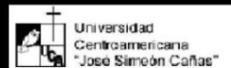


Investigación Experimental del Comportamiento Térmico de Sistemas Constructivos para Cubierta

FONDO DE INVESTIGACIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR "FIES"
MINISTERIO DE EDUCACIÓN DE EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA

Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" UCA
www.uca.edu.sv
Tel. (503) 2210-6600 extensiones, 320, 321, 293, Fax. (503)2210-6664
Dirección: Bulevar Los Próceres, La Libertad,
El Salvador, Centroamérica

Universidad Tecnológica de El Salvador UTEC
www.utec.edu.sv
Tel. (503) 2275-1013 y (503) 2275-1012
Dirección: 19 avenida Sur y Calle Arce #1045 Casa
"Ing. José Adolfo Araujo" San Salvador,
El Salvador, Centroamérica



Mario Chávez
Aarón Martínez
Arturo Cisneros
Lizeth Rodríguez
Cristina Vidal
José Miranda

i

FONDO DE INVESTIGACIÓN DE EDUCACIÓN
SUPERIOR “FIES”

PROYECTO:
FIES/Consortio UCA-UTEC

**“Investigación Experimental del
Comportamiento Térmico de Sistemas
Constructivos para Cubierta”**

Mayo 2015

ISBN 978-99961-0-549-4



**Universidad Tecnológica
de El Salvador**



CRÉDITOS

Investigadores

Mario Wilfredo Chávez Molina. Coordinador del proyecto de investigación. Investigador Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas DCEF-UCA.

Luis Aarón Martínez Figueroa. Investigador y Jefe Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas DCEF-UCA.

Carlos Arturo Cisneros Mayen. Investigador Departamento de Organización del Espacio DOE-UCA.

Lizeth Rodríguez Rodríguez. Investigadora Departamento de Organización del Espacio DOE-UCA.

Ana Cristina Vidal Vidales. Investigadora Asociada de la Vicerrectoría de Investigación, Universidad Tecnológica de El Salvador UTEC

José Remberto Miranda. Investigador de la Vicerrectoría de Investigación, Universidad Tecnológica de El Salvador UTEC

Soporte Técnico

Carlos Mario Flores Lazo, Ingeniero Electricista, catedrático del Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas

Asistentes

Luis Benjamín Ibáñez García, Egresado de Ingeniería Mecánica UCA

Max de Jesús Barillas Velásquez, Egresado de Ingeniería Mecánica UCA

Colaboradores

Oscar Manuel Guzmán Reyes, Ingeniero Mecánico graduado UCA

René Eduardo Rodríguez Marcía, Ingeniero Mecánico graduado UCA

David Gerardo Vega Iraheta, Ingeniero Mecánico graduado UCA

Diego José Aguirre Azucena, Ingeniero Mecánico graduado UCA

José Benjamín Cárcamo Henríquez, Ingeniero Mecánico graduado UCA

Armando Alfredo Henríquez Baires, Ingeniero Mecánico graduado UCA

Contador

Carlos Alexander Quintanilla Solórzano

Secretaria

Gloria del Carmen Ávila Gómez

Editora

Lizeth Rodríguez

Diseño de portada: **Abstracción de Termografía, Lizeth Rodriguez**

Primera edición, 2015, 910 ejemplares, Talleres Gráficos UCA, ISBN 978-99961-0-549-4

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Educación MINED, Gobierno de El Salvador

Fondo de Educación Superior FIES

José Francisco Marroquín

Director Nacional de Educación Superior

Mauricio Acevedo

Coordinador de FIES

Andreu Oliva De La Esperanza S.J.

Rector

Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA

Nelson Zárate Sánchez

Rector

Universidad Tecnológica de de El Salvador, UTEC

Carlos Rivas

Vicerrector Académico Adjunto

Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA

Noris Isabel López Guevara

Vicerrectora de Investigación

Universidad Tecnológica de El Salvador, UTEC

Blanca Ruth Orantes

Directora de Investigaciones

Universidad Tecnológica de El Salvador, UTEC

Silvia Lorena Funes

Coordinadora de Oficina de Vinculación con el Entorno Socioeconómico

Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA

Carlos Ferrufino

Jefe de Departamento Organización del Espacio, DOE

Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA

624.182

I62 Investigación experimental del comportamiento térmico de sistemas constructivos para cubiertas / investigadores Mario Wilfredo Chávez Molina, Luis Aarón Martínez Figueroa, Carlos Arturo Cisneros Mayen, Lizeth Rodríguez Rodríguez, Ana Cristina Vidal Vidales, José Remberto Miranda ; asistentes Luis Benjamín Ibañez García, Max de Jesús Barrillas Velásquez. -- 1ª ed. -- San Salvador, El Salv. : [s.n.], 2015. (Talleres Gráficos UCA) 80 p. : il. imágenes, gráficos, tablas ; 28 cm.

En la portada se lee: Fondo de Investigación de Educación Superior "FIES", Proyecto: FIBS/Consortio UCA-UTBC, mayo 2015.

624.182

I62 Investigación experimental del comportamiento ... 2015
(Ficha 2)

ISBN 978-99961-0-549-4

1. Materiales de construcción-El Salvador-Investigaciones. 2. Cubiertas (Construcción)-Investigaciones. 3. Construcciones. I. Chávez Molina, Mario Wilfredo, 1961- coaut. II. Título.

BIOGRAFÍAS DE INVESTIGADORES

Mario Wilfredo Chávez Molina

Coordinador de Proyecto de Investigación. Docente Investigador, Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas DCEF-UCA. Salvadoreño. Obtuvo título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Centroamericana (UCA) en El Salvador y Posgrado en Termofluidos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España. En su experiencia profesional ha sido Profesor en Diplomado de Eficiencia Energética para la industria y edificaciones. Ha sido Investigador en proyecto FIES ediciones anteriores. Consultor en el área térmica para diversos organismos nacionales e internacionales. Catedrático de los cursos de Termodinámica, Transferencia de Calor, Física, Auditorías Energéticas, entre varias. Ha sido Director de trabajos de graduación asesorando a diversos grupos en temáticas relacionadas con el diseño eficiente de sistemas intercambiadores de calor. Coordinador de la carrera de Ingeniería Mecánica en la UCA. Consultor y asesor en la formulación de marco normativo para la eficiencia energética. Consultor en proyectos de alta eficiencia y acreditación para edificaciones. Premio Nacional de Ciencia y Tecnología 2013, por investigación y desarrollo de plancha a GLP eficiente. Correo electrónico: mchavez@uca.edu.sv

Luis Aarón Martínez Figueroa

Docente Investigador, Jefe del Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas DCEF-UCA. Salvadoreño. Obtuvo título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Centroamericana (UCA) en El Salvador y Maestría y Doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Estados Unidos, respectivamente. Es ex-becario Fulbright y participó en el Decatlón Solar del año 2007, con el equipo de la Universidad de Illinois, obteniendo primer lugar en las categorías de viabilidad de mercado y confort térmico. Tiene diez años de experiencia en consultoría en eficiencia energética y energía solar en las edificaciones e industria, atendiendo a instituciones gubernamentales, comerciales e industriales en El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y los Estados Unidos. Ejerce la docencia desde 2003 y ha sido distinguido con el Premio ASIME-IEEE en docencia en el año 2010 y 2013, y como Académico Distinguido de la UCA en 2012. Ha publicado alrededor de doce trabajos de investigación a nivel internacional en conferencias y revistas científicas. Es miembro activo de las asociaciones profesionales ASHRAE, ASME, ASIMEI e IBPSA. Es miembro suplente del Consejo de Acreditación de la Agencia Centroamericana de Acreditación de programas de Postrados (ACAP). Correo electrónico: lamartinez@uca.edu.sv

Carlos Arturo Cisneros Mayen

Docente investigador del Departamento de Organización del Espacio DOE-UCA. Salvadoreño. Obtuvo título de Arquitecto de la Universidad de El Salvador y estudios de postgrado en Diseño y Construcción en Madera en la Universidad del Bio-Bio en Concepción, Chile. Gestor de proyectos de investigación, desarrollo e innovación en la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). Experiencia profesional en las áreas de diseño, construcción y supervisión, catedrático en el área tecnológica de la carrera de arquitectura de la UCA. Ha sido Investigador en proyecto FIES ediciones anteriores. Consultor de la Política Municipal de Vivienda en el municipio de San Salvador. Catedrático de los cursos de diseño y construcción en madera en la UCA y en la Universidad Politécnica. Ha sido director de trabajos de graduación asesorando a diversos grupos en temáticas relacionadas con el diseño eficiente con materiales sustentables. En 2012 fue nombrado Arquitecto del Año por el Colegio de Arquitectos de El Salvador (CADES). Obtuvo Premio en X Bienal de Arquitectura en la categoría de Investigación y publicación por CADES 2012. Correo electrónico: acisneros@uca.edu.sv

Lizeth Rodríguez Rodríguez

Docente Investigadora, Departamento de Organización del Espacio DOE-UCA. Nació en Brasil, salvadoreña por naturalización. Obtuvo título de Arquitecta de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA) y Maestría en Ingeniería Estructural en Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España. Estudios de posgrado en Eficiencia Energética y en Investigación Científica de la UCA. Su experiencia profesional incluye dirección en proyectos de diseño y construcción, laboratorios experimentales con materiales reciclados, ha brindado conferencias en El Salvador, Panamá y Nicaragua sobre Sistemas Constructivos. Ha participado en Consultorías para instancias estatales. Ha obtenido premios en concursos de diseño por presentar propuestas innovadoras considerando nuevas formas de construir. Recientemente obtuvo Premio en XI Bienal de Arquitectura en la categoría de Investigación y publicación por CADES 2014. Cuenta con publicaciones y artículos en el área de conocimiento técnico de la construcción, retroalimentados con la cátedra que como docente imparte, sobre Tecnología en Construcción. Directora de trabajo de graduación de pregrado en temas vinculados al desarrollo de nuevos sistemas constructivos derivados del reciclaje. Correo electrónico: lrodriguez@uca.edu.sv

Ana Cristina Vidal Vidales

Investigadora asociada de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Tecnológica de El Salvador (UTEC). Salvadoreña. Obtuvo título de Arquitecta de la Universidad Albert Einstein y Maestría en Desarrollo Local de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). En su experiencia profesional ha sido investigadora docente, enfocando sus investigaciones en el área de medio ambiente, desarrollo sustentable, bioclimatización y recuperación del espacio público en ciudades grandes e intermedias. Ha sido Investigadora en proyecto FIES ediciones anteriores. Adicionalmente, se ha desempeñado en el área de planificación estratégica participativa a nivel local y metropolitano, participando en distintas iniciativas de planificación impulsadas por el Gobierno central y metropolitano. Ha sido directora de trabajos de graduación relacionados con arquitectura bioclimática a nivel de pregrado. Correo electrónico: acvidalvidales@hotmail.com

José Remberto Miranda

Investigador de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Tecnológica de El Salvador (UTEC). Salvadoreño. Obtuvo título de Ingeniero Industrial de la Universidad Politécnica de El Salvador y Maestría en Investigación Científica de la Universidad de Alicante, España. Docente en Ingeniería de Métodos. Participación en el diseño de proyectos de ingeniería para nuevos productos. Coordinador en proyectos de investigación de Ingeniería industrial en la Vicerrectoría de Investigaciones UTEC. Correo electrónico: jose.miranda@utec.edu.sv

ÍNDICE DE CONTENIDO

Página 1. INTRODUCCIÓN

Página 2. CAPITULO I: CONTEXTO

Página 6. CAPITULO II: SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Página 22. CAPITULO III: PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Página 38. CAPITULO IV: LABORATORIO EXPERIMENTAL, ESTABLECIENDO LÍNEA BASE

Página 54. CAPITULO V: INCORPORACIÓN DE MEJORAS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Página 65. CAPITULO VI: SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Página 74. BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

El Fondo de Investigación de Educación Superior (FIES) es un programa del Gobierno de El Salvador para el fomento de proyectos científico-tecnológicos presentados por Instituciones de Educación Superior (IES), tanto públicas como privadas (universidades, institutos especializados e institutos tecnológicos). El Ministerio de Educación de El Salvador (MINED) es el ente responsable de la administración de dicho fondo de investigación para su adecuada implementación y uso.

El fondo permite destinar recursos financieros a las IES de El Salvador, que se encuentren acreditadas, para fomentar que la educación superior promueva la investigación científica como una búsqueda sistemática y de análisis de nuevos conocimientos a fin de enriquecer la realidad científica y social del país.

En el año 2012 es lanzada la tercera convocatoria FIES, cuya principal meta es integrar a las IES entre sí con miras a fomentar la colaboración y la participación mancomunada en los nuevos proyectos.

Las áreas prioritarias para esta convocatoria son: Salud, Energía, Medio Ambiente, Seguridad Alimentaria, Manufactura y Tecnología. Estas áreas del conocimiento para el desarrollo científico, tecnológico y de innovación se derivan de las diferentes ramas incluidas en la "Agenda Nacional de Ciencia y Tecnología e Innovación".

Los tipos de proyecto financiados son:

1. Proyectos de Investigación y Desarrollo Científico-Tecnológicos.
2. Proyectos de Investigación y Desarrollo Tecnológicos que conlleven a la innovación.
3. Proyectos de Promoción de la Transferencia Tecnológica.

Es así como se formula el proyecto "Investigación Experimental del Comportamiento Térmico de Sistemas Constructivos para Cubierta", desarrollado en conjunto por Consorcio/FIES UCA-UTEC (Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA y la Universidad Tecnológica de El Salvador, UTEC).

El proyecto inicia operativamente en el año 2013, mediante financiamiento del Fondo de Investigación para Instituciones de Educación Superior (FIES) de El Salvador y fondo de contraparte por cada IES.

La investigación es de tipo experimental y estudia el comportamiento térmico de sistemas constructivos para cubierta utilizados típicamente en El Salvador, tales como lámina metálica troquelada, lámina de fibrocemento, lámina metálica ondulada y techo metálico auto-soportante.

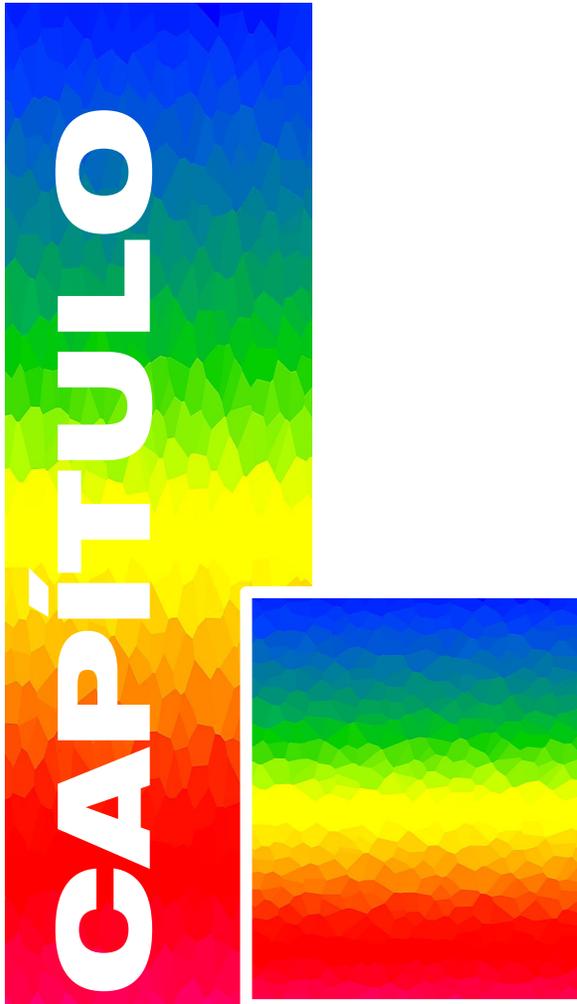
Se construyeron prototipos experimentales para cada sistema constructivo y se montaron bajo condiciones reales de asoleamiento. Así mismo, se analizaron las temperaturas promedio de la lámina y las temperaturas promedio del aire dentro de cada prototipo.

La comparación permitió concluir que los sistemas constructivos estudiados presentan temperaturas de lámina incluso alrededor de 60°C, obteniéndose temperaturas máximas dentro del volumen de aire alrededor de 40°C, muy fuera de la zona de confort térmico, de igual forma, se identificó que los sistemas constructivos con mejores comportamientos térmicos son la lámina de fibrocemento y el techo metálico auto-soportante, siendo la lámina metálica ondulada la que presenta un comportamiento térmico más desfavorable.

Se identificaron posibles áreas de mejora en los sistemas constructivos a considerar para reducir las temperaturas observadas y mejorar su comportamiento térmico. Se probaron experimentalmente las mejoras identificadas obteniendo sustanciales reducciones en las temperaturas de lámina: 20% en reducción al instalar teja, 17% al aislar con fibra cerámica, 15% de reducción al utilizar pintura blanca sellante, 8.6% de reducción al utilizar una mezcla de pintura y celulosa y 8.3% de reducción al utilizar espuma aislante.

Dadas las condiciones cambiantes del clima de los experimentos, la simulación energética es una herramienta que una vez validada por los experimentos, puede permitir extrapolar resultados a condiciones distintas a las del experimento y visualizar el comportamiento térmico de los sistemas a largo plazo.

Al realizar las validaciones de las simulaciones contra experimentos, se obtuvieron resultados satisfactorios y permiten dar validez a la simulación como una herramienta complementaria a los experimentos, la cual ayuda a ampliar los análisis a condiciones climáticas y modificaciones o mejoras en los sistemas constructivos para cubierta.



CAPÍTULO I. CONTEXTO

1.1 BENEFICIARIOS

1.2 ANTECEDENTES

1.3 OBJETIVOS

1.4 METODOLOGÍA

CAPÍTULO I. CONTEXTO

1.1 ANTECEDENTES

Existen antecedentes en la literatura sobre investigaciones experimentales en sistemas de cubiertas. Se puede mencionar, por ejemplo, un estudio realizado por Alvarado [3], en el cual se crearon prototipos a escala de cubiertas de techos en base a cemento, con el objetivo de caracterizar las mejoras obtenidas al incorporar aislamiento térmico y reflectores metálicos. En dicho experimento, se instalaron dos prototipos, un prototipo de control y un prototipo al cual se le harían las modificaciones.

A los prototipos se les incorporó instrumentación para medir temperaturas, mediante termocuplas (sensor de temperatura), montadas en superficie y sensores de transferencia de calor de película delgada. Dicho experimento fue realizado al interior de un laboratorio y se simuló la radiación solar mediante el uso de lámparas halógenas de 600 Watts, tipo T, capaces de elevar la temperatura de la superficie de las cubiertas hasta 45 °C.

Los investigadores del citado estudio ubicaron las lámparas en una posición relativa equivalente para el prototipo de control y el prototipo de pruebas, a modo de permitir la misma condición en ambos casos. El uso de lámparas halógenas para simular la radiación solar ha sido utilizado en otros estudios, justificándose porque dichas lámparas transmiten típicamente en un rango espectral similar al sol (300 – 2,500 nm) [3].

El citado estudio encontró reducciones en el orden de 65% a 88% en la conducción de calor al aplicar medidas de mejora, comparando el prototipo de prueba con mejoras con el prototipo de control.

En un estudio similar, Lee [24] construyó un prototipo experimental para caracterizar el desempeño térmico de sistemas constructivos para cubierta al incentivar el flujo de aire en la cavidad de ésta. Para llevar a cabo los experimentos, los investigadores construyeron un simulador de techos, el cual cuenta con un panel de calentamiento que simularía la ganancia de calor solar. Se hicieron experimentos en diversos sistemas constructivos, incluyendo techos de asfalto, barro, concreto, metálico y fibrocemento. El estudio comprobó los beneficios de permitir la circulación de aire en la cavidad de los techos e identificó las formas de sección y pendientes óptimas para incentivar el fenómeno.

En ambas investigaciones experimentales, se ha buscado construir prototipos de prueba y control bajo condiciones controladas de laboratorio, simulando la radiación solar mediante lámparas halógenas o paneles de calentamiento. Ninguna de las investigaciones citadas ha sometido a los prototipos de cubiertas a condiciones reales.

1.2 BENEFICIARIOS

- Se espera beneficiar a las Universidades participantes, a través de la autogeneración del conocimiento y nuevas tecnologías.
- Se espera beneficiar a la comunidad menos favorecida, facilitándoles información técnica para la elección de sistemas constructivos que mejoren el confort de la vivienda.
- Se espera beneficiar a los usuarios en general a través de brindar nuevas alternativas de sistemas constructivos que contribuyan a disminuir el consumo energético en las edificaciones.

1.3 OBJETIVOS

- Objetivo 1: Caracterizar el comportamiento térmico de sistemas constructivos para cubierta que se utilizan en El Salvador con base en criterios de selección que se establecerán en la investigación.
- Objetivo 2: Desarrollar mejoras e innovaciones en sistemas constructivos para cubiertas a partir del estudio en los sistemas caracterizados.
- Objetivo 3: Validar programas de simulación térmico-energética de edificaciones para las condiciones de El Salvador.



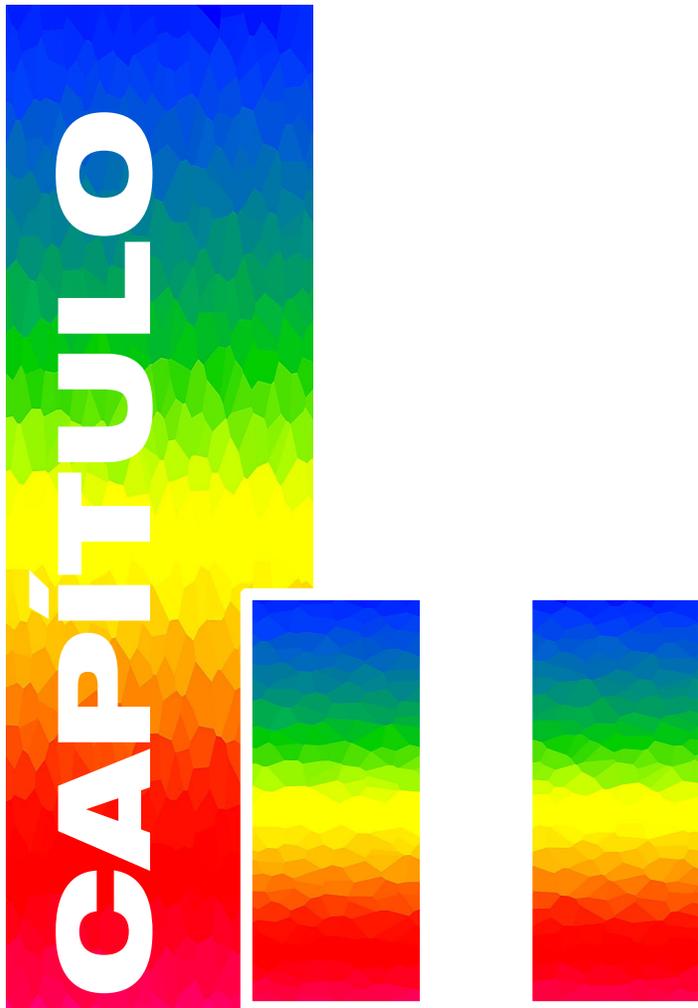
Figura 1.1 Grupo de investigadores en reunión de trabajo.



Figura 1.2 Grupo de investigadores en reunión de trabajo.

1.4 METODOLOGÍA

OBJETIVOS	ACTIVIDADES
<p>OBJETIVO 1 Caracterizar el comportamiento térmico de sistemas constructivos para cubierta que se utilizan en El Salvador con base en criterios de selección que se establecerán en la investigación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Actividad 1: Elaborar criterios de selección de sistemas constructivos a caracterizar y su ponderación. • Actividad 2: Elaborar listado de sistemas constructivos utilizados en el país. • Actividad 3: Aplicar criterios de selección al listado de sistemas constructivos. • Actividad 4: Seleccionar los sistemas constructivos que se caracterizarán. • Actividad 5: Diseño de módulos de prueba de cubiertas. • Actividad 6: Construcción de módulos de prueba de cubiertas • Actividad 7: Medición de parámetros de desempeño térmico energético de sistemas de cubiertas. • Actividad 8: Análisis de resultados de medición de parámetros de desempeño energético de sistemas de cubiertas. • Actividad 9: Realizar reporte de la caracterización.
<p>OBJETIVO 2 Desarrollar mejoras e innovaciones en sistemas constructivos para cubiertas a partir del estudio en los sistemas caracterizados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Actividad 1: Elaborar criterios de selección para nuevos sistemas. • Actividad 2: Elaborar listado de innovaciones posibles a los sistemas constructivos. • Actividad 3: Aplicar criterios de selección al listado de innovaciones de los sistemas constructivos. • Actividad 4: Seleccionar las innovaciones de sistemas constructivos que se caracterizarán. • Actividad 5: Implementación de sistemas innovadores de cubierta a módulos de prueba. • Actividad 6: Medición de parámetros de desempeño térmico energético de sistemas de cubiertas. • Actividad 7: Análisis de resultado de medición de parámetros de desempeño térmico energético de sistemas de cubiertas. • Actividad 8: Realizar reporte de la caracterización. • Actividad 9: Realizar una publicación con los resultados de la investigación y modelos de aplicación.
<p>OBJETIVO 3 Validar programas de simulación térmico-energética de edificaciones para las condiciones de El Salvador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Actividad 1: Medición de propiedades termofísicas de materiales para sistemas constructivos de cubiertas existentes. • Actividad 2: Simulación de sistemas constructivos existentes bajo condiciones climáticas observadas en las pruebas. • Actividad 3: Análisis comparativo de resultados de pruebas a sistemas constructivos y resultados previstos por la simulación. • Actividad 4: Medición de propiedades termofísicas de materiales para sistemas constructivos de cubiertas innovadores. • Actividad 5: Simulación de sistemas constructivos existentes aplicando las innovaciones seleccionadas. • Actividad 6: Análisis de resultados de simulaciones de sistemas innovadores. • Actividad 7: Simulación de sistemas constructivos existentes aplicando las innovaciones seleccionadas bajo condiciones de prueba. • Actividad 8: Análisis comparativo de resultados de pruebas a sistemas constructivos y resultados previstos por la simulación. • Actividad 9: Realizar reporte de la viabilidad de utilizar simulaciones energéticas para predecir el desempeño térmico-energético de sistemas de cubiertas.



CAPÍTULO II. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

2.2 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS AMPLIAMENTE UTILIZADOS EN EL SALVADOR

2.3 JERARQUIZACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS CON BASE EN CRITERIOS PONDERADOS PARA SELECCIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS A SOMETER A PRUEBA

CAPÍTULO II. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Un techo se conforma por la cubierta y la estructura que la soporta, a esta combinación se le denomina sistema constructivo para cubierta. Entre el universo de materiales que conforman la cubierta de techo pueden mencionarse los metálicos, de fibras, cementicios, arcillas, polímeros, vidrio, etc., cuyas características determinan el grado de protección contra la intemperie. Tales características deben ser medibles de forma cuantitativa y cualitativa para verificar la eficacia y eficiencia de su desempeño en virtud de garantizar el confort térmico del usuario que se protege bajo la cubierta. Para efectuar el estudio de las características de cubiertas, será necesario hacer una selección de sistemas constructivos para techo con base en la definición de criterios técnicos. A los criterios que a continuación se enumeran, se les asigna un porcentaje de relevancia y participación que suman 100% y serán ponderados con un puntaje para establecer jerarquía en la lista y finalmente seleccionar de forma objetiva los sistemas que serán investigados.

1. Criterio de Representatividad (15%)
2. Criterio de Propiedades térmicas (40%)
3. Criterio de Trabajabilidad (20%)
4. Criterio de Sostenibilidad (20%)
5. Criterio de Acústica (5%)

2.1.1 Criterio de Representatividad (15%)

La representatividad es el criterio que establece la contextualización en el territorio nacional de los materiales y sistemas constructivos a analizar con base en la existencia y frecuencia de utilización en el medio. A través de este criterio, es posible identificar qué materiales o sistemas constructivos predominan en las cubiertas de las viviendas y cuáles representan un potencial de mejora tomando en cuenta el déficit habitacional cualitativo y por lo tanto, la medición del uso de éstos por la población.

Para establecer este criterio, el análisis se basa en la contabilización que establecen los censos nacionales de 1992 y 2007, lo que permite visualizar una evolución en la utilización de los materiales y sistemas constructivos para cubierta ante distintos fenómenos externos, como los cambios en la economía y eventos naturales extremos que representan hitos en la historia nacional.

Dentro de esta sección se encuentran los siguientes aspectos:

- Sistema de cubiertas más utilizadas según censo por región.
- Potencial de impacto social

2.1.2 Criterio de Propiedades térmicas (40%)

Las propiedades térmicas son muy importantes en los materiales de construcción, ya que están relacionadas directamente con el consumo energético de las edificaciones y con el bienestar de los ocupantes. Debido a esto, el porcentaje respecto a los demás criterios es el de más valor.

La reflectividad, la transmisividad y la absorptividad nos indican el balance de energía que incide sobre una superficie; así, es deseable que para el uso propuesto, los materiales tengan una gran reflectividad y bajas absorptividades y transmisividades.

También interesa en esta primera etapa seleccionar sistemas constructivos con materiales que tengan potencialidad de mejoramiento de las propiedades, así se selecciona el factor U de los sistemas constructivos como criterio para este fin.

La capacidad térmica de los sistemas constructivos es importante porque está relacionada con la inercia térmica y, por tanto, con la rapidez de calentamiento o enfriamiento de los sistemas.

Dentro de esta sección se encuentran los siguientes aspectos:

- Potencial de mejora térmica: factor U, el cual indica la facilidad con que la energía en forma de calor atraviesa en forma conductiva el sistema constructivo.
- Reflectividad, que indica la fracción de la energía radiante incidente que es reflejada por una superficie.
- Capacidad térmica (calor específico), que indica la energía en forma de calor necesaria para cambiar la temperatura (en 1°C) del sistema constructivo.

2.1.3 Criterio de Trabajabilidad (20%)

La Trabajabilidad de un sistema constructivo para cubiertas en una edificación se relaciona con las actividades para la ejecución de obra del mismo. Estas actividades no solo deben ser efectivas para lograr ejecutar la obra, sino también eficientes para disminuir el consumo de recursos que intervienen en la obra de construcción, tales como materiales, gestión del talento humano y herramientas; garantizando la eficiencia en la administración del recurso económico.

La trabajabilidad también está relacionada con la factibilidad de ejecutar la obra de construcción, considerando las condiciones climáticas del país, para garantizar que esta pueda ejecutarse aún en época lluviosa. En este sentido, la rapidez con que se construya una cubierta maximiza el uso de recursos y permite el avance de la programación de obra.

En proyectos de interés social y de autoconstrucción demanda capacitación a mano de obra no especializada; en ese sentido, la trabajabilidad está relacionada con la técnica de construcción y se estima idóneo aquel sistema cuyo peso sea bajo para que se pueda instalar con poco personal y con herramientas de poca complejidad, de esta forma el instalador podrá realizar mayor cantidad de obra en el menor tiempo y aumentará así su rendimiento.

Otro factor de eficiencia sinónimo de trabajabilidad, es que el sistema constructivo de cubierta consuma la menor cantidad de estructura. Esto se relaciona con la longitud entre apoyos de la cubierta según su peralte y espesor, es decir, que aquellas cubiertas cuyo peralte y espesor sean mayor, son menos susceptibles a la flexión, por lo tanto el consumo de estructura es menor, ya que la longitud entre apoyo de la cubierta se reduce.

Así mismo, el material de cubierta que tiene mayor longitud evita los traslapes, siendo más eficiente ante condiciones de lluvia, ya que se minimiza la posibilidad de infiltraciones, su pendiente puede ser menor y el consumo de estructura es menor, de igual forma el rendimiento aumenta, puesto que, con el mismo esfuerzo, un trabajador instala mayor superficie.

En caso de necesitar mantenimiento por estar expuesto a intemperie, es necesario que el sistema sea compatible con otros sistemas y que la cubierta pueda adaptarse a la estructura existente si fuera necesario su cambio.

Por otra parte, para el análisis en el proceso de investigación se desarrollaran de forma experimental modelos a escala natural cuyas características deben cumplir con los aspectos de trabajabilidad:

- Experimental: reproducible en laboratorio, ya que para efectos experimentales debe poderse construir en la azotea de un edificio de 4 niveles, ubicándolo en condiciones de exposición sin obstáculos. Para esto, el sistema debe comprender una técnica de construcción factible.
- Flexibilidad: compatible con otros sistemas para que pueda ajustarse al diseño de módulo experimental a escala.
- Rapidez constructiva: se refiere al rendimiento, implica mayor superficie instalada en menor tiempo.
- Cantidad de unidades por superficie: Mejor rendimiento, rapidez constructiva.
- Peso: Debe ser liviano, flexible y no un diafragma rígido.
- Facilidad de autoconstrucción: Que pueda ser reproducible con mano de obra poco especializada.
- Menor consumo de estructura: Incide en bajo costo y bajo peso.
- Porcentaje de pendiente: Considerando la pendiente más desfavorable en este caso, para garantizar la igualdad de condición en laboratorio.

