



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Estudio térmico de alojamientos portátiles para el
diseño de toldos de mitigación solar**

presentada por

Ing. Maria del Rocio Ponciano Chigo

como requisito para la obtención del grado de

Maestra en Ciencias de la Ingeniería

Director de tesis

Dr. Juan Reyes Reyes

Codirector de tesis

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre 2026.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 03/septiembre/2026

Oficio No. SAC/288/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

MARIA DEL ROCIO PONCIANO CHIGO
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"ESTUDIO TÉRMICO DE ALOJAMIENTOS PORTÁTILES PARA EL DISEÑO DE TOLDOS DE MITIGACIÓN SOLAR"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

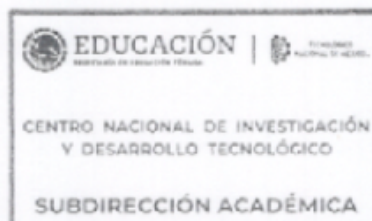
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Coordinación de Ciencias de la Ingeniería
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



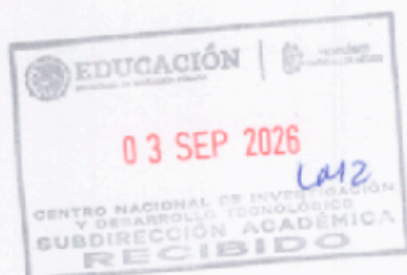
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4106,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Coordinación de Ciencias de la Ingeniería

Cuernavaca, Mor., 02/SEPTIEMBRE/2026

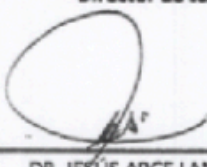
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO
Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la estudiante **MARÍA DEL ROCÍO PONCIANO CHIGO**, con número de control M23CE131, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"ESTUDIO TÉRMICO DE ALOJAMIENTOS PORTÁTILES PARA EL DISEÑO DE TOLDOS DE MITIGACIÓN SOLAR"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.



DR. JUAN REYES REYES
Director de tesis



DR. JESÚS ARCE LANDA
Revisor 1

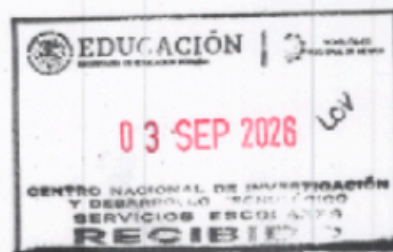


DR. RODOLFO AMALIO VARGAS MÉNDEZ
Codirector de Tesis



DRA. GLORIA LILIA OSORIO GORDILLO
Revisor 2

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



2026
año de
Margarita Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado 5/N Col. Palmira
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770
e-mail: coord.ingenieria@cenidet.tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme vida y salud, por permitirme alcanzar este sueño y culminar esta etapa importante de mi vida.

A mis asesores, el Dr. Juan Reyes Reyes y el Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez, y a mis revisores, la Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo y el Dr. Jesús Arce Landa. Agradezco su tiempo, los conocimientos compartidos y su orientación para la realización de esta investigación.

A mi esposo, por su apoyo incondicional en este proceso. Su ejemplo de trabajo, responsabilidad y constancia me motiva a seguir adelante y a ser mejor cada día.

A mis padres, por su amor, apoyo y confianza incondicional, por acompañarme en cada etapa de este camino y motivarme a continuar con mi formación y a dar siempre lo mejor de mí. A mis hermanas, por estar siempre presentes, por su cariño y por ser un apoyo constante a lo largo de este proceso. De igual manera, agradezco a mis suegros por recibirme con cariño en su hogar, hacerme sentir parte de su familia y brindarme siempre su apoyo y confianza.

A mis amigos Jessica, Karina, Andrea y Noel, agradezco la amistad brindada y cada momento compartido, que guardaré en mi corazón con mucho cariño.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por permitirme formar parte de esta institución y por contribuir a mi formación profesional.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el respaldo institucional y el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

Índice general

CONTENIDO	6
Nomenclatura	1
Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	4
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
1.3. Justificación	7
1.4. Alcances	7
1.5. Estructura del documento	8
2. Marco teórico	9
2.1. Alojamientos portátiles	9
2.1.1. Clasificación de toldos portátiles	11
2.1.2. Componentes principales de un toldo	11
2.1.3. Cubiertas textiles y membranas estructurales	12
2.2. Materiales para cubiertas de toldos	15
2.2.1. Configuraciones multicapa o tipo emparedado	16
2.3. Transferencia de calor y formulación del modelo térmico	17
2.3.1. Interacción de la radiación solar con los materiales	18
2.3.2. Transferencia de calor por conducción	18
2.3.3. Transferencia de calor por convección	20
2.3.4. Radiación térmica	20
2.3.5. Almacenamiento de energía térmica	21
2.3.6. Balance general de energía	21
2.3.6.1. Balance de energía de la capa superior	22
2.3.6.2. Balance de energía de la capa inferior	22
2.3.6.3. Modelo dinámico acoplado	23
2.4. Confort térmico en espacios exteriores protegidos	25

2.4.1. Evaluación experimental del comportamiento térmico	27
3. Resultados	28
3.1. Experimentación de emparedados	28
3.2. Modelo físico y matemático del emparedado	42
3.2.1. Simulación del modelo matemático del fenómeno térmico con datos experimentales	45
3.2.2. Simulación del modelo térmico de toldo a escala	48
3.3. Diseño del toldo	50
3.3.1. Desarrollo de Caja Morfológica	50
3.3.2. Análisis de la Caja Morfológica	54
3.3.2.1. Diseño de toldo combinación 1	54
3.3.2.2. Diseño de toldo combinación 2	56
3.3.2.3. Diseño de toldo combinación 3	56
3.3.3. Boceto de diseño adicional de un toldo portátil adaptable	60
4. Conclusiones y trabajos futuros	65
4.1. Conclusiones	65
4.2. Trabajos futuros	66
Bibliografía	67
Anexo	71
Anexo I: Caja morfológica como criterio de decisión	71
Anexo II: Reconocimientos	73

Índice de figuras

1.1. Componentes de un toldo	6
2.1. Tipos de estructura de toldo portátil	11
2.2. Tipos de techos de toldos	13
2.3. Materiales naturales (Fibra de coco, seda, lana, algodón, etc.)	15
2.4. Materiales sintéticos (Polietileno, nylon, poliestireno, etc.)	16
3.1. Cámara termográfica infrarroja inalámbrica.	28
3.2. Dimensiones del prototipo experimental con materiales tensados.	29
3.3. a) Imagen digital del experimento; b) imagen termográfica de los emparedados. .	30
3.4. Irradiancia solar de la experimentación	32
3.5. a) Temperatura de área cubierta del emparedado 1, b) Temperatura de área cubierta del emparedado 2	33
3.6. Sombras proyectadas por los emparedados vs área sin protección	34
3.7. a) Imagen digital de emparedado 3 y 4, b) Imagen térmica de emparedado 3 y 4	34
3.8. Temperatura de área cubierta	35
3.9. Sombras proyectadas por los emparedados 3 y 4	36
3.10. a) Dimensiones de la cubierta y soportes del prototipo b) Vista frontal del diseño del prototipo experimental a escala	37
3.11. Irradiancia solar percibida el 21 de mayo de 2025	38
3.12. Ubicación geográfica de ITSMIGRA	39
3.13. a) Temperatura inicial de material superior b) Temperatura inicial de material inferior	40
3.14. Comportamiento térmico en un toldo a escala	41
3.15. Área sombreada vs área expuesta	41
3.16. Área sombreada vs área expuesta	42
3.17. Emparedado expuesto a radiación solar	43
3.18. Temperatura experimental del material superior: acrílico con fibra de vidrio. . . .	45
3.19. Temperatura experimental del material inferior: aislante térmico con espuma. . .	46
3.20. Comparación experimental de la temperatura en los materiales del emparedado uno.	46
3.21. Comparación entre temperaturas experimentales y simuladas del emparedado uno.	47
3.22. Temperaturas experimentales de toldo a escala vs simulación	49
3.23. Combinación de los atributos para el diseño del toldo parte 2	53
3.24. Caja morfológica de un toldo	53

3.25. Combinaciones de variantes de atributos de Caja morfológica	54
3.26. Espacio interior del toldo con base rectangular	55
3.27. Toldo cuatro aguas con doble techo vista en perspectiva	56
3.28. Toldo cuatro aguas con doble techo vista frontal	57
3.29. Toldo cuatro aguas mono techo (vista en perspectiva)	58
3.30. Boceto diseño de toldo ajustable	61
3.31. Vista superior de diseño de toldo ajustable	62
3.32. Boceto diseño de toldo ajustable	64
1. Invitación para participación como conferencista	74
2. Reconocimiento participación como conferencista	75
3. Reconocimiento participación como ponente	76
4. Participación como ponente (póster)	77
5. Participación como ponente (póster)	78
6. Redacción de artículo	79
7. Participación como ponente (póster)	80

Lista de tablas

2.1. Propiedades estructurales de materiales. Adaptado de [14].	12
3.1. Datos de los materiales utilizados en la experimentación.	30
3.2. Irradiancia solar registrada durante la experimentación.	31
3.3. Parámetros de materiales del emparedado 1	32
3.4. Irradiancia solar registrada en intervalos de tiempo seleccionados.	38
3.5. Datos de los materiales	38
3.6. Parámetros de materiales de la experimentación	40
3.7. Temperaturas experimentales registradas de un toldo a escala	41
3.8. Criterios considerados para el diseño del toldo portátil.	59
3.9. Justificación técnica de los elementos seleccionados para el diseño del toldo portátil.	60
3.10. Mejoras propuestas para el diseño del toldo portátil adaptable.	63

Nomenclatura

Símbolo	Nombre	Unidad
λ	Conductividad térmica	$W/(m \cdot ^\circ C)$
h_i	Coefficiente de transferencia de calor por convección	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
S_i	Área superficial expuesta al ambiente	m^2
A	es el área superficial de contacto y transversal de conducción	m^2
m_i	Masa del material	kg
c_i	Calor específico del material	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
T_i	Temperatura instantánea de la capa superior	$^\circ C$
T_a	Temperatura del ambiente circundante	$^\circ C$
T_{surr}	Temperatura absoluta del entorno circundante	K
I	Irradiancia solar incidente variante en el tiempo	W/m^2
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$)	$W/(m^2 \cdot K^4)$
L	Grosor o espesor de la capa intermedia	m
t	Tiempo cronológico de la evaluación o simulación	s
$T_{1,0}$	Temperatura inicial de material superior	$^\circ C$
$T_{2,0}$	Temperatura inicial de material inferior	$^\circ C$
α	Absortividad solar del material (0 -1)	adimensional
ϵ	Emisividad de la superficie del material (0 -1)	adimensional
i	i -ésima capa (1,2,..n)	adimensional

Resumen

Los toldos portátiles se utilizan ampliamente como sistemas de protección solar en espacios exteriores; sin embargo, las cubiertas convencionales no siempre proporcionan condiciones adecuadas de confort térmico, debido a que los materiales pueden absorber parte de la radiación solar incidente y transferir calor hacia el área protegida. En este contexto, la presente investigación desarrolla un estudio teórico y experimental del comportamiento térmico de cubiertas para toldos portátiles, con el objetivo de identificar combinaciones de materiales y configuraciones geométricas que contribuyan a mejorar la mitigación de la ganancia de calor solar. Como estrategia de aislamiento térmico, se evaluaron configuraciones multicapa tipo emparedado, integradas por materiales con diferentes propiedades térmicas y ópticas. El comportamiento térmico del sistema se representó mediante un modelo matemático transitorio implementado en MATLAB, considerando los principales mecanismos de transferencia de calor involucrados en la cubierta. Se realizaron pruebas experimentales bajo exposición directa a la radiación solar para registrar las temperaturas superficiales de los materiales, así como las temperaturas de las áreas sombreadas y expuestas. Adicionalmente, se empleó el Análisis Morfológico mediante la Caja de Zwicky como una herramienta sistemática de diseño para explorar y seleccionar alternativas relacionadas con los materiales, la geometría y las características funcionales del toldo. Los resultados experimentales y de simulación muestran que la selección y disposición de los materiales influyen significativamente en la transferencia de calor hacia la capa inferior y en la temperatura del área protegida. En particular, el uso de materiales con baja emisividad y alta reflectividad solar, como el aislante térmico de aluminio, contribuyó a limitar la ganancia de calor hacia el interior. Asimismo, la incorporación de configuraciones de doble techo se identificó como una estrategia de diseño que puede favorecer la evacuación del aire caliente acumulado mediante convección natural. En términos generales, los resultados indican que las cubiertas multicapa que incorporan barreras térmicas y radiantes representan una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño térmico de los toldos portátiles. Este estudio proporciona una base teórica y experimental para el diseño de sistemas de protección solar térmicamente más eficientes, considerando de manera conjunta la selección de materiales, los mecanismos de transferencia de calor, la geometría de la cubierta y la ventilación natural. Palabras clave: toldo portátil, mitigación de la ganancia de calor solar, transferencia de calor, configuración multicapa, confort térmico, modelado térmico.

Palabras claves: Toldo portátil, transferencia de calor, configuración multicapa, confort térmico, modelado térmico.

Abstract

Portable canopies are widely used as solar protection systems in outdoor spaces; however, conventional covers do not always provide adequate thermal comfort conditions because their materials may absorb part of the incident solar radiation and transfer heat to the protected area. In this context, this research presents a theoretical and experimental study of the thermal behavior of portable canopy covers, with the aim of identifying material combinations and geometric configurations that can contribute to improved solar heat mitigation. As a thermal insulation strategy, multilayer sandwich configurations composed of materials with different thermal and optical properties were evaluated. The thermal behavior of the system was represented by a transient mathematical model implemented in MATLAB, considering the main heat transfer mechanisms involved in the cover. Experimental tests under direct solar exposure were conducted to record the surface temperatures of the materials, as well as the temperatures of shaded and exposed areas. In addition, Morphological Analysis using the Zwicky Box was employed as a systematic design tool to explore and select alternatives involving materials, geometries, and functional characteristics of the canopy. The experimental and simulation results show that the selection and arrangement of materials significantly influence heat transfer toward the lower layer and the temperature of the protected area. In particular, the use of materials with low emissivity and high solar reflectivity, such as aluminum-based thermal insulation, contributed to limiting heat gain toward the interior. Likewise, the incorporation of double-roof configurations was identified as a design strategy that can promote the removal of accumulated hot air through natural convection. Overall, the results indicate that multilayer covers incorporating thermal and radiant barriers represent a technically feasible alternative for improving the thermal performance of portable canopies. This study provides a theoretical and experimental basis for the design of more thermally efficient solar protection systems by jointly considering material selection, heat transfer mechanisms, cover geometry, and natural ventilation.

Keywords: portable canopy, heat transfer, multilayer configuration, thermal comfort, thermal modeling.

Capítulo 1

Introducción

Los toldos portátiles son estructuras ligeras y desmontables utilizadas para generar espacios de sombra y protección temporal al aire libre. Su uso se debe principalmente a su bajo costo relativo, facilidad de montaje, movilidad y adaptación a diferentes espacios exteriores. Sin embargo, aunque estas estructuras proporcionan sombra, no siempre garantizan condiciones adecuadas de confort térmico, especialmente cuando se emplean en regiones con alta irradiancia solar y temperaturas elevadas.

La cubierta de este tipo de estructuras está fabricada con materiales ligeros cuya función principal es bloquear parcialmente la radiación solar directa. No obstante, estos materiales pueden absorber una fracción importante de la energía incidente y transferir calor hacia el interior del espacio protegido. Desde el punto de vista físico, este comportamiento está asociado con los mecanismos de transferencia de calor por radiación, conducción y convección, así como con propiedades del material como la conductividad térmica, la emisividad, la reflectividad, la absorptividad y el espesor [16, 26, 36].

La acumulación de calor bajo una cubierta puede generar condiciones de incomodidad térmica para los usuarios, reduciendo la efectividad del toldo como sistema de mitigación solar. El confort térmico depende de variables ambientales como la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad relativa y la velocidad del aire, además de factores personales relacionados con la actividad metabólica y el aislamiento de la vestimenta [4, 18]. Por esta razón, el diseño de alojamientos portátiles debe considerar no solo criterios de portabilidad, resistencia y facilidad de instalación, sino también el desempeño térmico de los materiales y la ventilación del espacio interior.

Una alternativa para mejorar el comportamiento térmico de las cubiertas consiste en emplear configuraciones multicapa o tipo emparedado. Estas estructuras combinan capas externas con un núcleo intermedio, permitiendo integrar materiales con propiedades complementarias para mejorar la resistencia mecánica, reducir el peso y aumentar la capacidad de aislamiento térmico [45, 46].

Este tipo de configuración ha sido ampliamente utilizada en sectores como la construcción, la

aeronáutica, el transporte y la energía eólica debido a su relación favorable entre rigidez, ligereza y desempeño funcional [10, 15].

En este contexto, la presente investigación aborda el estudio térmico de alojamientos portátiles para el diseño de toldos de mitigación solar. Para ello, se analiza el comportamiento térmico de materiales expuestos a radiación solar y se propone el uso de configuraciones tipo emparedado como estrategia para reducir la transferencia de calor hacia el interior del toldo. El estudio integra el análisis de los mecanismos de transferencia de calor, la experimentación con materiales seleccionados y el desarrollo de un modelo matemático transitorio que permite representar la evolución de la temperatura en la cubierta.

La validación experimental se realiza mediante pruebas de exposición solar, considerando mediciones de temperatura superficial, temperatura en el área sombreada y temperatura en el área expuesta. A partir de estos resultados, se establecen criterios para seleccionar materiales y proponer una geometría de toldo portátil que favorezca la mitigación solar, la circulación natural del aire y el confort térmico del usuario.

La contribución principal de esta tesis consiste en establecer una base técnica para el diseño de toldos portátiles con mejor desempeño térmico mediante el uso de materiales multicapa y criterios de transferencia de calor. Con ello, se busca proponer una alternativa viable, accesible y funcional que no solo proporcione sombra, sino que también reduzca la ganancia de calor y mejore las condiciones de uso en espacios exteriores.

1.1. Planteamiento del problema

Los toldos portátiles disponibles en el mercado se emplean principalmente como sistemas de sombra; sin embargo, su desempeño térmico suele ser limitado cuando son utilizados bajo condiciones de alta radiación solar. En muchos casos, la selección de materiales responde a criterios de bajo costo, ligereza, impermeabilidad y facilidad de montaje, pero no necesariamente a propiedades térmicas que permitan reducir la transferencia de calor hacia el espacio interior.

Esta situación provoca que, aun cuando el usuario se encuentre protegido de la radiación solar directa, el área bajo el toldo pueda presentar acumulación de calor debido a la absorción de energía en la cubierta y a su posterior transferencia mediante conducción, convección y radiación (ver Figura 1.1).

Como consecuencia, el espacio sombreado no siempre ofrece condiciones adecuadas de confort térmico, lo que limita la efectividad del toldo como una solución de mitigación solar. Debido a que los diseños comerciales no consideran de manera cuantificable el comportamiento térmico de los materiales ni la influencia de la geometría de la cubierta en la ventilación natural del espacio protegido. Por lo tanto, existe una falta de criterios técnicos que permitan seleccionar y combinar materiales con base en su capacidad para disminuir la ganancia de calor y mejorar las

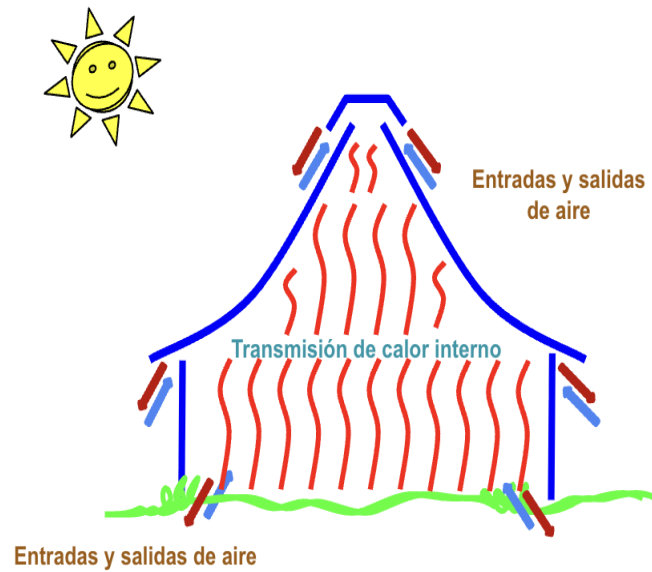


Figura 1.1: Componentes de un toldo

condiciones térmicas del interior del toldo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un estudio teórico y experimental de la mitigación solar que se puede generar en un toldo portátil, con el propósito de proponer los diseños geométricos y la selección de los materiales para la construcción de un prototipo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar los fenómenos térmicos presentes en un material expuesto a la radiación solar, el material expuesto se parametrizará para hacer las veces de una muestra superficial de un toldo.
- Generar un conjunto de experimentos con materiales determinados para caracterizar los efectos térmicos y de mitigación solar. Estos materiales se determinan por sus prestaciones para construir toldos.
- Proponer el diseño de un toldo portátil que cumpla con las características de mitigación solar y confort térmico para la elaboración de un prototipo.

1.3. Justificación

El diseño de un toldo portátil con una combinación de materiales por medio de la técnica de emparedado se considera una solución ante la necesidad de mejora del confort térmico interno de los toldos portátiles, siendo un espacio que ofrece habitabilidad y brinde una mejora en la calidad de vida del usuario al usar espacios expuestos a la radiación solar. Los alojamientos portátiles no solo brindan comodidad en actividades recreativas familiares al aire libre, sino que también resultan esenciales en contextos comerciales, como puestos de venta, ferias, mercados y exhibiciones, donde la protección solar influye directamente en la salud, bienestar y rendimiento de los individuos.

La naturaleza portátil, desmontable y reutilizable de este tipo de estructuras permite su uso en diversos escenarios, prolonga su vida útil y facilita su adaptación a múltiples necesidades al aire libre. Este aspecto contribuye a una gestión más eficiente de los recursos, reducir la demanda de productos desechables o de soluciones improvisadas que suelen ser menos duraderas y eficientes desde el punto de vista térmico.

Asimismo, el desarrollo de toldos diseñados con materiales duraderos de mejor calidad favorece a prácticas alineadas con la economía circular, al minimizar la generación de residuos y disminuir la frecuencia de reemplazo de materiales. De esta manera, la investigación no solo mejora el desempeño térmico del espacio cubierto, sino que también promueve la incorporación de materiales mediante la técnica de emparedado. Con el propósito de lograr una reducción de al menos 5°C en la temperatura superficial de la zona sombreada respecto a la superficie expuesta bajo condiciones comparables.

Desde el punto de vista científico, esta investigación contribuye al análisis del comportamiento térmico de toldos portátiles y al uso de configuraciones multicapa de materiales, generando bases para futuros desarrollos. En el ámbito social, busca mejorar el confort térmico y la calidad de vida de los usuarios, reduciendo riesgos asociados a la exposición al calor. Finalmente, desde la perspectiva ambiental, promueve soluciones innovadoras que optimizan el uso de materiales, alineándose con los objetivos 9 y 11 de la Agenda 2030 en materia de innovación y sostenibilidad.

1.4. Alcances

- Desarrollo de un modelo teórico de transferencia de calor (radiación, conducción y convección) aplicado a materiales de toldos.
- Evaluación experimental del comportamiento térmico de materiales seleccionados bajo radiación solar.
- Análisis de parámetros térmicos como temperatura superficial y temperatura bajo el toldo.
- Propuesta de un diseño conceptual de toldo portátil orientado al confort térmico.

1.5. Estructura del documento

Capítulo I: Este capítulo establece el marco general de la tesis, describiendo el contexto y la motivación que impulsan esta investigación. Se exponen claramente la problemática que se aborda, enfocándose en la necesidad de optimizar el diseño y los materiales de toldos para mejorar el confort térmico en espacios exteriores. Estableciéndose los objetivos, alcances y justificación para la realización de la investigación.

Capítulo II: En este capítulo se presentan y definen conceptos teóricos del toldo y tipos de toldos. Se aborda la transferencia de calor, materiales utilizados, etc. fundamentales para la investigación.

Capítulo III: En este capítulo se muestra los resultados de la simulación del modelo matemático así como los resultados de las pruebas experimentales de los materiales. Mostrándose además las propuestas de diseños de los prototipos de un toldo que garantice una mejora en mitigación solar.

Capítulo IV: En este capítulo se muestran las conclusiones y trabajos futuros del proyecto de tesis. Finalmente, se presenta la bibliografía y anexos de información complementaria del trabajo de investigación.

Capítulo 2

Marco teórico

El presente capítulo reúne los fundamentos teóricos necesarios para analizar el comportamiento térmico de alojamientos portátiles expuestos a radiación solar. En primer lugar, se describen las características generales de los toldos portátiles, sus componentes principales y la influencia de la geometría de la cubierta en la protección solar y la ventilación natural. Posteriormente, se presentan las propiedades térmicas y ópticas de los materiales empleados en cubiertas, con énfasis en configuraciones multicapa o tipo emparedado.

Asimismo, se desarrollan los principios de transferencia de calor que intervienen en una cubierta expuesta al ambiente, considerando los mecanismos de radiación, conducción y convección. Estos conceptos permiten sustentar el modelo matemático empleado para representar la evolución térmica de los materiales. Finalmente, se abordan los conceptos de confort térmico, evaluación experimental mediante termografía infrarroja y análisis morfológico como herramienta para la selección conceptual del diseño del toldo.

2.1. Alojamientos portátiles

Los alojamientos portátiles son estructuras temporales diseñadas para proporcionar sombra, protección y resguardo en espacios exteriores. Dentro de esta categoría, los toldos portátiles destacan por su facilidad de montaje, transporte y adaptación a distintas condiciones de uso, tales como actividades recreativas, comerciales, comunitarias y de atención provisional.

