

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA
TRANSFERENCIA DE CALOR CON EL USO DE
TEJA EN TECHOS DE VIGUETA Y BOVEDILLA**

POR

ING. BRIZET GUADALUPE VERA BELTRÁN

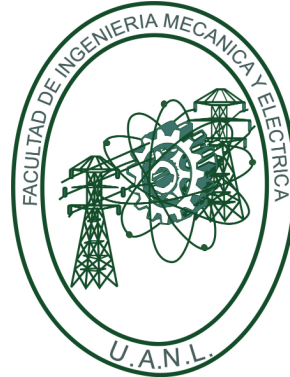
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

OCTUBRE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA
TRANSFERENCIA DE CALOR CON EL USO DE
TEJA EN TECHOS DE VIGUETA Y BOVEDILLA**

POR

ING. BRIZET GUADALUPE VERA BELTRÁN

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

OCTUBRE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Evaluación del impacto en la transferencia de calor con el uso de teja en techos de vigueta y bovedilla”, realizada por la estudiante Brizet Guadalupe Vera Beltrán, con número de matrícula 1988543, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Evaluación de Tesis


Dr. Héctor Daniel García Lara
Director

Dr. Hugo Guadalupe Ramírez Hernández
Revisor

Dr. Santos Méndez Díaz
Revisor

M.C. Miguel García Yera
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 3948

Ciudad Universitaria, a 12 de Octubre de 2021.

"Se le recordará por las reglas que rompan."

General Douglas MacArthur

AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar que este es el capítulo que contiene más mi esencia que todo el trabajo mostrado, primeramente quiero agradecer al universo y a Dios que me han permitido concluir al fin con este logro más en mi vida. También quiero agradecer infinitamente a mi padre Juan Vera Alarcón que se que desde allá en el cielo está guiandome y cuidandome diariamente.

Agradezco también a mi mamá y a mi hermana, a toda mi familia por todo su apoyo mientras curse esta maestría.

Estos dos años fueron sin duda una de las mejores épocas de enseñanza en mi vida, agradezco tanto a cada uno de los amigos que pude conocer aquí y siendo un ambiente tan multicultural, aprendí infinidad de cosas y también sembraron una gran curiosidad de seguir conociendo el mundo.

Extrañaré muchísimo todos los momentos a su lado, sus enseñanzas, las horas de comida, las tardes de café, las celebraciones, las frustraciones y cada uno de sus consejos los llevo en el corazón. Gracias a los mayores Damián, Ulises, Roshi, Mayra y Fer; gracias a Vane y a Alan, gracias al gran Odlan y a mi buen amigo Mario y a los más pequeños Martitha, Fer, Joaquín, Mary, JC y Diego. Y sobre todo gracias a Jorge y a mi mejor amiga Nory.

Agradezco muchísimo a mis amigos y compañeros todo el apoyo que me brindaron para construir las casitas, sé que fue desgastante tanto físicamente como mentalmente, pero ¡LO LOGRAMOS! y si lo logramos por que fue un trabajo de todos.

Por otra parte agradezco a los maestros que si lograron aportarnos conocimientos y apoyo durante este largo camino, gracias al Dr.Héctor, Dr.Santos, Dr.Arturo, Dr.Hugo y al M.C.Rúa.

En estos momentos me siento tan afortunada de todo lo que viví y aprendí, que quisiera alentar a las futuras generaciones a seguir esforzandose y luchando por sus sueños, que generen proyectos que aporten algo útil a la sociedad y que no permitan que nadie les obstaculize el lograr sus objetivos. En ocasiones existe gente que se ha quedado estancada tanto tiempo que su mentalidad ya no logra progresar suelen ser tan cuadrados y caer en la monotonía que no les permite innovar, tener esa curiosidad de poder crear cosas nuevas que pueden resultar siendo exitosas y más con la mentoría de estas mismas personas, porque sé que tienen demasiados conocimientos pero deberían de afrontar sus miedos y arriesgarse, aprovechar a estas personas que desbordan curiosidad, actitud y perseverancia y así lograr enormes proyectos novedosos más allá de solo ver el signo de \$ en los trabajos desarrollados, si no ver en ellos oportunidades para mejorar está sociedad.

Gracias a todos fue un placer coincidir con ustedes en esta vida, me llevo una parte de ustedes conmigo ya sean experiencias buenas o malas; pero de todo se aprende en esta vida como de que no.

”Éxito y la mejor de las vibras para todos ustedes.”

Con esto me despido, muchas gracias a CONACYT y a la empresa Ladrillera Mecanizada por el apoyo económico y en especie para la realización de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Nomenclatura	xvii
Resumen	xxi
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Hipótesis	9
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Planteamiento del problema	11
2. Estado del arte	12
2.1. Uso de materiales aislantes en viviendas	13
2.2. Evolución de estudios experimentales de rendimiento térmico de techos con teja	15

2.3. Transformación de las metodologías empleadas para el cálculo térmico de edificaciones	26
3. Marco conceptual	29
3.1. Transferencia de calor	30
3.2. Tipos de transferencia de calor	30
3.2.1. Conducción	30
3.2.2. Convección	32
3.2.3. Radiación térmica	33
3.3. Resistencia térmica	35
3.4. Radiación solar	37
3.5. Transmisión de calor en viviendas	39
4. Metodología	41
4.1. Metodología general	42
4.1.1. Metodología experimental	43
4.1.2. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor combinado	46
4.1.3. Procesamiento de la radiación	49
4.2. Método numérico	52
4.2.1. Datos de la locación y meteorológicos	52
4.2.2. Geometría del recinto	52
4.2.3. Propiedades de la envolvente	52

5. Resultados	55
5.1. Resultados de experimentación para la comprobación del funcionamiento de la instalación experimental	56
5.2. Comparación de resultados de temperaturas entre la experimentación y la simulación	61
5.3. Comparación de resultados entre recinto sin teja y recinto con teja . .	67
5.4. Impacto anual de capa de teja en recinto con sistema de refrigeración	73
6. Conclusiones	75
6.1. Conclusiones	76
Referencias	77

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Consumo energético del sector residencial en México del año 2015 al 2019.[1]	3
1.2. Consumo de energía total por sector en México en el año 2019.[1]	3
1.3. Consumo de energía mundial por sector en el año 2018.[2]	4
1.4. Porcentaje de viviendas que cuentan con un equipo o más y número de equipos existentes de aire acondicionado, por región climática[3]	5
1.5. Porcentaje de casa habitación en las que se utilizan sistemas de calefacción por región climática.[3]	6
1.6. Porcentaje de viviendas particulares habitadas con aislamiento por región climática.[3]	6
1.7. Porcentaje de tipo de aislamiento en viviendas particulares habitadas.[3]	7
2.1. Emisiones de CO_2 en México.[5, 6]	13
2.2. Representación de aislamiento, ventilación y reflectividad en techo de tejas	16
2.3. Instalación experimental de Miller y Karagiozis.[11]	16

2.4. Resultados de diferencia de flujo de calor en techos con diferentes revestimientos y ventilación.[11]	17
2.5. Instalación experimental de Levinson y Akbari.[12]	18
2.6. Resultados de reducción de temperatura a razón de la insolación absorbida.[12]	18
2.7. Comparativa de flujos de calor durante un día.[10]	19
2.8. Comparación de temperaturas y flujo de calor variando temperatura, ángulo de la cavidad y ventilación.[13]	19
2.9. Instalación experimental de Orazio, Di Perna y DiGiuseppe.[14]	20
2.10. Registro de temperaturas registradas en ambiente interior de las superficies internas de cada configuración de techo.[14]	20
2.11. Instalación experimental de Takebayashi .[15]	21
2.12. Comparación de flujos de calor através de techo variando valores de reflectancia.[15]	21
2.13. Ubicación de termopares y sensores de flujo en instalación experimental de Levinson.[16]	22
2.14. Instalación experimental de Pisello, Rossi y Cotana.[18]	22
2.15. Temperaturas registradas en la superficie de techo de ambas viviendas.[18]	23
2.16. Instalación experimental de Lil y Zhao.[20]	24
2.17. Comparaciones de temperaturas registradas en las 5 configuraciones de tejas de arcilla con cáscara de arroz.[21]	25
2.18. Comparaciones de temperaturas registradas en las 5 configuraciones de tejas de arcilla con lodo cerámico.[22]	25

3.1. Conducción de calor por medio de una superficie plana de espesor Δx y área A	31
3.2. Diagrama de transferencia de calor por medio de convección	32
3.3. Absorción incidente sobre una superficie opaca	34
3.4. Transferencia de calor en una superficie plana. Distribución de temperatura y circuito de resistencias térmicas	36
3.5. Radiación difusa y directa que se proyecta sobre el plano terrestre. . .	38
3.6. Transferencia de calor en una pared	40
4.1. Mapa de clima en Nuevo León y localización del área referenciada. . .	42
4.2. Ubicación y orientación de instalación experimental.	43
4.3. Dimensiones del recinto	44
4.4. Materiales de la envolvente	44
4.5. Casos de los techos a evaluar	45
4.6. Diagrama de instrumentación	45
4.7. Sistema de refrigeración	46
5.1. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 1 en ambos recintos	56
5.2. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 2 en ambos recintos	56
5.3. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 3 en ambos recintos	57

5.4. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 4 en ambos recintos	57
5.5. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 1 en ambos recintos	58
5.6. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 2 en ambos recintos	58
5.7. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 3 en ambos recintos	58
5.8. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 4 en ambos recintos	59
5.9. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de techo en ambos recintos	59
5.10. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de techo en ambos recintos	59
5.11. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de techo en ambos recintos	60
5.12. Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de piso en ambos recintos	60
5.13. Temperaturas registradas por 72 horas en ambiente interior en ambos recintos	60
5.14. Condiciones ambientales del 06 al 08 de Febrero	61
5.15. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas re- gistradas durante 72 horas en pared exterior 1	62

5.16. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 2	62
5.17. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 3	63
5.18. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 4	63
5.19. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 1	64
5.20. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 2	64
5.21. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 3	64
5.22. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 4	65
5.23. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en techo exterior	65
5.24. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en techo interior	66
5.25. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en piso	67
5.26. Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en ambiente interior	67
5.27. Temperaturas de techo interior registradas del 09 al 15 de Abril del 2021	68

5.28. Temperaturas de ambiente interior registradas del 09 al 15 de Abril del 2021	68
5.29. Diferencia de temperaturas de techo interior entre recinto sin teja y con teja	69
5.30. Diferencia de temperaturas de ambiente interior entre recinto sin teja y con teja	69
5.31. Condiciones ambientales de Abril	70
5.32. Temperaturas calculadas en un período de 168 horas en superficie exterior de techo en ambos recintos	70
5.33. Temperaturas calculadas en un período de 168 horas en superficie interior de techo en ambos recintos	71
5.34. Temperaturas calculadas en un período de 168 horas en el ambiente interior en ambos recintos	71
5.35. Diferencia de temperatura de superficie interior y exterior del techo entre recintos	72
5.36. Diferencia de temperatura de ambiente interior entre recintos	72
5.37. Diferencia entre temperatura techo interior y ambiente interior entre recintos	73
5.38. Diferencia entre temperatura techo interior y ambiente interior entre recintos	74
5.39. Diferencia entre temperatura techo interior y ambiente interior entre recintos	74

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Consumo de energía por sectores en el año 2019.[1]	2
4.1. Correlaciones para calcular la proporción de radiación difusa basado en el modelo de Reindl.	49
4.2. Datos de localización y meteorológicos	53
4.3. Propiedades de la envolvente	54
5.1. Resultados obtenidos de temperaturas medias en superficies externas del recinto	63
5.2. Resultados obtenidos de temperaturas medias en superficies internas del recinto	65
5.3. Resultados obtenidos de temperaturas medias en superficies exterior e interior del techo	66
5.4. Resultados obtenidos de temperaturas medias en piso y ambiente in- terior	66

NOMENCLATURA

α	Absortividad	[-]
β	Coefficiente de expansión volumétrica	[1/K]
ε	Emisividad	[-]
ν	Viscosidad cinemática	[m ² /s]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² K ⁴]
θ	Ángulo de incidencia de la radiación solar directa	[°]
A	Área de la superficie	[m ²]
A_i	Índice de anisotropía	[-]
c_p	Calor específico	[J/kgK]

d	Fracción de radiación difusa	[-]
f	Factor de modulación	[-]
g	Gravedad	$[m/s^2]$
G_{dif}	Radiación solar difusa	$[W/m^2]$
G_{dir}	Radiación solar directa	$[W/m^2]$
G_{on}	Constante solar	$[W/m^2]$
G_{sc}	Radiación solar global horizontal	$[W/m^2]$
G_{total}	Radiación solar global horizontal	$[W/m^2]$
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección	$[W/m^2K]$
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación	$[W/m^2K]$
$h_{combinado}$	Coefficiente de transferencia de calor combinado (convección y radiación)	$[W/m^2K]$
H_0	Radiación solar extraterrestre	$[W/m^2K]$
k	Conductividad térmica	$[W/mK]$
k_t	Índice de claridad	[-]
n	Número del día del año	[-]

L	Espesor	[m]
L_c	Longitud característica	[m]
Nu	Número de Nusselt	[-]
P	Perímetro	[m]
Pr	Número de Prandtl	[-]
q	Tasa de transferencia de calor	[W]
$\dot{Q}_{absorbida}$	Calor de radiación absorbido por la superficie	[W]
$\dot{Q}_{incidente}$	Calor de radiación que incide sobre la superficie	[W]
$\dot{Q}_{conducción}$	Razón de transferencia de calor por conducción	[W]
$\dot{Q}_{convección}$	Razón de transferencia de calor por convección	[W]
$\dot{Q}_{radiación}$	Razón de transferencia de calor por convección	[W]
\dot{Q}_{total}	Razón de transferencia de calor total	[W]
R_b	Factor geométrico	[-]
Ra	Número de Rayleigh	[-]
$R_{t,cond}$	Resistencia térmica total por conducción	[m ² °C/W]

$R_{t,conv}$	Resistencia térmica total por convección	$[m^2\text{°C}/W]$
$R_{t,rad}$	Resistencia térmica total radiación	$[m^2\text{°C}/W]$
R_{total}	Resistencia térmica total	$[m^2\text{°C}/W]$
t	tiempo	[hrs]
T	Temperatura	[°C,K]
x	Dirección de transferencia de calor	[m]

Subíndices

∞	Condiciones ambientales
ext	Exterior
int	Interior
net	Neto
s	Superficie

RESUMEN

Debido al incremento que se presenta año con año en el gasto de energía eléctrica residencial para mejorar el confort térmico, diversas compañías y organizaciones han optado por desarrollar e invertir en materiales aislantes térmicos para la estructura de las viviendas, al ser un método económico y sustentable, se ha convertido en el más importante en los últimos años.

El aislante térmico integrado en una estructura de vivienda evita la ganancia o pérdida de calor hacia el interior, esto genera una disminución energética dentro de un 50 al 80 %, basado en la zona climática donde se encuentre ubicada la vivienda. La vivienda consta de diferentes partes como techo, paredes y ventanas; siendo el techo el punto de atención más importante debido a que cuenta con un gran área mayormente sometida a la radiación solar la cual genera mayor transmisión de calor al interior de la vivienda.

En este trabajo se realizó el análisis de la capacidad de aislar térmicamente con un revestimiento de tejas de barro 100 % natural en comparación con un techo simple de vigueta y bovedilla. Este análisis se evaluó por medio de una instalación experimental compuesta por dos recintos que contaban con las mismas características variando únicamente el techo; siendo el primer recinto un techo de vigueta y bovedilla simple y el segundo un techo de vigueta y bovedilla con una capa de tejas adicional sobre él. Adicionalmente se evaluó el desempeño térmico por medio de una simulación computacional realizada en un código FORTRAN.

La metodología se compone de diferentes etapas, iniciando por la construcción

e instrumentación de los recintos, posteriormente la instalación experimental fue monitoreada y registro datos de temperaturas de las superficies del recinto en lapsos de tiempo periódicos de 6 días por 24 horas, finalmente en base a los días registrados se realizó la simulación computacional con los datos meteorológicos adquiridos de una estación meteorológica cercana.

Con los resultados conseguidos tanto de manera experimental como de simulación computacional, se determinó si la capa de teja beneficia térmicamente a las viviendas manteniendo la temperatura del interior en condiciones favorables sin importar el clima externo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En esta sección se expone los factores que propiciaron la elaboración de este trabajo desde un panorama mundial y nacional, basandose en el alto consumo de energía utilizada para el confort térmico. Además se presenta el planteamiento general de esta investigación, conformado por la hipótesis, objetivo general y objetivos específicos.

1.1 MOTIVACIÓN

La demanda energética incrementa año con año, lo cual es un aspecto de gran importancia para el progreso social y económico, esto impulsa las actividades productivas del país y propicia un aumento en la calidad de vida de las familias mexicanas. La apertura de mercados energéticos en nuestro país, sumado al multilateralismo y a la cooperación internacional que practica México en materia de energía, representa un desafío para las instituciones nacionales, pues éstas, encabezadas por la Secretaría de Energía (SENER), tienen el compromiso de reportar estadísticas alineadas con los estándares internacionales que dictan la Agencia Internacional de Energía (IEA) y otros organismos internacionales.

De acuerdo al histórico del Balance Nacional de Energía de la SENER, se obtienen los datos de consumo de energía por sector del año 2019, mostrados en la Tabla 1.1. Se muestra en la Figura 1.1 que en México el sector residencial presenta variaciones en el consumo pero tiende a tener mayor cantidad de aumento que reducciones; además ocupa el tercer lugar del consumo total de energía, como se señala en la Figura 1.2.[1]

Sector	Energía consumida en GWh (Gigawatts/hora)
Transporte	563,068.28
Industrial	441,515.00
Residencial	208,037.77
Agropecuario	53,303.89
Comercial	47,416.66
Público	9,153.056
Consumo energético total	1,347,658.33

Tabla 1.1: Consumo de energía por sectores en el año 2019.[1]

De acuerdo, con la base de datos registrados por la IEA del 2018; el consumo

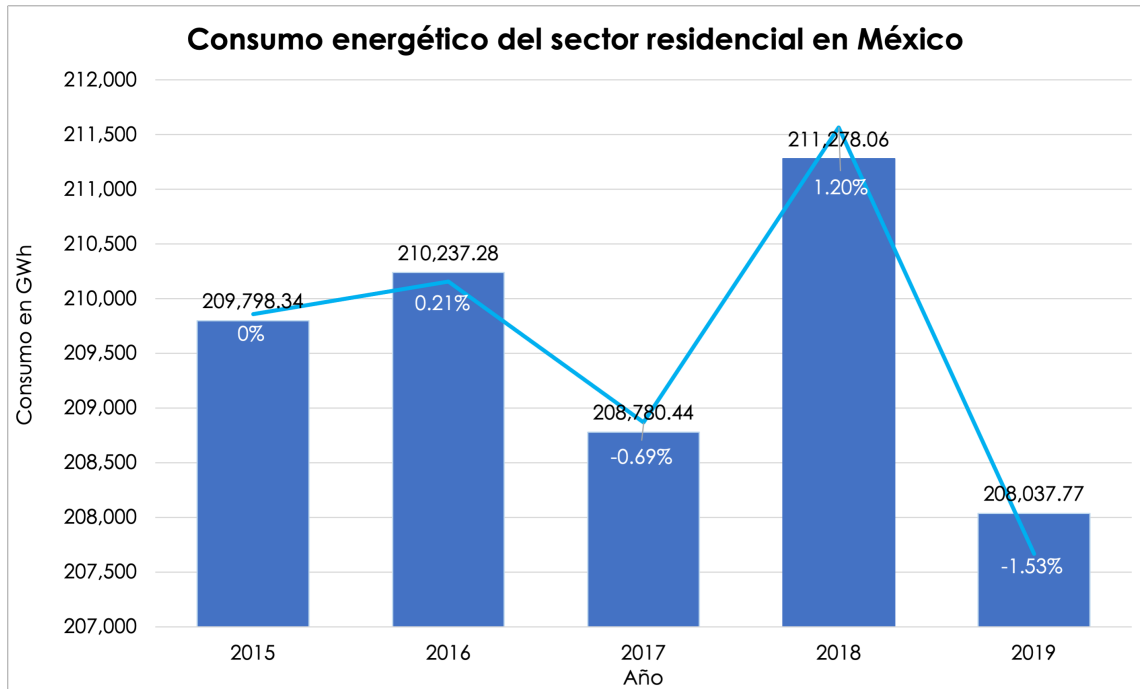


Figura 1.1: Consumo energético del sector residencial en México del año 2015 al 2019.[1]

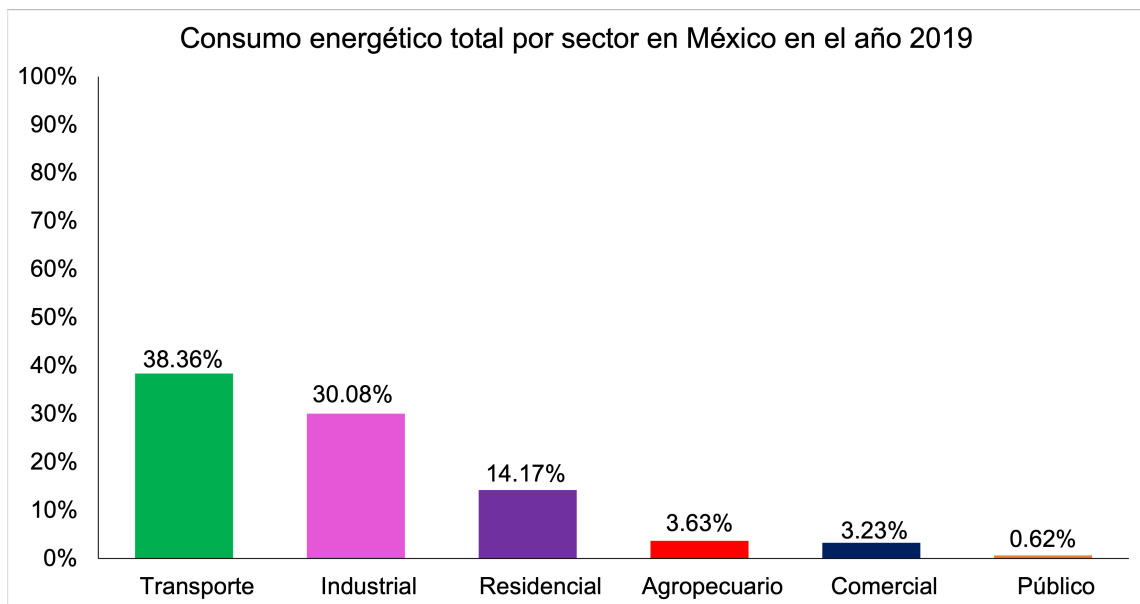


Figura 1.2: Consumo de energía total por sector en México en el año 2019.[1]

energético en el sector residencial corresponde a una cuarta parte del gasto final de energía total mundial como se observa en la Figura 1.3; el cual se integra por

aquellas actividades en las viviendas tales como: iluminación, cocción de alimentos, uso de aparatos electrodomésticos, calentamiento de agua, refrigeración, enfriamiento y calefacción de espacios.[2]

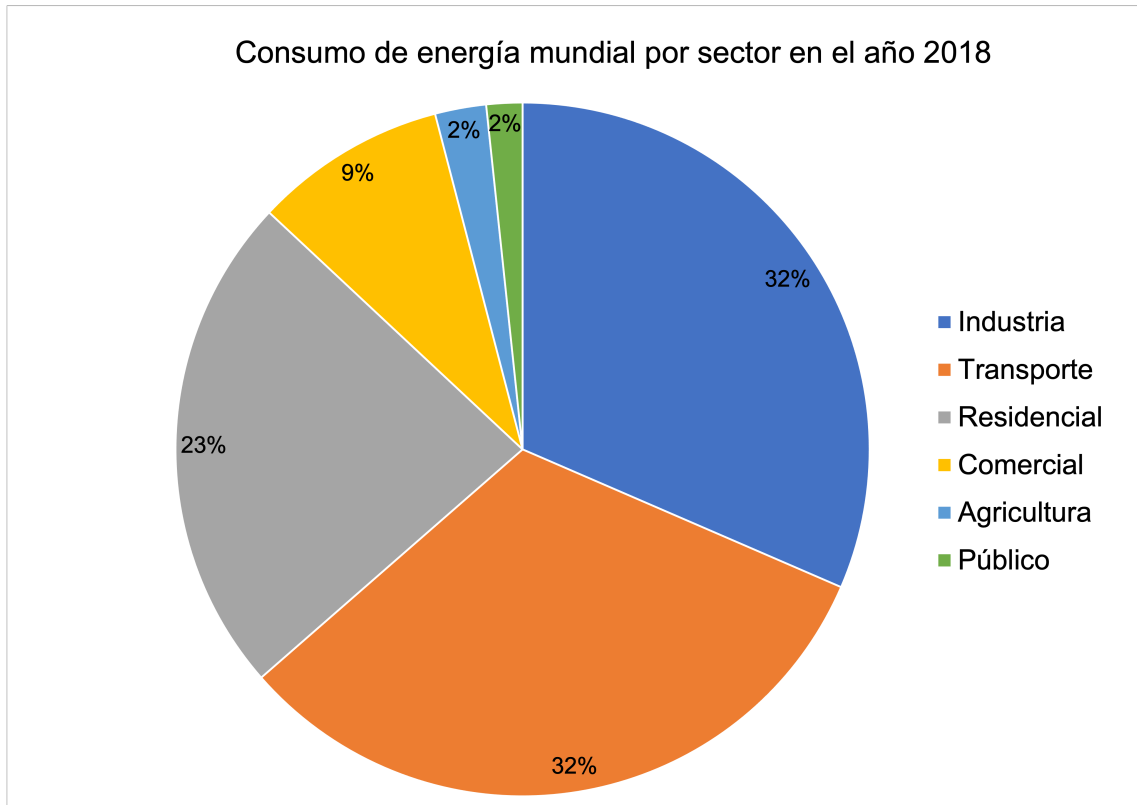


Figura 1.3: Consumo de energía mundial por sector en el año 2018.[2]

Con base en la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en conjunto con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la SENER; al año los desarrolladores de vivienda construyen en México alrededor de 225 mil viviendas en regiones de clima cálido. Estas viviendas duplican o hasta quintuplican los consumos promedio de electricidad, en comparación con las viviendas ubicadas en regiones de clima templado, por su alta necesidad de contar con comodidad térmica en el ambiente interno de su vivienda. Esto genera un mayor gasto en el aspecto financiero de las familias que residen en estas regiones cálidas, debido a que el obtener confort térmico les permite poseer

una mejor calidad de vida.

