

**ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TÉRMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN
BUCARAMANGA.**

**ROMUALDO DE JESÚS REYES GALVIS
JULIÁN ALBERTO SÁNCHEZ AGUIRRE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TÉRMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN
BUCARAMANGA.**

**ROMUALDO DE JESÚS REYES GALVIS
JULIÁN ALBERTO SÁNCHEZ AGUIRRE**

**Trabajo Grado para optar al título de:
Ingeniero Mecánico**

**Director:
JULIÁN ERNESTO JARAMILLO IBARRA
Ingeniero Mecánico, PhD**

**Codirector:
JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ
Ingeniero Mecánico, Mtr**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

Al padre de los espíritus, por guiarme en medio de tantos caminos; a mi madre por su compañía y comprensión; a mi padre por todo su apoyo; a toda mi familia, compañeros y mis amigos.

Romualdo de Jesús Reyes Galvis

A Dios por darme la vida y permitirme soñar, a mis padres por el apoyo incondicional que me brindaron, a mi hermano por estar siempre al tanto de mis logros, a toda mi familia, a mis compañeros de estudio por compartir esos momentos agradables en esta etapa de la vida.

Julián Alberto Sánchez Aguirre

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por apoyarnos en todas nuestras actividades.

A los profesores Julián Ernesto Jaramillo Ibarra y Jabid Eduardo Quiroga Méndez por ser nuestros directores de tesis y orientarnos en el desarrollo de la misma.

A cada uno de los profesores que participaron en nuestro desarrollo profesional durante la carrera.

A todos mis amigos.

Julián Alberto Sánchez Aguirre
Romualdo de Jesús Reyes Galvis

CONTENIDO

| | Pág |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| 1. OBJETIVOS..... | 22 |
| 1.1 Objetivo General..... | 22 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 22 |
| 2. ANTECEDENTES | 24 |
| 3. GENERALIDADES | 27 |
| 3.1 Techos Verdes extensivos..... | 28 |
| 3.2 Techos Verdes Intensivos | 29 |
| 3.3 Arquitectura Bioclimática | 29 |
| 3.4 Sistemas pasivos de climatización | 30 |
| 4. TRANSFERENCIA DE CALOR | 31 |
| 4.1 Modos o mecanismos de transferencia de calor | 31 |
| 4.1.1 Conducción | 31 |
| 4.1.2 Convección..... | 32 |
| 4.1.3 Radiación | 33 |
| 4.2 Radiación solar y atmosférica..... | 33 |
| 4.2.1 Declinación..... | 35 |
| 4.2.2 Ángulo horario | 36 |
| 4.2.3 Latitud..... | 36 |
| 4.2.4 Ángulo de elevación y azimut solar | 36 |
| 4.2.5 Ángulo de incidencia del sol | 38 |
| 4.2.6 Radiación solar sobre una superficie horizontal. | 38 |
| 4.2.7 Radiación sobre una superficie inclinada. | 39 |
| 4.3 Conducción de calor en estado transitorio en pared plana..... | 40 |
| 4.4 Métodos numéricos de cálculo | 41 |
| 5. MODELIZACIÓN TÉRMICA DE HABITÁCULOS | 43 |
| 5.1 Balance térmico para recintos con techos verdes y no verdes..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1.1 Balance térmico para el techo | 43 |
| 5.1.2 Balance térmico para las paredes | 45 |
| 5.1.3 Balance térmico para el ambiente interior | 47 |
| 5.2 Solución numérica para conducción transitoria en recintos | 50 |
| 5.3 Aplicación de los modelos a cada cerramiento..... | 54 |
| 5.3.1 Parámetros de las paredes | 55 |
| 5.3.2 Parámetros de la placa de concreto | 56 |
| 5.3.3 Parámetros techo verde | 58 |
| 5.3.4 Parámetros de la teja termo-acústica | 60 |
| 6. MONTAJE EXPERIMENTAL..... | 62 |
| 6.1 Selección del lugar y proceso de construcción de los cerramientos..... | 62 |
| 6.2 Sistema de monitoreo: Sensórica y adquisición de datos..... | 68 |
| 7. VALIDACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS | 73 |
| 7.1 Datos colectados en campo | 73 |
| 7.2 Predicción de temperaturas..... | 82 |
| 7.2.1 Primera sesión de pruebas..... | 82 |
| 7.2.2 Ajustes realizados al modelo | 85 |
| 7.2.3 Segunda sesión de pruebas..... | 86 |
| 7.3 cálculo de la carga térmica | 88 |
| 8. ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO | 90 |
| 8.1 Costo que valdría retirar la carga térmica acumulada en los módulos | 90 |
| 8.2 Costo por metro cuadrado de techo | 91 |
| 8.3 Procedimiento para el análisis de costo-beneficio | 93 |
| 8.4 Cálculos de costo-beneficio..... | 94 |
| 9. CONCLUSIONES | 95 |
| 10. RECOMENDACIONES..... | 97 |
| CITAS BIBLIOGRAFICAS | 98 |

| | |
|--------------------------|------------|
| BIBLIOGRAFÍA..... | 99 |
| ANEXOS..... | 100 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág |
|--|------------|
| Figura 1. Capas del techo verde..... | 28 |
| Figura 2. Urbanización de techo verde en Düsseldorf-Unterbach (Alemania). . | 29 |
| Figura 3. Declinación del sol..... | 35 |
| Figura 4. Variación de la declinación con el mes..... | 36 |
| Figura 5. Posición del sol con respecto a una superficie ubicada en la tierra. ... | 37 |
| Figura 6. Radiación solar directa y difusa sobre una superficie horizontal. | 38 |
| Figura 7. Radiación solar directa y difusa sobre una superficie inclinada. | 39 |
| Figura 8. Flujos de calor considerados en el balance térmico de los techos. ... | 43 |
| Figura 9. Flujos de calor sobre la pared..... | 46 |
| Figura 10. Calores para el balance interno. | 47 |
| Figura 11. Esquema del techo dividido en secciones Δx | 51 |
| Figura 12. Flujos de calor sobre una pared. | 55 |
| Figura 13. Nodos en Placa de concreto..... | 57 |
| Figura 14. Nodos en techo verde..... | 59 |
| Figura 15. Nodos en teja termoacústica. | 61 |
| Figura 16. Adecuación del terreno..... | 62 |
| Figura 17. Marco de habitáculos..... | 63 |
| Figura 18. Red de acero. | 63 |
| Figura 19. Módulo placa de concreto..... | 64 |
| Figura 20. Marco y módulo de teja termoacústica. | 64 |
| Figura 21. Cajón para el techo verde..... | 65 |
| Figura 22. Tela anti raíz y geotextil. | 65 |
| Figura 23. Filtro y sustrato del techo verde..... | 66 |
| Figura 24. Maní forrajero. | 66 |
| Figura 25. Techo con Maní forrajero..... | 67 |
| Figura 26. Cinta para rendijas..... | 67 |
| Figura 27. Estación de investigación | 68 |
| Figura 28. Sensor de temperatura LM35DZ y cable de conexión..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 29. Conexión de los LM35DZ al Arduino. | 69 |
| Figura 30. Tarjeta de adquisición..... | 70 |
| Figura 31. Piranómetros. | 70 |
| Figura 32. Field-Point..... | 71 |
| Figura 33. Cámara termográfica fluke Ti110..... | 71 |
| Figura 34. Air Meter Fluke. | 72 |
| Figura 35. Radiación solar total observada en la UIS el 9 de abril de 2013..... | 74 |
| Figura 36. Temperatura ambiente capturada en la estación experimental el 9 de abril de 2013. | 74 |
| Figura 37. Radiación solar total observada en la UIS el 28 de mayo del 2013. | 75 |
| Figura 38. Temperatura ambiente capturada en la estación experimental el 28 de Mayo de 2013. | 75 |
| Figura 39. Termografía del módulo con techo verde | 76 |
| Figura 40. Termografía del módulo con teja termoacústica. | 77 |
| Figura 41. Termografía del módulo con placa de concreto..... | 78 |
| Figura 42. Termografía de modulo con techo verde 28 de Mayo 2013..... | 79 |
| Figura 43. Termografía del módulo con teja termoacústica 28 de mayo de 2013. | 80 |
| Figura 44. Termografía del módulo con placa de concreto 28 de mayo de 2013. | 81 |
| Figura 45. Temperatura aire interior de los habitáculos (medida) vs Tiempo. .. | 83 |
| Figura 46. Temperatura aire interior de los habitáculos (modelada) vs tiempo. | 83 |
| Figura 47. Temperatura aire interior (medida y modelada) en el habitáculo con techo verde vs tiempo. | 84 |
| Figura 48. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con placa de concreto vs tiempo..... | 84 |
| Figura 49. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con teja termoacústica vs tiempo..... | 85 |
| Figura 50. Temperatura aire interior de los habitáculos (medida) vs tiempo. ... | 86 |
| Figura 51. Temperatura aire interior de los habitáculos (modelada) vs tiempo. | 87 |
| Figura 52. Temperatura aire interior (medida y modelada) en el habitáculo con techo verde vs tiempo..... | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 53. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con placa de concreto vs tiempo..... | 88 |
| Figura 54. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con teja termoacústica vs tiempo..... | 88 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág |
|--|------------|
| Tabla 1.Placas planas..... | 50 |
| Tabla 2.Temperatura superficial medida en el módulo con techo verde..... | 76 |
| Tabla 3. Temperatura superficial en el módulo con teja termoacústica. | 77 |
| Tabla 4.Temperatura superficial en el módulo con placa de concreto. | 78 |
| Tabla 5. Temperatura superficial medida en el módulo con techo verde..... | 79 |
| Tabla 6. Temperatura superficial en el módulo con teja termoacústica. | 80 |
| Tabla 7. Temperatura superficial en el módulo con placa de concreto. | 81 |
| Tabla 8. Costo de los techos por metro cuadrado. | 92 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág |
|--|------------|
| ANEXO A. PROPIEDADES DE MATERIALES..... | 100 |
| ANEXO B. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | 101 |
| ANEXO C. DATOS MEDIDOS..... | 109 |

RESUMEN

TÍTULO:

ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TERMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN BUCARAMANGA*

AUTORES:

Romualdo de Jesús Reyes Galvis.

Julián Alberto Sánchez Aguirre.**

PALABRAS CLAVES:

Modelo matemático, Carga térmica, Techos verdes, validación.

DESCRIPCIÓN:

El estudio tiene como objetivo comprobar las ventajas térmicas que ofrecen los techos verdes con respecto a otros usados convencionalmente como la placa de concreto y la teja termoacústica en una vivienda situada en el trópico, específicamente en la ciudad de Bucaramanga (Lat: 7° Norte, Altura: 959 msnm). Para ello se construyeron tres módulos en madera de iguales dimensiones con techos distintos; a cada uno de ellos se le instaló una cubierta de las antes mencionadas. Los módulos fueron equipados con sensores para obtener datos experimentales de temperatura del aire en el interior de cada recinto durante los meses de abril y mayo de 2013. En este estudio se propone un modelo analítico que se valida con los datos experimentales. El modelo propuesto consta de tres balances de energía, realizados a los techos, las paredes y al aire en el interior de cada recinto, con el que se predice el comportamiento de las variables (temperaturas, flujos de calor) en cada habitáculo. En la experimentación se monitorearon otras variables requeridas por el modelo como la velocidad del viento, radiación solar, temperaturas ambiente y de superficies. El modelo analítico se implementó en una plataforma de MatLab®. Los experimentos mostraron que las temperaturas del aire en el interior y la carga térmica son menores en el módulo con techo verde en comparación con los otros módulos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Julián Jaramillo Ibarra; Codirector: Ing. Jabid Quiroga Méndez.

SUMMARY

TITLE:

STUDY ABOUT THERMAL ADVANTAGE OF GREEN ROOFS IN BUCARAMANGA*

AUTHORS:

Romualdo de Jesús Reyes Galvis.

Julián Alberto Sánchez Aguirre.**

KEYWORDS:

Mathematical model, Thermal load, Green roofs, Validation.

DESCRIPTION:

The study aims to test the thermal advantages offered by Green Roofs over other conventionally used roofs as concrete slabs and thermo-acoustic tiles in a house located in the tropics, specifically in Bucaramanga (Lat 7 ° North, height: 959 masl). To that end, three equal-sized wooden modules with different roofs were built; each one of them was built with each of the three aforementioned roofs. Each module was monitored by means of high-precision sensors in order to obtain the data for the air temperature inside each enclosure during April and May in 2013. In the study, it was created an analytical model that is validated with experimental data. The proposed model consists of three energy balances, made to ceilings, the walls and the air inside of each enclosure, this model predicts the behavior of the variables (temperature, heat flux) in each cabin. In the experiment, variables such as wind speed, solar radiation, ambient and surfaces were monitored also. The analytical model was implemented in a MatLab® platform. The experiments showed that the indoor air temperatures and thermal load are smaller in the green roof module compared to the other modules.

* Degree work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School. Director: Eng. Julián Jaramillo Ibarra; Codirector: Eng. Javid Quiroga Méndez

INTRODUCCIÓN

Hoy día el planeta enfrenta grandes amenazas ambientales, pero sin duda el cambio climático causado por el calentamiento global es fiel reflejo de una humanidad inconsciente durante años. Ahora después de tanta irreflexión, surge la necesidad de contribuir de alguna manera al cuidado del medio ambiente, por ejemplo los países que conforman la unión europea vienen promoviendo el uso de energías alternativas como la eólica y solar, para disminuir las emisiones de CO₂ provenientes de la quema de hidrocarburos, se motiva también a la utilización de arquitectura bioclimática en el diseño de edificaciones que son técnicas amigables con el medio ambiente al reducir el consumo de la energía eléctrica en edificaciones, temas que no solo deben ser abordados por estas comunidades sino por el mundo entero.

Una alternativa ecológica de construcción son los techos verdes, contribuyen de manera favorable al medio ambiente reduciendo el efecto de isla de calor, ayudan a filtrar elementos contaminantes disueltos en el aire, alivian las descargas de aguas lluvias al sistema de alcantarillado, absorben CO₂ y producen O₂. Se vienen utilizando con más frecuencia en todas partes del mundo no solo por lo dicho anteriormente, también por su capacidad de aislamiento en climas fríos y enfriamiento en climas cálidos, otras razones como son la estética y generación de hábitat para algunas especies también son aspectos de no menos relevancia y son tomados en cuenta para decidirse por la utilización de estos techos.

La mayoría de las veces a la hora de edificar se da prioridad al factor económico y se presta poca atención a factores térmicos que pueden afectar las condiciones de confort y consumo energético de los recintos. Por esto el objetivo de este proyecto es corroborar las ventajas térmicas que ofrece el techo verde comparado con la placa de concreto y la teja termo-acústica en un clima como el de Bucaramanga, así que es necesario realizar la medición de parámetros, modelización térmica del sistema y asimismo la validación del

modelo para demostrar como ayuda el techo verde en el ahorro energético de recintos.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

- Hacer un estudio del ahorro energético que se obtendría con el uso de techos verdes respecto a otros convencionales (placa de concreto, teja termo-acústica) cumpliendo con la misión de la Universidad Industrial de Santander en la generación y adecuación del conocimiento por medio de la investigación.