Un toldo se compone, de manera general, de dos elementos principales: la cubierta y la estructura de soporte. La cubierta, comúnmente fabricada con materiales textiles, polímeros o compuestos, tiene la función de interceptar la radiación solar directa, reducir la exposición del usuario y proteger parcialmente contra factores ambientales como lluvia o viento. Desde el punto de vista térmico, la cubierta es el componente más relevante, debido a que recibe directamente la radiación solar y participa en los procesos de absorción, reflexión, transmisión y emisión de energía. Por esta razón, el desempeño de un toldo no depende únicamente de su capacidad para generar sombra, sino también de las propiedades térmicas y ópticas de los materiales que conforman la cubierta [16, 26].

La estructura de soporte, por su parte, proporciona estabilidad mecánica y permite mantener la forma geométrica del sistema. Existen dos tipos de estructuras, estructura fijas y portátiles.

Estructuras fijas: estas son conocidas como membranas estructurales hechas para cubrir áreas extensas para estructura con diseños arquitectónicos. Su diseño y estructura pueden variar según las necesidades específicas y el entorno donde se instalen, algunos de los tipos de toldos más importantes se mencionan a continuación:

- **Brazos invisibles (articulados):** se extiende mediante brazos mecánicos sin necesidad de soportes frontales, generando un espacio libre debajo de la estructura. Esta característica lo hace ideal para terrazas y patios, ya que permite una adecuada ventilación y una proyección eficiente de sombra.
- **Cofre:** es un sistema retráctil que cuenta con una caja protectora donde se resguardan la lona y los mecanismos cuando el toldo está recogido. Esta protección reduce el desgaste por exposición a agentes ambientales, aumentando así la durabilidad del sistema.
- **Vertical enrollable:** se despliega en dirección vertical, funcionando como una cortina que bloquea la radiación solar lateral y el viento. Es comúnmente utilizado en balcones y terrazas, donde además contribuye a mejorar la privacidad y el control térmico en espacios semiabiertos.
- **Capota:** se distingue por su forma curva o semicircular, sostenida por una estructura rígida. Se utiliza principalmente en ventanas, puertas y locales comerciales, combinando una función estética con la capacidad de reducir la incidencia directa de la radiación solar en las aberturas.
- **Vela:** consiste en superficies de tela tensada, generalmente con formas triangulares o rectangulares, ancladas a distintos puntos. Este diseño es ampliamente utilizado en jardines y espacios abiertos debido a su ligereza, su apariencia moderna y su capacidad para permitir la circulación de aire, lo que favorece el confort térmico.
- **Corredero para pérgola:** se instala sobre estructuras fijas y se desplaza mediante guías, lo que permite ajustar la cobertura de sombra según las condiciones climáticas. Este sistema es adecuado para espacios exteriores donde se requiere flexibilidad en el control de la radiación solar.
- **Extensible:** permite modificar su longitud de despliegue dependiendo del área que se desea cubrir, siendo una opción versátil para espacios amplios donde las condiciones ambientales pueden variar.
- **Retráctil motorizado:** incorpora un sistema automatizado que facilita su operación mediante controles eléctricos. En algunos casos, puede incluir sensores de sol o viento, lo que permite optimizar su funcionamiento y mejorar tanto la eficiencia como la comodidad del usuario.

Estructura portátil: El concepto de la palabra portátil se refiere a cualquier objeto que es fácil de transportar o mover. El término portátil proviene del latín *portātum*, que significa llevar. Este adjetivo describe algo que es movable y fácil de transportar. El diseño de estructuras temporales se rige por la dicotomía entre la eficiencia mecánica del montaje y el comportamiento termodinámico del refugio.

2.1.1. Clasificación de toldos portátiles

Los toldos portátiles pueden clasificarse de acuerdo con su sistema estructural en plegables, tubulares o modulares [5, 31]. Los sistemas plegables, también conocidos como tipo Pop-Up, utilizan mecanismos articulados de tipo tijera que permiten un montaje rápido y compacto. En cambio, los sistemas tubulares se componen de elementos independientes que se ensamblan mediante conectores, lo que puede incrementar el tiempo de instalación, pero también mejorar la estabilidad del conjunto, ver Figura 2.1.



Figura 2.1: Tipos de estructura de toldo portátil

En términos de diseño, la portabilidad exige una relación adecuada entre ligereza, resistencia, facilidad de montaje y durabilidad. Sin embargo, estos criterios no siempre garantizan un buen desempeño térmico. En muchos toldos comerciales, la selección de materiales se orienta principalmente al bajo costo, impermeabilidad o resistencia mecánica, dejando en segundo plano propiedades como reflectividad solar, emisividad, conductividad térmica y capacidad de aislamiento.

2.1.2. Componentes principales de un toldo

Los componentes principales de un toldo portátil son la cubierta, la estructura de soporte, los elementos de unión y los sistemas de anclaje. La cubierta es el elemento encargado de recibir la radiación solar y proteger el área ocupada; por ello, sus propiedades térmicas y ópticas influyen directamente en el desempeño del sistema, la cual debe cumplir con estándares de resistencia hidrostática. Para asegurar la impermeabilidad en condiciones de uso exterior, la lona debe soportar una columna de agua mínima de 1500 mm [24]. El empleo de recubrimientos técnicos

como el poliuretano (PU) en el sistema de emparedado propuesto permite modificar la tensión superficial del textil, evitando la acumulación hídrica que aumentaría la carga estática sobre el armazón [20], además parte de la radiación solar es absorbida, reflejada o transmitida de acuerdo a la forma y tipo de material que este tenga, ver Figura 2.2.

2.1.3. Cubiertas textiles y membranas estructurales

Las cubiertas textiles y membranas estructurales representan una solución ligera y flexible para generar espacios de sombra y protección en exteriores. A diferencia de las cubiertas rígidas convencionales, estas estructuras emplean materiales textiles o membranas recubiertas que trabajan principalmente a tensión, permitiendo cubrir áreas amplias con un uso reducido de material y con una alta libertad formal [25, 32]. Desde esta perspectiva, la geometría del paño, definida por su inclinación, altura libre, orientación y tensión, influye directamente en la forma en que la cubierta intercepta la radiación solar, proyecta sombra y permite la circulación del aire bajo la estructura. En el caso de toldos y cubiertas textiles desmontables, estas variables geométricas son fundamentales para mejorar el confort del espacio protegido, ya que permiten adaptar la solución a las condiciones solares, climáticas y funcionales del sitio [9, 12].

La estructura de soporte mantiene la forma del toldo y transmite las cargas hacia el suelo, de acuerdo a [14] las propiedades estructurales de materiales como caña guadua, acero, hierro, aluminio, cobre, PVC y madera permite identificar alternativas ligeras y resistentes para estructuras temporales, ver Tabla 2.1. Añadiéndose los anclajes que proporcionan estabilidad ante la acción del viento y otras cargas externas.

Tabla 2.1: Propiedades estructurales de materiales. Adaptado de [14].

POR TIPO DE MATERIAL							
Propiedad estructural	Caña Guadua	Acero	Hierro	Aluminio	Cobre	PVC	Madera (roble)
Densidad de masa	0.95 g/cm ³	7.85 g/cm ³	7.87 g/cm ³	2.7 g/cm ³	8.940 g/cm ³	1.4 g/cm ³	2.7 g/cm ³
Límite de elasticidad	13.85 MPa	207 MPa	360 MPa	275 MPa	33.300 MPa	80 MPa	103 MPa
Resistencia máxima a tracción	25.97 MPa	345 MPa	550 MPa	310 MPa	210 MPa	70 MPa	200 MPa
Módulo de Young	26 GPa	210 GPa	190 GPa	68.9 GPa	117.5 GPa	2.75 GPa	70 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3 su	0.3 su	0.21 su	0.33 su	0.36 su	0.38 su	0.33 su
Módulo cortante	88 GPa	80.76 GPa	73 GPa	25.90 GPa	46 GPa	1.2 GPa	73.09 GPa

La ligereza de un toldo portátil puede generar vulnerabilidad ante la acción del viento, debido a que las cargas aerodinámicas producen esfuerzos de levantamiento, succión y deformación en la cubierta. Por ello, el desempeño seguro de este tipo de estructuras depende de un sistema adecuado de anclaje que permita contrarrestar las fuerzas por el viento [21, 27, 34]. De acuerdo con guías técnicas para la instalación de tiendas temporales, cuando una estructura tipo carpa se somete a fuerzas de viento, su forma puede cambiar y modificar significativamente las cargas que deben resistir los anclajes o estacas [27].

Asimismo, la Tent Rental Division (TRD) división especializada de la Industrial Fabrics Association International (IFAI), una organización institucional global de textiles técnicos hoy

conocida como Advanced Textiles Association (ATA) ha señalado la necesidad de desarrollar criterios industriales para determinar la cantidad de lastre (peso o bolsas de arena) requerida, especialmente cuando no es posible utilizar estacas en el suelo [1]. Por lo tanto, en toldos portátiles resulta indispensable considerar anclajes, estacas, contrapesos o sistemas de lastre como elementos de seguridad estructural.

Para el objetivo de esta investigación, la cubierta representa el elemento de mayor interés, ya que en ella se presentan los procesos de transferencia de calor que determinan la temperatura superficial y la cantidad de calor transferida hacia el espacio interior. Por lo tanto, el análisis térmico de los materiales de la cubierta es fundamental para proponer un toldo con capacidad de mitigación solar.

Geometría de la cubierta y ventilación natural

La geometría de la cubierta influye directamente en la proyección de sombra, la captación de radiación solar y la circulación del aire bajo el toldo. Cubiertas inclinadas, de doble pendiente o con aberturas superiores pueden favorecer el ascenso del aire caliente y su evacuación hacia el exterior mediante convección natural, ver Figura 2.2. Este fenómeno, conocido como efecto chimenea, se produce cuando el aire caliente disminuye su densidad, asciende y es reemplazado por aire más frío proveniente de la parte inferior [3, 17].

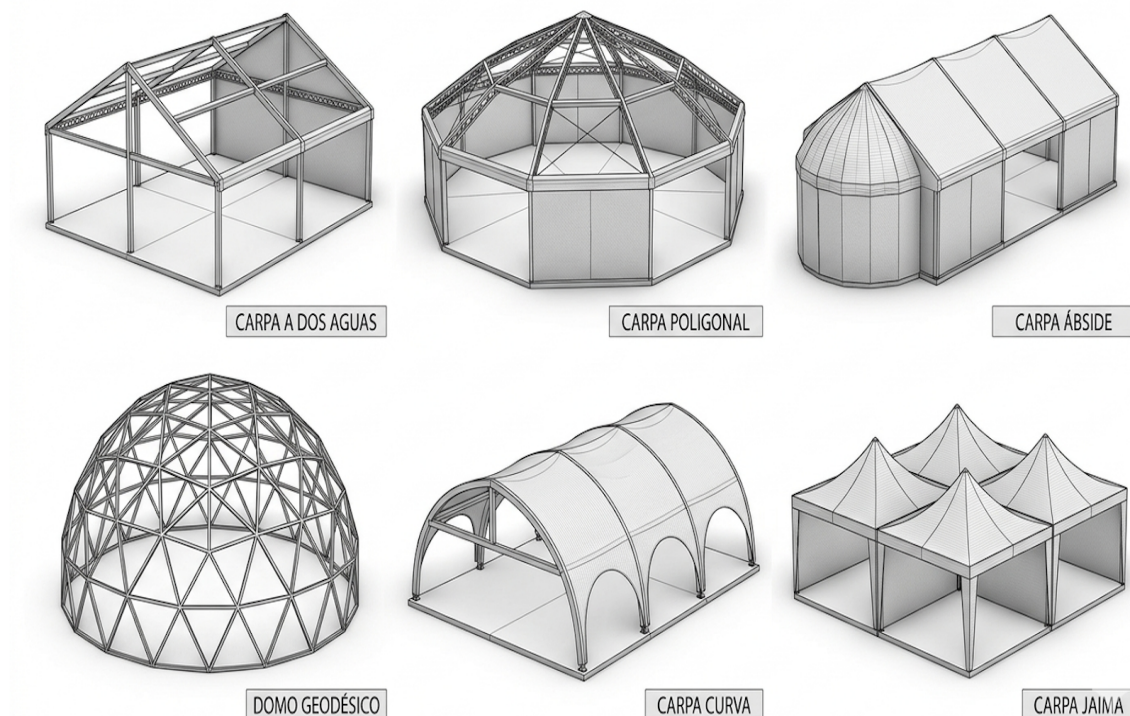


Figura 2.2: Tipos de techos de toldos

Existen diversos tipos de cubiertas de toldos, tales como:

- **Dos aguas (Carpa Alemana):** La geometría de este tipo de carpas se basa en una configuración de dos aguas, definida por dos planos inclinados con una pendiente constante que convergen en una cumbrera central. Esta tipología estructural optimiza la gestión de la radiación solar al permitir la orientación estratégica de sus faldones, maximizando la sombra proyectada sobre el área de ocupación. Desde la perspectiva termodinámica, este diseño facilita el ascenso del aire caliente hacia la parte superior, favoreciendo la ventilación natural a través de la diferencia de presiones y el efecto chimenea, lo que reduce la carga térmica en el espacio confinado debajo del toldo.
- **Poligonal:** Presenta una estructura de base poligonal donde la cubierta converge desde un vértice central hacia perfiles perimetrales. A diferencia del modelo a dos aguas, ofrece una menor pendiente en sus secciones, lo cual optimiza el volumen útil del espacio interior. Si bien su diseño mejora la eficiencia espacial, su complejidad estructural y costos operativos son superiores, limitando su aplicación a proyectos con requerimientos específicos de aforo o diseño.
- **Ábside:** Se caracteriza por la integración de terminaciones semicirculares en uno o ambos extremos de la estructura. Este diseño, además de aportar un valor estético distintivo, mejora la continuidad del flujo visual, siendo una solución recurrente en eventos que requieren un alto estándar de presentación arquitectónica.
- **Domo geodésico:** Estructura esférica segmentada en una red de perfiles triangulares que distribuyen las cargas de manera uniforme, otorgándole una elevada resistencia mecánica ante esfuerzos externos. Su geometría permite optimizar el uso de materiales (especialmente membranas tensadas o paneles translúcidos), favoreciendo una relación volumen-superficie altamente eficiente y un impacto visual predominante.
- **Curva:** Definida por un perfil de cubierta continuo en forma de arco (ola), que elimina las discontinuidades geométricas (vértices) presentes en otros modelos. Esta configuración no solo reduce la acumulación de cargas en puntos críticos, sino que facilita el drenaje pluvial. Su diseño, caracterizado por voladizos que protegen el perímetro, proporciona un área de transición funcional entre el interior y el exterior del toldo.
- **Jaimas (pagoda):** Modelo de estructura modular simple, ampliamente adoptado por su eficiencia en el ensamblaje y su capacidad de expansión. Mediante el acoplamiento lineal o perimetral de unidades básicas, permite la conformación de espacios dinámicos y adaptables. Por su versatilidad y facilidad de montaje, constituyen una solución técnica ideal para instalaciones temporales o stands que requieren una configuración ágil.

Por lo tanto, un diseño eficiente de toldo debe considerar no solo la selección del material de cubierta, sino también la forma geométrica que permita reducir la acumulación de calor en el espacio interior. En este sentido, la ventilación natural representa una estrategia pasiva complementaria a la mitigación solar generada por los materiales.

2.2. Materiales para cubiertas de toldos

Los materiales utilizados en cubiertas de toldos deben cumplir con requisitos mecánicos, ambientales y térmicos. Entre las propiedades más importantes se encuentran la resistencia a la radiación ultravioleta, impermeabilidad, ligereza, flexibilidad, durabilidad, facilidad de limpieza y estabilidad frente a cambios de temperatura [2]. No obstante, para el diseño de toldos de mitigación solar también es necesario considerar propiedades térmicas y ópticas, tales como conductividad térmica, calor específico, emisividad, absorptividad, transmitancia y reflectividad solar.

Materiales naturales

Este tipo de materiales corresponde a fibras naturales de origen vegetal, animal o regenerado, ampliamente estudiadas por su disponibilidad, baja densidad y biodegradación con potencial en aplicaciones textiles [30, 41]. Entre las fibras de origen animal ver 2.3 se encuentran la lana, seda, alpaca, cuero y quitina; mientras que entre las de origen vegetal destacan el algodón, lino, yute, cáñamo, bambú, fibra de coco, kenaf y otras fibras [38].

Estas fibras presentan ventajas relacionadas con su origen renovable, bajo peso, disponibilidad y menor impacto ambiental en comparación con fibras sintéticas convencionales. Sin embargo, su permeabilidad y susceptibilidad a la humedad pueden limitar su capacidad para proteger frente a lluvia, radiación solar prolongada [37, 44].



Figura 2.3: Materiales naturales (Fibra de coco, seda, lana, algodón, etc.)

Por otro lado, los materiales sintéticos (ver Figura 2.4) conocidos como plásticos derivados del petróleo y poliméricos, como poliéster, PVC, polietileno, nylon o tejidos recubiertos, son ampliamente utilizados en toldos debido a su flexibilidad, impermeabilidad, resistencia mecánica y durabilidad [8]. Estos materiales pueden modificarse mediante recubrimientos, pigmentos o

tratamientos superficiales para mejorar su resistencia a la intemperie, opacidad y capacidad de reflexión solar. Sin embargo, su desempeño térmico depende de sus propiedades ópticas y de su capacidad para limitar la transferencia de calor hacia el interior [13, 24].

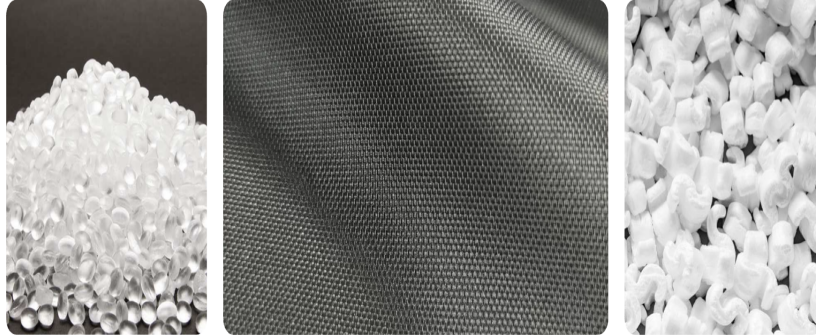


Figura 2.4: Materiales sintéticos (Polietileno, nylon, poliestireno, etc.)

2.2.1. Configuraciones multicapa o tipo emparedado

Una cubierta monocapa está formada por una sola lámina o lona expuesta directamente a la radiación solar. En este tipo de sistema, la temperatura de la cubierta depende principalmente de la radiación absorbida, la convección con el aire exterior e interior, la emisión de radiación térmica y la conducción a través del espesor del material. Aunque las cubiertas monocapa pueden proporcionar sombra, su capacidad para reducir la transferencia de calor es limitada cuando el material presenta alta absorción solar o baja resistencia térmica. Por esta razón, un toldo monocapa puede disminuir la exposición directa a la radiación solar, pero no necesariamente garantizar condiciones adecuadas de confort térmico bajo la estructura.

El término emparedado o sándwich, según [22], se refiere al uso de una estructura multicapa compuesta por una o más capas externas de alta resistencia, conocidas como caras, y una o más capas internas de baja densidad, denominadas núcleo. Esta configuración permite combinar rigidez estructural con propiedades de aislamiento térmico o acústico, dependiendo de los materiales empleados. El núcleo constituye la parte central de los materiales en una estructura tipo emparedado. permite combinar materiales con funciones térmicas diferenciadas. La capa exterior puede seleccionarse con alta reflectividad solar para reducir la absorción de radiación incidente; la capa intermedia puede funcionar como aislante térmico o cámara de aire; y la capa interior puede diseñarse con baja emisividad para disminuir la radiación térmica emitida hacia el usuario. Esta configuración incrementa la resistencia térmica equivalente del sistema y reduce la ganancia de calor hacia el espacio protegido [19, 29]. Asimismo, estudios en toldos solares avanzados han demostrado que el uso de películas aluminizadas y superficies con emisividad controlada puede mejorar el microclima y el confort térmico bajo la cubierta [43]. Por lo tanto, la eficiencia de una cubierta tipo emparedado depende no solo de la selección de materiales, sino también de su orden de colocación, espesor, separación entre capas y propiedades superficiales.

Las configuraciones tipo emparedado, también conocidas como estructuras multicapa, consisten en la combinación de dos o más capas de materiales con propiedades diferentes. De forma general, este tipo de sistema se compone de capas externas y un núcleo intermedio, el cual puede cumplir funciones de aislamiento, separación, rigidez o reducción de peso [45, 46].

Las estructuras tipo emparedado han sido utilizadas en diversos sectores de ingeniería debido a su relación favorable entre ligereza, rigidez y resistencia. En aplicaciones aeronáuticas, automotrices, navales y de energía eólica, estas configuraciones han mostrado ventajas funcionales importantes [10, 15]. En el ámbito de la construcción, los sistemas multicapa también se han empleado para mejorar el aislamiento térmico de envolventes arquitectónicas [40].

2.3. Transferencia de calor y formulación del modelo térmico

El comportamiento térmico de una cubierta expuesta a la radiación solar depende de la interacción entre los mecanismos de transferencia de calor y las propiedades físicas de los materiales que la conforman. En una cubierta tipo emparedado, la energía recibida por la superficie exterior puede ser reflejada hacia el ambiente, absorbida por el material o transferida hacia las capas inferiores, produciendo variaciones en la temperatura de los materiales y, en consecuencia, en las condiciones térmicas del espacio protegido [16, 26].

En el presente trabajo, la cubierta se representa mediante un sistema formado por dos capas con propiedades térmicas diferentes. La capa superior, se encuentra directamente expuesta a la radiación solar, mientras que la capa inferior, se encuentra orientada hacia la región protegida por el toldo.

Las temperaturas instantáneas correspondientes a ambas capas se representan mediante $T_1(t)$ y $T_2(t)$. El modelo se formula mediante una aproximación de parámetros concentrados, considerando que cada material puede representarse mediante una temperatura uniforme en cada instante de tiempo. De esta manera, cada capa se modela como un nodo térmico y su comportamiento puede describirse a partir de un balance de energía.

Bajo esta aproximación, los principales fenómenos considerados son:

- el aporte o ganancia energético asociado a la radiación solar incidente sobre la capa superior;
- la transferencia de calor por convección entre cada material y el aire circundante;
- la transferencia de calor por conducción entre la capa superior y la capa inferior; y
- el almacenamiento de energía térmica en cada uno de los materiales.

Para la simulación se distinguen las variables dinámicas de los parámetros del modelo. Las temperaturas $T_1(t)$ y $T_2(t)$ constituyen las variables que cambian durante el tiempo. En con-

traste, la irradiancia solar I , la temperatura ambiente T_a y los coeficientes de transferencia de calor por convección h_1 y h_2 se consideran constantes en el modelo.

Esta consideración se debe a que, para la simulación desarrollada, se utilizaron valores representativos de las condiciones experimentales y no funciones temporales continuas para dichos parámetros. Por lo tanto, el modelo permite estudiar la respuesta térmica transitoria de los materiales bajo condiciones de entrada consideradas constantes.

2.3.1. Interacción de la radiación solar con los materiales

Cuando la radiación solar incide sobre la superficie de un material, la energía incidente puede ser absorbida, reflejada o transmitida. Estas fracciones se relacionan mediante

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (2.1)$$

donde:

- α representa la absorptividad solar del material
- ρ corresponde a la reflectividad del material.
- τ es la transmisividad del material.

La absorptividad representa la fracción de la radiación incidente que es absorbida por el material, mientras que la reflectividad representa la fracción que retorna hacia el ambiente. La transmisividad corresponde a la fracción de radiación que atraviesa el material.

Estas propiedades permiten describir de manera general la interacción entre la radiación solar y la superficie de una cubierta. Sin embargo, para el modelo térmico simplificado que se utiliza en este trabajo se representa directamente mediante la irradiancia considerada durante la simulación.

Debido a que la capa superior del emparedado se encuentra directamente expuesta a la radiación solar, la potencia solar considerada en el modelo se expresa como:

$$\dot{Q}_{\text{sol},1} = IA_{\text{exp}} \quad (2.2)$$

donde:

- I representa la radiación solar recibida por unidad de área (W/m^2)
- A_{exp} representa el área expuesta directamente a radiación solar (m^2)

En la Ec. (2.2), el valor de I se considera constante durante cada simulación. Por tanto, la variación temporal de la temperatura de la capa superior se obtiene como respuesta del sistema térmico ante una entrada energética constante.

2.3.2. Transferencia de calor por conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de energía térmica que se produce dentro de un material o entre cuerpos en contacto como consecuencia de la existencia de una diferencia de temperatura.

Para una transferencia unidimensional, la ley de Fourier puede expresarse como:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -\lambda A \frac{dT}{dx}, \quad (2.3)$$

donde:

λ	corresponde a la conductividad térmica del medio de transferencia ($\text{W/m} \cdot ^\circ \text{C}$).
A	es el área superficial de contacto y transversal de conducción (m^2).
$\frac{dT}{dx}$	representa el gradiente de temperatura en dirección de la transferencia de calor.

Para una región de espesor efectivo L , la transferencia de calor entre las dos capas puede aproximarse mediante

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\lambda A}{L} [T_1(t) - T_2(t)]. \quad (2.4)$$

En esta expresión, $T_1(t)$ representa la temperatura instantánea del material superior y $T_2(t)$ la temperatura instantánea del material inferior. En esta ecuación L es el espesor del material o capa.

La diferencia de temperaturas entre ambos materiales se define como

$$\Delta T_{12}(t) = T_1(t) - T_2(t). \quad (2.5)$$

Cuando $T_1(t) > T_2(t)$, el calor se transfiere desde la capa superior hacia la capa inferior. En el caso contrario, la dirección de transferencia se invierte.