2.1.4 Criterio de Sostenibilidad (20%)

Las consideraciones de la sostenibilidad en la selección de un sistema constructivo son a través de la evaluación de impactos al ambiente a lo largo del ciclo de vida de sus materiales y procesos de transformación, desde la producción del material y la transformación de materias primas, la distribución, la instalación, el mantenimiento en su vida útil hasta la disposición final; de tal forma que la distancia del punto de fabricación y distribución hasta su lugar de instalación sea lo más corta posible para garantizar la baja producción de emisiones en el consumo energético.

Así mismo, en su proceso de instalación, el sistema debe ser eficiente y seguro en la ejecución de los procesos constructivos, y a lo largo de su vida útil debe garantizar la durabilidad y eficiencia del uso para el cual se ha destinado. Al cumplir su vida útil, es ideal que el material tenga un potencial de ser reciclado para tornarse en nueva materia prima.

Todas estas variables afectan el costo total de un sistema constructivo, que contempla los costos de producción, transporte y venta de materiales, costo de mano de obra en instalación, costo de equipo y consumo de energéticos. Por lo tanto, al evaluar la sostenibilidad debe hacerse bajo los siguientes aspectos:

- Reciclabilidad: Potencial de reutilización.
- Disponibilidad: Bajo costo en transporte.
- Emisiones: Bajo consumo energético en su fabricación, instalación y desmontaje.
- Durabilidad: Vida útil, relacionado con la composición de los materiales y su exposición a la intemperie.
- Costo de instalación, costo/área techada: Costo unitario (material, transporte, mano de obra, herramienta).

2.1.5 Criterio de Acústica (5%)

La acústica se refiere a la propagación de ondas sonoras. Llinares [25]. Esta propagación de ondas sonoras es capaz de afectar el bienestar, que depende no únicamente de la sensación térmica y lumínica, sino de la combinación de estos elementos. En ese sentido, se considera que un sonido se convierte en ruido desde el momento en que se convierte en un "sonido no deseado". Serra [32]. Por lo tanto, la acústica y el control de ruidos se convierte en un elemento susceptible de análisis para asegurar el bienestar al interior de una edificación.

Dentro de esta sección se encuentra el aspecto de generación de ruido.

2.2 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS AMPLIAMENTE UTILIZADOS EN EL SALVADOR

De acuerdo con el VI Censo de Población y V de Vivienda 2007, los materiales de cubierta más utilizados en la construcción de viviendas en el país en el área urbana son principalmente, la lámina de asbesto, seguido de la lámina metálica y finalmente la teja. Por otro lado, en el área rural predominan principalmente la teja y la lámina metálica (ver figura 2.1).

Un análisis más detallado de los datos permite observar cómo se distribuye la frecuencia en la utilización de los distintos materiales para cubierta a lo largo del país, dependiendo de la región climática¹ en la que se ubican los municipios.

La figura 2.2 muestra que los materiales más utilizados en las cubiertas de las viviendas en el área urbana ubicadas en la región climática conocida como "sabana tropical caliente" son la lámina de asbesto, seguido de la lámina metálica y la teja. Lo mismo sucede en la región climática conocida como "sabana tropical calurosa". En la región climática conocida como "clima tropical de las alturas" predomina la teja, seguida de la lámina metálica y la lámina de asbesto.

Por otro lado, la figura 2.3 muestra que los materiales más utilizados en las cubiertas de las viviendas en el área rural ubicadas en la región climática conocida como "sabana tropical caliente" son la teja y la lámina metálica, y con menor frecuencia la lámina de asbesto. Los mismos materiales predominan en la región climática conocida como "sabana tropical calurosa", pero la frecuencia es inversa, es decir, la lámina metálica predomina, luego la teja. En la región climática conocida como "clima tropical de las alturas" se repite la situación de la "sabana tropical caliente".

Tanto la figura 2.2 como la 2.3 muestran que el mayor número de municipios del país se ubica en la región climática conocida como "sabana tropical caliente".

Para visualizar mejor el porcentaje de viviendas que utilizan cada uno los materiales analizados por región climática y por área, según el censo 2007, se ha realizado una serie de gráficos (ver figuras 2.4 a la 2.9).

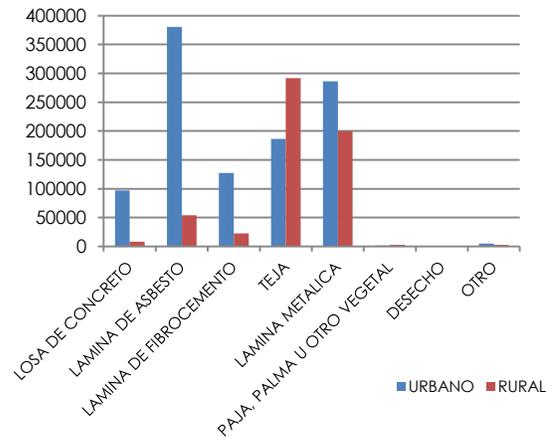


Figura 2.1 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas, según área. El Salvador. Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009)

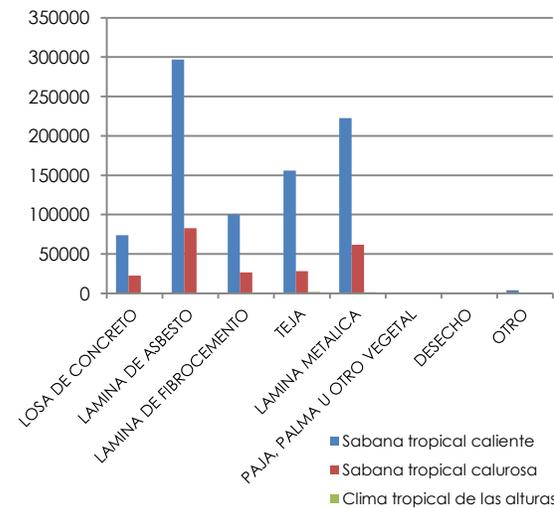


Figura 2.2 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área urbana, según región climática. El Salvador. Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000)

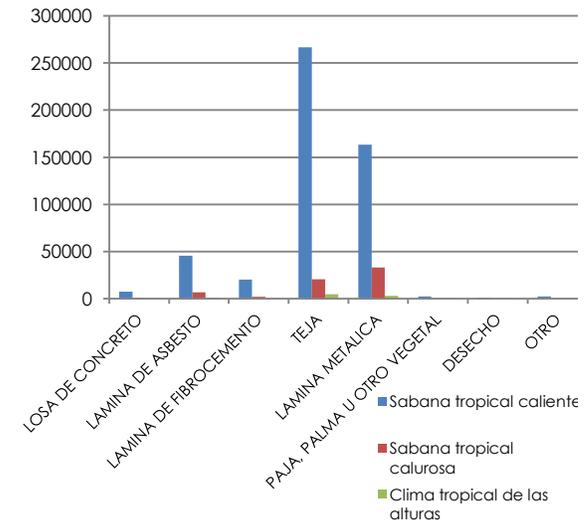


Figura 2.3 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área rural, según región climática. El Salvador. Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000)

1. Se ha tomado como referencia la clasificación climática de Köppen.

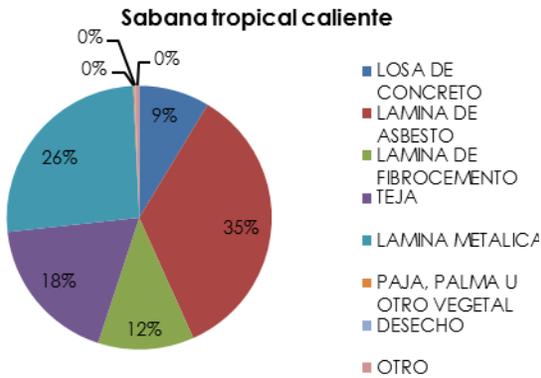


Figura 2.4 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área urbana, en la región climática "sabana tropical caliente". El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000).

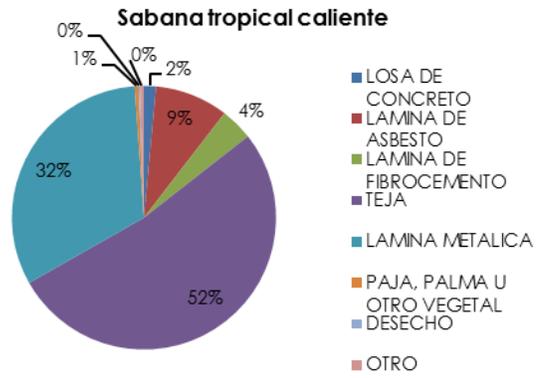


Figura 2.7 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área rural, en la región climática "sabana tropical caliente". El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000).

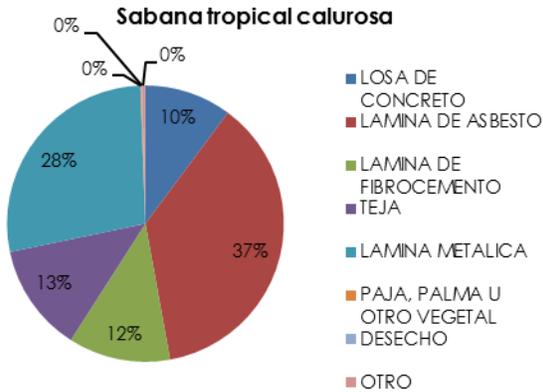


Figura 2.5 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área urbana, en la región climática "sabana tropical calurosa". El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000).

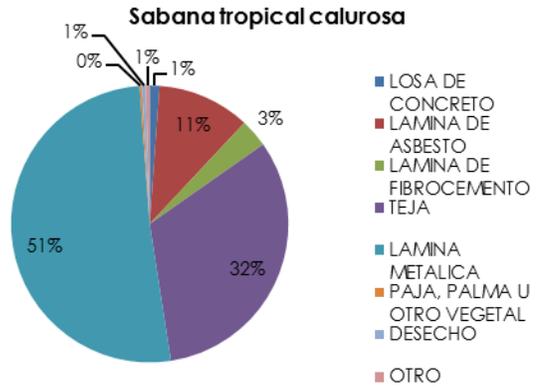


Figura 2.8 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área rural, en la región climática "sabana tropical calurosa". El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000).

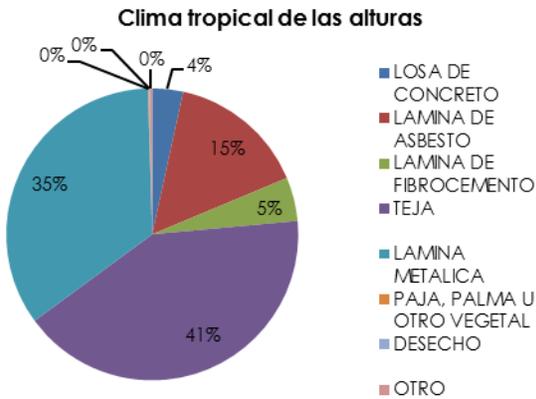


Figura 2.6 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área urbana, en la región climática "clima tropical de las alturas". El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000).

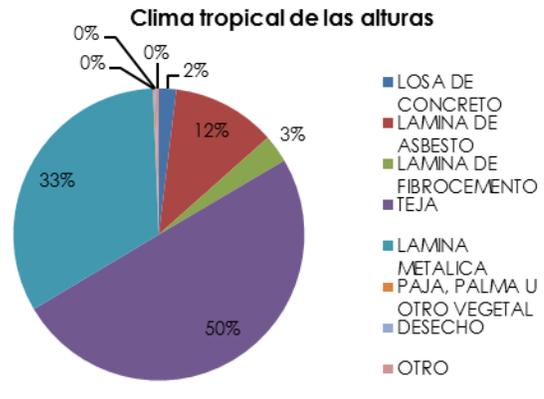


Figura 2.9 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área rural, en la región climática "clima tropical de las alturas". El Salvador.
Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009) e Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros (2000).

Adicionalmente, un análisis por zonas² permite ver varios aspectos (ver figura 2.10), entre ellos los siguientes:

1. Los departamentos con mayor cantidad de viviendas en el área urbana son San Salvador y La Libertad.
2. Los materiales de cubierta predominantes en las viviendas urbanas, tanto en la zona occidental como en la zona central son la lámina de asbesto y la lámina metálica, a excepción del departamento de Chalatenango, que presenta un mayor porcentaje de viviendas con cubierta de teja en el área urbana. En la zona paracentral los materiales más utilizados son la lámina de asbesto, la teja y la lámina metálica; mientras que en la zona oriental predominan la lámina de asbesto y la teja, la lámina metálica se presenta con mucha menor frecuencia, lo que demuestra que se utilizan materiales que siguen los criterios de confort térmico en la construcción de viviendas.

En las áreas rurales, en general, predominan dos materiales: la teja y la lámina metálica. Como muestra la figura 2.11, en la zona oriental las viviendas rurales tienen en su mayoría techos de teja.

Al realizar una comparación entre los censos de 1992³ y 2007, es posible ver cuál es la tendencia que sigue la utilización de los materiales en el país. La figura 2.12 muestra un incremento en el uso de losa de concreto, láminas de asbesto y de fibrocemento. La lámina metálica presenta un incremento sustancial, mientras que la utilización de materiales vernáculos, tales como la teja y las cubiertas vegetales comienza a decrecer.

2. Definiendo a la zona occidental (Ahuachapán, Santa Ana, Sonsonate), zona central (La Libertad, Chalatenango, Cuscatlán, San Salvador), zona paracentral (La Paz, Cabañas, San Vicente) y zona oriental (Usulután, San Miguel, Morazán, La Unión).

3. El censo de 1992 no presenta datos para la lámina de fibrocemento.

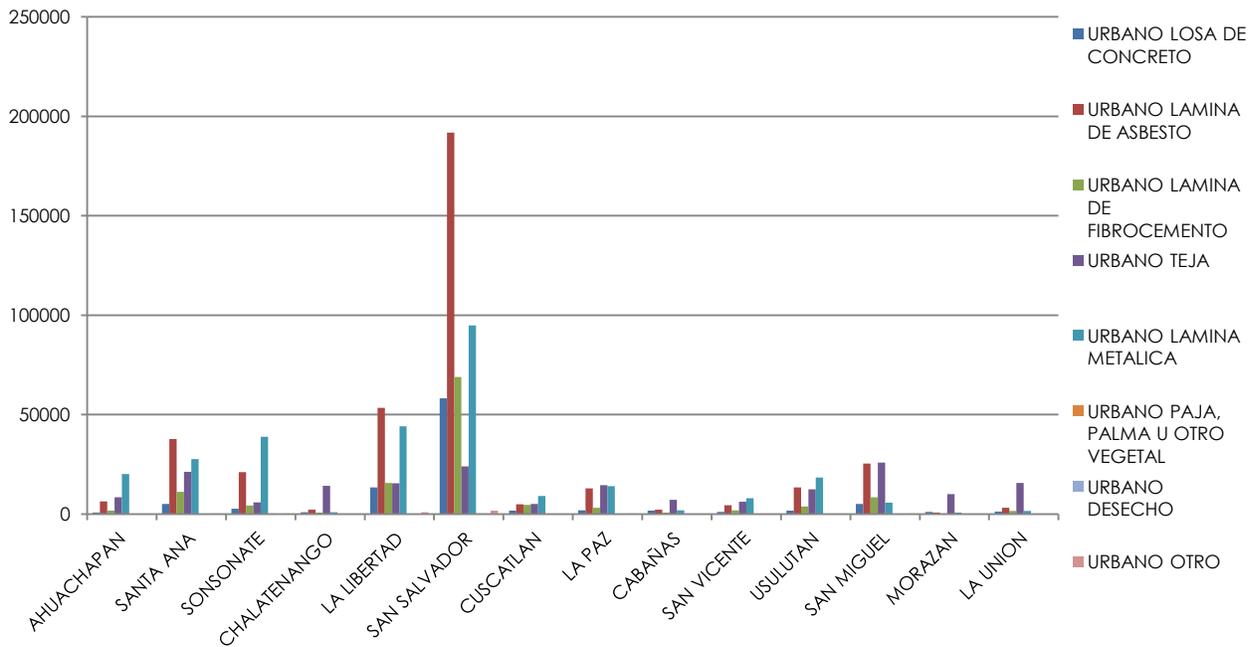


Figura 2.10 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área urbana, por departamento. El Salvador. Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009).

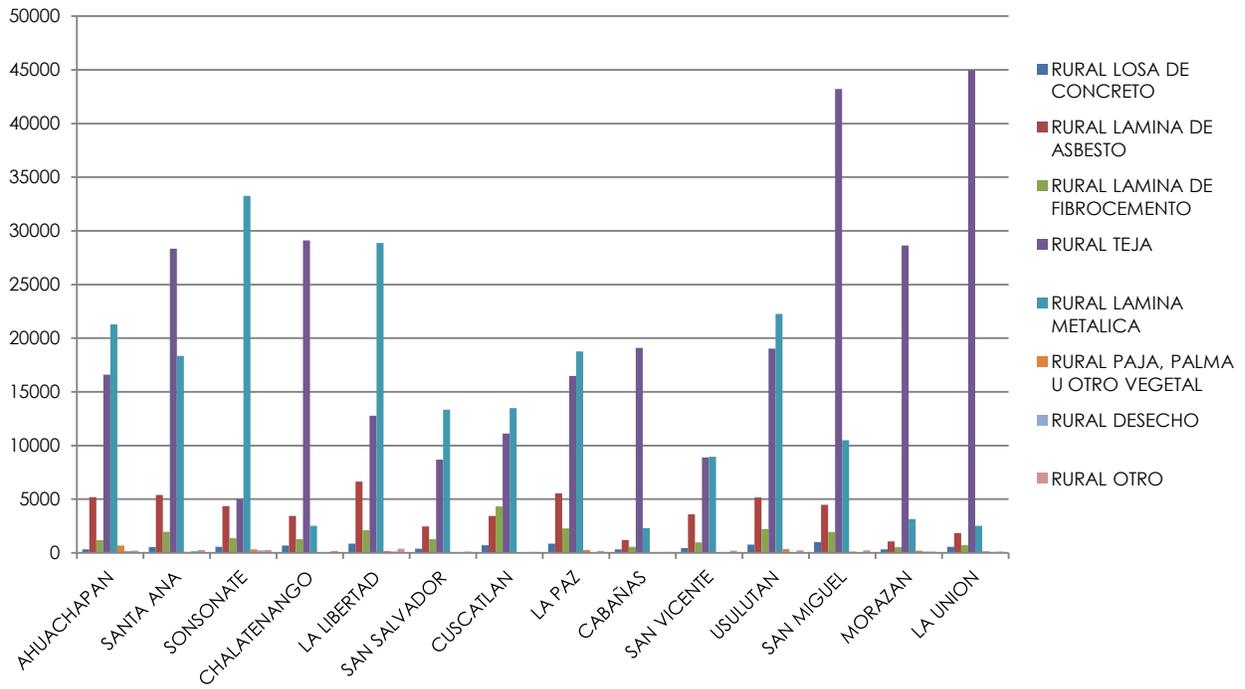


Figura 2.11 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas en el área rural, por departamento. El Salvador. Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009).

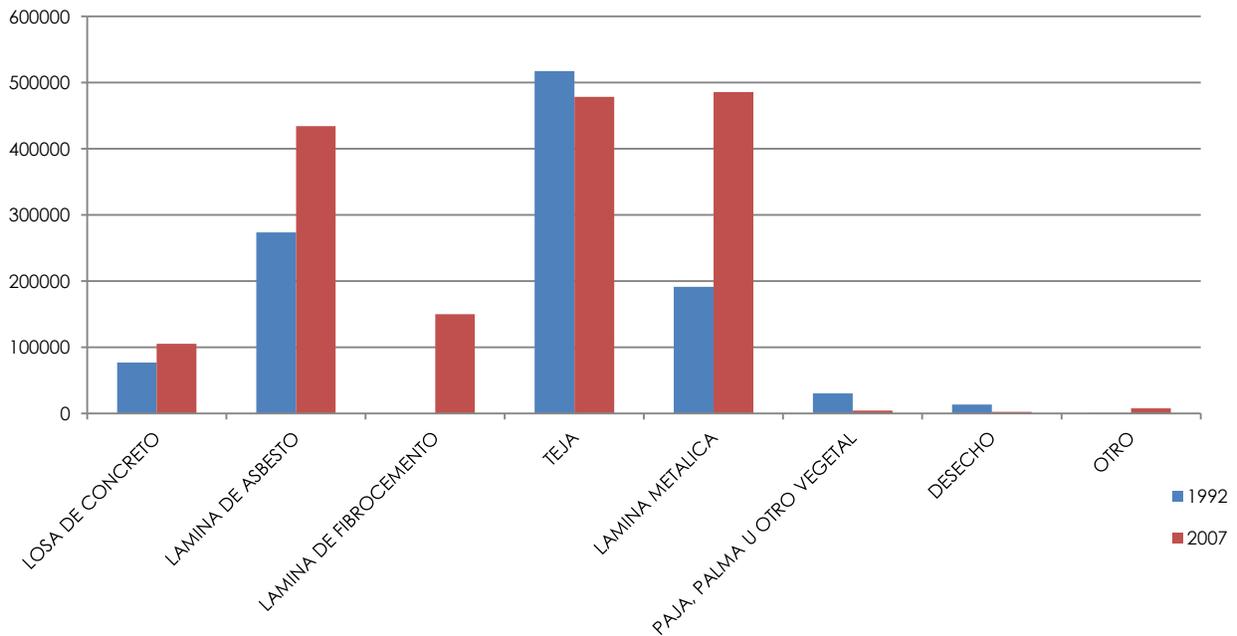


Figura 2.12 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas, según censos 1992 y 2007. El Salvador. Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (1995) y DIGESTYC (2009).

Con base en los análisis estadísticos anteriores, tomando en cuenta también los criterios de selección, se establece que los sistemas constructivos más utilizados en El Salvador, son los que se detallan a continuación:

1. Lámina de fibrocemento perfil 10
2. Lámina de fibrocemento perfil 6
3. Lámina metálica ondulada
4. Lámina metálica troquelada
5. Teja de barro
6. Techo de palma
7. Losa de concreto
8. Techos metálicos auto-soportantes
9. Teja asfáltica

2.2.1 Lámina de fibrocemento perfil 10 (fibra y cemento)

Este tipo de cubierta está conformada por láminas de fibrocemento, que es un sistema modular, es decir, de tamaños específicos dados por el fabricante. Con este tipo de cubierta pueden considerarse pendientes desde el 12%.

La longitud de traslape vertical es de 15.0 centímetros. Las estructuras secundarias se colocan en cada traslape y en algunos casos se colocan apoyos intermedios, dependiendo de los tamaños de las láminas. Debido a ello, su eficiencia es considerable, ya que el peso de cada lámina hace que deba ser colocada entre dos personas según el tamaño. Espesor de 10mm.

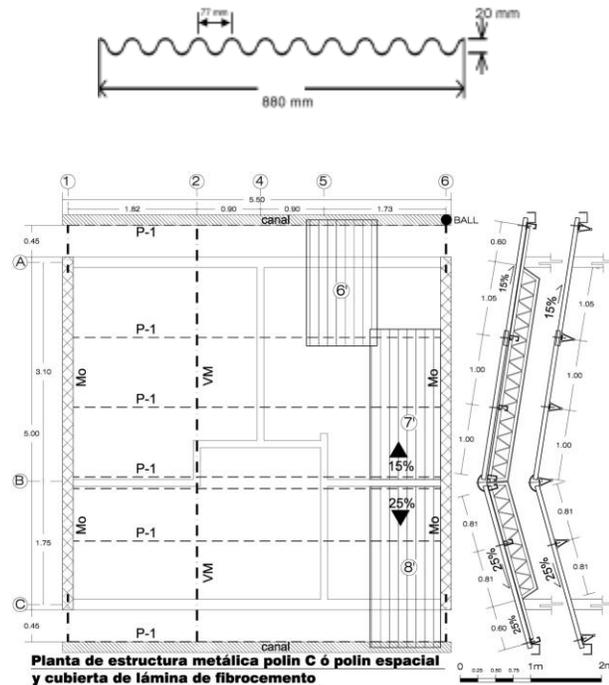


Figura 2.13 Planta estructural de techo con cubierta de lámina de fibrocemento, en la que se muestra la modulación en el plano horizontal y en sección. [10]

2.2.2 Lámina de fibrocemento perfil 6 (fibra y cemento)

Este tipo de cubierta está conformada por láminas de fibrocemento, que es un sistema modular, es decir, de tamaños específicos dados por el fabricante. Con este tipo de cubierta pueden considerarse pendientes desde el 12%. La longitud de traslape vertical es de 15.0 centímetros. Las estructuras secundarias se colocan en cada traslape y en algunos casos se colocan apoyos intermedios, dependiendo de los tamaños de las láminas, por lo que su eficiencia es considerable, ya que su peso hace que sea colocada entre dos personas según el tamaño. La diferencia con la lámina perfil 10 es el espesor en milímetros, esta es de 6 mm.

2.2.3 Lámina metálica ondulada (acero y zinc)

La lámina ondulada metálica tiene recubrimiento galvanizado, pero sus medidas son hasta 1.8 m, por lo que generalmente es utilizada como base para otros materiales que contribuyen a mejorar el confort térmico del interior de las edificaciones. De esta forma es que el sistema puede tornarse menos eficiente ya que su peso aumenta. La pendiente de uso puede ser desde el 10%.

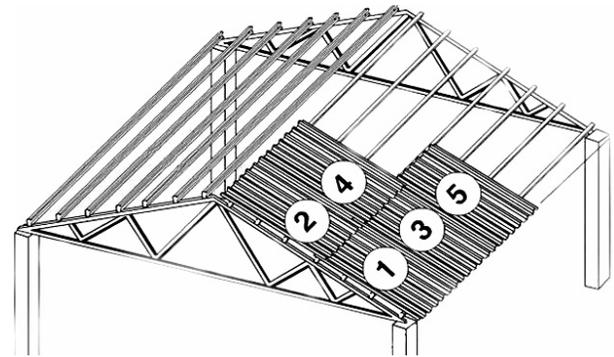
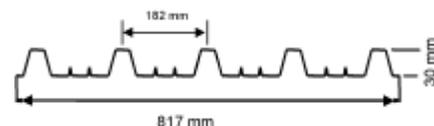


Figura 2.14 Isométrico de techo de lámina acanalada. [10]

2.2.4 Lámina metálica troquelada (acero y zinc)

La lámina de acero recubierta con aleación de zinc y aluminio, es considerada como eficiente ya que consume poca estructura porque es liviana y según su peralte, la longitud entre apoyos y ancho efectivo son mayores que cualquier otra cubierta liviana para superficies oblicuas. La longitud total de la lámina puede ser según requerimiento del proyecto, en cuyo caso el límite lo determina el tamaño del transporte a la obra de construcción, y la pendiente puede ser desde el 2%.



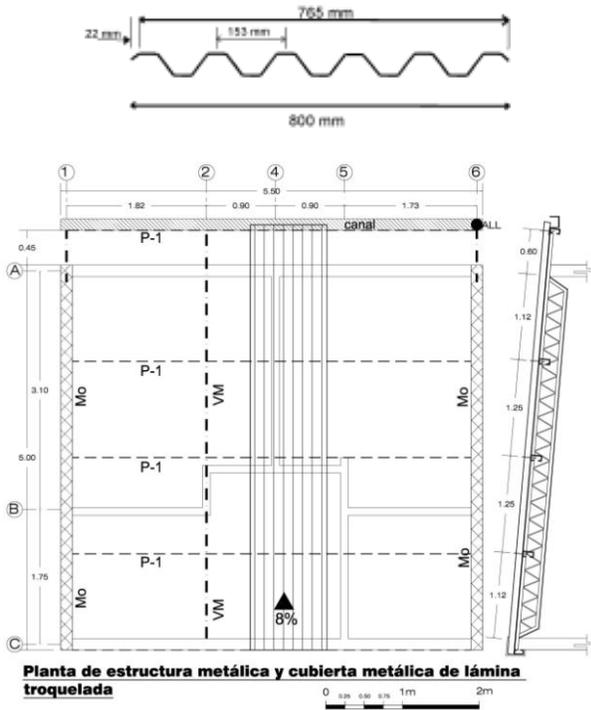


Figura 2.15 Planta estructural de techo con cubierta de lámina troquelada, en la que se muestra la modulación en el plano horizontal y en sección. [10]

2.2.5 Teja de barro (arcilla)

La teja de arcilla puede ser fabricada de forma artesanal o de forma industrial, moldeada al vacío. El proceso de fabricación determina la durabilidad del material y el control de calidad para minimizar el desperdicio en la instalación. La arcilla cocida es más frágil que otros materiales, por lo tanto las longitudes son menores y su peso es mayor, lo que hace que el sistema sea menos eficiente. La pendiente debe ser desde el 30% y puede reducirse con una superficie por debajo de esta.

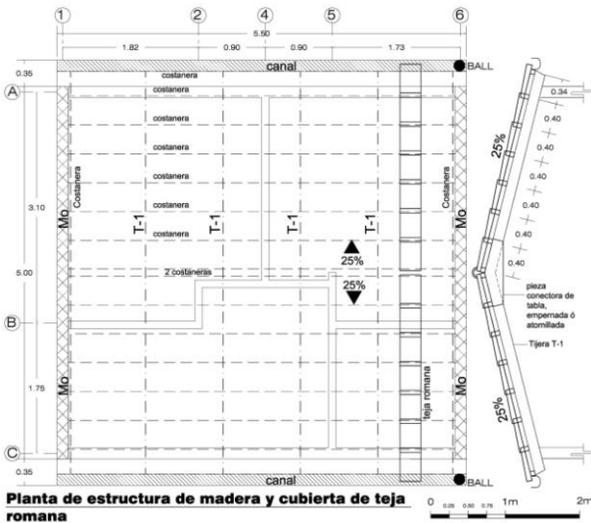


Figura 2.16 Planta estructural de techo con cubierta de lámina de teja tipo romana, en la que se muestra la modulación en el plano horizontal y en sección. [10]

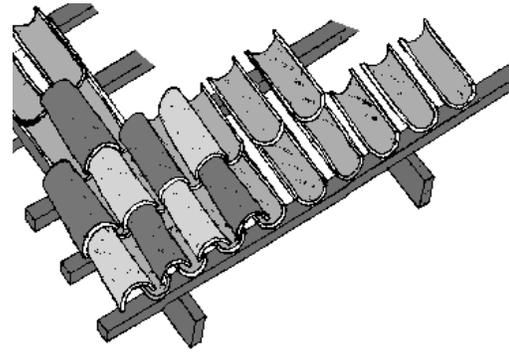


Figura 2.17 Isométrico de techo de teja tipo árabe. [10]

2.2.6 Techo de palma (palma)

El techo de palma es de procedencia orgánica, a partir de fibras de palma, lo que la hace muy permeable y conlleva a instalarla con altas pendientes (arriba del 45%) para evitar las filtraciones.

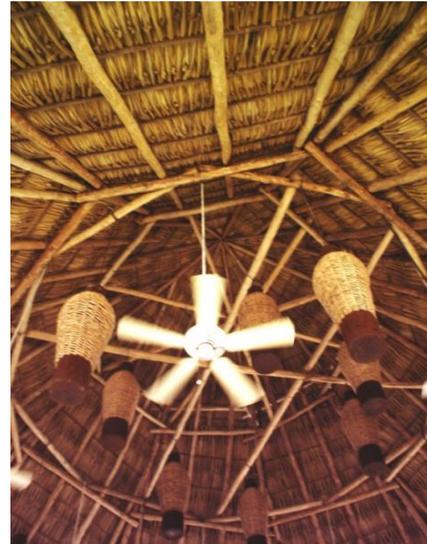


Figura 2.18 Techo cónico de palma. [10]

2.2.7 Losa de concreto (cemento, pétreos y acero)

La losa de concreto es considerada como diafragma rígido, el cual necesita de estructura interna de acero de refuerzo para mejorar el desempeño a flexión. El peralte está directamente relacionado con la longitud entre apoyos, según la dirección en que la losa distribuye la carga a las vigas.

La losa para techo debe contemplar al menos el 1% de pendiente y un sistema eficiente de drenaje.

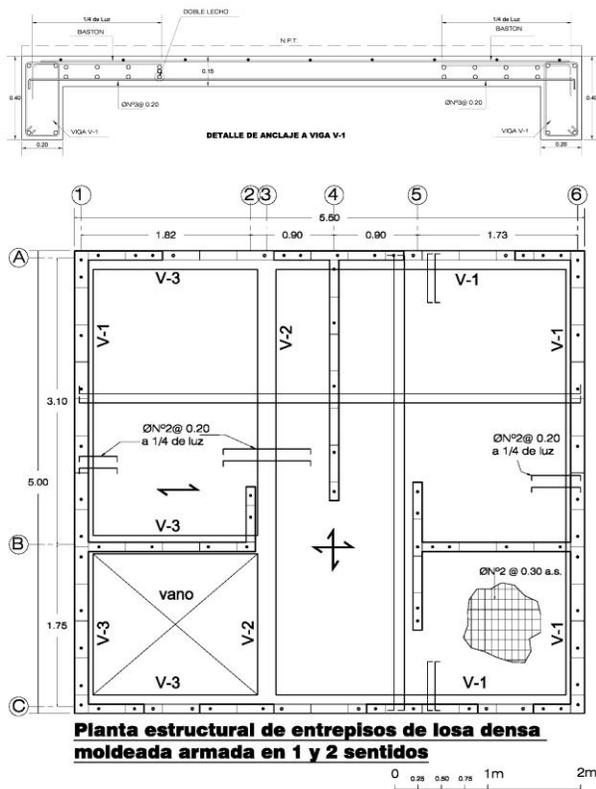


Figura 2.19 Planta estructural de losa, en la que se muestra la modulación en el plano horizontal y en sección. [10]



Figura 2.20 Colado de losa. [10]



Figura 2.21 Losa aligerada de techo. [10]

2.2.8 Techos metálicos auto-soportantes (acero, aluminio y zinc)

Las cubiertas auto-soportantes curvas, fabricadas con acero galvanizado con recubrimiento de aluminio y zinc con $150\text{gr}/\text{m}^2$ se consideran eficientes, ya que consumen poca estructura y, por sus características geométricas, pueden alcanzar una longitud entre apoyos de hasta 30.0m con una relación de $1/5$ entre la luz (longitud entre apoyos) y la flecha (distancia vertical de la cumbre al punto más bajo del apoyo). Las superficies curvas contemplan radios desde 2.5m hasta 24.0m . Su instalación es por medio de un sistema de auto-engrape a través del doblado de una pestaña entre paneles adyacentes acanalados sin necesidad de perforación ni uso de tornillos.