Basado en la información anterior, se estima que en la época de verano ocurre la demanda máxima de energía eléctrica, es decir durante los meses de mayo y septiembre, cuando en las zonas nortes del país se presenta temperaturas más elevadas o calor. Originado de ello, aumenta el uso de los sistemas de enfriamiento de espacios para mantener una temperatura estable de confort para los habitantes como se muestra en la Figura 1.4; y durante el invierno, debido a las temperaturas bajas extremas en la región norte del país se presenta un gran porcentaje de viviendas que utilizan aparatos de calefacción como se señala en la Figura 1.5.[3]



Figura 1.4: Porcentaje de viviendas que cuentan con un equipo o más y número de equipos existentes de aire acondicionado, por región climática[3]

Algunas de las técnicas económicas y sustentables más fomentadas por el Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) y el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT) dentro de sus proyectos de vivienda, es la instalación de aislamiento térmico y un acristalamiento adecuado en las construcciones, lo cual permite un ahorro energético que va del 50 % al 80 % , y a su vez disminuye el gasto económico, al reducir los gastos de energía eléctrica generados por la utilización de equipos de climatización o calefacción. En la Figura 1.6 se señala la distribución porcentual de viviendas particulares con algún tipo de aislamiento térmico por región climática y en la Figura 1.7 se observa la fracción por tipo de ais-

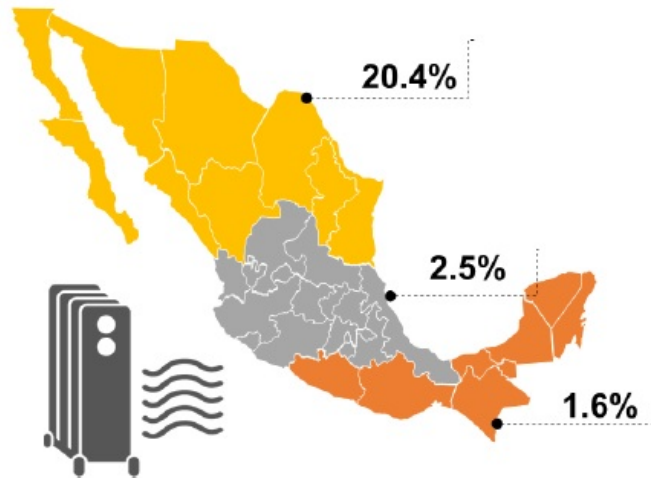


Figura 1.5: Porcentaje de casa habitación en las que se utilizan sistemas de calefacción por región climática.[3]

lamiento en viviendas particulares habitadas de las cuales tienen colocado materiales aislantes en techos, paredes y ventanas.[3]

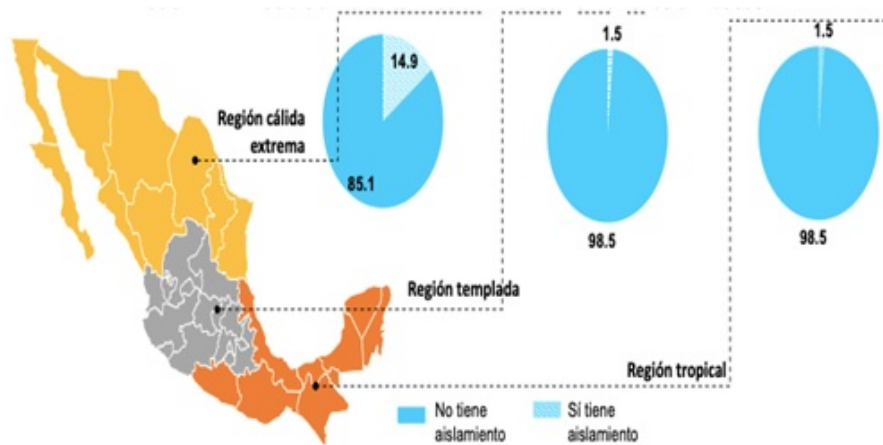


Figura 1.6: Porcentaje de viviendas particulares habitadas con aislamiento por región climática.[3]

Este sistema de construcción se lleva a cabo bajo las siguientes normas que se encuentran en vigor en México: [4]

- NMX-C-460-ONNCCE-2009-Industria de la construcción aislamiento térmico valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica, para la República

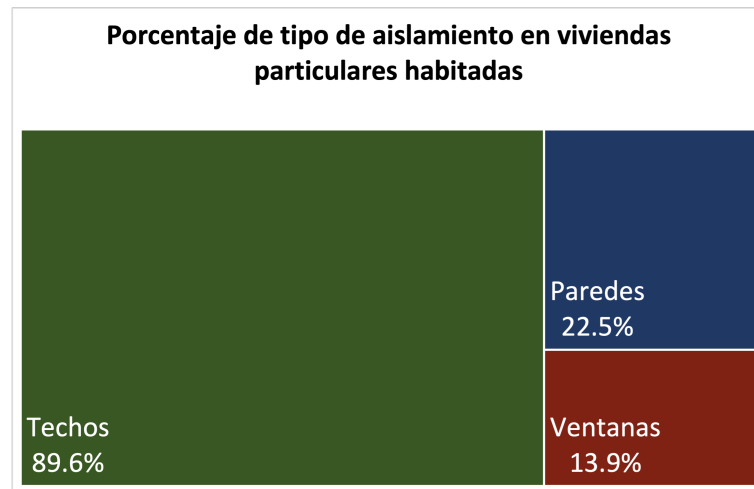


Figura 1.7: Porcentaje de tipo de aislamiento en viviendas particulares habitadas.[3]

Mexicana especificaciones y verificación.

- NOM-018-ENER-2011-Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba.
- NOM-020-ENER-2011-Eficiencia energética en edificaciones, Envoltorio de edificios para uso habitacional.
- NOM-024-ENER-2012-Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones. Etiquetado y métodos de prueba.

Es de gran importancia poder evaluar estas recomendaciones al momento de diseñar edificaciones, funcionando como herramientas los programas de simulación de desempeño térmico de viviendas nos dan la oportunidad de implementar diferentes modelos más consisos que imiten las características de entrada y de salida de la forma más realista. Por ejemplo, basandose en las condiciones climatológicas de un sitio, un programa de simulación de viviendas elabora un prototipo de simulación que estima la temperatura interior variando el color de las paredes, la orientación de las ventanas, la altura del techo, la capacidad térmica de la envoltorio, las ganancias de calor internas, como por ejemplo el horario de ocupación, el número de ocupantes, la apertura de puertas y ventanas, etcétera; esto permite estimar la temperatura

interior de confort requerida sin la necesidad de recurrir a complicadas y costosas instalaciones experimentales.

1.2 HIPÓTESIS

El uso de tejas en techos de vigueta y bovedilla disminuye la transmisión de calor del exterior hacia interior del recinto, lo cual reduce el uso de sistemas de enfriamiento para mantener el confort térmico, generando una disminución en el consumo energético. Por medio del código computacional es posible conocer las cargas térmicas existentes que tendría este sistema y realizar una comparación con un sistema que únicamente utiliza techo de vigueta y bovedilla. Los resultados obtenidos se compararán con una validación experimental de ambos casos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

El propósito principal de esta investigación es evaluar el desempeño térmico de techos de vigueta y bovedilla incorporando una cubierta de tejas en recintos que operan únicamente por medios pasivos (por ejemplo, aislantes térmicos, o que operan con equipos de climatización, por medio de un código computacional que simula procesos de transferencia de calor, además se realizará la validación experimental del código.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adaptar el código computacional a los parámetros de diseño de los componentes implementados en la instalación experimental.
- Aplicar la metodología de la experimentación con el código para realizar las simulaciones.
- Diseñar, construir e instrumentar una instalación experimental para obtener mediciones en distintos puntos de la instalación para la validación del código.
- Validar el código por medio de las mediciones de temperatura, junto con mediciones de radiación y temperatura ambiente como datos de entrada en el código y comparar los resultados de la simulación con las mediciones experimentales de la temperatura en los distintos puntos de la instalación por medio de porcentajes de error.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El consumo energético por el uso de sistemas de enfriamiento domésticos incrementa día con día, lo cual genera un alto consumo eléctrico y mayor contaminación. En este trabajo se pretende determinar por medio de simulación computacional y validación experimental, cuál es el impacto que tiene en la transferencia de calor el uso de tejas en techos de vigueta y bovedilla, y de esta manera saber si se obtiene un mejor desempeño térmico que en una losa común y por lo tanto un mayor ahorro energético.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este apartado se expone una breve recapitulación los artículos que presentan trabajos previos realizados en el área de esta investigación.

2.1 USO DE MATERIALES AISLANTES EN VIVIENDAS

Debido a la alta demanda por los usuarios de un ambiente interior de confort en las viviendas, se considera que el ámbito residencial tiende a realizar un mayor consumo de energía. Aunado a esto, es importante disminuir el consumo de electricidad para aminorar las emisiones contaminantes, basado en los datos del Atlas de Emisiones de CO_2 de la Agencia Ambiental Internacional (IEA) los niveles de emisiones de CO_2 en México han incrementado en los últimos años como se grafica en la Figura 2.1.[5, 6]

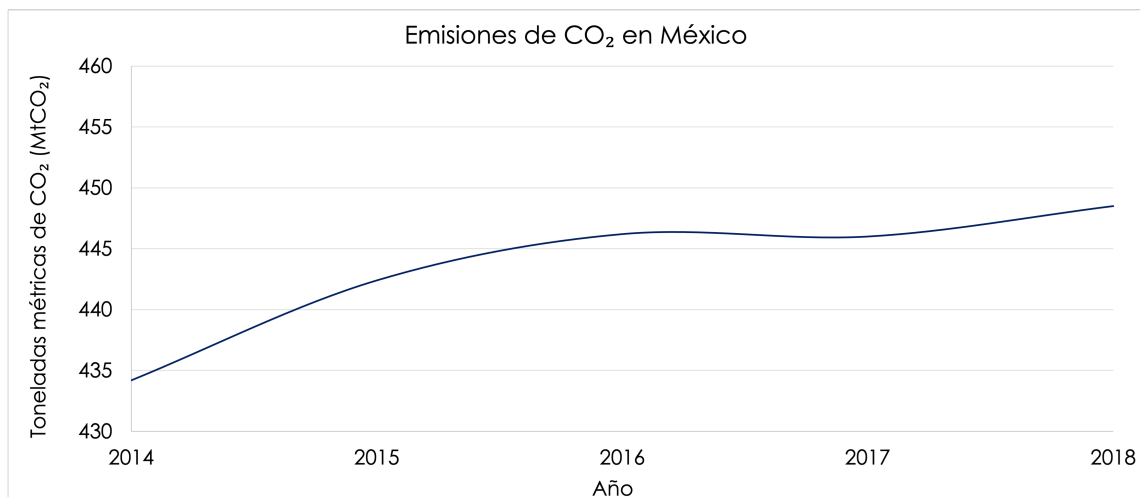


Figura 2.1: Emisiones de CO_2 en México.[5, 6]

El aislamiento en viviendas es una técnica sencilla, de la cual se puede obtener una alta eficiencia energética que puede ser aplicada en el ámbito industrial, comercial o residencial. Los aislantes térmicos están compuestos por un material o combinación de materiales los cuales pueden ser de origen orgánico, inorgánico o membranas metálicas reflejantes; estos materiales son caracterizados por un alta resistencia térmica, esto permite reducir la circulación de calor por medio de conducción, convección o radiación. Los aislantes térmicos guardan la energía en el interior, provocando que se requiera menos energía para conservar la temperatura de confort durante el verano y de igual manera poder conservar el calor durante el invierno. Los

materiales aislantes se fabrican de diferentes formas como el relleno suelto, manta enrollada, placa rígida, espuma o forma reflejante; la elección del tipo y la forma de los materiales aislantes varía de acuerdo a su aplicación y a las características físicas, térmicas y de otro tipo de los materiales. La selección de un buen material de aislamiento es necesaria para disminuir el consumo de energía, las propiedades térmicas de la envolvente se determinan por las características térmicas de los materiales empleados para la construcción caracterizada por su capacidad de absorber o emitir calor solar.[7]

El usar aislamientos térmicos en las viviendas nos ofrece las siguientes ventajas:

- Reduce la dependencia a los sistemas de calefacción y enfriamiento para conseguir un ambiente confortable.
- Reduce el costo del uso de la energía eléctrica, debido a que reduce el uso de los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado.
- Favorece al medio ambiente, ya que reduce las emisiones contaminantes ocasionadas por los sistemas de calefacción y enfriamiento, debido la reducción del uso de los mismos.
- Otorga un confort acústico, reduciendo los niveles de ruido provenientes del exterior.
- Ayuda a conservar la integridad de la estructura de la vivienda, debido a que mantiene mínimas fluctuaciones de temperatura lo cual evita movimientos térmicos no deseados.
- Evita la penetración de humedad a la vivienda.
- Algunos aislantes ayudan a retardar el calor y evitar la inmigración de las llamas en la vivienda en caso de incendio.

2.2 EVOLUCIÓN DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE RENDIMIENTO TÉRMICO DE TECHOS CON TEJA

La predicción del rendimiento energético de las estructuras y los componentes del edificio es una tarea difícil; las condiciones climáticas, los detalles de construcción y el uso doméstico del edificio juegan un papel importante.

En ciudades con climas cálidos, el calor obtenido por la radiación solar es el principal motivo de preocupación al momento de analizar el rendimiento térmico. Debido a que entre los componentes comunes del edificio, el techo genera una carga de calor significativa debido a su vasta área de superficie y la orientación que se enfrenta directamente al cielo expuesto totalmente a esta radiación solar. Por lo tanto, para mantener un ambiente térmico interior aceptable para los ocupantes se debe seleccionar un sistema de techo adecuado y controlando cuidadosamente sus propiedades térmicas.[8, 9]

Para mejorar el rendimiento energético es esencial: el aislamiento, la ventilación y la reflectividad, como se expone en el esquema de la Figura 2.2. La ventilación es una característica inherente del techo de tejas, esta ventilación formada por un espacio de aire entre la cara exterior del revestimiento del techo y la parte inferior de la cubierta del techo, y proporciona beneficios térmicos sobre la cubierta de techo hermética tradicional colocada directamente en la cubierta del techo. Como resultado, cualquier transferencia de calor de la irradiación solar es inicialmente absorbida por la masa térmica de las tejas y el calor es conducido a través de ellas, la ventilación expulsará parte del calor a la atmósfera. En consecuencia, hay una reducción significativa en la transmisión de calor al espacio vital.[10]

Existen varios estudios que han demostrado el rendimiento superior de un techo de tejas sobre un techo tradicional ligero y hermético, como los trabajos realizados en 2006 por Miller y Karagiozis et. al. [11] realizados en techos de áticos, variando

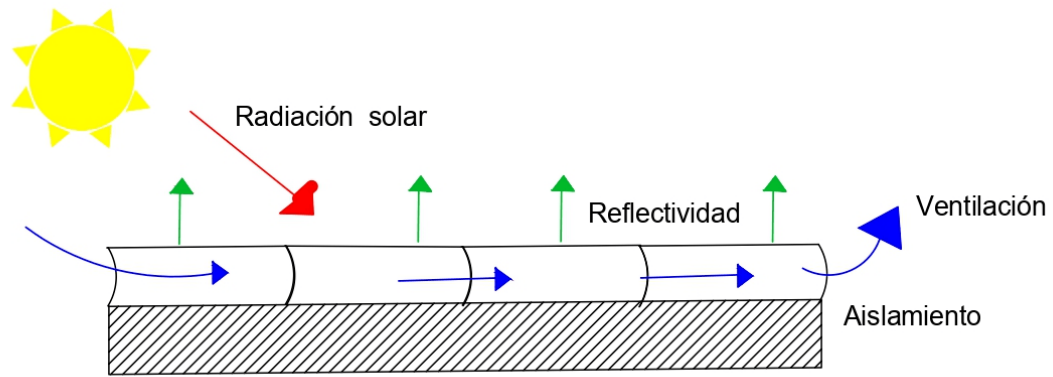


Figura 2.2: Representación de aislamiento, ventilación y reflectividad en techo de tejas

ventilación, revestimientos y pigmentación de tejas como se observa en su instalación experimental mostrada en la Figura 2.3, los resultados que obtuvieron demostraron una reducción del 30 % en la transferencia de calor, debido a la ventilación por encima del revestimiento. Los efectos combinados de la reflectancia solar y la ventilación por encima del revestimiento permitieron una reducción del 70 % en el flujo de calor que penetra el techo en el espacio acondicionado, estos resultados fueron representados en la gráfica de la Figura 2.4.



Figura 2.3: Instalación experimental de Miller y Karagiozis.[11]

Levinson y Akbari et. al. [12] caracterizaron el rendimiento térmico del revestimiento de 6 diferentes tejas, de las cuales solo se varía el color para modificar su reflectividad, empleando estas tejas construyeron las instalaciones experimentales

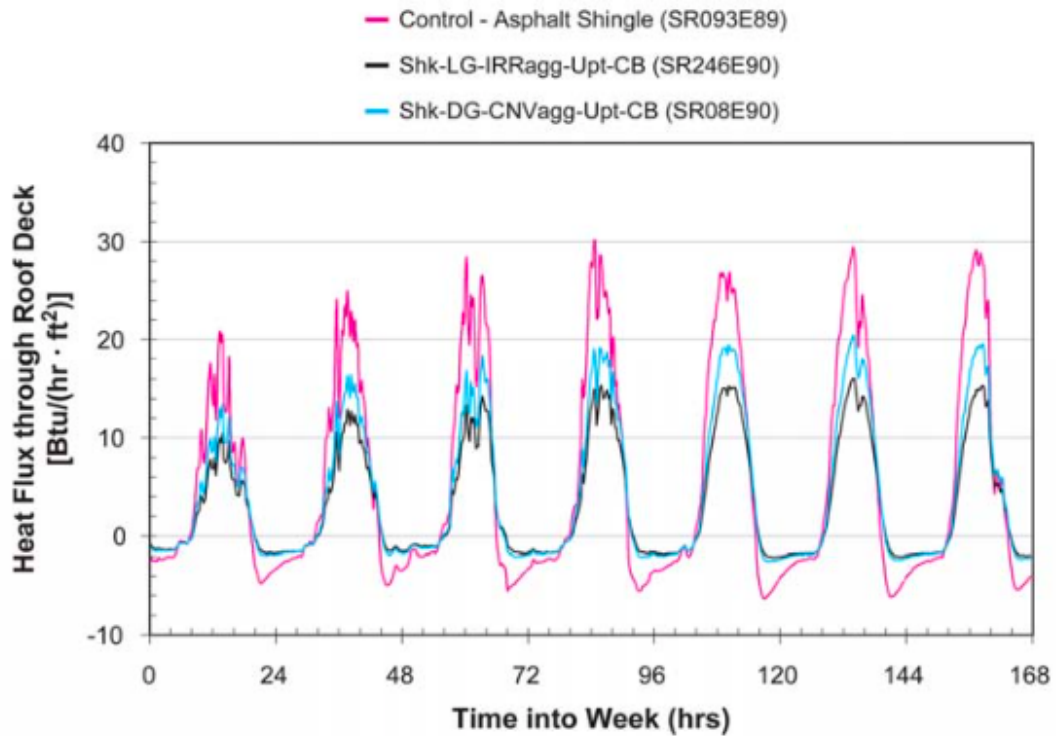


Figura 2.4: Resultados de diferencia de flujo de calor en techos con diferentes revestimientos y ventilación.[11]

mostradas en la Figura 2.5; de este estudio se obtiene que los revestimientos reducen la temperatura de la superficie de 5 a 14 °C y el flujo de calor disminuye entre un 13-21 %, como se muestra en las gráficas de resultados de la Figura 2.6 .