La resistencia térmica asociada con esta transferencia puede expresarse como

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{\lambda A}, \quad (2.6)$$

por lo que la Ec. (2.4) también puede escribirse como

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{T_1(t) - T_2(t)}{R_{\text{cond}}}. \quad (2.7)$$

Para una configuración formada por N capas conductivas conectadas en serie, la resistencia térmica total puede expresarse de manera general como

$$R_t = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{\lambda_i A_c}, \quad (2.8)$$

donde:

L_i	corresponde al espesor de la i -ésima capa
λ_i	es la conductividad térmica de la i -ésima capa

En el modelo utilizado posteriormente, el intercambio entre las capas superior e inferior se representa mediante la forma simplificada de la Ecuación (2.4).

2.3.3. Transferencia de calor por convección

La convección corresponde al mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido circundante. En el sistema analizado, el fluido corresponde al aire que se encuentra en contacto con las superficies de los materiales.

La transferencia de calor por convección puede representarse mediante la ley de enfriamiento de Newton, expresada a continuación:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hS(T_i - T_a), \quad (2.9)$$

donde:

h	representa el coeficiente de transferencia de calor por convección
S	el área superficial expuesta al ambiente
T_i	la temperatura instantánea de la superficie o material
T_a	la temperatura ambiente

En el modelo se consideran dos intercambios convectivos: uno asociado a la capa superior y otro correspondiente a la capa inferior.

Para la capa superior,

$$\dot{Q}_{\text{conv},1} = h_1 S_1 [T_1(t) - T_a], \quad (2.10)$$

mientras que para la capa inferior,

$$\dot{Q}_{\text{conv},2} = h_2 S_2 [T_2(t) - T_a]. \quad (2.11)$$

En estas expresiones, h_1 y h_2 representan los coeficientes de transferencia de calor por convección correspondientes a las capas superior e inferior, respectivamente, mientras que S_1 y S_2 corresponden a las áreas superficiales de cada material expuestas al intercambio convectivo.

En la simulación, T_a , h_1 y h_2 se consideran constantes. Sin embargo, las tasas de transferencia de calor por convección $\dot{Q}_{\text{conv},1}$ y $\dot{Q}_{\text{conv},2}$ varían durante la simulación debido a que dependen de las temperaturas instantáneas $T_1(t)$ y $T_2(t)$.

Cuando $T_i(t) > T_a$, la transferencia de energía ocurre desde el material hacia el ambiente. Por el contrario, si $T_i(t) < T_a$, el aire circundante transfiere energía térmica hacia el material.

2.3.4. Radiación térmica

Además de la radiación solar incidente, una superficie puede intercambiar energía térmica con sus alrededores mediante radiación electromagnética. La transferencia neta de calor por radiación térmica puede representarse, de manera general, mediante la ley de Stefan–Boltzmann:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4), \quad (2.12)$$

donde:

$\dot{Q}_{\text{rad}}$	es la tasa neta de transferencia de calor por radiación térmica, en W.
ε	representa la emisividad de la superficie del material (adimensional).
σ	es la constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.
S	es el área superficial del material expuesta al intercambio, en m^2 .
T_s	corresponde a la temperatura absoluta de la superficie, en K.
T_{surr}	es la temperatura absoluta efectiva del entorno circundante, en K.

Debido a la dependencia con la cuarta potencia de la temperatura, los valores de T_s y T_{surr} deben expresarse en kelvin.

La radiación térmica forma parte de los mecanismos físicos presentes en una cubierta expuesta al ambiente. No obstante, en el modelo dinámico reducido utilizado en este trabajo este término no se incorpora de manera explícita. El modelo se concentra en el aporte energético asociado a la radiación solar, la conducción entre las dos capas y la convección con el aire circundante.

2.3.5. Almacenamiento de energía térmica

La respuesta térmica de cada material depende de su capacidad para almacenar energía. Para una capa i , la capacidad térmica se define como

$$C_i = m_i c_i, \quad (2.13)$$

donde m_i representa la masa del material y c_i su calor específico.

La tasa de variación de la energía almacenada en una capa puede expresarse como

$$\dot{Q}_{\text{alm},i} = m_i c_i \frac{dT_i(t)}{dt}, \quad i = 1, 2. \quad (2.14)$$

Para la capa superior,

$$\dot{Q}_{\text{alm},1} = m_1 c_1 \frac{dT_1(t)}{dt}, \quad (2.15)$$

y para la capa inferior,

$$\dot{Q}_{\text{alm},2} = m_2 c_2 \frac{dT_2(t)}{dt}. \quad (2.16)$$

De acuerdo con estas relaciones, una mayor masa o un mayor calor específico incrementan la capacidad térmica del material y, por tanto, su resistencia a experimentar cambios rápidos de temperatura.

2.3.6. Balance general de energía

El modelo térmico se fundamenta en el principio de conservación de la energía. Para cada capa, la tasa de cambio de la energía almacenada es igual a la diferencia entre las tasas de energía que ingresan y las que abandonan el nodo térmico.

De manera general,

$$\frac{dE_i}{dt} = \sum \dot{Q}_{\text{entrada},i} - \sum \dot{Q}_{\text{salida},i}. \quad (2.17)$$

Considerando el almacenamiento de energía térmica del material, la expresión anterior puede escribirse como

$$m_i c_i \frac{dT_i(t)}{dt} = \sum \dot{Q}_{\text{entrada},i} - \sum \dot{Q}_{\text{salida},i}. \quad (2.18)$$

Esta ecuación constituye la base para formular los balances correspondientes a las capas superior e inferior.

2.3.6.1. Balance de energía de la capa superior

La capa superior se encuentra directamente expuesta a la radiación solar. Por tanto, el aporte energético considerado para esta capa corresponde a la potencia solar incidente sobre su superficie.

Al mismo tiempo, la capa superior transfiere energía por convección hacia el aire circundante y por conducción hacia la capa inferior.

De esta manera, el balance de energía puede representarse como

$$\text{Acumulación} = \text{Ganancia solar} - \text{Convección} - \text{Conducción}. \quad (2.19)$$

En términos de tasas de transferencia de calor,

$$m_1 c_1 \frac{dT_1(t)}{dt} = \dot{Q}_{\text{sol},1} - \dot{Q}_{\text{conv},1} - \dot{Q}_{\text{cond}}. \quad (2.20)$$

Sustituyendo las expresiones correspondientes,

$$\boxed{m_1 c_1 \frac{dT_1(t)}{dt} = I A_{\text{exp}} - h_1 S_1 [T_1(t) - T_a] - \frac{\lambda A}{L} [T_1(t) - T_2(t)]}. \quad (2.21)$$

Despejando la derivada temporal de la temperatura de la capa superior se obtiene

$$\boxed{\frac{dT_1(t)}{dt} = \frac{I A_{\text{exp}}}{m_1 c_1} - \frac{h_1 S_1}{m_1 c_1} [T_1(t) - T_a] - \frac{\lambda A}{L m_1 c_1} [T_1(t) - T_2(t)]}. \quad (2.22)$$

La Ec. (2.22) muestra que la evolución de $T_1(t)$ está determinada por tres contribuciones: el aporte energético de la radiación solar, la transferencia de calor por convección con el ambiente y el intercambio conductivo con la capa inferior.

2.3.6.2. Balance de energía de la capa inferior

En el modelo considerado, la capa inferior no recibe directamente el término de radiación solar. La principal entrada de energía de esta capa corresponde a la transferencia de calor por conducción proveniente de la capa superior.

Simultáneamente, la capa inferior intercambia energía térmica por convección con el aire circundante. Por tanto, su balance energético puede expresarse como

$$\text{Acumulación} = \text{Conducción} - \text{Convección}. \quad (2.23)$$

En términos matemáticos,

$$m_2 c_2 \frac{dT_2(t)}{dt} = \dot{Q}_{\text{cond}} - \dot{Q}_{\text{conv},2}. \quad (2.24)$$

Sustituyendo las expresiones correspondientes,

$$\boxed{m_2 c_2 \frac{dT_2(t)}{dt} = \frac{\lambda A}{L} [T_1(t) - T_2(t)] - h_2 S_2 [T_2(t) - T_a].} \quad (2.25)$$

Despejando la derivada temporal de $T_2(t)$,

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{dT_2(t)}{dt} &= \frac{\lambda A}{L m_2 c_2} [T_1(t) - T_2(t)] \\ &\quad - \frac{h_2 S_2}{m_2 c_2} [T_2(t) - T_a]. \end{aligned}} \quad (2.26)$$

El término conductivo aparece con signo negativo en el balance del material superior y con signo positivo en el balance del material inferior. Esto indica que la energía que abandona el material 1 mediante conducción constituye, simultáneamente, una entrada energética para el material 2.

2.3.6.3. Modelo dinámico acoplado

Los balances de energía correspondientes a las capas superior e inferior forman un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas:

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{dT_1(t)}{dt} &= \frac{I A_1}{m_1 c_1} - \frac{h_1 S_1}{m_1 c_1} [T_1(t) - T_a] \\ &\quad - \frac{\lambda A_c}{L m_1 c_1} [T_1(t) - T_2(t)], \\ \frac{dT_2(t)}{dt} &= \frac{\lambda A_c}{L m_2 c_2} [T_1(t) - T_2(t)] \\ &\quad - \frac{h_2 S_2}{m_2 c_2} [T_2(t) - T_a]. \end{aligned}} \quad (2.27)$$

Las variables dinámicas del modelo pueden agruparse en el vector

$$\mathbf{T}(t) = \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

donde $T_1(t)$ representa la temperatura instantánea del material superior y $T_2(t)$ corresponde a la temperatura instantánea del material inferior.

Consideraciones y alcance del modelo

El modelo desarrollado constituye una representación simplificada del comportamiento térmico de una cubierta de un toldo de tipo emparedado. Su propósito es analizar la respuesta térmica transitoria de los materiales y estudiar la influencia de los principales parámetros físicos considerados.

Las principales consideraciones adoptadas son las siguientes:

- Cada material se representa mediante un nodo térmico de temperatura espacialmente uniforme.
- Las temperaturas $T_1(t)$ y $T_2(t)$ constituyen las variables dinámicas del modelo.
- La irradiancia solar I se considera constante durante cada simulación.
- La temperatura ambiente T_a se considera constante durante cada simulación.
- Los coeficientes de transferencia de calor por convección h_1 y h_2 se consideran constantes.
- El área A_1 representa la superficie de la capa superior expuesta directamente a la radiación solar.
- El área A_c representa el área efectiva de contacto térmico entre las capas.
- Las áreas S_1 y S_2 representan las superficies expuestas al intercambio convectivo de las capas superior e inferior, respectivamente.
- La transferencia de calor entre las capas se representa mediante conducción a través de una región caracterizada por una conductividad térmica λ y un espesor efectivo L .
- La radiación térmica de onda larga puede describirse mediante la ley de Stefan–Boltzmann; sin embargo, no se incorpora de manera explícita en las ecuaciones dinámicas del modelo reducido empleado en la simulación.

Bajo estas consideraciones, la variación temporal obtenida en las temperaturas $T_1(t)$ y $T_2(t)$ corresponde a la respuesta dinámica de los materiales ante parámetros de entrada considerados constantes. Por tanto, el modelo no pretende reproducir de manera explícita las variaciones temporales de todas las condiciones ambientales presentes durante la experimentación.

Relación entre el modelo teórico y la simulación

Las ecuaciones desarrolladas en esta sección constituyen la base teórica del modelo utilizado posteriormente para analizar el comportamiento térmico de las configuraciones experimentales.

En el capítulo de resultados, las ecuaciones del modelo se particularizan mediante las masas, calores específicos, dimensiones y propiedades térmicas correspondientes a los materiales seleccionados. Asimismo, se incorporan los valores de irradiancia solar, temperatura ambiente y coeficientes de transferencia de calor por convección considerados para cada simulación.

A partir de las temperaturas iniciales $T_{1,0}$ y $T_{2,0}$, el modelo permite determinar la evolución temporal de $T_1(t)$ y $T_2(t)$. Las temperaturas obtenidas mediante simulación pueden posteriormente compararse con los valores medidos experimentalmente con el propósito de analizar la capacidad del modelo para representar la tendencia térmica de los materiales.

Debido a que algunos parámetros ambientales se mantienen constantes durante la simulación, las diferencias entre los resultados calculados y los valores experimentales pueden asociarse, entre otros factores, con las variaciones reales de irradiancia, temperatura ambiente, movimiento del aire y condiciones de contacto térmico que se presentan durante las pruebas experimentales.

Por lo tanto, el modelo es simplificado lo que permite analizar los principales mecanismos de transferencia de calor y comparar el comportamiento de diferentes configuraciones de materiales, manteniendo una formulación suficientemente simple para su implementación y análisis numérico.

2.4. Confort térmico en espacios exteriores protegidos

El confort térmico se refiere a la condición en la cual una persona expresa satisfacción con el ambiente térmico que la rodea. Esta condición depende de variables ambientales como la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad relativa y la velocidad del aire, así como de factores personales como la actividad metabólica y el aislamiento térmico de la vestimenta [4, 18, 28].

En espacios exteriores protegidos por toldos, el confort térmico no depende únicamente de la sombra generada. También intervienen la temperatura superficial de la cubierta, la cantidad de radiación térmica emitida hacia el usuario, la ventilación del espacio interior y la temperatura del aire bajo la estructura. Por ello, un toldo puede bloquear la radiación solar directa y, aun así, generar incomodidad si la cubierta absorbe demasiado calor y lo transfiere hacia el área interna del toldo [35, 43]. Por lo que en este trabajo el confort térmico se aborda desde una perspectiva comparativa, mediante la medición de temperaturas en el área sombreada y en el área expuesta. Esta comparación permite evaluar la capacidad de mitigación solar del sistema propuesto y determinar si la configuración de materiales contribuye a reducir la temperatura bajo el toldo [6, 35].

Variables ambientales asociadas al confort térmico

Las variables ambientales más relevantes para el confort térmico son la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad relativa y la velocidad del aire. La temperatura del aire influye directamente en el intercambio convectivo entre el cuerpo humano y el ambiente. La temperatura radiante media representa el efecto térmico de las superficies que rodean al usuario. La humedad relativa afecta la capacidad del cuerpo para disipar calor mediante evaporación, mientras que la velocidad del aire modifica la pérdida de calor por convección. En un espacio protegido por un toldo, estas variables pueden cambiar según el material de la cubierta,

la ventilación disponible, la altura de la estructura, la orientación solar y el tipo de suelo sobre el que se instala. Por esta razón, la evaluación térmica de un toldo debe considerar tanto el comportamiento de la cubierta como las condiciones del área sombreada.

Relación entre mitigación solar y confort térmico

La mitigación solar se refiere a la capacidad de una solución constructiva o material para disminuir los efectos térmicos de la radiación solar incidente. En el caso de los toldos portátiles, esta mitigación puede lograrse mediante la reducción de la radiación transmitida, el aumento de la reflectividad de la cubierta, la incorporación de materiales aislantes y la mejora de la ventilación natural.

Cuando estas estrategias se integran adecuadamente, la temperatura del área sombreada puede disminuir respecto al área expuesta, generando mejores condiciones de uso para las personas. Sin embargo, una solución de mitigación solar también debe evitar que el espacio interior resulte visualmente incómodo, oscuro o con deslumbramiento excesivo. Por ello, la diferencia de temperatura entre el área sombreada y el área expuesta, junto con la selección del color y la calidad de iluminación bajo la cubierta, constituyen criterios relevantes para evaluar el desempeño integral del toldo.

Confort visual y percepción térmica

El confort visual se relaciona con la percepción de iluminación, color, contraste, deslumbramiento y calidad visual del espacio. En estructuras de protección solar, como los toldos, este aspecto es importante porque la cubierta no solo modifica la entrada de radiación solar, sino también la cantidad y calidad de luz percibida por el usuario. Por lo tanto, el diseño del toldo debe procurar un equilibrio entre mitigación térmica, iluminación suficiente y reducción del deslumbramiento. Diversos estudios han mostrado que la iluminación y el color pueden influir en la percepción térmica de las personas. La temperatura de color esta correlacionada a la luz lo que puede modificar la sensación subjetiva de calidez o frescura; por ejemplo, ambientes con tonalidades cálidas pueden percibirse como térmicamente más cálidos, mientras que tonalidades frías pueden asociarse con una sensación de mayor frescura o confort [7, 11].

En el caso de cubiertas expuestas a radiación solar, el color del material también influye en el comportamiento térmico de la superficie. Los colores claros tienden a reflejar una mayor fracción de la radiación incidente, mientras que los colores oscuros suelen absorber más energía y aumentar la temperatura superficial. Por ello, la selección cromática de la cubierta debe considerarse como un criterio de diseño térmico y visual [23, 39].

Para toldos de mitigación solar, el confort visual no debe entenderse únicamente como la cantidad de luz bajo la estructura, sino como la combinación entre iluminación adecuada, reducción del deslumbramiento, percepción agradable del espacio y menor absorción térmica de

la cubierta. En este sentido, los colores claros, materiales de alta reflectividad y superficies que reduzcan la transmisión directa de radiación pueden contribuir tanto al confort térmico como al confort visual del usuario.

2.4.1. Evaluación experimental del comportamiento térmico

La evaluación experimental permite contrastar el comportamiento térmico previsto teóricamente con datos obtenidos bajo condiciones reales o controladas. En el caso de materiales para toldos, las pruebas de exposición solar permiten observar la evolución de la temperatura superficial y comparar la capacidad de distintas configuraciones para reducir el calentamiento del área protegida.

Medición de temperatura superficial

La temperatura superficial es una variable fundamental para evaluar el comportamiento térmico de una cubierta, ya que refleja la cantidad de energía absorbida y acumulada en el material. Una temperatura superficial elevada indica que el material absorbe una fracción importante de la radiación incidente o que presenta dificultades para disipar calor hacia el ambiente. La medición de la temperatura superficial permite comparar el desempeño térmico de materiales monocapa y multicapa, así como identificar combinaciones que reduzcan la transferencia de calor hacia el interior del toldo.

Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica de medición sin contacto que permite estimar la temperatura superficial de un objeto a partir de la radiación infrarroja que emite. Esta herramienta es útil para analizar distribuciones térmicas en superficies, identificar zonas de mayor calentamiento y comparar el comportamiento de diferentes materiales bajo exposición solar [33]. Lo que permite visualizar el comportamiento térmico de la cubierta y detectar diferencias de temperatura entre las superficies expuestas, sombreadas o protegidas por distintas configuraciones de materiales.

Comparación entre área sombreada y área expuesta

La comparación entre el área sombreada y el área expuesta permite evaluar de manera directa la capacidad de mitigación solar del toldo. El área expuesta representa la condición sin protección, mientras que el área sombreada representa el efecto combinado de la cubierta, la geometría y la ventilación. Una disminución de temperatura en el área sombreada respecto al área expuesta indica que la configuración del toldo contribuye a reducir la ganancia de calor. Esta diferencia térmica puede utilizarse como criterio experimental para seleccionar materiales y validar la propuesta del diseño.

Los conceptos descritos en este capítulo ayudan a comprender los resultados que se expresan en el capítulo III.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Experimentación de emparedados

Para la obtención de los datos experimentales se empleó una cámara termográfica infrarroja, mostrada en la Figura 3.1. Este instrumento permitió registrar la temperatura superficial de los materiales en tiempo real y obtener mapas térmicos de las zonas analizadas. A partir de estas imágenes fue posible identificar variaciones de temperatura mediante una escala de colores, lo que facilitó el análisis del comportamiento térmico de cada configuración de materiales.



Figura 3.1: Cámara termográfica infrarroja inalámbrica.

Adicionalmente, se diseñaron y evaluaron distintas configuraciones tipo emparedado mediante la combinación de materiales con propiedades térmicas diferentes. El propósito de estas pruebas fue analizar la transferencia de calor entre capas y evaluar el desempeño térmico de cada combinación bajo exposición directa a la radiación solar. Para ello, se consideraron los mecanismos de transferencia de calor por radiación, conducción y convección, así como la temperatura superficial de los materiales y la temperatura en las zonas sombreadas y expuestas.

Metodología experimental

Paso 1: Se diseñó y construyó una estructura experimental a base de tubos de PVC de 1/2 pulgada de diámetro, como se muestra en la Figura 3.2. La estructura tiene dimensiones de 0,25 m de altura, 0,50 m de longitud y 0,25 m de ancho. La unión de los elementos se realizó mediante conectores tipo codo de PVC de tres salidas con ángulo de 90°, con el propósito de proporcionar rigidez y estabilidad durante las pruebas experimentales.

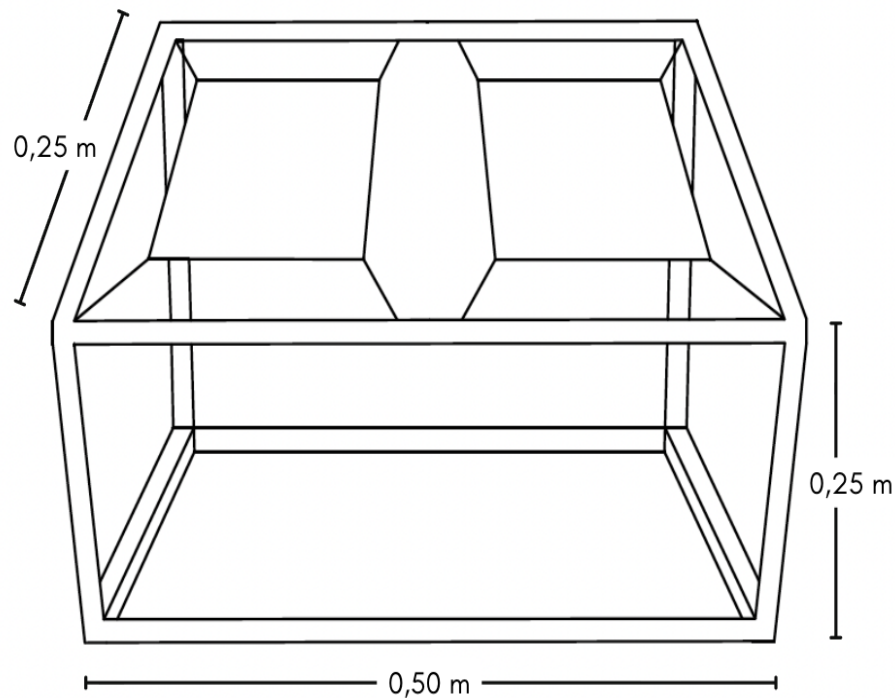


Figura 3.2: Dimensiones del prototipo experimental con materiales tensados.

Paso 2: Se elaboró un formato de registro, mostrado en la Tabla 3.1, para documentar las características físicas de los materiales empleados en la experimentación. En dicho formato se consideraron el grosor, la masa y las dimensiones de cada material.

Paso 3: La estructura de PVC se colocó sobre una mesa y los materiales se mantuvieron tensados mediante pinzas sujetas en las esquinas del aislante de aluminio, el cual se utilizó como material base en las pruebas. Sobre este material se colocaron diferentes capas superiores con dimensiones de 0,10 × 0,10 m. En la Figura 3.3 a) se presenta la imagen digital del experimento: del lado izquierdo se observa el emparedado 1, compuesto por PVC con fibra de vidrio como material superior, mientras que del lado derecho se observa el emparedado 2, compuesto por

Tabla 3.1: Datos de los materiales utilizados en la experimentación.

Material	Grosor (m)	Masa (kg)	Dimensiones (m)
Aislante de aluminio	0,0040	0,0060	0,20 × 0,20
Tela Oxford	0,0010	0,0024	0,10 × 0,10
PVC con fibra de vidrio	0,0003	0,0030	0,10 × 0,10
Mezclilla	0,0010	0,0040	0,10 × 0,10
Polietileno	0,0005	0,0007	0,10 × 0,10

tela Oxford. En la Figura 3.3 b) se muestra la imagen termográfica correspondiente, donde las variaciones de color representan diferencias de temperatura superficial.

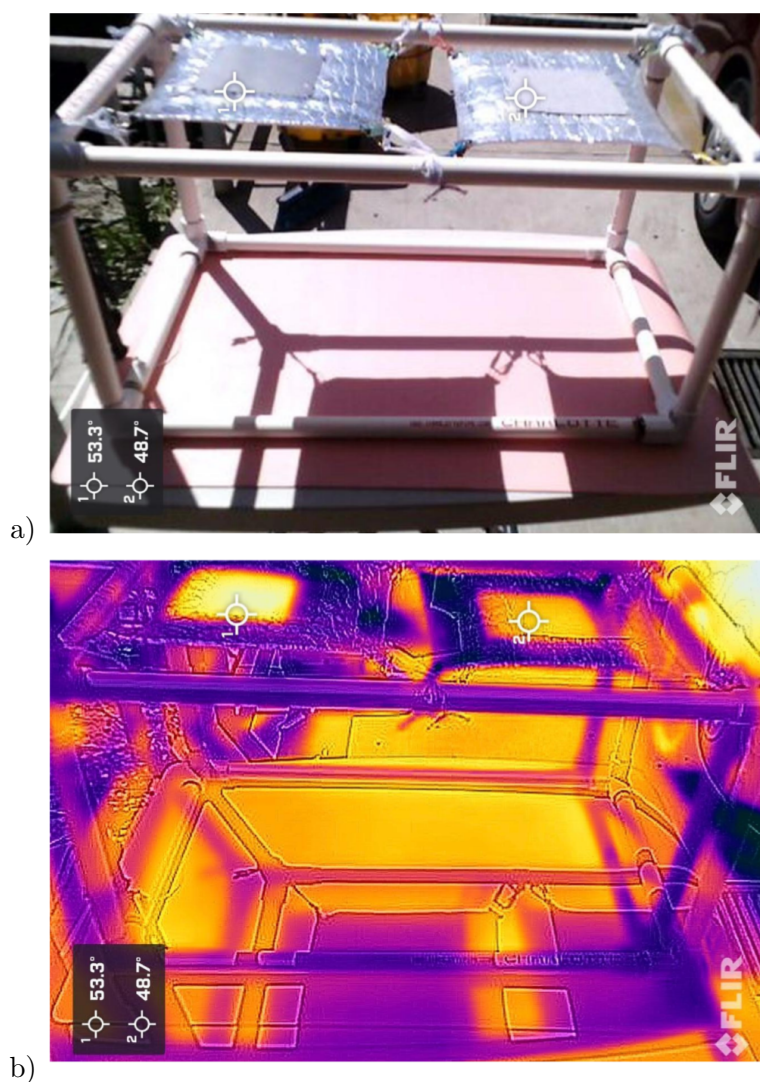


Figura 3.3: a) Imagen digital del experimento; b) imagen termográfica de los emparedados.

cde los materiales en el instante $t = 0$. Posteriormente, se realizó el seguimiento de la temperatura superficial de cada emparedado durante el periodo de exposición solar.