Figura 2.22 Techo de estación con lámina auto-soportante. [10]

2.2.9 Teja asfáltica (asfalto)

La teja asfáltica requiere de una superficie de apoyo y es flexible para adaptarse a todo tipo de geometría de cubierta, ya que no requiere canales internos cuando los techos cambian de dirección o pendientes. La teja asfáltica es de bajo peso, pero la superficie que puede ser de tablero contrachapado, la torna poco eficiente puesto que la pendiente debe ser mayor de 30% .

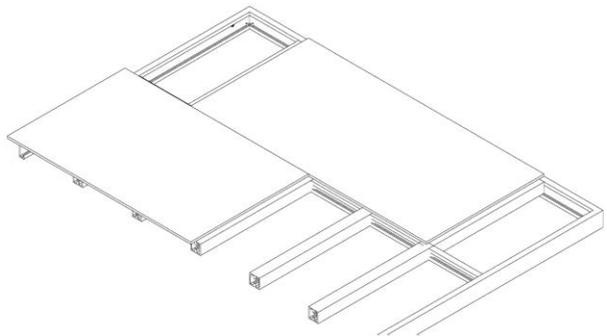


Figura 2.23 Isométrico de estructura y forro de lámina contrachapado previo a la colocación de teja asfáltica. [10]

2.3 JERARQUIZACIÓN CON BASE EN CRITERIOS PONDERADOS PARA SELECCIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS A SOMETER A PRUEBA

Después de realizar las calificaciones de cada uno de los sistemas constructivos utilizados en El Salvador, se han jerarquizado los resultados para así seleccionar aquellos más adecuados para la fabricación de módulos de prueba.

La evaluación es el resultado del promedio de las calificaciones individuales de cada una de las secciones asociadas a cada criterio de selección, siendo cada criterio multiplicado por su respectivo porcentaje. Por ejemplo, el promedio de las calificaciones otorgadas a las secciones "Sistema de cubiertas más utilizados según censo por región" y "Potencial de impacto social" se multiplican por 0.15 (debido al valor porcentual del 15%) siendo este valor la nota parcial del criterio de "Representatividad", y así sucesivamente con los demás criterios.

2.3.1 Evaluación de Criterio de Representatividad (15%)

Las puntuaciones para el criterio de Representatividad se basan principalmente en los resultados del Censo de población y vivienda 2007, sumando los resultados tanto para el área urbana como la rural (ver figura 2.24).

El gráfico muestra que los materiales predominantes son la teja y la lámina metálica, por lo que a ambos materiales les corresponde una calificación de 3, las láminas de fibrocemento y de asbesto tienen una calificación de 2 por ser los que le siguen en cantidad de viviendas que lo utilizan, mientras que a la losa de concreto le corresponde la calificación de 1, los materiales vegetales, de desecho y otro tienen una calificación de 0 por ser los menos utilizados.

Por otro lado, el criterio de potencial de impacto social está directamente relacionado con la calificación según el porcentaje de utilización que muestra el censo 2007, por lo que las calificaciones en este ámbito son las mismas, a excepción de la de los techos cubiertos con material de origen vegetal, que por estar ubicados principalmente en el área rural, representan cierto grado de impacto social. A estos se les asigna una puntuación de 1, ya que la cantidad de techos de este material en el país no es significativa.

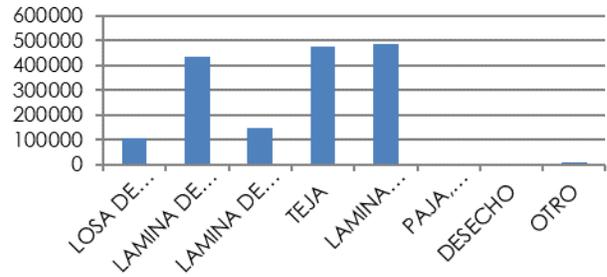


Figura 2.24 Materiales de cubierta más utilizados en viviendas, según censo 2007. El Salvador Fuente: Elaboración propia con base en DIGESTYC (2009).

Criterio de Representatividad 15%		
Sistemas	Sistemas de cubiertas más utilizados según censo por región	Potencial de impacto social
Lámina de fibrocemento perfil 10	2	2
Lámina de fibrocemento perfil 6	2	2
Lámina metálica ondulada	3	3
Lámina metálica troquelada	3	3
Teja de barro	3	3
Techo de palma	0	1
Losa de concreto	1	1
Techos metálicos auto-soportantes	0	0
Tejas asfáltica	0	0
Sistema de evaluación: Clave	0= el menos utilizado	0= menor impacto
	1=	1=
	2=	2=
	3= el más utilizado	3= mayor impacto

Tabla 2.1 Calificación de Criterio de Representatividad.

2.3.2 Evaluación de Criterio de Propiedades Térmicas (40%)

Las puntuaciones se basan en valores de U de sistemas constructivos con datos de las propiedades de los materiales que indican la literatura, otorgándole a un bajo valor de U la calificación más alta, ya que tiene potencial de mejora; y otorgándole a valores altos de U la calificación más baja, porque tiene menor potencial de mejora.

La reflectividad es de las propiedades más importantes a evaluar, ya que ésta indica la cantidad de energía radiante que una superficie refleja y, por tanto, energía que no entra al recinto. Valores altos de reflectividad son deseados.

El calor específico indica los cambios de temperatura que sufre un material cuando absorbe energía. Es deseable que un material, al absorber energía, aumente poco su temperatura, así que se desean valores altos de calor específico.

Datos confiables de la teja de barro y el techo de palma no están disponibles, por lo que se les adjudica calificaciones arbitrarias en base a la experiencia.

Criterio de Propiedades Térmicas 40%						
Sistemas	Potencial de mejora térmica: factor U (W/m ² -°C)		Reflec-tividad		Calor específico (KJ/kg°C)	
Lámina de fibrocemento perfil 10	0.0270	2	0.06	0	1.250	3
Lámina de fibrocemento perfil 6	0.0270	2	0.06	0	1.250	3
Lámina metálica ondulada	0.0273	0	0.87	3	0.896	2
Lámina metálica troquelada	0.0273	0	0.87	3	0.896	2
Teja de barro	-	3	0.06	0	0.921	1
Techo de palma	0.0268	2	-	-	-	-
Losa de concreto	0.0271	2	0.1	2	0,840	2
Techos metálicos auto-soportantes	0.0221	3	0.87	3	0.896	2
Tejas asfáltica	0.0252	3	0.06	0	1.260	3
Sistema de evaluación: Clave	0= alto		0= bajo		0= bajo	
	1=		1=		1=	
	2=		2=		2=	
	3= bajo		3= alto		3= alto	

Tabla 2.2 Calificación de Criterio de Propiedades Térmicas.

2.3.3 Evaluación de Criterio de Trabajabilidad (20%)

Las puntuaciones se basan en los siguientes valores:

En el caso del aspecto experimental se otorga mayor valor al sistema que presenta más facilidad en el proceso constructivo dentro del laboratorio experimental, siendo la losa de concreto la menos reproducible, y la lámina metálica troquelada la más reproducible.

Los aspectos de flexibilidad y rapidez constructiva tienen su mayor puntuación en aquellas cubiertas que tengan similar longitud entre apoyos, siendo las láminas metálicas las de mayor puntaje por ser compatibles en la forma de instalarlas sobre una misma estructura.

La cantidad de unidades instaladas por área y la pendiente determinan la rapidez con que se construye el techo, el consumo de estructura, y la eficiencia en su desempeño, por lo tanto se asigna mayor puntaje a las cubiertas de mayor tamaño, es decir, con menor cantidad de unidades por superficie y con menor pendiente, en este caso a la lámina metálica troquelada.

Se le otorga mayor puntuación a la cubierta que no requiera de mano de obra ni equipo muy especializado en su instalación, siendo la lámina metálica ondulado la que obtiene mayor puntuación en el aspecto de facilidad de autoconstrucción.

La cubierta que requiere menor cantidad de estructura por superficie instalada es la que mayor puntuación obtiene, en este caso, el de mayor puntaje es el techo auto-soportante.

Criterio de Trabajabilidad 20%								
Sistemas	Experimental: reproducible en laboratorio	Flexibilidad: compatible con otros sistemas	Rapidez constructiva (rendimiento)	Cantidad de unidades material por área	Peso	Facilidad autoconstrucción	Menor consumo de estructura	Pendiente
	Lámina de fibrocemento perfil 10	2	2	2	2	1	1	2
Lámina de fibrocemento perfil 6	2	2	2	2	1	1	2	1
Lámina metálica ondulado	2	3	2	2	3	3	2	1
Lámina metálica troquelada	3	3	3	3	3	2	2	2
Teja de barro	1	2	1	1	1	2	1	1
Techo de palma	1	1	1	1	1	1	1	0
Losa de concreto	0	2	0	0	0	1	0	3
Techos metálicos auto-soportantes	1	0	1	2	2	0	3	1
Tejas asfáltica	1	1	1	1	2	1	1	1
Sistema de evaluación: Clave								
	3= más reproducible	0= menos reproducible						
	3= alto	0= bajo						
	3= alto	0= bajo						
	3= menor cantidad	0= mayor cantidad						
	3= menor	0= mayor						
	3= más fácil	0= más difícil						
	3= menor	0= mayor						
	3= menor	0= mayor						

Tabla 2.3 Calificación de Criterio Trabajabilidad.

2.3.4 Evaluación de Criterio de Sostenibilidad (20%)

Las puntuaciones se basan en los siguientes valores:

La reciclabilidad obtiene el puntaje más alto cuando el material, después de haber cumplido su vida útil, puede reciclarse como materia prima. En este caso las cubiertas metálicas obtienen el puntaje más alto.

La disponibilidad del material para cubierta en el mercado nacional otorga un puntaje mayor a aquellos materiales que no requieren costos adicionales por transporte de largas distancias. En este sentido, la lámina de fibrocemento es la más accesible.

El material cuya producción emita menor CO₂ es la que tiene mayor puntaje, por lo que a los materiales que no requieren alto consumo de energía en la fabricación se les asigna mayor puntaje, siendo en este caso la palma.

La durabilidad se considera positiva y se asigna con mayor puntaje a aquel material que tenga mayor durabilidad en años, siendo los techos metálicos los que obtienen mayor puntuación.

El costo de instalación por unidad de superficie, en este caso por metro cuadrado m², determina la sostenibilidad financiera al considerar un sistema constructivo para cubierta, ya que puede representar hasta el 20% de un presupuesto de construcción, incidiendo sobre todo en el costo directo, específicamente en el costo unitario que es determinado por los costos de material, de mano de obra calificada, de herramientas y transporte, y dependerá de la complejidad del sistema constructivo. En este caso, el mayor puntaje se le asigna a la lámina metálica troquelada cuyo costo es el más bajo.

Criterio de Sostenibilidad 20 %							
Sistemas	Reciclabilidad	Disponibilidad	Emisiones	Durabilidad (años)		Costo \$ instalación costo/área (m2)	
Lámina de fibrocemento perfil 10	0	1	0	8	1	22.80	2
Lámina de fibrocemento perfil 6	0	3	0	10	2	22.80	2
Lámina metálica ondulada	3	3	0	25	3	18.60	3
Lámina metálica troquelada	3	2	0	25	3	15.00	3
Teja de barro	1	2	1	8	1	39.30	1
Techo de palma	0	0	2	6	0	35.80	1
Losa de concreto	2	1	0	25	3	250.00	0
Techos metálicos auto soportantes	3	1	0	30	3	70.00	1
Tejas asfáltica	0	0	0	10	2	34.00	1
Sistema de evaluación: Clave	3= Reciclable	3= disponible	3= bajo				3= bajo
	2=	2=	2=				2=
	1=	1=	1=				1=
	0= No reciclable	0= no existe	0= alto				0= alto

Tabla 2.4 Calificación de Criterio Sostenibilidad.

2.3.5 Evaluación de Criterio de Acústica (5%)

Las puntuaciones se basan en el valor de la generación de ruido, que depende de la densidad y el espesor del material y de las propiedades físicas que contribuyan a propagar las ondas de sonido, especialmente al caer la lluvia sobre la cubierta. En este sentido, se le otorga mayor puntaje al material que tenga mejores características acústicas en cuanto a baja transferencia de las ondas de sonido, siendo la losa de concreto la que obtiene el mayor puntaje, debido a la combinación de acero de refuerzo y concreto que conforman un espesor determinado por la longitud entre apoyos y el peso que soporta.

Criterio de Acústica 5%	
Sistemas	Generación de ruido
Lámina de fibrocemento perfil 10	1
Lámina de fibrocemento perfil 6	1
Lámina metálica ondulada	0
Lámina metálica troquelada	0
Teja de barro	2
Techo de palma	2
Losa de concreto	3
Techos metálicos autoportantes	0
Tejas asfáltica	3
Sistema de evaluación: Clave	0= alto
	1=
	2=
	3= bajo

Tabla 2.5 Calificación de Criterio de Acústica.

Posteriormente, se aplicaron los criterios mencionados anteriormente a los distintos sistemas constructivos, otorgando calificaciones entre 0 y 3, donde 0 le corresponde al caso más desfavorable y 3 para el caso más favorable del criterio, obteniendo cada uno de los sistemas de cubierta una puntuación, donde el puntaje mayor corresponde al sistema más apto para ser analizado.

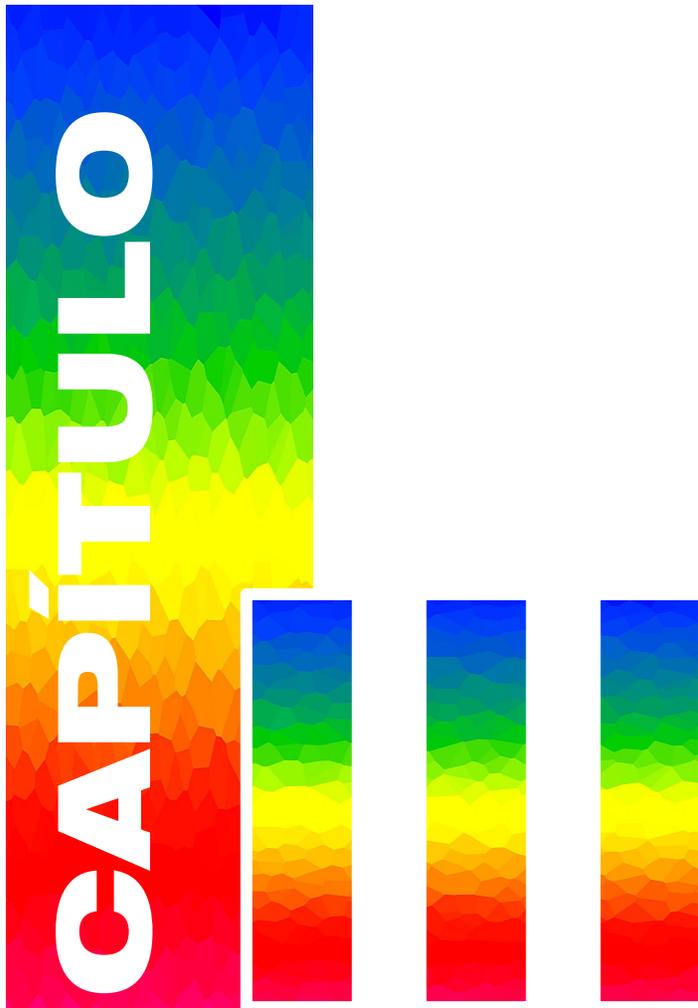
A continuación se presentan los diferentes sistemas de cubiertas y el puntaje asignado:

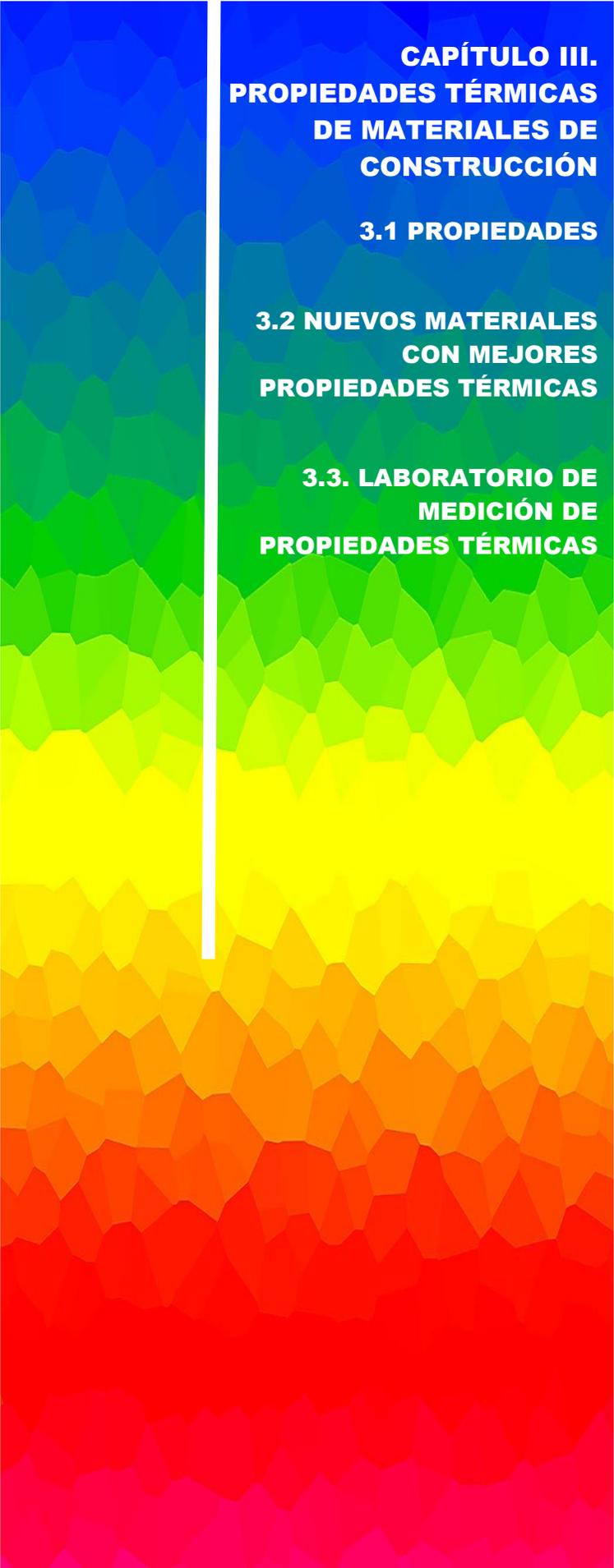
Sistema constructivo	Puntuación
Lámina metálica troquelada	2.19
Lámina metálica ondulada	2.17
Lámina de fibrocemento perfil 6	1.69
Techos metálicos auto-soportantes	1.69
Teja de barro	1.58
Losa de concreto	1.58
Lámina de fibrocemento perfil 10	1.54
Teja asfáltica	1.33
Techo de palma	1.20

Tabla 2.6 Puntajes promediados basados en la matriz de criterios ponderados.

Tomando en cuenta los puntajes y los intereses del equipo investigador, se seleccionaron los sistemas constructivos siguientes para fabricar los módulos de laboratorio:

1. Lámina metálica troquelada (2.19)
2. Lámina metálica ondulada (2.17); la cual será analizada con teja de barro (1.58) sobre lámina ondulada. Esta combinación es de interés del equipo investigador.
3. Lámina de fibrocemento perfil 6 (1.69)
4. Techos metálicos auto-soportantes (1.69)





**CAPÍTULO III.
PROPIEDADES TÉRMICAS
DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN**

3.1 PROPIEDADES

**3.2 NUEVOS MATERIALES
CON MEJORES
PROPIEDADES TÉRMICAS**

**3.3. LABORATORIO DE
MEDICIÓN DE
PROPIEDADES TÉRMICAS**

2.3.5 Evaluación de Criterio de Acústica (5%)

Las puntuaciones se basan en el valor de la generación de ruido, que depende de la densidad y el espesor del material y de las propiedades físicas que contribuyan a propagar las ondas de sonido, especialmente al caer la lluvia sobre la cubierta. En este sentido, se le otorga mayor puntaje al material que tenga mejores características acústicas en cuanto a baja transferencia de las ondas de sonido, siendo la losa de concreto la que obtiene el mayor puntaje, debido a la combinación de acero de refuerzo y concreto que conforman un espesor determinado por la longitud entre apoyos y el peso que soporta.

Criterio de Acústica 5%	
Sistemas	Generación de ruido
Lámina de fibrocemento perfil 10	1
Lámina de fibrocemento perfil 6	1
Lámina metálica ondulada	0
Lámina metálica troquelada	0
Teja de barro	2
Techo de palma	2
Losa de concreto	3
Techos metálicos autoportantes	0
Tejas asfáltica	3
Sistema de evaluación: Clave	0= alto
	1=
	2=
	3= bajo

Tabla 2.5 Calificación de Criterio de Acústica.

Posteriormente, se aplicaron los criterios mencionados anteriormente a los distintos sistemas constructivos, otorgando calificaciones entre 0 y 3, donde 0 le corresponde al caso más desfavorable y 3 para el caso más favorable del criterio, obteniendo cada uno de los sistemas de cubierta una puntuación, donde el puntaje mayor corresponde al sistema más apto para ser analizado.

A continuación se presentan los diferentes sistemas de cubiertas y el puntaje asignado:

Sistema constructivo	Puntuación
Lámina metálica troquelada	2.19
Lámina metálica ondulada	2.17
Lámina de fibrocemento perfil 6	1.69
Techos metálicos auto-soportantes	1.69
Teja de barro	1.58
Losa de concreto	1.58
Lámina de fibrocemento perfil 10	1.54
Teja asfáltica	1.33
Techo de palma	1.20

Tabla 2.6 Puntajes promediados basados en la matriz de criterios ponderados.

Tomando en cuenta los puntajes y los intereses del equipo investigador, se seleccionaron los sistemas constructivos siguientes para fabricar los módulos de laboratorio:

5. Lámina metálica troquelada (2.19)
6. Lámina metálica ondulada (2.17); la cual será analizada con teja de barro (1.58) sobre lámina ondulada. Esta combinación es de interés del equipo investigador.
7. Lámina de fibrocemento perfil 6 (1.69)
8. Techos metálicos auto-soportantes (1.69)

3.1.2 Mecanismos de transferencia de calor

Se define como calor a la suma de la energía cinética total de los átomos o moléculas de una sustancia, y temperatura como una medida de esa energía, entendiendo que cuando se agrega calor a una sustancia, los átomos se mueven más rápido y su temperatura se eleva.

Al tener dos cuerpos de diferente temperatura en contacto, se produce una transferencia de calor, desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. Esta transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos diferentes: convección, conducción y radiación.

3.1.3 Conducción

La conducción de calor es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de las interacciones entre ellas.

La rapidez con que se transfiere calor por medio de conducción depende de la diferencia de temperaturas entre el medio, el material, el espesor y su configuración geométrica.

Así, considerando una pared plana de espesor L , área A , una temperatura T_1 mayor a T_2 en sus extremos, la razón de la conducción de calor a través de una pared plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y el área de transferencia de calor, pero inversamente proporcional al espesor de esa capa.

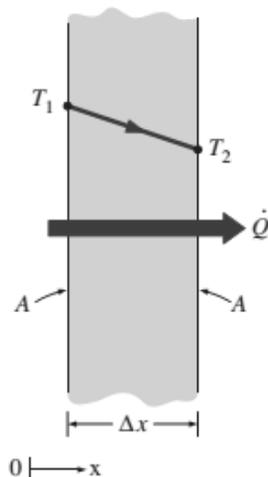


Figura 3.1 Gradiente de temperatura en elemento de espesor diferencial.
Fuente: Cengel (2004). Transferencia de calor.

En donde la constante de proporcionalidad es la conductividad térmica k , que es una medida de la capacidad del material para conducir calor, llegando a la ley de Fourier de la conducción de calor.

Recordando que la Conductividad Térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, un valor elevado de conductividad de calor indica que el material no opone mucha resistencia al calor y una baja conductividad significa que el material opone resistencia, o es un aislante térmico.

Se puede calentar una capa de material de espesor y área conocidos, colocar una fuente de calor a uno de sus lados, aislar las superficies exteriores al calentador, y, cuando se alcanza un estado estacionario, se miden las temperaturas de las superficies del material y se obtiene el valor de la conductividad térmica, en caso de requerir aumentar el calor.

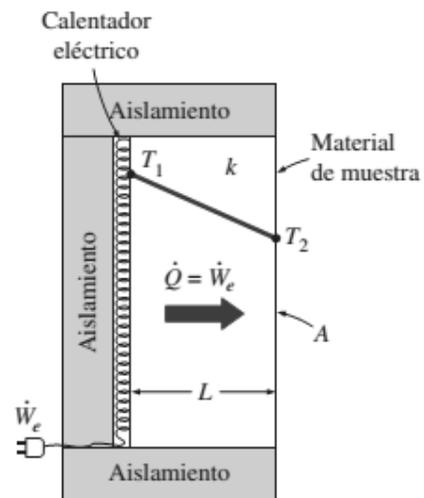


Figura 3.2 Elemento aislado en 3 rostros.
Fuente: Cengel (2004). Transferencia de calor.

3.1.4 Convección

La convección es el modo de transferencia de calor entre un sólido y un fluido (líquido o gas) adyacentes que está en movimiento. Entre más rápido es el movimiento del fluido, más rápida es la transferencia de calor y, en ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor solamente por conducción.

3.1.5 Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de fotones y, a diferencia de la conducción y convección, no se requiere de un medio, como fluido en movimiento o contacto, para transferir calor.

La radiación es un fenómeno volumétrico, y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados, aunque la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos como la madera, metales o rocas.

Donde la superficie idealizada que emite radiación a razón máxima se llama cuerpo negro, la radiación emitida por todas las superficies reales es menor a una emitida por un cuerpo negro a una misma temperatura.

3.1.6 Propiedades térmicas

Al hablar de propiedades térmicas de materiales de construcción, generalmente se piensa en el aislamiento térmico, material que opone resistencia al paso de calor al tener una baja conductividad térmica; sin embargo, existen otras propiedades como la reflectancia, que reduce el calor radiante, que también actúa como aislante térmico.

3.1.7 La conductividad térmica

Entre más bajo es su valor, mejor aislante es el material. Puede observarse en la tabla 3.1 los valores promedio de la conductividad térmica para diferentes materiales.

Si no hay un medio de transferencia de calor, como el vacío, la transferencia de calor es prácticamente nula.

Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente	
Material	k (W/m°C)
Diamante	2,300.000
Plata	429.000
Cobre	401.000
Oro	317.000
Aluminio	237.000
Hierro	80.200
Mercurio	8.540
Vidrio	0.780
Ladrillo	0.720
Agua	0.607
Piel humana	0.370
Madera de roble	0.170
Helio	0.152
Caucho suave	0.130
Fibra de vidrio	0.043
Aire	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Tabla 3.1 Conductividad Térmica de materiales a temperatura ambiente.

Fuente: Cengel (2004). Transferencia de calor.

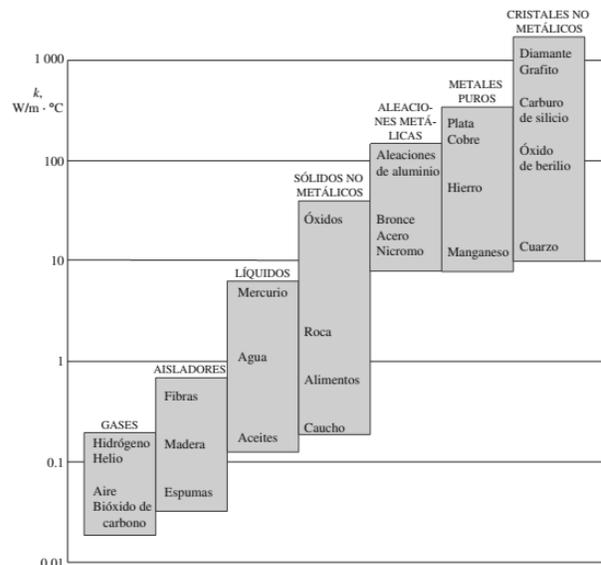


Figura 3.3 Comparación de conductividad térmica de algunos materiales.

Fuente: Cengel (2004). Transferencia de calor.

3.1.8 La Emisividad

La Emisividad es la medida de la capacidad de un material para emitir energía infrarroja, es un valor que indica la transferencia de calor debida a la emisión de ondas electromagnéticas entre dos superficies. Un valor bajo de emisividad significa que el material reflejara la mayoría de la radiación. A continuación pueden observarse en la tabla 3.2 los valores de emisividad de distintos materiales.

Emisividades de algunos materiales a 300K	
Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.007
Aluminio anodizado	0.820
Cobre pulido	0.030
Oro pulido	0.030
Plata pulida	0.020
Acero inoxidable pulido	0.170
Pintura negra	0.980
Pintura blanca	0.900
Papel blanco	0.920
Asfalto	0.850
Ladrillo rojo	0.930
Piel humana	0.950
Madera	0.820
Suelo	0.930
Agua	0.960
Vegetación	0.920

Tabla 3.2 Emisividad de algunos materiales a 300 K
Fuente: Cengel (2004). Transferencia de calor.

3.1.9 Absortividad, reflectividad y transmisividad

Todo lo que nos rodea emite radiación en forma constante y la emisividad representa las características de emisión de esos cuerpos. Esto significa que todo cuerpo, incluyendo el cuerpo humano, es constantemente bombardeado por la radiación proveniente de todas las direcciones en un intervalo de longitudes de onda. La radiación que incide sobre una superficie se llama irradiación y se denota por G .

Cuando la radiación choca con la superficie, parte de ella es absorbida, parte de ella es reflejada y la parte restante, si hay, es transmitida, como se ilustra en la figura 3.4.

La fracción de irradiación absorbida por la superficie se llama absortividad (α), la fracción reflejada por la superficie recibe el nombre de reflectividad (ρ), y la fracción transmitida es la transmisividad (τ); es decir:

G es la energía de la radiación que incide sobre la superficie y G_{abs} , G_{ref} y G_{tr} son las porciones absorbida, reflejada y transmitida a ella, respectivamente. La primera ley de la termodinámica requiere que la suma de energía de radiación absorbida, reflejada y transmitida sea igual a la radiación incidente.

Esta es una relación importante, ya que permite determinar tanto la absortividad como la reflectividad de una superficie opaca.

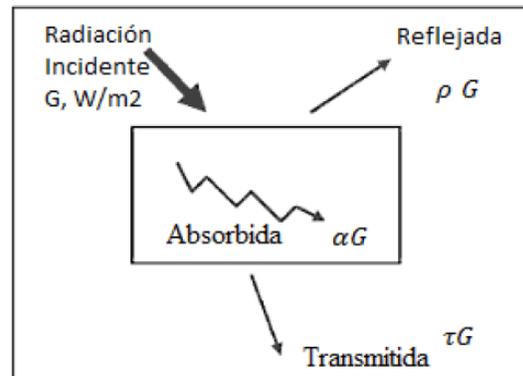


Figura 3.4 Absorción, reflexión y transmisión de la radiación por un material semitransparente.
Fuente: Cengel (2004). Transferencia de calor.

3.2 NUEVOS MATERIALES CON MEJORES PROPIEDADES TÉRMICAS

3.2.1 Espuma de vidrio con conductividad térmica de 0,035 W/m·K

La lana de vidrio es una lana mineral fabricada con millones de filamentos de vidrio unidos con un aglutinante. Gracias a las burbujas de aire atrapadas en las fibras, se obstaculiza el paso del calor.

3.2.2 Celulosa con conductividad térmica de 0,039 W/m·K

Aunque requiere ser tratada con sustancias químicas para evitar el moho y protegerla del fuego, tiene muy buenas propiedades aislantes, es ligera y requiere poca energía para su fabricación, ya que se encuentra en gran medida como desecho sólido de la industria del papel.

3.2.3 Vidrio Tintado

Al absorber la radiación solar, los vidrios tintados se calientan mucho más que un vidrio claro (lo cual puede incluso percibirse al tacto). Ya que una parte del calor absorbido es re-irradiado hacia el interior, los beneficios de reducir la transmisión directa disminuyen. En ese sentido, los vidrios tintados pueden no ser, por sí solos, tan efectivos para reducir el coeficiente de ganancia de calor solar como otros tipos de vidrio.