En el año 2008 los trabajos de De With et. al. [10] consistieron en cuantificar los beneficios de la masa térmica y la ventilación en construcciones de techos bien aisladas mediante simulación por computadora y su validación experimental, una sección de los resultados obtenidos se ven representados en la gráfica de la Figura 2.7 indican que la reducción en el flujo de calor medio es de hasta 16 % para un techo de tejas de asfalto con 30 % de reflectancia solar y que las construcciones de tejas ofrecen beneficios térmicos de hasta el 9 % durante los períodos más fríos cuando se debe retener el calor.

Yeo et. al.[13] en el 2009, realizaron la evaluación de la influencia de elementos



Figura 2.5: Instalación experimental de Levinson y Akbari.[12]

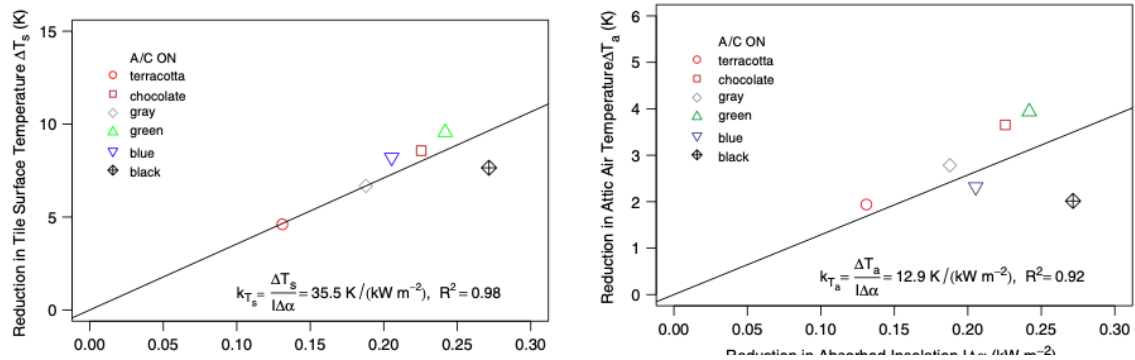


Figura 2.6: Resultados de reducción de temperatura a razón de la insolación absorbida.[12]

como el ángulo del techo, la intensidad de la radiación solar, la ventilación de la cavidad, la forma y el tamaño de la cavidad, así como los perfiles del panel, con el fin de poder aumentar el efecto del enfriamiento de la ventilación en las cavidades presentes en el techo; observando como resultado que al emplear una capa ventilada en el techo se evita la retención de calor y se puede reducir la carga de enfriamiento, también se demostró que mientras más inclinada es la pendiente del techo, menor es la temperatura de la cavidad, estos resultados fueron representados en las gráficas de la Figura 2.8.

En el 2010, Orazio, Di Perna y DiGiuseppe et. al. [14] realizaron experimentos

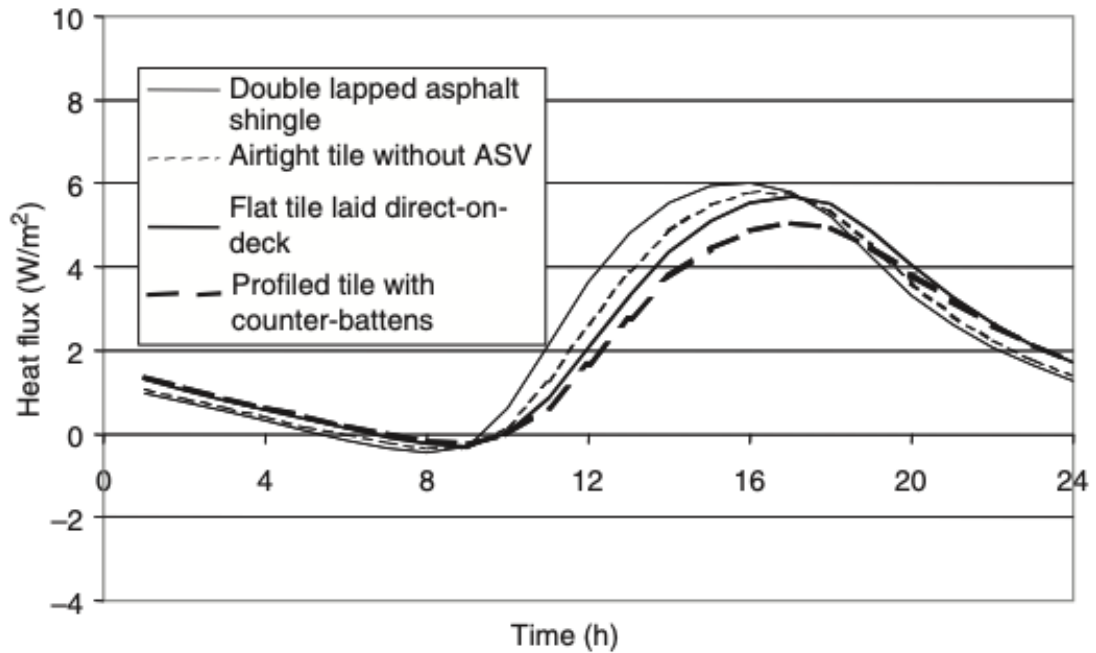


Figura 2.7: Comparativa de flujos de calor durante un día.[10]

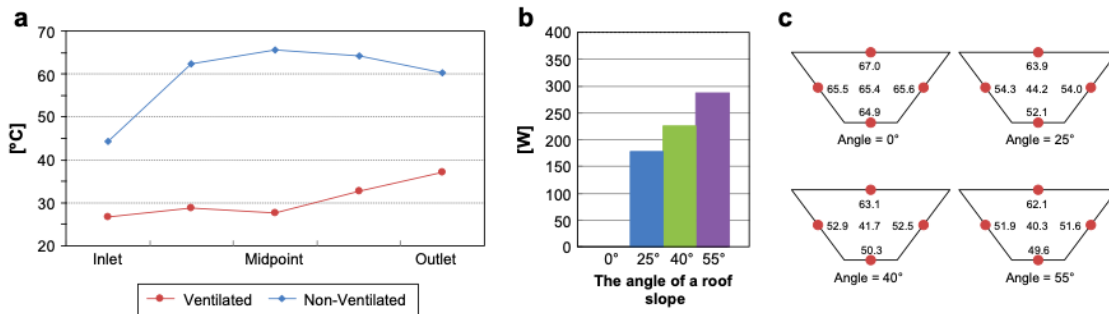


Figura 2.8: Comparación de temperaturas y flujo de calor variando temperatura, ángulo de la cavidad y ventilación.[13]

con 6 configuraciones diferentes de techos en la instalación experimental de la Figura 2.9 proponiendo diferentes capas de aislantes entre los cuales estaban un tablero de conglomerado, placa de abeto, tejas y ventilación. Comparando sus mediciones de temperatura entre todos los techados obtienen valores de temperatura la superficie interior muy similares los cuales fueron registrados como muestra la Figura 2.10, con una diferencia máxima de 1.5 °C.

En el año 2012, Takebayashi et. al. [15] examinaron el efecto de techo frío de un



Figura 2.9: Instalación experimental de Orazio, Di Perna y DiGiuseppe.[14]

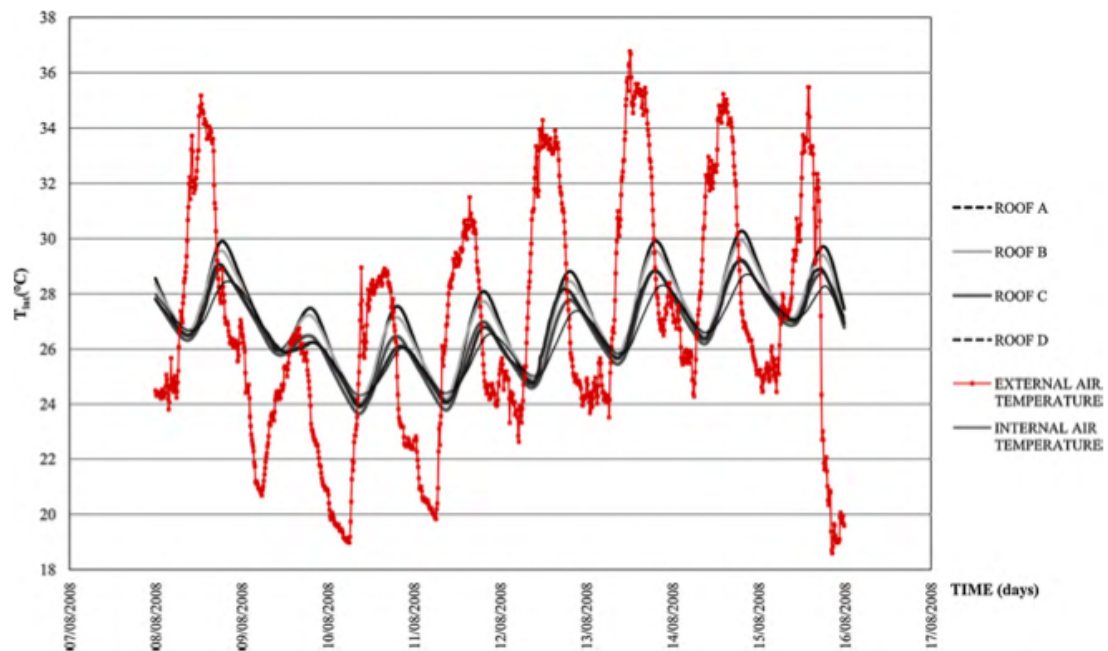


Figura 2.10: Registro de temperaturas registradas en ambiente interior de las superficies internas de cada configuración de techo.[14]

techo tradicional de tejas a través de la observación de su instalación experimental mostrada en la Figura 2.11 y el cálculo numérico de la estimación del calor superficial de una estructura típica de techo de tejas. Los resultados representados en la Figura 2.12 muestran que el cálculo del flujo de calor en el techo de tejas donde la reflectancia solar es 0.1 se muestran que más del 80% de la radiación neta absorbida por la superficie de la teja se libera como flujo de calor sensible en la atmósfera.



Figura 2.11: Instalación experimental de Takebayashi .[15]

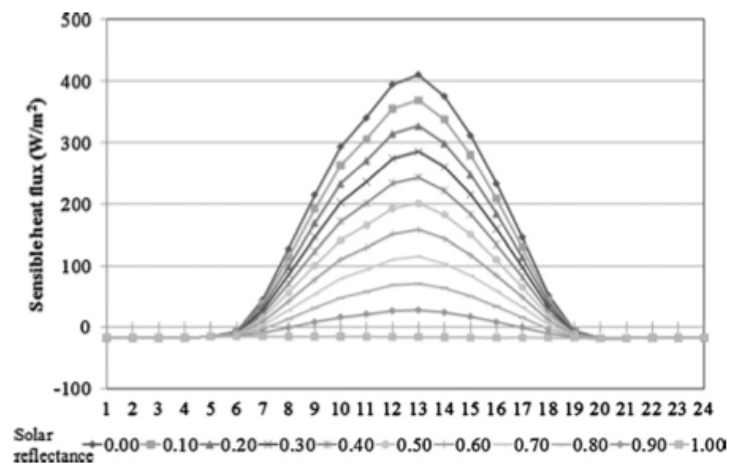


Figura 2.12: Comparación de flujos de calor a través de techo variando valores de reflectancia.[15]

Levinson et. al.[16] en el año 2014, realizaron un estudio donde se comparan dos casas unifamiliares de una sola planta en un clima cálido en el que los hogares utilizan aire acondicionado. La primera casa tiene un techo de tejas de asfalto oscuro estándar, y la segunda un techo de tejas de concreto reflectivo; se monitorea las temperaturas, los flujos de calor y el consumo de energía como se indica en el esquema de la Figura 2.13. En los resultados se observa que en la casa con tejas de concreto reflectivo se usó 26 % menos de energía de enfriamiento anual y 4 % menos de energía

de calefacción que en la vivienda con techo de tejas oscuras.

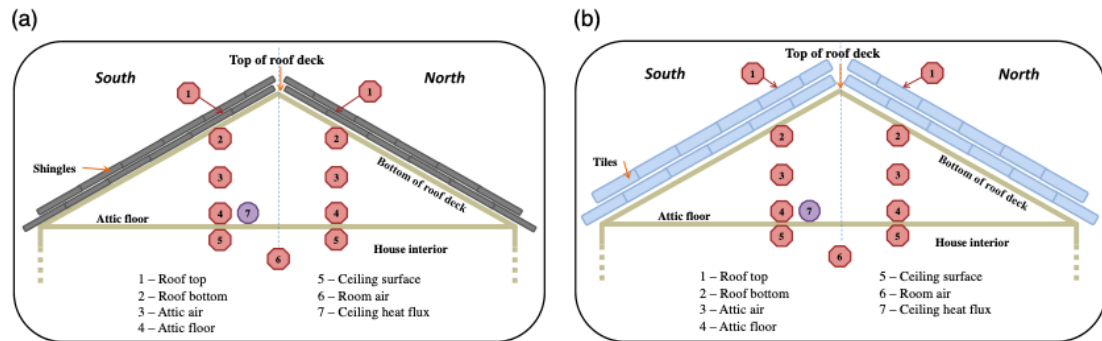


Figura 2.13: Ubicación de termopares y sensores de flujo en instalación experimental de Levinson.[16]

Por su parte Amornleetrakul y Puangsombut et. al. [17] investigaron los rendimientos térmicos y la disminución de la ganancia de calor de un nuevo diseño de tejas para techos denominados teja ventilada en comparación con las tejas de hormigón corrugado, el porcentaje de reducción de flujo de calor varió entre 10-70 %. En el mismo año Pisello, Rossi y Cotana et. al.[18] evaluaron el impacto en el comportamiento térmico en una vivienda italiana durante el invierno y el verano, comparando un techo de tejas con un techo de tejas pintado con un material reflectante en color blanco como se observa en la Figura 2.14; de este estudio obtienen que al aumentar la reflectividad aproximadamente a un 167 % se tiene una disminución de $3^{\circ}C$ en la temperatura del ambiente interior, estos resultados se representan en la gráfica de la Figura 2.15.



Figura 2.14: Instalación experimental de Pisello, Rossi y Cotana.[18]

Durante el año 2015, Muscio et. al. [19] realizaron un trabajo con el objetivo de

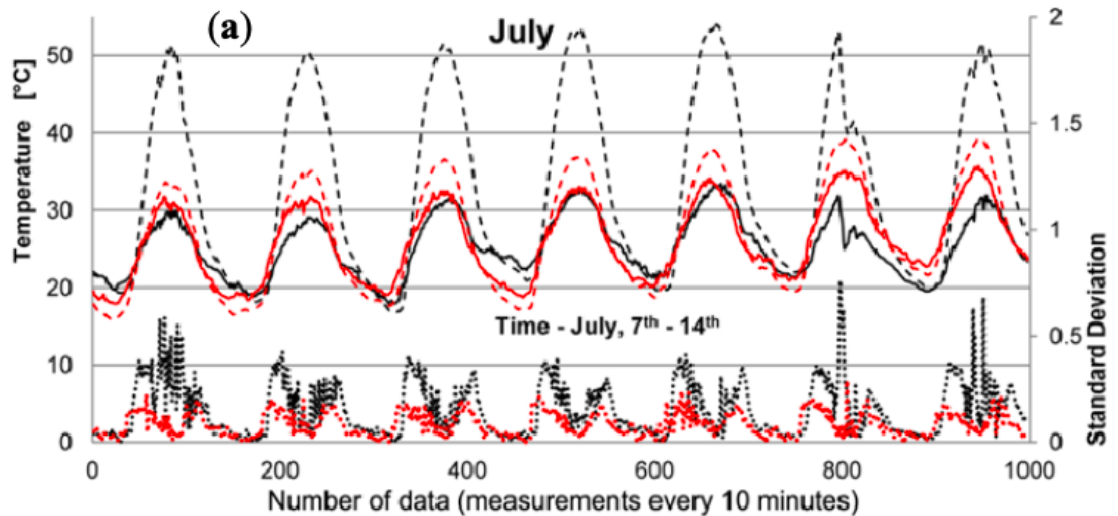


Figura 2.15: Temperaturas registradas en la superficie de techo de ambas viviendas.[18]

lograr tejas con alta capacidad de rechazar la radiación solar, se planteó una solución para obtener un aumento en el rendimiento energético representando un sistema acoplado hecho de una teja de color frío y una delgada capa aislante hecha por aerogel de sílice y una barrera radiante debajo. Los resultados logrados en condiciones de estado estacionario, mostraron que se puede obtener una mejoría notable en términos de rechazo de la ganancia de calor, reduciendo la temperatura debajo de la capa de baldosas pero al mismo tiempo promoviendo rechazo de calor hacia el cielo por radiación térmica.

Lil y Zhao et. al.[20] en el año 2017, evaluaron en su instalación experimental mostrada en la Figura 2.16 el rendimiento térmico de los techos de tejas negras de doble capa, investigando las distribuciones de temperatura de la superficie y las temperaturas interiores de las techos de tejas negras de una o de dos capas. Se presentaron diferencias notables en la ganancia y pérdida de calor de dos capas de tejas negras a diferencia de una sola capa, la ganancia de calor en la doble capa de tejas negras se redujó aproximadamente un 85% debido a la sombra de la primera capa y la ventilación. En consecuencia a la transferencia de calor por medio de convección y menor radiación de onda larga se logró aproximadamente el 55% en la

pérdida de calor.

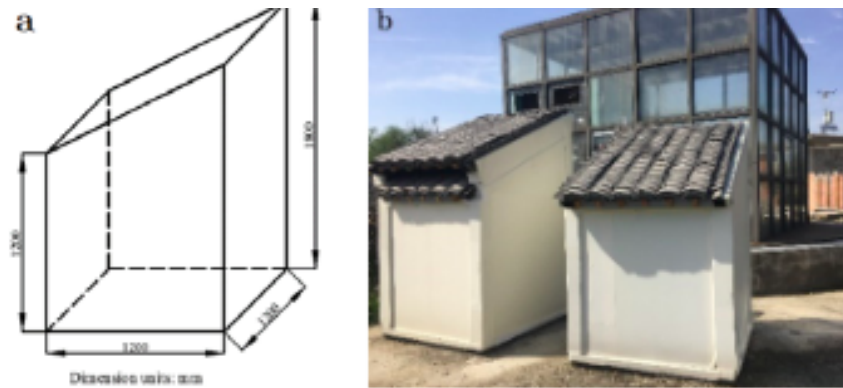


Figura 2.16: Instalación experimental de Lil y Zhao.[20]

En el año 2018 De Silva y Mallwattha et. al. [21] evaluaron el desempeño térmico de tejas reemplazando los productos de arcilla con ceniza de cáscara de arroz en 5 diferentes porcentajes 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Los resultados mostraron una tendencia como se observa en la Figura 2.17 reduciendo la temperatura interior del recinto cuando aumentaba el porcentaje de ceniza de cáscara de arroz. En el año siguiente, exploraron la posibilidad de sustituir la arcilla por lodo cerámico, reemplazando de igual manera en porcentajes de 0 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %, obteniendo una reducción de 2 a 5 °C entre la temperatura exterior e interior como se observa en la Figura 2.18. La reducción de la conductividad térmica hace que el ambiente interior sea más frío y, por lo tanto, una reducción en el costo del enfriamiento artificial. [22]

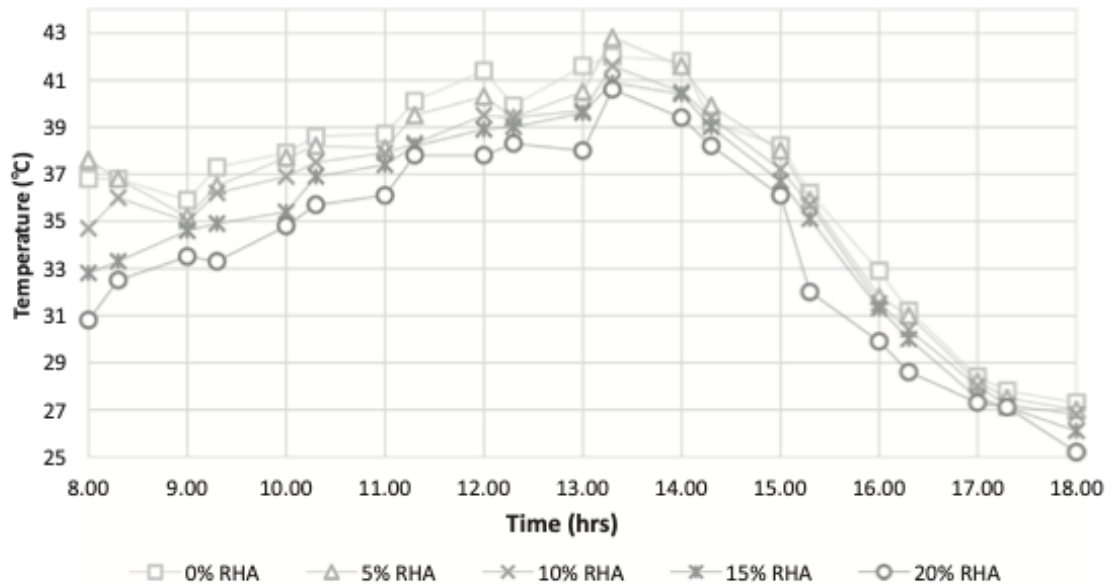


Figura 2.17: Comparaciones de temperaturas registradas en las 5 configuraciones de tejas de arcilla con cáscara de arroz.[21]

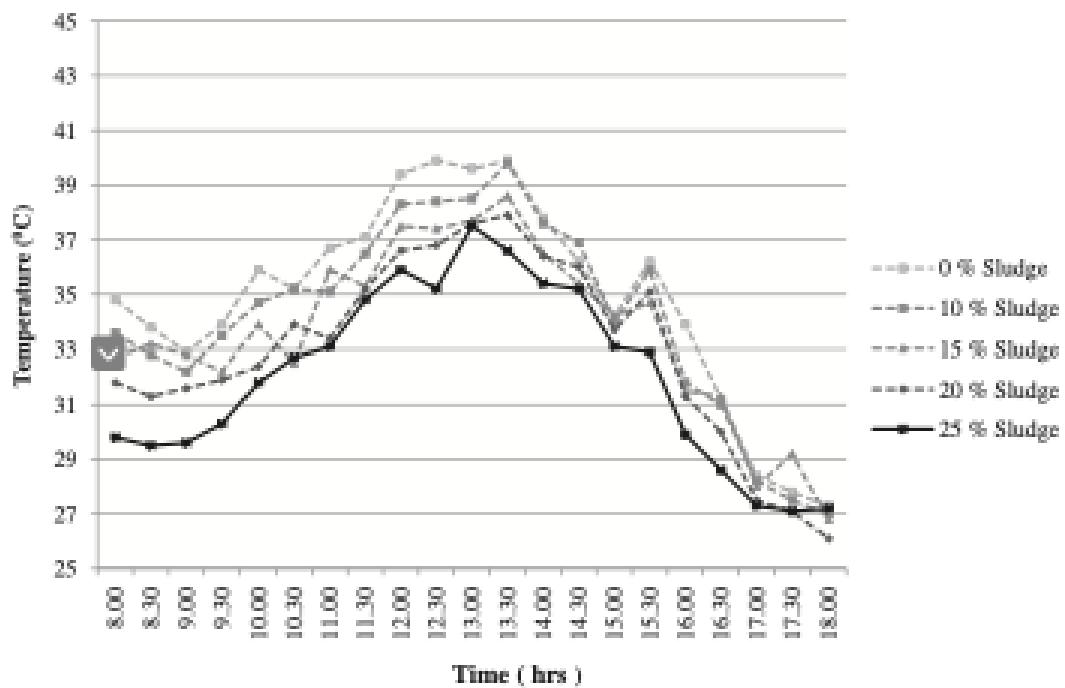


Figura 2.18: Comparaciones de temperaturas registradas en las 5 configuraciones de tejas de arcilla con lodo cerámico.[22]

2.3 TRANSFORMACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS PARA EL CÁLCULO TÉRMICO DE EDIFICACIONES

Las herramientas de diseño para el cálculo energético son utilizadas para reducir la complejidad de los sistemas de ecuaciones, fundamentado en las leyes de termodinámica y transferencia de calor, y de este modo facilitar su resolución. Los programas de simulación implementan modelos matemáticos construidos para representar cada trayectoria de flujo de calor y masa, y sus interacciones con el medio, en este sentido la simulación es un intento de emular la realidad. La evolución de los métodos numéricos tradicionales realizados manualmente a los programas de simulación modernos se divide en cuatro generaciones.