1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir tres prototipos de habitación que tengan características geométricas similares con techos diferentes (teja termo-acústica, placa de concreto y techo verde).
- Implementar un sistema de monitoreo que permita determinar experimentalmente las variables (temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento) requeridas para validar el estudio, el cual contará con sensórica, sistema de adquisición de datos e interfaz gráfica en donde se muestre el comportamiento en cada recinto.
- Realizar la modelización térmica de los techos para calcular las ganancias y pérdidas de calor por convección, radiación y conducción usando el modelo **ENERGY BALANCE MODELING APPLIED TO A COMPARISON OF WHITE AND GREEN ROOF COOLING EFFICIENCY** hecho por Stuart Gafin, Cynthia Rosenzweig, Lily Parshall, David Beattie, Robert Berghage, Greg O'Keeffe, Dan Braman.
- Determinar la carga térmica o temperatura promedio en cada habitáculo, realizando la modelización térmica en todo el recinto, utilizando un modelo de transferencia de calor unidimensional en estado transitorio para determinar las ganancias y pérdidas de calor a través de paredes, puertas, ventanas y para los techos el modelo comentado en el objetivo anterior.

- Validar el modelo matemático seleccionado, realizando una comparación entre los resultados experimentales y los del modelo matemático, en donde se tengan en cuenta los errores obtenidos y los ajustes requeridos.

2. ANTECEDENTES

Se nombran a continuación algunos estudios térmicos realizados a los techos verdes, en muchos de ellos se proponen modelos físico-matemáticos basados en los conceptos de transferencia de calor y termodinámicos para predecir el comportamiento térmico de los mismos.

En 2007 se realiza un estudio térmico denominado EVALUACIÓN DEL USO DE TECHOS VERDES EN CLIMA TEMPLADO: CASO ECATEPEC DE MORELOS, ESTADO DE MEXICO, MEXICO (ASADES), en el que se comparan edificios con y sin aire acondicionado para determinar el potencial térmico que tienen los techos verdes en climas templados. (ASADES) concluye que estos disminuyen la ganancia de calor hacia el interior de los edificios, consecuencia de ello existe un ahorro en el consumo de energía del aire acondicionado, por lo tanto una disminución en los costos de mantenimiento al trabajar con temperaturas interiores menores. En este estudio, la disminución ascendió a un 8% (2.104 kW) de lo que en un inicio gana térmicamente el edificio [1], además de los resultados obtenidos se observó que el techo verde funciona como capa aislante en la envolvente del edificio.

En 2009 Elba Teresa Haro Carvajal en su trabajo COMPORTAMIENTO DE DOS TIPOS DE CUBIERTAS VEGETALES, COMO DISPOSITIVO DE CLIMATIZACIÓN, PARA CLIMAS CALIDOS SUB-HÚMEDOS plantea que con este tipo de cubiertas se puede disminuir la temperatura de globo (temperatura interior del recinto) de manera considerable, entre 5 a 10 ° C [2], el experimento se llevó a cabo en la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima, al comparar las temperaturas de globo de un testigo (cubierta para comparación) con las temperaturas de globo en cubiertas vegetales (Gaudenia y Suculenta), Elba demostró que en el mes de marzo la Gaudenia tenía una temperatura 12°C menor que la temperatura del testigo, mientras que durante la experimentación que fueron 10 meses, la Suculenta redujo solo en 5°C la temperatura de globo con lo que se afirma la hipótesis de

Elba, con esto se corrobora la capacidad de enfriamiento que tienen los techos verdes, pero que además dependiendo del tipo de planta, la humedad en el sustrato y el tipo de sustrato, se obtienen diferentes resultados en la capacidad de enfriamiento, en este caso la cubierta con Gaudenia obtuvo mejores resultados que la Suculenta, mostrando una capacidad de enfriamiento más alta.

Otro estudio sobre los techos verdes fue presentado en un reporte investigación realizado por Stuart Gaffin, Lily Parshall, Greg O’Keeffe, Daniel Braman, David Beattie, and Robert Berghage en el año 2006, un capítulo del estudio se llamó ENERGY BALANCE MODELING APPLIED TO A COMPARISON OF WHITE AND GREEN ROOF COOLING EFFICIENCY, que es un modelo de balance energético para ser aplicado a techos verdes y blancos (estándar). El método empleado consistió en recopilación de información, medición de parámetros (temperaturas), simulación y validación de modelos. Demostrando la reducción en las temperaturas que se puede lograr con vegetación en los techos. Por otra parte en el intento de buscar alternativas similares a los techos ajardinados les surgió la pregunta ¿Qué albedo (reflectividad) sería requerido en los techos blancos para obtener el comportamiento térmico de los techos verdes? , concluyendo que los albedos requeridos deberían ser más altos que los posibles para el tipo de material estudiado, por tal razón aunque los techos estándar son más económicos no ofrecen los mismos beneficios ambientales que los techos verdes.

En una tesis de graduación de Ingeniería Arquitectónica en la Universidad Estatal de Pensilvania, realizada por Paulo Tabares en el año 2009, denominada PREDICTIVE HEAT AND MASS TRANSFER MODEL OF PLANT-BASED ROOFING MATERIALS FOR ASSESSMENT OF ENERGY SAVINGS se desarrolló un modelo predictivo de transferencia de calor y masa para los techos verdes en condiciones de verano, utilizando un aparato experimental diseñado y construido específicamente para cuantificar los fenómenos de intercambio energético en el techo, además teniendo en cuenta factores que

hacen más complejo el modelo como resistencia del sustrato, índice de área de la hoja, etc. Hace énfasis en como la evapotranspiración¹ juega un papel de control en los demás flujos de calor, dependiendo del estado de las plantas y las condiciones ambientales. Encontrando que cuando el techo está húmedo el calor conductivo a través de él es menor. Por último, el modelo es validado y verificado usando la información recopilada del aparato experimental.

¹ *Evapotranspiración: Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo. Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Evapotranspiraci%C3%B3n>*

3. GENERALIDADES

Los techos verdes o también llamadas cubiertas ajardinadas, son en esencia alternativas de construcción para minimizar el impacto ambiental (ecológicas) y reducir los consumos de energía. Se refiere a techos verdes a aquellos compuestos por plantas y crecen en un medio de cultivo o sustrato conformado en la azotea de las edificaciones, o bien según los autores Peck y Callaghan² los techos verdes se definen como sistemas de cubiertas especializadas que apoyan el crecimiento de vegetación en las estructuras hechas por el hombre, tales como tejados.

Cabe resaltar que algunas tecnologías son denominadas verdes, por ejemplo el uso de paneles solares, por lo que en algún momento se puede presentar la confusión con los términos.

En el mundo los alemanes han sido los principales promotores de la utilización de techos verdes, en su libro Techos verdes planificación, ejecución y consejos prácticos el Alemán Gernot Minke [3] nombra una serie de beneficios que traen la utilización de techos verdes, estos beneficios son los siguientes.

- Producción de oxígeno y absorción de dióxido de carbono.
- Reducción de las superficies pavimentadas.
- Limpieza del aire.
- Evitan el recalentamiento de las superficies y con ello impiden que se creen remolinos de polvo.
- Regulación de la temperatura.
- Aislación acústica.
- Alivio de los sistemas de alcantarillados, ya que retienen mucha agua y desaguan gradualmente.

² Peck y Callaghan 1999, Liu et al. 2004

Existen muchos más beneficios, esta tesis quiere corroborar uno de ellos como es el caso de reducción de la temperatura interna de los recintos en climas cálidos como el de Bucaramanga.

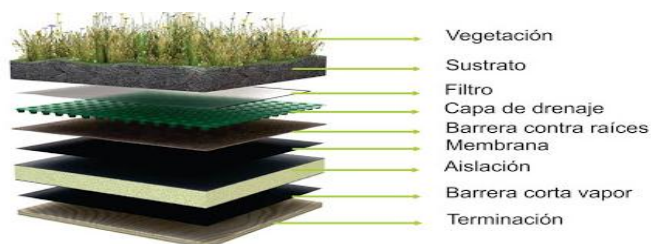
Los techos verdes básicamente son clasificados como techos verdes extensivos e intensivos.

3.1 Techos Verdes extensivos

Son denominados techos verdes extensivos a aquellos cuyo espesor de sustrato se encuentra entre 3 cm y 15 cm, las plantas que los conforman necesitan de muy poco riego y mantenimiento, han desarrollado mecanismos para resistir sequías y heladas. Este tipo de vegetación suelen ser musgos, suculentas, pastos o hierbas de diferente tipo, además el peso por m^2 de techo debe ser menor a 1.6 KN/m^2 (160 kg/m^2).

La configuración más simple para estos techos extensivos es en esencia la que se conforma por una capa exterior de vegetales, seguida por una capa de sustrato, una capa de drenaje, una tela anti-raíz y una base estructural ya sea en madera o losa de concreto, la **figura 1** muestra un corte de techo verde en el que se ven otras capas como barrera al vapor, filtro y aislación.

Figura 1. Capas del techo verde.



Fuente: a3slzuccolinigfernandez.blogspot.com

Nota de interés: En las instalaciones de la UIS fue instalado en el edificio de ingeniería eléctrica un techo verde.

La **figura 2** muestra una urbanización con techo verde ubicada en Alemania, es posible ver el alto grado de inclinación que presenta y lo estéticos que pueden llegar a ser.

Figura 2. Urbanización de techo verde en Düsseldorf-Unterbach (Alemania).



Fuente: Manual de planificación, ejecución y consejos prácticos Gernot Minke

3.2 Techos Verdes Intensivos

Los techos verdes intensivos deben tener como mínimo un espesor de 30 cm de capa de sustrato, se le considera intensivos porque necesitan de constante riego y un buen mantenimiento. Estos techos se conforman de plantas vivaces, césped y en general plantas que se encuentran en campo abierto. Se sabe de techos en los que se han encontrado huertas, además no se pueden utilizar en cubiertas con inclinación superior al 3%.

3.3 Arquitectura Bioclimática

La arquitectura bioclimática son técnicas de diseño en las que el objetivo es aprovechar las condiciones climáticas de un lugar para lograr el máximo confort térmico o lumínico dentro de las edificaciones sin necesidad en muchos casos de recurrir a energías convencionales provenientes de fuentes que puedan contaminar el planeta disminuyendo así el impacto ambiental.

Existen variadas técnicas de diseño para hacer que una edificación interactúe con el medio circundante y lograr condiciones de autoabastecimiento, confort térmico y lumínico, por ejemplo la simple orientación de las casas que se encuentran en las zonas templadas (más allá de los trópicos), para aprovechar al máximo la radiación solar, la utilización de colectores solares para calefacción, la creación de paredes aislantes como los muros trombe, son diseños bioclimáticos. Sin embargo se puede ver que la interacción del diseño con el medio puede ser de manera artificial o natural, cuando existen medios artificiales como por ejemplo paneles solares, bombas de calor se denomina un sistema activo y cuando es natural se denomina sistema pasivo.

3.4 Sistemas pasivos de climatización

En la arquitectura bioclimática una manera de evitar que se transfiera una alta cantidad de calor hacia el interior de recintos en climas cálidos y lograr confort es por medio de sistemas de climatización pasivos, se denominan de esta manera ya que no utilizan ningún medio externo o instalaciones extras para climatizar, por ejemplo sistemas de acondicionamiento como aires acondicionados, caloductos, etc. El método de enfriamiento por evaporación es denominado un sistema pasivo de climatización, de acuerdo a la termodinámica se sabe que a la hora de evaporar un líquido se necesita de una cierta cantidad de energía denominada calor latente de vaporización para obtener el cambio de fase, los techos verdes al poseer gran contenido de humedad y estar sometidos a la radiación solar presentan este fenómeno de evaporación por lo que el flujo de calor hacia el interior del recinto es disminuido. Por otro lado la aislación térmica también constituye un método de climatización pasiva, los techos verdes en climas fríos mantienen temperaturas de confort en el interior de los recintos ya que contienen una capa de tierra que aísla la edificación del ambiente externo disminuyendo el calor perdido a través de ellos.

4. TRANSFERENCIA DE CALOR

Para entender cualquiera de los modelos fisicomatemáticos usados en ingeniería para el estudio de sistemas térmicos es necesario tener una noción de los conceptos básicos de transferencia de calor.

De acuerdo con los conceptos termodinámicos, un sistema interactúa con su entorno cuando existe una diferencia de potencial, cuando la causa de esta diferencia es la temperatura, la energía intercambiada se denomina calor. Sin embargo considerar un sistema mediante las leyes termodinámicas permite únicamente tener información sobre la transferencia de energía entre estados de equilibrio, pero no sobre la naturaleza del proceso y la rapidez con que ocurre.

La transferencia de calor expone los modos que hacen posible el intercambio y la rapidez con que se dan los procesos térmicos.

4.1 Modos o mecanismos de transferencia de calor

Son los procesos físicos mediante los cuales se transfiere energía cuando existe una diferencia de temperatura. Proporcionan las ecuaciones necesarias para cuantificar la transferencia de energía en función del tiempo. Básicamente existen tres modos de transferencia de calor.

4.1.1 Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos y gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y el transporte de energía por parte de los electrones libres [4].

Se puede cuantificar el flujo de calor por conducción transferido a través de un cuerpo por medio de la ley de Fourier donde se establece que el flujo de calor depende de la geometría del sistema, el tipo de material y el gradiente de temperatura (ver **ecuación 1**).

$$\dot{Q}_x = -KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

En donde A es el área de la superficie, K es la constante de conductividad térmica y $\frac{dT}{dx}$ es la variación de la temperatura respecto a la posición. En este caso el flujo de calor está dado en una sola dirección en el sistema de coordenadas cartesianas.

4.1.2 Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que estén en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Cuanto más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo del fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. [4]

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por ley de enfriamiento de Newton [4], (ver **ecuación 2**).

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

En donde A_s es el área de la superficie en contacto con el fluido, T_s temperatura de superficie del cuerpo, T_∞ temperatura del fluido y h coeficiente de convección.

4.1.3 Radiación

La radiación es un mecanismo de transferencia de energía que no requiere un medio material para fluir como ocurre en la conducción y la convección, ya que el intercambio se da por medio de ondas electromagnéticas y fotones [4].

Todo cuerpo emite radiación de manera proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, según Stefan-Boltzmann la potencia máxima es la radiación emitida por un cuerpo negro dada por la **ecuación 3**:

$$\dot{Q}_{\text{Emitida,max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (3)$$

Donde A_s es el Área de la superficie emisora, T_s temperatura de la superficie emisora y σ constante de Stefan-Boltzmann.

La potencia producida por una superficie real es menor y viene dada por la **ecuación 4**:

$$\dot{Q}_{\text{Emitida,real}} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (4)$$

Donde ϵ es la emisividad, que es una propiedad de los materiales e informa sobre la capacidad o eficiencia de un cuerpo para emitir radiación, comparada con el cuerpo negro y está en el rango de $[0 \text{ a } 1]$.

4.2 Radiación solar y atmosférica

La energía proveniente del sol que llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas es denominada radiación solar, esta energía se debilita en la atmosfera debido a las interacciones a las que es sometida, con las capas atmosféricas. Por otro lado la radiación atmosférica es aquella energía que es emitida y reflejada por los componentes atmosféricos, esta radiación es denominada de onda larga ya que tiene longitudes de onda mayores que las presentadas en la radiación solar a la que se le denomina radiación de onda corta.

La emisión atmosférica se debe principalmente a las moléculas de CO₂ y H₂O, y se concentra en la región del espectro de radiación en los rangos de 5 a 8 μm y por encima de 13 μm, mientras la mayor parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre cae en la banda de longitudes de onda de 0.3 a 2.5 μm [4].