Paso 5: Al finalizar cada prueba, se capturó una imagen térmica del área cubierta por los

materiales superiores. Para ello, se levantaron las capas superiores de los emparedados con el propósito de observar la huella térmica generada sobre el material inferior. Asimismo, se registró la temperatura de la sombra proyectada y del área sin protección, con el fin de comparar el desempeño térmico de cada configuración.

Selección y caracterización de materiales del experimento

a) Experimentación de emparedados para comprender el fenómeno térmico

La experimentación se llevó a cabo el día 03 de julio de 2024, en un horario de 2:30 p.m. a 3:30 p.m., en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, ubicado en Cuernavaca, Morelos. El objetivo fue analizar el comportamiento térmico de dos configuraciones tipo emparedado expuestas directamente a la radiación solar.

Prueba 1

Los materiales seleccionados para la experimentación

- **Emparedado 1:** PVC con fibra de vidrio como material superior y aislante térmico de aluminio como material inferior.
- **Emparedado 2:** tela Oxford como material superior y aislante térmico de aluminio como material inferior.

Durante el periodo de prueba se registró la irradiancia solar, cuyos valores se muestran en la Tabla 3.2. La irradiancia presentó una tendencia decreciente, pasando de 703,8 W/m² al inicio del experimento a 588,7 W/m² al finalizar la prueba ver Figura 3.4. Esta variación se asocia con las condiciones atmosféricas presentes durante el experimento y con el cambio de la posición solar durante el periodo de medición.

Tabla 3.2: Irradiancia solar registrada durante la experimentación.

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	30	45	55	60
Irradiancia (W/m ²)	703.8	690.3	685.1	683.2	665.3	637.3	608.2	587.7	588.7

Los materiales fueron expuestos durante una hora a radiación solar directa. En la imagen termográfica de la Figura 3.3 se observa que la tela Oxford alcanzó una temperatura superficial de 48,7°C, mientras que el PVC con fibra de vidrio registró 53,3°C. Esto indica que, bajo las condiciones del experimento, el PVC con fibra de vidrio presentó una mayor temperatura superficial que la tela Oxford.

Al finalizar el experimento, se levantaron los materiales superiores para analizar la temperatura del área cubierta sobre el aislante térmico de aluminio. Los resultados se muestran en la Figura 3.5. En el caso del emparedado 1, se observó una disminución aproximada de 5°C respecto al área cubierta únicamente por el material inferior expuesto a la radiación solar. En contraste, el emparedado 2 presentó un incremento aproximado de 4°C, lo que sugiere que la tela Oxford permitió una mayor transferencia de calor hacia la capa inferior.

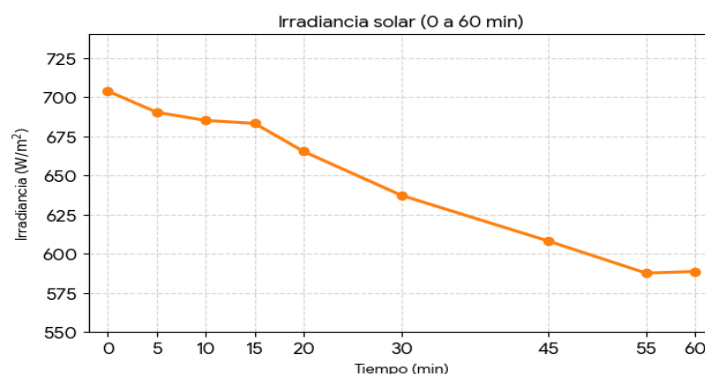


Figura 3.4: Irradiancia solar de la experimentación

En la Tabla 3.3 se presentan los parámetros físicos de los materiales, como el coeficiente de transferencia de calor por convección, área expuesta al ambiente, masa, calor específico, temperatura ambiente, área del material expuesto al sol e irradiancia.

Tabla 3.3: Parámetros de materiales del emparedado 1

Símbolo	Nombre	Valor	Unidades
$T_{1,0}$	Temperatura inicial del material superior de PVC con fibra de vidrio	29,8	$^{\circ}\text{C}$
T_a	Temperatura ambiente	27,5	$^{\circ}\text{C}$
h_1	Coeficiente de transferencia de calor por convección	10	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
S_1	Área superficial expuesta al ambiente	0,010012	m^2
m_1	Masa material superior	0,003	kg
c_1	Calor específico del material superior	1700	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
A_1	Área expuesta directamente al sol (radiación)	0,01	m^2
A	Área en contacto con material inferior (conducción)	0,01	m^2
λ	Conductividad térmica del material de unión (velcro)	0,045	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$
L	Grosor del material de unión (velcro)	0,0004	m
$T_{2,0}$	Temperatura inicial del material inferior aislante con espuma	29,7	$^{\circ}\text{C}$
h_2	Coeficiente de transferencia de calor por convección	8,0	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
c_2	Calor específico del material inferior	1200	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
S_2	Área superficial expuesta al ambiente	0,7932	m^2
m_2	Masa de material inferior	0,0060	kg

En la Figura 3.6 se observa la imagen invertida del experimento (imagen del lado opuesto) las temperaturas de las sombras proyectadas de los emparedados y la temperatura del área sin protección, observándose que el emparedado 1 (lado derecho) disminuyó $11,3^{\circ}\text{C}$ respecto a la temperatura del área sin protección el cual corresponde a una temperatura de $44,4^{\circ}\text{C}$, mientras que la sombra proyectada por el emparedado 2 disminuyó $8,4^{\circ}\text{C}$.

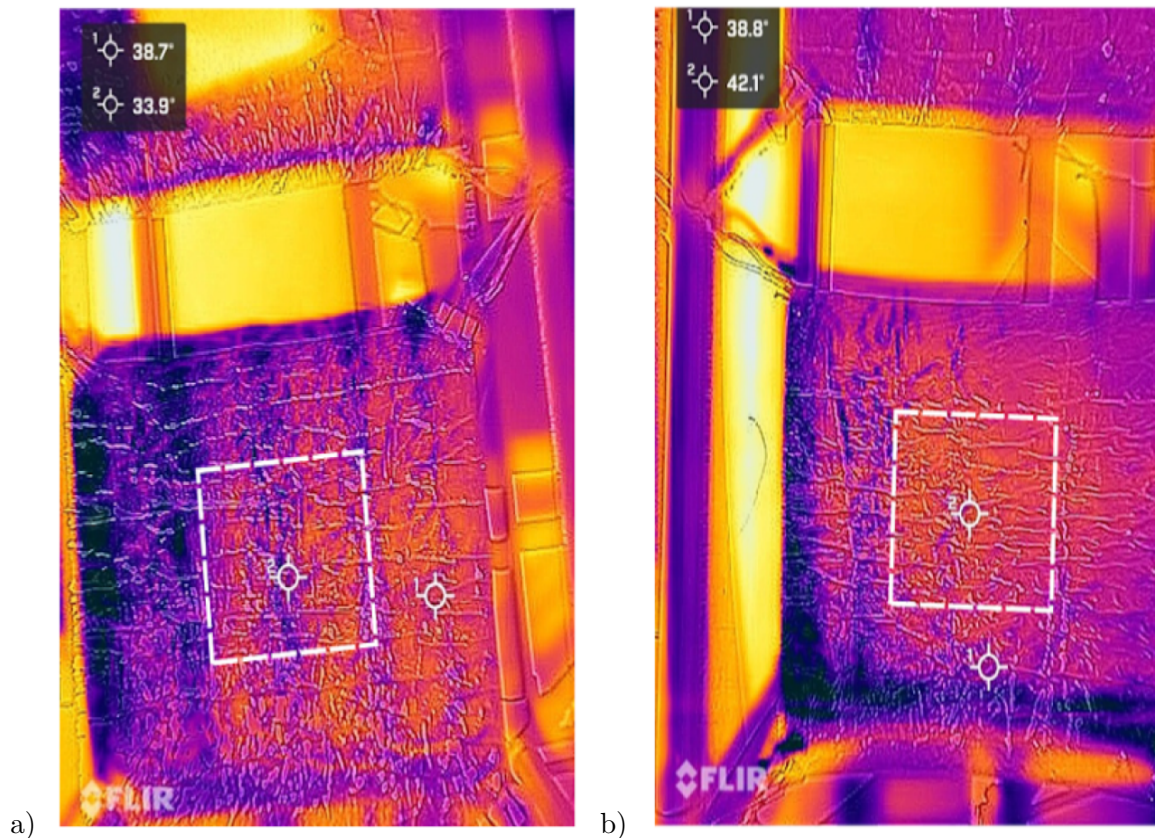


Figura 3.5: a) Temperatura de área cubierta del emparedado 1, b) Temperatura de área cubierta del emparedado 2

Prueba 2

Materiales seleccionados para la experimentación

- Emparedado 3: Material superior de Mezclilla / Material inferior aislante térmico de aluminio
- Emparedado 4: Materia superior de Polietileno / Material inferior Aislante térmico de aluminio

De la misma manera que el protocolo del primer experimento el día 18 de octubre de 2024 en horario de 12 : 35 pm a 12 : 45 pm se realizó un segundo experimento teniendo una radiación solar de $708,4 \text{ W/m}^2$ a $714,4 \text{ W/m}^2$. En la Figura 3.7 a) se observa desde una imagen digital y en el b) se muestra la imagen termográfica capturada con una cámara térmica desde una vista superior de la combinación del emparedado 3 y 4. El material superior del emparedado 3 es una tela de mezclilla color negro, mientras que el emparedado 4 está hecho de lona de polietileno color blanco, en ambos casos se utilizó como material inferior un aislante térmico de aluminio. Los materiales iniciaron con una temperatura de 29°C previo a la experimentación.

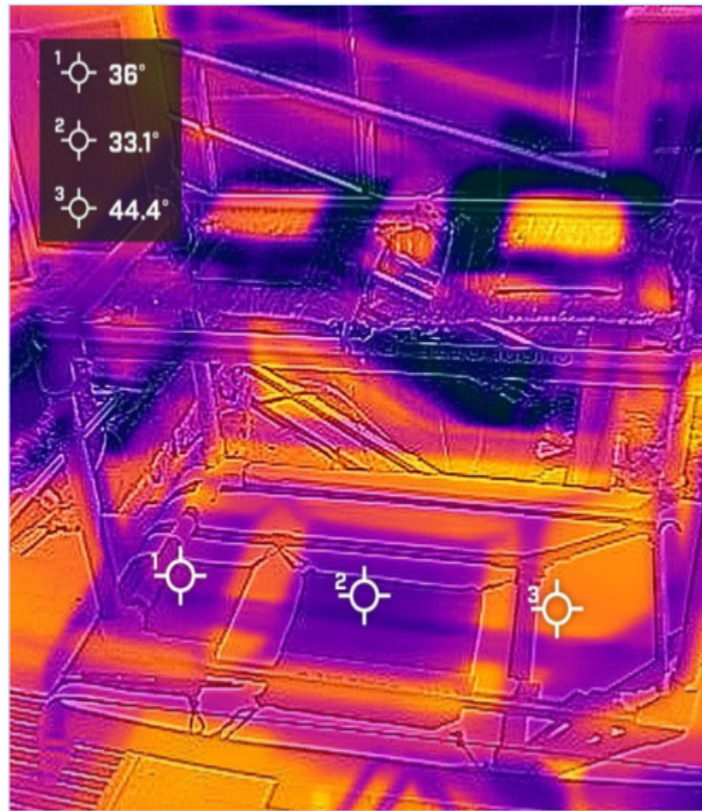


Figura 3.6: Sombras proyectadas por los emparedados vs área sin protección

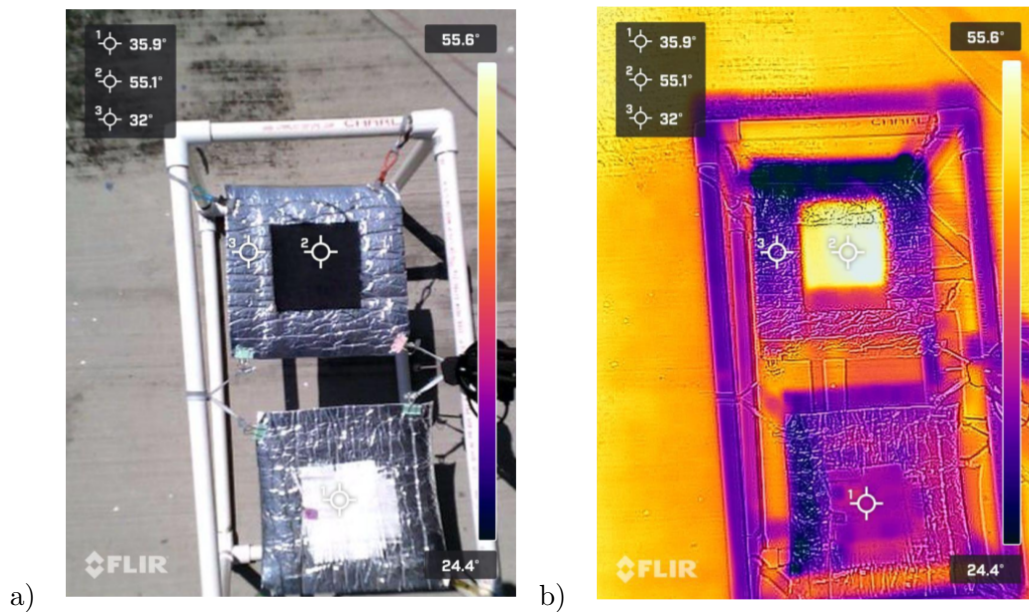


Figura 3.7: a) Imagen digital de emparedado 3 y 4, b) Imagen térmica de emparedado 3 y 4

Para este experimento, se tomaron muestras de la trayectoria de la temperatura con respecto al tiempo de los emparedados durante un periodo de 10 minutos. La Figura 3.8 muestra la

temperatura del área cubierta por los materiales superiores, obteniéndose que el emparedado 3 registró una temperatura de $39,2^{\circ}\text{C}$, es decir, el material superior permitió el paso de la radiación solar incrementando $8,3^{\circ}\text{C}$ más respecto al área sin material superior. Por otro lado, para el emparedado 4 se registró una temperatura de 33°C en el área cubierta con un incremento de $2,1^{\circ}\text{C}$ superior al aislante térmico. Además se registró la temperatura de las sombras proyectadas por los emparedados, mostrada en la Figura 3.9. Del lado derecho se observa la sombra del emparedado 4 (Material superior de Polietileno / Material inferior Aislante térmico de aluminio) que presenta una temperatura de $40,8^{\circ}\text{C}$ mitigando $8,5^{\circ}\text{C}$ con respecto al área totalmente expuesta al sol. Para la sombra de emparedado 3 (Mezclilla / Material inferior aislante térmico de aluminio) ubicada del lado izquierdo se registró una temperatura de $41,6^{\circ}\text{C}$, lo que representa una disminución de $7,7^{\circ}\text{C}$ respecto al área expuesta, la cual presentó una temperatura de $49,3^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.8: Temperatura de área cubierta

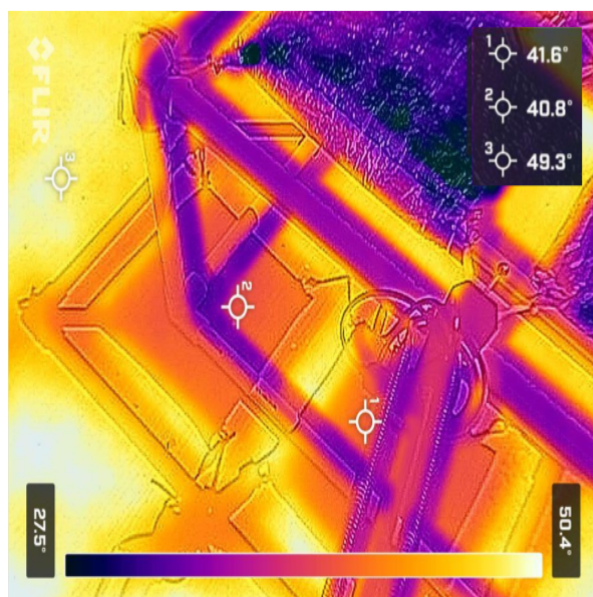


Figura 3.9: Sombras proyectadas por los emparedados 3 y 4

Conclusión de los experimentos

Los resultados experimentales muestran que la selección del material superior influye de manera significativa en la temperatura alcanzada por la capa inferior y en la temperatura de la sombra proyectada. En el emparedado 1, compuesto por PVC con fibra de vidrio y aislante térmico de aluminio, se observó una reducción de la temperatura aproximada de 5°C en la zona cubierta del material inferior. Además, la sombra proyectada por esta configuración presentó una disminución de $11,3^{\circ}\text{C}$ respecto al área sin protección, cuya temperatura fue de $44,4^{\circ}\text{C}$. Estos resultados evidencian que dicha combinación puede funcionar como una alternativa pasiva para la mitigación térmica. En el emparedado 2, compuesto por tela Oxford y aislante térmico de aluminio, se observó un incremento de 4°C en la temperatura del material inferior. Esto sugiere que el calor se transfirió con mayor facilidad hacia la capa inferior. No obstante, la sombra proyectada por esta configuración logró una reducción de $8,4^{\circ}\text{C}$ respecto al área expuesta.

En el segundo experimento, el emparedado 3, compuesto por mezclilla y aislante térmico de aluminio, registró un incremento de $8,3^{\circ}\text{C}$ en el área cubierta. Este comportamiento puede atribuirse al color oscuro de la mezclilla, el cual favorece la absorción de radiación solar y, por tanto, la transferencia de calor hacia el material inferior. Sin embargo, la sombra proyectada redujo la temperatura en $7,7^{\circ}\text{C}$ respecto al área expuesta. Finalmente, el emparedado 4, compuesto por polietileno y aislante térmico de aluminio, presentó un incremento de solo $2,1^{\circ}\text{C}$ en el área cubierta y una disminución de $8,5^{\circ}\text{C}$ en la sombra proyectada respecto al área sin protección. Estos resultados indican que el desempeño térmico de una configuración tipo emparedado depende no solo de la presencia de un material aislante, sino también de las propiedades ópticas, térmicas y geométricas del material superior.

b) Experimentación de prototipo de un toldo a escala

Para la realización del experimento a escala, se diseñó un modelo con las características mostradas en la Figura 3.10, en el inciso a) se muestra las dimensiones de la cubierta y soportes del prototipo. En el inciso b) se observa la vista frontal del diseño del prototipo a escala. El prototipo presenta dimensiones de $0,3 \times 0,3$ m de base y una altura de $0,3$ m, las cuales corresponden a la escala proporcional de un toldo real de 3×3 m con una altura aproximada de $2,5$ m (que ofrece un área cubierta de 9 m^2). La estructura se compone de un techo plano con materiales de tipo emparedado y está soportada por cuatro pilares de $0,3$ m en las esquinas.

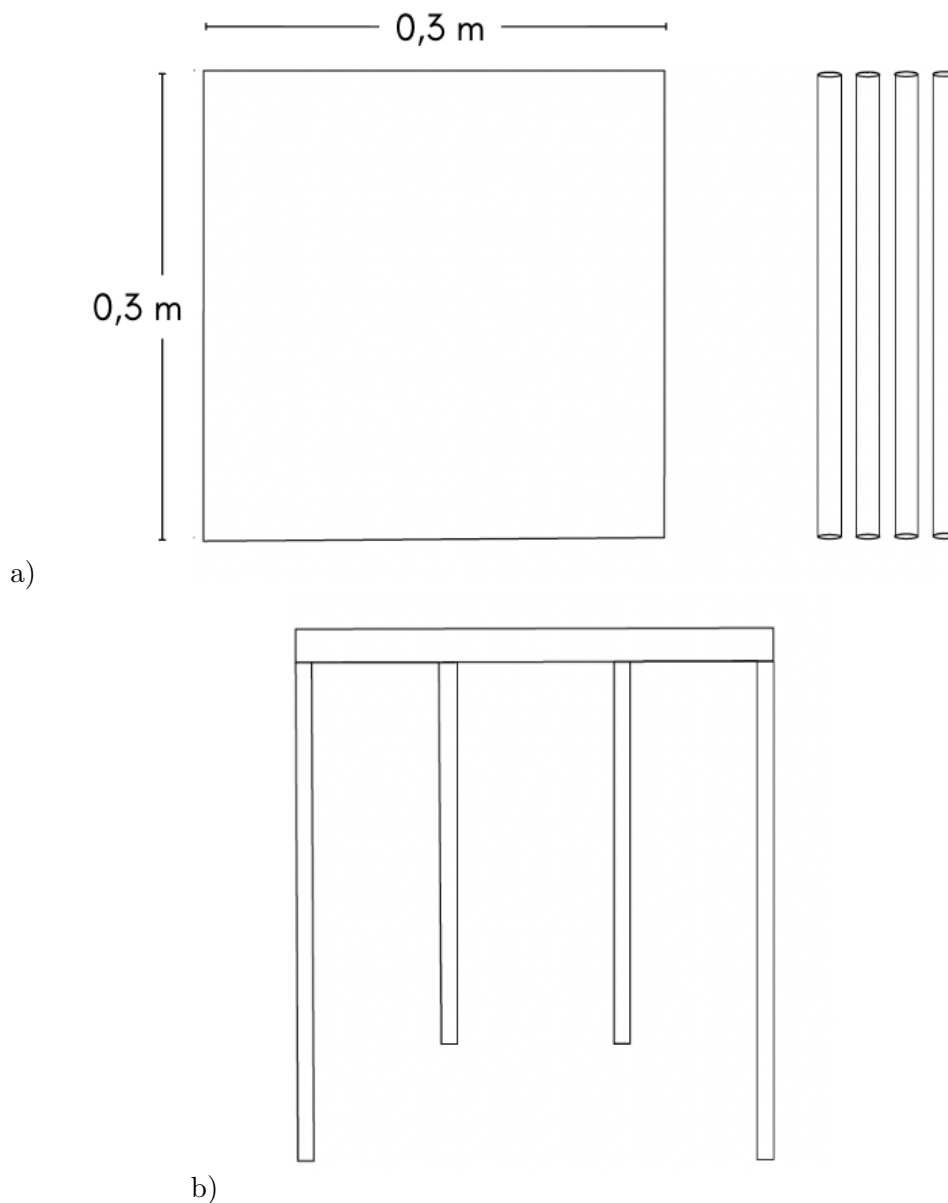


Figura 3.10: a) Dimensiones de la cubierta y soportes del prototipo b) Vista frontal del diseño del prototipo experimental a escala

El experimento se realizó el miércoles 21 de mayo de 2025 dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande, las cuales se muestran en la imagen satelital de la Figura 3.12, en la región de la Mixteca Alta, Oaxaca. La prueba inició a las 01 : 20 pm bajo condiciones de 28 % de humedad relativa y una temperatura ambiente de 23 °C.

Asimismo, se registró un índice UV de 9, con una irradiancia inicial de 880 W/m², y una velocidad del viento de 9 km/h. Los datos de la irradiancia obtenida durante un periodo de 30 minutos se presentan detalladamente en la gráfica de la Figura 3.11 y la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Irradiancia solar registrada en intervalos de tiempo seleccionados.

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	35
Irradiancia (W/m ²)	880.0	976.8	833.6	886.0	871.3	618.7	704.0	736.8

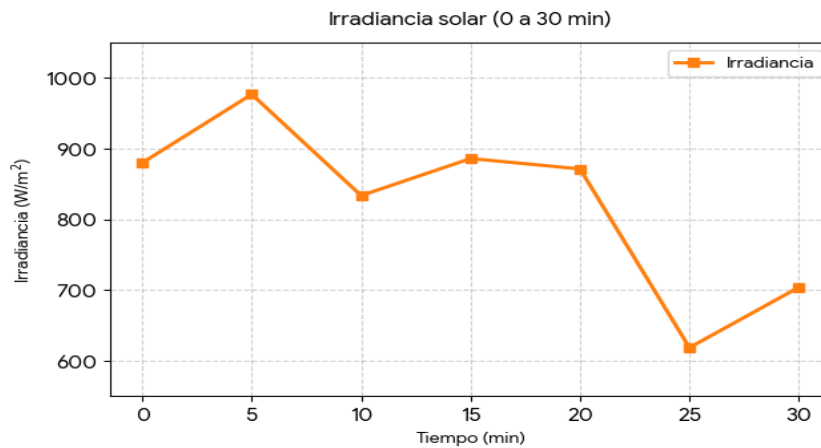


Figura 3.11: Irradiancia solar percibida el 21 de mayo de 2025

A continuación, en la Tabla 3.5, se muestran los datos correspondientes al grosor, masa y dimensiones de los materiales utilizados para la realización del experimento.

Tabla 3.5: Datos de los materiales

Material	Grosor (m)	Masa (kg)	Dimensiones (m)
Policloruro de vinilo (PVC)	0,001	0,054	0,3 × 0,3
Ais. doble de aluminio	0,004	0,034	0,3 × 0,3

En la Tabla 3.6 se muestran los parámetros correspondientes a los materiales seleccionados para la experimentación del toldo a escala, emparedado compuesto por la lona de PVC y aislante doble de aluminio.



Figura 3.12: Ubicación geográfica de ITSMIGRA

Datos experimentales

En la Figura 3.13 se presentan las imágenes térmicas de los materiales previas al experimento. El material superior (PVC), mostrado en el inciso a), presenta una temperatura de $25,1^{\circ}\text{C}$, mientras que el material inferior (aislante térmico doble) registra $23,4^{\circ}\text{C}$. Al exponerse a la radiación solar, el incremento térmico de los componentes fue inmediato (ver Figura 3.16), aumentando $4,9^{\circ}\text{C}$ durante el primer minuto de exposición.