En la primera generación eran cálculos basados en una formulación analítica que eran resueltos manualmente y los cuales no representaban la energía ni el flujo de masa que ocurre en una edificación real, por lo cual su aplicación era limitada. Un ejemplo del método numérico desarrollado en esta época fue el de Diferencia de Temperaturas Equivalente Total/Promediado en el Tiempo (TETD/TA, por sus siglas en inglés); el TEDT fue usado para calcular las ganancias de calor dinámico y el TA fue usado para calcular la carga de enfriamiento en el cuarto.[23] Este modelo está fundamentado en la ecuación de calor unidimensional para los estados transitorios, resuelta por medio de las series de Fourier para componentes tipo pared compuesta. En este método de cálculo se empleaban numerosas tablas de valores estimadas particularmente para un determinado número de componentes constructivos (techos y paredes) característicos. Adicionalmente se requería efectuar el promediado en el tiempo mediante un procedimiento iterativo, para posteriormente obtener el efecto de la inercia térmica del edificio, el cual consiste en absorber carga térmica instantánea para después liberarla como carga de enfriamiento.[24]

En los años 70 la segunda generación comienza a surgir, con un enfoque en el aspecto temporal de los problemas, con respecto a elementos constantes en un período de tiempo como edificaciones con múltiples capas de materiales. Estos métodos analizaban como el tiempo o dominio de frecuencia respondía a factores donde se usaba un modelo dinámico de elementos de construcción, mientras el modelado del sistema HVAC estaba en estado permanente.

En 1972, se desarrolla el Método de Función de Transferencia (TFM, por su abreviatura en inglés) el cual está fundamentado en el uso directo de la ecuación de calor unidimensional y para estados transitorios, la cual se desarrolla en términos de diferencias finitas y posteriormente es solucionada mediante series de tiempo. Este método era bastante complejo y debido a sus altas exigencias computacionales en su época no fue viable su aplicación masiva. En el año de 1977, se presenta el método de Diferencial de Carga de Temperaturas de Enfriamiento/Factores de Carga de Enfriamiento (CLTD/CLF, por sus siglas en inglés), en el cuál se procedía a estimar las cargas de enfriamiento en una secuencia de elementos constructivos que se definieron como significativos, posteriormente se dividieron los resultados entre los valores asignados de coeficientes globales de transferencia de calor U , y con ellos se extrajeron series de constantes utilizados para la estimación de cargas de enfriamiento. Algunos ejemplos de softwares de simulación energética de esta época son ESP-R, DOE2, BLAST y TRNSYS.[24, 25, 26]

Con el avance de los sistemas computacionales, emerge la tercera generación a mediados de los años 80. Estos métodos asumían que solo las dimensiones de espacio y tiempo eran variables independientes, todos los otros parámetros del sistema eran dependientes; así que ningún proceso de transferencia de energía se podía resolver de forma aislada. Este fue el comienzo del modelado integral, es decir, todos aspectos térmico, óptico y acústico eran considerados; en programas como TAS.[26]

La cuarta generación surge a mediados de los años 90, el trabajo de integración del dominio continuó pero con la adición de la interoperabilidad del programa se

obtuvo una mejor aplicación de las condiciones reales, además se obtuvo una mejor interpretación de los resultados. Los últimos métodos numéricos desarrollados fueron el Método de Balance de Calor (HBM, por su abreviatura en inglés), el cual calcula las ganancias del calor y las cargas de enfriamiento al mismo tiempo, usando cinco consideraciones principales: temperatura constante de la superficie, temperatura del aire constante en el espacio, superficies de radiación difusa, constante de onda larga y corta interna radiación y una conducción de calor unidimensional en el área de un cuarto.

Otro método numérico fue el de Series de Tiempo Radiantes (RTS, por su abreviación en inglés), el cual se basa en dos series de cálculos, la primer serie calcula calor ganado con variación de tiempo y la segunda serie calcula las cargas de enfriamiento en zonas usando la primer serie, siendo este método más simplificado y riguroso que el método HBM.[23]

Actualmente, contamos con la disponibilidad de una amplia gama de programas gratuitos y comerciales que continúan en el proceso de mejora, como por ejemplo, DesignBuilder, Open Studio, Vasari, Beopt y Design Advisor.[25, 26, 27]

En el año 2012 se creó en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) un software que permite la valoración del rendimiento térmico en viviendas que funcionan únicamente con elementos pasivos (por ejemplo materiales aislantes), o que funcionan con equipos de climatización; para el desarrollo del programa se optó por un lenguaje de codificación FORTRAN 95, este permite emplear una programación modular, es decir, se encuentra dividido en módulos o subrutinas. En este programa computacional se empleó el enfoque de avance el cual consiste en patrones matemáticos que describen los efectos de masa en los edificios y transporte de energía; además de la metodología del método de balance de calor.[28]

CAPÍTULO 3

MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se presentan los conocimientos teóricos indispensables para desarrollar esta investigación. De igual manera se describen los conceptos fundamentales referentes a transferencia de calor y su aplicación en viviendas.

3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la energía térmica en circulación generada por una diferencia de temperatura espacial. Mientras se presenten diferentes temperatura en un medio o entre medios, ocurre una transferencia de calor.

Los tres diferentes tipos de transmisión de calor son: la conducción que es la transmisión de calor que se ocasiona debido a una diferencia de temperatura en un medio estacionario, el cual puede ser un fluido o un sólido. Por el contrario, la transferencia de calor por convección ocurre cuando un área sólida y un fluido (líquido o gas) que se encuentra en circulación presentan temperaturas distintas. El tercer tipo de transferencia de calor es la radiación térmica. Cualquier superficie de temperatura finita desprende energía en forma de ondas electromagnéticas. Por consiguiente, en caso de falta de un medio intermedio, existe transmisión neta de calor por radiación através de dos superficies que se encuentran a temperaturas distintas.[29]

3.2 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

3.2.1 CONDUCCIÓN

Cuando en un cuerpo presenta diferentes temperaturas, la transmisión de energía por conducción suele suceder en dirección de la temperatura menor.

Es posible medir el proceso de transmisión de calor por medio de ecuaciones, las cuales pueden usarse para cuantificar la porción de energía que es transferida por unidad de tiempo. Para obtener el valor de calor transferido por conducción por medio de una superficie plana como la que se observa en la Figura 3.1 se utiliza la ecuación 3.1, la cual es denominada Ley de Fourier.

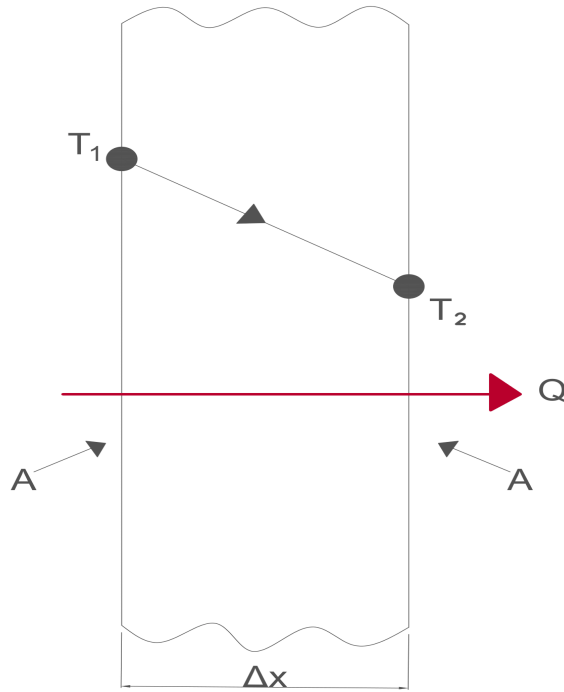


Figura 3.1: Conducción de calor por medio de una superficie plana de espesor Δx y área A

$$\dot{Q}_{\text{conducción}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1)$$

El flujo de calor $\dot{Q}_{\text{conducción}}(W)$ es la tasa de transferencia de calor en la dirección x por unidad de área que es perpendicular en la dirección de transmisión, y es correspondiente a la diferencia de temperatura, $\Delta T/\Delta x$, en la misma dirección. El parámetro k es una característica de transporte denominada conductividad térmica ($W/m \cdot K$) y es una propiedad del componente de la pared. El área en la que se transfiere el calor A será perpendicular a la dirección de esta transmisión. El signo negativo señala que el calor está siendo transmitido en la dirección de disminución de la temperatura.

3.2.2 CONVECCIÓN

El tipo de transferencia de calor por convección se produce entre una superficie límite y un fluido en movimiento en el momento en que los dos están a temperaturas distintas como se observa en la Figura 3.2. Está compuesto por las características combinadas del desplazamiento del fluido y la conducción. Normalmente, la energía sensible, energía del fluido o térmica interna es la que se transmite.

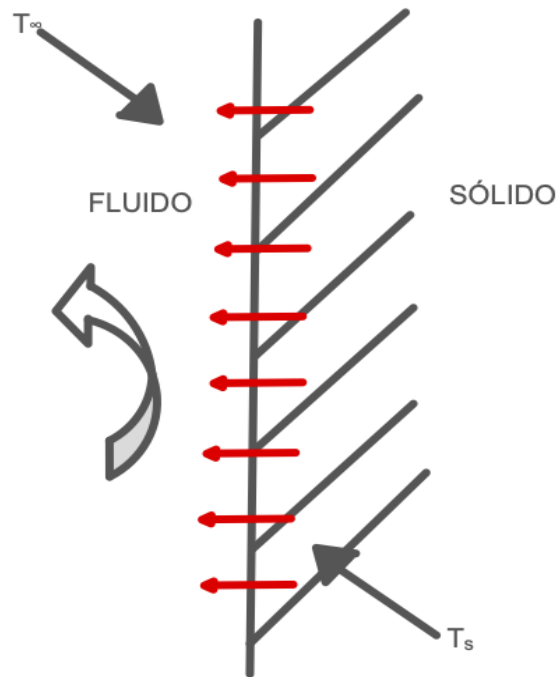


Figura 3.2: Diagrama de transferencia de calor por medio de convección

El proceso de transmisión de calor por convección, se expresa por medio la ecuación 3.2, que representa la ley de Newton de enfriamiento:

$$\dot{Q}_{convección} = h_c A (T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

En la cual $\dot{Q}_{convección}$, representa el flujo de calor convectivo (W), es correspondiente a la diferencia de las temperaturas del fluido T_∞ y de la superficie T_s . El

parámetro $h_c(W/m^2 \cdot K)$ se define como el coeficiente de transferencia de calor por convección. Este valor se establece por las características presentes en la capa límite, que están influenciados por la forma de la superficie, el origen del movimiento del fluido y diversas características termodinámicas y de transporte de fluidos.

En el momento que se emplea la expresión anterior, se asume que cuando el flujo de calor por convección se transmite desde la superficie es positivo ($T_s > T_\infty$) y por el contrario si este se traslada hacia la superficie es negativo ($T_\infty > T_s$). No obstante, cuando $T_\infty > T_s$, entonces la expresión de la ley de Newton del enfriamiento queda de la siguiente forma 3.3, convierte la transmisión de calor hacia la superficie en positiva:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A (T_\infty - T_s) \quad (3.3)$$

3.2.3 RADIACIÓN TÉRMICA

La energía expedida por la materia que permanece a cierta temperatura distinta de cero absoluto, se define como radiación térmica. En comparación con la transferencia de energía por conducción o convección, la radiación no necesita la existencia de un medio material. En realidad, en el vacío la transferencia de calor por radiación ocurre de una forma más efectiva.

La razón de transferencia de calor por radiación que puede transmitir una superficie real a cierta temperatura T_s (K), es definida mediante la ley de Stefan-Boltzmann por medio de la expresión 3.4:

$$\dot{Q}_{radiación} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (3.4)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$, es la constante de Stefan-Boltzmann; ε es la emisividad de la superficie la cual mantiene su valor dentro del intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$,

A es el área de la superficie real y T_s representa la temperatura de la superficie.[30]

Cuando una superficie se encuentra expuesta al ambiente a una temperatura T_{alr} , la razón de transferencia de calor es definida por la fórmula 3.5:

$$\dot{Q}_{radiación} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (3.5)$$

La ley de Kirchoff de la radiación asegura que la absorptividad y la emisividad de una superficie son idénticas, ambas propiedades se definen en base de la temperatura y longitud de onda. Considere el proceso de transferencia de radiación para la superficie como en la Figura 3.3.

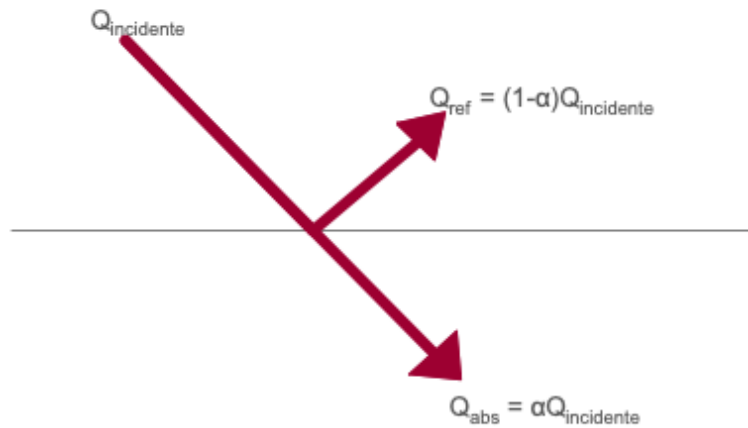


Figura 3.3: Absorción incidente sobre una superficie opaca

La radiación además puede incidir en una superficie de su entorno. La radiación puede ser generada por una fuente especial, como por ejemplo el sol o de otras fuentes a las cuales la superficie analizada se encuentre expuesta.

Una parte o toda de la irradiación puede ser absorbida por la área, aumentando así la energía térmica del componente. La razón a la que se absorbe la energía radiante es absorbida por unidad de área de la superficie, está puede evaluarse en base a la información de la propiedad radiativa del área denominada absorptividad

α , su valor esta entre $0 \leq \alpha \leq 1$. Para determinar el calor que absorbe la superficie $\dot{Q}_{absorbida}$, se emplea la ecuación 3.6:

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha * \dot{Q}_{incidente} \quad (3.6)$$

Donde $\dot{Q}_{incidente}$, representa la radiación que incide encima de la superficie. Si $\alpha < 1$ y el material es opaco, porciones de la irradiación son reflejadas. Si el material es semitransparente, porciones de la irradiación podrá ser transmitidas. No obstante, en tanto que la radiación absorbida aumenta y la radiación emitida reduce, la energía térmica del componente, la radiación transmitida y la radiación reflejada no presentan ninguna consecuencia en esta energía.[31, 29, 32]

3.3 RESISTENCIA TÉRMICA

Especialmente, hay una similitud entre la carga eléctrica y la difusión de calor. Al igual que se relaciona la conducción de electricidad con una resistencia eléctrica, podemos relacionar la conducción de calor con una resistencia térmica. Estableciendo el concepto de resistencia como la relación entre un potencial de conducción a la correspondiente de la tasa de transferencia, se infiere que la resistencia térmica para el proceso de conducción en una superficie plana es como se muestra en la ecuación 3.7:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{Q} = \frac{L}{kA} \quad (3.7)$$

Para la convección, la resistencia térmica se representa con la ecuación 3.8:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{Q} = \frac{1}{hA} \quad (3.8)$$

El circuito térmico semejante para la superficie plana con características de superficie de convección se observa en la Figura 3.4

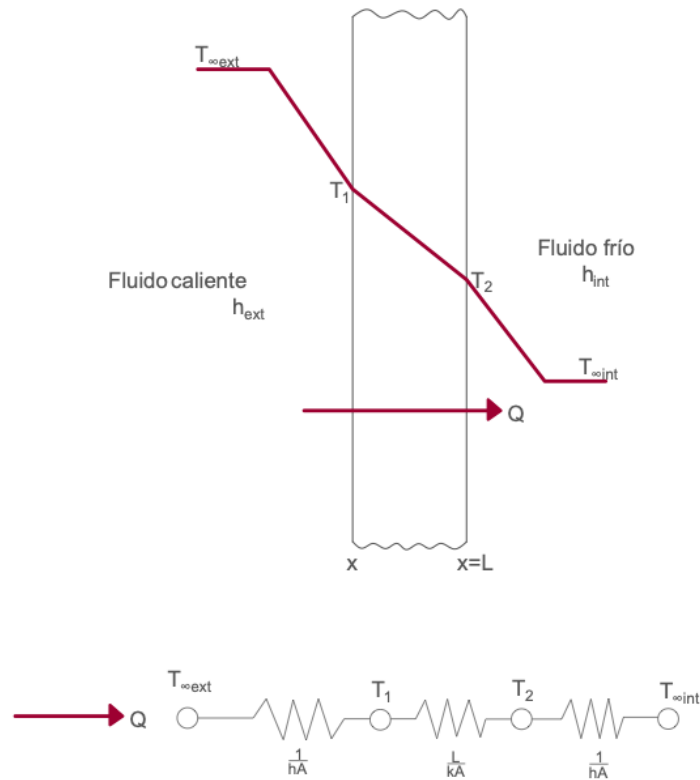


Figura 3.4: Transferencia de calor en una superficie plana. Distribución de temperatura y circuito de resistencias térmicas

La tasa en la que se transfiere de calor debe determinarse considerando aparte cada componente de la serie. Puesto que q es constante en toda la red, se deduce que:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\frac{L}{k A}} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_2 A}} \quad (3.9)$$

Por ende a que las resistencias de conducción y las resistencias convección se encuentran conectadas en serie, puede ser resumido como:

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.10)$$

En términos de la variación de la temperatura general, $T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$, y la resistencia térmica total, R_{total} , la tasa de transferencia de calor también se representa con la ecuación 3.11:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{total}} \quad (3.11)$$

Una resistencia térmica por radiación puede ser definido por la ecuación 3.12 [31, 29, 32]:

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{alr}}{q} = \frac{1}{h_r A} \quad (3.12)$$

Donde h_r se define como el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

3.4 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es expresada como la porción de radiación electromagnética incidente en la tierra que proviene del Sol. La estructura y las características del Sol determinan la naturaleza de la energía que irradia al espacio. El espacio entre el Sol y la Tierra es de 1.405×10^{11} m. La constante solar G_{cte} es la energía del Sol por unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de expansión de la radiación a la longitud promedio Tierra-Sol afuera de la atmósfera, el valor de esta constante es de 1367 W/m^2 .

Para calcular la radiación extraterrestre incidente en el plano normal G_{on} en el día n , se emplea la ecuación 3.13, la cual tiene una precisión de $\pm 0.01\%$:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (3.13)$$

La radiación solar total que se proyecta encima del plano de la Tierra se divide en dos partes directa y difusa como se presenta en la Figura 3.5.

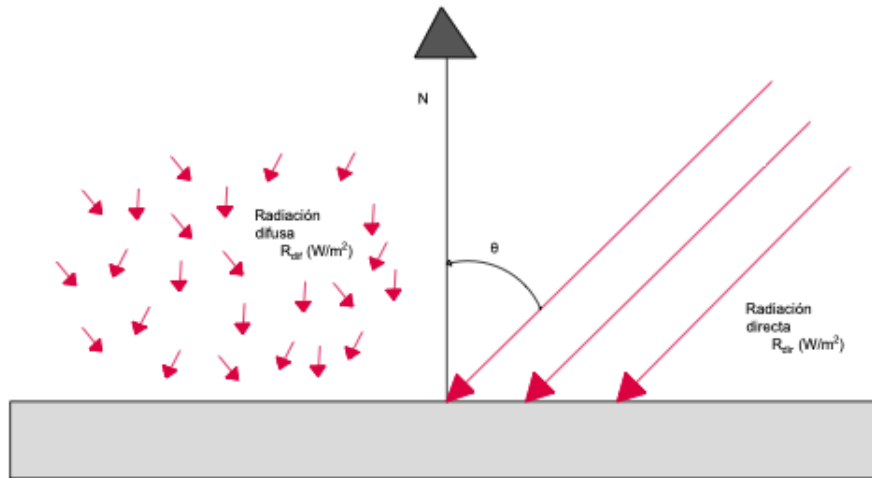


Figura 3.5: Radiación difusa y directa que se proyecta sobre el plano terrestre.

La radiación directa G_{dir} se presenta sobre la superficie terrestre sin ser absorbida ni dispersada por la atmósfera, en cambio, la radiación difusa G_{dif} es la radiación dispersa que se presenta sobre el plano terrestre de manera homogénea en varias direcciones. Por lo tanto, la energía solar total G_{total} es la que incide sobre la unidad de área de un plano horizontal sobre el suelo se representa como la ecuación 3.14:

$$G_{total} = G_{dir} \cos \theta + G_{dif} \quad (3.14)$$

En la cual, θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa (el ángulo que genera un rayo del sol con la perpendicular de la superficie).[33, 34]

3.5 TRANSMISIÓN DE CALOR EN VIVIENDAS

El principal fin de la envolvente de una vivienda es funcionar como un modificador pasivo del clima para ayudar a mantener un ambiente interior que es más adecuado para habitar que el exterior. La envolvente del edificio difícilmente puede garantizar que las condiciones ambientales interiores sean siempre cómodas para los ocupantes, o adecuadas para los propósitos previstos de los espacios interiores, particularmente durante los períodos de condiciones exteriores desfavorables.

La necesidad de características de diseño de edificios que faciliten el uso de la ventilación natural y la luz del día han disminuido, ya que los medios activos para el control del ambiente, como los equipos de ventilación, calefacción y aire acondicionado central (HVAC) y las luces eléctricas, se pueden utilizar en su lugar para mantener una adecuada condiciones ambientales térmicas y visuales interiores, y calidad del aire.

Sin embargo, el uso de los equipos de iluminación y climatización para el control activo de las condiciones ambientales interiores ha convertido a los edificios en los principales consumidores de energía de todo el mundo. La carga de refrigeración o calefacción debida a la transmisión de calor por medio de la envolvente de la vivienda puede disminuir mediante el uso de materiales de aislamiento térmico en paredes y techos externos.