3.2.4 Vidrio Reflectante

Los vidrios reflectantes han sido concebidos para aumentar la cantidad de radiación solar reflejada hacia el exterior, reduciendo de esa manera la radiación transmitida y absorbida por el propio vidrio. Este efecto se suele conseguir revistiendo una de las superficies del vidrio con una delgada capa metálica, cuyo espesor dependerá en buena medida de su coeficiente de reflectancia.

3.2.5 Vidrios Low E

Los vidrios bajo emisivos se producen con las mismas tecnologías que los vidrios reflectantes (tanto con el método pirolítico como el magnetrónico), pero son diseñados para reflejar principalmente la radiación térmica infrarroja, siendo por lo general bastante transparentes al resto del espectro solar. Si se asume que la emisividad es el inverso de la reflectancia a la radiación infrarroja, se determina entonces que, mientras más alto es el valor de ésta última, más bajo será el valor de emisividad.

3.2.6 Pinturas reflectivas

Poseen una reflectividad de un 92.3% en todas las bandas de frecuencia y de un 94.6% en áreas cercanas a rayos infrarrojos. Estos asombrosos resultados se logran dado a la presencia de pequeñas bolas huecas que son suspendidas uniformemente y laminadas con una película superior.

3.3. LABORATORIO DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS

3.3.1 Metodología

Las actividades para la realización de las pruebas de laboratorio se resumen así:

- Obtención de materiales.
- Preparación de las muestras.
- Obtención de datos mediante pruebas experimentales.
- Mediciones.

Estas actividades son las fundamentales para llevar a cabo la investigación cumpliendo los objetivos de la misma, considerando el proceso de forma general, puesto que cada una de las actividades tiene su procedimiento particular para realizarse.

3.3.2 Obtención de materiales

Esta actividad es crítica y determinante de todo el proceso.

Se inicia indagando en el mercado salvadoreño sobre materiales alternativos para el aislamiento del envolvente del edificio cuyas propiedades térmicas no se garanticen. Así mismo, se analizó el potencial de mejora en los cuatro sistemas constructivos para cubierta propuestos en el capítulo 2; tal es el caso de los techos metálicos y el fibrocemento.

3.3.3 Preparación de las muestras para pruebas de luz visible

Al disponer de los materiales, se procedió a preparar las muestras con las dimensiones físicas requeridas según fuera necesario para montar en cada equipo de medición.

Primero, se prepararon muestras de vidrio transparente, como se observa en la figura 3.5, cortándose muestras de 15cm x 10cm para pruebas de transmisividad. A estas muestras se les aplicó solamente una capa de pintura para realizar mediciones de transmisividad y ser analizadas, tal como se muestra en la figura 3.6 y 3.7.



Figura 3.5 Muestras de vidrio transparente.



Figura 3.6 Aplicando pintura negra en muestra de vidrio.



Figura 3.7 Capa de pintura negra.

Luego se prepararon muestras de cartón piedra calibre 10mm de 35 cm x 35 cm. Se utilizó este material porque proporciona suficiente rigidez para las pruebas. Estas piezas se pintaron para analizar la reflectividad de diferentes tipos de pintura sobre superficies planas (ver figuras 3.8, 3.9 y 3.10).



Figura 3.8 Aplicando pintura en muestras de cartón.

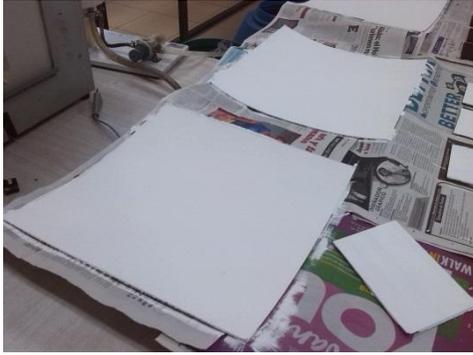


Figura 3.9 Cartón con pintura blanca.

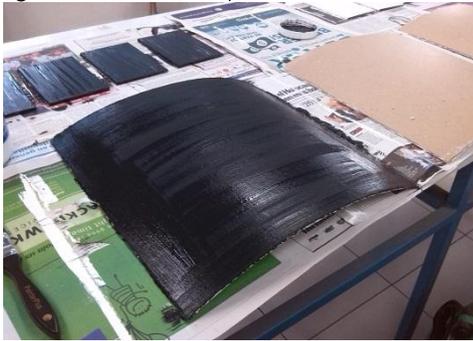


Figura 3.10 Cartón con pintura negra.

Al aplicar pintura sobre los cartones estos se deformaron debido a la diferencia de humedad al pintar solo sobre una cara. Al aplicar pintura sobre la cara contraria, la deformación disminuyó pero se mantuvo una pequeña curvatura y este hecho es algo no deseado para las pruebas, pues puede causar concentración de los rayos de luz o dispersión de los mismos, dependiendo de qué cara sea la que se exponga. Para eliminar esta deformación, se puso un peso considerable sobre las muestras durante varios días, esto las volvió totalmente planas y de esta manera pudieron ser utilizadas para la realización de las pruebas. También se prepararon muestras de cielo falso común a partir de losetas, láminas de acero galvanizado calibre 24, baldosa de piso de concreto, muestras de tabla yeso y baldosa de piso cerámico (ver figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15).

Todas las muestras de estos materiales se cortaron para obtener piezas de 25 x 25 cm, pues estas son las dimensiones requeridas para montarse sobre el equipo de medición de conductividad térmica. Este proceso se explica más adelante.



Figura 3.11 Muestra de cielo falso común.

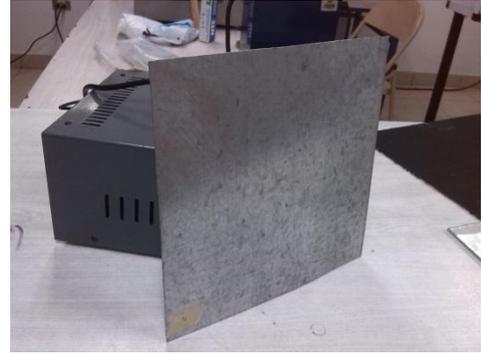


Figura 3.12 Muestra de lámina galvanizada.



Figura 3.13 Baldosa de concreto para piso.



Figura 3.14 Muestra de tabla yeso.

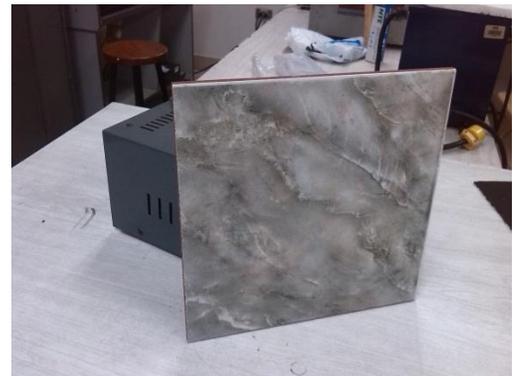


Figura 3.15 Baldosa de piso cerámico.

Son escasas las muestras de materiales que fueron brindadas por los colaboradores con las dimensiones que se necesitaban. La mayoría tuvieron que ser cortadas y preparadas para poder ser utilizadas en los distintos equipos de medición de los laboratorios. Contando con las muestras preparadas, se prosigue a realizar las pruebas y mediciones.

3.3.4 Obtención de datos mediante pruebas experimentales

Para obtener resultados de las propiedades de interés, se realizaron distintas pruebas con diferentes equipos:

- Prueba de transmisión de luz visible.
- Prueba de reflectividad de luz visible.
- Medición de conductividad térmica.
- Medición de emisividad de superficies.
- Prueba de transmisión de rayos UV.

El procedimiento de todas las pruebas se realizó tomando como referencia las Guías de Laboratorio Práctico de Transferencia de Calor del laboratorio.

3.3.5 Transmisividad de luz visible

El objetivo de esta prueba es conocer cuánta luz es capaz de atravesar un cuerpo o superficie, obteniendo una relación entre la luz emitida y la atravesada, a lo cual se le conoce como "Transmisividad". Para esta prueba se utilizó el equipo central Armfield HT10X, la fuente de luz visible y el receptor de luz visible; para fijar estos dos últimos elementos se utilizó el riel principal, formando juntos parte del conjunto HT13. El diagrama del equipo montado se muestra en la figura 3.16.



Figura 3.16 Equipo HT13 y sus elementos.



Figura 3.17 Interruptor de encendido Armfield.

El primer paso a seguir en esta prueba fue conectar el equipo Armfield HT10X a un tomacorriente y luego encenderlo con el interruptor. El HT10X es el cerebro que administra el resto de los equipos (ver figura 3.17).

Luego se montó la fuente de luz sobre el soporte fijo utilizando la pieza roscada de sujeción, y el equipo receptor de luz fue montado sobre el soporte deslizante introduciendo el vástago del receptor dentro del agujero con perno roscado de sujeción, ambos soportes ubicados en el riel principal HT13 (ver figuras 3.18 a 3.22).



Figura 3.18 Tornillo de sujeción HT13 para fuente de luz.



Figura 3.19 Fuente de luz montada en HT13.

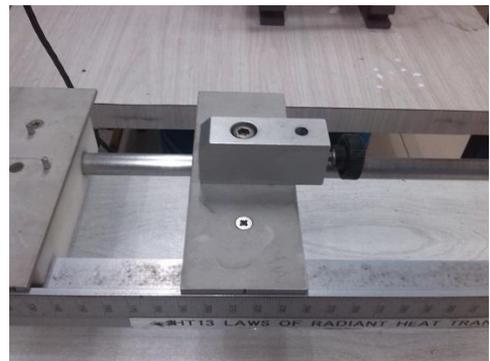


Figura 3.20 Soporte deslizante con tornillo de sujeción, equipo HT13.



Figura 3.21 Receptor de luz visible montado sobre riel HT13.



Figura 3.22 Riel del equipo HT13.

A continuación se coloca la muestra a analizar en el soporte deslizante intermedio, de manera que la luz de la fuente incida directamente sobre dicha superficie y el receptor de luz se encuentre inmediatamente después de la muestra para que en él incidan los rayos de luz que han sido transmitidos (ver figuras 3.23, 3.24).

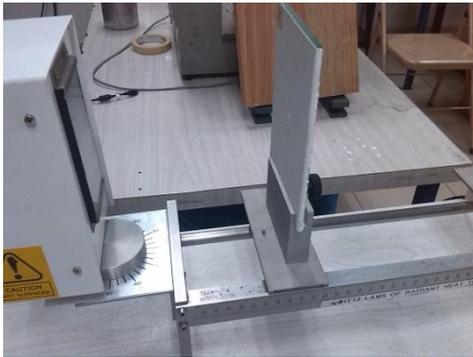


Figura 3.23 Muestra de vidrio con pintura blanca montada en soporte deslizante intermedio.

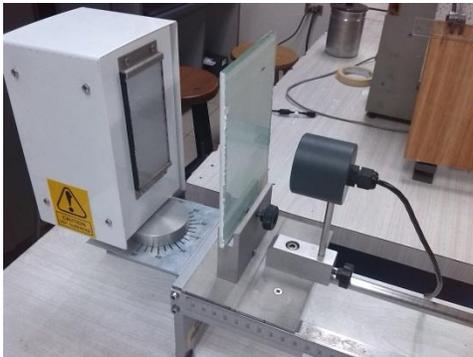


Figura 3.24 Disposición de muestra y equipos para pruebas de transmisividad de luz visible.

Luego de contar con el emisor de luz y el receptor debidamente montados, se deben conectar ambos equipos correctamente en el Armfield HT10X, la fuente de luz se conecta en la parte trasera del HT10X, mientras que el receptor de luz se conecta en la parte frontal del HT10X en la entrada correspondiente.



Figura 3.25 Conexión de la fuente de luz en el equipo HT10X.



Figura 3.26 Conexión del receptor de luz en el equipo HT10X.

Considerando que los equipos se encuentran debidamente montados y conectados, se procede a alimentar con energía la fuente de luz. Esto se hace ubicando la perilla correspondiente en la posición V para medir voltaje en el HT10X (ver figura 3.27) y luego se varía el voltaje con el potenciómetro; al ubicar la perilla en posición de voltaje se puede observar en la pantalla del HT10X el valor exacto de voltaje que se esté suministrando. Cuando se ha seleccionado el voltaje deseado, luego se mueve la perilla en la posición L para medir luxes y se observa el valor medido en la pantalla del HT10X. Este proceso se debe repetir las veces necesarias según la cantidad de mediciones que se desee realizar.



Figura 3.27 Potenciómetro variador de voltaje del equipo HT10X.

3.3.6 Transmisividad de rayos UV

El procedimiento para la prueba de transmisión de rayos UV es conceptualmente igual al proceso de transmisión de luz visible; sin embargo, los equipos a utilizar fueron diferentes. Para este caso, se utilizó el medidor de rayos UV y un banco de lámparas emisoras de rayos ultravioleta. Otro elemento importante que se utilizó son las gafas protectoras contra rayos UV, pues la exposición directa de los ojos con este tipo de luz puede generar daños en la vista del que realiza la prueba.



Figura 3.28 Equipo medidor de rayos UV.



Figura 3.29 Gafas protectoras contra rayos UV.

El primer paso para realizar esta prueba fue ubicar el banco de lámparas de rayos UV en una superficie plana donde esta pueda descansar fija, puede ser en una mesa larga o sobre el piso.



Figura 3.30 Banco de lámparas de rayos UV.

Luego de montar el banco de lámparas, este se conectó a un tomacorriente para alimentarlo con energía eléctrica; ya montado y conectado, se encendieron las lámparas con el interruptor principal. Es importante que en todo momento se utilicen las gafas protectoras para evitar daños oculares.



Figura 3.31 Interruptor principal de banco de lámparas de rayos UV.



Figura 3.32 Medición de rayos UV emitidos por la fuente.

Antes de proceder a tomar mediciones deben apagarse las luces del cuarto donde se esté realizando la prueba para evitar mediciones erróneas. Después de apagar las luces se tomó la medición de rayos emitidos por las lámparas con el medidor de rayos UV. El medidor se debe ubicar a una distancia de 10 cm a 50 cm para realizar la medición, luego de ubicar el medidor se registró el valor que apareció en la pantalla del mismo, este valor es el emitido por la fuente. El siguiente paso fue ubicar la muestra a analizar entre el medidor y la fuente de forma que bloqueara totalmente los rayos UV emitidos, se registró el valor mostrado en la pantalla del equipo medidor de rayos UV. Esta medición refleja los rayos que atravesaron la muestra. La relación entre la segunda y la primera medición es lo que se denomina "transmisividad de rayos UV" (Cengel, 2011).



Figura 3.33 Ubicación de la muestra para medir transmisión de rayos UV.

Este procedimiento se repitió las veces necesarias de acuerdo con la cantidad de muestras que se analizaron. De esta manera se determinó la propiedad de transmisividad de rayos ultravioleta de los materiales de interés (ver figuras 3.28 a 3.33).

3.3.7 Reflectividad de Luz visible

El objetivo de esta prueba es conocer la capacidad que tiene una superficie de reflejar cierta cantidad de luz, es decir, sin absorberla ni transmitirla.

Para llevar a cabo esta prueba, se necesita como elemento principal la central Armfield HT10X, la fuente emisora de luz visible, el medidor de luz visible, la muestra a someter a prueba, y un cuerpo opaco que servirá para bloquear los rayos directos entre la fuente de luz y el receptor.

Lo primero que se hizo fue montar la fuente de luz visible en el soporte fijo del riel principal HT13, después se montó el receptor de luz visible frente a la fuente de luz, al igual que en la prueba de transmisividad, con la importante diferencia que ambos elementos se encuentran con una desviación de 30° . El siguiente paso fue montar una pieza de sujeción sobre el soporte móvil intermedio y en este soporte fijar el elemento de superficie opaca, para las pruebas de este estudio se utilizó una placa de madera contrachapada como elemento de superficie opaca.



Figura 3.34 Fuente de luz visible con 30° de orientación.



Figura 3.35 Medidor de luz visible con 30° de orientación.

Luego se colocó la muestra del material de interés frente al medidor y a la fuente de luz, de manera que los rayos de luz emitidos por la fuente incidían sobre la muestra y los mismos, al ser reflejados, incidían sobre el medidor de luz. La muestra fue fijada sobre un soporte de manera que no se desplazara ni rotara; para las pruebas de esta investigación se utilizó una base H y una varilla metálica, también se utilizó cinta adhesiva para fijar la muestra para que no rotara. Las muestras a analizar se montaron a una distancia de 12.5 cm del riel principal en el caso de muestras de 35 cm x 35 cm, y a una distancia de 10.8 cm para muestras de 25 x 25 cm. En la figura 3.40 se muestra cómo quedaron montados todos los elementos para esta prueba.



Figura 3.36 Pieza de superficie opaca montada sobre soporte móvil intermedio.



Figura 3.37 Elementos de sujeción de muestras para prueba de reflectividad.



Figura 3.38 Rayos de luz incidiendo sobre muestra.



Figura 3.39 Rayos de luz reflejados por la muestra al medidor.

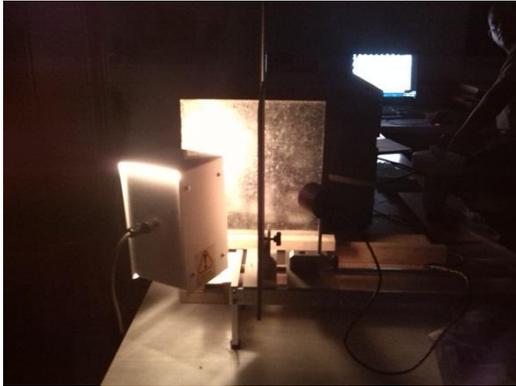


Figura 3.40 Sistema montado para prueba de reflectividad de luz visible.

Posterior al montaje del sistema, se procedió a tomar mediciones. Las luces deben estar apagadas para evitar lecturas erróneas y resultados poco confiables. Al igual que en las pruebas anteriores, la fuente de luz y el medidor deben estar conectados a la central HT10X desde donde se varía la intensidad de luz por medio del potenciómetro y se registran las mediciones de luz censada por el medidor. La relación de la luz medida por el reflector y la luz emitida por la fuente es lo que se conoce como "reflectividad de luz visible" (Cengel, 2011). El procedimiento se repitió tantas veces como fue requerido según la cantidad de muestras y la cantidad de mediciones por muestra.

3.3.8 Pruebas para determinar la conductividad térmica

Para la determinación de la conductividad térmica se utilizó la caja térmica, la cual consiste en una caja aislada térmicamente, que posee una fuente de calor de valor conocido en su interior (60 W). Se colocan 4 muestras de un material de análisis de dimensiones 25 cm x 25 cm. El calor generado por la fuente es conducido por estas 4 muestras, el cual se distribuye de igual forma.

El proceso de prueba es el siguiente: Se limpiaron las probetas a utilizar para evitar la contaminación por residuos de polvo u otras factores que podían alterar la medición, como segundo paso se procedió a marcar el punto donde serían colocadas las termocuplas tipo k. Estas fueron colocadas a 21.5 cm, debido a que es la capa de la muestra donde se mide la temperatura más representativa según el estudio de "Simulación de la caja térmica en ALGOR".



Figura 3.41 Limpieza de muestras.

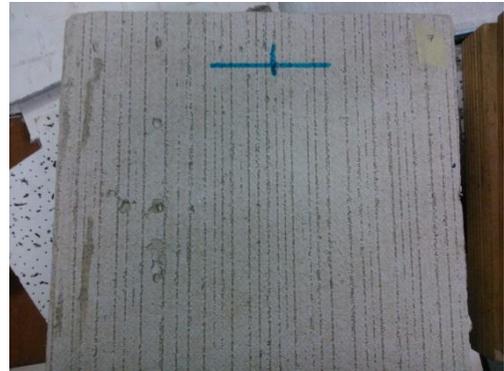


Figura 3.42 Marca para colocación de termocuplas tipo k.



Figura 3.43 Termocupla tipo k.

A continuación se instalaron las 4 probetas del material seleccionado en la caja térmica para después proceder con la colocación de 4 termocuplas tipo k, 2 por probeta, una colocada en la cara interna y otra en la cara externa del material. Para adherir las termocuplas se utilizó pasta térmica NTE.

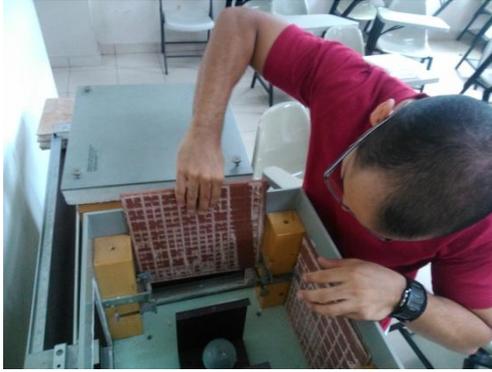


Figura 3.44 Montaje de muestras en la caja térmica.



Figura 3.45 Pasta NTE utilizada para fijar las termocuplas en las muestras.

Como último paso se conectó a un toma de energía eléctrica la caja térmica y se esperó 1.5 horas para poder tomar las mediciones de temperaturas, este es el tiempo necesario de estabilización del sistema según "Simulación de la caja térmica en ALGOR". Este proceso se repitió las veces necesarias para tomar mediciones de las 4 probetas instaladas.

3.3.9 Emisividad

Para la determinación de la emisividad de los materiales se utilizaron una cámara termográfica Fluke it200 (ver figura 3.47), un medidor de temperatura fluke51/52 II (ver figura 3.46), una termocupla tipo k y pasta térmica NTE.



Figura 3.46 Cámara termografica fluke it200.



Figura 3.47 Termómetro fluke 51/52 II.

Como primer paso se limpiaron las muestras para remover residuos de contaminación, las cuales podían afectar en las mediciones de las superficies, luego se procedió a colocar pasta térmica en la termocupla para adherirla a la superficie a medir. La termocupla colocada en la superficie de la muestra era leída por medio del termómetro fluke (ver figura 3.46), en ese mismo instante se tomaba una fotografía con la cámara térmica. Por cada material se repitió este procedimiento 8 veces.

Luego se procedió a utilizar el software de la cámara para poder variar la emisividad de un punto seleccionado en específico hasta que la temperatura de ese punto coincidiera con la temperatura obtenida mediante el termómetro Fluke.

A continuación pueden observarse en la tabla 3.3 los valores de propiedades térmicas de los distintos materiales ensayados y analizados en laboratorio.

PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN EL SALVADOR					
Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA. Agosto de 2014					
Material	Absortividad de luz visible	Transmisividad de luz visible	Reflectividad de luz visible	Conductividad térmica (W/m*°C)	Emisividad
Ladrillo estructural de concreto	0.948 ± 0.003	-	0.052 ± 0.003	-	0.85 ± 0.02
Ladrillo rojo recocido	0.947 ± 0.003	-	0.053 ± 0.003	-	0.80 ± 0.02
Lámina galvanizada	0.857 ± 0.003	-	0.143 ± 0.003	-	0.92 ± 0.02
Fibrocemento	0.938 ± 0.003	-	0.062 ± 0.003	1.71 ± 0.05	-
Cielo falso Radar tipo 1	0.904 ± 0.003	-	0.096 ± 0.003	0.51 ± 0.01	0.87 ± 0.02
Cielo falso Radar tipo 2	0.924 ± 0.003	-	0.076 ± 0.003	-	-
Cielo falso común	0.907 ± 0.003	-	0.093 ± 0.003	-	-
Piso cerámico	0.920 ± 0.003	-	0.080 ± 0.003	2.71 ± 0.11	0.93 ± 0.02
Tabla yeso	-	-	-	1.14 ± 0.03	-
Aislamiento de aluminio más poliéster	0.901 ± 0.003	-	0.099 ± 0.003	-	0.69 ± 0.01
Espuma aislante autoexpansiva	-	-	-	-	0.57 ± 0.01
Panel contrachapado	0.910 ± 0.003	-	0.090 ± 0.003	-	0.66 ± 0.01
Madera de cedro	0.913 ± 0.003	-	0.087 ± 0.003	1.12 ± 0.02	0.78 ± 0.02
Madera de pino	0.905 ± 0.003	-	0.095 ± 0.003	0.84 ± 0.01	0.76 ± 0.02
Vidrio transparente de ventana	-	0.79 ± 0.01	-	-	-
Vidrio transparente con pintura blanca (pintura blanca de agua)	-	0.012 ± 0.002	-	-	-
Vidrio transparente con pintura intermedia (pintura amarilla de agua)	-	0.056 ± 0.003	-	-	-
Pintura blanca de agua			0.112 ± 0.003		0.94 ± 0.02
Pintura intermedia de agua (amarilla)			0.101 ± 0.003		0.72 ± 0.02
Pintura negra de agua	0.9957 ± 0.0004		0.0043 ± 0.0004		0.93 ± 0.02
Mezcla de celulosa con pintura blanca	0.930 ± 0.003		0.070 ± 0.003		0.86 ± 0.02

Tabla 3.3 Valores de propiedades térmicas de distintos materiales.



CAPÍTULO
IV

The image features a large, stylized title 'CAPÍTULO IV' centered on the page. The text is rendered in a bold, white, sans-serif font. The background of the text is a vibrant, multi-colored gradient that transitions from red at the bottom to blue at the top, passing through orange, yellow, and green. The gradient is composed of small, irregular polygonal shapes, giving it a mosaic-like appearance. The word 'CAPÍTULO' is positioned above the Roman numeral 'IV', and both are contained within a single, wide rectangular area.



**CAPÍTULO IV.
LABORATORIO
EXPERIMENTAL,
ESTABLECIENDO
LÍNEA BASE**

**4.1 EVALUACIÓN DE
SOMBREAMIENTOS**

**4.2 CARACTERIZACIÓN
TÉRMICA DE SISTEMAS
CONSTRUCTIVOS
PARA CUBIERTA**

CAPÍTULO IV. LABORATORIO EXPERIMENTAL, ESTABLECIENDO LÍNEA BASE

4.1 EVALUACIÓN DE SOMBREAMIENTOS

Las dimensiones de los prototipos y su ubicación deben estar de acuerdo a las características del emplazamiento destinado al laboratorio experimental. El presente análisis tiene como objetivo determinar dimensiones adecuadas para los prototipos y su espaciamiento, a modo de reducir sombreadamientos ocasionados por objetos contiguos en el sitio previsto para el montaje de los mismos. La presencia de sombras en las cubiertas prototipo es indeseable, ya que no permitiría una comparación objetiva entre la línea base y las cubiertas mejoradas. Por esa razón, se lleva a cabo un estudio que permita garantizar que las dimensiones propuestas para los prototipos y sus espaciamientos son idóneas.

Para hacer la evaluación de sombreadamientos, se construyó un modelo computacional del sitio disponible para ubicar los prototipos. Dicho modelo computacional fue construido en base a un levantamiento arquitectónico del sitio previsto para las pruebas de los prototipos. En la figura 4.1 se muestra el modelo, indicando el área disponible y la ubicación propuesta para los prototipos. Se utilizó un programa comercial para análisis de sombras en edificaciones. Para la evaluación, se utilizó la base climática disponible para Ilopingo, la más cercana al sitio. Mediante un proceso de prueba, asistido por la herramienta computacional, se identificó una distribución y dimensiones básicas de los prototipos. Se partió de dimensiones de 1 x 1 m, dejando como incógnita la altura, se considera que con estas dimensiones se pueden observar las diferencias en el comportamiento térmico de los distintos prototipos. Además, se consideró una pendiente de 30% para las cubiertas, ya que todos los sistemas a evaluar pueden ser construidos con este porcentaje de inclinación.

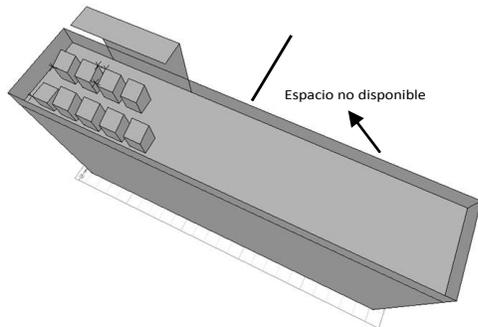


Figura 4.1 Modelo geométrico del sitio y prototipos de cubiertas. Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Resultados de sombreadamiento

El análisis de sombreadamiento fue llevado a cabo a lo largo del año, a modo de identificar posibles épocas para las cuales los objetos aledaños

provocarán sombra sobre los prototipos o sombras producidas por otros prototipos. Típicamente, se consideran dos días críticos, el solsticio de verano y el solsticio de invierno, ya que muestran los ángulos de sombra más desfavorables.

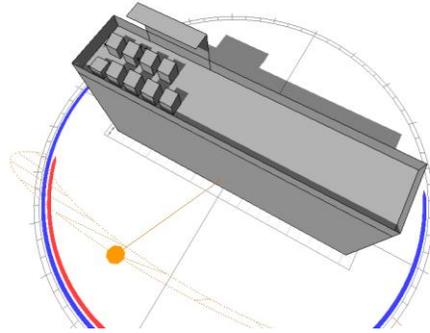


Figura 4.2 Sombras para el 21 de diciembre al mediodía (solsticio de invierno). Fuente: Elaboración propia.

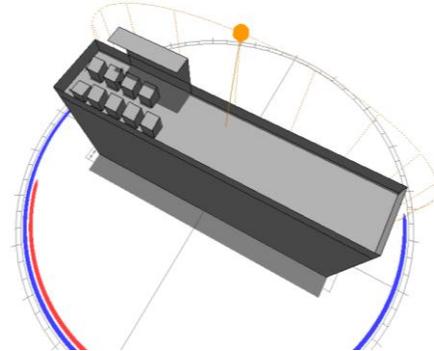


Figura 4.3 Sombras para el 21 de junio al mediodía (solsticio de verano). Fuente: Elaboración propia.

Además, como una representación anual de las sombras producidas en distintos puntos, se tomaron como referencia dos puntos, uno en la primera fila y uno en la segunda fila. Asimismo, se analizaron las sombras sobre una cubierta, denominada cubierta de prueba, considerada la más desfavorable desde la perspectiva de sombreadamiento.

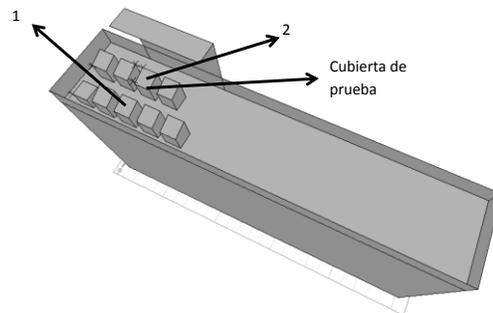


Figura 4.4 Puntos de análisis para estudio de sombras anual. Fuente: Elaboración propia.

Para los objetos de análisis, se obtuvo el diagrama estereográfico, el cual permite observar los sombreadamientos producidos en un punto o superficie a lo largo del año. Dichos diagramas son presentados a continuación.

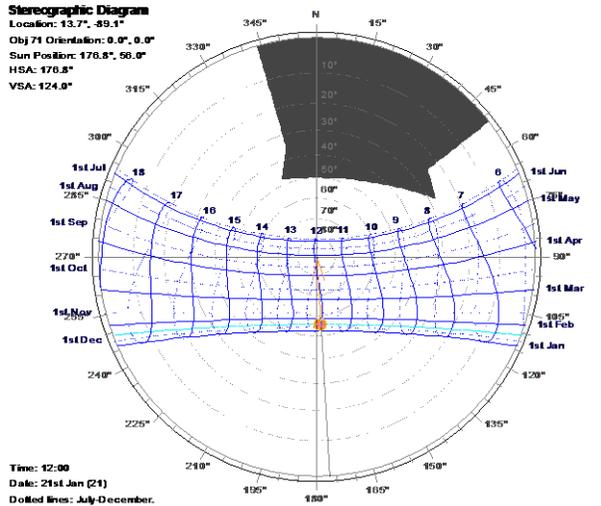


Figura 4.5 Diagrama estereográfico para punto de análisis 1. Fuente: Elaboración propia.

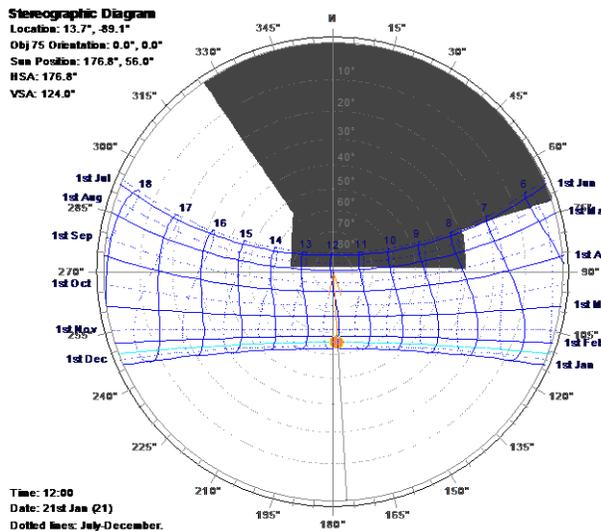


Figura 4.6 Diagrama estereográfico para punto de análisis 2. Fuente: Elaboración propia.