La determinación de la radiación atmosférica emitida está dada por la **ecuación 5**, esta es la radiación atmosférica que incide sobre una superficie, viene determinada por la temperatura del aire, la emisividad de la superficie y la constante de Stefan Boltzmann.

$$LW_{\text{down}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{air}}^4 \quad (5)$$

Existen dos tipos de radiación solar, la radiación directa y la radiación difusa, la directa es aquella energía que impacta con mayor intensidad las superficies, son los rayos solares que llegan directamente a la tierra sin ser dispersados o absorbidos por los componentes atmosféricos y la radiación difusa es aquella que ha sido dispersada en las capas atmosféricas y llega a la superficie con menor intensidad.

Para determinar la radiaciones solares directa y difusa, sobre una superficie, se deben tener en cuenta factores como el movimiento de la tierra, la posición del sol, la ubicación de la superficie en la tierra (latitud), su orientación e inclinación.

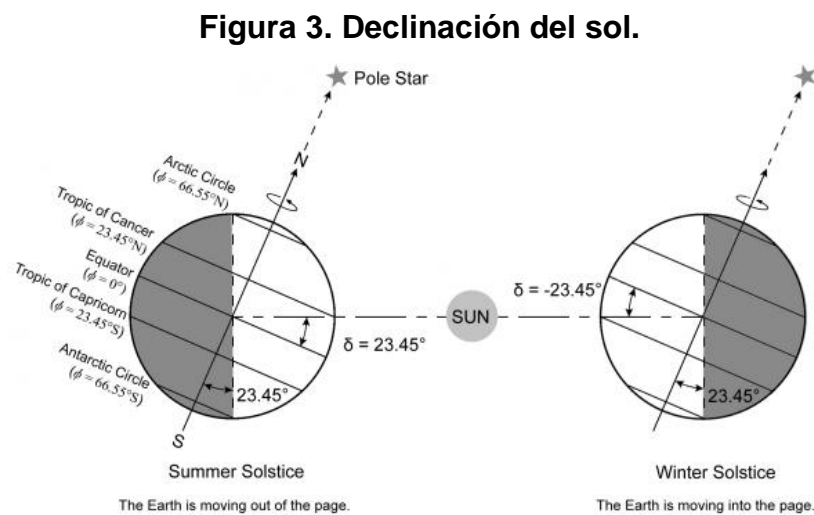
El movimiento de la tierra o movimiento aparente del sol es determinado por medio de la geometría esférica, en donde se deben tener en cuenta parámetros como el día del año que está relacionado con el ángulo de declinación δ , la hora del día con el ángulo horario ω y la ubicación (punto de referencia en la tierra) con la latitud ϕ .

4.2.1 Declinación

El ángulo de declinación δ es el formado entre la tierra y el sol con respecto a la línea del ecuador proyectada en el espacio y está relacionado con el movimiento de traslación de la tierra, existen correlaciones trigonométricas para calcularlo, por lo general se usa la **ecuación 6**.

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{n+284}{365}\right) 360 \quad (6)$$

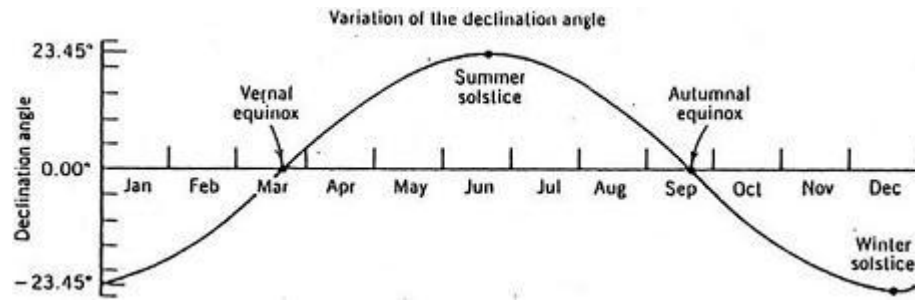
En donde n es el día para el cual se desea la declinación, varía de $n=1$ a $n=365$. La **figura 3** da una noción del ángulo de declinación, se muestra la línea del ecuador y la línea de sol



Fuente: <http://www.itacanet.org>

El ángulo de declinación varía de -23.45 a 23.45° como lo muestra la **figura 4**.

Figura 4. Variación de la declinación con el mes.



Fuente <http://www.reuk.co.uk/Solar-Declination.htm>

4.2.2 Ángulo horario

El ángulo horario es el formado entre la posición del sol al medio día y la posición del sol a una hora determinada, está relacionado con el movimiento rotacional de la tierra. Se puede calcular con la **ecuación 7**.

$$\omega = (\text{hora_solar} - 12) * 15 \quad (7)$$

La hora solar varía desde 0 a 24.

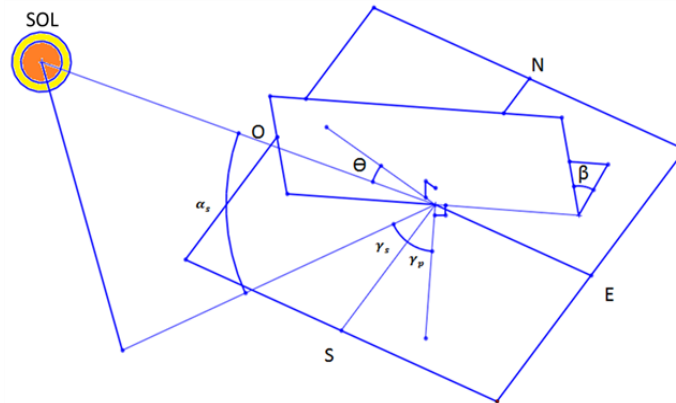
4.2.3 Latitud

La latitud ϕ es el ángulo formado entre la línea del ecuador y cualquier lugar de la tierra, varía de 0 a 90°, se nombra latitud sur o norte dependiendo de si el punto sobre la tierra está por encima o por debajo del plano ecuatorial.

4.2.4 Ángulo de elevación y azimut solar

La posición del sol se determina por medio del ángulo de elevación α_s y el azimut solar γ_s . El ángulo de elevación es aquel formado entre un plano horizontal en la tierra y la línea que une al sol con un punto de referencia en la tierra (línea del sol), ver **figura 5**. El azimut solar es el ángulo entre la proyección de la línea del sol sobre la superficie horizontal y la línea norte-sur también mostrado en la **figura 5**.

Figura 5. Posición del sol con respecto a una superficie ubicada en la tierra.



El ángulo de elevación y el azimut solar dependen de la declinación, latitud, ángulo horario y se relacionan con las **ecuaciones 8 y 9**.

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega) \quad (8)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1} \frac{(\cos \delta * \sin \omega)}{(\cos \alpha_s)} \quad (9)$$

La **ecuación 9** presenta problemas de computo ya que la función \sin^{-1} no discrimina valores de azimut superiores a 90° , valores que se dan en las primeras y últimas horas del día. Existe una ecuación en función de coseno que permite evaluar valores superiores a 90° pero no discrimina el signo de γ_s (este u oeste), este problema se corrige multiplicando por la función $\text{SGN}(\omega)$ ³, ver **ecuación 10** [5].

$$\gamma_s = \cos^{-1} \frac{(\sin \varphi * \sin \alpha_s - \sin \delta)}{(\cos \alpha_s * \cos \varphi)} * \text{SGN}(\omega) \quad (10)$$

³ $\text{SGN}(X)$: Es una función que devuelve el signo del argumento, (1 si $x > 0$, -1 si $x < 0$).

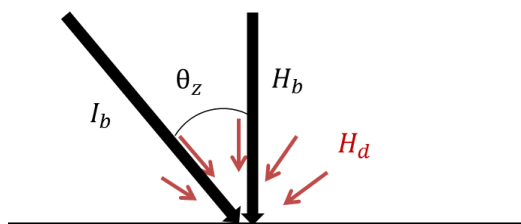
4.2.5 Ángulo de incidencia del sol

La **figura 5** también muestra el ángulo θ llamado cenit o ángulo de incidencia del sol, y se forma entre la línea perpendicular a la superficie y la línea de sol; más adelante se muestra como se calcula este ángulo en superficies horizontales e inclinadas.

4.2.6 Radiación solar sobre una superficie horizontal.

La radiación solar comúnmente se denota por H , y es la suma de la radiación directa H_b más radiación difusa H_d como lo muestra la **ecuación 11**. Los valores de radiación solar se dan en $\frac{W}{m^2}$. Se ilustra la radiación solar directa y difusa sobre una superficie horizontal en la **figura 6**.

Figura 6. Radiación solar directa y difusa sobre una superficie horizontal.



$$H=H_d+H_b \quad (11)$$

$$H_b=I_b \cdot \cos \theta_z \quad (12)$$

El flujo de calor radiante sobre una superficie horizontal es igual a H . Existen instrumentos de medida como los piranómetros que se encargan de medir la radiación total H , otros como los pirheliómetros se encargan de medir la radiación de rayo directo I_b . La **ecuación 12** expresa la radiación directa en función de la radiación de rayo directo y el ángulo de incidencia solar.

El ángulo de incidencia solar sobre una superficie horizontal o ángulo del cenit θ_z es el ángulo que forma la perpendicular a la superficie y la línea del sol ver **figura 6**. Con ecuaciones basadas en la trigonometría esférica solar se obtiene

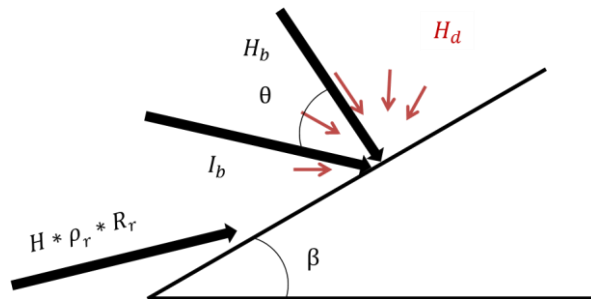
para θ_z una relación que depende de la declinación, latitud y el ángulo horario ver **ecuación 13**.

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega) \quad (13)$$

4.2.7 Radiación sobre una superficie inclinada.

Para el caso de una superficie inclinada ver **figura 7**, el flujo de calor radiante no es igual a la radiación H medida por un piranómetro y sobre estas superficies se llama H_R . Esta radiación H_R depende de factores como la inclinación de la pared β , azimut solar γ_s , cenit θ_z , azimut de pared γ_p y el ángulo de incidencia sobre superficies inclinadas θ . La **ecuación 14** representa de forma generalizada la radiación sobre una superficie inclinada.

Figura 7. Radiación solar directa y difusa sobre una superficie inclinada.



$$H_R = (H - H_d) * R_b + H_d * R_d + H * \rho_r * R_r \quad (14)$$

En donde los tres términos de la parte derecha de la ecuación representan las radiaciones directa, difusa y total reflejada por el suelo y que incide en la superficie. Los coeficientes R_d y R_r son relaciones que dependen de la inclinación de la superficie (β) y R_b depende de la relación trigonométrica entre el ángulo de incidencia solar sobre una superficie inclinada (θ) y horizontal (θ_z) y se determinan por las **ecuaciones 15,16 y 17**. ρ_r es la reflectividad del suelo. La **ecuación 18** permite determinar el ángulo de incidencia solar sobre una superficie inclinada.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (15)$$

$$R_d = \left(\cos \frac{\beta}{2} \right)^2 \quad (16)$$

$$R_r = \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)^2 \quad (17)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\cos (\gamma_s - \gamma_p) * \cos \alpha_s * \sin \beta + \sin \alpha_s * \cos \beta \right) \quad (18)$$

4.3 Conducción de calor en estado transitorio en pared plana

El proceso de conducción de calor se puede presentar en forma estable o transitoria, un proceso es estable cuando la variación de la temperatura en el cuerpo solo es función de la posición y no del tiempo, el calor a través de él es constante y puede ser determinado cómodamente por la ecuación de Fourier. Por otra parte un proceso transitorio se da cuando la temperatura es función del tiempo y de la posición. Existen varias formas de resolver un problema de transferencia de calor en estado transitorio, hay métodos analíticos, experimentales y numéricos; dentro de los métodos analíticos de cálculo de problemas de transferencia de calor, hay uno denominado método de la resistencia interna despreciable que asume la no dependencia de la temperatura con la posición en el cuerpo. Otros métodos analíticos también introducen simplificaciones que facilitan la solución de escenarios comunes de transferencia de calor.

La **ecuación 19** resulta de aplicar el balance de energía a un elemento de volumen diferencial en un sólido en donde se transfiere calor por conducción y se acumula energía.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

En donde α es la difusividad térmica, que es una propiedad física de cada material.

Esta ecuación sirve para determinar la distribución de temperatura en función del tiempo y de la posición. De acuerdo con el caso en estudio se pueden hacer las simplificaciones necesarias, por ejemplo, si el término del lado derecho se toma como cero quiere decir que el proceso es en estado estable, ya que la distribución de temperatura solo es función de la posición.

4.4 Métodos numéricos de cálculo

Existen limitantes para el uso de los métodos analíticos de cálculo en la solución de problemas reales de transferencia de calor, ya que solo pueden dar solución a problemas simplificados. Los métodos numéricos de cálculo son utilizados para dar solución a sistemas más complejos de conducción como por ejemplo aquellos en los que se presentan geometrías irregulares. El objeto de los métodos numéricos es discretizar las ecuaciones diferenciales que rigen el proceso transmisión de calor en sólidos y facilitar su solución [6]. Un método usado para solucionar los problemas de conducción de calor es el de diferencias finitas por su fácil aplicación; este método consiste en dividir el sistema en cuestión en n -partes llamados nodos, en donde cada nodo pertenece a un elemento de volumen al cual se le aplica el balance de energía. Cuando se estudia un proceso de transferencia de calor unidimensional en estado estable se utiliza este método para determinar las temperaturas de cada nodo en un mismo instante, el sistema de ecuaciones resultante tiene tantas incógnitas como nodos y se resuelve de manera simultánea. Por otra parte cuando es un proceso unidimensional en estado transitorio también resulta un sistema de tantas ecuaciones como nodos, pero aparece un término adicional en cada ecuación que está relacionado con el cambio de la temperatura nodal en el tiempo y sirve para predecir las temperaturas de cada nodo cada cierto intervalo de tiempo Δt .

Cuando se predicen las temperaturas de un sistema usando diferencias finitas existen dos métodos llamados explícito e implícito; con el método explícito se pueden obtener las temperaturas nodales en los instantes siguientes especificando las condiciones iniciales y teniendo en cuenta las limitaciones en el Δt al usar este método, resulta un sistema de ecuaciones que se resuelve de forma iterativa hasta predecir las temperaturas para el tiempo deseado. Cuando se aplica el método implícito se pueden determinar las temperaturas nodales anteriores a partir de la condición inicial, aunque su aplicación requiere que las ecuaciones resultantes se resuelvan simultáneamente y el intervalo de tiempo no está limitado.

Al estudiar cualquier caso de transferencia de calor por el método de diferencias finitas los algoritmos de cálculo deben cumplir con ciertas condiciones (estabilidad, convergencia, consistencia, entre otras [5]) que garantizarán la veracidad de la solución.

Para entender mejor el método de diferencias finitas en el capítulo siguiente se muestra su aplicación al caso que se presenta en esta tesis, recintos expuestos a radiación solar y condiciones ambientales externas.