Asimismo, en la Tabla 3.7 se detallan las temperaturas de los materiales. El área expuesta al sol registró una temperatura de $40,9^{\circ}\text{C}$, mientras que el área cubierta por el toldo se mantuvo en $39,9^{\circ}\text{C}$. Observándose que la temperatura en el interior disminuye 1°C desde los primeros segundos de la prueba.

El experimento se realizó en un lapso de 34 minutos. Finalizado este tiempo, se tomó un último dato de la temperatura del material superior, área sombreada y el área expuesta al sol (ver Figura 3.14). El material superior finalizó con una temperatura de $33,7^{\circ}\text{C}$, es decir, con un incremento de más de 7°C de su temperatura inicial. En el inciso c) se muestra la temperatura del material inferior (aislante de aluminio doble) con $25,8^{\circ}\text{C}$ posterior al levantamiento del material superior (lona de PVC). Esto indica que el material superior fue capaz de mitigar la temperatura debido a ciertas propiedades, como reflejar parte de la radiación solar, emitir calor al ambiente y tener una baja conductividad térmica, con $7,9^{\circ}\text{C}$ de diferencia de temperatura, sin embargo cabe señalar que hubo un incremento de temperatura de $2,4^{\circ}\text{C}$ en el material inferior (aislante) respecto a su temperatura inicial. Manteniendo una temperatura final relativamente baja en comparación con la temperatura final de la lona de PVC.

Otro aspecto importante es el comportamiento del área sombreada, la cual registró un decremento de $5,5^{\circ}\text{C}$ en comparación con el área expuesta totalmente al sol (ver Figura 3.15).

Tabla 3.6: Parámetros de materiales de la experimentación

Símbolo	Nombre	Valor	Unidades
$T_{1,0}$	Temperatura inicial del material superior	25,1	°C
T_a	Temperatura ambiente	23,0	°C
h_1	Coefficiente de transferencia de calor por convección	30,0	W/(m ² ·°C)
S_1	Área superficial expuesta al ambiente	0,0912	m ²
m_1	Masa material superior	0,054	kg
c_1	Calor específico del material superior	1000	J/(kg · °C)
A_1	Área expuesta directamente al sol	0,09	m ²
A	Área en contacto con material inferior	0,09	m ²
I	Irradiancia solar ganada	650,0	W/m ²
λ	Conductividad térmica del velcro	0,04	W/(m · °C)
L	Grosor del velcro	0,0004	m
$T_{2,0}$	Temperatura inicial del material inferior	23,4	°C
h_2	Coefficiente de transferencia de calor por convección	27,0	W/(m ² ·°C)
c_2	Calor específico del material inferior	1300	J/(kg · °C)
S_2	Área superficial expuesta al ambiente	0,0948	m ²
m_2	Masa de material inferior	0,034	kg

Al finalizar el experimento, se tomo la temperatura del área sombreada concluyendo con una temperatura de 36 °C, lo que representa una disminución de 3,9 °C respecto a su condición inicial de 39,9 °C. Estos resultados demuestran que el uso de toldos mitiga la temperatura de manera eficiente cuando se combina una selección idónea de materiales con una estructura adecuada.

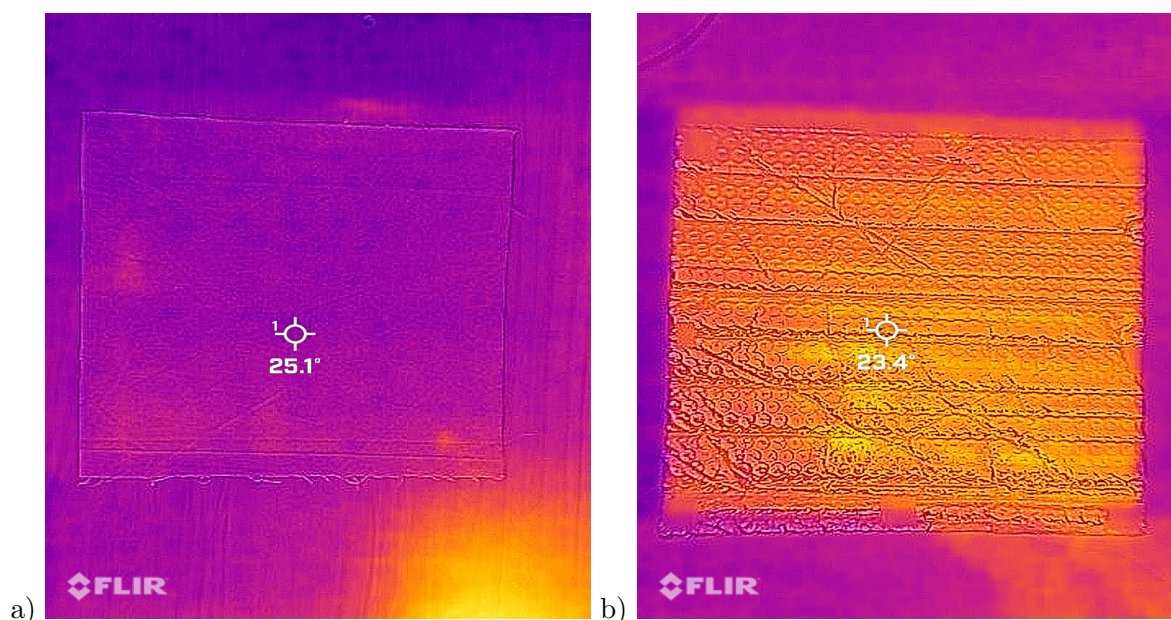
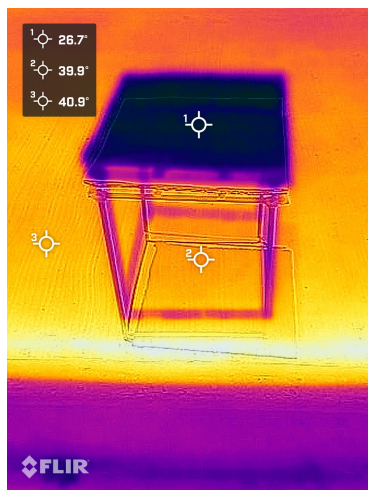
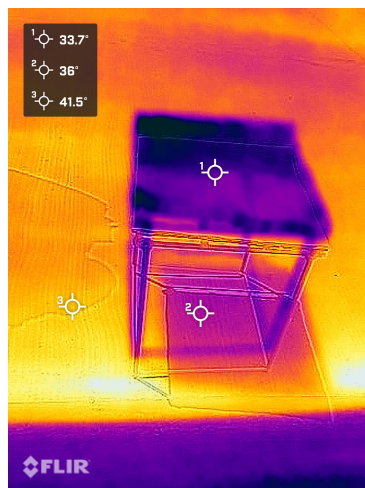


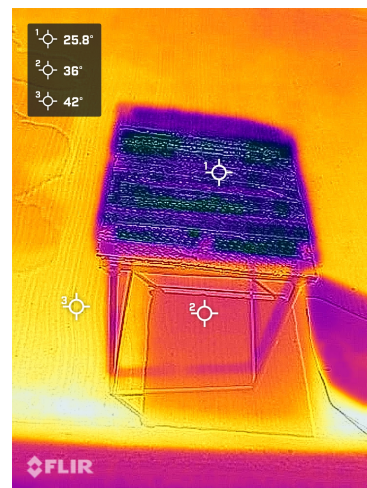
Figura 3.13: a) Temperatura inicial de material superior b) Temperatura inicial de material inferior



(a) Imagen de los primeros segundos del emparedado expuesto al sol



(b) Temperatura final del experimento



(c) Temperatura final de material inferior

Figura 3.14: Comportamiento térmico en un toldo a escala

Tabla 3.7: Temperaturas experimentales registradas de un toldo a escala

Tiempo (min)	Temperatura del material superior (T_1)(t) (°C)	Temperatura del material inferior (T_2) (t) (°C)	Temperatura en el área sombreada (t) (°C)	Temperatura en el área expuesta (t) (°C)
0	25.1	23.4	39.9	40.9
1	30	-	39	41.5
4	31.7	-	36.8	40.4
5	31.8	-	36.5	40.7
6	34.2	-	37.3	41.2
7	34	-	36.7	41.2
8	33.3	-	36.6	40.7
11	25.9	-	36.6	38.6
12	28.9	-	37.6	41
14	32.9	-	37.5	42.3
15	32.8	-	36.6	42.6
19	33.4	-	36.8	42.6
20	35.4	-	37.1	42.9
23	27	-	40	41.4
24	30.7	-	39.1	41.3
25	25.6	-	36.6	39.9
26	26.1	-	36.7	40
27	26.4	-	37.6	40.3
28	26.5	-	37	39.6
29	26.7	-	36.7	39.7
30	31.2	-	36.8	41.5
34	33.7	-	36	41.5
34	33.7	25.8	36	42

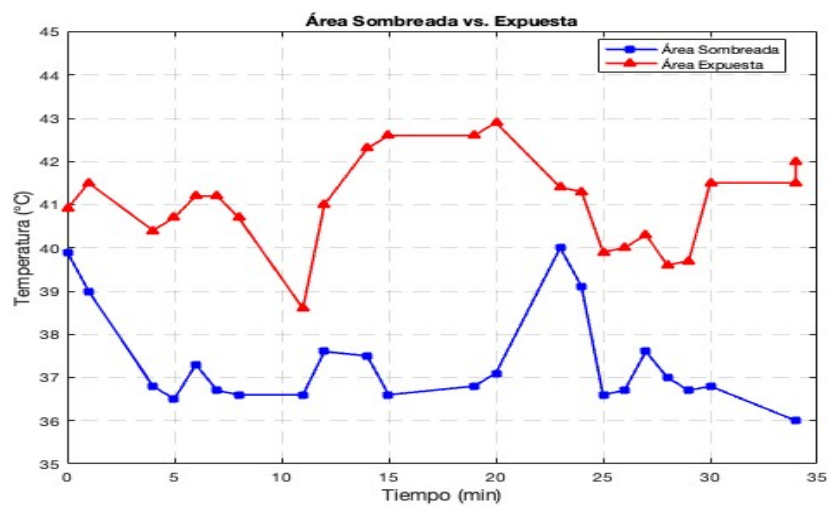


Figura 3.15: Área sombreada vs área expuesta

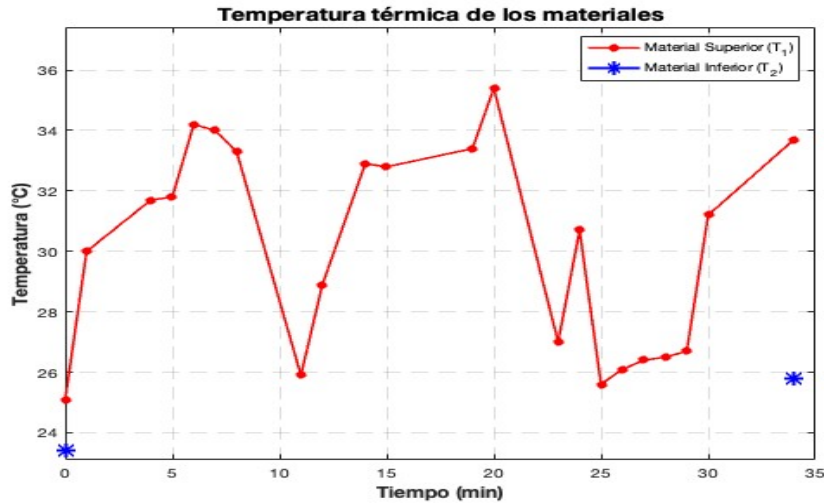


Figura 3.16: Área sombreada vs área expuesta

3.2. Modelo físico y matemático del emparedado

El sistema estudiado corresponde a una estructura multicapa tipo emparedado conformada por un material superior y una capa inferior. El propósito del modelo consiste en describir el comportamiento térmico transitorio del sistema bajo condiciones reales de exposición a radiación solar, considerando los mecanismos de transferencia de calor presentes en el experimento. Desde el punto de vista físico, la capa superior actúa como superficie receptora de radiación solar incidente, absorbiendo energía térmica y distribuyéndose sobre su superficie. Parte de esta energía es disipada hacia el ambiente mediante convección y otra fracción es transferida hacia la capa inferior mediante conducción térmica a través de la interfaz de contacto entre materiales. Simultáneamente, el material inferior intercambia calor con el ambiente debido al fenómeno convectivo presente en la región inferior del sistema.

Bajo estas consideraciones, el sistema térmico fue modelado mediante balances de energía de parámetros concentrados, asumiendo temperatura especialmente uniforme en cada capa debido a las reducidas dimensiones y espesores de los materiales empleados.

Formulación del modelo matemático

La formulación matemática se obtuvo a partir de balances de energía aplicados a cada nodo térmico del sistema, presentados en el capítulo II, se muestra la Figura 3.17 para comprender el modelo del emparedado.

■ Balance energético de la capa superior

El balance energético del material superior se define por la ganancia de radiación solar frente a la disipación de calor por convección y la conducción térmica hacia la superficie subyacente

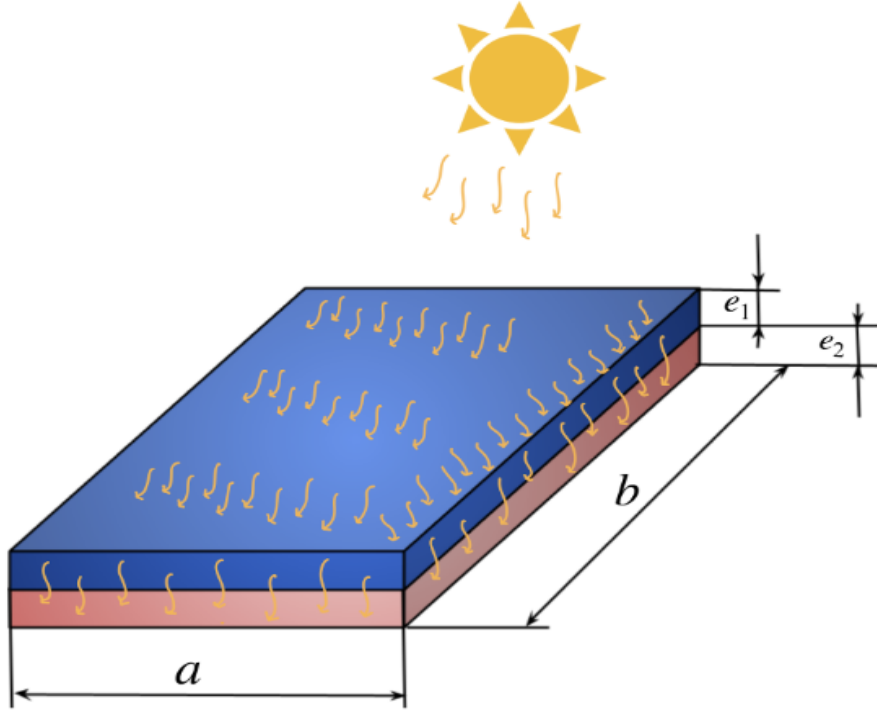


Figura 3.17: Emparedado expuesto a radiación solar

(material inferior).

El balance energético queda expresado por:

$$m_1 c_1 \frac{dT_1}{dt} = I A_1 - h_1 S_1 (T_1 - T_a) - \frac{\lambda A}{L} (T_1 - T_2) \quad (3.1)$$

Reordenando:

$$\frac{dT_1}{dt} = \underbrace{-\frac{h_1 S_1}{m_1 c_1} (T_1 - T_a)}_{\text{Convección}} + \underbrace{\frac{I A_1}{m_1 c_1}}_{\text{Radiación}} - \underbrace{\frac{\lambda A}{L m_1 c_1} (T_1 - T_2)}_{\text{Conducción}} \quad (3.2)$$

donde:

h_1 coeficiente de transferencia de calor por convección del material superior ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$).

S_1 área superficial del material superior expuesta al ambiente (m^2).

m_1 masa del material superior (kg).

c_1 calor específico del material superior ($\text{J/kg} \cdot ^\circ \text{C}$).

T_1 temperatura del material superior ($^\circ \text{C}$).

T_a temperatura ambiente ($^\circ \text{C}$).

I irradiancia solar variante en el tiempo (W/m^2).

λ conductividad térmica del velcro (W/m · °C).

A_1 área expuesta de manera directa a la radiación solar (m²).

A área en contacto con el material inferior (m²).

L grosor del velcro (m).

T_2 temperatura del material inferior (°C).

Esta ecuación modela la evolución térmica transitoria del material superior bajo la influencia de la radiación solar y las fluctuaciones de las variables ambientales.

■ Balance energético de la capa inferior

La capa inferior recibe energía por conducción desde la superficie superior y simultáneamente disipa calor hacia el ambiente.

El balance energético se expresa como:

$$m_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{\lambda A}{L} (T_1 - T_2) - h_2 S_2 (T_2 - T_a) \quad (3.3)$$

Despejando:

$$\frac{dT_2}{dt} = \underbrace{-\frac{h_2 S_2}{m_2 c_2} (T_2 - T_a)}_{\text{Convección}} + \underbrace{\frac{\lambda A}{L m_2 c_2} (T_1 - T_2)}_{\text{Conducción}} \quad (3.4)$$

La ecuación obtenida describe la dinámica térmica del aislante inferior considerando la interacción conductiva con la capa superior y la pérdida convectiva hacia el entorno.

Resolución numérica

Debido a la naturaleza no estacionaria del sistema y a la dependencia temporal de la irradiancia solar, el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) se resolvió mediante el método numérico de Euler.

La discretización temporal empleada se define según la Ecuación 3.5:

$$T^{n+1} = T^n + \left(\frac{dT}{dt} \right) \Delta t \quad (3.5)$$

donde Δt representa el paso de integración. Este esquema permite aproximar la evolución térmica transitoria de ambas capas durante el periodo bajo estudio.

Mediante la simulación, se pretende evaluar la precisión del modelo matemático presentado en la Ec. 3.2 y 3.4, contrastando los resultados teóricos con los datos obtenidos experimentalmente. Esta validación tiene como finalidad consolidar el modelo como una herramienta confiable

para la optimización del diseño de toldos y la predicción de su desempeño térmico ante diversas condiciones ambientales.

La implementación numérica se llevó a cabo en el software **MATLAB**, utilizando un paso de integración $\Delta t = 0,001$ y un tiempo total de simulación de $T_{\text{sim}} = 34$ min.

3.2.1. Simulación del modelo matemático del fenómeno térmico con datos experimentales

El modelo matemático permite analizar el comportamiento térmico de los materiales empleados en la cubierta del toldo, así como evaluar su capacidad para mitigar la transferencia de calor hacia el interior de la estructura. En este trabajo, la cubierta se representa como un sistema tipo emparedado, compuesto por dos capas de materiales con propiedades térmicas distintas: una capa superior expuesta directamente a la radiación solar y una capa inferior orientada hacia el interior del toldo.

El objetivo de la simulación es estimar la evolución temporal de la temperatura en cada una de las capas del emparedado, considerando la radiación solar incidente, la conducción de calor entre los materiales y las pérdidas por convección hacia el ambiente. De esta manera, el modelo permite estudiar la respuesta térmica del sistema bajo condiciones ambientales reales y comparar los resultados simulados con los datos obtenidos experimentalmente.

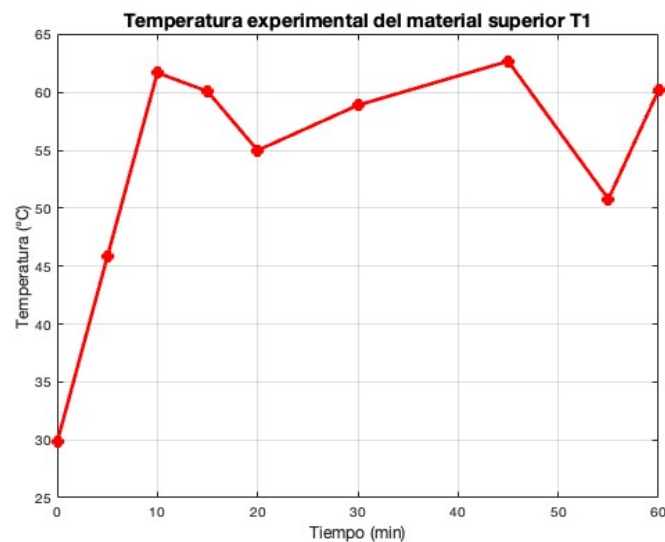


Figura 3.18: Temperatura experimental del material superior: acrílico con fibra de vidrio.

En las Figuras 3.18 y 3.19 se muestran las mediciones experimentales de temperatura correspondientes al material superior y al material inferior, respectivamente. El material superior corresponde a una cubierta de acrílico con fibra de vidrio, mientras que el material inferior corresponde a un aislante térmico con espuma. Estas mediciones permiten observar la diferencia

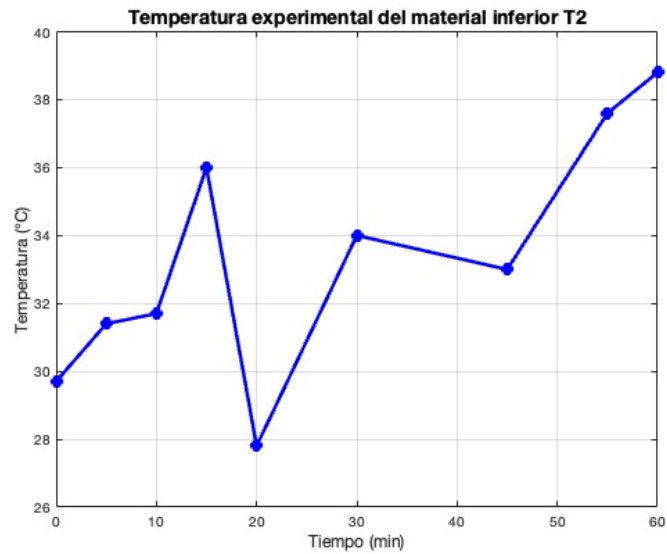


Figura 3.19: Temperatura experimental del material inferior: aislante térmico con espuma.

en la respuesta térmica de cada capa cuando el sistema es expuesto a radiación solar. Asimismo, en la Figura 3.20 se presenta la comparación de temperaturas entre ambos materiales, lo cual permite identificar diferencias significativas en el calentamiento de las capas que conforman el emparedado.

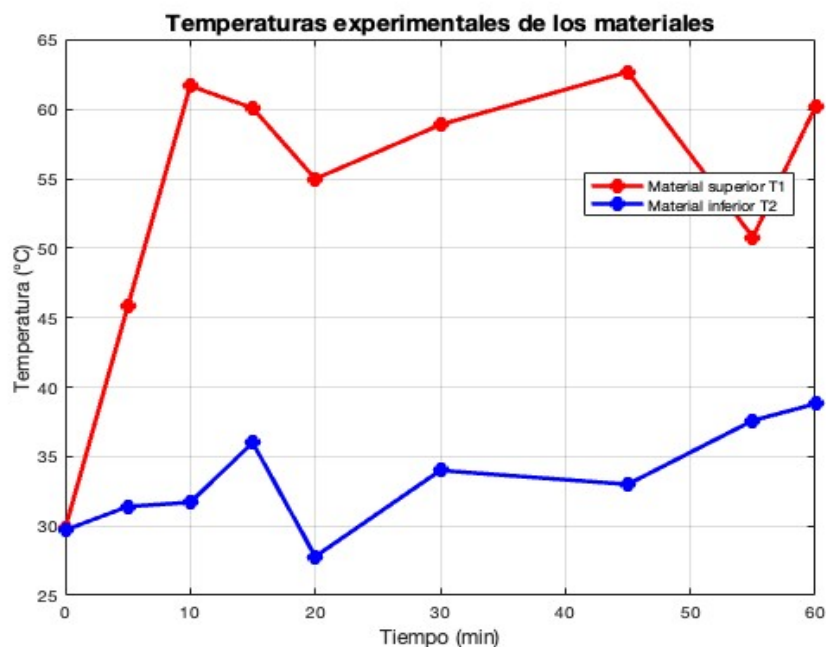


Figura 3.20: Comparación experimental de la temperatura en los materiales del emparedado uno.

La comparación entre el modelo matemático y los datos experimentales se emplea como cri-

terio de validación del modelo propuesto. Las ecuaciones 3.2 y 3.4 describen, respectivamente, el balance térmico del material superior y del material inferior. A partir de estas ecuaciones, se resolvió numéricamente el sistema dinámico y se compararon las temperaturas simuladas con las temperaturas registradas durante el experimento.

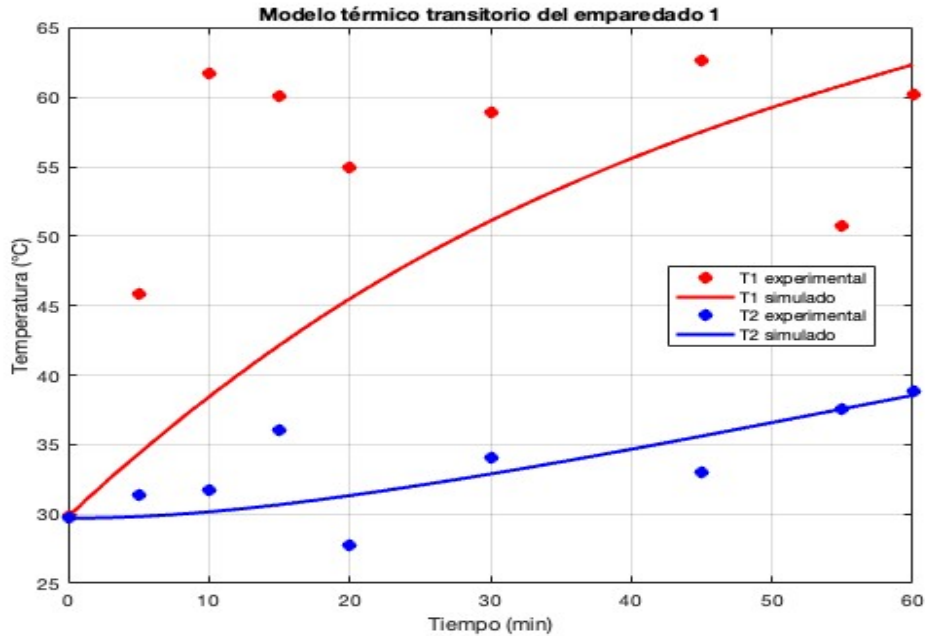


Figura 3.21: Comparación entre temperaturas experimentales y simuladas del emparedado uno.