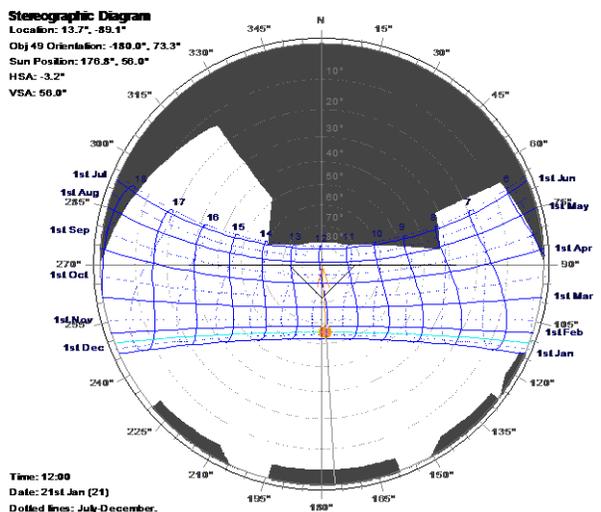


Figura 4.7 Diagrama estereográfico para cubierta de prueba. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Análisis de resultados de simulación de sombras

Los análisis de sombreado permiten observar que la altura y separación de los prototipos de cubiertas, ubicados en el sitio de pruebas, no presentan problemas de sombreado, por lo tanto, son factibles según dicha perspectiva.

El diagrama estereográfico del punto de análisis 1, mostrado en la figura 4.5, ubicado en la primera fila, mostró cero influencias de sombras. Por otro lado, el análisis de sombreado para el solsticio de verano, identificó sombras parciales en la segunda fila de prototipos. El análisis del diagrama estereográfico para el punto de análisis 2, mostrado en la figura 4.6, permite identificar sombras parciales entre los meses de mayo y agosto fechas en las cuales no se prevén mediciones. El análisis de la superficie de prueba, mostrado en la figura 4.7, identificó, en su conjunto, cierta influencia de sombras en esos meses, pero como una fracción pequeña.

4.1.3 Conclusión sobre simulación de sombras

Como conclusión, se puede afirmar que las dimensiones propuestas para los prototipos, así como su espaciado tentativo, no experimentarían problemas de sombreado que ocasionen distorsiones en las variables del experimento. Se recomendó, como primera opción, ubicar todos los prototipos en la primera fila, buscando extender el área disponible y garantizar mayor control del experimento. Como segunda opción, limitar la realización de experimentos para los meses donde no se ocasiona sombra en la segunda fila, siendo dichos meses entre mayo y agosto.

4.1.4 Modelos

Los prototipos, se diseñan con una estructura de madera con las dimensiones de la base de 1 x 1 m y altura máxima de 1.25 m, forrada de poliestireno expandido, en la parte superior con pendiente del 30% y salientes de 15 cm sobre la que van montadas las distintas cubiertas. La parte posterior de los prototipos podrá abrirse para facilitar el montaje de los sensores.

Los prototipos se montarán en dos filas, en una de las cuales estarán las cuatro cubiertas seleccionadas y cuyos datos servirán como línea base para las modificaciones a proponer. En la otra fila se montarán los prototipos con las cubiertas modificadas, asegurándose así que tanto los prototipos de línea base y las cubiertas propuestas se encuentren a las mismas condiciones ambientales y poder comparar los datos obtenidos.

4.2 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA CUBIERTA

4.2.1 Metodología

Para llevar a cabo la presente investigación, se construyeron ocho prototipos de cubierta y se instalaron en la azotea del edificio de laboratorios de Ingeniería de la UCA. Previamente, como se describe en el apartado 4.1, se realizaron y presentaron estudios de sombreado para garantizar que los edificios contiguos u otros obstáculos no causarían sombra sobre los prototipos.

Los sistemas constructivos utilizados son: lámina metálica troquelada, lámina de fibrocemento, lámina metálica ondulada y techo metálico auto-soportante. La selección de dichos sistemas constructivos se basó en criterios de representatividad local, potencial de mejora e interés del equipo investigador, como se describió anteriormente.

Cada prototipo consistió de una sección de 1.0 m x 1.0 m del sistema constructivo a analizar, montado sobre una estructura de madera, recubierta por aislamiento de poliestireno, a modo de reducir la transferencia de calor lateral y enfocar la observación en la transferencia de calor a través del sistema constructivo.

Para cada sistema constructivo analizado se construyeron dos prototipos, un prototipo de prueba y un prototipo de control. Tal como se realizó en estudios de antecedente, el prototipo de prueba será sometido posteriormente a modificaciones y mejoras, mientras que el prototipo de control (línea base) mantendrá sus condiciones y la comparación entre ambos permitirá conocer los efectos de la mejora implementada.

Con el objetivo de cuantificar la temperatura en distintos puntos del prototipo experimental se montaron termocuplas de contacto, instaladas en diversos puntos por debajo de la cubierta, en la cavidad de aire y paredes de cada prototipo. La figura 4.16 y 4.17 muestra los puntos de medición de temperatura para todas las cubiertas, así como el sistema de adquisición de datos utilizado para registrar las mediciones de temperatura.

Adicional a la medición de temperatura, se hicieron capturas termográficas puntuales desde el interior de los prototipos, a modo de detectar puentes térmicos o diferencias de temperaturas de interés.

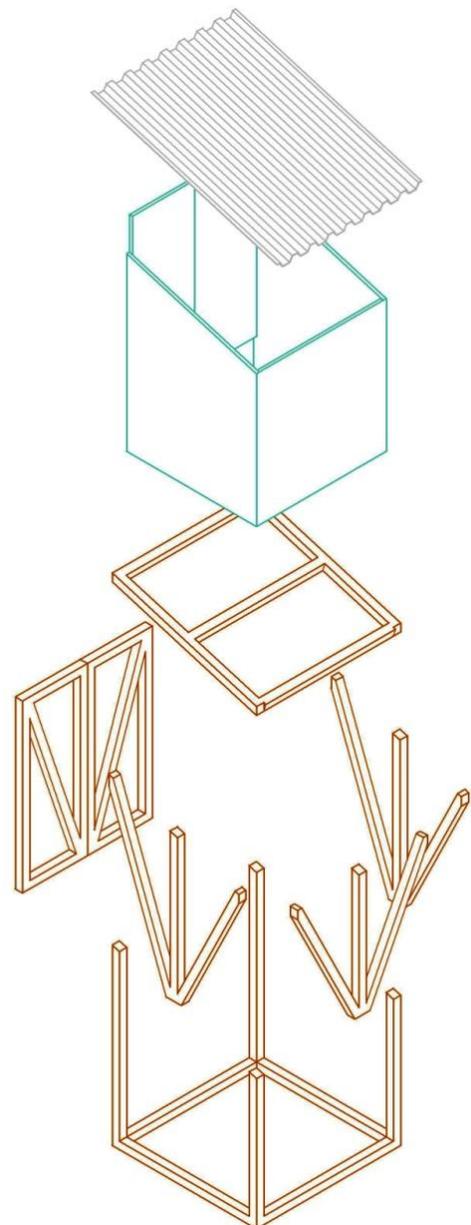
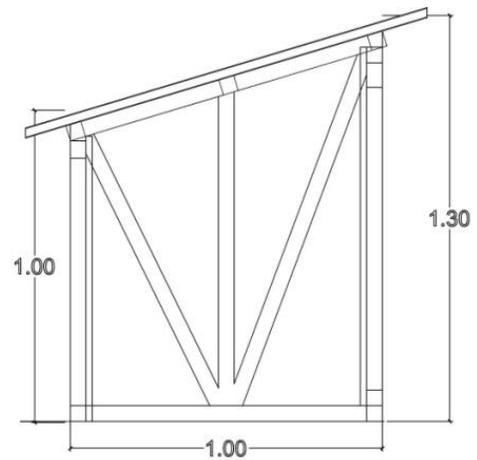


Figura 4.8 Sección e isométrico de componentes de la estructura del módulo de prueba. Fuente: Elaboración propia.

Como un primer paso en las mediciones, se procedió a someter a todos los prototipos de sistemas a un periodo de pruebas. Dicho periodo de pruebas permitiría, en primer lugar, calibrar las mediciones y garantizar que el comportamiento térmico de los prototipos de control coincida con el comportamiento de los prototipos de prueba sin modificaciones.

En segundo lugar, las mediciones preliminares permitieron comparar entre sí los sistemas constructivos seleccionados, a modo de comparar su desempeño térmico en condiciones reales.

A continuación se presentan vistas del montaje de los prototipos en el lugar de emplazamiento, la azotea del edificio de laboratorios de ingeniería "Jon de Cortina, S. J."

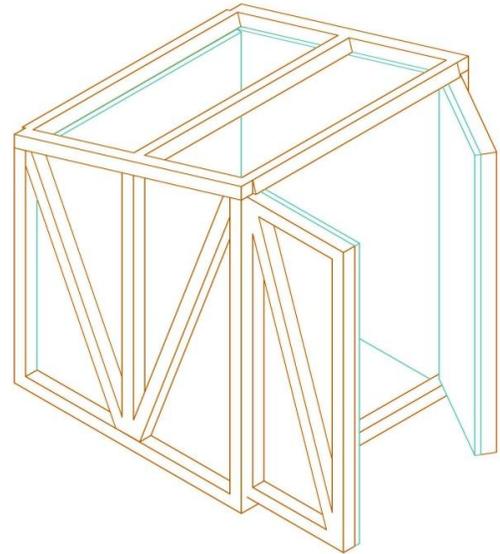


Figura 4.10 Sección e isométrico de componentes de la estructura forrada del módulo de prueba. Fuente: Elaboración propia.

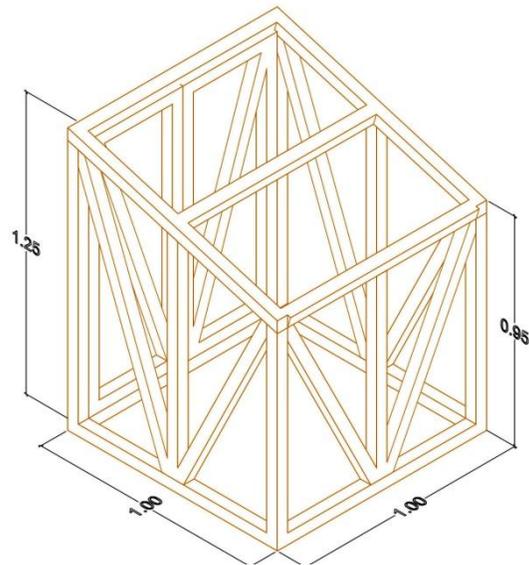
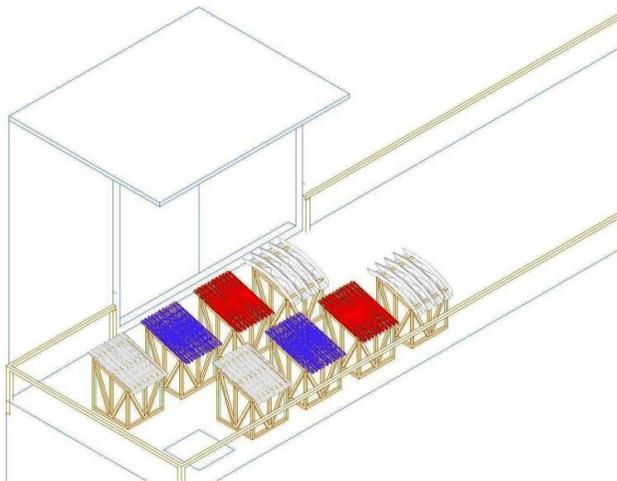


Figura 4.9 Sección e isométrico de componentes de la estructura del módulo de prueba. Fuente: Elaboración propia.

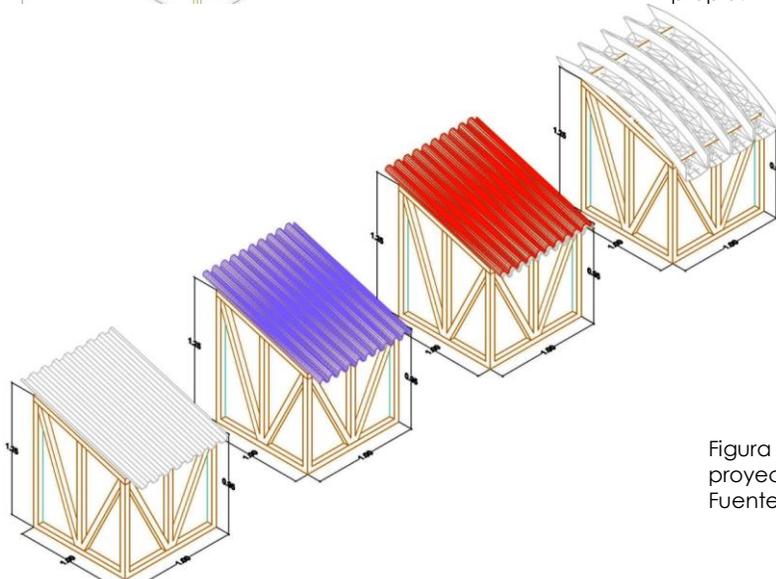


Figura 4.11 Módulos experimentales proyectados
Fuente: Elaboración propia

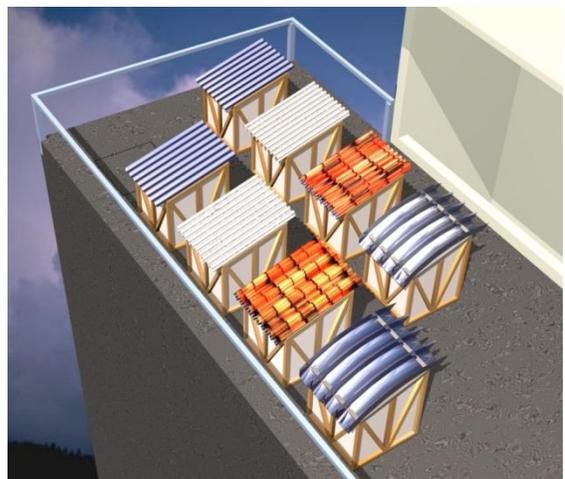
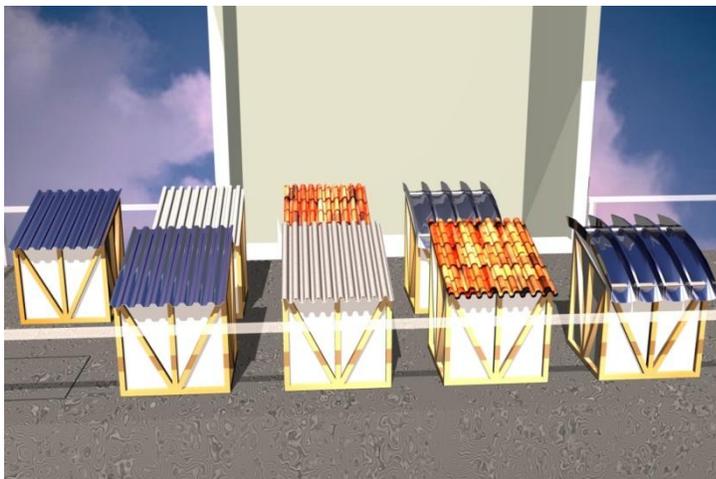
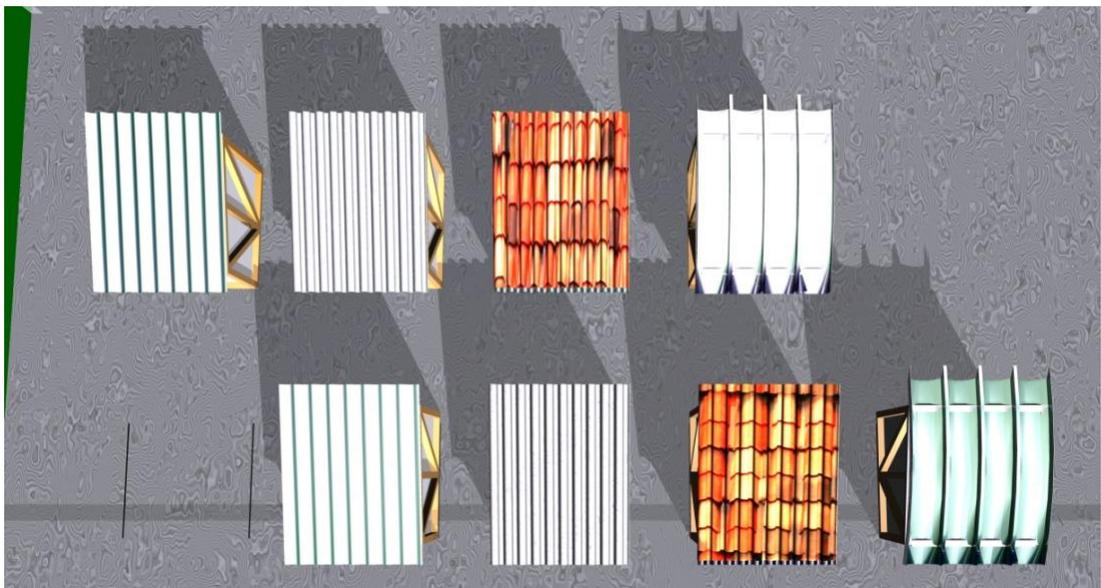
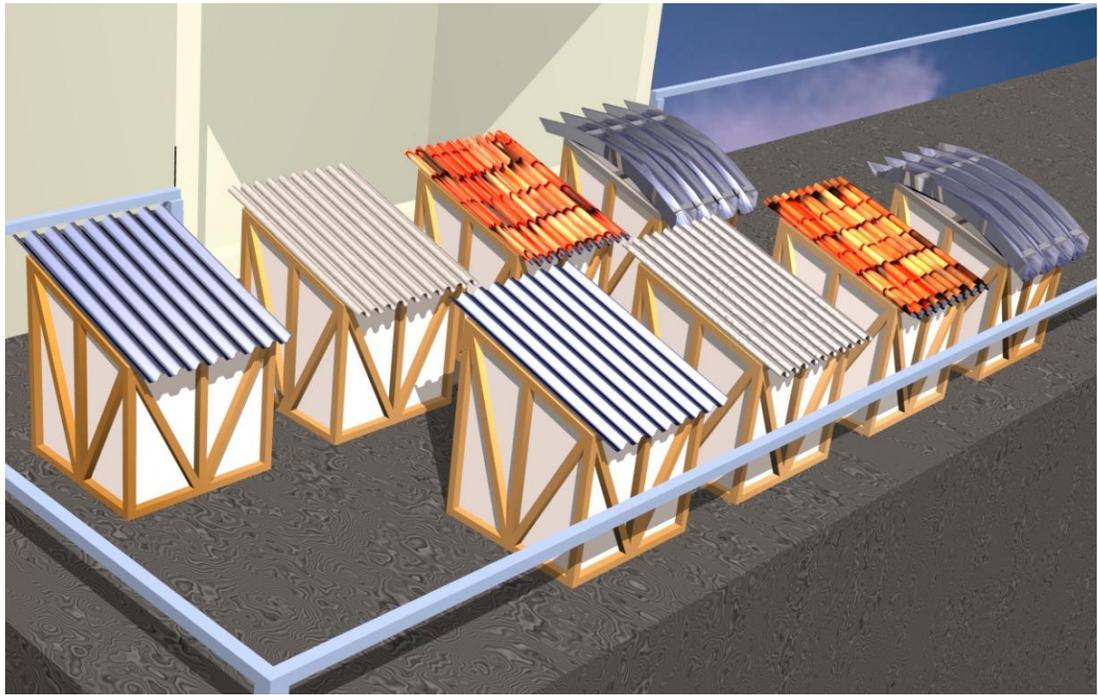


Figura 4.12 Disposición de las filas de los módulos de prueba o prototipos de línea base y los prototipos modificados simulados para (21 de diciembre). Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.13 Proceso constructivo y proceso de montaje de los módulos de prueba.
 Se han prefabricado los módulos en un taller considerando ensayar las cubiertas para verificar los apoyos secundarios.
 Los módulos fueron trasladados a la azotea del edificio de laboratorios de Ingeniería de la UCA.
 Ya fijos en la azotea del edificio, los módulos han sido forrados con poliestireno.

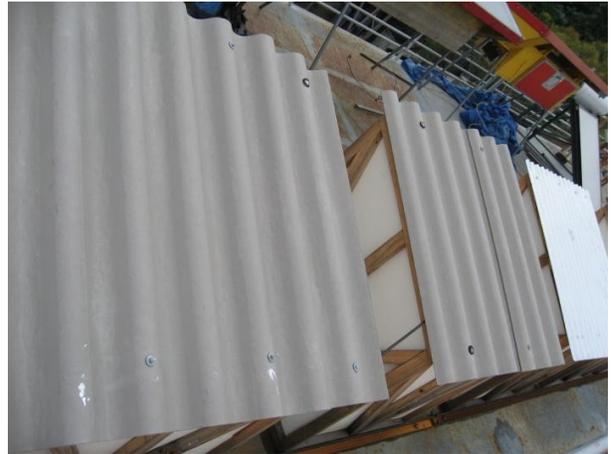


Figura 4.14 Montaje de cubiertas sobre módulos de prueba.

Figura 4.15 Vista de prototipos de cubierta con sistemas constructivos montados.

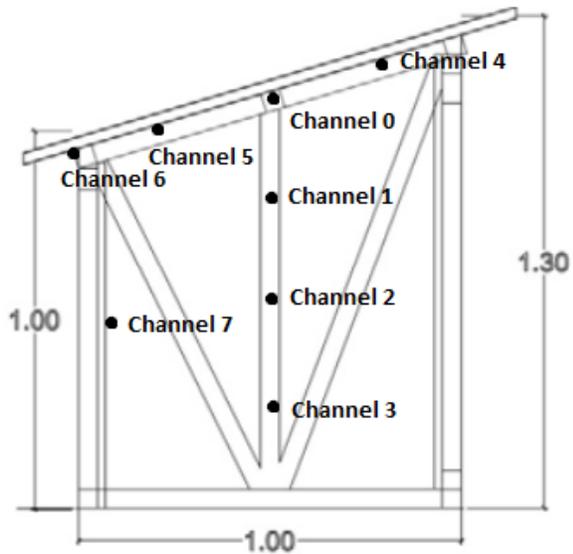


Figura 4.16 Ubicación de sensores de temperatura.



Figura 4.17 Montaje de equipos de medición.

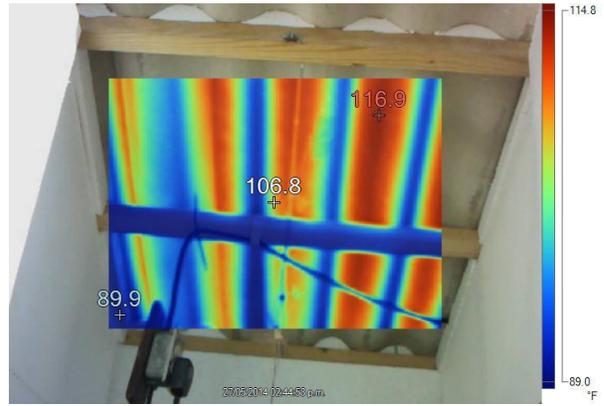


Figura 4.18 Imágenes termográficas lámina de fibrocemento. Temperatura promedio 106.8°F=41.5°C.

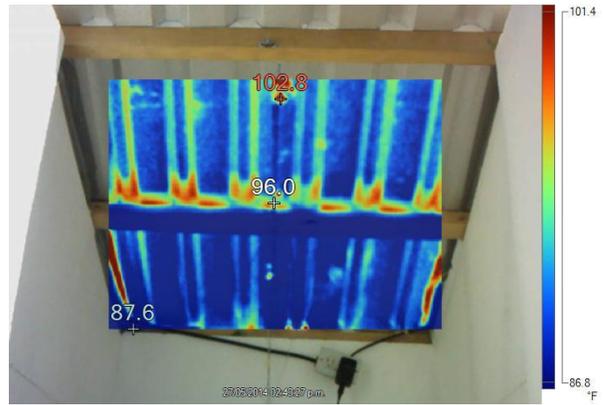


Figura 4.19 Imágenes termográficas lámina metálica troquelada. Temperatura promedio 96.0°F=35.5°C.

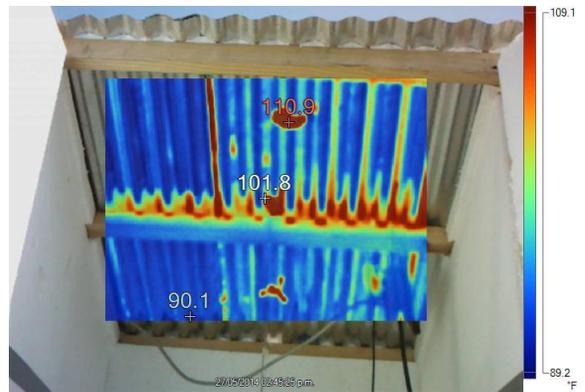


Figura 4.20 Imágenes termográficas lámina metálica acanalada. Temperatura promedio 101.8°F=38.7°C.

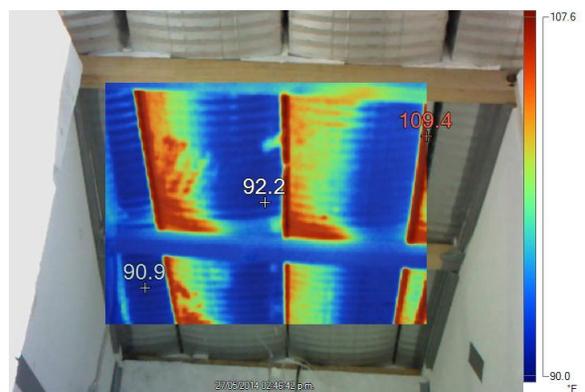


Figura 4.21 Imágenes termográficas lámina metálica auto-soportante. Temperatura promedio 92.2°F=33.4°C.

4.2.2 Resultados obtenidos de mediciones

Como primera actividad, se procedió a obtener mediciones de temperatura para los canales instalados en los prototipos. Se realizó la medición durante un periodo de cuatro semanas, a modo de analizar el desempeño térmico de cada sistema para cubierta y compararlos. Se hizo una validación entre los conjuntos de prototipo de prueba y de control para cada sistema constructivo, con el fin de verificar que ambos tuvieran mediciones similares. A manera de ilustración, se muestra en la figura 4.22 una comparación entre las mediciones en el día 19 de mayo de 2014 en el punto central de la lámina (canal 0) y el aire (canal 2), para el prototipo de prueba y el prototipo de control con el sistema constructivo de lámina metálica ondulada. Se hicieron similares comparaciones para todos los canales y todos los sistemas constructivos, haciendo los ajustes necesarios hasta obtener una equivalencia aceptable entre ellas. Dicha validación permite tener confianza de que ambos modelos están sujetos a las mismas condiciones de radiación solar, temperatura y que el montaje ha sido similar, permitiendo comparar las diferencias al implementar medidas en los sistemas.

Se seleccionó un día de mediciones para realizar una comparación entre el comportamiento térmico de todos los sistemas constructivos, la cual es mostrada en la figura 4.23.

Se graficaron dos temperaturas promedio, la temperatura promedio de la lámina, para lo cual se promedió para cada instante las lecturas de temperatura de los canales 0, 4 y 5 y la temperatura promedio del aire dentro de la cavidad, obtenida al promediar las lecturas de los canales 1, 2 y 3. Se buscó, además, obtener una idea de la correlación entre la temperatura de lámina y del volumen de aire con la radiación solar y velocidad del viento en cada caso.

En la figura 4.24 se presenta una comparación de la temperatura promedio del aire dentro de la cavidad del prototipo para todos los sistemas constructivos examinados. Se obtuvo, además, para cada uno de los sistemas constructivos, una comparación entre la temperatura promedio de lámina y la temperatura promedio del aire interior de los prototipos. En la figura 4.25 se presenta la temperatura promedio diaria de las temperaturas en todos los canales de medición para el prototipo de lámina metálica ondulada. En la figura 4.25 se presenta, además, la temperatura promedio diaria de medición para el prototipo de lámina metálica ondulada.

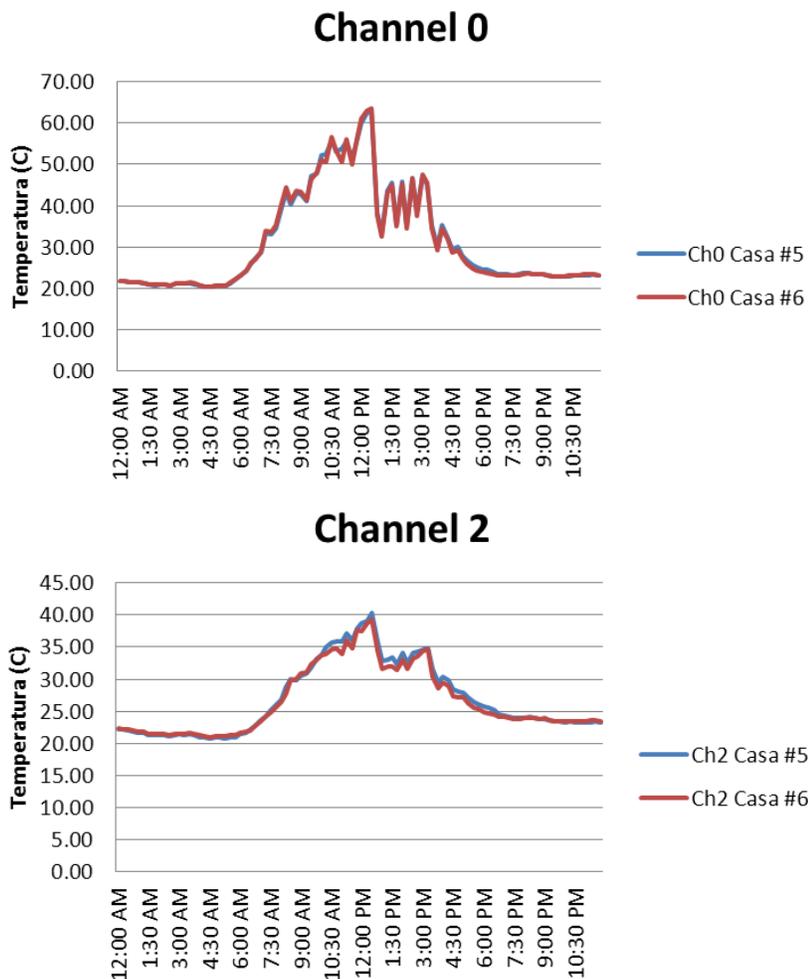


Figura 4.22 Comparación de temperatura de prototipo de prueba y de control para lámina metálica ondulada.

Fuente: Elaboración propia.

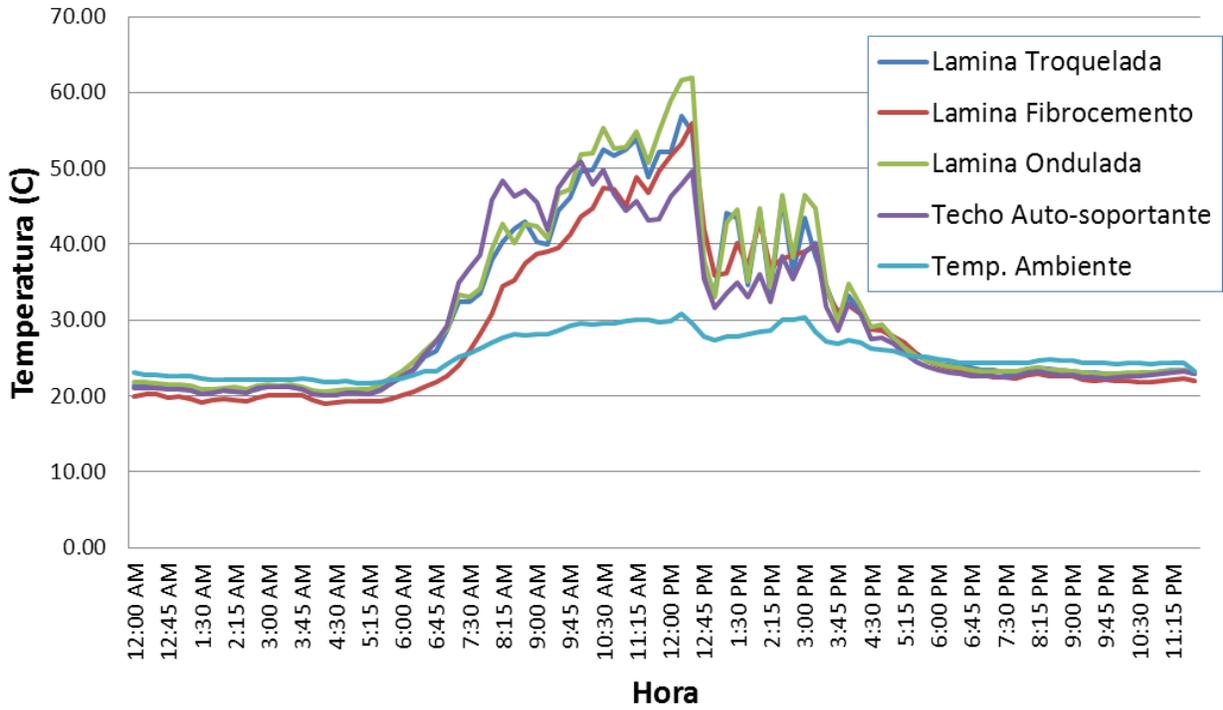


Figura 4.23 Comparación de temperatura promedio de lámina para todos los sistemas constructivos, sin modificaciones. Fuente: Elaboración propia.