5. MODELIZACIÓN TÉRMICA DE HABITÁCULOS

En este capítulo se muestran los balances energéticos necesarios para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento térmico de un recinto; en primer lugar el balance energético del techo, seguido por el de las paredes y por último el balance para el ambiente interior (aire).

Además se muestra la aplicación del método de diferencias finitas para predecir las temperaturas requeridas en la validación del estudio.

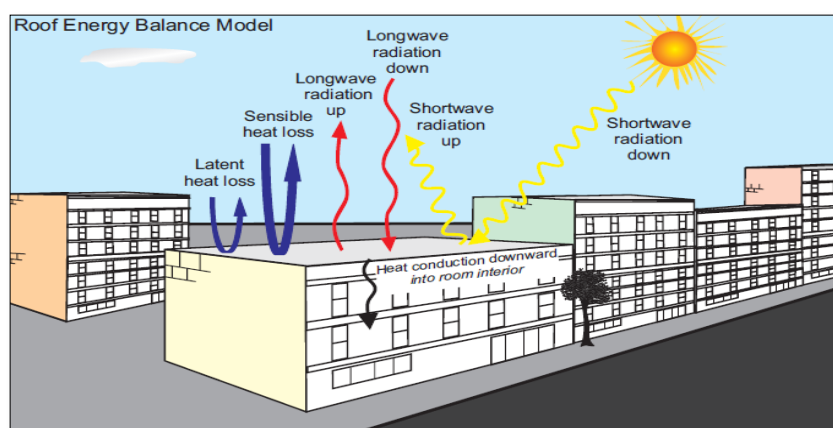
5.1 Balance térmico para recintos con techos verdes y no verdes

El siguiente es el modelo matemático para techos verdes y no verdes propuesto en el reporte de investigación “techos verdes en la región metropolitana de Nueva York” [7], con algunas modificaciones.

5.1.1 Balance térmico para el techo

A continuación se muestra un modelo físico con el fin de ilustrar detalladamente los flujos de calor que intervienen en el caso de estudio y la ecuación de balance energético, aplicable a los techos verdes y no verdes, (ver **figura 8**).

Figura 8. Flujos de calor considerados en el balance térmico de los techos.



Fuente: Energy Balance Modeling Applied to a Comparison of White and Green Roof Cooling Efficiency [7]

En seguida se nombran los siete flujos de energía que se pueden identificar y que son necesarios para realizar el balance energético en un techo verde [7]; para los techos no verdes (placa de concreto y teja termo-acústica) se omite el termino del calor latente, pues se asume que el contenido de humedad presente en estos techos es nulo.

- Radiación de onda corta (SW_{down})
- Radiación de onda corta reflejada (SW_{up})
- Radiación de onda larga (LW_{down})
- Radiación de onda larga emitida por la superficie (LW_{up})
- Calor sensible (Q_{conv})
- Calor latente (Q_{latent})
- Calor de conducción (Q_{cond})

La **ecuación 20** representa el balance energético en estado transitorio para el modelo de la **figura 8**, en el lado izquierdo estan los siete flujos de calor mencionados y en el lado derecho la variación con el tiempo del calor acumulado en el techo.

$$[SW_{down}-SW_{up}+LW_{down}-LW_{up}-Q_{cond}-Q_{conv}-Q_{latent}] * A = m * C_{roof} * \frac{d}{dt} \left[\frac{T_{roof} - T_{ceil}}{2} \right] \quad (20)$$

Ecuaciones para los siete flujos de calor presentes en el techo [3].

$$Shortwave_{down} = Directa + Difusa$$

$$Shortwave_{up} = \alpha \cdot Shortwave_{down}$$

$$longwave_{down} = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{air}^4$$

$$longwave_{up} = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{roof}^4$$

$$Q_{convection} = h \cdot (T_{roof} - T_{air})$$

$$Q_{conduction} = k \cdot \frac{(T_{roof} - T_{ceiling})}{d_x}$$

$$Q_{latent} = \begin{cases} 0 & \text{techos no verdes} \\ \frac{Q_{convection}}{\beta} & \text{techos verdes} \end{cases}$$

en donde:

α : Reflectividad del techo

σ : Cte de Stefan Boltzman.

| | |
|---|---|
| T_{air} :Temperatura de aire externo | k :Conductividad térmica del techo |
| T_{roof} :Temperatura de superficie exterior | β :Relación de Bowen. |
| $T_{ceiling}$:Temperatura de superficie interior | d_x :Grosor techo. |
| ϵ_s :Emisividad del techo | C_{roof} :calor específico del techo. |
| h :coeficiente de convección. | A : Area del techo. |
| u :Velocidad del viento. | m : Masa del techo. |

5.1.1.1 Determinación del coeficiente de convección externo (h)

En el estudio hecho por Gaffin [7] se determina el coeficiente de convección externo por medio de la **ecuación 21**.

$$h=5.82*(L)^{0.2}*u^{0.8} \frac{W}{m^2k} \quad (21)$$

Esta ecuación se utiliza para placas planas horizontales y convección forzada, se expresa en función de la velocidad del viento (u) y la longitud característica de la superficie (L), funciona para valores de $u > 1.75 \text{ m/s}$. La longitud característica para una placa plana horizontal es calculada por la **ecuación 22**.

$$L = \frac{A}{P} \quad (22)$$

Donde (A) es el area de la placa y (p) es el perimetro.

5.1.1.2 Relación de Bowen.

Es una relación entre el calor sensible y el calor latente que se presenta en un cuerpo. Estudios anteriores sobre techos verdes han mostrado que el valor del coeficiente de Bowen se encuentra entre 0,12 y 0,35 [7].

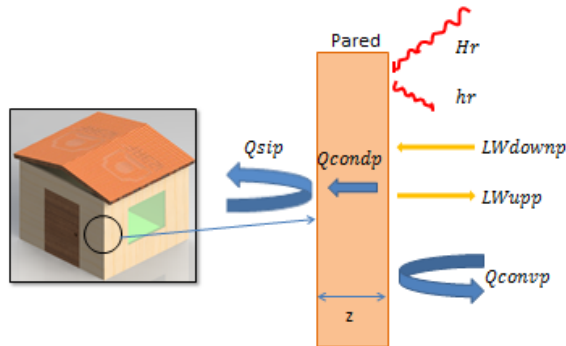
5.1.2 Balance térmico para las paredes

Otro balance necesario para construir un modelo matemático global de un recinto es el de las paredes. Es un balance similar al usado para el techo, ver **ecuación 23**, de igual manera que para los techos no verdes el calor latente no

se tiene en cuenta; además para el balance de energía la radiación de onda corta que incide en las paredes es llamada H_R y la que se refleja h_r , ver **figura 9**.

Las radiaciones incidente y reflejada sobre las paredes son menores que la radiación solar total incidente y reflejada sobre una superficie horizontal. H_R se calcula por medio de la **ecuación 14** y h_r es el producto de la reflectividad de la pared (α_p) con H_R . Se usaron algunos símbolos del balance anterior con el subíndice “p” para distinguir que el balance es para las paredes.

Figura 9. Flujos de calor sobre la pared.



$$[H_R - h_r + LW_{downp} - LW_{upp} - Q_{sip} - Q_{convp}] \cdot A_p = m_p \cdot C_{pared} \cdot \frac{d}{dt} \left[\frac{T_{pe} - T_{pi}}{2} \right] \quad (23)$$

Ecuaciones para los términos de lado izquierdo de la **ecuación 23**:

$$H_R = (H - H_d) \cdot R_b + H_d \cdot R_d + H \cdot \rho_r \cdot R_r$$

$$h_r = \alpha_p \cdot H_R$$

$$longwave_{downp} = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{air}^4$$

$$longwave_{upp} = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{pe}^4$$

$$Q_{convp} = h \cdot (T_{pe} - T_{air})$$

$$Q_{condp} = k_p \cdot \frac{(T_{pe} - T_{pi})}{z}$$

En donde:

α_p : Reflectividad de pared

σ : Cte de Stefan Boltzman.

T_{air} : Temperatura de aire externo

T_{pe} : Temperatura exterior de pared

T_{pi} : Temperatura interior de pared

ϵ_p : Emisividad del pared

u : Velocidad del viento.

k_p : Conductividad térmica de pared

H_R : Radiación de pared.

H : Radiación total.

H_d : Radiación difusa.

ρ_r : Reflectividad de piso.

C_{pared} : calor específico de piso.

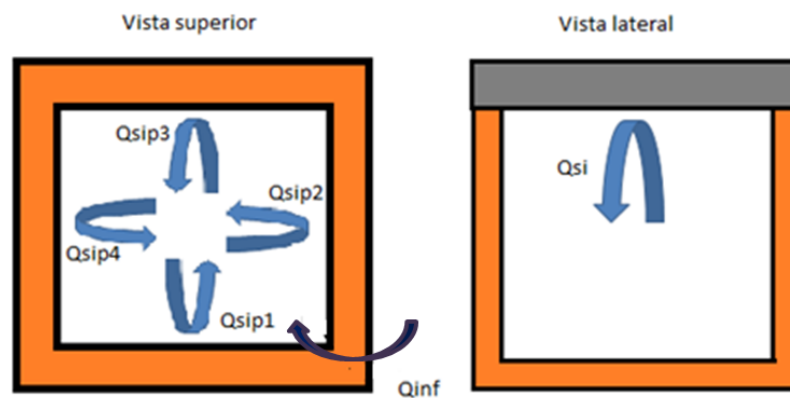
A_p : Area de pared.

m_p : Masa de pared.

5.1.3 Balance térmico para el ambiente interior

Para completar el modelo matemático se hace el balance energético en estado transitorio para el aire interior del recinto. Se requiere el calor convectivo interno desde cada pared y el techo, se desprecia el intercambio de calor por radiación y se introduce un termino para cuantificar el calor perdido por infiltraciones de aire (Q_{inf}), ver **figura 10**. El calor convectivo interno desde el techo es llamado (Q_{si}) y para las paredes (Q_{sip}) con el subíndice (1,2,3,4) que indica la pared. La **ecuacion 24** representa este balance.

Figura 10. Calores para el balance interno.



$$Q_{si} + Q_{sip1} + Q_{sip2} + Q_{sip3} + Q_{sip4} + Q_{inf} = \rho_{air} \cdot V_{air} \cdot C_{air} \cdot \frac{d}{dt} [T_{airi}] \quad (24)$$

Las ecuaciones para los calores sensibles y por infiltraciones son:

$$Q_{sip1} = h_i \cdot A_p \cdot (T_{p1i} - T_{airi})$$

$$Q_{sip2} = h_i \cdot A_p \cdot (T_{p2i} - T_{airi})$$

$$Q_{sip3} = h_i \cdot A_p \cdot (T_{p3i} - T_{airi})$$

$$Q_{sip4} = h_i \cdot A_p \cdot (T_{p4i} - T_{airi})$$

$$Q_{si} = h_{it} \cdot A_t \cdot (T_{ceil} - T_{airi})$$

$$Q_{inf} = \frac{C_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V_{inf} \cdot (T_{air} - T_{airi})}{3600}$$

En donde:

T_{airi} : Temperatura de aire interno.

h_i : Coeficiente de convección interno paredes.

T_{pe} : Temperatura exterior de pared

h_{it} : Coeficiente de convección interno techo.

T_{pi} : Temperatura interior de pared

T_{ceil} : Temperatura interior de techo

C_{air} : Calor específico del aire.

A_p : Area de pared.

ρ_{air} : densidad del aire.

A_t : Area de techo.

V_{inf} : Volumen de infiltraciones.

V_{air} : Volumen de aire en el recinto.

5.1.3.1 Determinación del coeficiente de convección interno (h_i).

Dentro de los recintos el intercambio de calor entre las paredes y el aire se da por convección natural, para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección interno (h_i) se utilizan fórmulas propuestas en el libro de Cengel [4] para superficies planas ubicadas de manera horizontal y vertical. Existe un número adimensional llamado Nusselt (Nu) que representa el gradiente de temperatura adimensional en la superficie. Este número está en función del coeficiente de convección (h_i), la conductividad térmica del aire (k) y la longitud característica (L) del cuerpo sometido a convección, ver **ecuación 25**.

$$Nu = \frac{h_i \cdot L}{k} \quad (25)$$

El número de Nusselt se determina gracias a los números adimensionales de Grashof (Gr) y Prandtl (Pr) [4], que se calculan por medio de las **ecuaciones 26 y 27**.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (26)$$

$$Pr = \frac{\nu^* C_v}{k} \quad (27)$$

En donde:

hi: Coeficiente de convección ($w/m^2 \cdot k$)

g: Constante de gravedad (m/s^2)

β : Coeficiente de expansión volumétrica ($1/k$).

ν : Viscosidad cinemática (m^2/s)

T_s : Temperatura de superficie (k)

T_∞ : Temperatura del aire (k)

k: Conductividad térmica del aire ($w/m \cdot k$)

L: Longitud característica (m)

C_v : Calor específico del air ($j/kg \cdot k$).

El número de Grashof representa la razón entre la fuerza de empuje y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido [4].

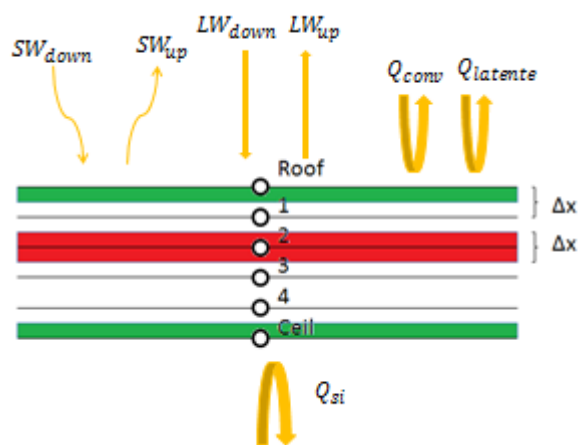
El producto entre el número de Grashof y Prandlt se conoce como número de Rayleigh que se determina por medio de la **ecuación 28**, existen algunas relaciones para determinar el número de Nusselt en función del número de Rayleigh cuando hay convección natural sobre superficies planas ubicadas de manera horizontal y vertical.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (28)$$

Relaciones entre los números de Nusselt y Rayleigh para superficies planas se muestran en la **Tabla 1**, se usó para las paredes la fórmula de placa vertical para todo el intervalo, mientras para el techo se usó la fórmula para placa horizontal en la que la superficie caliente es la parte inferior de la placa.

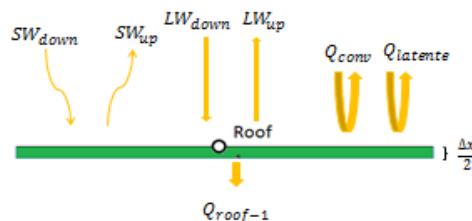
La siguiente es la formulación en diferencias finitas por el método explícito para el techo, en primer lugar se asume que está dividido en secciones Δx , la **figura 11** denota los nodos frontera e internos a los cuales se aplican balances térmicos que permiten la predicción de las temperaturas. Los calores que se muestran en los nodos interiores son calores por conducción, el término de la derecha de cada ecuación muestra el significado físico de la acumulación del calor.

Figura 11. Esquema del techo dividido en secciones Δx .



A continuación se muestra el balance que se hace a cada nodo para obtener la ecuación que servirá para predecir su temperatura en los tiempos futuros, los nodos superficiales (Roof y ceil) tienen la mitad del espesor que los nodos internos.