En la Figura 3.21 se presenta la comparación entre las temperaturas simuladas y experimentales del emparedado compuesto por acrílico con fibra de vidrio como material superior y aislante térmico con espuma como material inferior. En dicha figura, las curvas continuas representan los resultados obtenidos mediante simulación numérica, mientras que las líneas discontinuas corresponden a los datos experimentales. Esta comparación permite evaluar la capacidad del modelo para reproducir la dinámica térmica del sistema bajo condiciones reales de exposición solar.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo reproduce de manera aproximada la tendencia general de calentamiento de ambos materiales. Para el material superior, la temperatura simulada final fue de $62,36^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura experimental final fue de $60,2^{\circ}\text{C}$. Esta diferencia indica que el modelo logra aproximarse al valor final medido, aunque no reproduce con exactitud todas las variaciones observadas durante el experimento. En el caso del material inferior, la temperatura simulada final fue de $38,54^{\circ}\text{C}$, valor cercano al registrado experimentalmente.

A pesar de que las temperaturas simuladas no coinciden completamente con los datos experimentales, el modelo permite representar la tendencia térmica general del emparedado. Debido a que los datos simulados no considera información en tiempo real de la irradiancia solar respecto al tiempo. Además de que puede atribuirse a perturbaciones ambientales presentes durante la

prueba, tales como, presencia de nubosidad parcial y cambios en la velocidad del viento. Por ejemplo, durante el intervalo de 5 a 10 minutos se observó un incremento abrupto de temperatura en el material superior, el cual no fue reproducido completamente por la simulación. De manera similar, la disminución de temperatura registrada en el material inferior alrededor del minuto 20 puede asociarse con una reducción temporal de la radiación solar incidente debido al paso de nubes.

Otro factor importante es la influencia del viento sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección. La presencia de viento puede incrementar la convección forzada y modificar el valor efectivo de α , provocando que los materiales se calienten o enfríen con una rapidez distinta a la prevista por el modelo. Por esta razón, en la simulación se emplearon coeficientes convectivos ajustados, con el propósito de representar de mejor manera las condiciones reales del experimento.

En general, la comparación entre simulación y experimento muestra que el modelo matemático es útil para describir el comportamiento térmico del emparedado y estimar la evolución de la temperatura en sus capas. No obstante, para mejorar su precisión, es recomendable incorporar mediciones continuas de irradiancia solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento. Asimismo, el uso de parámetros efectivos, como la absorción solar, la conductancia térmica entre capas y los coeficientes de convección, permite representar de forma más realista las condiciones presentes en el experimento.

3.2.2. Simulación del modelo térmico de toldo a escala

La aproximación entre el modelo simulado y los datos experimentales depende directamente de la selección de los parámetros físicos utilizados en las ecuaciones diferenciales. En el modelo considerado, los parámetros con mayor influencia son la irradiancia I , los coeficientes de transferencia de calor por convección h_1 y h_2 , la conductividad térmica λ , las masas m_1 y m_2 , los calores específicos c_1 y c_2 , así como las áreas de transferencia A , S_1 y A_1 .

El parámetro I determina la cantidad de energía solar que incide sobre el material superior. Por lo tanto, un valor mayor de I provoca un incremento más rápido de la temperatura T_1 , mientras que un valor menor reduce la pendiente de calentamiento. En el experimento real, la irradiancia solar no permanece constante, ya que puede variar por nubosidad parcial, orientación de la superficie y condiciones atmosféricas. Por esta razón, en la simulación el valor de I se interpreta como una irradiancia efectiva del modelo.

Los coeficientes convectivos h_1 y h_2 controlan la rapidez con la que cada material intercambia calor con el aire circundante. Un valor alto de α_1 incrementa la pérdida de calor del material superior hacia el ambiente, reduciendo la temperatura simulada de T_1 . De forma similar, α_2 influye en la temperatura del material inferior, ya que representa la pérdida de calor hacia el aire interior del toldo. Estos parámetros son sensibles a la velocidad del viento y a la ventilación

natural, por lo que pueden variar durante el experimento.

La conductividad térmica λ regula la transferencia de calor entre el material superior y el material inferior. Si λ aumenta, el calor se transmite con mayor facilidad desde T_1 hacia T_2 , provocando que la temperatura del material inferior se eleve más rápidamente. En cambio, un valor menor de λ representa una mayor resistencia térmica entre capas, lo que permite que T_2 permanezca más estable y con menor incremento de temperatura. Este parámetro es especialmente importante en el análisis de cubiertas tipo emparedado, ya que permite evaluar la capacidad aislante del conjunto.

Por otra parte, las masas y calores específicos de los materiales determinan la inercia térmica del sistema. Materiales con mayor masa o mayor calor específico requieren más energía para elevar su temperatura, por lo que presentan una respuesta térmica más lenta y suave. En cambio, materiales ligeros o con bajo calor específico tienden a calentarse y enfriarse con mayor rapidez.

En la Figura 3.22 se observa que el modelo reproduce de forma aproximada la tendencia general de las temperaturas experimentales. La temperatura del material superior presenta mayores variaciones debido a su exposición directa a la radiación solar, mientras que el material inferior muestra una respuesta más atenuada, asociada a la resistencia térmica del emparedado. Las diferencias entre las curvas simuladas y experimentales pueden atribuirse a perturbaciones ambientales no medidas de manera continua, como cambios de irradiancia, viento, nubosidad y contacto no ideal entre los materiales.

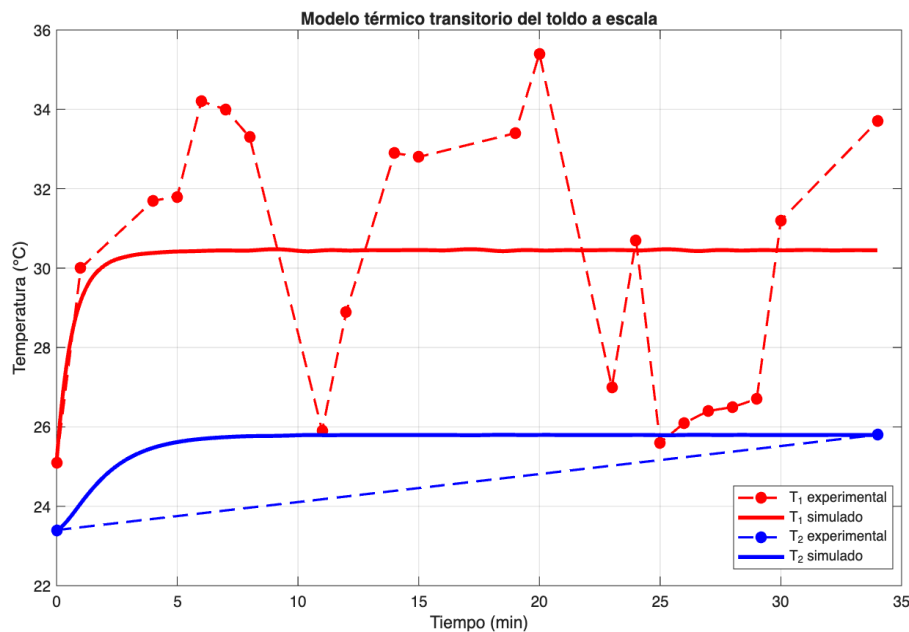


Figura 3.22: Temperaturas experimentales de toldo a escala vs simulación

3.3. Diseño del toldo

3.3.1. Desarrollo de Caja Morfológica

Metodología Caja Morfológica:

Paso 1: Definir el objetivo

Diseñar un sistema de alojamiento portátil optimizado para la mitigación de la carga térmica por radiación solar, mediante la integración de materiales y configuraciones geométricas que maximicen el confort térmico y garanticen la portabilidad.

Paso 2: Análisis funcional y definición de parámetros, definiéndose las características a estudiar para el logro del objetivo propuesto en el paso anterior.

- **Parámetro 1** Material y características de la cubierta.
- **Parámetro 2** Mecanismo de interrupción térmica, estrategia física para detener el calor.
- **Parámetro 3** Propiedades ópticas del color del material del toldo, control de la interacción con el espectro solar.
- **Parámetro 4** Desfogue de aire en el techo para la evacuación de calor acumulado en el interior por convección, entradas y salidas de aire.

V1:Techo

V2:Laterales

- **Parámetro 5** Soporte estructural, esqueleto que mantiene la integridad del sistema.

V1:Material de la estructura

V2:Geometría de la base

V3:Dimensiones

V3:Uniones

V4:Varillas

- **Parámetro 6** Método de ensamblaje, define la portabilidad y rapidez de despliegue.

V1:Armado estructural

Paso 3: Generación de la matriz de atributos donde se determinaron las diversas alternativas de los parámetros necesarios a considerar en el diseño.

Atributo A: Material de la cubierta

A1:PVC con fibra de vidrio

A2:PVC

A3:Algodón

A4:Manta

Atributo B: Mecanismo de interrupción térmica.

B1:Alfombra aislante

B2:Aislante térmico doble

B3:Espuma de Polietileno (EPE)

B4:Aerogel

Atributo C: Propiedades ópticas de la cubierta

C1:Negro

C2:Blanco

C3:Gris

C4:Beige

C5:Azul

Atributo D: Desfogue de aire en el techo.

D1: Mono techo

D2: Doble techo

Atributo E: Desfogue de aire laterales del toldo

E1:Sin laterales

E2:Laterales fijas

E3:Laterales corredizas

E4:Laterales corredizas con remaches

E5:Laterales corredizas con remaches y mosquitero

Atributo F: Material de la estructura

F1:Caña guadua

F2:PVC

F3:Aluminio

Atributo G: Geometría base estructural

G1:Cuadrado

G2:Rectangular

Atributo H: Dimensión del toldo

H1:3 x 3 (m)

H2:2 x 3 (m)

H3:3 x 2 (m)

Atributo I: Uniones

I1:Articulaciones

I2:Bisagras

I3:Empalmes de rieles

I4:Conectores (L,T,Y,X).

Atributo J: Tipo de armado de varillas de la estructura

J1:Telescópicas con armado de tipo tijera

J2:Tubular

Atributo K: Estabilidad del toldo.

K1:Ojales de metal, estacas de metal, ajustador de cuerdas

K2:Ojales de metal, estacas de plástico, ajustador de cuerdas

K3:Ojales de metal, estacas de metal tipo espiral, ajustador de cuerdas

K4:Ojales de metal, estacas de plástico tipo espiral, ajustador de cuerdas.

Paso 4: Construcción de Caja morfológica, mediante una tabla se plasmaron en la parte superior de las columnas los parámetros o atributos. En la parte vertical de la tabla se colocaron las diversas opciones (variantes) a elegir para cada atributo. Se analizaron los atributos fundamentales para el diseño del toldo tales como el número de puertas, paredes o cortinas laterales, número de ventanas, forma de las ventanas, tipos de uniones, anclajes, tipos de soportes de uniones, clips y tensores, los cuales se muestran en la Figura 3.23.

Puerta (j)	Paredes laterales (k)	Tipo de paredes (l)	Ventanas (m)	Forma de ventanas (n)	Uniones (o)	Varillas (p)	Anclajes (q)	Soporte de uniones (r)	Tipos de clips (s)	Tensores (t)
0	0	Cierre	0	Cuadrado	Articulaciones	Telescópicas	Estacas de metal	Tuercas y tornillos	Redondos (plástico)	Cuerdas elásticas
1	1	Fijas	1	Inglesa, cerradas	Bisagras	Ensamble	Estacas de plástico	Seguro de mariposas	Pinzas (abrazaderas)	Cuerdas polipropileno
	2	Corredizas	2	Inglesa, abierta	Empalmes de rieles		Anclajes de espiral	Pijas	Ojales de metal	Ajustador de cuerdas
	3		3	Cuadrado	Perforaciones para tornillo y tuercas					
	4		4							

Figura 3.23: Combinación de los atributos para el diseño del toldo parte 2

Finalmente se concluyó con la siguiente propuesta de la Caja morfológica mostrada en la Figura 3.24 considerando los atributos descritos en pasos anteriores. En la imagen se muestra en la parte horizontal los atributos considerados mientras que las diversas opciones para cada atributo de encuentran de manera vertical en cada una de las columnas al que corresponde, para facilitar la comprensión y análisis de las combinaciones se adjunto una clave de acuerdo a la posición de cada opción es decir (A1,A2...,B1,B2....).

Atributos Opciones	A. Material cubierta	B. Interrupción térmica	C. Color de la cubierta	D. Desfogue aire techo	E. Desfogue laterales	F. Mat. estructura	G. Geometría base	H. Dimensión (m)	I. Uniones	J. Tipo armado	K. Estabilidad
1	PVC con fibra de vidrio (A1)	Alfombrilla aislante (B1)	Negro (C1)	Mono techo (D1)	Sin laterales (E1)	Caña guadua (F1)	Cuadrado (G1)	3 x 3 (H1)	Articulaciones (I1)	Telescópicas (J1)	Estacas metal/ojales metal/ajustador (K1)
2	PVC (A2)	Aislante térmico doble (B2)	Blanco (C2)	Doble techo (D2)	Laterales fijas (E2)	PVC (F2)	Rectangular (G2)	2 x 2 (H2)	Bisagras (I2)	Tubular (J2)	Estacas plástico/ojales metal/ajustador (K2)
3	Algodón (A3)	Espuma Polietileno (B3)	Gris (C3)		Laterales corredizas (E3)	Aluminio (F3)		3 x 2 (H3)	Empalme rieles (I3)		Estacas metal espiral/ojales metal /ajustador (K3)
4	Manta (A4)	Aerogel (B4)	Beige (C4)		Corredizas con remaches (E4)				Conectores (L,T,Y,X) (I4)		Estacas plástico espiral /ojales metal/ajustador (K4)
5			Azul (C5)		Remaches y mosquitero (E5)						

Figura 3.24: Caja morfológica de un toldo

Paso 5: Se realizó un análisis de Consistencia Cruzada (CCA) (ver Figura 3.25) mediante la selección de tres posibles combinaciones de las variantes de cada atributo (parámetro) para generar una nueva solución del diseño. Considerándose las siguientes combinaciones:

Combinación 1: A1+B2+C3+D2+E4+F2+G2+H3+I4+J2+K1

Combinación 2: A2+B2+C2+D2+E5+F3+G1+H1+I1+J1+K3

Combinación 3: A4+B2+C4+D1+E3+F1+G1+H1+I4+J2+K1

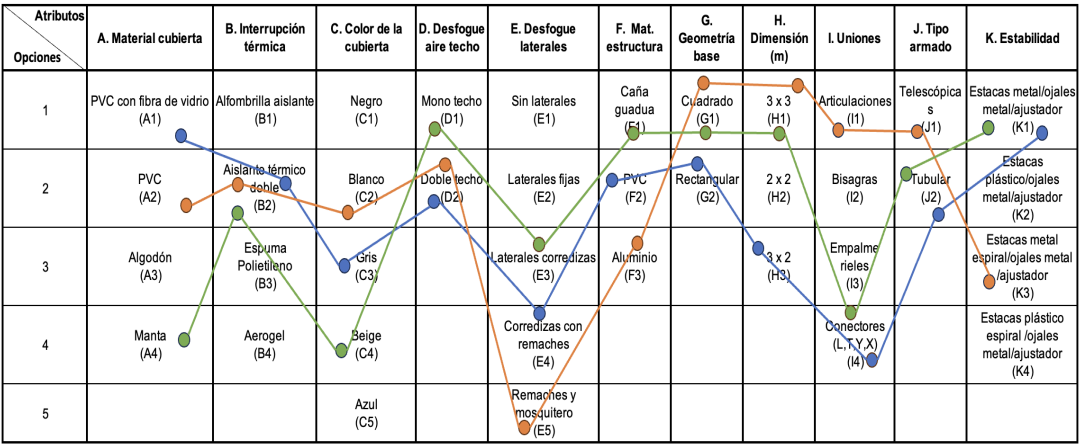


Figura 3.25: Combinaciones de variantes de atributos de Caja morfológica

Paso 6: Tras el análisis de consistencia cruzada, se procedió a la evaluación técnica de las tres combinaciones resultantes. Para determinar la solución óptima, se ponderaron tres criterios críticos: Eficiencia térmica (mitigación de radiación y flujo de aire), Portabilidad (peso y complejidad de armado) y Funcionalidad (protección y versatilidad).

3.3.2. Análisis de la Caja Morfológica

3.3.2.1. Diseño de toldo combinación 1

Combinación 1 (Ruta azul): Presenta una configuración térmicamente robusta gracias al PVC con fibra de vidrio (A1) de color gris (C3) es un material ideal de acuerdo a datos experimentales previos, el material aislante térmico (B2),laterales corredizas con remaches (E4) y el doble techo (D2) son elementos que contribuyen a minimizan la temperatura interior del toldo. Las dimensiones de 3 x 2 metros (H3) al ser una geometría rectangular, permite una mejor organización de flujos de aire en comparación con un cuadrado. Si se orienta el lado de 3 metros hacia la brisa predominante, maximizando la superficie de intercambio de calor por convección. Garantizando un espacio confortable para un número de 2 a 4 personas. Para este diseño del toldo se considera las mismas indicaciones que el primer diseño, forma de base cuadrangular paredes ajustables y tener preferentemente un techo con doble capucha. De añadir un elemento u objeto adicional en el interior del toldo

mostrada en la Figura 3.26 se consideran las siguientes recomendaciones:

- **Mesa pequeña (2 – 4 personas):** Una mesa pequeña para 2 – 4 personas es la mejor opción. Permitiendo que 2 – 4 personas estén cómodas.
- **Mesa mediana (4 personas):** Una mesa de tamaño mediano para 4 personas en un toldo con base rectangular al ser un espacio estrecho solo de 2 metros, el espacio en su interior sería estrecho y limitando para su movilidad. Lo ideal serían 2 – 3 personas para estar cómodas dentro de un toldo con estas dimensiones.

En cuanto a la estabilidad las estacas de metal, ojales de metal y ajustador de cuerda garantizan la estabilidad del toldo. Sin embargo, el uso de estructura de PVC (F2) y uniones mediante conectores (I4) con armado tubular (J2) penaliza drásticamente la portabilidad. Convirtiéndose en un diseño de armado lento con múltiples piezas sueltas, lo que incrementa el riesgo de pérdida de componentes y tiempo de despliegue.

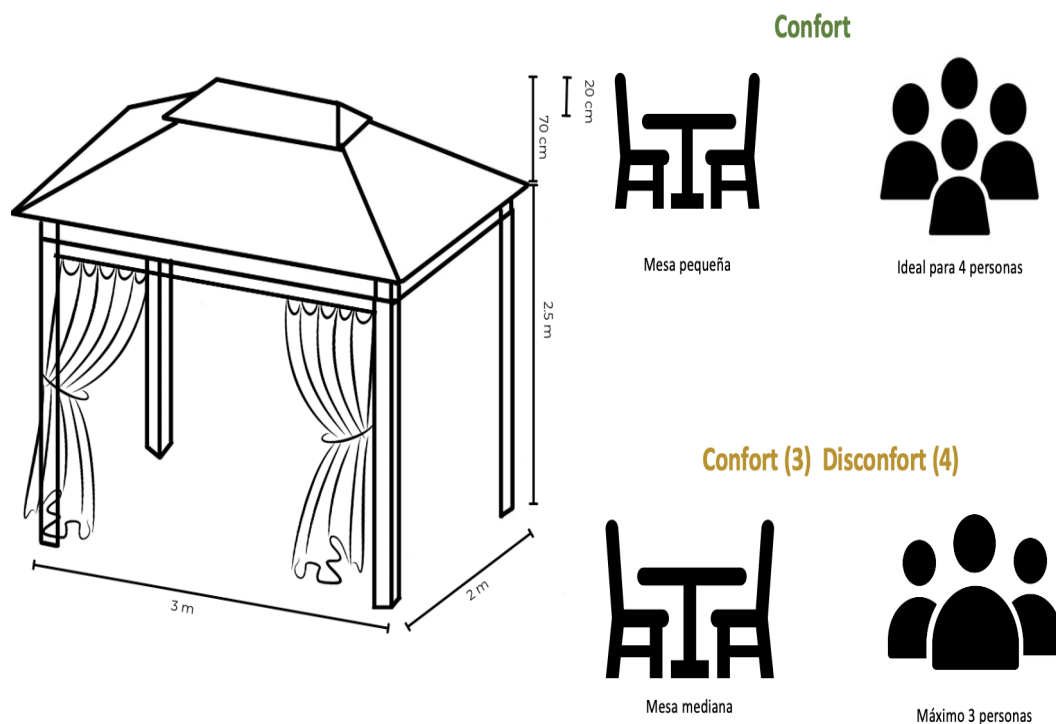


Figura 3.26: Espacio interior del toldo con base rectangular

3.3.2.2. Diseño de toldo combinación 2

Combinación 2 (Ruta naranja): Es la configuración con mayor equilibrio técnico. En la Figura 3.27 se observa el diseño desde una perspectiva lateral, mientras que la Figura 3.28 muestra la imagen frontal. El material de la cubierta de policloruro de vinilo PVC (A2), se caracteriza por su capacidad de bloqueo de la radiación UV, alta resistencia al desgarre, resistencia a la intemperie y abrasión.

- **Mesa pequeña (para 4 personas):** Si usas una mesa pequeña, tipo bistro o cuadrada para 4 personas, se puede tener espacio suficiente y cómodo para 4 personas.
- **Mesa mediana (para 6 personas):** En el mismo toldo colocando una mesa rectangular o redonda para 6 personas, el espacio será más ajustado considerándose como ligeramente cómodo.

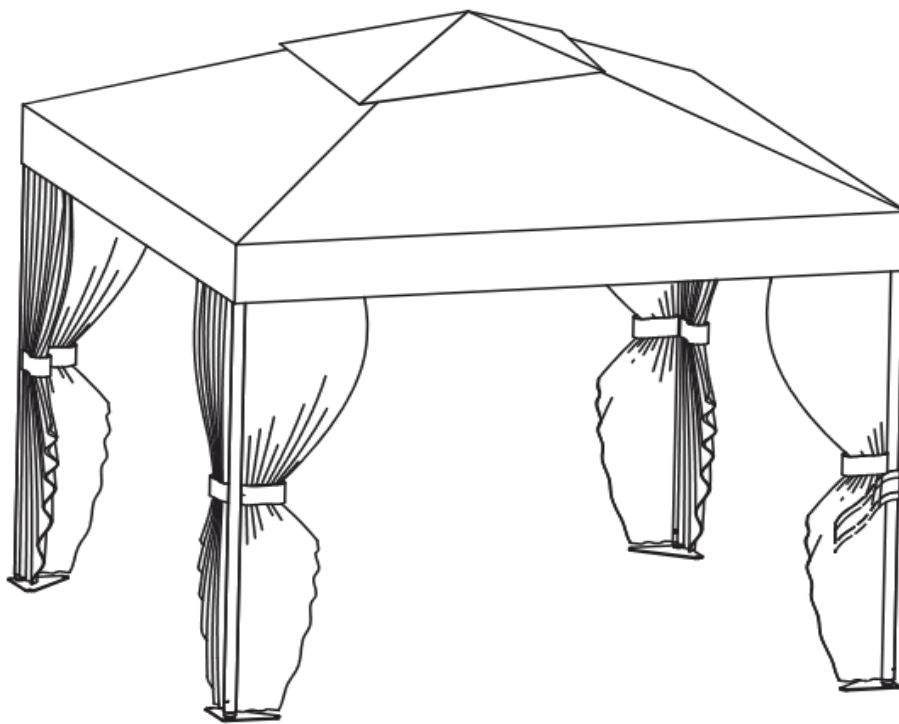


Figura 3.27: Toldo cuatro aguas con doble techo vista en perspectiva

3.3.2.3. Diseño de toldo combinación 3

Combinación 3 (Ruta verde): Es la opción menos eficiente para el objetivo propuesto se muestra en la Figura 3.29. El uso de tela de Manta (A4) de color beige(C4) tiene una baja resistencia a la radiación UV y térmica en comparación con los polímeros técnicos, lo

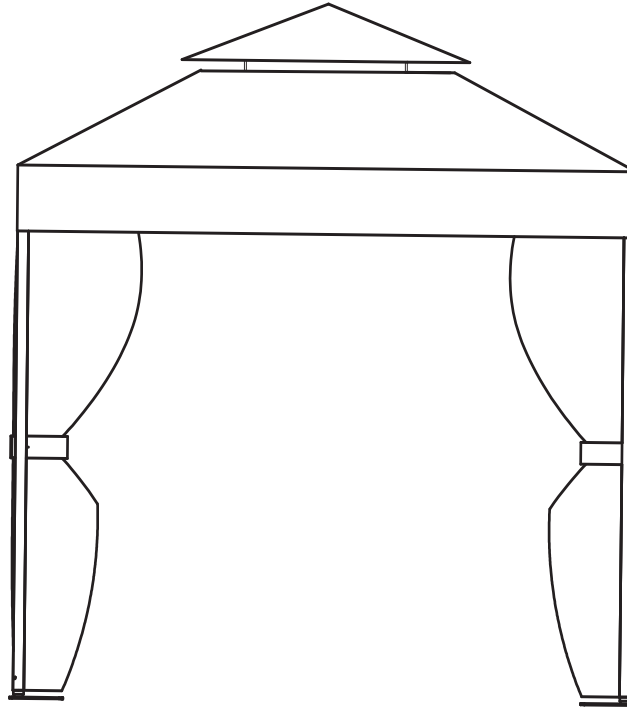


Figura 3.28: Toldo cuatro aguas con doble techo vista frontal

que permitiría la transferencia de calor hacia el Aislante térmico doble (B2). La estructura de caña guadua (F1) y el mono techo (D1) limitan tanto la durabilidad como la evacuación del calor por convección, fallando en el criterio de confort térmico y la portabilidad al ser instalado por medio de conectores (I4) con armado de tipo tubular (J2) siendo un material pesado con un diseño complejo de instalar, siendo una alternativa para un espacio con una instalación fija como el jardín.