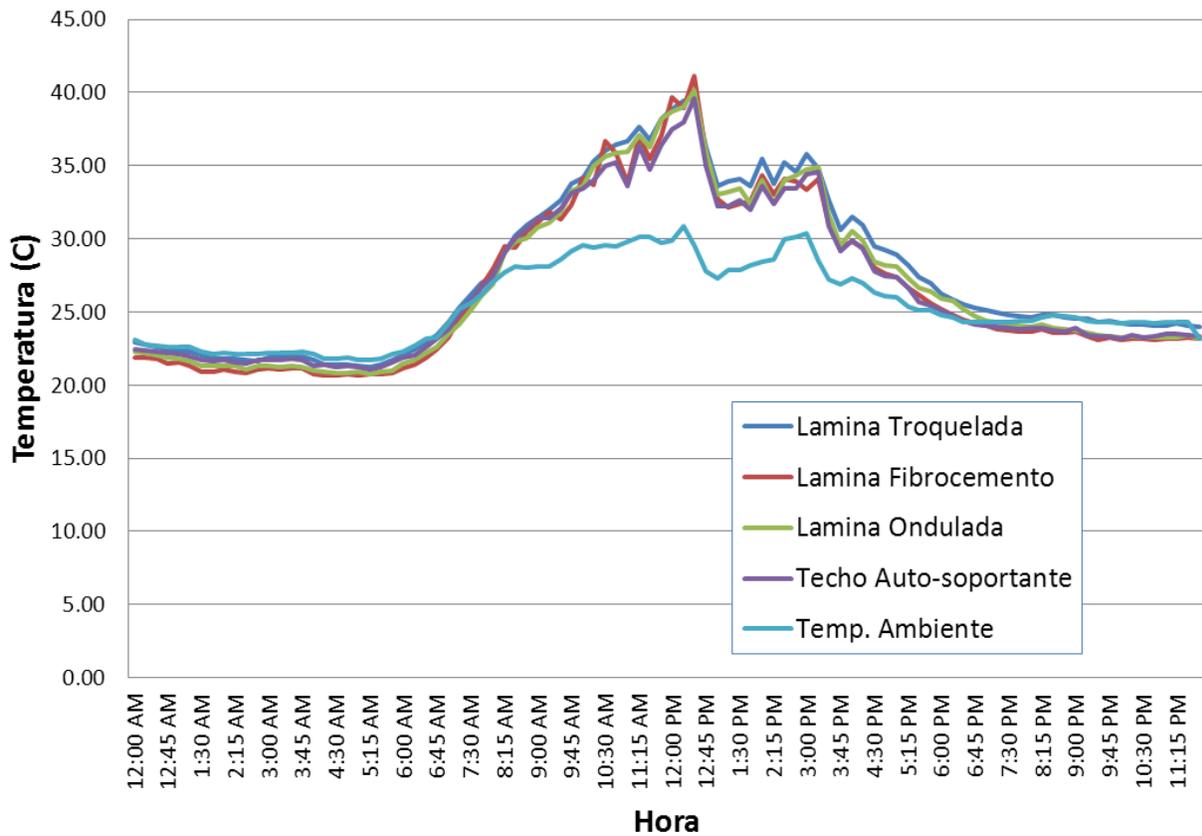


Figura 4.24 Comparación de temperatura promedio de aire en cavidad de prototipos, para todos los sistemas constructivos, sin modificaciones. Fuente: Elaboración propia.

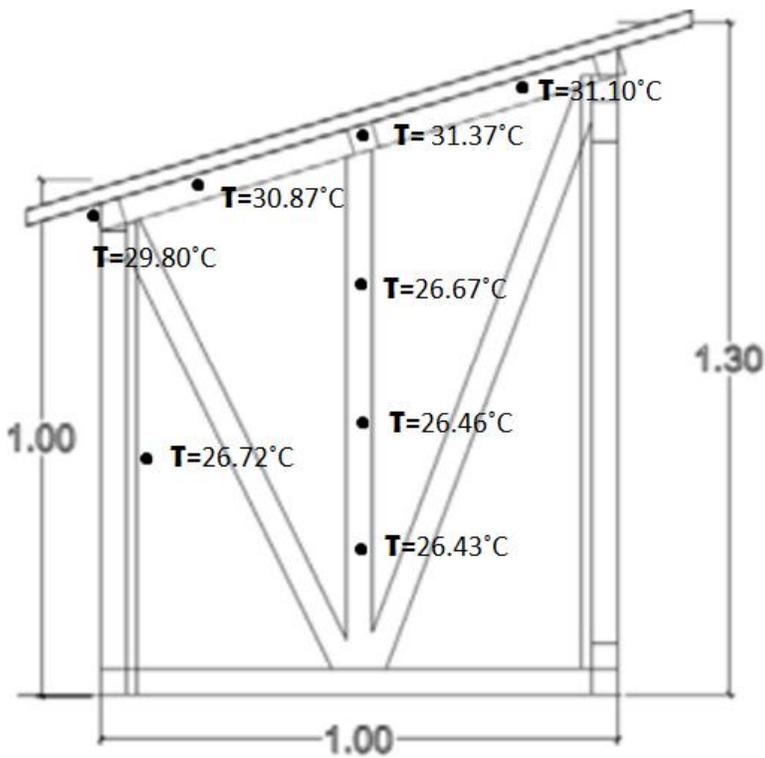
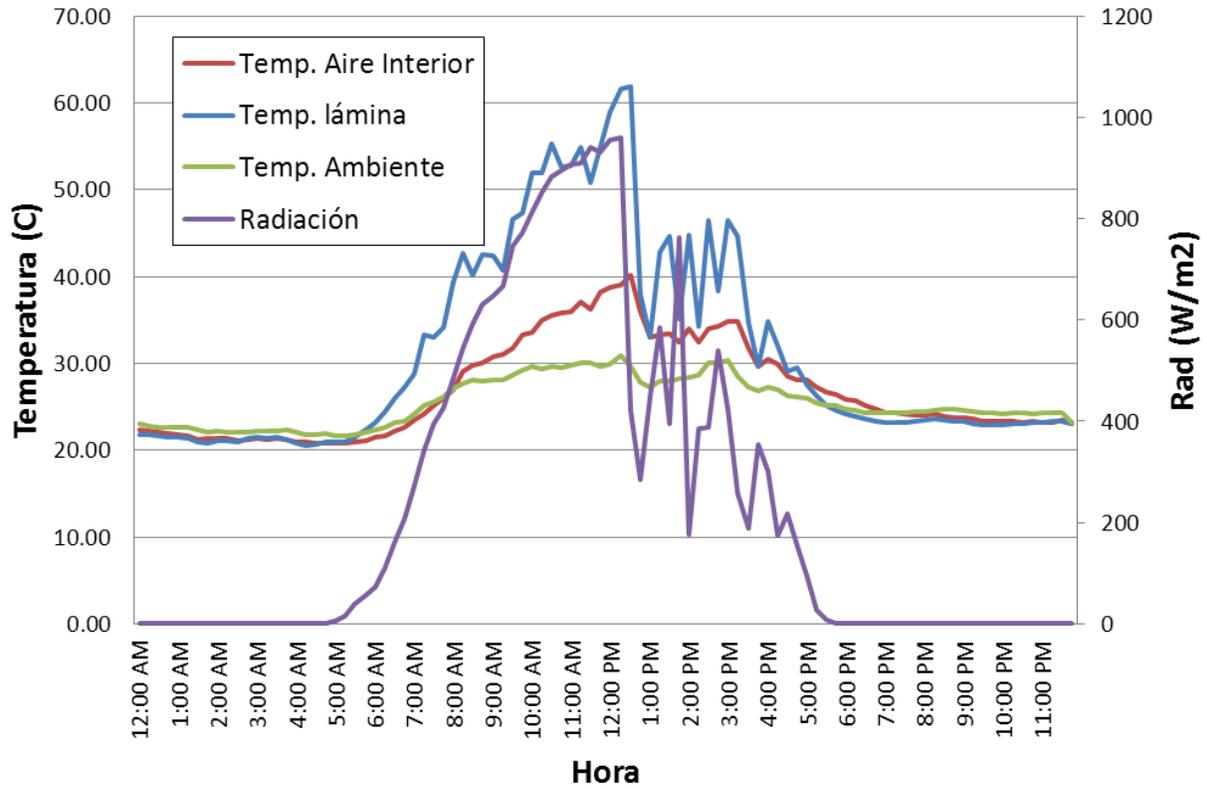


Figura 4.25 Para lámina metálica ondulada,
a) Comparación de temperatura promedio de lámina y temperatura promedio de aire interior.
b) Promedio diario para todos los canales.
Fuente: Elaboración propia

Se llevaron a cabo análisis estadísticos de la variación de las temperaturas de todos los sistemas constructivos, comparando los promedios y valores máximos y mínimos, así como las desviaciones estándar. Los resultados de dichas comparaciones son mostrados en las figuras 4.26 y 4.27.

N.	Sistema constructivo	Promedio	Mínimo	Máxima	Desv. Estándar
1	Lámina metálica troquelada	30.41	20.05	56.86	10.82
2	Lámina de fibrocemento	28.57	18.97	55.92	10.01
3	Lámina metálica ondulada	31.16	20.58	61.92	11.68
4	Lámina metálica auto-soportante	29.58	20.03	50.83	9.96

Tabla 4.1 Temperaturas en sistemas constructivos.

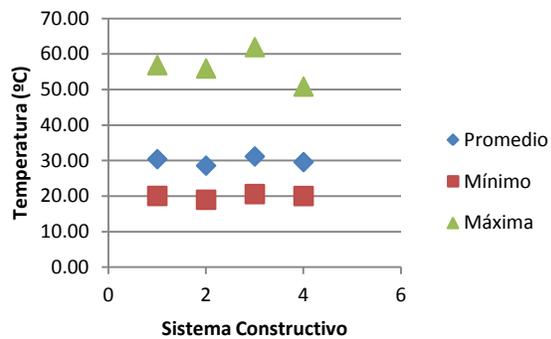


Figura 4.26 Resumen de valores de temperatura en °C para la temperatura promedio de la lámina de los sistemas constructivos analizados.
Fuente: Elaboración propia.

N.	Sistema constructivo	Promedio	Mínimo	Máxima	Desv. Estándar
1	Lámina metálica troquelada	27.56	21.24	39.68	5.50
2	Lámina de fibrocemento	26.64	20.65	41.13	5.56
3	Lámina metálica ondulada	26.89	20.77	40.17	5.54
4	Lámina metálica auto-soportante	26.74	21.05	39.63	5.14

Tabla 4.2 Temperaturas en sistemas constructivos.

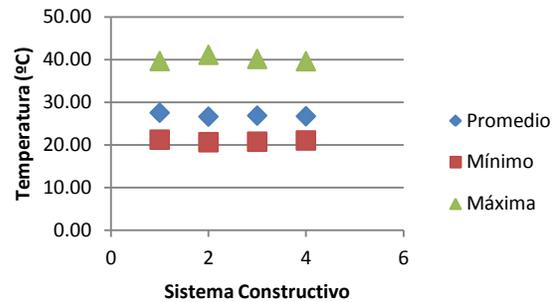


Figura 4.27. Resumen de valores de temperatura en °C para la temperatura promedio de la lámina de los sistemas constructivos analizados.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Discusión de Resultados

Los resultados de las mediciones para los sistemas constructivos muestran tendencias interesantes. Al analizar estadísticamente las temperaturas de la lámina para todos los prototipos, se observa que los sistemas constructivos analizados presentan comportamientos similares y sumamente correlacionados con la radiación solar incidente. La figura 4.26 y 4.27 muestra la temperatura promedio, máxima, mínima y desviación estándar de la temperatura promedio de la lámina para todos los sistemas constructivos analizados. Se pueden observar temperaturas promedio de alrededor de 30 °C, y temperaturas mínimas cercanas a los 20 °C. Donde se observa mayor variación es en la temperatura máxima. La lámina metálica ondulada alcanza temperaturas cercanas a los 62°C, mientras que la lámina metálica auto-soportante llega únicamente a los 50 °C. Dicha diferencia, de alrededor de 10 °C fue la más grande observada entre los sistemas constructivos. A pesar de ello, al analizar la temperatura promedio del aire interior en los prototipos, se observan comportamientos estadísticamente similares, con promedios alrededor de 27 °C, valores máximos cercanos a los 40 °C y valores mínimos de temperatura cercanos a los 20 °C. A pesar de tener valores de temperatura muy inferiores a las temperaturas de las correspondientes láminas, los valores máximos están muy alejados de la zona de confort.

Por lo tanto, ninguno de los sistemas constructivos analizados presenta condiciones aceptables para el confort humano en horas de radiación pico. Tal como se observa en la figura 4.28, la temperatura de la lámina ondulada, la menos favorable, presenta las mayores variaciones y se observan fluctuaciones muy marcadas, asociadas a las variaciones de radiación solar. La temperatura del aire interior, sin embargo, no sufre variaciones tan drásticas, en parte quizás por la masa térmica del prototipo, observándose además un efecto de retraso en alcanzar el pico, lo cual es de esperarse. De los sistemas constructivos analizados, la lámina auto-soportante y la lámina de fibrocemento presentan comportamiento levemente superior al resto.

La lámina de fibrocemento presenta la temperatura promedio de lámina y aire interior más bajas que el resto. Sin embargo, los valores máximos de temperatura de lámina y aire interior son más altos que los de la lámina auto-soportante, la cual presenta un comportamiento más estable en temperatura. Un fenómeno interesante es observado al analizar termografías de la lámina metálica ondulada y la lámina auto-soportante. Como se observa en la figura 4.29, para una medición puntual, existen variaciones de temperatura a lo largo de la lámina, observándose puntos más calientes, mejor conocidos como puentes térmicos.

Una oportunidad de mejora de los sistemas constructivos sería disminuir la presencia de puentes térmicos, pero más importante, reducir la ganancia de calor hacia la lámina, la cual impacta negativamente sobre la temperatura interior.

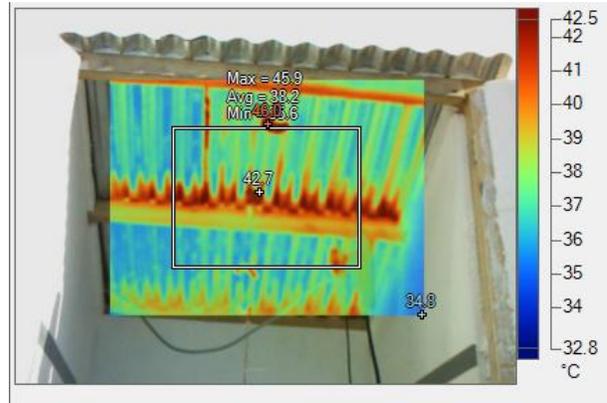


Figura 4.28 Termografía de superficie interior de prototipo de cubierta con lámina metálica ondulada.

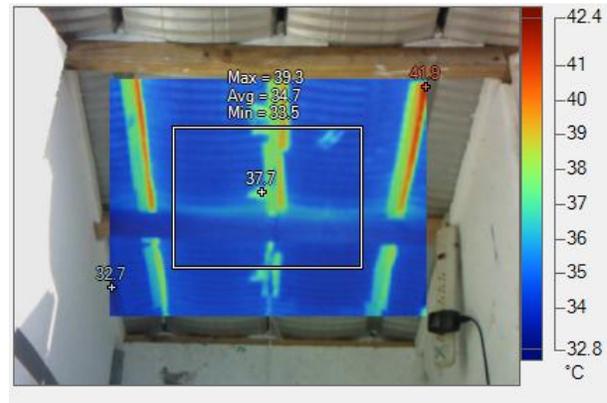


Figura 4.29 Termografía de superficie interior de cubierta con lámina auto-soportante.

La justificación de la utilización de aislamiento térmico se fundamenta con la observación de temperaturas de lámina y aire interior estadísticamente muy por encima de la temperatura ambiente. La diferencia de temperatura es más marcada en la temperatura de la lámina que en la temperatura del aire. Sin embargo, ambos valores son importantes, ya que temperaturas de lámina tan elevadas afectan negativamente el confort al elevar la temperatura radiante de los espacios. Se debe buscar formas de reducir la transferencia de calor por conducción y radiación a través del sistema constructivo, lo cual se reflejará en menores temperaturas de aire interior, mejorando el confort. Se observa que las elevadas temperaturas de la lámina son consecuencia además de propiedades reflectivas inadecuadas, tanto reflectancia como emitancia. La alta temperatura de la lámina, con el tiempo, emite radiación hacia dentro del espacio, por lo cual la temperatura interior es afectada de forma similar para todos los sistemas, con mayor o menor retraso.

Otro aspecto interesante, observado en la figura 4.24, es el hecho que durante la noche, la temperatura de todos los sistemas constructivos es ligeramente menor que la temperatura ambiente, lo cual podría justificar la utilización de materiales con mayor masa térmica en el sistema constructivo a modo de retardar el efecto de la radiación solar y pre enfriar el volumen de aire durante la noche.

4.2.4 Conclusiones y recomendaciones sobre línea base

Se han presentado los resultados de la comparación del comportamiento térmico de cuatro sistemas constructivos analizados para estudio.

Mediante mediciones en tiempo real en los prototipos a escala de dichos sistemas, se obtuvo la variación de temperatura en el tiempo para la temperatura promedio de la lámina y la temperatura promedio dentro del espacio de aire bajo cada prototipo de sistema constructivo.

Se constató en las mediciones que la temperatura de la lámina es sumamente variable y guarda una cercana correlación con la radiación solar instantánea. Se observaron valores promedio diarios alrededor de 30 °C para los diversos sistemas constructivos. La temperatura máxima de la lámina mostró mayor variación que el resto de parámetros, observándose una oscilación entre 50 °C y 62 °C, para los diversos sistemas constructivos. Las temperaturas promedio, mínima y máxima de la temperatura del aire interior de los prototipos mostraron mucha similitud para todos los sistemas constructivos analizados. Los valores promedio de la temperatura del aire bajo las cubiertas se encuentran fuera de los valores típicos de confort, alrededor de 27 °C y los valores máximos de dicha variable se encuentran muy por encima de valores aceptables, rondando los 40 °C.

Las temperaturas no son comparables a las esperadas en una edificación real. Sin embargo, la temperatura que se ha medido en el prototipo sí es un indicador de qué tanto contribuye el sistema constructivo de cubierta a que la condición térmica en un edificio real sea de confort o desconfort. En el diseño del experimento se intentó aislar las paredes y limitar la entrada de aire.

El supuesto es que, bajo las mismas condiciones de ocupación, clima, geometría, aquella edificación que tenga instalado un sistema constructivo que registre menores temperaturas en el experimento, tendrá una condición térmica más comfortable.

Por lo tanto, se concluye que ninguno de los sistemas constructivos analizados presenta comportamientos aceptables y se justifica la búsqueda de mejoras.

Existen ciertas diferencias entre el comportamiento de los sistemas constructivos analizados, siendo los de mejor comportamiento la lámina auto-soportante así como la lámina de fibrocemento, y la de peor comportamiento es la lámina metálica ondulada.

Las termografías tomadas a los sistemas constructivos muestran cierta uniformidad de temperaturas, aunque se observan ciertas zonas más calientes que otras, las cuales presentan áreas de oportunidad. Se recomienda, en base a los hallazgos, buscar medidas de mejora que reduzcan la temperatura promedio de la lámina, y la acerquen a valores que produzcan de forma indirecta menores temperaturas de aire.

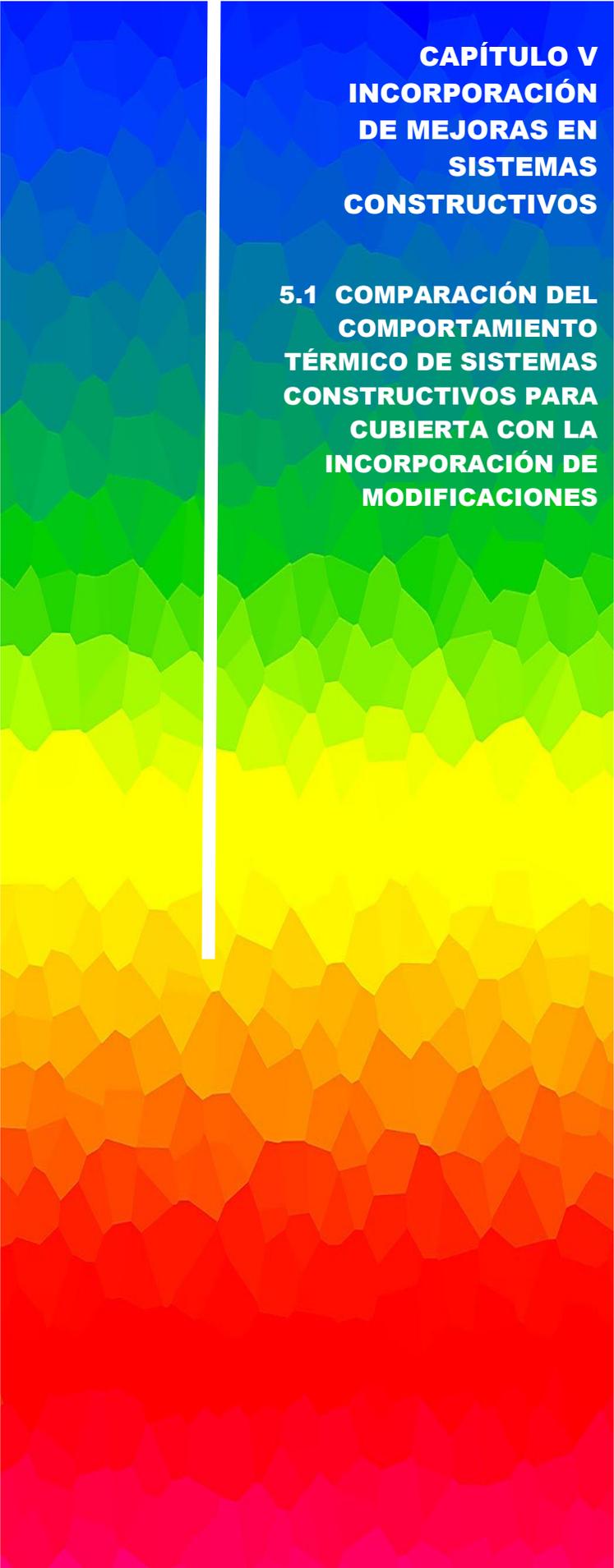
La utilización de aislamiento térmico y mejoras en las propiedades reflectivas de los sistemas de cubiertas son alternativas razonables a considerar por el equipo investigador.



CAPÍTULO

V

The graphic features a vertical rectangular bar on the left and a large, stylized letter 'V' on the right. Both elements are filled with a vibrant, multi-colored gradient that transitions from red at the bottom to blue at the top, passing through orange, yellow, and green. The text 'CAPÍTULO' is written vertically in white, bold, uppercase letters within the bar. The letter 'V' is also filled with the same gradient and has a white outline.



**CAPÍTULO V
INCORPORACIÓN
DE MEJORAS EN
SISTEMAS
CONSTRUCTIVOS**

**5.1 COMPARACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO
TÉRMICO DE SISTEMAS
CONSTRUCTIVOS PARA
CUBIERTA CON LA
INCORPORACIÓN DE
MODIFICACIONES**

CAPÍTULO V. INCORPORACIÓN DE MEJORAS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

5.1 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA CUBIERTA CON LA INCORPORACIÓN DE MODIFICACIONES

Se presentan los resultados de las mediciones realizadas en los prototipos de prueba de cubierta incluyendo modificaciones y mejoras. Se enfocará el análisis a la comparación entre el comportamiento térmico de los sistemas sin modificaciones y los sistemas con modificaciones.

5.1.1 Antecedentes

Se han analizado los resultados de comparaciones entre los cuatro tipos de sistemas constructivos utilizados frecuentemente en El Salvador: Lámina metálica troquelada, lámina de fibrocemento, lámina metálica ondulada y techo metálico auto-soportante. Las pruebas experimentales analizaron la temperatura promedio interna de la lámina y la temperatura promedio del volumen de aire contenido en los prototipos. En base a los resultados, se concluyó que existen ciertas diferencias entre el comportamiento de los sistemas constructivos analizados, siendo los de mejor comportamiento la lámina auto-soportante y la lámina de fibrocemento, y la de peor comportamiento, la lámina metálica ondulada. Existen mayores diferencias en temperaturas de lámina y en los valores máximo y mínimo observados.

El análisis fue apoyado con termografías, en base a las cuales se identificó que es fundamental reducir las ganancias de calor por conducción a través de los sistemas constructivos y eliminar puentes térmicos. Se recomendó, en base a los hallazgos, buscar medidas de mejora que reduzcan la temperatura promedio de la lámina, y la acerquen a valores que produzcan de forma indirecta temperaturas de aire menores. Asimismo, se recomendó la utilización de aislamiento térmico y mejoras en las propiedades reflectivas de los sistemas de cubiertas como alternativas razonables a considerar para las modificaciones.

5.1.2 Metodología

Para las pruebas se utilizó el arreglo experimental planteado previamente, consistente de ocho prototipos de cubierta instalados en la azotea del edificio de laboratorios. Partiendo de criterios basados en los hallazgos y recomendaciones de la caracterización de sistemas constructivos para cubierta existentes, se seleccionó un grupo de modificaciones a probar para cada tipología de sistema constructivo, las cuales son presentadas en las tablas 5.1 y 5.2.

La comparación es realizada entre un prototipo de sistema constructivo sin modificación y un prototipo con el mismo sistema constructivo con las mejoras o modificaciones implementadas.

El objetivo es hacer una comparación bajo iguales condiciones ambientales, de forma simultánea, midiendo el efecto de mejora a partir de la implementación de las modificaciones.

Cada medición fue realizada durante el transcurso de al menos una semana. Para la presentación de resultados, se han seleccionado días específicos en los cuales no existan distorsiones tales como excesiva nubosidad o distorsiones en las mediciones y que representen de mejor manera las condiciones típicas bajo las cuales están sometidos los sistemas. Es importante aclarar que las mediciones hechas en días distintos no son comparables, ya que las condiciones ambientales son diferentes y pueden no reflejar una comparación adecuada acerca del comportamiento térmico de los sistemas. Por lo tanto, no pueden generalizarse los valores absolutos de los hallazgos, ya que son válidos para ciertas condiciones ambientales encontradas.

Sin embargo, los resultados sí pueden mostrar tendencias que las simulaciones energéticas pueden estudiar para periodos de tiempo más prolongados.

Tipo de techo	Cambios realizados	Fecha representativa
Lámina metálica troquelada (1-2)	Modelo original	19-may-14
	Bloqueo de entradas de aire	06-jun-14
	Aplicación de pintura blanca	15-jun-14
	Aplicación de capa de celulosa	10-jul-14
	Inversión de lámina	15-jul-14
	Manta de fibra cerámica	08-ago-14
	Aplicación de espuma aislante	10-abr-15
Fibrocemento (3-4)	Modelo original	19-may-14
	Bloqueo de entradas de aire	06-jun-14
	Aplicación de pintura blanca	15-jun-14
	Aplicación de capa de celulosa	10-jul-14
	Inversión de lámina	15-jul-14
	Manta de fibra cerámica	08-ago-14
	Aplicación de espuma aislante	10-abr-15

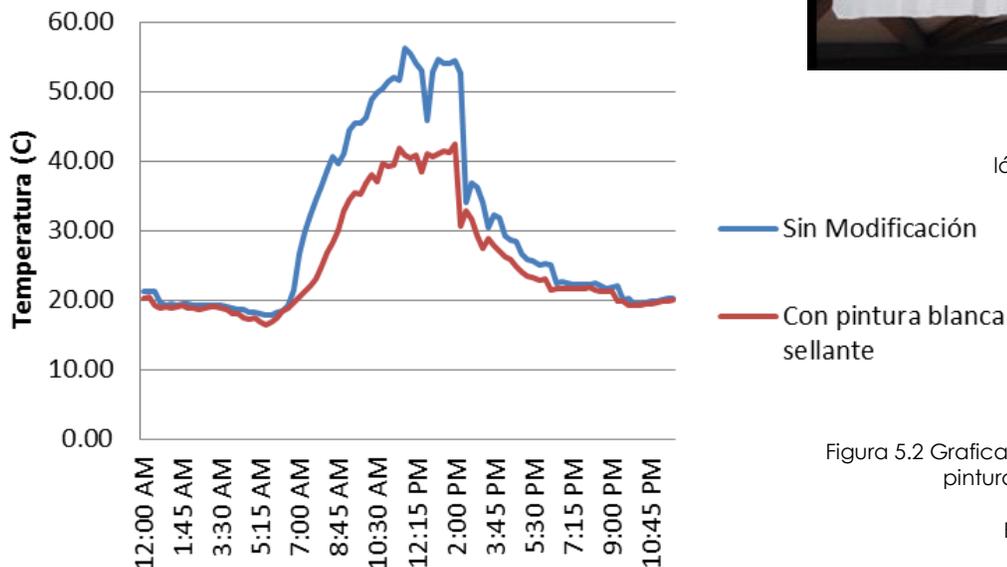
Tabla 5.1 Cambios realizados en lámina troquelada y fibrocemento.

Tipo de techo	Cambios realizados	Fecha representativa
Lámina galvanizada a ondulada (5-6)	Modelo original	19-may-14
	Bloqueo de entradas de aire	06-jun-14
	Instalación de tejas de arcilla	22-jun-14
	Manta de fibra cerámica	08-ago-14
	Aplicación de espuma aislante	12-abr-15
Auto-soportante (7-8)	Modelo original	13-may-14
	Bloqueo de entradas de aire	22-jun-14
	Aplicación de fibra de vidrio en aletas	10-jul-14
	Manta de fibra cerámica	08-ago-14
	Aplicación de pintura blanca	12-abr-15
	Aplicación de capa de celulosa	10-jul-14
	Inversión de lámina	15-jul-14
	Manta de fibra cerámica	08-ago-14
	Aplicación de espuma aislante	10-abr-15

Tabla 5.2 Cambios realizados en lámina ondulada y lámina auto-soportante.

5.1.3 Resultados

Los resultados obtenidos son presentados a continuación para las cinco modificaciones que mostraron mejor efectividad: pintura blanca sellante, teja, aislamiento de fibra cerámica, aislamiento de espuma aislante, mezcla de pintura blanca sellante y celulosa. Para cada modificación se presentan resultados obtenidos y hallazgos importantes en base a las mediciones realizadas en días típicos seleccionados.



5.1.4 Pintura blanca sellante

Al introducir una capa de pintura blanca sellante en la superficie exterior de los sistemas de cubierta, se incrementa la reflectancia solar del sistema, es decir, se refleja en mayor proporción la radiación térmica. Esto contribuye a reducir el calentamiento del sistema constructivo. La figura 5.1 ilustra la aplicación de pintura blanca sellante en lámina metálica troquelada. Tal como se observa en la figura 5.2, se obtiene una reducción significativa en el valor promedio de la temperatura de superficie de la lámina, de 29.92 °C a 25.39 °C, equivalente al 15%. Asimismo, se nota un decremento significativo en los valores pico de temperatura, de 55°C a 41°C, una reducción equivalente al 25%. Resultados similares fueron obtenidos para lámina de fibrocemento.

Las diferencias en temperatura se pueden visualizar claramente al presentar una comparación entre la termografía de un sistema constructivo sin pintura blanca sellante y un sistema constructivo con pintura blanca sellante. Esas diferencias son originadas por la reducción en temperatura debido a la mayor fracción de radiación térmica que es capaz de reflejar el sistema con la pintura blanca sellante.



Figura 5.1 Aplicación de pintura blanca sellante en lámina metálica troquelada.

Figura 5.2 Gráfica Efecto de la aplicación de pintura blanca sellante en lámina metálica troquelada.
Fuente: Elaboración propia.