La transmisión de calor por conducción por medio de un elemento de tela de construcción opaco, como una pared externa como se observa en la Figura 3.6, es el efecto del calor convectivo que la superficie a cada lado del elemento intercambia con el aire circundante, y el calor radiante son los intercambios con diferentes áreas a las que se encuentra exhibida la superficie. Para una pared externa o un techo, el intercambio de calor radiante en el lado externo incluye la radiación solar absorbida, incluida la radiación difusa y directa.

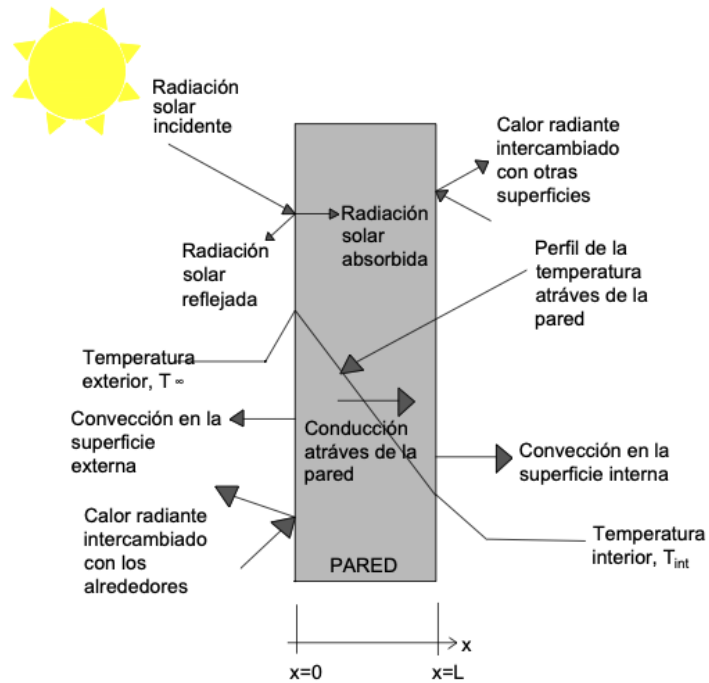


Figura 3.6: Transferencia de calor en una pared

La superficie que está expuesta a un ambiente a una temperatura conocida e intercambia calor radiante con los alrededores. En esta situación, el balance de calor de la superficie puede ser descrita por las ecuaciones 3.15 y 3.16:

$$q(0, t) = k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = h_0(T_{\infty,0} - T(x, t)) + q_{net,0} \quad (\text{para } x = 0) \quad (3.15)$$

$$q(L, t) = k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = h_L(T(x, t) - T_{\infty,L}) + q_{net,L} \quad (\text{para } x = L) \quad (3.16)$$

Donde h_0 y h_L representan los coeficientes de transferencia de calor convectiva, $T_{\infty,0}$ y $T_{\infty,L}$ representan las temperaturas del aire ambiente y $q_{net,0}$ y $q_{net,L}$ son ganancias de calor neto radiante por unidad de área encima de la superficie de $x=0$ y $x=L$ respectivamente.[35]

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este apartado se define la metodología general utilizada en la realización de este estudio referente a la evaluación de la transferencia de calor del uso de teja en techos de vigueta y bovedilla. En primer lugar como metodología experimental se presentan las instalaciones experimentales utilizadas y sus componentes.

Además, se calcula mediante los datos de temperaturas obtenidas experimentalmente el coeficiente combinado de transferencia de calor. Posteriormente se presenta la metodología del método numérico, utilizada para realizar las simulaciones computacionales.

Cada proceso presenta el paso a paso de su desarrollo, puntualizando sus características.

4.1 METODOLOGÍA GENERAL

El propósito de esta investigación es evaluar el impacto en la transferencia de calor implementando el uso de tejas en techos de vigueta y bovedilla, por lo cual se aplicó un enfoque cuantitativo que se fracciona en dos partes, la primera se constituye en la construcción de una instalación experimental y en la segunda parte se realizaron simulaciones computacionales.

El estudio es localizado en la región norte de México en la entidad federativa de Nuevo León. El clima que presenta el estado es del 68 % seco y semiseco, 20 % cálido subhúmedo, 7 % templado subhúmedo y el 5 % muy seco. La ubicación específica de la Facultad de Ingeniería Mecánica donde se realiza el estudio son latitud norte $25^{\circ}C$ $43'27.7''$ y longitud al oeste de $100^{\circ}C$ $18'44.4''$, donde sus condiciones climáticas son las mostradas en la Figura 4.1. En el área de estudio es frecuente una temperatura máxima de $35^{\circ}C$ y una temperatura mínima de $10^{\circ}C$.



Figura 4.1: Mapa de clima en Nuevo León y localización del área referenciada.

4.1.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se realiza un trabajo experimental para validar los resultados numéricos obtenidos, por lo que se procede a construir dos recintos rectangulares orientados a 90° E, con características similares y alineados con una distancia de 1.50 m. entre ellos para evitar sombras, como se señala en la Figura 4.2.

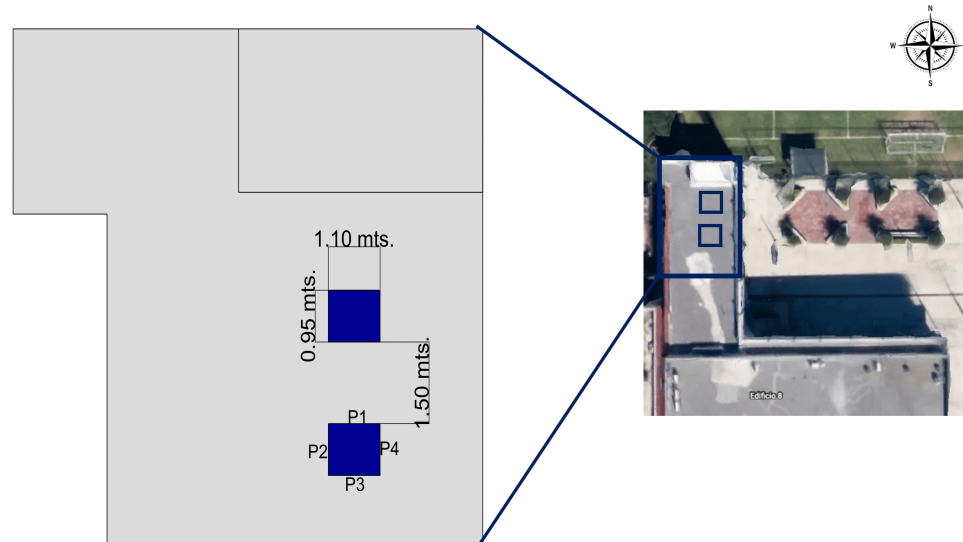


Figura 4.2: Ubicación y orientación de instalación experimental.

Las dimensiones del recinto constan de dos paredes de 1.15 m. x 0.95 m. orientadas hacia norte y sur; y dos paredes con dimensiones de 1.15 m. x 1.10 m. orientadas hacia este y oeste; así como un techo y piso de 0.95 m. x 1.10 m. En la Figura 4.3 se muestra la geometría del recinto.

Se utiliza para la construcción de los dos recintos una envolvente compuesta en las paredes de multimuro, compuesto por una placa de lámina de 0.001 m, una placa de poliestireno extruido de .048 m. y una placa de lámina de 0.001 m. como se muestra en la Figura 4.4(a), el piso está conformado por una placa de poliestireno de 0.0254 m. de grosor, como se muestra en la Figura 4.4(b); así como un techo de sistema de vigueta y bovedilla, con bovedilla peralte de 10 cm de cazuela de barro, vigueta con cazuela de barro de peralte 5 cm. Con capa de compresión de 5 cm. De

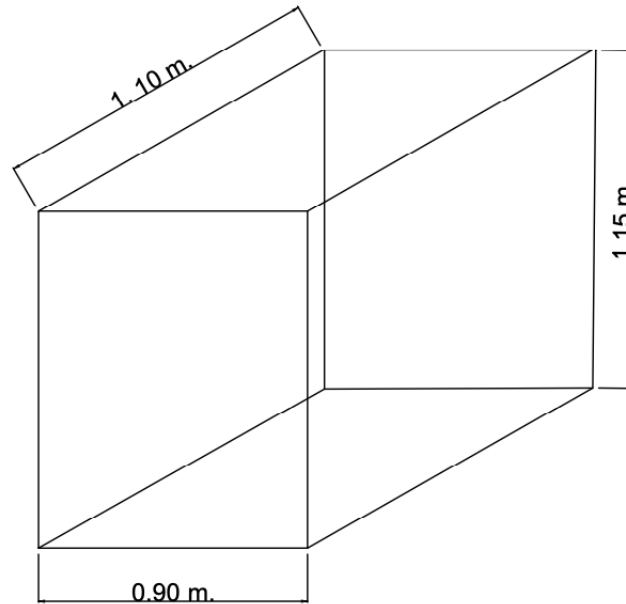


Figura 4.3: Dimensiones del recinto

espesor, como en la Figura 4.4(c).



(a) Multimuro

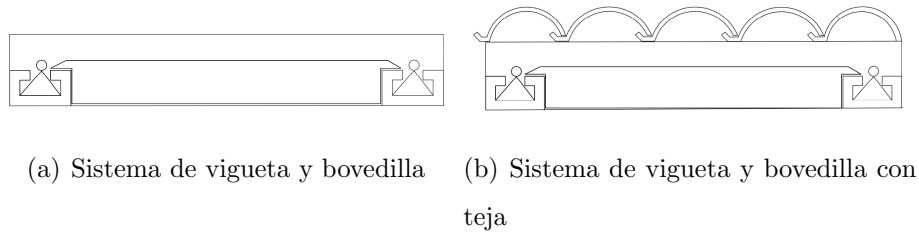
(b) Placa foamular

(c) Sistema de vigueta y bovedilla

Figura 4.4: Materiales de la envolvente

Se realizan dos casos de comparación importantes, en los cuales se varía la estructura del techo, el primer caso consta de un sistema de vigueta y bovedilla, en el segundo caso se agrega una capa de tejas por encima del sistema de vigueta y bovedilla; como se muestran en la Figura 4.5. En ambos casos se pretende principalmente evaluar la carga térmica en el momento que la temperatura del aire ambiente interior se conserva constante.

Se controlan los parámetros interiores y exteriores, los parámetros ambientales



(a) Sistema de vigueta y bovedilla (b) Sistema de vigueta y bovedilla con teja

Figura 4.5: Casos de los techos a evaluar

exteriores provienen de la estación meteorológica cercana y se realiza el registro de los valores de la radiación solar por medio de un piranómetro Modelo LP-PYRA 03AV (Rango 0 a 2000 W/m^2 , Precisión $|\pm 2.5\%|$), el registro de estos datos será cada 30 minutos. Las instalaciones experimentales se instrumentan como se señala en la Figura 4.6, con termopares tipo T (Rango: $-200\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$, Precisión $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) para medir las temperaturas externas e internas de las superficies.



Figura 4.6: Diagrama de instrumentación

El piránometro y los termopares se conectan a un módulo de entrada de datos CompactRIO, que se encuentra programado para tomar lecturas de las temperaturas cada hora por medio del programa LabView.

La temperatura del aire interior se controla mediante un sistema de refrigeración en el interior de los recintos para mantenerlo a una temperatura constante de $24 \text{ }^\circ\text{C}$, el cual se observa en la Figura 4.7. Este sistema está conformado por una unidad condensadora, 2 evaporadores, 2 ventiladores y 2 válvulas de expansión termostática, dicho sistema emplea refrigerante R-134a. Para el control de su funcionamiento se han instalado dos válvulas solenoides que controlan el cierre y la

apertura de las líneas con carga de refrigerante hacia los evaporadores, dependiendo de la temperatura que exista en el interior del recinto, la cual esta siendo controlada por termostatos. Además, se coloca un presostato conectado al compresor para que controle el encendido y apagado de acuerdo con la presión existente.

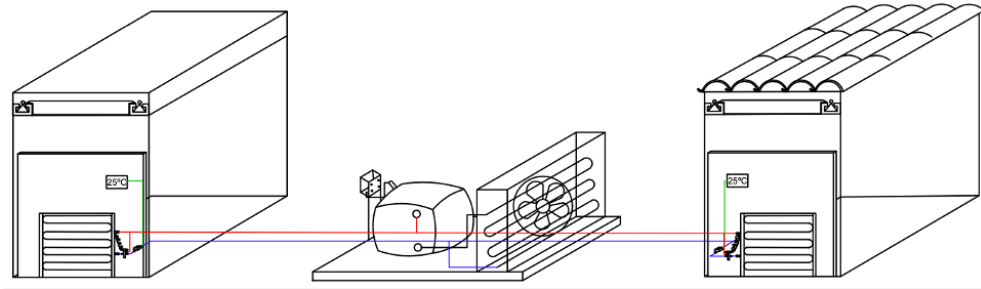


Figura 4.7: Sistema de refrigeración

La experimentación se lleva a cabo por períodos de 7 días durante las 24 horas, para garantizar que se establezca una condición térmica estable.

4.1.2 CÁLCULO DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR COMBINADO

La transferencia de calor por radiación en una superficie, o proveniente de ésta, la cual se encuentra expuesta al aire, sucede paralela a la conducción o convección entre el área y el aire. De tal manera que, la transferencia total de calor se determina incluyendo los efectos de los dos mecanismos de transferencia, debido a esto se define mediante un coeficiente combinado de transferencia de calor, $h_{combinado}$, el cual se determina con la fórmula 4.1:

$$h_{combinado} = h_c + h_r \quad (4.1)$$

Donde h_c , es el coeficiente de transferencia por convección y h_r , representa el coeficiente de transferencia de calor por radiación. Entonces la razón total de trans-

ferencia de calor se expresa con la ecuación 4.2:

$$Q_{total} = h_{combinado} A_s (T_s - T_\infty) \quad (4.2)$$

4.1.2.1 OBTENCIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Por medio del registro de las temperaturas de la superficie interior y ambiente interior, se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección de acuerdo a las correlación empírica del numero promedio de Nusselt para la convección natural sobre diferentes superficies, teniendo como estructura geométrica una placa horizontal.[32]

Se comienza determinando la longitud característica (L_c) con los datos del área (A) y el perímetro (P) de la superficie, por medio de la ecuación 4.3.

$$L_c = A/P \quad (4.3)$$

Posteriormente se calcula con la ecuación 4.4, el número de Rayleigh (Ra).

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} (Pr) \quad (4.4)$$

Donde g la gravedad, β es el coeficiente de expansión volumétrica de un gas ideal, ν es a viscosidad cinemática y Pr corresponde al número de Prandtl, estas propiedades se determinan de acuerdo a la temperatura promedio, como $T_{prom} = T_s - T_\infty$.

Si el resultado se encuentra dentro del rango de valores $10^5 - 10^{11}$ para el número de Rayleigh, podremos aplicar la ecuación 4.5 para obtener el número de Nusselt (Nu).

$$Nu = 0.27 * Ra^{1/4} \quad (4.5)$$

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección procedemos a despejar la ecuación 4.6:

$$Nu = \frac{h_c * L_c}{k} \quad (4.6)$$

Obteniendo como resultado la ecuación 4.7:

$$h_c = \frac{Nu * k}{L_c} \quad (4.7)$$

Posteriormente, se repetirá el procedimiento en base con el registro de temperaturas tomadas cada hora, para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección en el transcurso del día.

4.1.2.2 OBTENCIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor por radiación, mediante las temperaturas obtenidas experimentalmente de la superficie interior y ambiente interior, se determina con la ecuación 4.8:

$$h_r = \sigma \varepsilon (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (4.8)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, ε es la emisividad del material, T_s es la temperatura de la superficie y T es la temperatura ambiente.[30]

4.1.3 PROCESAMIENTO DE LA RADIACIÓN

El parámetro cuantificado en la instalación experimental es la radiación global sobre la horizontal, de modo que, se debe de obtener la radiación solar directa normal y la radiación solar difusa incidente, a través de un modelo teórico.

4.1.3.1 OBTENCIÓN DE LA RADIACION SOLAR DIRECTA NORMAL

Para calcular la proporción de radiación difusa en cuanto a la radiación global horizontal (d), es aceptable emplear el modelo de Reindl, este modelo genera la estimación de dicha proporción utilizando datos climatológicos comunes; este método depende de la altitud solar (α) y el índice de claridad (k_t). El índice de claridad indica la claridad de la atmósfera, se define por la ecuación 4.9:

$$k_t = \frac{G_{total}}{H_0} \quad (4.9)$$

Donde G_{total} , es la radiación global horizontal y H_0 es la radiación extraterrestre. El modelo divide las correlaciones de fracciones difusas en diferentes intervalos de acuerdo al valor del índice de claridad, como se muestra en la Tabla 4.1; ya que para cielos nublados este valor es el que más afecta, en cambio en los cielos despejados predomina el efecto de la altitud solar.

Tabla 4.1: Correlaciones para calcular la proporción de radiación difusa basado en el modelo de Reindl.

Intervalo	Restricción	Correlación
$0 \leq k_t \leq 0.3$	$d \leq 1$	$d = 1.020 - 0.254k_t + 0.0123 \text{ sen } (\alpha)$
$0.3 \leq k_t \leq 0.78$	$d \leq 0.97$ y $d \geq 0.1$	$d = 1.400 - 1.749k_t + 0.177 \text{ sen } (\alpha)$
$0.78 \leq k_t$	$d \geq 0.1$	$d = 0.486k_t - 0.182 \text{ sen } (\alpha)$

Por último, se obtiene el valor de la radiación directa normal a través de la ecuación 4.10 [36, 37, 38]:

$$G_{dir} = \frac{G_{total} - (G_{total} * d)}{\text{sen}\alpha} \quad (4.10)$$

4.1.3.2 OBTENCIÓN DE LA RADIACION SOLAR DIFUSA

La radiación difusa es muy variable y difícil de determinar, ya que se encuentra en función de la nubosidad y claridad atmosférica. La fracción de radiación difusa es también la combinación de tres componentes: isotrópico, circunsolar y brillo del horizonte. Los modelos utilizados para predecir la radiación difusa en una superficie inclinada se clasifican en términos generales como modelos de cielo isotrópico y anisotrópico.

De acuerdo al modelo de Hay y Davies (*HA*) el cielo está compuesto únicamente por un componente isotrópico y circunsolar, estos componentes se ponderan de acuerdo al índice de anisotropía A_i , el cual depende de la transmitancia de la atmósfera el cual se obtiene por la expresión 4.11:

$$A_i = \frac{G_{dir}}{H_0} \quad (4.11)$$

El modelo de Reindl (*RE*) incorpora el factor de brillo del horizonte por medio del factor de modulación f , el cual se determina por la ecuación 4.12:

$$f = \frac{G_{dir}}{G_{total}} \quad (4.12)$$

Para determinar la radiación difusa incidente sobre la superficie se determina por la ecuación 4.13:

$$G_{dif} = G_{dif,H}(1 - A_i)\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right)\left[1 + f\text{sen}^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + A_i R_b \quad (4.13)$$

Donde $G_{dif,H}$ es la radiación difusa sobre la horizontal, β es la inclinación de la superficie, A_i es el índice de anisotropía y R_b es un elemento geométrico que cuantifica la aportación de la radiación directa en un plano inclinado, el cual se calcula por la ecuación 4.14:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_s} \quad (4.14)$$

Donde θ representa el ángulo de incidencia en la superficie.[36, 39]

4.2 MÉTODO NÚMÉRICO

En esta sección se procede a realizar la simulación computacional de nuestra instalación experimental con el objetivo de evaluar las cargas térmicas en el momento que la temperatura del aire ambiente interior se encuentra constante. Los valores de entrada solicitados por el programa computacional se puede clasificar en cuatro clases de información: global, geometría, de la envolvente y meteorológica.

4.2.1 DATOS DE LA LOCACIÓN Y METEOROLÓGICOS

Para esta sección se requieren los datos colocados en la Tabla 4.2.

4.2.2 GEOMETRÍA DEL RECINTO

La geometría del recinto es de 0.95 x 1.10 x 1.15 m. Las paredes de 0.95 m. x 1.15 m. orientadas hacia sur y norte; y las paredes de 1.10 m. x 1.15 m. orientadas hacia oeste y este; y el techo y el suelo poseen un área de 0.95 x 1.10 m.

4.2.3 PROPIEDADES DE LA ENVOLVENTE

Para esta sección se requieren los datos colocados en la Tabla 4.3.

El sistema de refrigeración conserva una temperatura constante de 24 °C en el ambiente interior de la vivienda.

La emisividad y absorptividad de todas las superficies tendrá los valores de 0.6 y 0.9, respectivamente.

El valor de coeficiente de transferencia de calor por convección exterior es

Tabla 4.2: Datos de localización y meteorológicos

Tipo de clima	Frío / Seco
Formato de los datos meteorológicos	Typical Meteorological Year (TMY)
Latitud	25.72° Norte
Longitud	-100.3° Este
Altitud	512 m
Huso horario	-6 h
Reflectancia del suelo	0.2
Sitio	Plano, sin obstrucciones.
Velocidad promedio anual del viento	1.5 m/s
Temperatura del suelo	10 °C
Temperatura promedio anual de bulbo seco ambiente	27 °C
Temperatura mínima anual del bulbo seco	-15.1 °C
Temperatura máxima anual del bulbo seco	28.8 °C
Velocidad máxima anual del viento	1.9 m/s
Grados-día de calefacción	161.66 °C-días
Grados-día de refrigeración	1180.55 °C-días
Temperatura promedio anual de punto de rocío	15.2 °C
Razón de humedad promedio anual	0.0047
Total anual de radiación solar global horizontal	1875 kWh/(m ² año)
Total anual de radiación solar directa normal	1736 kWh/(m ² año)
Radiación solar directa horizontal	1115 kWh/(m ² año)
Radiación solar difusa horizontal	761 kWh/(m ² año)

de 25 (W/m^2K) y el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección interior es de 6.13 (W/m^2K), dichos valores se mantienen constantes para todas las superficies de la instalación experimental.

Tabla 4.3: Propiedades de la envolvente

Material	Espesor (m)	$\rho(kg/m^2)$	$c_p(J/kgK)$	k(W/mK)
Pared)				
Multimuro (Acero es- tructural y poliure- tano)	0.05	76.84	868.59	0.021
Suelo				
Poliestireno extruido	0.0254	29.03	1450	0.027
Techo				
Vigueta y Bovedilla 10 cm. de peralte	0.15	915.99	1319.88	0.094
Teja	0.013	1744.73	921.09	0.1051

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En esta parte de la investigación se mostrarán los resultados correspondientes a la simulación y los datos experimentales.

Los cuales se presentan en etapas; comenzando con la comprobación del funcionamiento de la instalación experimental, posteriormente se realiza la validación empírica la cual compara los resultados del código computacional con los obtenidos experimentalmente y por último se presentan los resultados de comparación de temperatura y transferencia de calor en el techo entre ambos recintos teniendo como variante la colocación de tejas.

5.1 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para verificar la funcionalidad de la instalación experimental y de la instrumentación colocada se realiza la toma de datos de temperaturas de las superficies del día 06 al 08 de Febrero, como resultados preliminares de ambos recintos con igualdad de condiciones en su estructura, es decir, sin la colocación de tejas.