Descripción de propuesta de diseño final del toldo:

A partir del análisis experimental, la simulación del modelo térmico y la evaluación de distintas configuraciones de materiales, se propone el diseño conceptual de un toldo portátil orientado a la mitigación solar y al mejoramiento del confort térmico en espacios exteriores. La propuesta considera que el desempeño térmico del toldo no depende únicamente del área de sombra generada, sino también de la selección de materiales, la geometría de la cubierta, la ventilación natural y la facilidad de montaje. El diseño propuesto se basa en una estructura portátil de planta cuadrada, con dimensiones de referencia de 3×3 m y una altura aproximada de 2,5 m, lo que permite cubrir un área útil de 9 m^2 . Esta configuración corresponde a una medida comercial común en toldos portátiles, por lo que facilita su posible adaptación a aplicaciones recreativas, comerciales, comunitarias o de protección temporal.

La cubierta se plantea como un sistema tipo emparedado, compuesto por una capa superior

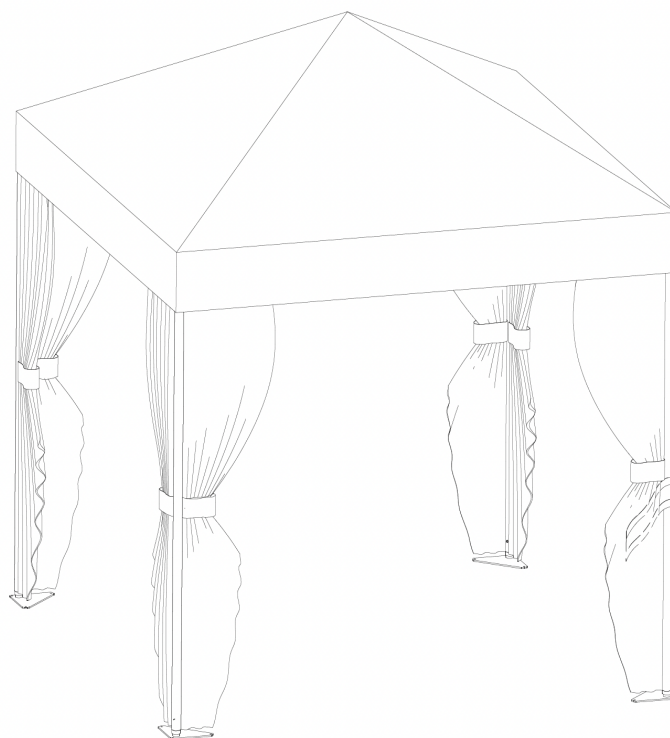


Figura 3.29: Toldo cuatro aguas mono techo (vista en perspectiva)

de lona de PVC y una capa inferior de aislante térmico aluminizado. La capa superior tiene la función de recibir directamente la radiación solar, resistir las condiciones ambientales y proporcionar protección mecánica. Por su parte, la capa inferior funciona como una barrera térmica que reduce la transferencia de calor hacia el espacio interior del toldo. Esta configuración se fundamenta en los resultados experimentales, donde las combinaciones con aislante térmico de aluminio mostraron capacidad para disminuir la temperatura en la zona sombreada y limitar el incremento térmico del material inferior. En particular, se observaron reducciones de temperatura de hasta $11,3^{\circ}\text{C}$ en la sombra proyectada respecto al área expuesta, dependiendo de la combinación de materiales evaluada. Desde el punto de vista geométrico, se propone una cubierta inclinada o de cuatro aguas, en lugar de un techo completamente plano. Esta geometría favorece el escurrimiento del agua de lluvia, mejora la estabilidad de la cubierta y contribuye a dirigir la radiación solar incidente hacia superficies con diferente orientación. Además, la inclinación de la cubierta permite reducir la acumulación de aire caliente en la zona superior del toldo.

Como mejora adicional, se propone incorporar una abertura superior o doble techo, también denominada capucha de ventilación. Este elemento permite aprovechar el efecto chimenea: el aire caliente acumulado bajo la cubierta asciende por diferencia de densidad y sale por la parte superior, mientras que aire más fresco ingresa por las zonas laterales o inferiores. De esta manera, la ventilación natural complementa el efecto aislante de los materiales y contribuye a reducir la temperatura interna del espacio protegido. Esta decisión de diseño es coherente con el análisis realizado, donde se identifica que la ventilación natural y el efecto chimenea pueden mejorar el confort térmico bajo el toldo. La estructura de soporte se plantea mediante elementos de tipo

tijera y ligeros, preferentemente de aluminio o acero galvanizado, debido a su relación entre resistencia, durabilidad y facilidad de transporte. El sistema debe permitir un montaje sencillo, con articulaciones resistentes y anclajes que garanticen estabilidad frente a cargas de viento. La portabilidad del diseño requiere que los componentes puedan transportarse sin maquinaria especializada.

En términos funcionales, el diseño debe considerar entradas laterales de aire, cubierta superior reflectiva, bajo peso, facilidad de limpieza, resistencia a la intemperie y posibilidad de reemplazar la cubierta en caso de desgaste. Asimismo, se recomienda emplear colores claros en la superficie exterior, ya que estos tienden a reflejar una mayor fracción de la radiación solar incidente y reducen el calentamiento superficial de la cubierta. En conjunto, el diseño propuesto integra criterios térmicos, estructurales y funcionales. La cubierta tipo emparedado reduce la transferencia de calor hacia el interior; la geometría inclinada mejora el drenaje y la estabilidad; el doble techo favorece la ventilación natural; y la estructura desmontable mantiene la portabilidad del sistema.

Por lo tanto, la propuesta representa una alternativa viable para el desarrollo de toldos portátiles con mejor desempeño térmico frente a diseños convencionales de cubierta simple en la Tabla 3.8 se describen los criterios considerados para el diseño del toldo portátil, tales como la cubierta, geometría, ventilación, color exterior, estructura, anclaje, portabilidad. La Tabla 3.9 muestra la justificación técnica de los elementos seleccionados (material exterior, material interior, configuración de la cubierta, estructura, geometría de base, tipo de techo, ventilación superior, laterales, color e inclinación) para la propuesta de diseño del toldo.

Tabla 3.8: Criterios considerados para el diseño del toldo portátil.

Elemento de diseño	Propuesta	Justificación técnica
Cubierta	Sistema tipo emparedado con lona de PVC y aislante térmico aluminizado.	Reduce la transferencia de calor hacia el interior y mejora el desempeño térmico respecto a una cubierta simple.
Geometría	Cubierta inclinada o de cuatro aguas.	Favorece el drenaje pluvial, reduce acumulación de calor y mejora la estabilidad geométrica.
Ventilación	Doble techo o abertura superior.	Permite evacuar aire caliente mediante efecto chimenea y mejora la ventilación natural.
Color exterior	Superficie clara o reflectiva.	Disminuye la absorción de radiación solar y reduce el calentamiento superficial.
Estructura	Sistema de tipo tijera expandible de aluminio o acero galvanizado.	Facilita transporte, montaje y estabilidad mecánica.
Anclaje	Estacas, contrapesos o lastres según el sitio de instalación.	Mejora la seguridad del sistema frente a viento y cargas externas.
Portabilidad	Componentes ligeros, modulares y de fácil ensamblaje.	Permite uso en actividades temporales, comerciales, recreativas o comunitarias.

Tabla 3.9: Justificación técnica de los elementos seleccionados para el diseño del toldo portátil.

Elemento seleccionado	Propuesta	Justificación técnica
Material exterior	PVC color blanco	Proporciona impermeabilidad, resistencia ambiental y mayor reflexión de radiación solar debido al color claro.
Material interior	Aislante térmico doble de aluminio	Funciona como barrera térmica y radiante, reduciendo la transferencia de calor hacia el interior del toldo.
Configuración de cubierta	Tipo emparedado	Permite combinar materiales con funciones térmicas distintas para mejorar el desempeño frente a radiación solar.
Estructura	Aluminio con armado tipo tijera	Favorece la portabilidad, ligereza y rapidez de montaje.
Geometría de base	Cuadrada, 3×3 m	Ofrece un área útil de 9 m^2 , adecuada para uso familiar, comercial o temporal.
Tipo de techo	Cuatro aguas	Favorece el drenaje pluvial, mejora la estabilidad geométrica y distribuye la incidencia solar.
Ventilación superior	Doble techo o capucha	Permite la salida de aire caliente mediante efecto chimenea y mejora la ventilación natural.
Laterales	Cortinas ajustables	Permiten controlar ventilación, entrada de radiación solar, privacidad y protección frente a viento o lluvia.
Color	Tonalidades claras	Reducen la absorción de calor y favorecen el confort visual interior.
Inclinación	Rango de 15° a 30°	Facilita el escurrimiento del agua y permite controlar parcialmente la incidencia solar.

La propuesta final no debe entenderse únicamente como una mejora formal del toldo, sino como una integración de estrategias pasivas de control térmico. La combinación de cubierta multicapa, ventilación natural y geometría inclinada permite reducir la ganancia de calor, mejorar la circulación del aire y generar condiciones más favorables para el usuario. De esta forma, el diseño responde al objetivo de desarrollar un toldo portátil que proporcione sombra y, al mismo tiempo, contribuya a la mitigación solar y al confort térmico.

3.3.3. Boceto de diseño adicional de un toldo portátil adaptable

Como propuesta complementaria al diseño principal del toldo portátil, se plantea un boceto conceptual de una cubierta adaptable, orientada a brindar sombra y mitigación solar en espacios donde existan elementos fijos que puedan funcionar como puntos de apoyo, tales como árboles, pilares, postes, muros o columnas. Esta propuesta busca ampliar las posibilidades de uso del toldo, reduciendo la dependencia de una estructura completamente independiente y favoreciendo su portabilidad. En la Figura 3.30 se muestra una primera aproximación del diseño, en la cual la cubierta puede sujetarse parcialmente a un elemento fijo del entorno. Por su parte, la Figura 3.31 presenta la vista superior del sistema, donde se observa una configuración abierta que permite adaptar la geometría del toldo al objeto de soporte. Esta característica resulta útil en espacios

exteriores irregulares, donde no siempre es posible instalar un toldo convencional con cuatro postes.

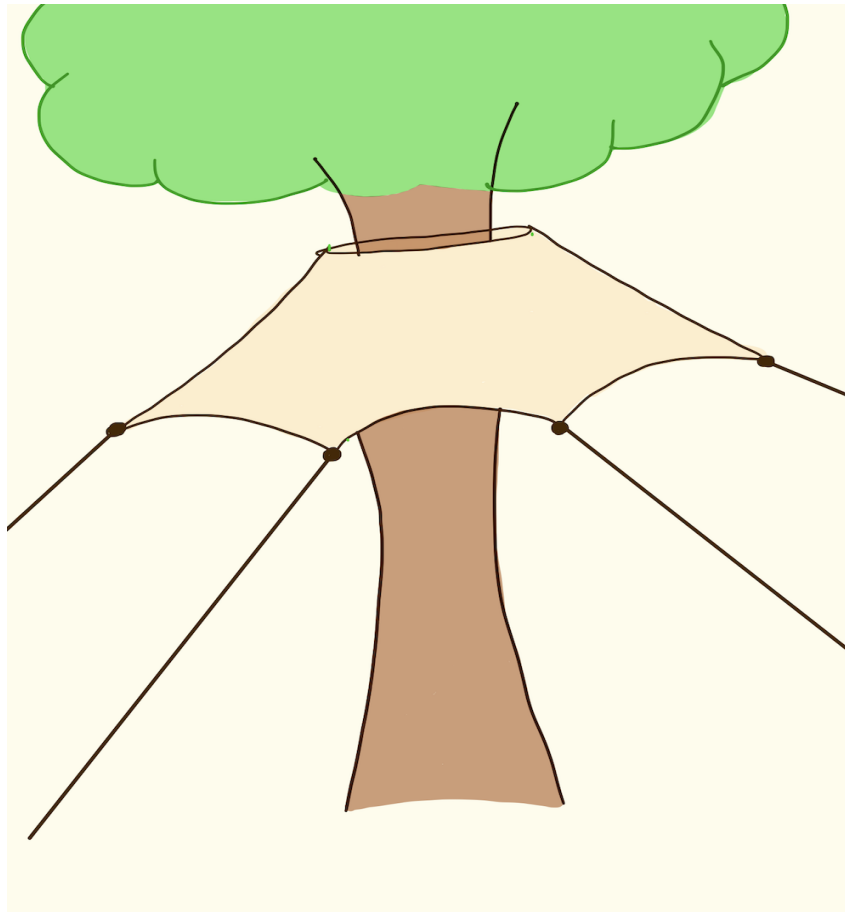


Figura 3.30: Boceto diseño de toldo ajustable

Desde el punto de vista funcional, el diseño se concibe como una estructura ligera, desmontable y de fácil instalación. La cubierta podría fabricarse con un sistema multicapa, integrando una lona exterior reflectiva y una capa interior aislante, con el propósito de reducir la transferencia de calor hacia el espacio protegido. Asimismo, se recomienda incorporar puntos de tensión regulables en los extremos de la cubierta, de manera que el usuario pueda ajustar la inclinación, la altura y la tensión del material según la posición del sol, la dirección del viento y el tipo de soporte disponible. Para mejorar la estabilidad del sistema, se propone que el toldo incluya correas ajustables, tensores, mosquetones, ojillos reforzados y anclajes desmontables. Estos elementos permitirían fijar la cubierta de forma segura sin dañar el elemento de soporte. En caso de utilizar árboles, se recomienda emplear bandas anchas de sujeción para evitar concentraciones de esfuerzo sobre la corteza. Cuando el soporte sea un pilar o poste, podrían emplearse abrazaderas regulables para una fácil instalación.

Una mejora importante para este diseño consiste en incorporar al menos dos postes telescópicos desmontables en los extremos libres de la cubierta. Estos postes permitirían controlar la altura del toldo y generar una pendiente adecuada para el escurrimiento de agua de lluvia.

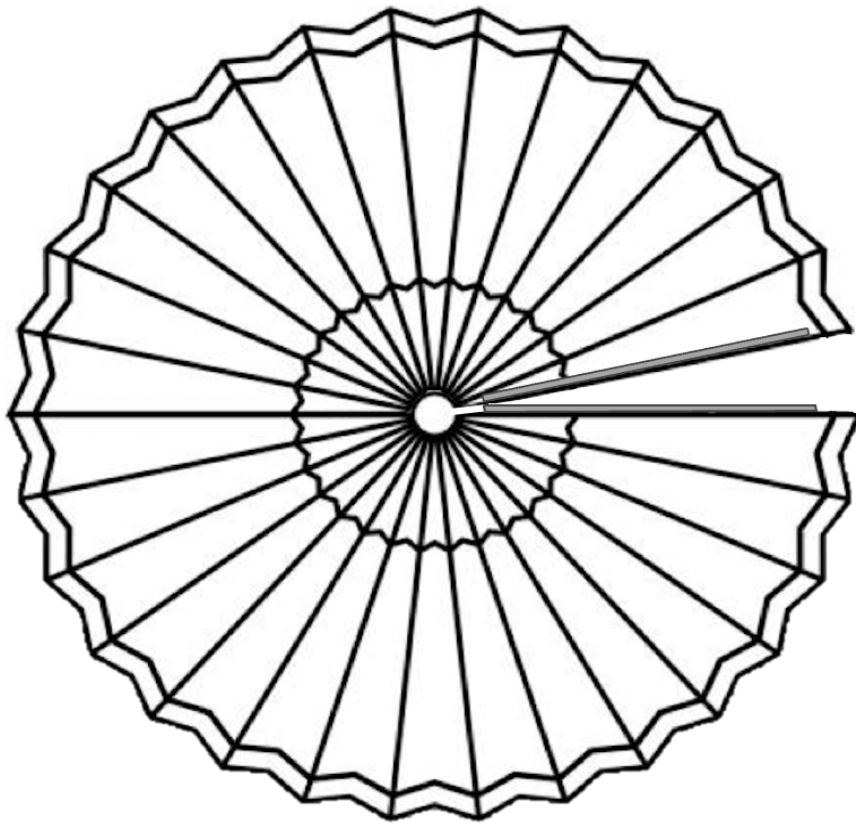


Figura 3.31: Vista superior de diseño de toldo ajustable

Además, al modificar la altura relativa entre los puntos de apoyo, se favorecería la circulación natural del aire y se reduciría la acumulación de calor bajo la cubierta. En términos de confort térmico, se recomienda que la cubierta tenga una inclinación ajustable y una superficie exterior de color claro, preferentemente blanco, beige o gris claro, para disminuir la absorción de radiación solar. También podría incorporarse una pequeña abertura superior o una separación entre capas, con el fin de permitir la salida del aire caliente acumulado. De esta manera, el diseño no solo funcionaría como una barrera de sombra, sino como un sistema pasivo de mitigación térmica.

El diseño también puede mejorarse mediante una geometría modular. Por ejemplo, la cubierta podría dividirse en secciones triangulares o trapezoidales unidas mediante cierres, velcro estructural o broches resistentes. Esta configuración permitiría adaptar el tamaño del toldo al espacio disponible y facilitaría su almacenamiento. Asimismo, una cubierta plegable reduciría el volumen de transporte y permitiría que el sistema se guardara en una bolsa compacta. En general, este boceto representa una alternativa flexible para situaciones donde se requiere sombra temporal, pero no se dispone de una estructura completa de soporte. Aunque la propuesta aún requiere mayor desarrollo constructivo y validación experimental, su potencial radica en la combinación de portabilidad, adaptabilidad y bajo peso. Para etapas posteriores, se recomienda evaluar la resistencia al viento, la facilidad de montaje, el comportamiento térmico de la cubierta

y la estabilidad de los puntos de anclaje bajo distintas condiciones de uso.

La Tabla 3.10 muestra los elementos de diseño a considerar en el toldo para garantizar una mejora en el confort térmico, incorporando mejoras para cada elemento propuesto, así como la justificación técnica de la propuesta.

Tabla 3.10: Mejoras propuestas para el diseño del toldo portátil adaptable.

Elemento de diseño	Mejora propuesta	Justificación técnica
Sistema de sujeción	Correas ajustables, tensores, mosquetones y ojillos reforzados.	Permiten adaptar el toldo a árboles, postes o pilares sin comprometer la estabilidad del sistema.
Puntos de apoyo	Incorporación de postes telescópicos desmontables.	Facilitan el ajuste de altura, inclinación y tensión de la cubierta, mejorando la portabilidad.
Cubierta	Sistema multicapa con lona exterior reflectiva y capa interior aislante.	Reduce la ganancia de calor hacia el espacio protegido y mejora el confort térmico.
Geometría	Cubierta inclinada y adaptable.	Favorece el escurrimiento de agua, mejora la proyección de sombra y facilita la ventilación natural.
Color exterior	Uso de colores claros o superficies reflectivas.	Disminuye la absorción de radiación solar y reduce el calentamiento superficial.
Ventilación	Separación entre capas o abertura superior.	Permite evacuar aire caliente acumulado mediante convección natural.
Portabilidad	Diseño plegable o modular.	Reduce el volumen de transporte y facilita el armado en espacios exteriores.
Protección del soporte	Bandas anchas o abrazaderas recubiertas.	Evitan daño en árboles o superficies de apoyo y distribuyen mejor los esfuerzos.

En la Figura 3.32 se presenta una propuesta conceptual de un toldo portátil adaptable para mitigación solar. El diseño considera una cubierta ligera de tipo multicapa, sujeta parcialmente a un elemento fijo del entorno, como un árbol, poste o pilar, y soportada en sus extremos libres mediante postes telescópicos desmontables. Esta configuración permite reducir la cantidad de elementos estructurales requeridos, favoreciendo la portabilidad y facilitando su instalación en espacios exteriores.

El prototipo incorpora correas ajustables, tensores, mosquetones, ojillos reforzados y anclajes al suelo, con el propósito de garantizar estabilidad durante el uso y permitir la adaptación del sistema a diferentes condiciones de instalación. Asimismo, se propone una cubierta de color claro y con propiedades reflectivas, acompañada de una capa interior aislante, con el fin de disminuir la absorción de radiación solar y reducir la transferencia de calor hacia el área sombreada. Una característica importante del diseño es la incorporación de una abertura o separación superior para favorecer la ventilación pasiva. Mediante este principio, el aire caliente acumulado bajo la cubierta puede ascender y salir por la parte superior, mientras que el aire más fresco ingresa por los laterales. Este efecto contribuye a mejorar el confort térmico del usuario y complementa la función de mitigación solar proporcionada por los materiales de la cubierta.

También muestra una secuencia básica de instalación, que incluye la fijación de correas al elemento de apoyo, la conexión de tensores y mosquetones, el despliegue de la lona, el ajuste de los postes telescópicos y el anclaje final al suelo. De esta manera, el diseño busca integrar facilidad de montaje, estabilidad, ventilación natural y bajo peso, características necesarias para un toldo portátil de uso temporal en espacios abiertos.



Figura 3.32: Boceto diseño de toldo ajustable

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones obtenidas y los trabajos futuros de esta investigación.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajos futuros

4.1. Conclusiones

El presente trabajo permitió desarrollar un estudio teórico y experimental del comportamiento térmico de cubiertas para alojamientos portátiles, orientado a establecer criterios para el diseño de un toldo con capacidad de mitigación solar. Para ello, se analizaron diferentes configuraciones de materiales tipo emparedado, se realizaron pruebas experimentales de exposición a radiación solar y se desarrolló un modelo matemático transitorio para representar la evolución de la temperatura en las capas que conforman la cubierta. Los resultados obtenidos muestran que el desempeño térmico de un toldo no depende únicamente de la sombra generada, sino también de las propiedades térmicas y ópticas de los materiales, de su disposición dentro del sistema multicapa y de las condiciones ambientales de operación.

En particular, se observó que la combinación de materiales en forma de emparedado puede contribuir a disminuir la transferencia de calor hacia el material inferior, siempre que se integren materiales con baja conductividad térmica y propiedades que ayuden a reflejar la radiación solar. Sin embargo, también se identificó que una selección inadecuada del material superior puede favorecer la absorción de radiación y aumentar la temperatura del material inferior, por lo que la configuración de las capas resulta un factor determinante. Bajo este enfoque, la técnica de emparedado puede mitigar la temperatura de los materiales de las cubiertas portátiles. La incorporación de un material aislante aluminizado como barrera radiante permitió reducir el flujo de calor hacia la zona protegida y mejorar la diferencia térmica entre el área sombreada y el área expuesta. De acuerdo con los resultados experimentales, algunas configuraciones alcanzaron reducciones de temperatura de al menos 5 °C respecto al área sin protección, evidenciando su potencial como estrategia pasiva de mitigación solar.

Por otra parte, el modelo matemático permitió representar de manera aproximada la evolución de la temperatura en los materiales de la cubierta. Aunque el modelo requiere ajustes mediante parámetros efectivos, como la absorción solar, el contacto térmico entre capas y los coeficientes convectivos, constituye una herramienta útil para interpretar el comportamiento térmico del sistema y comparar diferentes configuraciones de materiales. Esto permite establecer una base sólida para futuros procesos de optimización y validación experimental de las estructuras.

Asimismo, el análisis morfológico permitió organizar de forma sistemática las alternativas de diseño, considerando materiales de cubierta, mecanismos de interrupción térmica, color, ventilación, geometría, estructura y portabilidad. A partir de este análisis, se propuso un diseño de toldo portátil con cubierta tipo emparedado, geometría de cuatro aguas y doble techo. Esta configuración favorece la evacuación del aire caliente acumulado en la parte superior mediante convección natural, lo que contribuye a mejorar el confort térmico en comparación con los diseños tradicionales de cubierta simple.

En términos generales, se concluye que el diseño de toldos portátiles de mitigación solar debe integrar criterios térmicos, estructurales y funcionales de manera simultánea. La selección de materiales, el color de la cubierta, la presencia de capas aislantes o reflectivas, la ventilación natural y la geometría del toldo son factores que influyen directamente en el confort térmico. Por lo tanto, los toldos portátiles no deben diseñarse únicamente como elementos de sombra, sino como sistemas pasivos capaces de reducir la ganancia de calor y mejorar significativamente las condiciones de uso en espacios exteriores.

4.2. Trabajos futuros

- Construir y evaluar un prototipo a escala real del toldo propuesto para validar experimentalmente su desempeño térmico bajo condiciones ambientales reales de operación.
- Mejorar el modelo matemático mediante la incorporación de fenómenos adicionales de transferencia de calor que permitan aumentar su precisión y capacidad predictiva.
- Aplicar la técnica de emparedado para mitigación o absorción solar en sombreros, sombrillas, fundas, cortinas, hieleras, etc, evaluando nuevos materiales y diseños para optimizar la eficiencia del confort térmico.