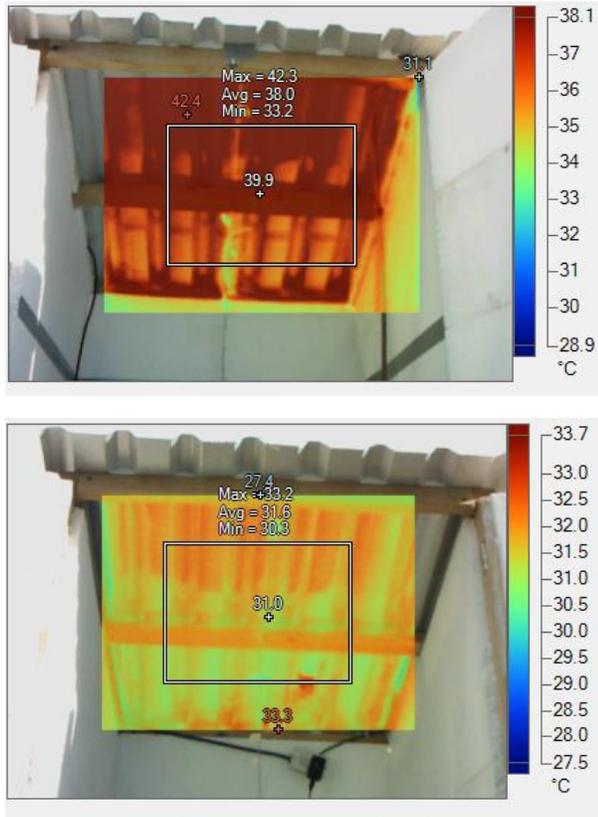
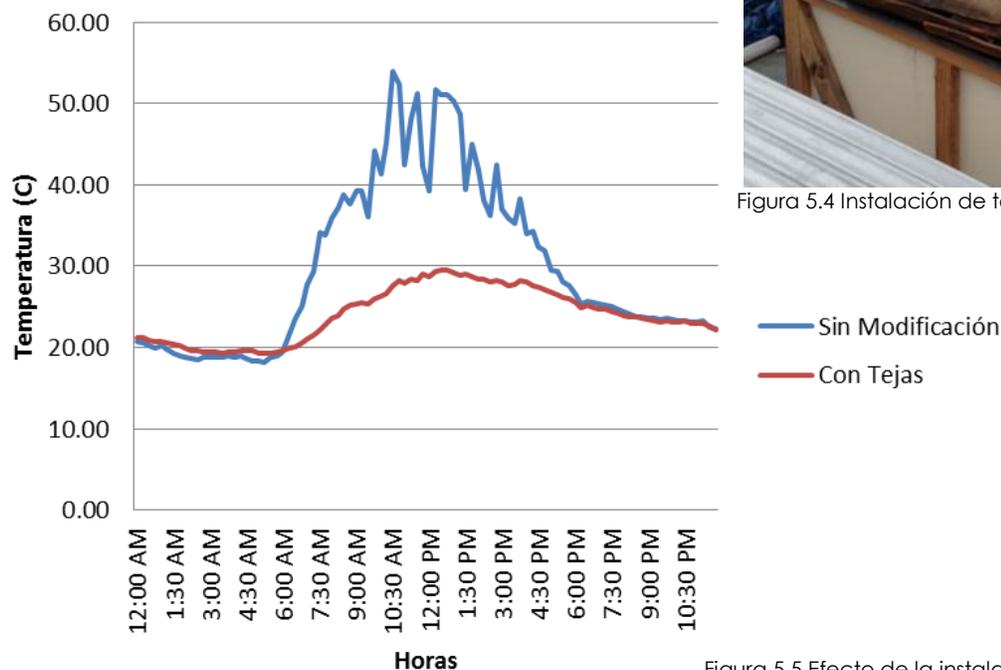


Figura 5.3 Comparación termográfica de lámina metálica troquelada sin pintura blanca sellante (arriba) y con pintura blanca sellante (abajo).



5.1.5 Tejas

Una de las mejoras evaluadas consistió en la instalación de tejas sobre el sistema de lámina metálica ondulada. Las tejas, al ser de arcilla, tienen dos buenas características: baja conductividad térmica y alta capacidad térmica. Esto significa que dificultan el paso del calor y es complicado ya sea calentarlas o enfriarlas. Dichas características contribuyen a reducir la ganancia de calor y a diferir dicha ganancia; en otras palabras, retrasan el efecto de incremento de temperatura. La figura 5.4 ilustra la instalación de teja en lámina metálica ondulada. Como se observa en la figura 5.5, la medición indicó un drástico decremento de la temperatura de lámina al aplicar esta modificación. La temperatura promedio de lámina disminuyó de 29.84°C a 24.07°C, equivalente a una reducción de 20%. Es de hacer notar que no únicamente se redujo la temperatura de forma significativa, sino también se minimizó la variación de temperatura, lo cual se puede entender al tomar en cuenta el efecto de la alta capacidad térmica de la teja. La reducción presentada en picos de temperatura fue de 55 °C a 30 °C, una reducción equivalente de 45.4%. Por tanto, el resultado de la instalación de teja es sumamente efectivo, reduciendo drásticamente la temperatura promedio de lámina, los valores extremos y uniformizando la temperatura.



Figura 5.4 Instalación de tejas sobre lámina metálica ondulada.

Figura 5.5 Efecto de la instalación de tejas sobre lámina metálica ondulada. Fuente: Elaboración propia.

5.1.6 Fibra cerámica

Al aplicar una pulgada de fibra cerámica por debajo de la superficie de los sistemas constructivos, se espera una notable reducción en la conducción de calor a través del sistema constructivo. Si bien la pintura blanca sellante es capaz de reducir la radiación solar absorbida por el sistema, el uso de aislamiento térmico será esencial para reducir las ganancias de calor una vez se haya minimizado la radiación absorbida. La fibra cerámica es una opción común de aislamiento térmico para sistemas constructivos, el objetivo del experimento era evaluar el nivel de mejora obtenido al implementarlo. La figura 5.6 muestra la aplicación de fibra cerámica en techo metálico auto-soportante. Se presenta el resultado de la aplicación de esta modificación en techo metálico ondulado y techo metálico auto-soportante. Para el caso del techo metálico auto-soportante, la figura 5.7 muestra el favorable impacto en temperatura de lámina, reduciéndose de 29.60°C a 24.44°C, equivalente a 17% de reducción. La reducción en los valores máximos fue 50°C a 36°C, equivalente a 28% de reducción.



Figura 5.6 Instalación de fibra cerámica en techo metálico auto-soportante.

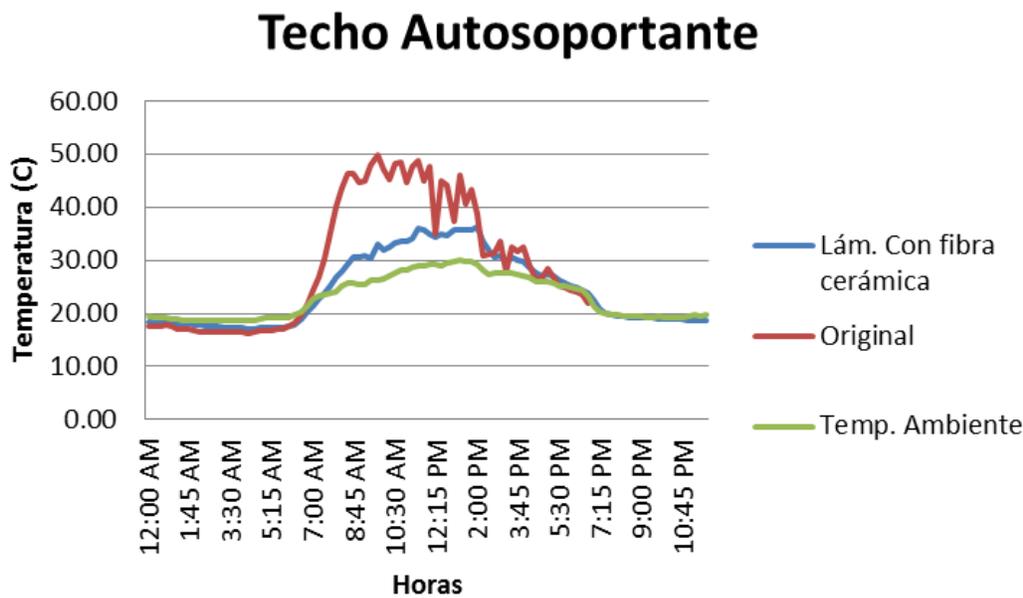


Figura 5.7 Efecto de fibra de lámina cerámica en techo metálico auto-soportante. Fuente: Elaboración propia

El efecto se replica en otros sistemas constructivos. Como se observa en la figura 5.8, para lámina metálica ondulada, la aplicación de este aislamiento térmico da como resultado una reducción de la temperatura promedio de 29.91°C a 24.44°C, equivalente a un 18% de reducción. La reducción en los valores máximos es de 53°C a 35°C, equivalentes a un decremento de 33.96 %.

De igual manera, puede observarse un cambio en el perfil de temperatura, obteniéndose un perfil más suavizado, sin las variaciones observadas en el techo sin el aislamiento térmico instalado.

Como puede notarse, el efecto de la instalación de aislamiento térmico de una pulgada de fibra cerámica en techos metálicos es sumamente beneficioso en su comportamiento térmico.

Al analizar detenidamente las mediciones e incluir la tasa de transferencia de calor, puede entenderse con claridad el beneficio.

La figura 5.9 presenta gráficamente la tasa de transferencia de calor a través del sistema metálico auto-soportante sin la modificación y con la modificación de fibra cerámica.

Del gráfico es claramente notable una minimización del flujo de calor al incorporar el aislamiento térmico. También puede visualizarse la temperatura del volumen de aire bajo los módulos, como un indicador de la temperatura a esperar.

Como muestra la figura 5.10, la temperatura del volumen del aire es inferior a la temperatura de la lámina. El valor alcanzado es teóricamente mayor que el esperado en una edificación de tamaño real, debido a que una edificación real presenta mayor tasa de cambios de aire y el efecto convectivo asociado a las alturas reales de las edificaciones.

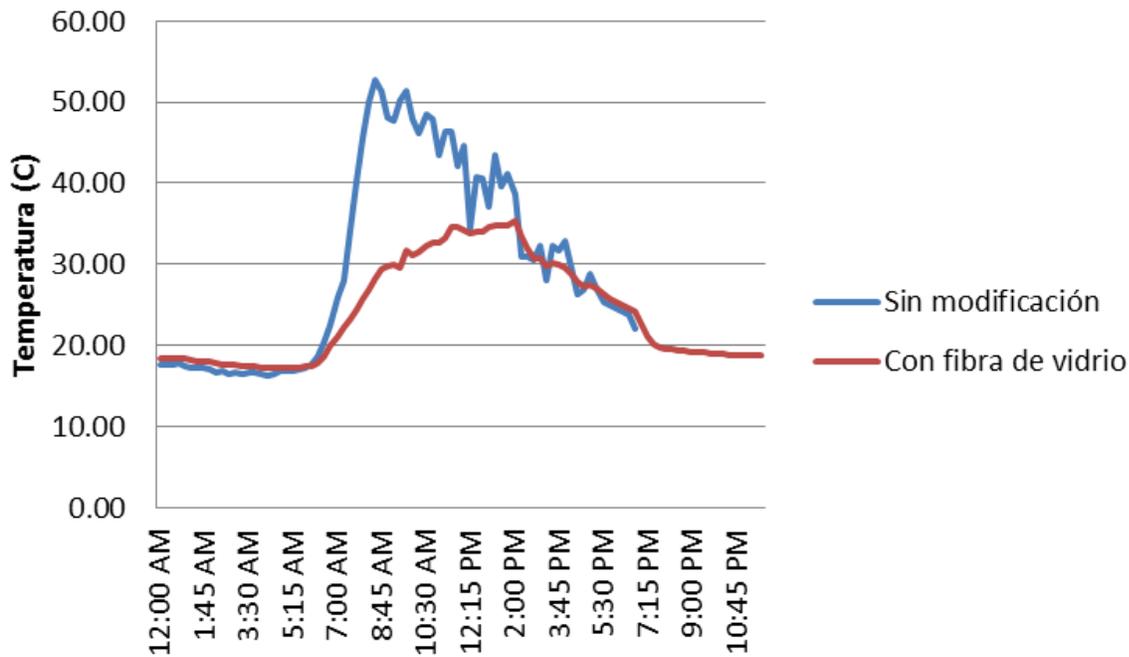


Figura 5.8 Efecto de fibra cerámica en techo metálico auto-soportante. Fuente: Elaboración propia

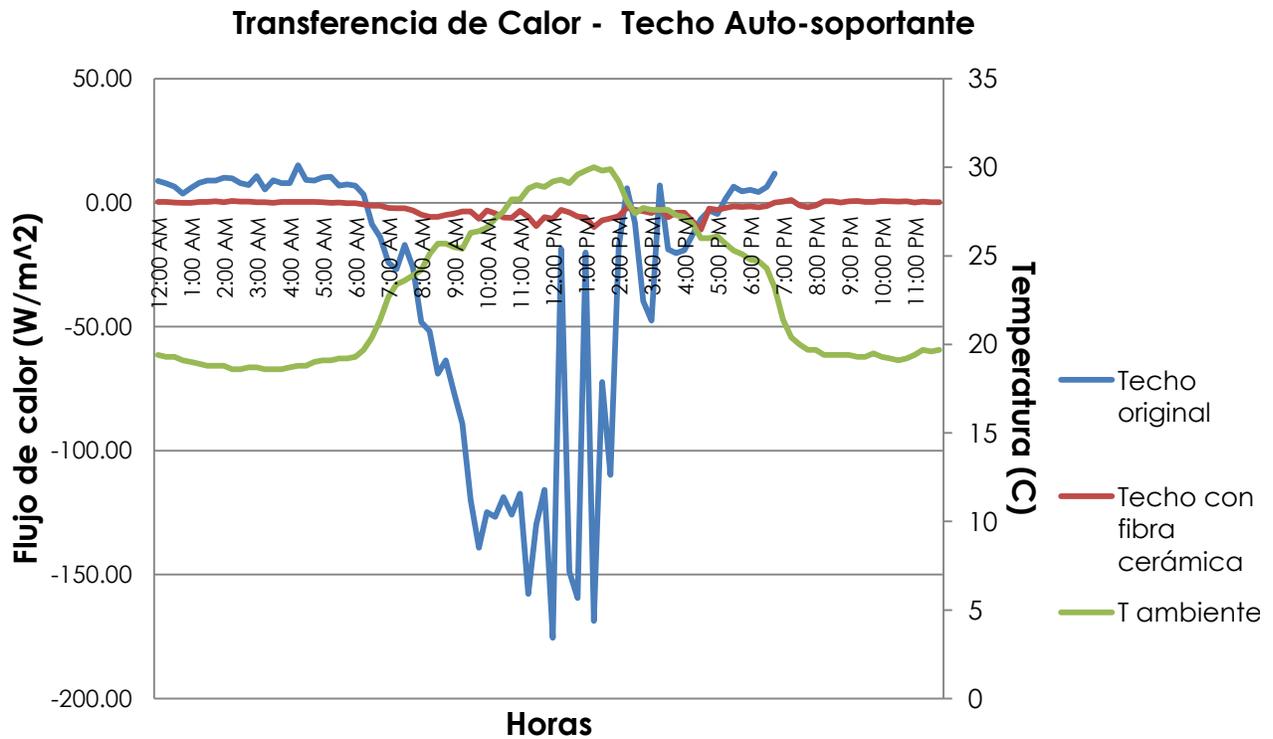


Figura 5.9 Efecto de la instalación de una pulgada de fibra cerámica en el flujo de calor y temperatura de techo de lámina auto-soportante. Fuente: Elaboración propia.

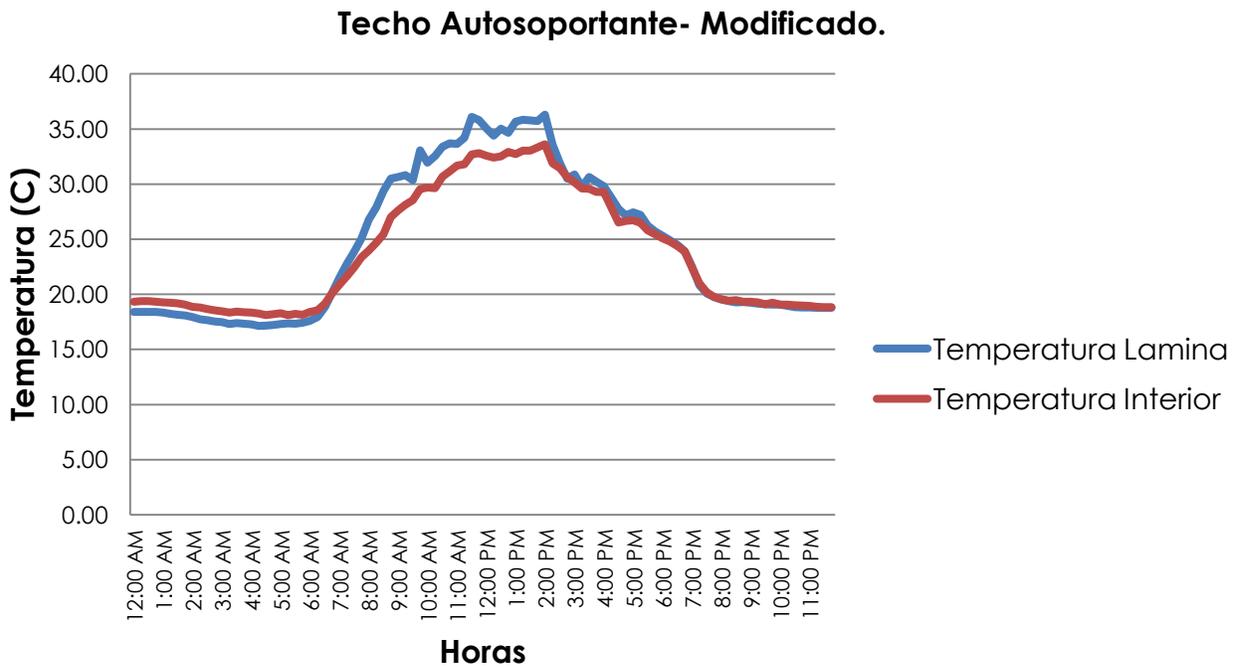


Figura 5.10 Efecto de la aplicación de fibra cerámica en techo metálico auto-soportante, temperatura de lámina versus temperatura interior. Fuente: Elaboración propia.

5.1.7 Espuma aislante

Se consideró, como otra alternativa de aislamiento, la aplicación de espuma aislante de poliuretano. Este aislamiento térmico presentó resultados menos favorables que la fibra cerámica, quizás debido a la mayor presencia de puentes térmicos, producto de su instalación.

La figura 5.11 muestra un sistema constructivo de lámina de fibrocemento con la aplicación de espuma aislante. En la figura 5.12 se muestra el efecto térmico de la aplicación de esta modificación en la lámina.

Se observó una reducción en temperatura promedio de 29.11°C a 26.70°C al hacer la modificación, equivalente a una reducción de 8.30%.

La reducción en valores máximos de temperatura fue de 51°C a 38°C, equivalente a un 25%. Por tanto, la espuma aislante presenta moderadas cualidades para reducir la temperatura promedio de lámina y buenas cualidades para reducir los picos de temperatura.



Figura 5.11 Aplicación de espuma aislante en techo de fibrocemento.

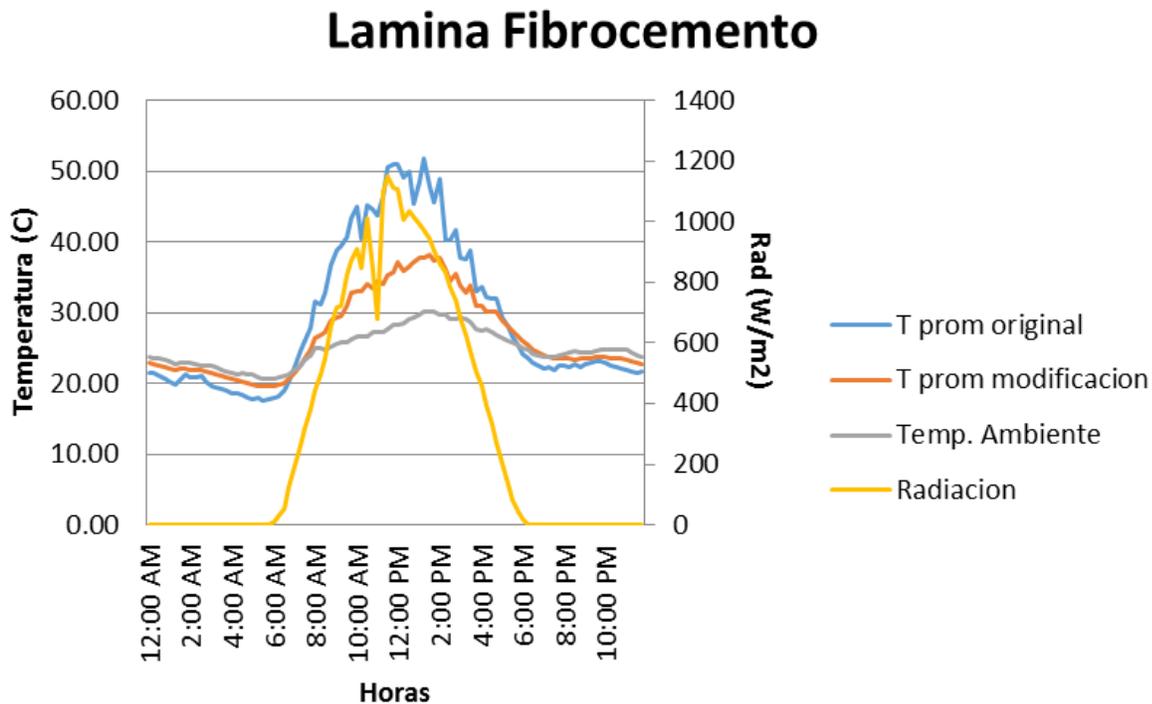


Figura 5.12 Efecto de la instalación de espuma aislante en techo de lámina de fibrocemento. Fuente: Elaboración propia.

5.1.8 Mezcla de pintura y celulosa

Otra modificación importante para mencionar consiste en la aplicación de una mezcla de pintura blanca sellante y celulosa. La celulosa utilizada es un desecho de la industria papelera.

El impacto esperado de esta mezcla es doble. Por un lado, reducir la absorción de radiación térmica y por el otro, mejorar la resistencia térmica del sistema constructivo al utilizar un material con buenas propiedades aislantes.

El resultado observado es mostrado en la figura 5.13. La reducción en la temperatura promedio de lámina fue entre 29.07°C y 26.56°C, equivalente a un 8.6%. La reducción en valores máximos fue entre 49°C y 40°C, equivalente a 18%.

Al ser una modificación que utiliza un material de desecho, el resultado presenta un interesante potencial para su aplicación.

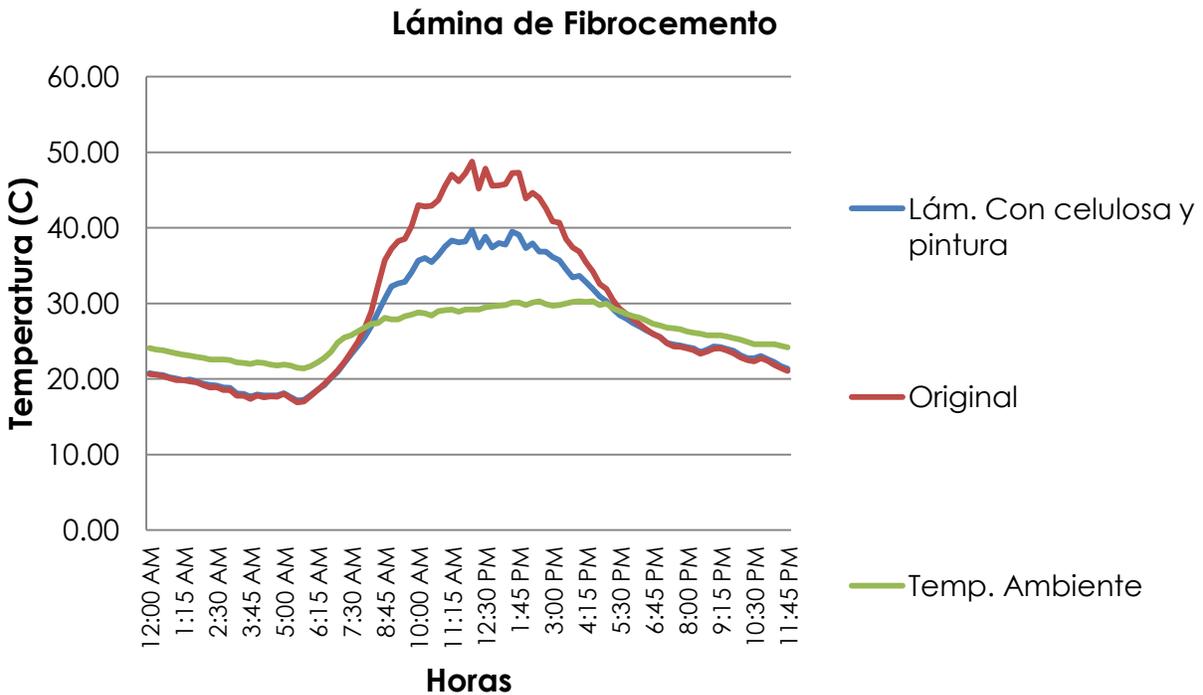


Figura 5.13 Efecto de la aplicación de una mezcla de pintura blanca y celulosa. Fuente: Elaboración propia

5.1.9 Discusión de resultados

La comparación del comportamiento térmico de los sistemas constructivos para cubierta investigados con la incorporación de mejoras ha brindado una cuantificación de los potenciales beneficios esperados al implementarlos.

Las cinco mejoras principales evaluadas son:

1. Pintura blanca sellante
2. Teja
3. Aislamiento de fibra cerámica
4. Espuma aislante
5. Mezcla de pintura y celulosa

Estas producen mejoras significativas en las temperaturas de lámina interior y volumen de aire medidas. La transferencia de calor a través de los sistemas es reducida y los valores extremos de temperatura son moderados. Todos esos beneficios, de ser implementados, facilitan mejores condiciones térmicas en edificaciones no acondicionadas y menores cargas térmicas en edificaciones acondicionadas, lo cual reduce el tamaño del sistema de aire acondicionado así como su consumo energético.

El diagnóstico previo indicaba que la radiación térmica y la conducción de calor eran los principales factores a mitigar en la búsqueda de la optimización de los sistemas constructivos. La aplicación de pintura blanca y mezcla de pintura y celulosa reducen la radiación térmica absorbida por el sistema.

La función de los aislamientos utilizados (fibra cerámica y espuma aislante) es la de reducir la conducción de calor.

Asimismo, la teja, tiene un efecto de retardo de cargas térmicas por su capacidad térmica elevada. Justamente la teja resultó ser la modificación más efectiva, propiciando drásticos decrementos de temperatura de lámina y minimización de picos de temperatura.

Entre los aislamientos térmicos, la fibra cerámica presentó los mejores resultados. La aplicación de pintura blanca para reducir la radiación térmica absorbida brindó resultados altamente favorables, con la ventaja adicional de requerir menor inversión que otras modificaciones.

5.1.10 Conclusiones y recomendaciones

Se han evaluado cinco modificaciones principales para los sistemas constructivos para cubierta en estudio: pintura blanca sellante, teja, aislamiento de fibra cerámica, espuma aislante y mezcla de pintura y celulosa. La aplicabilidad y efectividad de cada mejora difiere dependiendo de cada sistema.

En general, el aislamiento de fibra cerámica y la teja presentan los mayores potenciales de mejora, siendo también de interés el potencial de mejora por uso de pintura blanca sellante.

Al combinar mejoras, se pueden obtener resultados más favorables que los obtenidos de la aplicación individual de las modificaciones. Sin embargo, la suma de medidas no produce la suma de los beneficios, debido a las interacciones de transferencia de calor que ocurren. En otras palabras, al reducir la absorción de calor con pintura blanca aislante, se disminuye la reducción en conducción de calor obtenida por el uso de aislamiento de fibra cerámica.

Al combinar modificaciones, efectivamente se obtiene un mayor beneficio que al aplicar las medidas individualmente, pero no se suman los beneficios.

Como conclusión, para optimizar los sistemas constructivos de cubierta estudiados se requiere:

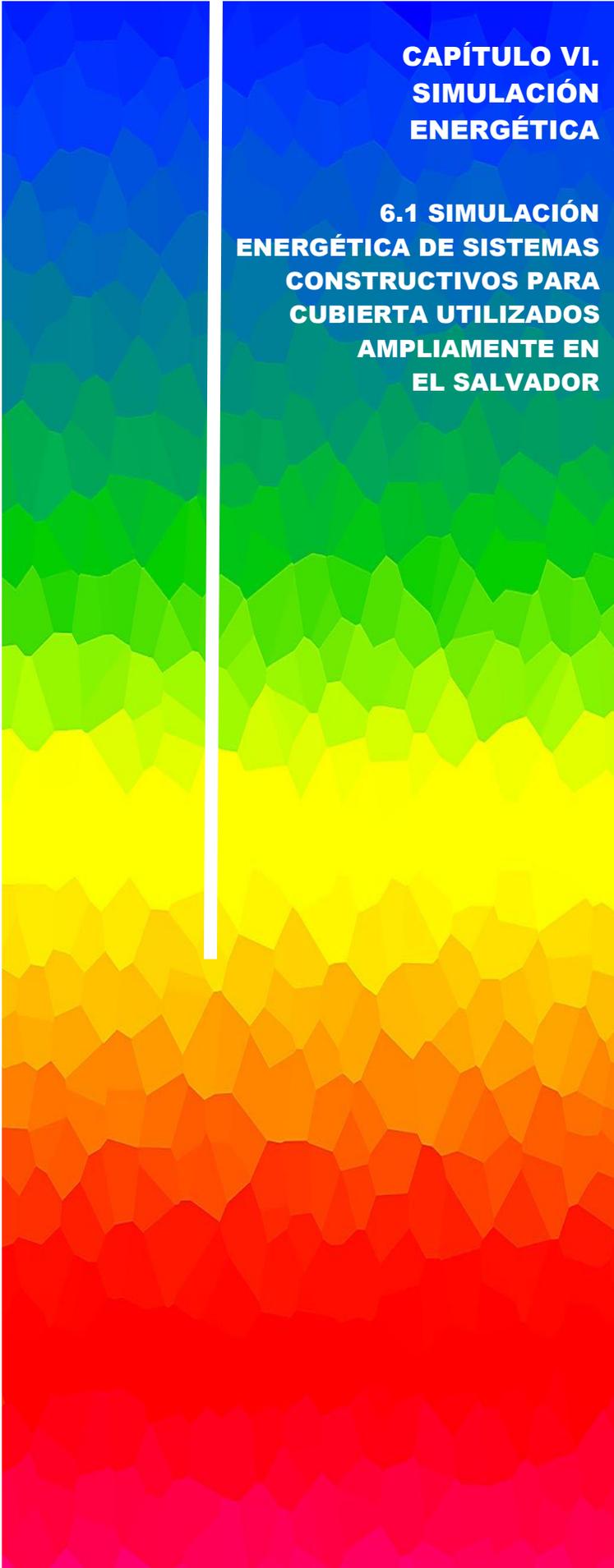
1. Optimizar las características de reflectancia solar de las cubiertas.
2. Incorporar aislamiento térmico cercano a la superficie exterior.
3. Incorporar materiales con buena capacidad térmica, con el objetivo de moderar los cambios de temperatura y las temperaturas extremas, así como producir un efecto de retardo de las ganancias de calor.



CAPÍTULO

1

The graphic features the word 'CAPÍTULO' in white, bold, uppercase letters, oriented vertically on the left side of a rectangular area. To the right of this area is a large, stylized number '1'. Both the text and the number are filled with a vibrant rainbow gradient that transitions from red at the bottom to blue at the top. The background of the entire graphic is a white, low-poly, crystalline texture.



CAPÍTULO VI. SIMULACIÓN ENERGÉTICA

6.1 SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA CUBIERTA UTILIZADOS AMPLIAMENTE EN EL SALVADOR

CAPÍTULO VI. SIMULACIÓN ENERGÉTICA

6.1 SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA CUBIERTA UTILIZADOS AMPLIAMENTE EN EL SALVADOR

Se muestra una comparación entre los resultados del comportamiento térmico de sistemas constructivos para cubierta seleccionados y el comportamiento previsto mediante simulaciones. Se enfocará este estudio a describir el modelo computacional utilizado y los resultados comparativos para los cuatro sistemas constructivos seleccionados para el análisis.

6.1.1 Antecedentes

Como se ha presentado anteriormente, se analizaron los resultados de comparaciones entre cuatro tipos de sistemas constructivos utilizados frecuentemente en El Salvador (lámina metálica troquelada, lámina de fibrocemento, lámina metálica ondulada y techo metálico auto-soportante) a través de pruebas experimentales para estudiar la temperatura promedio interna de la lámina y la temperatura promedio del volumen de aire contenido en prototipos diseñados para tal fin. En base a los resultados, se concluyó que existen ciertas diferencias entre el comportamiento de los sistemas constructivos analizados, siendo los de mejor comportamiento la lámina auto-soportante y la lámina de fibrocemento, y la de peor comportamiento es la lámina metálica ondulada. Existen además diferencias en temperaturas de la lámina y en los valores máximo y mínimo observados. El análisis fue apoyado con termografías, con las cuales se identificó que es fundamental reducir las ganancias de calor por conducción a través de los sistemas constructivos y eliminar puentes térmicos. Se recomendó, en base a los hallazgos, buscar medidas de mejora que reduzcan la temperatura promedio de la lámina, y la acerquen a valores que produzcan de forma indirecta temperaturas de aire menores. Asimismo, se recomendó la utilización de aislamiento térmico y mejoras en las propiedades reflectivas de los sistemas de cubiertas como alternativas razonables a considerar para las modificaciones.

Para todos los casos, las pruebas fueron realizadas bajo condiciones reales, exponiendo los prototipos a condiciones ambientales. Por tanto, las variables del experimento no fueron controladas, ya que fueron afectados por variables rutinariamente cambiantes, tales como temperatura, radiación solar, velocidad de viento. Como una vía para extrapolar los resultados observados en los días del experimento a otras condiciones, se recurre a la utilización de metodologías de simulación térmica.

Los sistemas constructivos analizados tienen características propias de construcciones livianas, sin aislamiento térmico, usualmente no encontradas en otros países. Dado el clima cálido tropical del sitio de prueba, el resultado de las simulaciones contra los experimentos permitirá aportar nuevo conocimiento acerca de la pertinencia de la utilización de metodologías de simulación para dichos sistemas en las condiciones climáticas específicas del lugar.