Nodo frontera Roof.



$$SW_{down} - SW_{up} + LW_{down} - LW_{up} - Q_{conv} - Q_{latente} - Q_{roof-1} = C_{roof} * \rho * \frac{\Delta X}{2} * \frac{T_{roof}^{i+1} - T_{roof}^i}{\Delta t} \quad (29)$$

Q_{roof-1} , Q_{1-2} , Q_{2-3} , Q_{3-4} , Q_{4-ceil} son los calores por conducción que se identifican al realizar balances energéticos en cada nodo perteneciente al sistema en estudio.

Nodo interior 1



$$Q_{roof-1} - Q_{1-2} = C_{roof} * \rho * \Delta X * \frac{T_1^{i+1} - T_1^i}{\Delta t} \quad (30)$$

Nodo interior 2



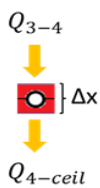
$$Q_{1-2} - Q_{2-3} = C_{roof} * \rho * \Delta X * \frac{T_2^{i+1} - T_2^i}{\Delta t} \quad (31)$$

Nodo interior 3



$$Q_{2-3} - Q_{3-4} = C_{roof} * \rho * \Delta X * \frac{T_3^{i+1} - T_3^i}{\Delta t} \quad (32)$$

Nodo interior 4



$$Q_{3-4} - Q_{4-ceil} = C_{roof} * \rho * \Delta X * \frac{T_4^{i+1} - T_4^i}{\Delta t} \quad (33)$$

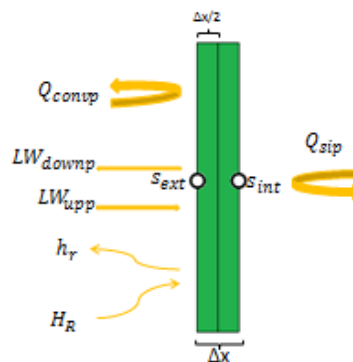
Nodo frontera **Ceil**



$$Q_{4-ceil} - Q_{sensible2} = C_{roof} * \rho * \Delta X * \frac{T_{ceil}^{i+1} - T_{ceil}^i}{\Delta t} \quad (34)$$

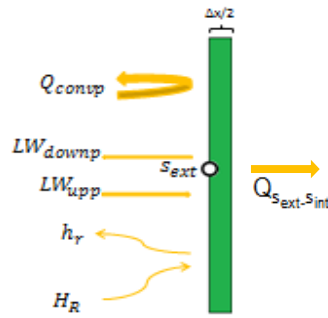
Ahora se realizan los balances de energía que requiere el método de diferencias finitas para las paredes del cerramiento, de igual forma que para el techo, se divide la pared en secciones Δx , resultando dos nodos para analizar.

Esquema de la pared dividida en secciones Δx .



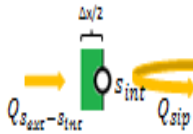
Aplicando a los elementos de volumen de cada nodo superficial (Sext y Sint) el balance de energía en régimen transitorio se obtienen dos ecuaciones para predecir temperaturas.

Nodo frontera superficie externa S_{ext}



$$LW_{downp} - LW_{uppp} + H_R - H_R \rho_r - Q_{convp} - Q_{S_{ext}-S_{int}} = C_p \frac{\Delta x}{2} \rho_p \frac{T_{S_{ext}}^{i+1} - T_{S_{ext}}^i}{\Delta t} \quad (35)$$

Nodo frontera superficie interna S_{int}



$$Q_{S_{ext}-S_{int}} - Q_{sip} = C_p \frac{\Delta x}{2} \rho_p \frac{T_{S_{int}}^{i+1} - T_{S_{int}}^i}{\Delta t} \quad (36)$$

Por último se discretiza la **ecuación 24** que se obtuvo al hacer el balance energético del aire interno en los habitáculos y se obtiene la **ecuación 37**.

$$Q_{si} + Q_{sip1} + Q_{sip2} + Q_{sip3} + Q_{sip4} - Q_{inf} = \rho_{air} \cdot V \cdot C_{air} \cdot \frac{T_{airi}^{i+1} - T_{airi}^i}{\Delta t} \quad (37)$$

Como se puede observar cada una de las ecuaciones tiene un término con el superíndice (i+1), al despejar este término en cada ecuación y conociendo todos los términos del lado derecho se pueden predecir las temperaturas requeridas.

5.3 Aplicación de los modelos a cada cerramiento.

A continuación se especifican las propiedades físicas de cada habitáculo, se obtienen de diferentes fuentes ver **Anexos A.1** y **A.2**, además se detallan los

modelos matemáticos para cada módulo y se despejan las ecuaciones quedando en función de las temperaturas predichas.

5.3.1 Parámetros de las paredes

La **figura 12** muestra los calores necesarios para el balance de energía en la pared, de donde se obtuvieron las **ecuaciones 35 y 36**, al despejar la expresión con subíndice $(i + 1)$ se obtienen las **ecuaciones 38 y 39** para predecir temperatura.

Dato de las paredes, ver **Anexo A.1 y A.2**.

$$\rho_r = 0.26$$

$$k_p = 0.163 \frac{w}{m^2k}$$

$$\alpha_p = 0.50$$

$$C_p = 1298 \frac{j}{kg.k}$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{w}{m^2k^4}$$

$$\rho_p = 300 \frac{kg}{m^3}$$

$$\epsilon_p = 0.91$$

Ecuaciones requeridas:

$$LW_{downp(i)} = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{air(i)}^4$$

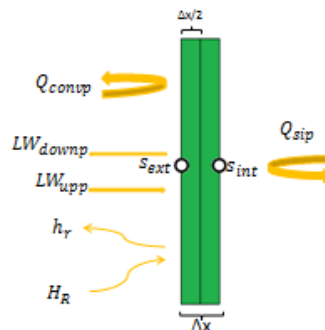
$$Q_{condp(i)} = k_p \cdot \frac{(T_{Sext(i)} - T_{Sint(i)})}{\Delta z}$$

$$LW_{uppp(i)} = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot T_{Sext(i)}^4$$

$$Q_{sip(i)} = h_i \cdot (T_{Sint(i)} - T_{air(i)})$$

$$Q_{convp(i)} = h \cdot (T_{Sext(i)} - T_{air(i)})$$

Figura 12. Flujos de calor sobre una pared.



Nodo de superficie exterior (Sext).

$$T_{Sext(i+1)} = \left(\left(\frac{L_{wdp(i)} - L_{upp(i)} - H_R - H_{R,\alpha p} - Q_{convp} - Q_{condp}}{C_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta Z}{2}} \right) * \Delta t \right) + T_{Sext(i)} \quad (38)$$

Nodo de superficie interior (Sint).

$$T_{Sint(i+1)} = \left(\frac{k_p}{\Delta Z} (T_{Sext(i)} - T_{Sint(i)}) - Q_{sip(i)} \right) * \left(\frac{\Delta t}{C_{roofp} \cdot \rho_p \cdot \frac{\Delta Z}{2}} \right) + T_{Sint(i)} \quad (39)$$

5.3.2 Parámetros de la placa de concreto

A continuación se muestra la placa de concreto, con el número de nodos propuestos ver **figura 13**, a cada nodo se le hace un balance energético y se obtienen las ecuaciones 40 hasta la 44, que predicen la temperatura de cada nodo en un intervalo de tiempo Δt .

Datos de la placa de concreto, ver **Anexo A.1** y **A.2**.

$$\epsilon_c = 0.54$$

$$\alpha_c = 0.37$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$k_c = 0.8 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$C_{roofc} = 880 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho_c = 1800 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Delta z = 0.02 \text{ m}$$

$$l = 4 * \Delta z = 0,8 \text{ m}$$

Ecuaciones:

$$SW_{down(i)} = \text{Radiación directa} + \text{Radiación difusa}$$

$$SW_{up(i)} = \alpha_c \cdot SW_{down(i)}$$

$$LW_{down(i)} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{air(i)}^4$$

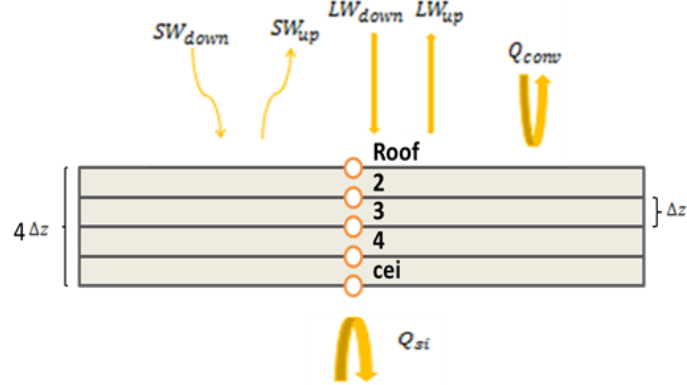
$$LW_{up(i)} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{roof(i)}^4$$

$$Q_{conv(i)} = h \cdot (T_{roof(i)} - T_{air(i)})$$

$$Q_{roof-2(i)} = k_c \cdot \frac{(T_{roof(i)} - T_{2(i)})}{\Delta Z}$$

$$Q_{si(i)} = h_i \cdot (T_{cei(i)} - T_{airi(i)})$$

Figura 13. Nodos en Placa de concreto.



Ecuaciones de Predicción de temperatura para cada uno de los nodos.

Nodo Roof.

$$T_{roof(i+1)} = \left(\left(\frac{S_{wd(i)} - S_{up(i)} + L_{wd(i)} - L_{up(i)} - Q_{cond(i)} - Q_{conv(i)}}{C_{roofc} \cdot \rho_c \cdot \frac{\Delta z}{2}} \right) * \Delta t \right) + T_{roof(i)} \quad (40)$$

Nodo 2

$$T_{2(i+1)} = \left(k_t * \Delta t \frac{((T_{roof(i)} - T_{2(i)}) - (T_{2(i)} - T_{3(i)}))}{C_{roofc} \cdot \rho_c \cdot \Delta z^2} \right) + T_{2(i)} \quad (41)$$

Nodo 3

$$T_{3(i+1)} = \left(k_c * \Delta t \frac{((T_{2(i)} - T_{3(i)}) - (T_{3(i)} - T_{4(i)}))}{C_{roofc} \cdot \rho_c \cdot \Delta z^2} \right) + T_{3(i)} \quad (42)$$

Nodo 4

$$T_{4(i+1)} = \left(k_c \cdot \Delta t \frac{((T_{3(i)} - T_{4(i)}) - (T_{4(i)} - T_{ceil(i)}))}{C_{roofc} \cdot \rho_c \cdot \Delta z^2} \right) + T_{4(i)} \quad (43)$$

Nodo ceil

$$T_{cei(i+1)} = \left(\frac{k_c}{\Delta z} (T_{4(i)} - T_{cei(i)}) - Q_{si(i)} \right) \left(\Delta t / C_{roofc} \cdot \rho_c \cdot \frac{\Delta z}{2} \right) + T_{cei(i)} \quad (44)$$

5.3.3 Parámetros techo verde

A continuación se muestra la distribución de los nodos en el techo verde y el número de nodos propuestos ver **figura 14**, de igual manera en cada nodo se hace un balance energético y se obtienen las ecuaciones 45 hasta la 50, que predicen la temperatura en cada uno de ellos en un intervalo de tiempo Δt .

Datos del techo verde, ver **Anexos A.1** y **A.2**.

$$\alpha_v = 0.8$$

$$\rho_v = 476 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$\beta = 0.35$$

$$\varepsilon_v = 0.96$$

$$\Delta z = 0.02 \text{ m}$$

$$k_v = 0.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$L = 5 \cdot \Delta z = 10 \text{ cm}$$

$$C_{roofv} = 870 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Ecuaciones:

$$SW_{down(i)} = \text{Radiación directa} + \text{Radiación difusa}$$

$$SW_{up(i)} = \alpha_v \cdot SW_{down(i)}$$

$$LW_{down(i)} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot T_{air(i)}^4$$

$$LW_{up(i)} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot T_{roof(i)}^4$$

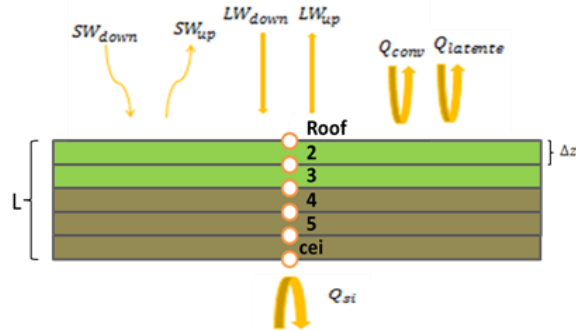
$$Q_{conv(i)} = h \cdot (T_{roof(i)} - T_{air(i)})$$

$$Q_{\text{roof-2}(i)} = k_v \cdot \frac{(T_{\text{roof}(i)} - T_{2(i)})}{\Delta Z}$$

$$Q_{\text{si}(i)} = h_i \cdot (T_{\text{cei}(i)} - T_{\text{air}(i)})$$

$$Q_{\text{latente}(i)} = Q_{\text{conv}(i)} / \beta$$

Figura 14. Nodos en techo verde.



Nodo Roof

$$T_{\text{roof}(i+1)} = \left(\left(\frac{(S_{\text{wd}(i)} - S_{\text{up}(i)} + L_{\text{wd}(i)} - L_{\text{up}(i)} - Q_{\text{cond}(i)} - Q_{\text{conv}(i)} - Q_{\text{latente}(i)})}{(C_{\text{roofc}} \cdot \rho_c \cdot \frac{\Delta Z}{2})} \right) * \Delta t \right) + T_{\text{roof}(i)} \quad (45)$$

Nodo 2

$$T_{2(i+1)} = \left(k_v * \Delta t \frac{((T_{\text{roof}(i)} - T_{2(i)}) - (T_{2(i)} - T_{3(i)}))}{C_{\text{roofv}} * \rho_v * \Delta Z^2} \right) + T_{2(i)} \quad (46)$$

Nodo 3

$$T_{3(i+1)} = \left(k_v * \Delta t \frac{((T_{2(i)} - T_{3(i)}) - (T_{3(i)} - T_{4(i)}))}{C_{\text{roofv}} * \rho_v * \Delta Z^2} \right) + T_{3(i)} \quad (47)$$

Nodo 4

$$T_{4(i+1)} = \left(k_v * \Delta t \frac{((T_{3(i)} - T_{4(i)}) - (T_{4(i)} - T_{5(i)}))}{C_{roofv} * \rho_v * \Delta Z^2} \right) + T_{4(i)} \quad (48)$$

Nodo 5

$$T_{5(i+1)} = \left(k_v * \Delta t \frac{((T_{4(i)} - T_{5(i)}) - (T_{5(i)} - T_{cei(i)}))}{C_{roofv} * \rho_v * \Delta Z^2} \right) + T_{5(i)} \quad (49)$$

Nodo ceil

$$T_{cei(i+1)} = \left(\frac{k_v}{\Delta Z} (T_{5(i)} - T_{cei(i)}) - Q_{si(i)} \right) \left(\frac{\Delta t}{C_{roofv} * \rho_v * \frac{\Delta Z}{2}} \right) + T_{cei(i)} \quad (50)$$

5.3.4 Parámetros de la teja termo-acústica

A continuación se muestra la distribución de los nodos para este techo con el número de nodos propuestos ver **figura 15**, en cada nodo se hace un balance energético y se obtienen las ecuaciones 51 y 52 que predicen la temperatura en cada uno de ellos cada intervalo de tiempo Δt .