Se obtienen las gráficas 5.1,5.2, 5.3 y 5.4 de temperaturas registradas por 72 horas en las superficies exteriores en las paredes 1, 2, 3 y 4.

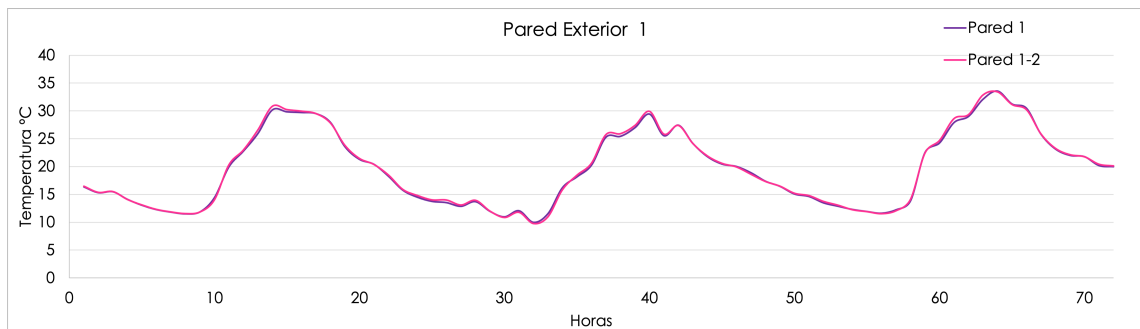


Figura 5.1: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 1 en ambos recintos

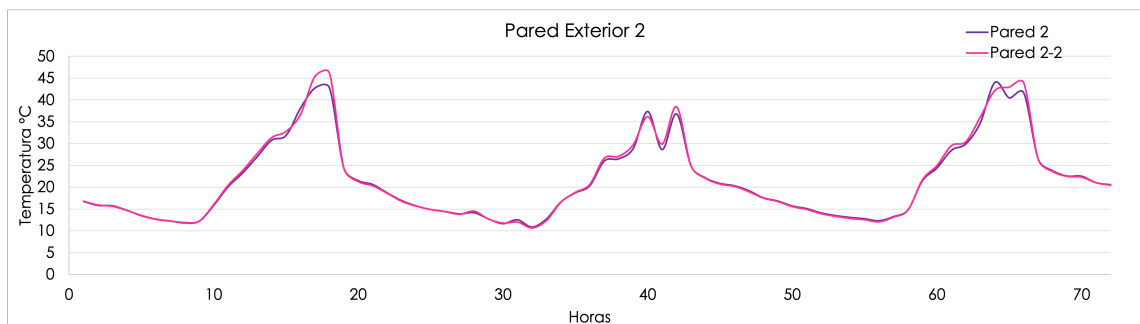


Figura 5.2: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 2 en ambos recintos

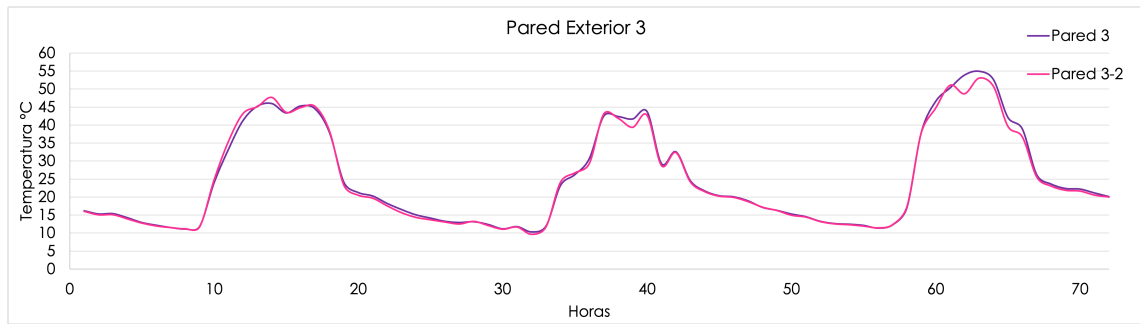


Figura 5.3: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 3 en ambos recintos

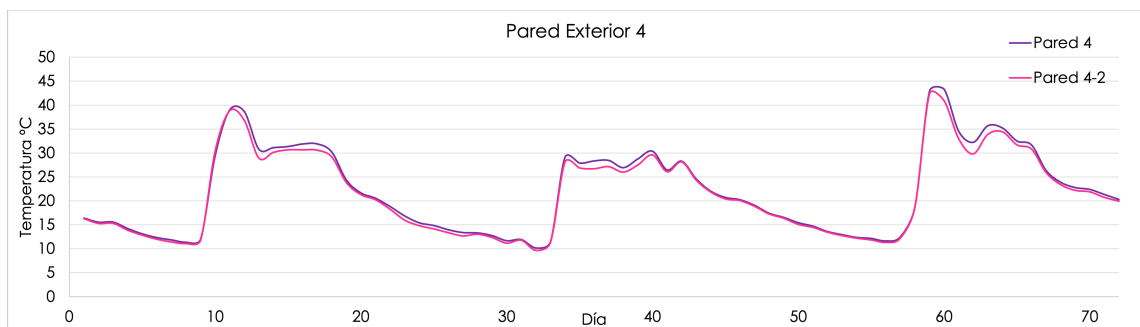


Figura 5.4: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de pared 4 en ambos recintos

En las cuales se observa que la variación de temperaturas entre recintos es mínima. De igual manera para las superficies interiores de las paredes 1, 2, 3 y 4. Se obtienen las gráficas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 de temperaturas registradas en las mismas 72 horas.

De igual manera que en las superficies exteriores, se observa que la variación de temperaturas de superficies interiores de las paredes entre recintos es mínima. A continuación se exponen las temperaturas registradas por 72 horas en superficies interiores y exteriores del techo, donde se obtienen las gráficas 5.9, 5.10 y 5.11.

Se continúa observando que la variación de temperaturas entre recintos es mínima. Por último se obtienen las gráficas 5.12 y 5.13, las cuales muestran las

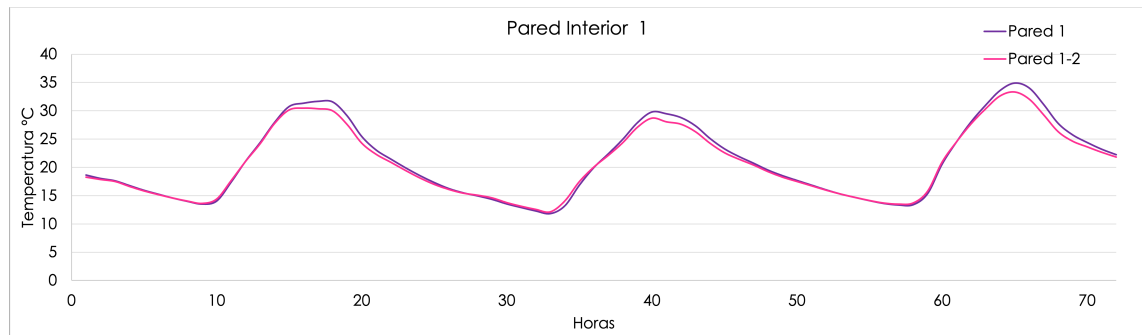


Figura 5.5: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 1 en ambos recintos

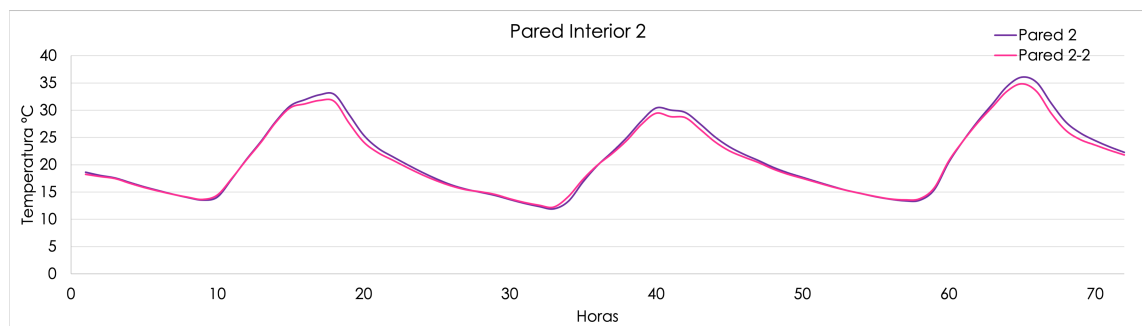


Figura 5.6: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 2 en ambos recintos

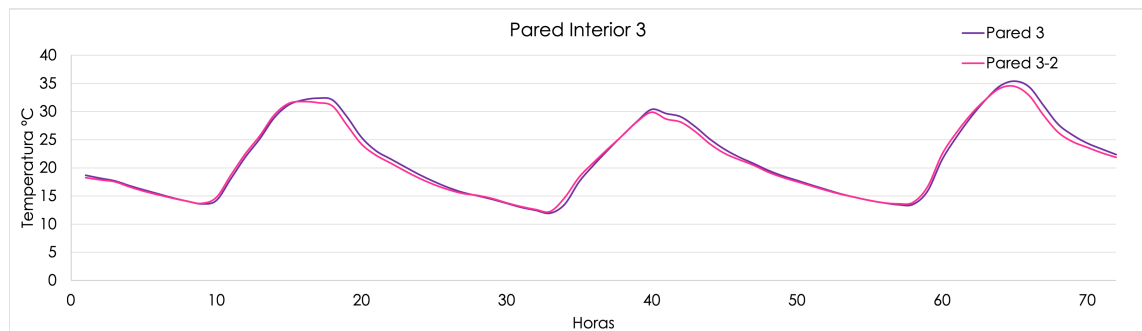


Figura 5.7: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 3 en ambos recintos

temperaturas registradas en 72 horas de la superficie del piso y ambiente interior de ambos recintos.

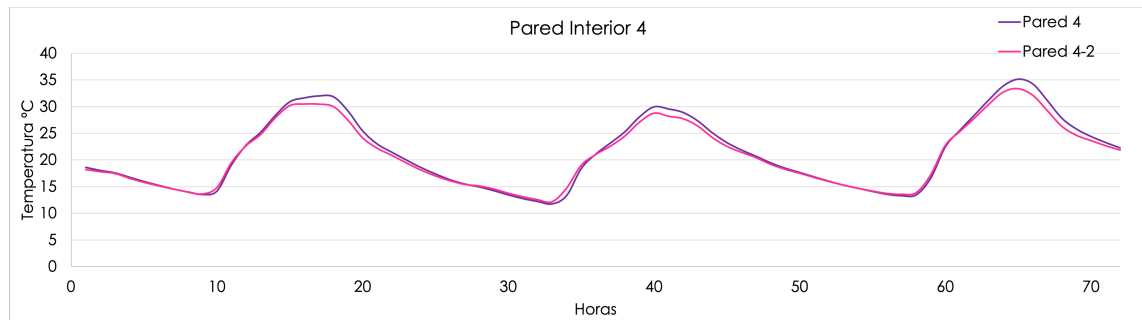


Figura 5.8: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de pared 4 en ambos recintos

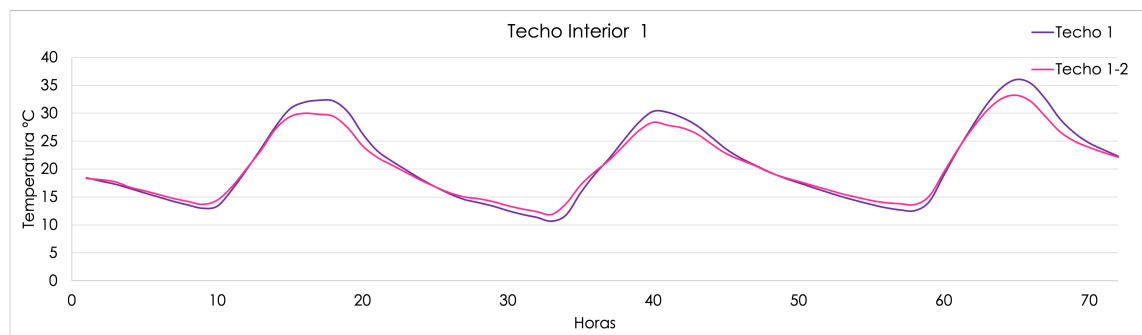


Figura 5.9: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de techo en ambos recintos

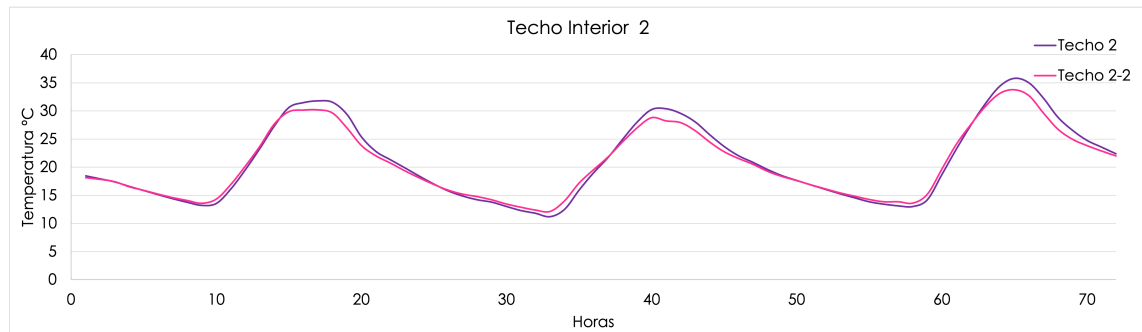


Figura 5.10: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de techo en ambos recintos

En ambas gráficas se observa la misma variación mínima de temperatura en ambos recintos que en las gráficas anteriores de las superficies restantes. Por lo cual, después de analizar todos los resultados se determina que tanto la estructura como la instrumentación si están funcionando correctamente, ya que si mantienen mediciones

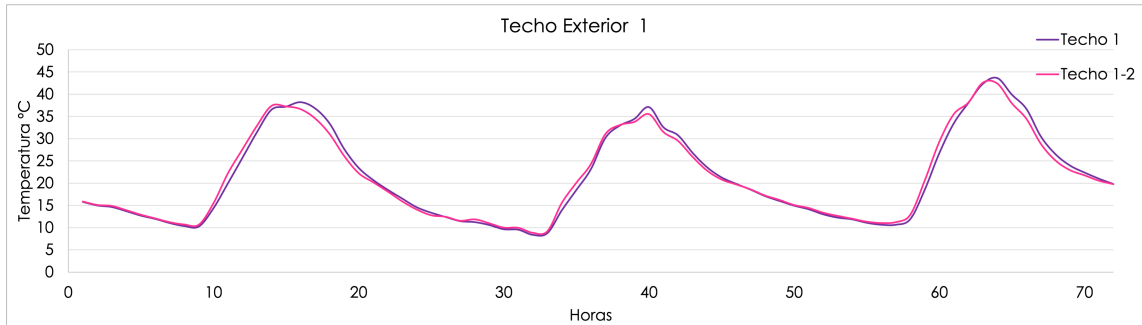


Figura 5.11: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie exterior de techo en ambos recintos

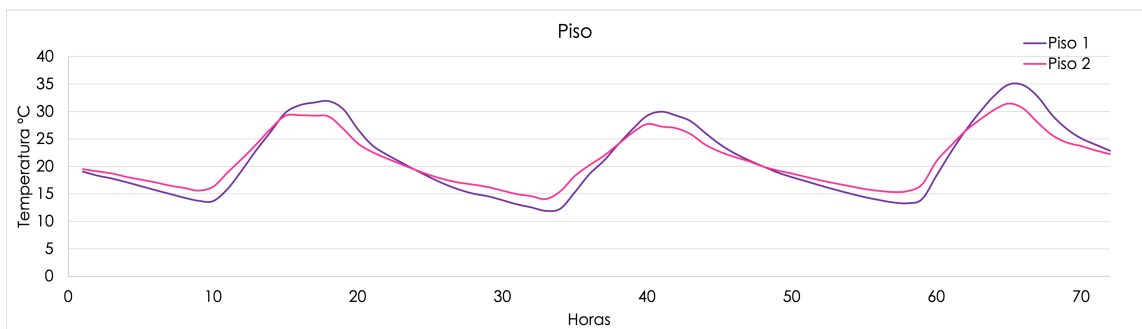


Figura 5.12: Temperaturas registradas por 72 horas en superficie interior de piso en ambos recintos

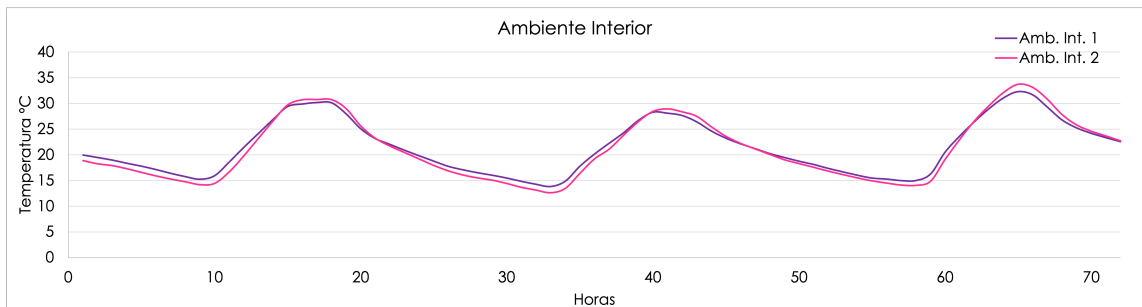


Figura 5.13: Temperaturas registradas por 72 horas en ambiente interior en ambos recintos

similares en la igualdad de condiciones.

5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE TEMPERATURAS ENTRE LA EXPERIMENTACIÓN Y LA SIMULACIÓN

Posteriormente se procede a realizar una simulación de prueba en el código computacional tomando la geometría, materiales y condiciones ambientales en las que se encontraba la instalación experimental del 06 al 08 de Febrero, para realizar una validación empírica entre el código computacional y la instalación experimental.

Se tomaron en cuenta las características de la envolvente anteriormente mencionada en la Tabla 4.3, así como datos meteorológicos y de locación de la Tabla 4.2.

Las simulaciones se realizan bajo las condiciones ambientales mostradas en la Figura 5.14, las cuales son la temperatura y la radiación solar del día 06 al 08 de Febrero.

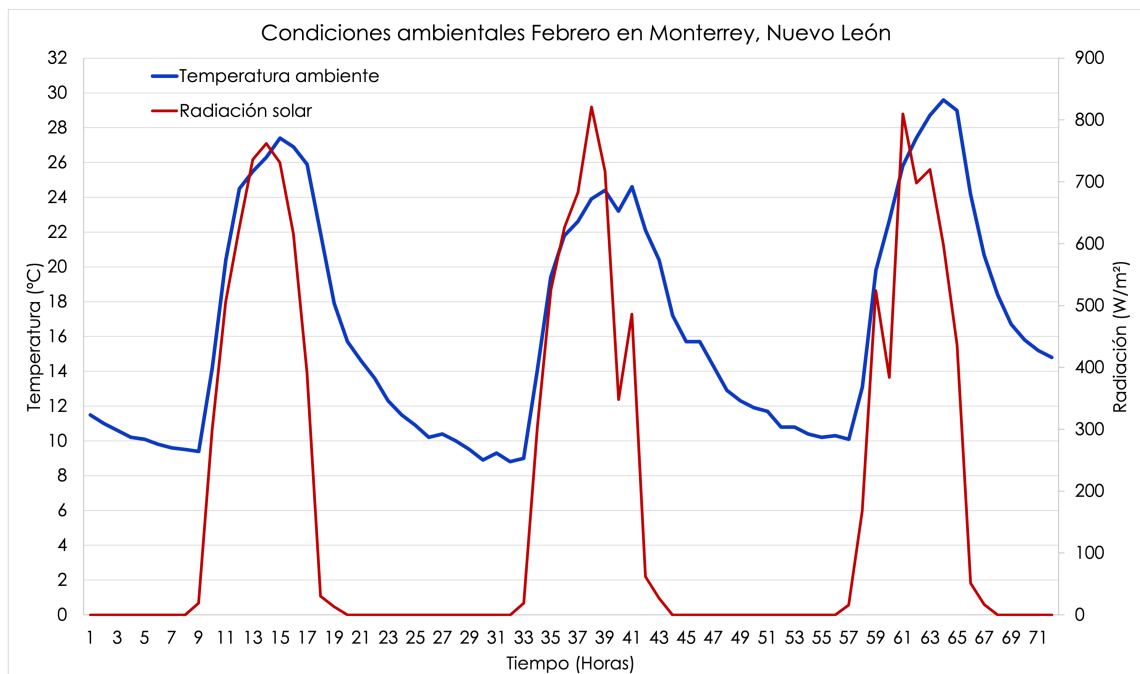


Figura 5.14: Condiciones ambientales del 06 al 08 de Febrero

En la simulación realizada se obtiene los datos presentados en las gráficas 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18 para las paredes exteriores del recinto, en las cuales se indican los resultados comparados con los adquiridos en las tomas de temperatura de la instalación experimental.

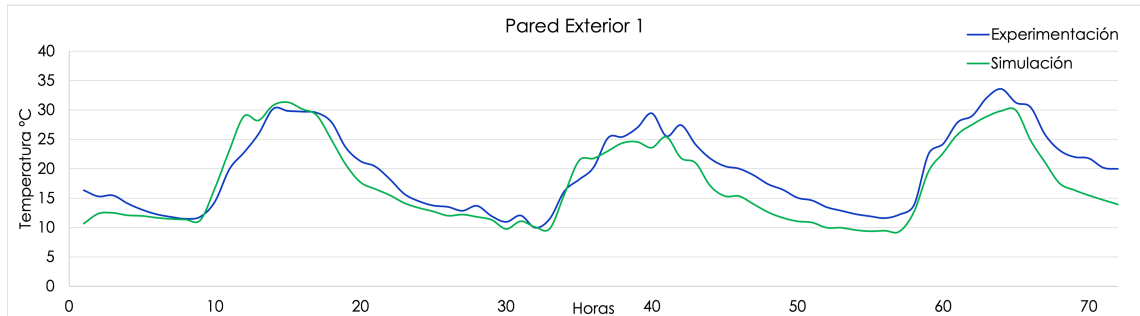


Figura 5.15: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 1

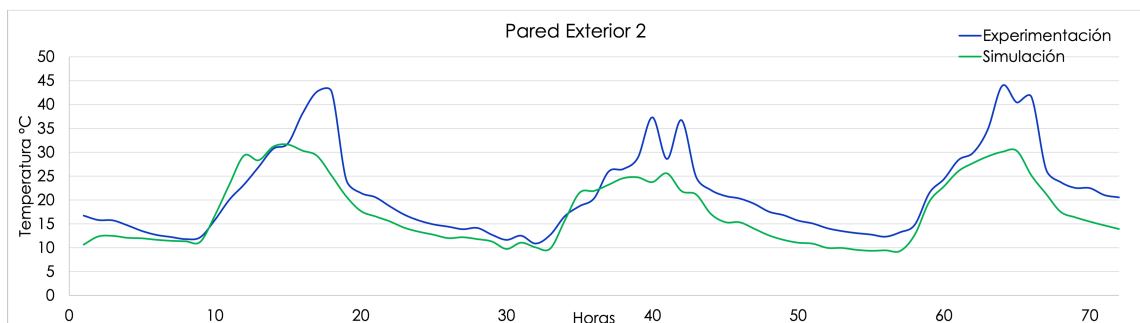


Figura 5.16: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 2

Se obtiene la temperatura media de cada superficie, en base a los datos obtenidos por el código computacional y los registrados en la instalación experimental, para determinar la diferencia porcentual entre los resultados la cual se observa en la Tabla 5.1.