Bibliografía

- [1] Advanced Textiles Association. Research: Ballasting of commercial rental tents. 2024. Tent Rental Division, antes Industrial Fabrics Association International.
- [2] Benito Lauret Aguirregabiria. *Materiales 2: Arquitectura textil*. 2019.
- [3] Francis Allard, ed. *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*. James & James, London, 1998.
- [4] ASHRAE. *Ansi/ashrae standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy*. 2023.
- [5] Aztec Tents. *Standard Frame Product Manual*. Aztec Tents, 2023. Manual técnico de instalación de estructuras temporales.
- [6] María del Mar Barbero-Barrera, Nicolás Flores-Medina, y Luis Maldonado-Ramos. Impact of solar shading on façades'surface temperature in different seasons. *Buildings*, 14(3):651, 2024. doi:10.3390/buildings14030651.
- [7] Laura Bellia, Francesca Romana d'Ámbrosio Alfano, Francesca Fragliasso, Boris Igor Pallera, y Giuseppe Riccio. On the interaction between lighting and thermal comfort: An integrated approach to ieq. *Energy and Buildings*, 231:110570, 2021. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110570.
- [8] Jaime A Bermúdez et al. Reconocimiento de materiales sintéticos. *Revista Universidad EAFIT*, 26(77):richa-55, 1990.
- [9] Diego Gustavo Betancourt Chávez, Andrea Cristina Goyes Balladares, Elizabeth Katalina Morles Urrutia, y Juan Alberto Paredes Chicaiza. Materiales utilizados dentro de la arquitectura textil y las tenso estructuras. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 6(5):178-186, 2024. URL <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/1198>.
- [10] Victor Birman y George A. Kardomateas. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142:221-240, 2018. doi:10.1016/j.compositesb.2018.01.027.
- [11] Arianna Brambilla, Wenye Hu, Reza Samangouei, Rebecca Cadorin, y Wendy Davis. How correlated colour temperature manipulates human thermal perception and comfort. *Building and Environment*, 177:106929, 2020. doi:10.1016/j.buildenv.2020.106929.

- [12] Ben Bridgens y Mark Birchall. Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures. *Engineering Structures*, 44:1–12, 2012. doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.044.
- [13] Kenneth G. Budinski. *Engineering Materials: Properties and Selection*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [14] Daniela Belén Cabrera Chica. *Sistema de diseño para stands feriales en la ciudad de Cuenca*. Trabajo de titulación, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2020. URL <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10231/1/15861.pdf>.
- [15] Bruno Castanié, Christophe Bouvet, y Matthieu Ginot. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1:100004, 2020. doi:10.1016/j.jcomc.2020.100004.
- [16] Yunus A. Cengel y Afshin J. Ghajar. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, New York, 6 ed^{ón}., 2020.
- [17] David Etheridge. *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. Wiley, Chichester, 2012.
- [18] P. O. Fanger. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [19] Stefano Fantucci, Valentina Serra, y Corrado Carbonaro. Investigating the performance of reflective insulation and low emissivity paints for the energy retrofit of roofs. *Energy and Buildings*, 182:300–310, 2019. doi:10.1016/j.enbuild.2018.10.021.
- [20] Robert Fletcher y Julia Grosse. *Sustainable Textiles: Life Cycle and Environmental Impact*. Elsevier, 2012.
- [21] Brian Forster y Marijke Mollaert. Engineering fabric architecture. En *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, págs. 26–59. TensiNet, 2004. Capítulo sobre diseño e ingeniería de estructuras textiles tensadas.
- [22] Nicholas J. Hoff y S. E. Mautner. Sandwich construction. En *Monocoque, Sandwich, and Composite Aerospace Structures: Selected Papers of Nicholas J. Hoff*, págs. 463–469. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1986. ISBN 9780877624547.
- [23] Chao Hong, Yujun Yang, Shuwei Ge, Guankun Chai, Peizhi Zhao, Qingxiang Shui, y Zhaolin Gu. Is the design guidance of color and material for urban buildings a good choice in terms of thermal performance? *Sustainable Cities and Society*, 83:103927, 2022. doi:10.1016/j.scs.2022.103927.
- [24] A. Richard Horrocks y Subhash C. Anand, eds. *Handbook of Technical Textiles*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2000.
- [25] Craig G. Huntington, ed. *Tensile Fabric Structures: Design, Analysis, and Construction*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013. doi:10.1061/9780784412893.

- [26] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, y Adrienne S. Lavine. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, Hoboken, NJ, 8 ed^{ón}., 2017.
- [27] Industrial Fabrics Association International. *The IFAI Procedural Handbook for the Safe Installation and Maintenance of Tentage*. Industrial Fabrics Association International, 2007. Manual técnico para instalación segura de tiendas y estructuras temporales.
- [28] International Organization for Standardization. Iso 7730:2005 ergonomics of the thermal environment – analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria. 2005.
- [29] Ali Joudi, Harald Svedung, Mathias Cehlin, y Mats Rönnelid. Energy efficient surfaces on building sandwich panels—a parameter study. *Energy and Buildings*, 43(11):3113–3120, 2011. doi:10.1016/j.enbuild.2011.08.013.
- [30] Ryszard M. Kozłowski, ed. *Handbook of Natural Fibres: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation*, tomo 1. Woodhead Publishing, Cambridge, 2012.
- [31] Yue Liao. *Deployable Structures and Their Applications in Architecture*. Tesis Doctoral, University of Illinois Urbana-Champaign, 2024.
- [32] Josep Llorens, ed. *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2015. doi:10.1533/9781782422403.
- [33] Xavier P. V. Maldague. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Wiley, New York, 2001. ISBN 9780471181903.
- [34] Sunthar Manoharan. *Determination of Safe Ballasts for Anchoring Event Tents by Numerical Analysis*. Master’s thesis, Clemson University, 2017.
- [35] Ariane Middel, Kathrin Häb, Anthony J. Brazel, Chris A. Martin, y Subhrajit Guhathakurta. Impact of shade on outdoor thermal comfort: A seasonal field study in tempe, arizona. *International Journal of Biometeorology*, 60(12):1849–1861, 2016. doi: 10.1007/s00484-016-1172-5.
- [36] Michael F. Modest. *Radiative Heat Transfer*. Academic Press, Oxford, 3 ed^{ón}., 2013.
- [37] Mohammed Mohammed, Anwar Jaáfar Mohamad Jawad, Aeshah M. Mohammed, Jawad K. Oleiwi, Tijjani Adam, Azlin F. Osman, Omar S. Dahham, Bashir O. Betar, Subash C. B. Gopinath, y Mustafa Jaafar. Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 24:7685–7710, 2023. doi:10.1016/j.jmrt.2023.05.064.
- [38] Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, y Lawrence T. Drzal, eds. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press, Boca Raton, 2005. doi:10.1201/9780203508206.
- [39] R. K. Pal, Parveen Goyal, y Shankar Sehgal. Thermal performance of buildings with light colored exterior materials. *Materials Today: Proceedings*, 28:1307–1313, 2020. doi:10.1016/j.matpr.2020.04.508.

- [40] A. M. Papadopoulos. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1):77–86, 2005. doi:10.1016/j.enbuild.2004.05.006.
- [41] Sunil K. Ramamoorthy, Mikael Skrifvars, y Anders Persson. A review of natural fibers used in biocomposites: Plant, animal and regenerated cellulose fibers. *Polymer Reviews*, 55(1):107–162, 2015. doi:10.1080/15583724.2014.971124.
- [42] Tom Ritchey. General morphological analysis: A general method for non-quantified modeling. Inf. téc., Swedish Morphological Society, Stockholm, 2011.
- [43] Federico Rossi, Marta Cardinali, Alessia Di Giuseppe, Beatrice Castellani, y Andrea Nicolini. Outdoor thermal comfort improvement with advanced solar awnings: Subjective and objective survey. *Building and Environment*, 221:109293, 2022. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109293.
- [44] Deepak Y. Thimmegowda et al. Enhancement of mechanical properties of natural fiber composites: A review. *Composites*, 9(5):220, 2025. doi:10.3390/composites9050220.
- [45] Jack R. Vinson. *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. CRC Press, Boca Raton, 1999.
- [46] Dan Zenkert. *An Introduction to Sandwich Construction*. EMAS Publishing, London, 1997.
- [47] Fritz Zwicky. *Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach*. Macmillan, Toronto, 1969.

Anexo

Caja morfológica como criterio de decisión de diseños

Las técnicas de pensamiento creativo son una herramienta ideal para la resolución de problemas. La creatividad e innovación son competencias fundamentales para abordar problemas complejos, generar ideas y desarrollar soluciones efectivas en múltiples ámbitos. En este contexto, herramientas como la caja morfológica desempeña el papel clave al ofrecer un enfoque estructurado que fomenta el pensamiento divergente. Sin embargo, la caja morfológica también tiene limitaciones, como la complejidad que puede surgir al generar muchas combinaciones, lo que puede ser abrumador en problemas con muchas variables. Diseñada para estructurar e investigar el conjunto total de relaciones contenidas en modelos de problemas multidimensionales, altamente complejos y no cuantificables. A diferencia de las técnicas de optimización numérica que requieren una función objetivo escalar, el GMA (General Morphological Analysis) se sitúa en la fase de síntesis del diseño, permitiendo mapear la arquitectura lógica de una solución antes de su materialización física [42].

El término morfología proviene del griego *morphos* (forma) y *logos* (estudio). En el contexto de la ingeniería de diseño, se refiere al estudio de la forma interna o la estructura de las interconexiones entre los componentes funcionales de un sistema. La técnica fue desarrollada por el eminente astrofísico suizo Fritz Zwicky (1898–1974) mientras trabajaba en el California Institute of Technology (Caltech) y en la corporación Aerojet. Zwicky, conocido por sus contribuciones a la materia oscura y las supernovas, buscaba un método que permitiera al pensamiento humano superar los prejuicios y las limitaciones de la intuición convencional [47].

Objetivos y aplicaciones en la ingeniería

- **Gestión de la Complejidad:** Permite descomponer sistemas con múltiples variables en unidades manejables sin perder la visión de conjunto.
- **Exploración del Espacio de Soluciones:** Asegura que ninguna configuración viable sea omitida por sesgos del investigador.
- **Identificación de Innovación:** Facilita la detección de combinaciones no convencionales que pueden derivar en nuevas patentes o avances tecnológicos.
- **Análisis de Factibilidad:** Provee un marco lógico para descartar combinaciones físicamente imposibles antes de invertir recursos en prototipado.

Estructura matemática de la Caja Morfológica:

Desde una perspectiva de ingeniería, la caja morfológica es un modelo discreto de variables independientes. Si un sistema S se define por n parámetros críticos:

$$S = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (1)$$

Y cada parámetro tiene un número k de variantes o atributos:

$$P_i = \{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k_i}\} \quad (2)$$

El espacio total de la caja (C) es el producto cartesiano de todos sus parámetros:

$$C = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n \quad (3)$$

El número total de soluciones posibles es $\prod_{i=1}^n k_i$. Esta magnitud demuestra por qué la gestión sistemática es vital: una matriz simple de 6 parámetros con 5 variantes cada uno genera 15,625 configuraciones, un volumen imposible de analizar sin la metodología de Zwicky.

Metodología de Implementación:

Paso 1: Definir el objetivo

Clarificar qué se busca solucionar o crear, el propósito de esta investigación es proponer el diseño de un toldo que reduzca la temperatura interna garantizando confort térmico para el usuario.

Paso 2: Análisis funcional y definición de parámetros

Se identifican las funciones esenciales del sistema. Un parámetro debe ser una característica necesaria, pero no una solución en sí misma. Deben ser ortogonales (independientes entre sí) para evitar redundancias en el modelo.

Paso 3: Generación de la matriz de atributos

Se listan todas las formas posibles de realizar cada función. Se recomienda incluir tanto soluciones existentes como propuestas teóricas.

Paso 4: Construcción de la matriz (La Caja)

Se organiza la información de manera visual. Cada fila representa un parámetro y cada celda en la fila una variante. Una "solución" se visualiza como un hilo que atraviesa un atributo de

cada fila.

Paso 5: Análisis de Consistencia Cruzada (CCA)

Es el paso de filtrado científico. Se evalúa la compatibilidad entre pares de atributos. Este proceso utiliza una matriz de soporte para marcar combinaciones como:

- Mutuamente excluyentes: Por leyes físicas o lógicas.
- Inconsistentes: Por restricciones de ingeniería o costos.
- Compatibles: Configuraciones que pasan al análisis de diseño.

Paso 6: Evaluación y síntesis de soluciones candidatas

Las configuraciones que sobreviven al CCA se convierten en el catálogo de candidatos óptimos para determinar cuál ofrece el mejor rendimiento bajo las condiciones de frontera establecidas.

La Caja Morfológica no es solo una herramienta de dibujo, sino un marco de pensamiento que garantiza el rigor en la fase conceptual de la ingeniería. Su uso en esta investigación fundamenta que el diseño final no es producto del azar, sino el resultado de un escrutinio exhaustivo del universo de soluciones técnicas disponibles.

Retribución social

Zacatepec, Morelos, 11/abril/2024
ASUNTO: INVITACIÓN**ING. MARÍA DEL ROCÍO PONCIANO CHIGO**
CENIDET
PRESENTE

Durante sesenta y tres años, el Instituto Tecnológico de Zacatepec ha sido un pilar fundamental en la labor educativa y en el desarrollo de seres humanos integrales en el estado de Morelos, contribuyendo así a cubrir de forma efectiva con las necesidades de la sociedad a la cual servimos, con la calidad que caracteriza al Tecnológico Nacional de México, siendo una de nuestras estrategias, la promoción de espacios de convergencia educativa, de investigación y de formación de profesionistas de excelencia.

La Comunidad Tecnológica que orgullosamente represento, a través de mi conducto, se complace en hacerle una atenta y cordial:

INVITACIÓN

Para que nos distinga con su participación como **CONFERENCISTA** en el **"CONGRESO NACIONAL DE INNOVACIÓN, TECNOLOGÍA, LIDERAZGO Y SOSTENIBILIDAD 2024"**. Con el Tema: **"NORMAS DE CALIDAD"**, el día **23 de abril de 2024** en un horario de **15:00-16:00 horas**, en la **SALA SUM 10** del Instituto Tecnológico de Zacatepec.

Seguro de contar con su distinguida participación, la cual dará realce a nuestro evento, le deseo bienestar y salud para Usted y los suyos.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por la Independencia Tecnológica de México"**LORENZO O. HERNÁNDEZ**
DIRECTOR

CBC/VGN/orr

Calzada Tecnológico No.27 Col. Centro C.P.62780 Zacatepec, Morelos. Tel. 7343432110
y 7343432111 e-mail: dir_zacatepec@tecnm.mx | zacatepec.tecnm.mx

Figura 1: Invitación para participación como conferencista

Producto académico



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ZACATEPEC
OTORGA EL PRESENTE**

RECONOCIMIENTO

A

MARIA DEL ROCIO PONCIANO CHIGO

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN CON LA CONFERENCIA TITULADA:

“SEGURIDAD E HIGIENE”

EN EL MARCO DEL

**CONGRESO NACIONAL DE INNOVACIÓN, TECNOLOGÍA,
LIDERAZGO Y SOSTENIBILIDAD 2024**

ZACATEPEC, MOR., A 23 DE ABRIL DE 2024.

LORENZO O. HERNÁNDEZ
DIRECTOR



Figura 2: Reconocimiento participación como conferencista



Figura 3: Reconocimiento participación como ponente

DISEÑO DE UN TOLDO TÉRMICO PORTÁTIL

MARIA DEL ROCÍO PONCIANO CHIGO, JUAN REYES REYES, RODOLFO AMALIO VARGAS MÉNDEZ.
TECNM / CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO, CUERNAVACA, MORELOS.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado un notable aumento en los índices de la radiación solar, lo que ha generado preocupación por los riesgos para la salud. Este fenómeno destaca la importancia crucial de una protección efectiva y adecuada de acuerdo a lo que indica el Instituto Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT, 2023). El uso de medidas como lonas resulta esencial para prevenir problemas en la piel y evitar enfermedades graves, especialmente con el creciente nivel de exposición a esta radiación. Las membranas estructurales se presentan como un método eficaz para cubrir áreas extensas mediante el uso de materiales maleables, resistentes y duraderos que bloquean la radiación ultravioleta, permitiendo una amplia gama de diseños arquitectónicos (Murcia, López, 2020). La mayoría de las cubiertas de los toldos disponibles en el mercado no cumplen con los requisitos y estándares adecuados para la protección contra la radiación solar (Robledo, 2019). Además, presentan estructuras de baja calidad y diseño (Calderón, 2019). Este proyecto de investigación tiene como objetivo el diseño de un toldo portátil que pueda reducir significativamente los efectos perjudiciales de la radiación solar y la selección de materiales térmicos apropiados que cumplan con las normativas establecidas para lograr un confort térmico óptimo.

OBJETIVO

General:

Desarrollar un estudio teórico y experimental de la mitigación solar que se puede generar en un toldo portátil, con el propósito de proponer los diseños geométricos y la selección de los materiales para la construcción de un prototipo.

Específicos:

- Estudiar los fenómenos térmicos presentes en un material expuesto a la radiación solar, el material expuesto se parametrizará para hacer las veces de una muestra superficial de un toldo.
- Generar un conjunto de experimentos con materiales determinados para caracterizar los efectos térmicos y de mitigación solar. Estos materiales se determinan por sus prestaciones para construir toldos.
- Proponer el diseño de un toldo portátil que cumpla con las características de mitigación solar y confort térmico para la elaboración de un prototipo.

JUSTIFICACIÓN

En el mercado comercial existe una gran variedad de toldos con diversos materiales y diseños, que son utilizados para diversos usos, la mayoría de estos son elaborados de poliéster con acabados de policloruro de vinilo (PVC), lonas de fibra de vidrio con politetrafluoroetileno (PTFE) y lonas de etileno-tetrafluoroetileno (ETFE). Sin embargo el diseño y los materiales de la cubierta de estos no cubren de los daños de la radiación solar, traspasando por completo el material, convirtiéndose la parte inferior en un espacio que solo brinda sombra descuidándose el confort térmico para el usuario.

En esta investigación se busca mejorar el confort térmico de los toldos, proponiendo un diseño y material que mejore la protección solar, considerando que pueda extrapolarse posteriormente para generar espacios o cubículos confortables que brinden un mayor porcentaje de mitigación solar.

PROBLEMÁTICA

Actualmente los materiales utilizados para la fabricación de los toldos solo protegen parcialmente de la radiación solar, por lo que existe la necesidad de productos innovadores que sean capaces de dar solución a estos requerimientos, brindando confort térmico y utilizando materiales sostenibles. El propósito de la investigación es dar respuesta a la siguiente pregunta.

¿Qué materiales y diseños pueden ser utilizados para la elaboración del prototipo de un toldo portátil que brinde un mejor confort térmico y mitigación solar?



PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Revisión de la literatura

- Análisis de estudios referentes a materiales térmicos
- Análisis de diseños térmicos
- Evaluación de materiales y diseños existentes

Prueba experimental

- Análisis experimental térmico-estructural con cámara térmica con conectividad inalámbrica para dispositivos inteligentes marca (Flir ONE)
- Determinar tiempos de prueba y parámetros térmicos
- Comparación de datos

Diseño y desarrollo del prototipo

- Conjuntar datos teórico y experimental
- Diseño del prototipo del toldo



BIBLIOGRAFÍA

1. Dirección de Monitoreo Atmosférico. (n.d.). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/aire/default.php?opc=%27YqBhnmU=%27>
2. Murcia de Martínez, C., & López Ruiz, I. Membranas-Lonas.
3. Robledo-Fava, R., Hernández-Luna, M. C., Fernández-de-Córdoba, P., Michinel, H., Zaragoza, S., Castillo-Guzman, A. y Selvas-Aguilar, R. (2019). Analysis of the Influence Subjective Human Parameters in the Calculation of Thermal Comfort and Energy Consumption of Buildings. Energies, 12(8), 1531. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12081531>
4. Calderon Uribe, F. (2019). Evaluación del mejoramiento del confort térmico con la incorporación de materiales sostenibles en viviendas en autoconstrucción en Bosa, Bogotá. Revista hábitat sustentable, 9(2), 30-41.

Figura 4: Participación como ponente (póster)



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

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

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

**Maria del Rocio Ponciano Chigo, Juan Reyes Reyes, Rodoldo Amalio
Vargas Méndez**

Por su invaluable presentación del artículo DISEÑO DE UN TOLDO TÉRMICO PORTÁTIL en el 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 15 al 17 de noviembre de 2023.

Cuernavaca, Morelos, Noviembre de 2023



M0234823

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA
**DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

P7JVYE3fv00A1Qdzy042f3khhgeaN1x8S2+QJJENBehg6ppDxYEpFKGImDVJ7P0SjCfHG2uLw0N6HZWJKASmW0
FOq0S1p+N0WKRKyTIN/7bHFLu+SCWhpY4ICBzaGpuFTmSEZP6AMtXGoVbcr5T3VrIj8aRxZDKBBkBlrIRXc2fn
6uTKlmdKdKC6Y30v1h7idtMij1HkmwQg0LLZT8lrv+LUnCz6ChEDEdVRh4cCeE5CSY18TXwqcZSLQeY6m6QCU
6fgX+0xy9wtNvWY9LMM+a401QUR0raRlj2X4cQEL6IGZG+tSnBW7K2ks9WKRIm7Dh08EULr+xF7Wrg109mmQ==

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Figura 5: Participación como ponente (póster)

Sandwich technique in sheets to improve thermal comfort in awnings and tarps.

M. R. Ponciano Chigo* Juan Reyes Reyes*
Rodolfo A. Vargas Méndez*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado
Palмира S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.

Abstract: The recent increase in solar radiation demands effective solutions to protect human health and well-being. Awnings offer an effective alternative to address this issue by providing shade in outdoor spaces. However, conventional awning designs are made from a single material, allowing heat transfer to the interior and significantly reducing the desired thermal comfort. This work proposes implementing a sandwich technique, combining sheets of different materials, as a solution to optimize thermal comfort in awning structures by developing experimental data obtained using a FLIR ONE Edge Pro thermal camera. This tool captures temperature data of the materials during sun exposure, as well as the temperature of the area covered by the top material and the shaded area of the layered structure. The results show that combining materials with specific thermal characteristics helps mitigate solar radiation absorption in the lower layer, offering a better alternative for warm climates. Additionally, combinations were identified that allow an increase in the temperature of the lower material to absorb heat, as a proposal for cold climates.

Keywords: Awnings, Thermal comfort, Solar mitigation, Sandwich technique, Awnings materials.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado un notable aumento en los índices de la radiación solar, impulsado por el cambio climático generando preocupación debido a los riesgos que repercute en la salud del ser humano (Navarrete and Martín, 2022). Es ideal considerar los siguientes rangos de temperatura para garantizar salud y bienestar humano y el confort térmico, la temperatura corporal ideal es entre los $36.5^{\circ}C$ a $37^{\circ}C$ con una temperatura ambiente (Rincón-Martínez et al., 2020) entre $21^{\circ}C$ a $26^{\circ}C$. Sin embargo, es necesario considerar otros aspectos (Rojas, 2022) define que el confort o discomfort es un aspecto que surge debido a la interacción del ser humano con el entorno en el que se encuentra. Donde se consideran parámetros ambientales exteriores e interiores como la temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del aire, así como la adaptabilidad del espacio y factores personales (Fisiológicos y Psicológicos) aspectos que determinan el confort o discomfort térmico (Marchante González and González Santos, 2020).

Este fenómeno (García-Parra et al., 2022) destaca la importancia crucial de productos adecuados que brinden protección solar en espacios a la intemperie. Los toldos portátiles representan un ejemplo de diseño ingenioso que se adapta perfectamente, siendo un producto innovador que busca satisfacer una necesidad inmediata del entorno convirtiéndose en una herramienta práctica para el ser humano, cuyo producto ha tenido gran impacto y demanda en el sector comercial. Por lo que radica la importancia de

brindar productos que sean capaces de proteger al usuario, garantizando su bienestar y confort térmico.

Con base a la información encontrada en los trabajos de investigación, existen diversos diseños y estructuras de toldos con diversos materiales para brindar sombra al usuario, sin embargo, la mayoría de las cubiertas de los toldos disponibles en el mercado no cumplen con los requisitos y estándares adecuados para la protección contra la radiación solar (Robledo-Fava et al., 2019). Además, presentan estructuras de baja calidad y diseño (Calderon Uribe, 2019). Ante esto las membranas estructurales (Sastre, 2021) se presentan como un método eficaz para cubrir áreas extensas mediante el uso de materiales de mejor calidad, maleables, resistentes y duraderos que bloquean la radiación ultravioleta, permitiendo una amplia gama de diseños arquitectónicos pero con un costo más elevado a los toldos portátiles comerciales (de Martínez, 2020).

En esta investigación se busca mejorar el confort térmico de los toldos, reduciendo significativamente los efectos perjudiciales de la radiación solar mediante la combinación de materiales con la técnica de emparedado y la utilización de materiales térmicos para lograr un confort térmico óptimo. Se considera que este enfoque pueda extrapolarse posteriormente para generar espacios o cubículos confortables que brinden un mayor porcentaje de mitigación solar un aspecto que no es considerado de manera relevante en los toldos ya existentes. Además, dicho conocimiento contribuirá en el aporte para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las estructuras portátiles, de esta manera brindar un producto que garantice una mejor

Figura 6: Redacción de artículo



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

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

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Maria del Rocío Ponciano Chigo

Por su destacada participación con la exposición del Artículo
en el área Ciencias de la Ingeniería, eje estratégico Energía y Cambio Climático, titulado:
Técnica de emparedado en láminas para mejorar el confort térmico en lonas y toldos.
En el marco del 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA), celebrado
en el Tecnológico Nacional de México, campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico (TecNM/CENIDET), del 19 al 22 de noviembre de 2024

Cuernavaca, Morelos, 22 de noviembre de 2024



CITCA76024
<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

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

ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
COORDINADORA GENERAL
III CITCA

Sello Digital:

PRPP2vZpUF6AZubkUwQK9X5BxpN3eLQKzyGfh3xDmWLJTgXQjwKw0eupsVdMgxHH5vS6GtFie4jXz+k3FtrnJs
KjbHBvGGlmJvLtXVAL0KGSy0Iq91HC+xKQuJ0yFb/PbNDH/J0P9DphYPQvCrEm1jh7YiXRlXo5VwC2ZLDtr0nK
LUBK2A/3q1kYfRY6sy2xIvcSM0EIku0Vm3Th3n73QUtOe64KmS9LLvmJHf21cEQ8rc2wBwkwgp5l8LK7hHjE0x
94LS8W4cgyTeifvfxZ54D+4JhgmnbDQxA1ho2EPI539RZ1vWwUJQVUnE7fdfs+R+wdskjazm4TZleK4z9WHA==

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CITCA
3er CONGRESO INTERNACIONAL
DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA



Figura 7: Participación como ponente (póster)