Datos de la Teja termoacústica, Ver **Anexos A.1** y **A.2**.

$$\alpha_t = 0.1$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$\varepsilon_t = 0.95$$

$$k_t = 0.16 \frac{W}{m^2 K}$$

$$C_{rooft} = 920 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho_t = 1800 \frac{kg}{m^3}$$

$$L = \Delta z = 0.5 \text{ cm}$$

Ecuaciones:

$$SW_{down(i)} = \text{Radiación directa} + \text{Radiación difusa}$$

$$SW_{up(i)} = \alpha_t \cdot SW_{down(i)}$$

$$LW_{down(i)} = \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot T_{air(i)}^4$$

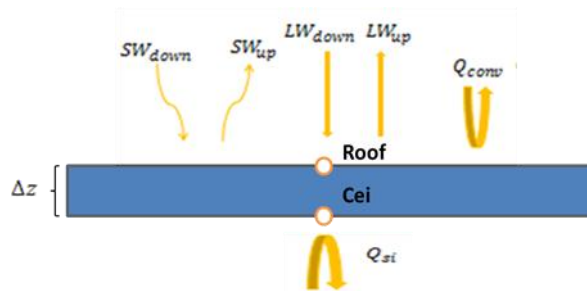
$$LW_{up(i)} = \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot T_{roof(i)}^4$$

$$Q_{conv(i)} = h \cdot (T_{roof(i)} - T_{air(i)})$$

$$Q_{roof-cei(i)} = k_t \cdot \frac{(T_{roof(i)} - T_{cei(i)})}{\Delta z}$$

$$Q_{si(i)} = h_i \cdot (T_{cei(i)} - T_{air(i)})$$

Figura 15. Nodos en teja termoacústica.



Nodo Roof

$$T_{roof(i+1)} = \left(\left(\frac{(S_{wd(i)} - S_{up(i)} + L_{wd(i)} - L_{up(i)} - Q_{cond(i)} - Q_{conv(i)})}{C_{roof} \cdot \rho_t \cdot \frac{\Delta z}{2}} \right) \cdot \Delta t \right) + T_{roof(i)} \quad (51)$$

Nodo ceil

$$T_{cei(i+1)} = \left(\frac{k_t}{\Delta z} (T_{roof(i)} - T_{cei(i)}) - Q_{si(i)} \right) \left(\frac{\Delta t}{C_{roof} \cdot \rho_t \cdot \frac{\Delta z}{2}} \right) + T_{cei(i)} \quad (52)$$

Por último se hace la predicción de temperatura del aire interno para todos los habitáculos por medio de la **ecuación 53** obtenida del balance energético que se le hizo al aire en el interior de cada recinto.

$$T_{air(i+1)} = \left((Q_{si(i)} + Q_{sip1(i)} + Q_{sip2(i)} + Q_{sip3(i)} + Q_{sip4(i)} - Q_{inf(i)}) \cdot \left(\frac{\Delta t}{(C_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V)} \right) \right) + (T_{air(i)}) \quad (53)$$

6. MONTAJE EXPERIMENTAL

El arreglo experimental comprende básicamente la construcción de los prototipos de habitación, la adecuación de los mismos y el desarrollo del sistema de monitoreo con la sensórica y adquisición de datos respectiva. La disposición de todo es denominada estación de investigación.

6.1 Selección del lugar y proceso de construcción de los cerramientos

Siendo este un proyecto en la modalidad de investigación, dentro de los objetivos se propuso la construcción de tres cerramientos necesarios para el desarrollo del estudio. Inicialmente se eligió un lugar accesible, poco sombreado y con terreno sólido. El lugar escogido fue el invernadero de la UIS, se delimitó un área aproximada de 16 m², la cual se adecuó para dar inicio a la construcción, ver **figura 16**.

Figura 16. Adecuación del terreno.



Con ayuda de un arquitecto con experiencia en construcción se hace el diseño y construcción de los habitáculos, cada cerramiento cuenta con dimensiones de 1.5 metros de ancho, 1.5 metros de largo y 1.6 metros de altura, la estructura

de cada cerramiento está compuesta por vigas y columnas, como se puede ver en la **figura 17**.

Figura 17. Marco de habitáculos.



El primer módulo que se hizo fue el que tiene el techo en placa de concreto, cabe resaltar que es una placa estructural de esfuerzo aproximado 3000 psi, de ocho centímetros de espesor, a continuación se muestra el proceso de conformación.

Para verter la mezcla de concreto y formar la placa, se hace un cajón (formaleta) en donde se debe disponer de una red hecha con acero (varilla) necesaria para dar rigidez al concreto como se muestra en la **figura 18**.

Figura 18. Red de acero.



Después de fundir la placa se debe esperar por lo menos dos o tres semanas para retirar la formaleta, durante este periodo el concreto adquiere consistencia y rigidez para finalmente quedar a punto, por último se encierra el modulo y se tiene el siguiente habitáculo para experimentación, ver **figura 19**.

Figura 19. Módulo placa de concreto.



El segundo habitáculo puesto en ejecución fue el de techo en teja termoacústica, se usó una teja ondulada azul (AJOVER A 360) que está compuesta por un alma de aluminio recubierta en asfalto. Habiendo terminado el marco del habitáculo se hizo otro marco para ubicar la teja, el cual posee una inclinación de 4°, necesario y justo para hacer fluir el agua; después de asegurar la teja en el marco y cerrar el modulo obtenemos el prototipo dispuesto para el estudio, ver **figura 20**.

Figura 20. Marco y módulo de teja termoacústica.



El último módulo construido fue el de techo verde o green roof. Para la conformación de este techo también se hizo un marco inclinado con una pendiente del 10%, inclinación que según la literatura [6] en construcción de techos verdes es adecuada para evacuar gradualmente el exceso de agua presente en el techo.

El marco inclinado sobre el cual reposa el techo verde es especial, en su parte superior tiene un cajón para delimitar el área como se muestra en la **figura 21**.

Figura 21. Cajón para el techo verde.



Sobre este marco se instaló primero una tela anti-raíz e impermeabilizante panaflex (tela blanca), seguido por una tela denominada geo-textil tejido GTX W (tela negra), esta capa hace de filtro para el agua, también sirve para dar firmeza al sustrato impidiendo que este se deslice en el techo, ver **figura 22**.

Figura 22. Tela anti raíz y geotextil.



Posteriormente siguiendo las recomendaciones de la literatura [6] en construcción de techos verdes, se dispuso un filtro en la parte inferior del cajón, hecho con grava envuelta en el geo-textil, ver **figura 23**.

Figura 23. Filtro y sustrato del techo verde.



Se utilizó la planta que comúnmente llaman maní forrajero, ver **figura 24**, cuyo nombre científico es *Arachis intoi*, es una planta rastrera de la familia de las leguminosas; se escogió el maní gracias a que su crecimiento suele ser rápido y tiene la capacidad de propagarse fácilmente. En Bucaramanga el maní forrajero se utiliza para enjardinados por su vistosidad, ya que posee una florecita amarilla que resalta; dentro de la Universidad Industrial de Santander se observa el maní en la mayor parte de los jardines existentes, otra razón por la cual se escogió fue porque posee una hoja en forma de lóbulos de gran área lo que permite dar más sombra al techo, además de que aprovechan la radiación solar al máximo para sus procesos biológicos.

Figura 24. Maní forrajero.



Fuente: <http://terranostra-terranostra.blogspot.com>

A continuación se muestra el maní forrajero sembrado en el techo, básicamente en cuatro semanas la planta creció y se esparció por casi todo el techo, ver **Figura 25**.

Figura 25. Techo con Maní forrajero.



En la tarea de encerrar los módulos se presentaron algunos espacios (rendijas) que permiten el ingreso de corrientes de aire debido a la asimetría de las tablas, que afectan térmicamente a cada recinto. Se trató de minimizar al máximo estos accesos en cada habitáculo con una cinta de papel con el fin de crear las condiciones térmicas similares y poder hacer una comparación más confiable con los datos adquiridos, ver **figura 26**.

Figura 26. Cinta para rendijas.



Al final se pueden observar los tres módulos orientados Norte-Sur para facilitar los cálculos de los modelos matemáticos propuestos. Como se dijo anteriormente el conjunto conformado por el lugar, los tres módulos y la sensórica se le denomina estación de investigación, ver **figura 27**.

Figura 27. Estación de investigación



6.2 Sistema de monitoreo: Sensórica y adquisición de datos

Otro aspecto a considerar en el montaje experimental es un sistema de monitoreo en el cual se utilizan sensores para medir temperaturas superficiales tanto internas como externas de las paredes y techos, temperatura del aire interior en el recinto y otras variables como radiación solar y velocidad del viento.

Para el monitoreo de la temperatura del aire interno se utilizaron sensores de temperatura llamados LM35dz⁴, este sensor tiene un rango para medir temperatura de -55° C a 150° C, la calibración de este sensor es sencilla y la

⁴ LM35dz: Sensor de temperatura fabricado por Texas Instruments

Para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta Arduino mega, ver **figura 30**, esta es una de las placas expuestas por ARDUINO, que es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles, fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier interesado en crear entornos u objetos interactivos⁵.

Figura 30. Tarjeta de adquisición.

Arduino Mega



Fuente: //arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardMega.

El Laboratorio de Sistemas Térmicos de Ingeniería Mecánica prestó dos piranómetros previamente adaptados para monitorear radiación solar directa y difusa que se presenta en Bucaramanga, ver **figura 31**.

Figura 31. Piranómetros.



⁵ <http://www.arduino.cc/>

La adquisición de estos datos de radiación se hizo por medio de un controlador industrial programable Field-Point, ver **figura 32**. La interfaz gráfica utilizada para visualizar los datos se creó en el software Labview.

Figura 32. Field-Point



La medición de temperaturas de superficie iniciales (paredes y techos) se hizo por medio de la cámara Fluke Ti110 que proporciona las imágenes termográficas (ver **figura 33**), las especificaciones técnicas de este equipo están en el **anexo B.3**. La obtención de datos por este medio exigió el uso de un software llamado SmartView, que es propio de la cámara. Uno de los parámetros importantes en la termografía es la emisividad.

Figura 33. Cámara termográfica fluke Ti110.



El equipo usado para medir temperatura ambiente y velocidad del viento es llamado Air-Meter-fluke 975 (ver **figura 34**), este equipo cuenta con un sistema

que permite captar y guardar datos especificando el tiempo de registro y el intervalo entre muestras, en el **anexo B.4** se dan las especificaciones del equipo. En el periodo de pruebas se programó el equipo para tomar y guardar datos 7 horas del día cada 5 minutos.

Figura 34. Air Meter Fluke.



La toma de datos de radiación y la temperatura de ambiente interior en cada recinto se hizo cada tres segundos durante 6 horas del día; otras variables como la temperatura del ambiente exterior y la velocidad del viento se monitorearon cada 5 minutos, la experimentación se hizo en dos sesiones de prueba, la primera sesión el 9 de abril y la segunda sesión el 28 de mayo.

7. VALIDACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

La manera de verificar si los modelos matemáticos propuestos están funcionando correctamente se denomina validación, en este caso es posible decir que la validación del modelo se hace al comparar los datos tomados experimentalmente con los datos que predice el modelo.

Para este estudio las variables predichas por el modelo matemático son las temperaturas internas y externas de superficies, y la temperatura del aire en el interior de los recintos.

El modelo físico-matemático hecho por Stuart Gafin [7] para los techos, implementado y adoptado por esta tesis de grado es validado gracias al sistema de monitoreo utilizado y la construcción de los habitáculos.

Este modelo forma parte de un modelo global aplicado a los habitáculos para predecir la temperatura del aire en el interior del recinto, por lo que existen otros modelos para las paredes y para el aire del interior; Sin embargo el modelo de Gafin [7] con algunas cambios y simplificaciones (ver capítulo 3) fue adaptado para las paredes y los otros techos.

7.1 Datos colectados en campo

La captura de datos se hizo entre el 9 y el 17 de abril de 2013 en una primera sesión y entre el 27 y 28 de mayo en una segunda, de los cuales se escogieron dos días, de la primera sesión se escogió el 9 de abril y de la segunda el 28 de mayo, días donde no hubo lluvia y el cielo estuvo despejado.

Las **gráficas 35 y 36** muestran el comportamiento de dos variables, la radiación solar y la temperatura del ambiente exterior medidas durante la primera sesión de pruebas, las **gráficas 37 y 38** muestran el comportamiento de estas variables tomadas en la segunda sesión de pruebas.

Tanto la radiación solar, la temperatura del ambiente exterior y temperaturas iniciales de superficie (paredes y techo) son datos requeridos como entradas para inicializar el programa de computadora y realizar las predicciones.

Figura 35. Radiación solar total observada en la UIS el 9 de abril de 2013

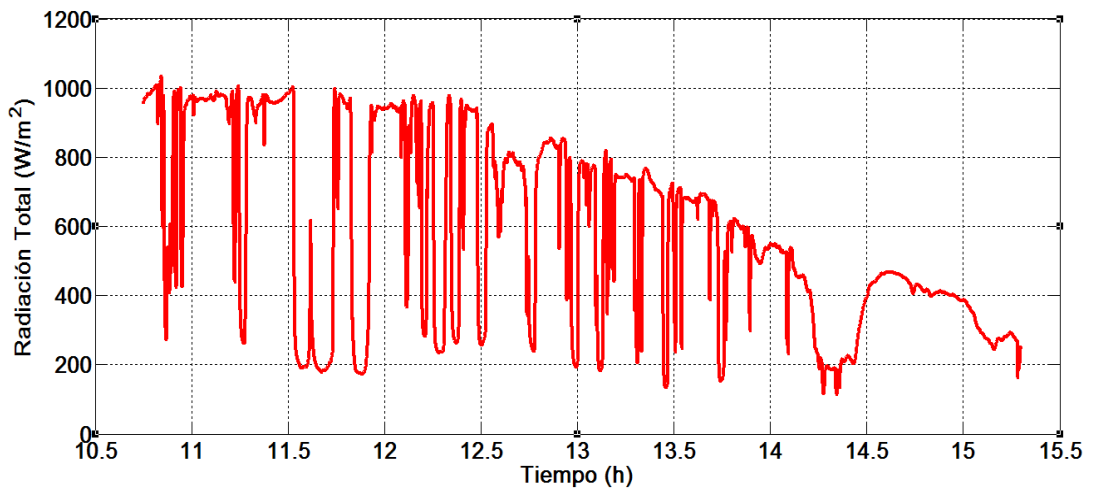


Figura 36. Temperatura ambiente capturada en la estación experimental el 9 de abril de 2013.