En los resultados podemos notar que las paredes 1, 2 y 4 tienen una variación significativa entre resultados, mientras que la pared 3 no varía más del 10 %.

Se realiza el mismo procedimiento con las paredes interiores del recinto obteniendo las gráficas 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22.

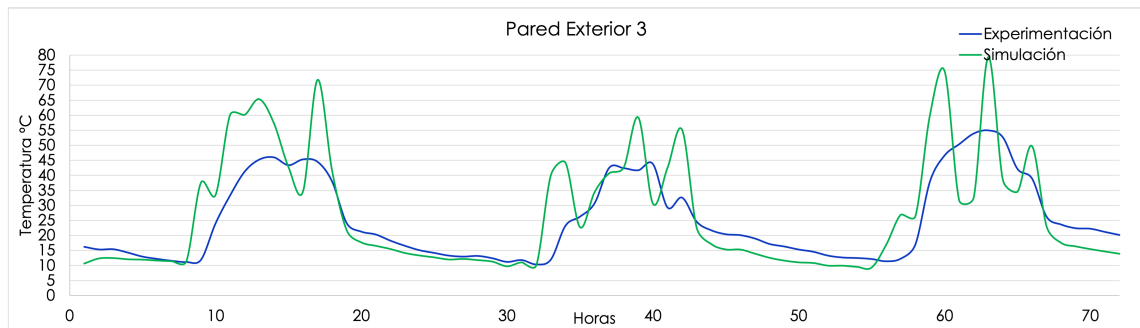


Figura 5.17: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 3

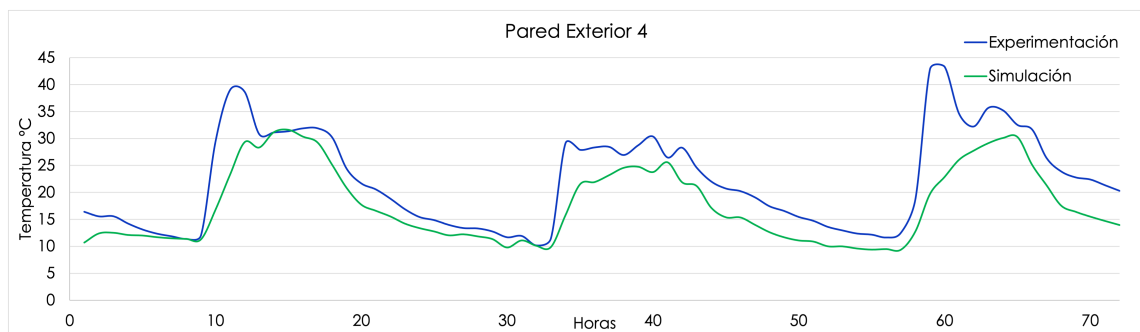


Figura 5.18: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared exterior 4

Tabla 5.1: Resultados obtenidos de temperaturas medias en superficies externas del recinto

Superficie	Unidades	Experimentación	Código	Diferencia (%)
Pared exterior 1	°C	19.60	17.46	10.90
Pared exterior 2	°C	21.41	17.53	18.11
Pared exterior 3	°C	24.91	27.01	8.43
Pared exterior 4	°C	22.11	17.53	20.72

La Tabla 5.2 presenta los resultados de la comparación de las temperaturas medias de las superficies interiores de las paredes.

En la tabla se muestra que todas las paredes tienen una diferencia significativa

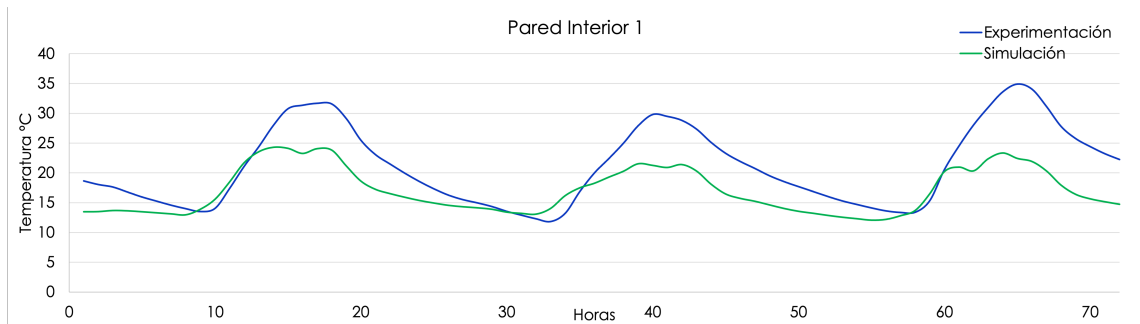


Figura 5.19: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 1

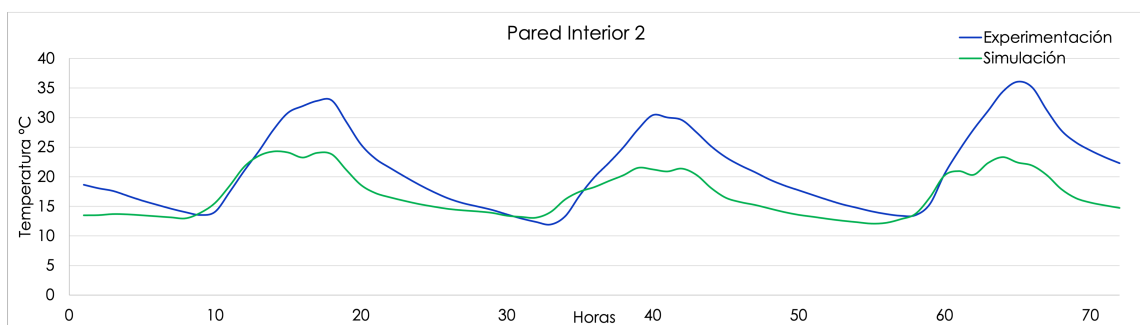


Figura 5.20: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 2

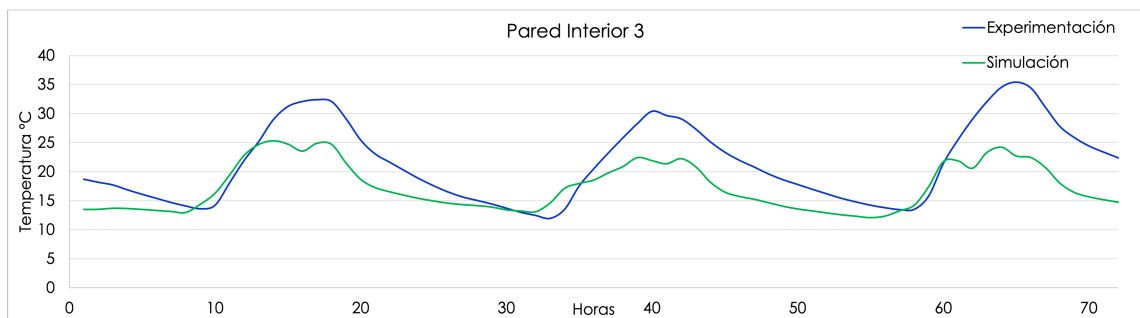


Figura 5.21: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 3

entre los resultados.

Se realiza el mismo procedimiento para la comparación de resultados de las superficie interior y exterior del techo, dichos resultados se presentan en las gráficas

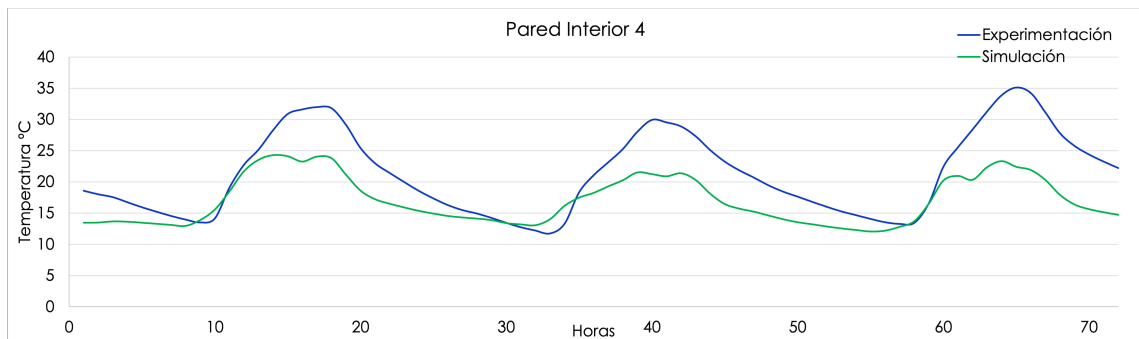


Figura 5.22: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en pared interior 4

Tabla 5.2: Resultados obtenidos de temperaturas medias en superficies internas del recinto

Superficie	Unidades	Experimentación	Código	Diferencia (%)
Pared interior 1	°C	21.16	17.02	19.57
Pared interior 2	°C	21.29	17.02	20.05
Pared interior 3	°C	21.44	17.33	19.15
Pared exterior 4	°C	21.35	17.02	20.27

5.23 y 5.24.

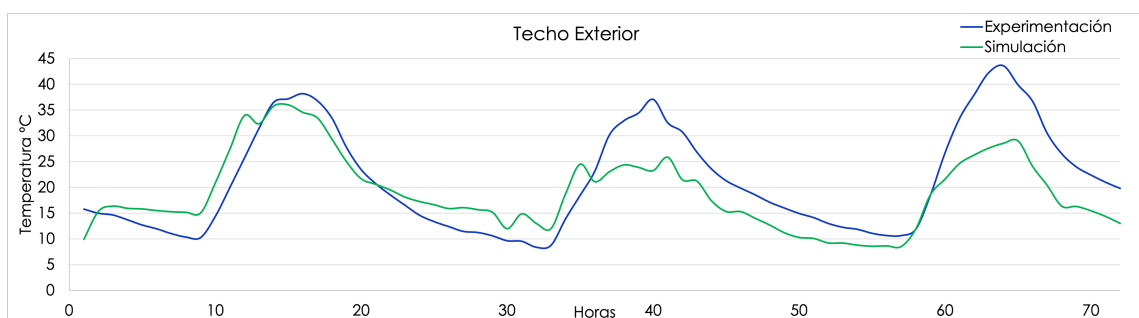


Figura 5.23: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en techo exterior

Los resultados de la comparación de las temperaturas medias obtenidas entre el código y la instalación experimental se exponen en la Tabla 5.3.

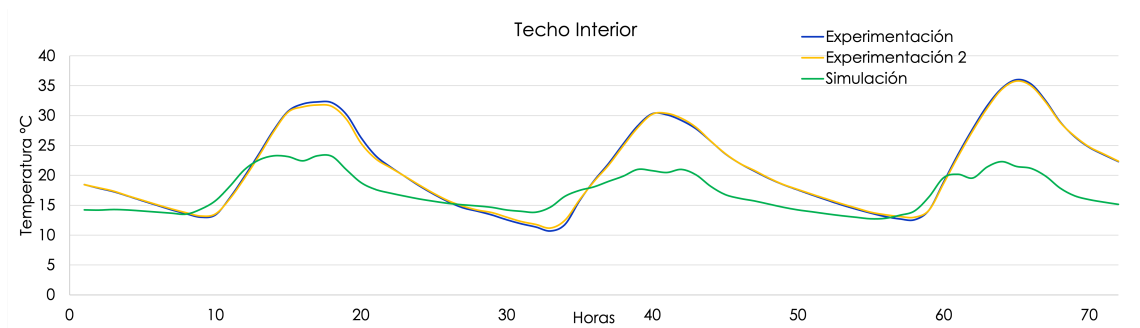


Figura 5.24: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en techo interior

Tabla 5.3: Resultados obtenidos de temperaturas medias en superficies exterior e interior del techo

Superficie	Unidades	Experimentación	Código	Diferencia (%)
Techo exterior	$^{\circ}C$	21.34	18.97	11.11
Techo Interior	$^{\circ}C$	20.99	17.13	18.37
Techo Interior 2	$^{\circ}C$	21.00	17.13	18.44

De igual manera que en las superficies anteriores, se muestra una diferencia significativa de casi un 20% en la superficie del techo interior; mientras que en la superficie exterior solo muestra un poco más del 10%.

Por último se realiza la comparativa entre las temperaturas de área del piso y el ambiente interior del recinto, obteniendo las gráficas 5.25 y 5.26.

Con respecto a la diferencia entre resultados se obtiene la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Resultados obtenidos de temperaturas medias en piso y ambiente interior

Superficie	Unidades	Experimentación	Código	Diferencia (%)
Piso	$^{\circ}C$	21.17	16.43	22.37
Ambiente Interior	$^{\circ}C$	21.48	17.00	20.83

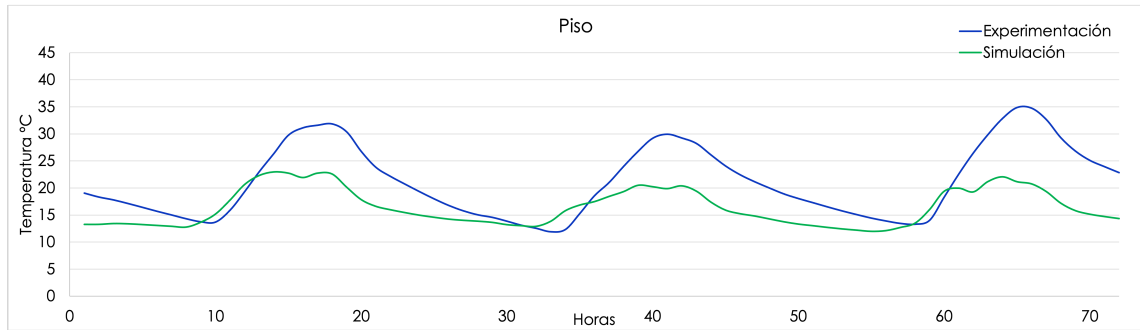


Figura 5.25: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en piso

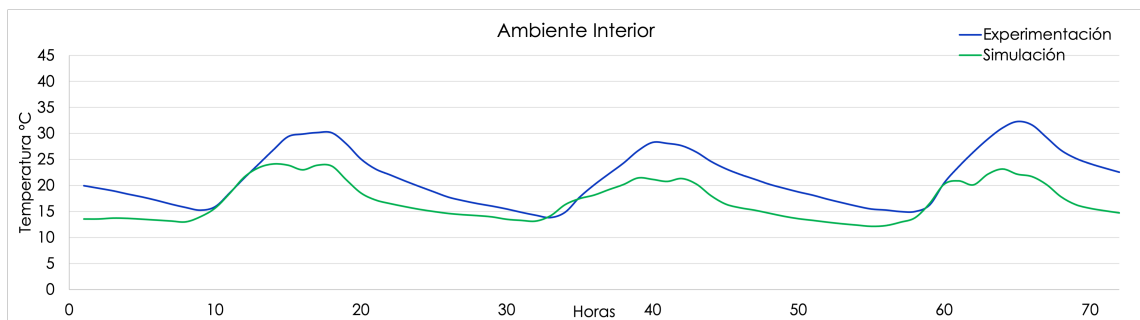


Figura 5.26: Comparativa entre simulación y experimentación de temperaturas registradas durante 72 horas en ambiente interior

En estos últimos resultados se observa la misma diferencia significativa de más del 20 % entre los resultados. Con esto determinamos que nuestra validación empírica si posee un alto grado de incertidumbre.

5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE RECINTO SIN TEJA Y RECINTO CON TEJA

De acuerdo a los datos registrados por los termopares colocados en el recinto, se efectúa el cotejo de los resultados conseguidos de temperaturas registradas por hora en el período del 09 al 15 de Abril del 2021, en la gráfica 5.27 se presentan los datos registrados en la superficie interior del techo y en la gráfica 5.28 se muestra

los datos registrados en el ambiente interior.

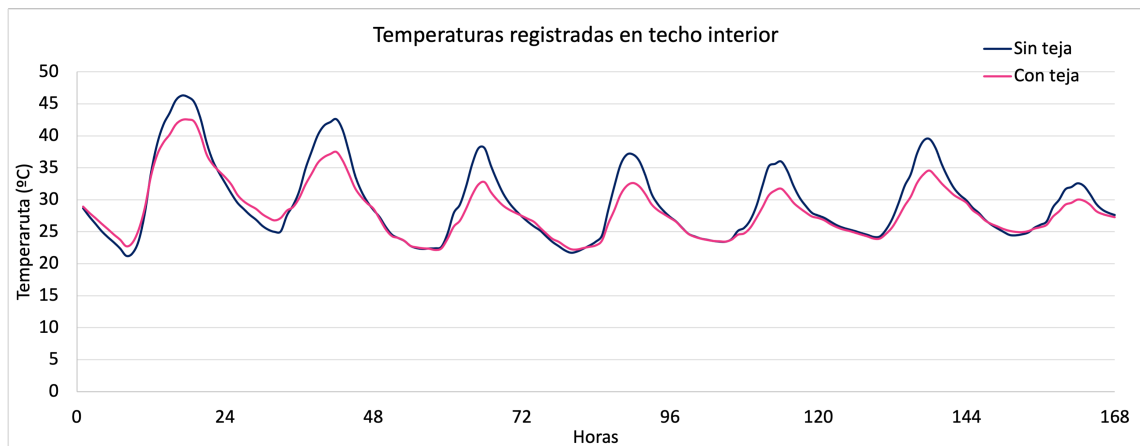


Figura 5.27: Temperaturas de techo interior registradas del 09 al 15 de Abril del 2021

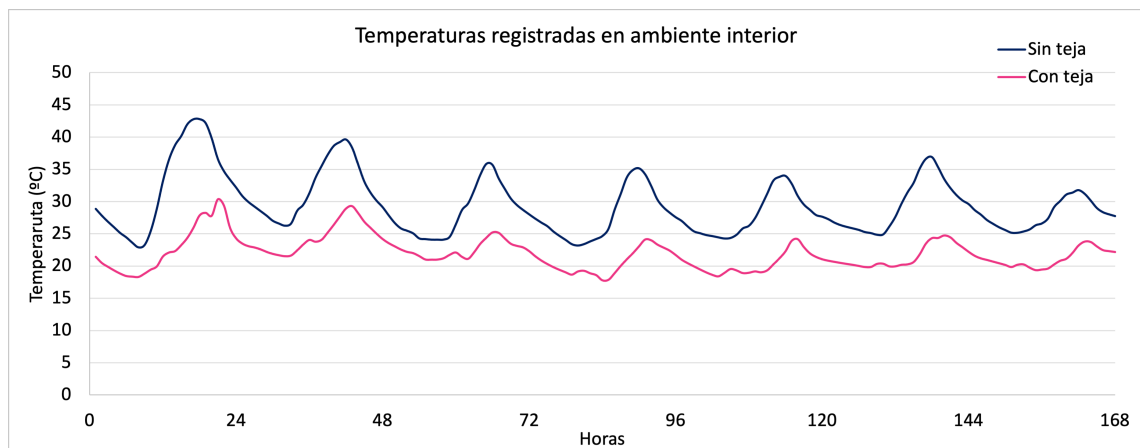


Figura 5.28: Temperaturas de ambiente interior registradas del 09 al 15 de Abril del 2021

En la gráfica podemos observar que las temperaturas del recinto que no cuenta con teja son más elevadas, debido a que posee una mayor transferencia de calor a través del techo.

En la gráfica 5.29 se observa la variación de la temperatura en la superficie interior en grados Celsius entre el recinto sin teja y con teja, mostrando que durante el día mientras se tiene radiación solar si existe una disminución en promedio de 5

$^{\circ}C$ en la temperatura de la superficie interior del techo que cuenta con la cobertura de teja.

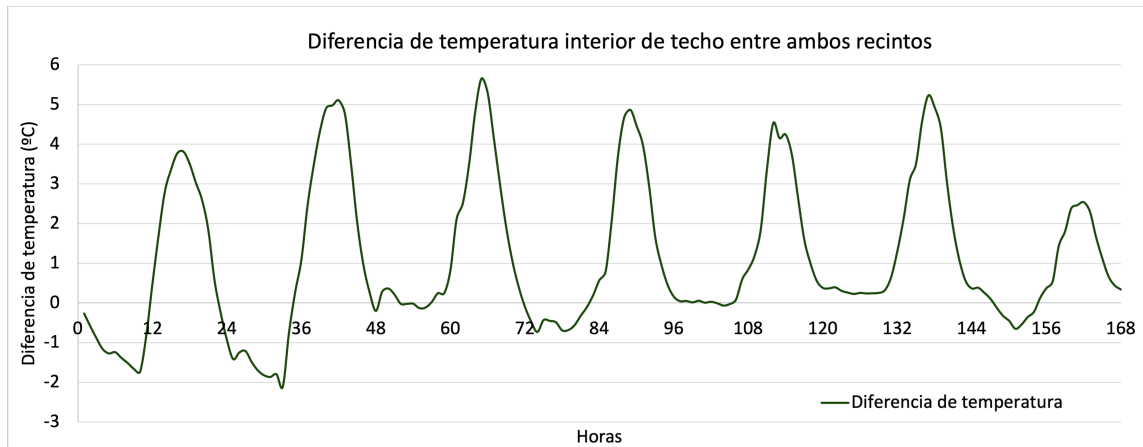


Figura 5.29: Diferencia de temperaturas de techo interior entre recinto sin teja y con teja

En la gráfica 5.30 se muestra que la variación de la temperatura en el ambiente interior en grados Celsius entre el recinto sin teja y con teja, en la gráfica se observa que durante la noche la temperatura ambiente del recinto con teja presenta una disminución entre 4 a 8 $^{\circ}C$ y durante el día cuando existe radiación solar se muestra una disminución ente 10 a 14 $^{\circ}C$.

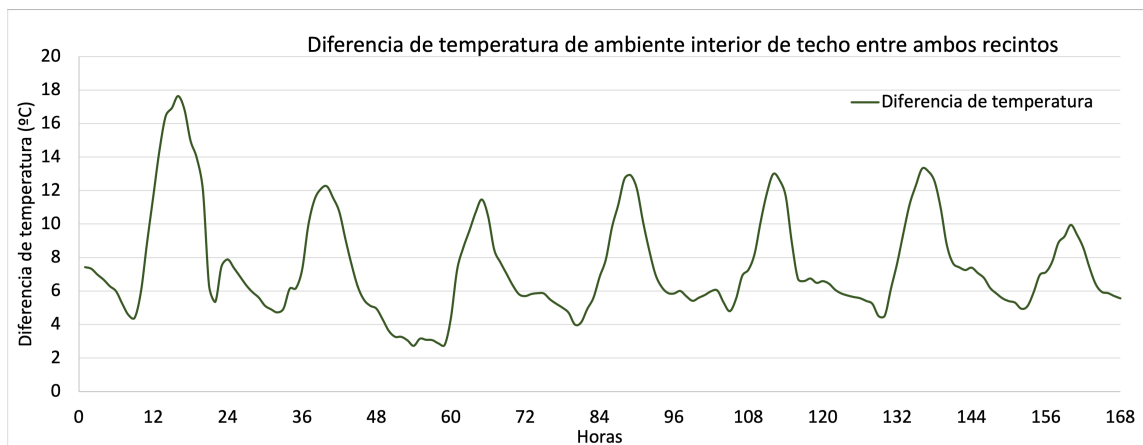


Figura 5.30: Diferencia de temperaturas de ambiente interior entre recinto sin teja y con teja

En la simulación se toman en cuenta las características de los materiales men-

cionados en la Tabla 4.3, los datos meteorológicos y de locación de la Tabla 4.2 y la geometría mencionada anteriormente; además se toman en cuenta las condiciones ambientales de temperatura y radiación del 09 al 15 de Abril, las cuales son mostradas en la gráfica 5.31.