6.1.2 Metodología

El objetivo del análisis consiste en utilizar herramientas de simulación térmica para modelar el comportamiento de sistemas constructivos para cubierta y comparar los resultados simulados con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. La modelación es realizada utilizando el programa de simulación energética EnergyPlus, con la ayuda de la interfaz comercial *Designbuilder*, la cual es utilizada para introducir la información de geometría y sistemas constructivos.

Se modeló un módulo de pruebas con las dimensiones utilizadas en el arreglo experimental. Se utilizó una base de datos de tipo año meteorológico típico (TMY, por sus siglas en inglés), para la ubicación de San Salvador/Ilopango, la cual representa las condiciones climáticas típicas de la zona geográfica donde se realizó el experimento. La base de datos TMY cuenta con detallada información climática horaria para la ubicación dada, por lo cual es posible modelar el comportamiento térmico del prototipo para el mismo día correspondiente al análisis. Para hacer coincidir las simulaciones con las pruebas, se seleccionó, en base a criterios de reproducibilidad y confiabilidad de datos de medición, el día 19 de mayo, fecha en la cual se llevó a cabo la comparación entre resultados experimentales y simulaciones de los sistemas constructivos.

La geometría corresponde a las medidas del prototipo real y es mostrada en la figura 6.1. Para la definición de materiales, se utilizaron las siguientes especificaciones: Las paredes del prototipo fueron modeladas como poliestireno expandido (EPS) de 2.54 cm, con un factor U equivalente de 1.385 W/m²K. El acabado exterior fue especificado como madera.

La lámina metálica ondulada fue modelada como acero de 1 milímetro de espesor, con un factor U de 7.142 W/m²K, una absorptancia solar de 0.4 y emisividad de 0.25.

La lámina metálica troquelada fue modelada como acero galvanizado de 0.5 mm de espesor y un factor U de 7.142 W/m²K, una absorptancia solar de 0.4 y emisividad de 0.25.

La lámina de fibrocemento fue modelada como un material creado por el usuario, basado en una densidad de 2,000 kg/m³, 900 J/kgK y conductividad térmica de 0.36 W/mK. Esto produce un factor U de 6.272 W/m²K.

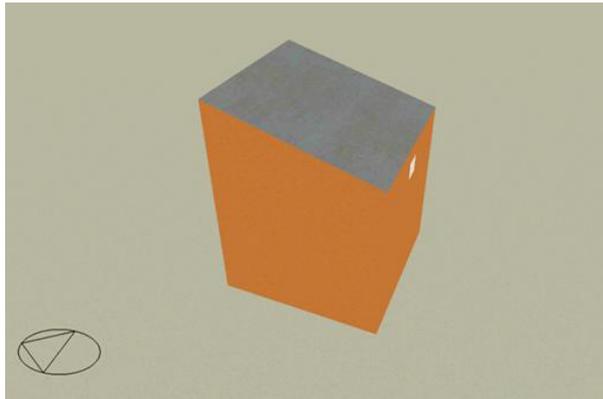


Figura 6.1 Modelo tridimensional de prototipo de pruebas utilizado para la simulación.

La lámina metálica auto-soportante fue modelada como acero, con un espesor de 0.70 mm y un factor U de 7.142 W/m²K. Se modelaron pequeños huecos de aire en la superficie norte y sur del prototipo para tomar en consideración las infiltraciones de aire que en la práctica experimenta el prototipo.

6.1.3 Resultados

A continuación se presentan los resultados de las comparaciones entre los resultados obtenidos de las simulaciones y las mediciones realizadas para cada sistema constructivo. Se utilizaron dos variables para la comparación: La temperatura de superficie interior y la temperatura de la cavidad de aire dentro del prototipo.

6.1.4 Lámina metálica ondulada

Para la lámina ondulada, la figura 6.2 presenta la comparación entre los valores simulado y medido de la temperatura interior de lámina. El error promedio obtenido es de 1.91% y el coeficiente de correlación es igual a 0.956.

La comparación entre la temperatura de aire simulada y medida es mostrada en la figura 6.3, resultando en un 2.75% y el coeficiente de correlación es igual a 0.954. En ambos casos, la correlación es aceptable.

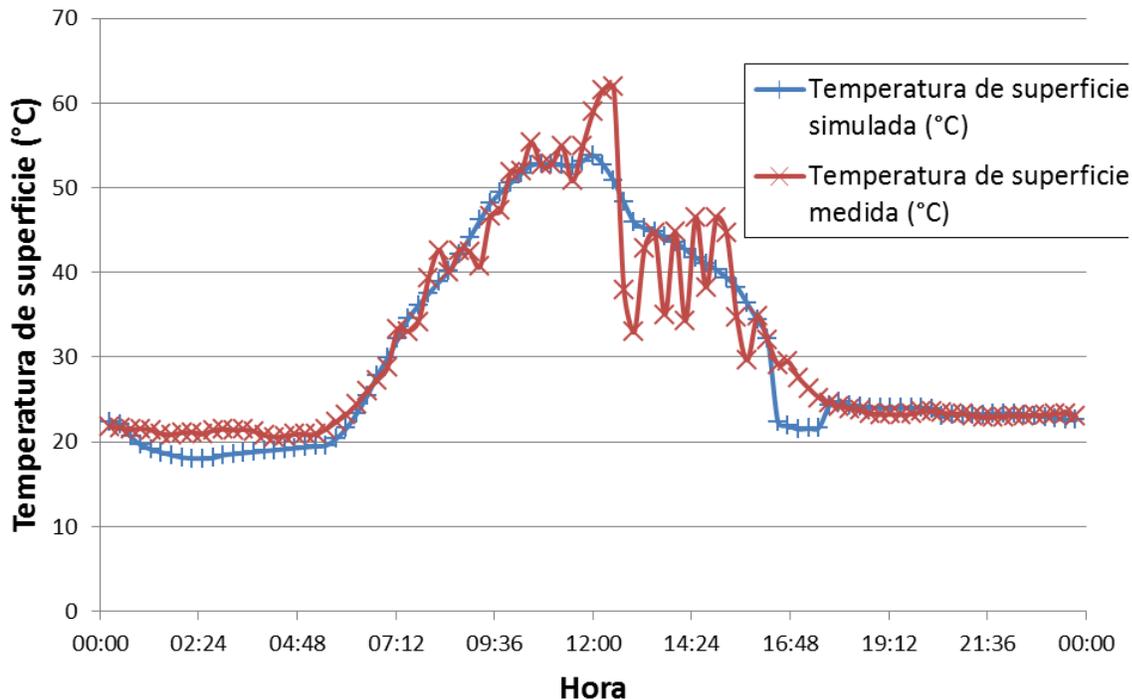


Figura 6.2 Comparación de temperatura de superficie de lámina simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

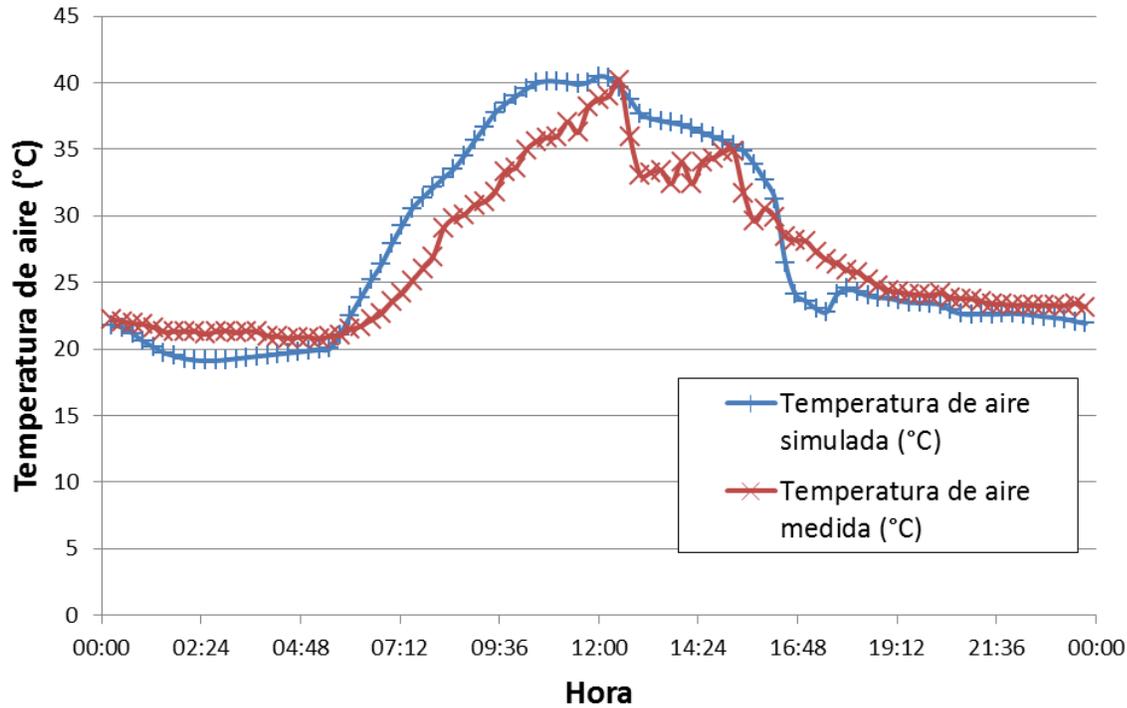


Figura 6.3 Comparación de temperatura de aire simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

6.1.5 Lámina metálica troquelada

En las figuras 6.4 se muestran los resultados de la simulación para la temperatura interior de superficie de lámina metálica troquelada. El error promedio obtenido para temperatura de lámina es de 8.40% con un coeficiente de correlación igual a 0.965.

La temperatura de la cavidad de aire simulada contra medida se muestra en la figura 6.5, para la cual se registra un error promedio entre la simulación y la medición de 3.22% y un coeficiente de correlación de 0.954.

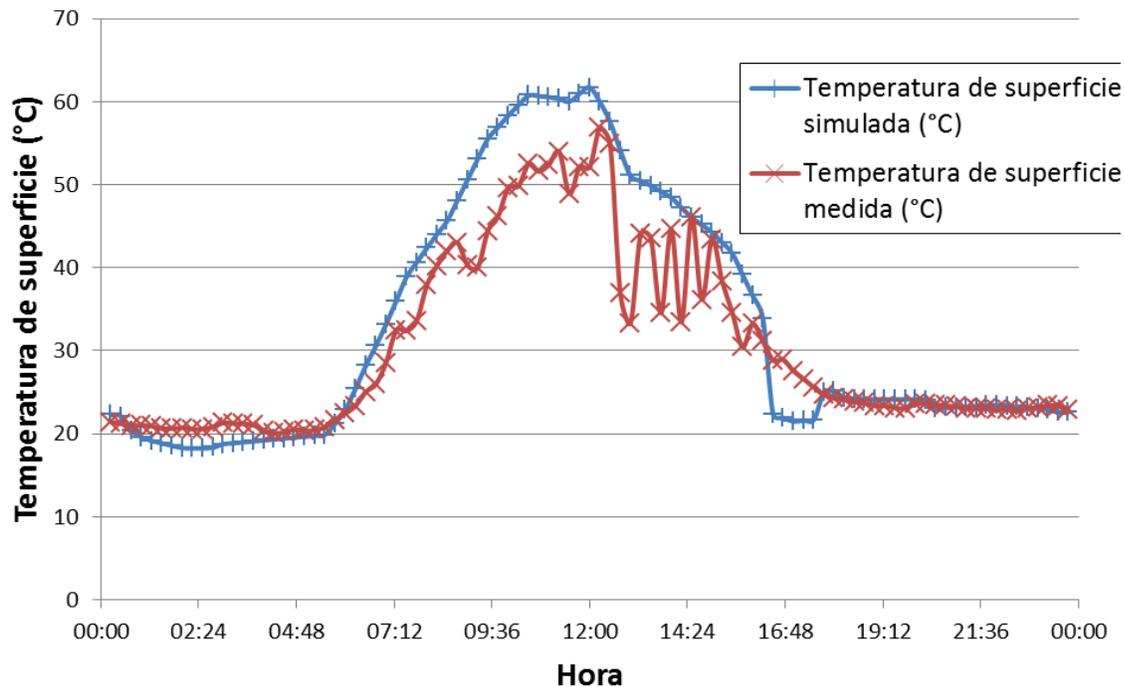


Figura 6.4 Comparación de temperatura de superficie de lámina troquelada simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

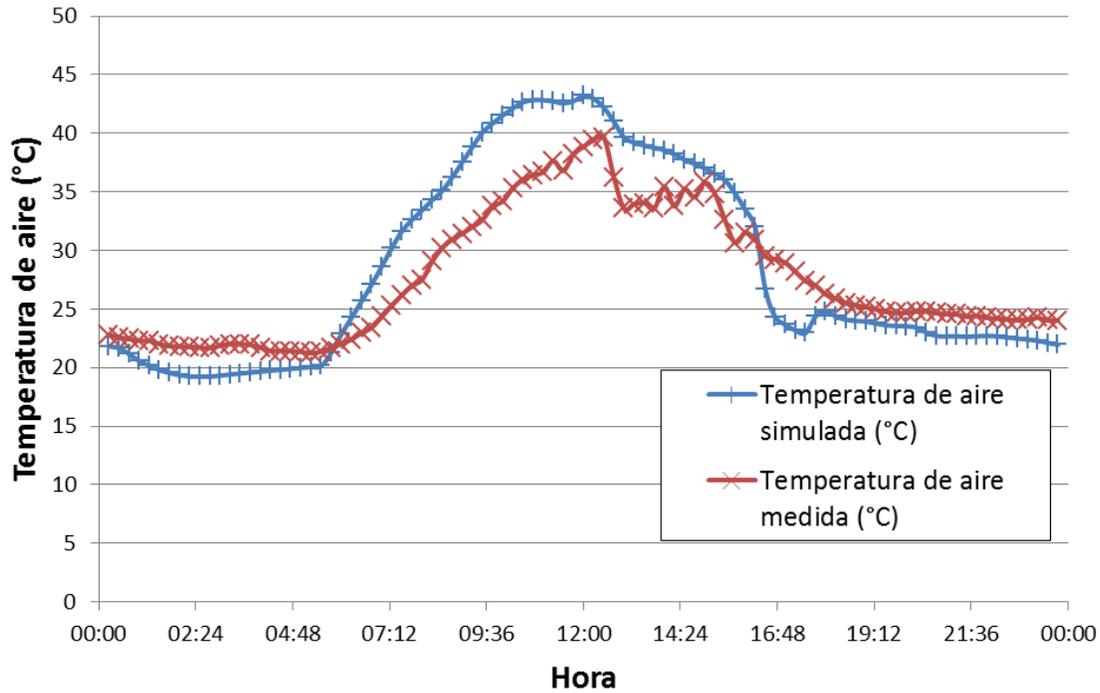


Figura 6.5 Comparación de temperatura de aire simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

6.1.6 Lámina de fibrocemento

Las simulaciones del sistema constructivo de lámina de fibrocemento son mostradas en las figuras 6.6 Para la temperatura de superficie de lámina, se observó un error promedio de 5.71% y un coeficiente de correlación de 0.969.

La temperatura simulada de la cavidad de aire en los prototipos registró un error promedio de 3.30% y un coeficiente de correlación de 0.964. Figura 6.7

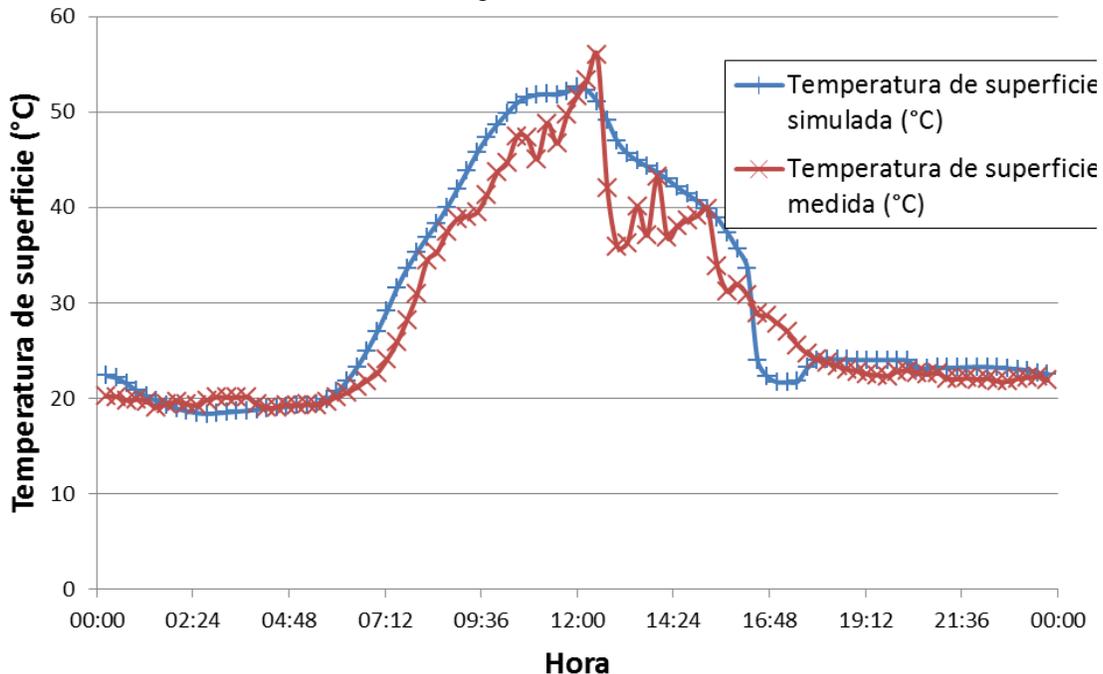


Figura 6.6 Comparación de temperatura de lámina de fibrocemento simulada y medida Fuente: Elaboración propia.

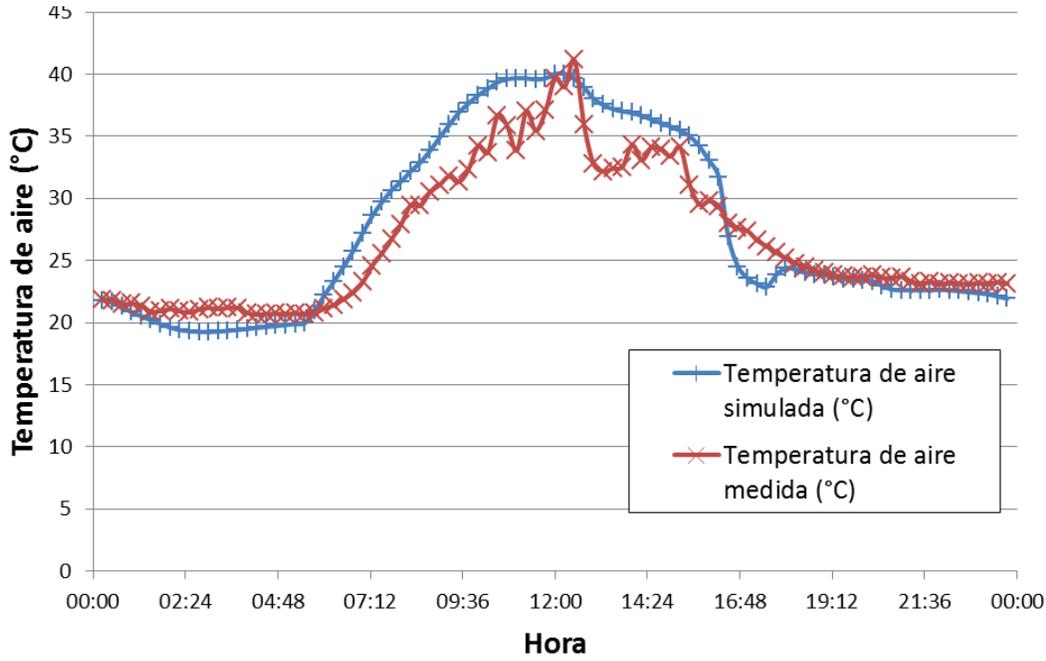


Figura 6.7 Comparación de temperatura de aire simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

6.1.7 Lámina metálica auto-soportante

Para el caso del sistema constructivo de lámina metálica auto-soportante, las figuras 6.8 y 6.9 presentan la comparación entre los resultados de la modelación y los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

La temperatura de superficie de lámina interior fue comparada y el resultado otorgó un error promedio de 3.42% y un coeficiente de correlación de 0.934. Para la comparación entre la temperatura de la cavidad de aire entre el prototipo experimental y la simulación, se obtuvo un error promedio de 3.37% y un coeficiente de correlación de 0.964.

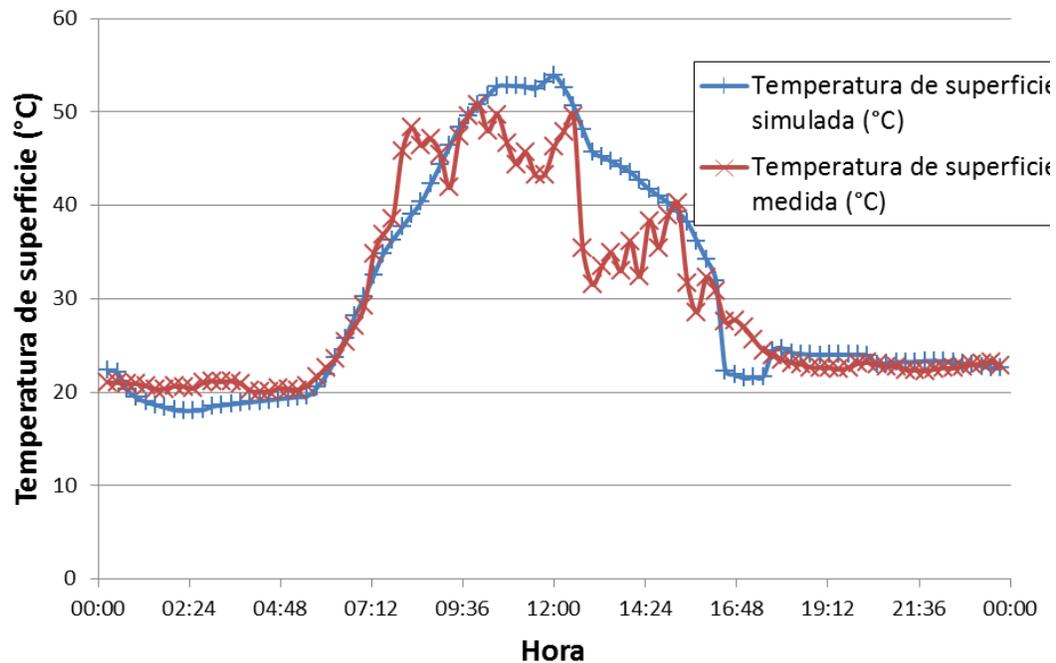


Figura 6.8 Comparación de temperatura de superficie de lámina metálica auto-soportante simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

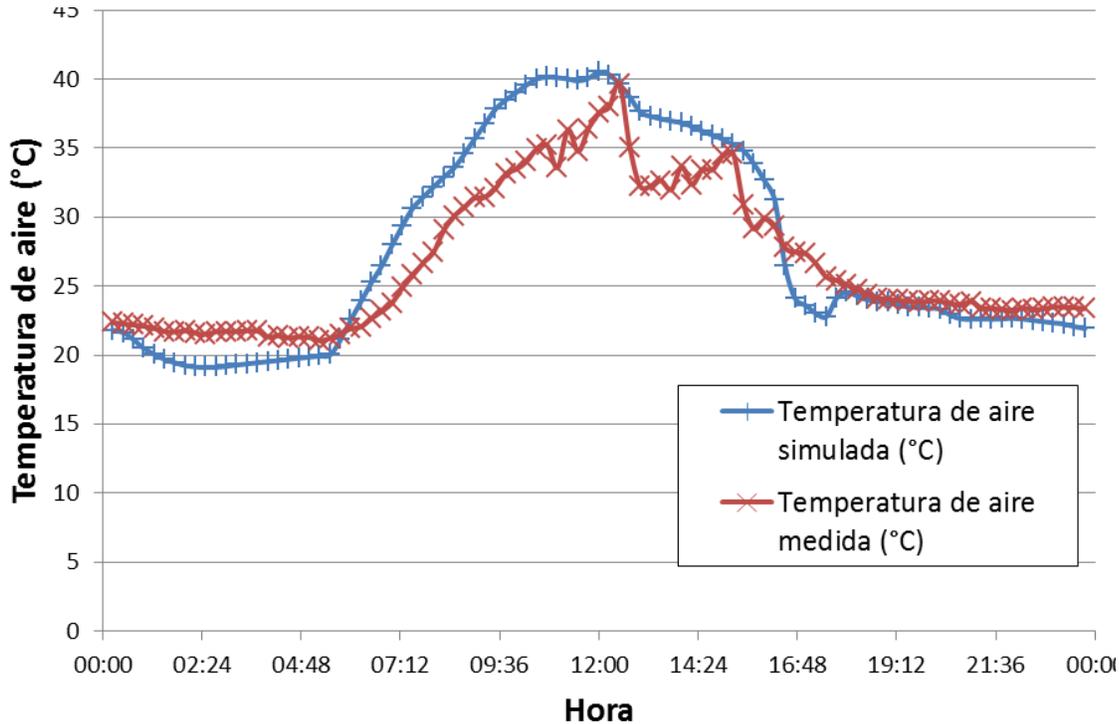


Figura 6.9 Comparación de temperatura de aire simulada y medida. Fuente: Elaboración propia.

6.1.8 Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación son resumidos en las tablas 6.1 y 6.2. La simulación de la temperatura interior de superficie reflejó porcentajes de error promedio máximo inferiores al 9% y coeficientes de correlación como mínimo 0.934.

Se considera que dadas las divergencias entre los datos climáticos típicos considerados en la simulación y el clima real observado en los días de medición, el comportamiento térmico previsto por la simulación es cercano a los experimentos en valor y tendencias y se concluyen aceptables.

Para el caso de la simulación de la cavidad de aire de los prototipos de sistemas constructivos, los resultados de las simulaciones son aún más cercanos a los datos experimentales, obteniéndose un error promedio máximo de 3.37% y un coeficiente de correlación mínimo de 0.954.

En este caso, se comprueba que la modelación de la temperatura de cavidad de aire representa de forma confiable los procesos físicos observados en los sistemas constructivos de cubierta.

Caso Simulado (Temperatura de superficie de cubierta)	Error %	Coefficiente de Correlación
Lámina metálica ondulada	1.91	0.956
Lámina metálica troquelada	8.40	0.965
Lámina de fibrocemento	5.71	0.969
Lámina metálica auto- soportante	3.42	0.934

Tabla 6.1 Resultados de simulación de temperatura de superficie de lámina para los sistemas constructivos estudiados.

Caso Simulado (Temperatura de cavidad de aire)	Error %	Coefficiente de Correlación
Lámina metálica ondulada	2.75	0.954
Lámina metálica troquelada	3.22	0.954
Lámina de fibrocemento	3.30	0.964
Lámina metálica auto- soportante	3.37	0.964

Tabla 6.2 Resultados de simulación de temperatura de cavidad de aire en los prototipos de los sistemas constructivos estudiados.

La comparación aquí presentada ha sido realizada para un día específico y son válidas para ese día. Sin embargo, la principal utilidad de la simulación es poder obtener resultados para días distintos, condiciones climáticas diferentes y considerar la implementación de cambios o mejoras en los sistemas constructivos.

La simulación es una herramienta que puede permitir extrapolar los resultados de las pruebas a un año completo y evaluar rendimientos y desempeños a largo plazo.

6.1.9 Conclusiones

Se realizó una validación experimental de simulación numérica del comportamiento térmico de los prototipos de sistemas constructivos de cubierta seleccionados para estudio, obteniéndose resultados aceptables para los sistemas investigados.

Esta validación da confianza en la utilización de la simulación numérica en el diseño de nuevas edificaciones y optimización de las existentes, específicamente para los sistemas constructivos metálicos analizados y de amplio uso en El Salvador.

BIBLIOGRAFÍA

1. Achterbosch, G.G.J. et al. (1985). Development of a convenient thermal building dynamic model. *Energy and Buildings*, Vol. 8 (3), pp. 183-196.
2. Aguirre, D., Cárcamo, J., Henríquez, A. (2014). Propiedades térmicas de materiales de construcción en El Salvador. Trabajo de Graduación para optar al grado de Ingeniero Mecánico. El Salvador. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas UCA.
3. Alvarado, J., Terrel W., Johnson, M. (2009). Passive cooling systems for cement based roofs. *Building and Environment* pp. 44: 1869-1875.
4. ASHRAE, Handbook. (2005). Fundamentals, American Society of Heating. Atlanta, GA. Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE).
5. Balcomb, D. (1983). Passive solar research and practice. *Energy and Buildings*, Vol. 7 (4), pp. 281-295.
6. Barnes, B., Martinez, L., Newell, T. et al. (2008). Design, simulation and preliminary results of an all electric net-zero energy solar home. Jacksonville, FL. Proceedings of the 2008 ASME International Energy Sustainability Conference.
7. Brewster, M.Q. (1999). *Thermal Radiative Transfer and Properties*, John Wiley & Sons, Wiley. New York, NY.
8. Calderón, M., Santos, S., Martínez, L.A., et. al. (2011). Proposed sustainable design alternatives for low-income and middle-income housing in a coastal area in a developing country. Washington D.C. Proceedings of the 2011 ASME International Conference on Energy Sustainability.
9. Cengel, Y.A. (2004). *Transferencia de calor*. México D.F. McGraw-Hill.
10. Cisneros, A., Rodríguez, L. (2006). *Tecnología en Construcción*. El Salvador. 1ª edición, UCA Editores.
11. Cisneros, A. (2012). *Sistema constructivo sostenible: madera más lodo de celulosa*. El Salvador. Departamento Organización del Espacio DOE, UCA.
12. Clarke, J. (2001). *Energy Simulation in Building Design*. New York, NY. Second edition, Butterworth-Heinemann.
13. Crawley, D. et al. (2005). *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Version 1.0.
14. DIGESTYC. (1995). *Censos nacionales V de población y IV de vivienda 1992*. San Salvador: DIGESTYC.
15. DIGESTYC. (2009). *VI Censo de población y V de vivienda 2007*. San Salvador: DIGESTYC.
16. Givoni, B. (1998). Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. *Energy and Buildings*, Vol. 28, pp. 25-32.
17. Guzmán, O., Rodríguez, R., Vega, D. (2014). Análisis y simulación de módulos de sistemas constructivos de cubierta. Trabajo de Graduación para optar al grado de Ingeniero Mecánico. El Salvador. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas UCA.
18. Henninger, H., Witte, M. (2004). *Energy Plus testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST)*. GARD Analytics.
19. Holst, J. (2003). Using whole building simulation models and optimizing procedures to optimize building envelope design with respect to energy consumption and indoor environment. Eindhoven, Netherlands, August 11-13. IBPSA Conference.
20. Huhn, B. (1996). *Fundamentals of Building Energy Dynamics*. Cambridge, MA. MIT Press.
21. Incropera, F., DeWitt, F. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York, NY. John Wiley.

22. Instituto Geográfico Nacional "Ing. Pablo Arnoldo Guzmán"-Centro Nacional de Registros, Ministerio de Economía. (2000). Atlas de El Salvador (4º. Ed.). San Salvador: Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Registros.
23. Judkoff, R., Neymark, J. (1995). Home energy rating system Building Energy Simulation Test (HERS BESTEST). Golden, CO. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
24. Lee, S., Park, S., Yeo, M., Kim K. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment* 44: 1431-1439.
25. Llinares, J., Llopis, & A. Sancho, F. (2008). *Acústica arquitectónica y urbanística*. México, D.F.: Limusa.
26. Martinez, L. (2007). Energy simulation of solar decathlon house. Illinois, USA. Master's Thesis, Department of Mechanical Science and Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
27. Martinez, L. (2010). Passive house guidelines for residential buildings in El Salvador. Phoenix, Arizona. Proceedings of the 2010 ASME International Energy Sustainability Conference.
28. Martinez, L. (2009). Simplified floor-area-based energy-moisture-economic model for residential buildings. Illinois, USA. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
29. Mills, A.F. (1999). *Heat transfer*. Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall.
30. Rey, Martínez, F.J. (2006). *Eficiencia energética en edificios*. Madrid. Ediciones Paraninfo.
31. Rodríguez, L., Chávez, M., Letona, P., Lartategui, F. (2013). Factibilidad para sistema constructivo de cubiertas y envolventes livianos derivados del reciclaje de plástico. El Salvador. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas UCA.
32. Serra, R. (1999). *Arquitectura y climas*. Barcelona. Editorial Gustavo Gili.
33. Snyder, M.E., Newell, T.A. (1990). Cooling cost minimization using building mass for thermal storage. *ASHRAE transactions* (pt 2), pp. 830-838.
34. Waltz, James, P. (1999). *Computerized building energy simulation handbook*. Lindburn GA. Fairmont Press.
35. Wang, N., Efram, T., Martinez, L., McCulley, M. (2009). A marketable all-electric solar house: A report of a Solar Decathlon project. *Renewable Energy*, 34.
36. Wang, N., Martinez, L., Efram, T., McCulley, M. (2008). Integration of Architecture and Engineering: A simulation assisted zero energy modular house design in the U.S. Dublin, Irlanda. Proceedings of the 25th PLEA International Conference.