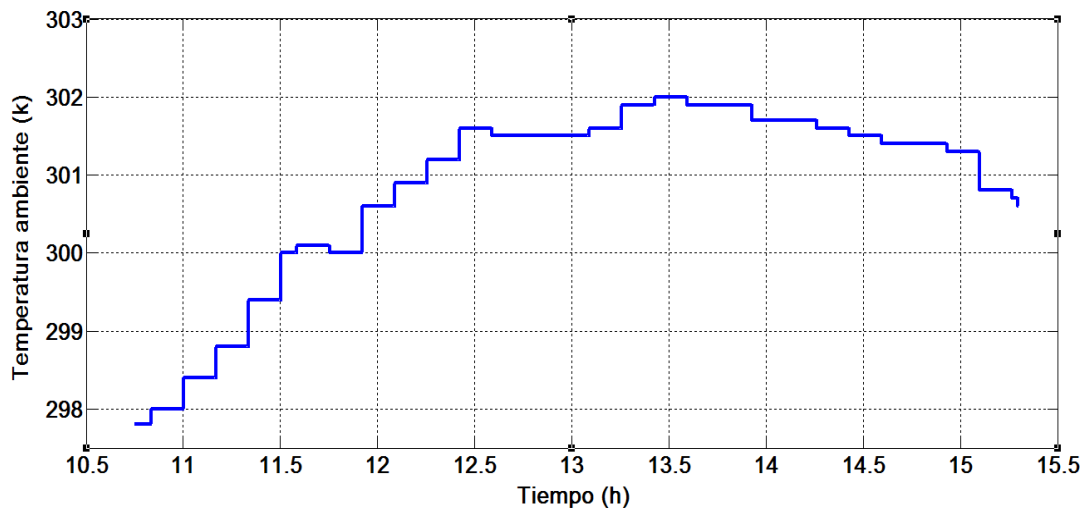


Figura 37. Radiación solar total observada en la UIS el 28 de mayo del 2013.

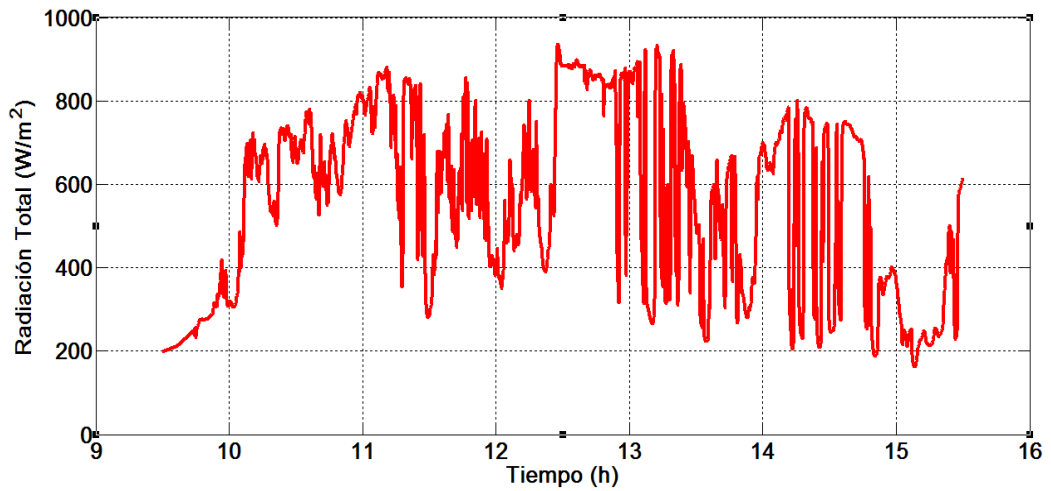
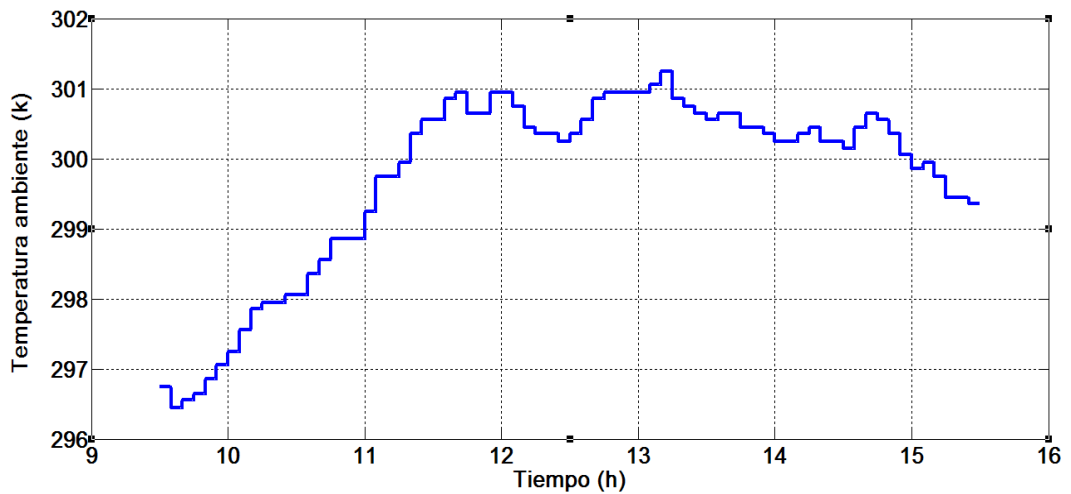
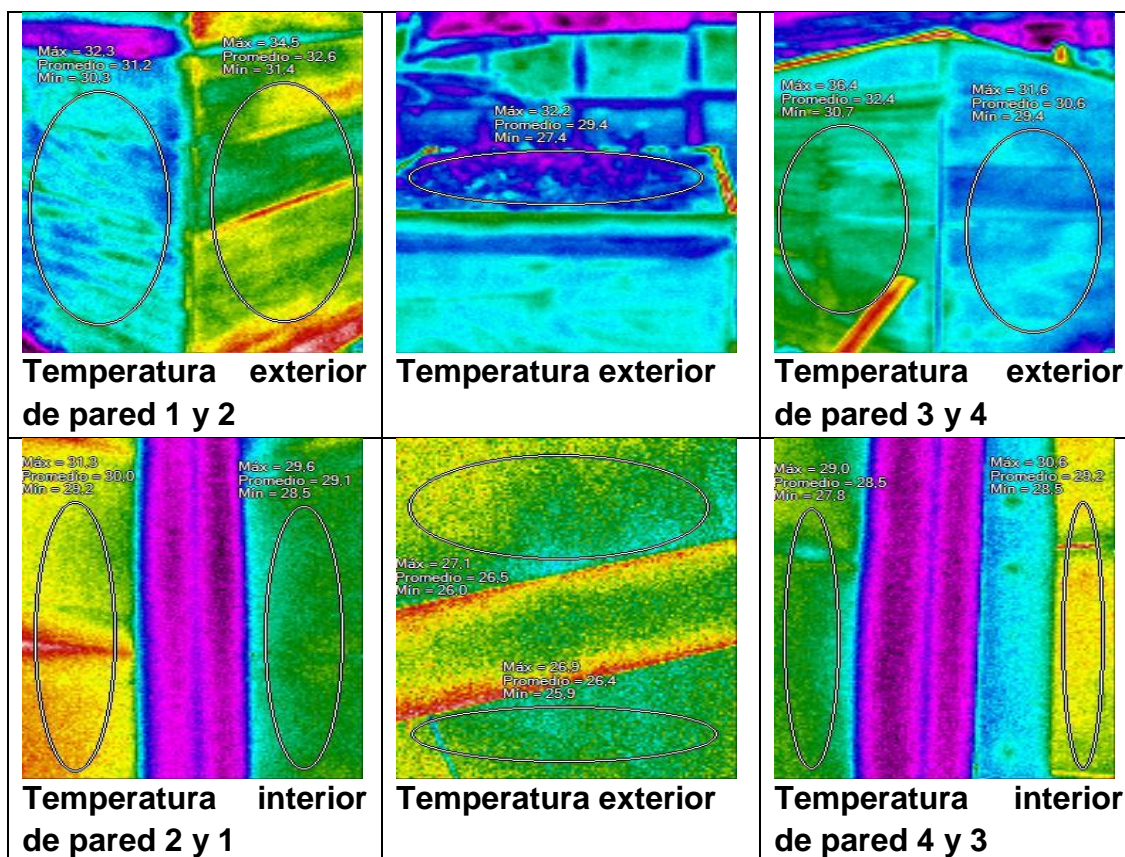


Figura 38. Temperatura ambiente capturada en la estación experimental el 28 de Mayo de 2013.



Las imágenes termo-gráficas capturadas en la estación experimental el 9 de abril de 2013 entregaron las temperaturas de superficie al inicio del día (ver **figura 39, 40 y 41**, y **tablas 2, 3 y 4**). Gracias al software de la cámara Smart-View, se obtienen promedios de temperatura para cada una de las superficies.

Figura 39. Termografía del módulo con techo verde

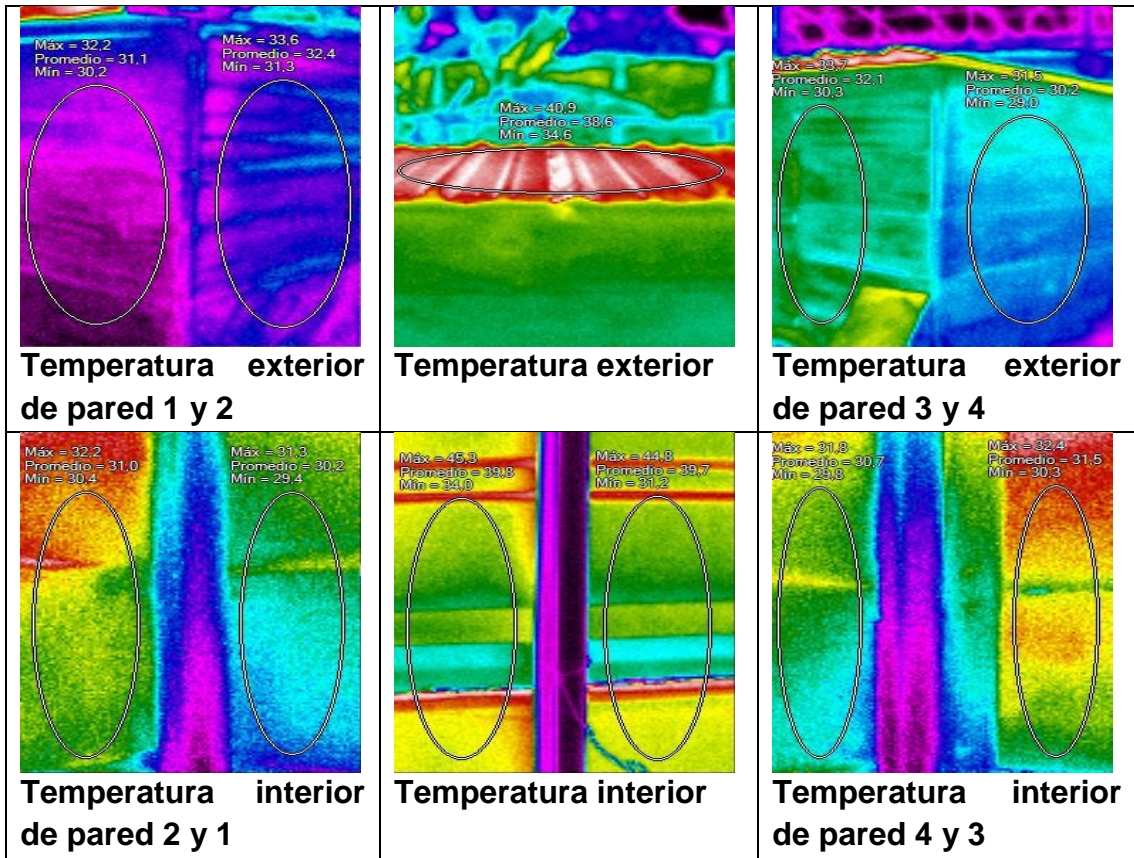


La **tabla 2** muestra las temperaturas de las superficies internas y externas en el módulo con techo verde en el momento inicial de captura de datos.

Tabla 2. Temperatura superficial medida en el módulo con techo verde.

| Superficie | Temperatura promedio (°C) |
|--------------------|---------------------------|
| Exterior del techo | 29.4 |
| Interior del techo | 26.4 |
| Pared 1 exterior | 31.2 |
| Pared 1 interior | 29.1 |
| Pared 2 exterior | 32.6 |
| Pared 2 interior | 30.0 |
| Pared 3 exterior | 32.4 |
| Pared 3 interior | 29.2 |
| Pared 4 exterior | 30.5 |
| Pared 4 interior | 28.5 |

Figura 40. Termografía del módulo con teja termoacústica.

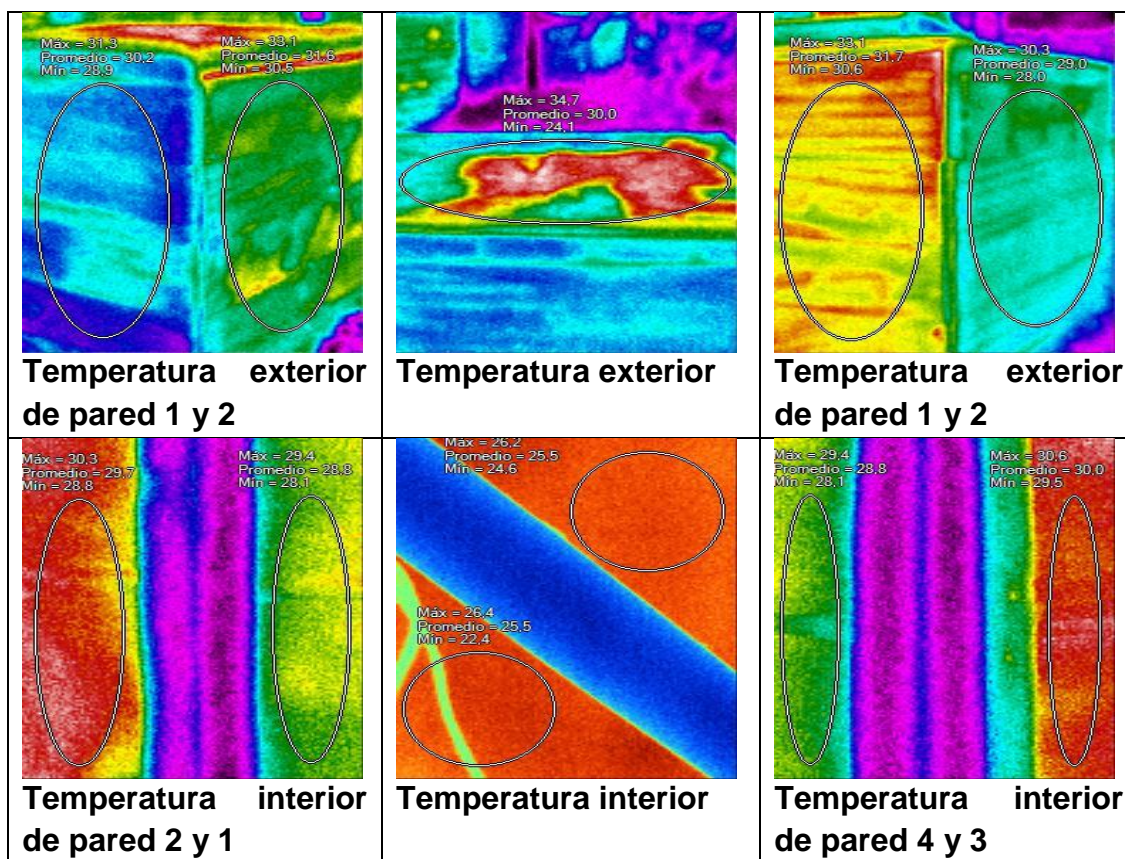


La **tabla 3** muestra las temperaturas de las superficies internas y externas en el módulo con teja termoacústica en el momento inicial de captura de datos.