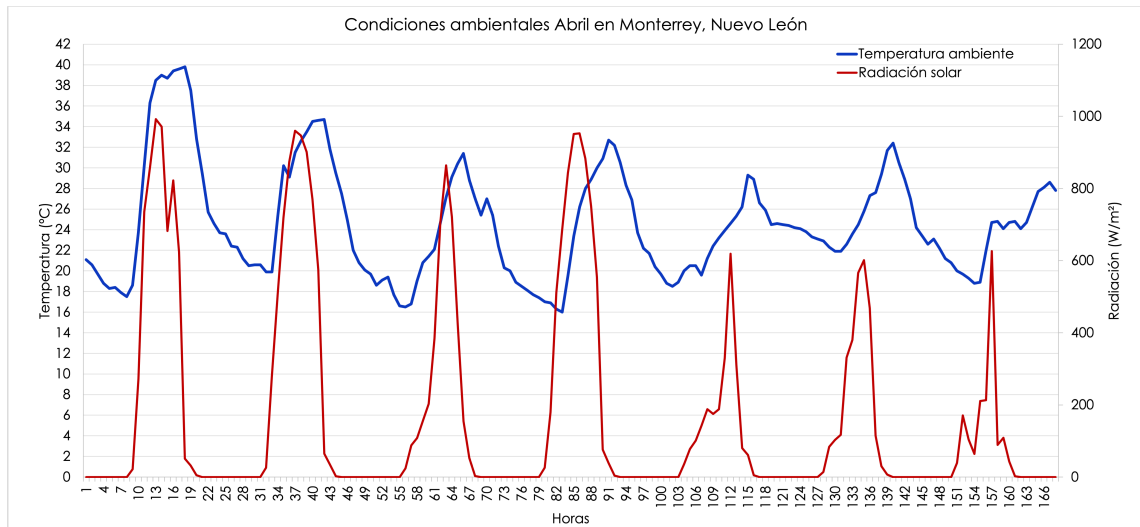


Figura 5.31: Condiciones ambientales de Abril

Obteniendo como resultados de la simulación del código computacional las temperaturas para las superficies exterior e interior del techo, así como la temperatura del ambiente interior, estos valores son mostrados en las gráficas 5.32, 5.33 y 5.34.



Figura 5.32: Temperaturas calculadas en un período de 168 horas en superficie exterior de techo en ambos recintos

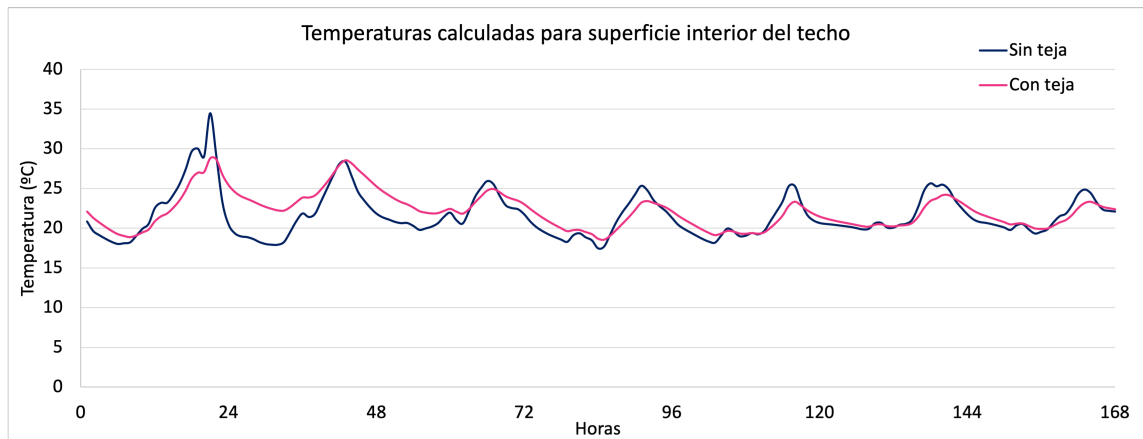


Figura 5.33: Temperaturas calculadas en un período de 168 horas en superficie interior de techo en ambos recintos

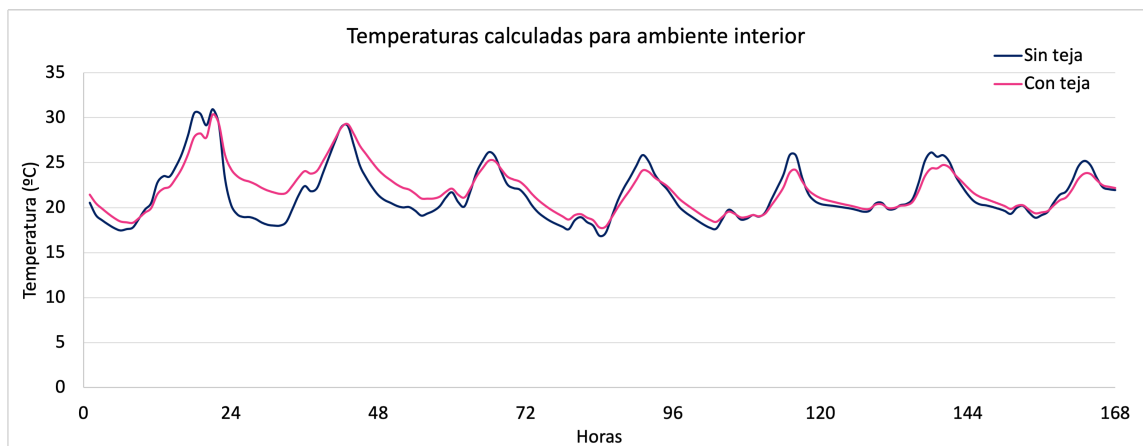


Figura 5.34: Temperaturas calculadas en un período de 168 horas en el ambiente interior en ambos recintos

Se observa que las temperaturas registradas en la superficie exterior tienen una mínima diferencia con respecto al recinto que tiene la capa de teja y el que no tiene, sin embargo sí muestra una diferencia significativa en la comparación de temperaturas de la superficie interior del techo y del ambiente interior. La gráfica 5.35 muestra la diferencia entre las temperaturas de la superficie exterior e interior de ambos recintos, con lo cual se busca comparar el impacto que tiene la capa de teja en la transferencia de calor hacia dentro del recinto. En base a esta información se puede determinar que la capa de teja genera una disminución de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la

temperatura de la superficie interior del techo que no cuenta con la capa de teja contra el que si tiene.

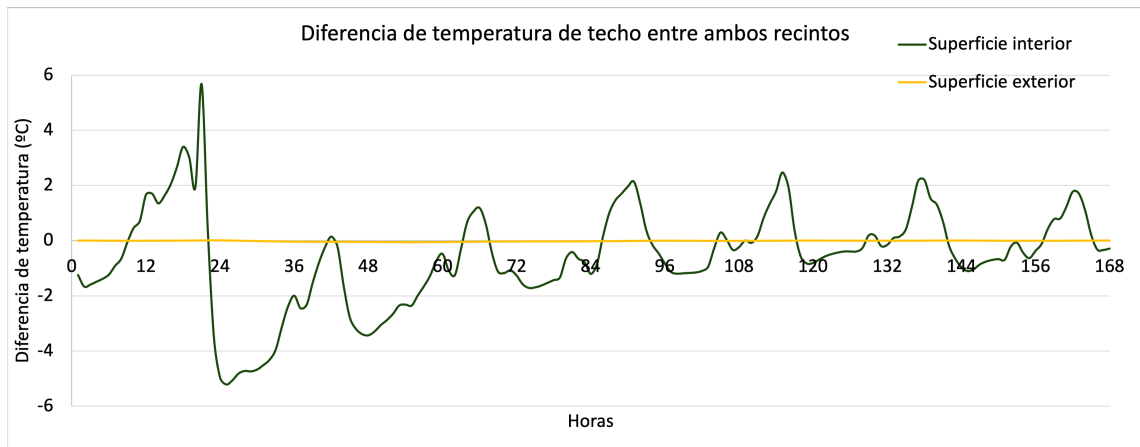


Figura 5.35: Diferencia de temperatura de superficie interior y exterior del techo entre recintos

De igual manera en la gráfica 5.36 se muestra la diferencia de las temperaturas del ambiente interior entre ambos recintos, con los resultados se observa que la implementación de la capa de teja reduce en promedio 2 °C la temperatura del ambiente interior.

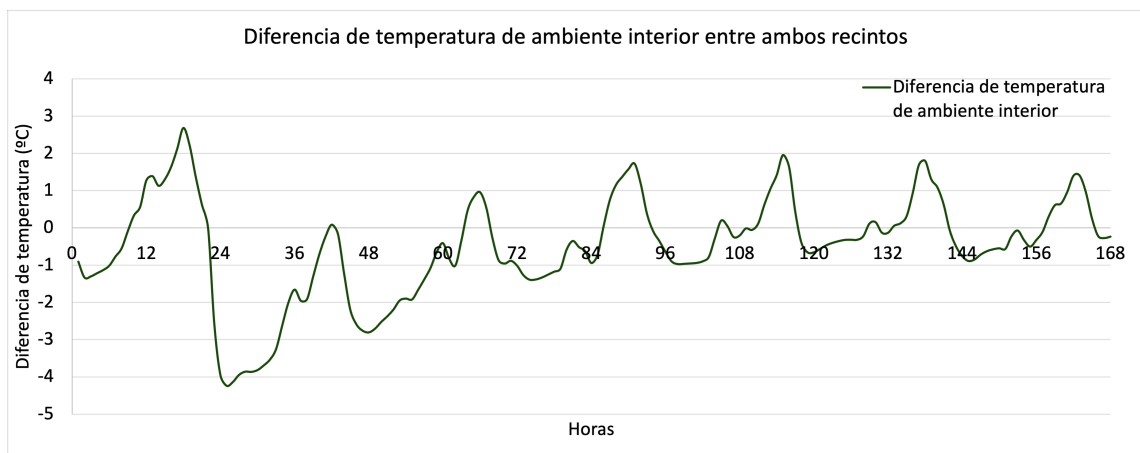


Figura 5.36: Diferencia de temperatura de ambiente interior entre recintos

5.4 IMPACTO ANUAL DE CAPA DE TEJA EN RECINTO CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para poder visualizar el impacto de la teja en el recinto, se procede a realizar una simulación anual para observar el comportamiento de ambos recintos. De acuerdo con los valores obtenidos de esta simulación, se calcula la diferencia de temperaturas entre la temperatura de la superficie interna y la temperatura ambiente interior, estos valores se grafican como valores absolutos y se muestran en la gráfica 5.37.

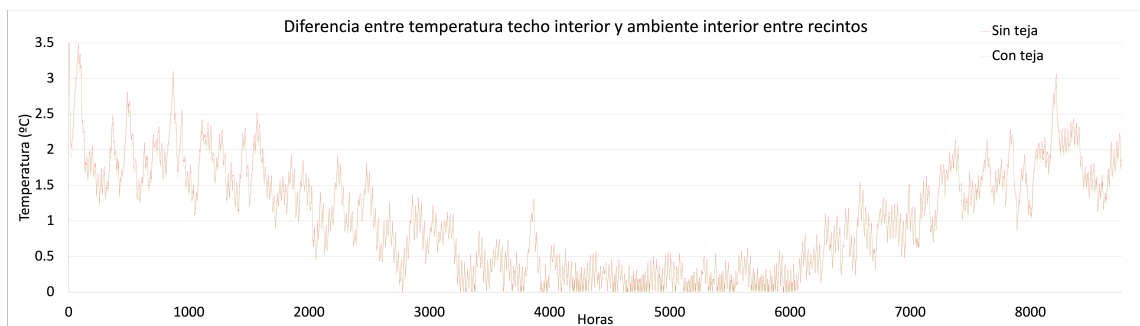


Figura 5.37: Diferencia entre temperatura techo interior y ambiente interior entre recintos

Para realizar un análisis más detallado de los resultados anuales se desglosan gráficas mensuales por ejemplo la gráfica 5.38. La cual corresponde al mes de Enero, estos resultados son obtenidos donde las situaciones climatológicas en el exterior son temperaturas bajas que van de 10 a 0 °C y existe muy poca radiación solar. Este comportamiento está presente en los períodos de invierno y otoño.

Además por la gráfica se puede observar que la delta de temperatura representada es mayor en el recinto que no tiene teja en el techo, por lo cual representa que existe una mayor transferencia de calor a través de su envolvente.

De igual manera, se observa el comportamiento del recinto en los meses de primavera y verano, donde las temperaturas son más elevadas y existe mayor radiación

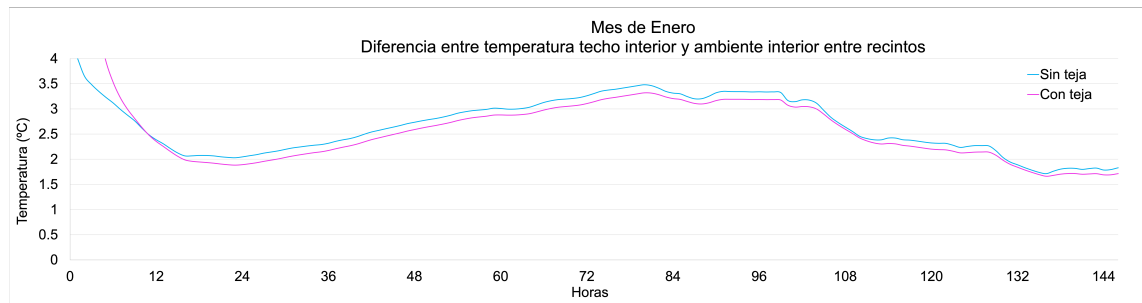


Figura 5.38: Diferencia entre temperatura techo interior y ambiente interior entre recintos

solar, obteniendo la gráfica 5.39, correspondiente al mes de Julio.

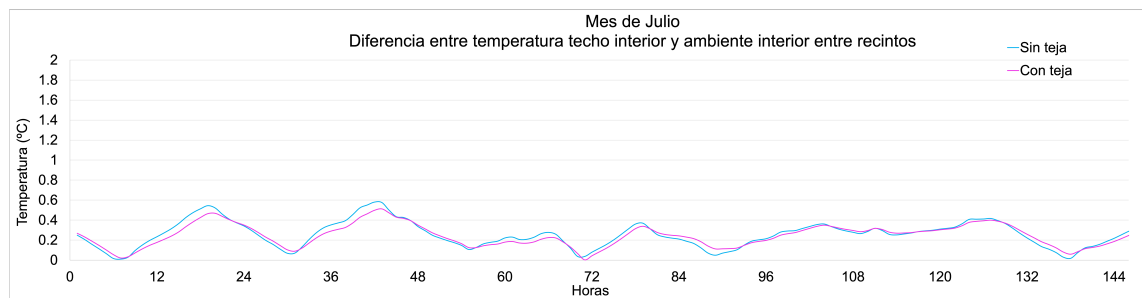


Figura 5.39: Diferencia entre temperatura techo interior y ambiente interior entre recintos

En esta gráfica podemos observar mayor variación de las deltas de temperatura, pero podemos determinar que son más períodos de tiempo en los cuales la delta de temperatura es mayor en el recinto sin teja, es decir tiene mayor transferencia de calor la mayor parte del tiempo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En este apartado se plantean las conclusiones basadas en los resultados obtenidos de las secciones anteriores.

6.1 CONCLUSIONES

- Se pudo configurar las entradas en el código computacional de acuerdo con los parámetros de diseño de los componentes implementados en la instalación experimental.
- Se diseñó, contruyó e instrumentó una instalación experimental de la cual se obtuvieron mediciones de temperatura de las superficies de paredes, piso y techo de la instalación para la validación del código.
- Se realizaron simulaciones computacionales mediante el código, colocando las mediciones de radiación y temperatura ambiente del período medido en la instalación experimental como datos de entrada, para posteriormente realizar una comparación de los resultados de la simulación con los datos adquiridos experimentalmente de las temperaturas en diferentes puntos de la instalación.
- Se evaluó el desempeño térmico de techos de vigueta y bovedilla incorporando una cubierta de teja, obteniendo como resultado una disminución en las temperaturas interiores.
- En la simulación realizada para observar el comportamiento anual se determinó que la cubierta de tejas si es factible para conservar un confort térmico al interior de la vivienda, debido a que cuando las temperaturas son bajas en el exterior permiten al recinto mantener calor en el interior y cuando las temperaturas son mayores en el exterior, disminuyen la transferencia de calor hacia el interior.

REFERENCIAS

- [1] SENER. Balance Nacional de Energía. Technical report, 2018.
- [2] Agencia Internacional de Energía (IEA). Consumo de energía mundial por sector 2018.
- [3] CONNUE. ENCEVI. 2018.
- [4] CONNUE. Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética Edificaciones. 2017.
- [5] Banco Mundial. Atlas de emisiones CO2.
- [6] International Energy Agency. Atlas de emisiones CO2.
- [7] Mohammad S. Al-Homoud. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3):353–366, 2005.
- [8] A.U. Weerasuriya. Predicting Thermal Performance of Different Roof Systems by Using Decision Tree Method. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, pages 27–37, 2014.
- [9] Caren Michels, Saulo Güths, Deivis L. Marinoski, and Roberto Lamberts. Thermal performance and thermal resistance of fibre cement roof tiles: Experimental study. *Energy and Buildings*, 231, 1 2021.

- [10] Govert De With, Nigel Cherry, and John Haig. Thermal benefits of tiled roofs with above-sheathing ventilation. *Journal of Building Physics*, 33(2):171–194, 2009.
- [11] William Miller, Joe Wilson, and Achilles Karagiozis. The Impact of Above-Sheathing Ventilation on the Thermal and Moisture Performance of Steep-Slope Residential Roofs and Attics. *Proceedings of the Fifteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*, 2006.
- [12] Ronnen Levinson, Hashem Akbari, and Joseph C. Reilly. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment*, 42:2591–2605, 7 2007.
- [13] Sunwoo Lee, Sang Hoon Park, Myong Souk Yeo, and Kwang Woo Kim. An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, 44(7):1431–1439, 2009.
- [14] M. D’Orazio, C. Di Perna, and E. Di Giuseppe. The effects of roof covering on the thermal performance of highly insulated roofs in mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 42:1619–1627, 10 2010.
- [15] Hideki Takebayashi, Masakazu Moriyama, and Teruaki Sugihara. Study on the cool roof effect of Japanese traditional tiled roof: Numerical analysis of solar reflectance of unevenness tiled surface and heat budget of typical tiled roof system. *Energy and Buildings*, 55:77–84, 2012.
- [16] Pablo J. Rosado, David Faulkner, Douglas P. Sullivan, and Ronnen Levinson. Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home. *Energy and Buildings*, 80(April):57–71, 2014.
- [17] Onvalee Amornleetrakul, Withaya Puangsombut, and Jongjit Hirunlabh. Field investigation of the small house with the ventilated roof tiles. *Advanced Materials Research*, 931-932:1233–1237, 2014.

- [18] Anna Laura Pisello, Federico Rossi, and Franco Cotana. Summer and winter effect of innovative cool roof tiles on the dynamic thermal behavior of buildings. *Energies*, 7:2343–2361, 2014.
- [19] Chiara Ferrari, Antonio Libbra, Federico Maria Cernuschi, Letizia De Maria, Stefano Marchionna, Matteo Barozzi, Cristina Siligardi, and Alberto Muscio. A composite cool colored tile for sloped roofs with high 'equivalent' solar reflectance. *Energy and Buildings*, 114:221–226, 2016.
- [20] Lili Shen, Qun Zhao, Zhengrong Li, and Jingpeng Zhao. Thermal performance of double-layer black tile roof in winter. *Energy Procedia*, 122:247–252, 2017.
- [21] G. H.M.J.Subashi De Silva and M. L.C. Surangi. Effect of waste rice husk ash on structural, thermal and run-off properties of clay roof tiles. *Construction and Building Materials*, 154:251–257, 2017.
- [22] G. H.M.J. Subashi De Silva and M. P.D.P. Mallwattha. Strength, durability, thermal and run-off properties of fired clay roof tiles incorporated with ceramic sludge. *Construction and Building Materials*, 179:390–399, 2018.
- [23] Sukjoon Oh and Jeff S Haberl. Origins of analysis methods used to design high- performance commercial buildings : Whole- building energy simulation Origins of analysis methods used to design high-performance commercial buildings : Whole-building energy simulation. *Science and Technology for the Built Environment*, 4731(December):1–20, 2015.
- [24] Ignacio Martín and Alarcón Teresa. Evolución de las metodologías para el cálculo de cargas térmicas en edificaciones, desarrolladas por la ASHRAE. *Memoria de la XXVIII Semana Nacional de Energía Solar*, pages 113–116, 2004.
- [25] A González, W Bustamante, A Bobadilla, and C Muñoz. Características relevantes de la simulación energética de viviendas unifamiliares. 66(533):1–13, 2014.

- [26] José Miguel Martínez Vives. *UF0571-Programas informáticos en eficiencia energética en edificios*. Quinta ed edition, 2019.
- [27] J. A. Clarke. *Energy Simulation in Building Design*. Segunda ed edition, 2001.
- [28] Roberto Eliud Soto Espinoza. *Desarrollo de un código computacional para el cálculo dinámico de cargas térmicas en edificaciones*. PhD thesis, UANL, 2012.
- [29] L. Bergman S. Lavine F. Incropera, D. DeWitt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Sexta ed edition, 2007.
- [30] ASHRAE. *ASHRAE Fundamental Handbook SI*. 2017.
- [31] J. Holmann. *Transferencia de calor*. Octava ed edition, 1998.
- [32] C. Yunus. *Transferencia de calor y masa Un enfoque práctico*. Tercera ed edition, 2007.
- [33] Ronald S. Veazey and Preston A. Marx. *Introduction*, volume 47. 2018.
- [34] John A. Duffie and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*,. 4 edition edition, 2013.
- [35] F. Yik C. Underwood. *Modelling methods for energy in buildings*. Primera ed edition, 2004.
- [36] Olga Rossio Delgado Carreño. *Metodología para la evaluación del desempeño anual de sistemas de concentración de energía solar*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [37] D.T. Reindl, W.A. Beckman, and J.A. Duffie. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 47(4):311–312, 1991.
- [38] L. T. Wong and W. K. Chow. Solar radiation model. *Applied Energy*, 69(3):191–224, 2001.

- [39] K. N. Shukla, Saroj Rangnekar, and K. Sudhakar. Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India. *Energy Reports*, 1:96–103, 2015.