Tabla 3. Temperatura superficial en el módulo con teja termoacústica.

| Superficie | Temperatura promedio (°C) |
|--------------------|---------------------------|
| Exterior del techo | 38.6 |
| Interior del techo | 39.7 |
| Pared 1 exterior | 31.1 |
| Pared 1 interior | 30.2 |
| Pared 2 exterior | 32.4 |
| Pared 2 interior | 31.0 |
| Pared 3 exterior | 32.1 |
| Pared 3 interior | 31.5 |
| Pared 4 exterior | 30.2 |
| Pared 4 interior | 30.7 |

Figura 41. Termografía del módulo con placa de concreto.



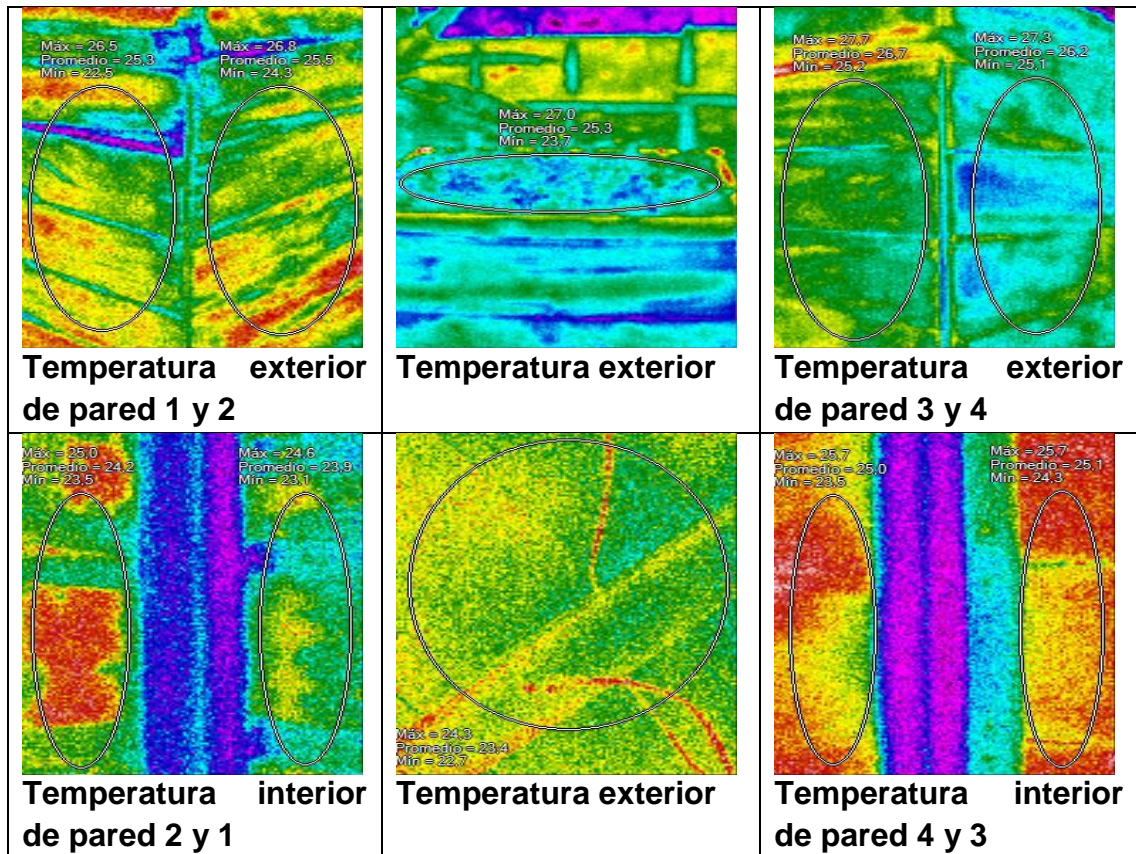
La **tabla 4** muestra las temperaturas de las superficies internas y externas en el módulo con placa de concreto en el momento inicial de captura de datos.

Tabla 4. Temperatura superficial en el módulo con placa de concreto.

| Superficie | Temperatura promedio (°C) |
|--------------------|---------------------------|
| Exterior del techo | 30.0 |
| Interior del techo | 25.5 |
| Pared 1 exterior | 30.2 |
| Pared 1 interior | 28.8 |
| Pared 2 exterior | 31.6 |
| Pared 2 interior | 29.7 |
| Pared 3 exterior | 31.7 |
| Pared 3 interior | 30.0 |
| Pared 4 exterior | 29.0 |
| Pared 4 interior | 28.8 |

A continuación se muestran las imágenes termográficas tomadas en la segunda sesión de pruebas el 28 de mayo del 2013 y las tablas de temperaturas iniciales de superficie en cada habitáculo, ver **figuras 42, 43 y 44** y las **tablas 5,6 y 7**.

Figura 42. Termografía de modulo con techo verde 28 de Mayo 2013.



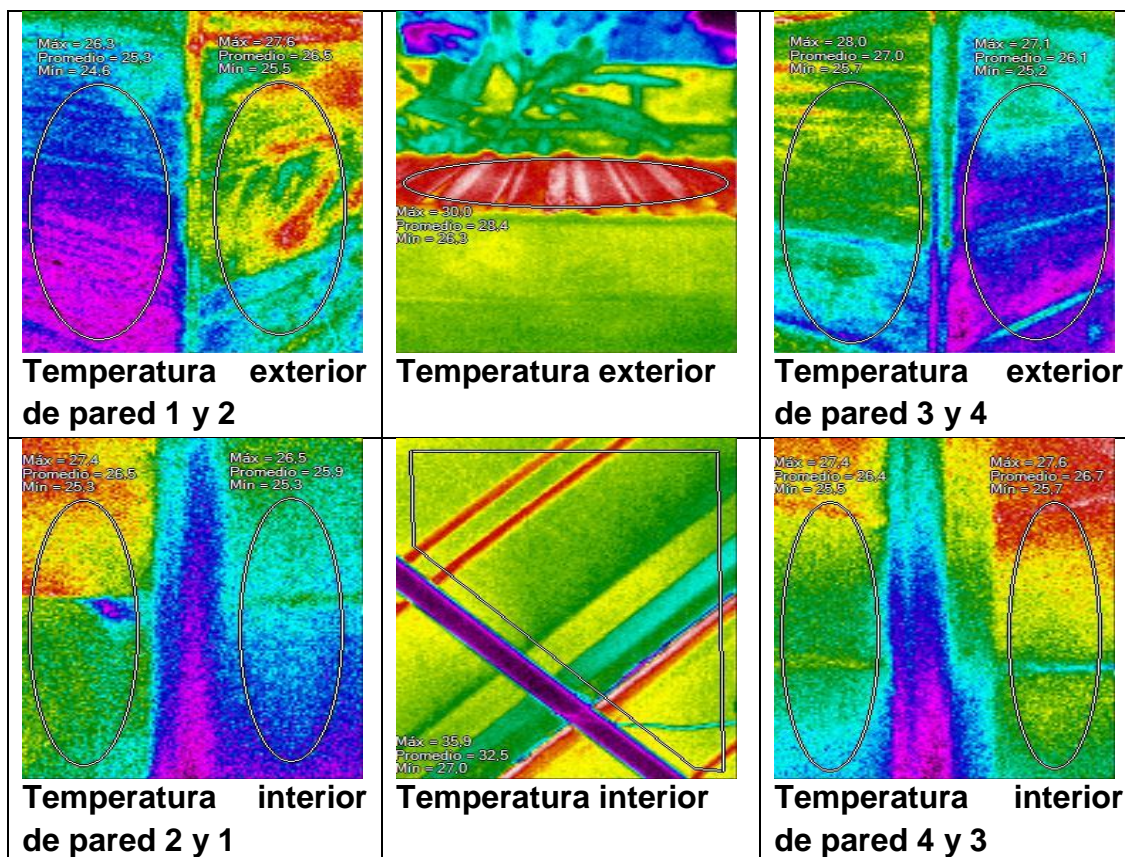
La **tabla 5** muestra las temperaturas de las superficies internas y externas en el módulo con techo verde en el momento inicial de captura de datos.

Tabla 5. Temperatura superficial medida en el módulo con techo verde.

| Superficie | Temperatura promedio (°C) |
|--------------------|---------------------------|
| Exterior del techo | 25.3 |
| Interior del techo | 23.4 |
| Pared 1 exterior | 25.3 |
| Pared 1 interior | 23.9 |
| Pared 2 exterior | 25.5 |
| Pared 2 interior | 24.2 |

| | |
|------------------|------|
| Pared 3 exterior | 26.7 |
| Pared 3 interior | 25.1 |
| Pared 4 exterior | 26.2 |
| Pared 4 interior | 25 |

Figura 43. Termografía del módulo con teja termoacústica 28 de mayo de 2013.



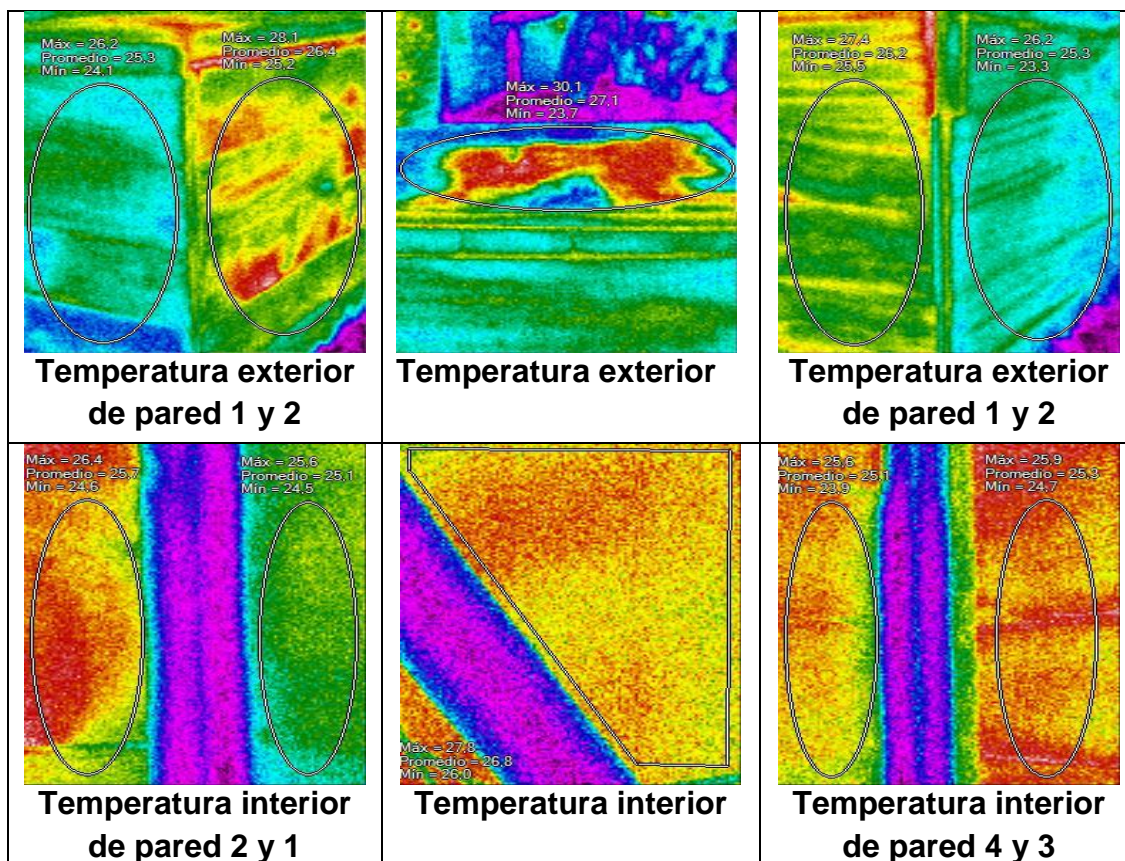
La **tabla 6** muestra las temperaturas de las superficies internas y externas en el módulo con teja termoacústica en el momento inicial de captura de datos.

Tabla 6. Temperatura superficial en el módulo con teja termoacústica.

| Superficie | Temperatura promedio (°C) |
|--------------------|---------------------------|
| Exterior del techo | 28.4 |
| Interior del techo | 32.5 |
| Pared 1 exterior | 25.3 |
| Pared 1 interior | 25.9 |
| Pared 2 exterior | 26.5 |
| Pared 2 interior | 26.5 |

| | |
|------------------|------|
| Pared 3 exterior | 27 |
| Pared 3 interior | 26.7 |
| Pared 4 exterior | 26.1 |
| Pared 4 interior | 26.4 |

Figura 44. Termografía del módulo con placa de concreto 28 de mayo de 2013.



La **tabla 7** muestra las temperaturas de las superficies internas y externas en el módulo con placa de concreto en el momento inicial de captura de datos.

Tabla 7. Temperatura superficial en el módulo con placa de concreto.

| Superficie | Temperatura promedio (°C) |
|--------------------|---------------------------|
| Exterior del techo | 27.1 |
| Interior del techo | 26.8 |
| Pared 1 exterior | 25.3 |
| Pared 1 interior | 25.1 |
| Pared 2 exterior | 26.4 |
| Pared 2 interior | 25.7 |

| | |
|------------------|------|
| Pared 3 exterior | 26.2 |
| Pared 3 interior | 25.3 |
| Pared 4 exterior | 25.3 |
| Pared 4 interior | 25.1 |

En esta segunda sesión de pruebas las temperaturas medidas de superficie de pared fueron consistentemente menores que las tomadas en las primeras pruebas, esto debido a los ajustes que se hicieron en la toma de datos, ver sección 5.2.2.

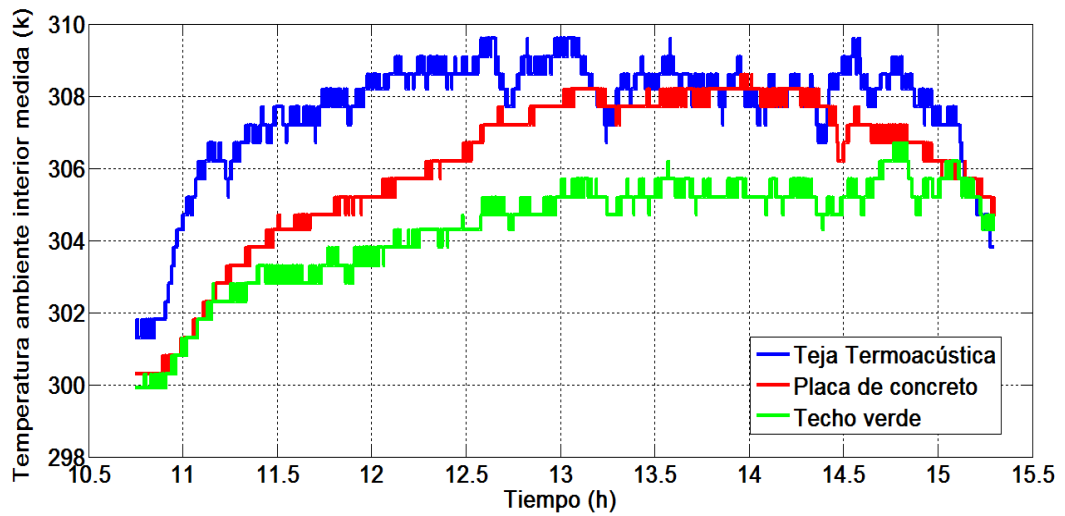
7.2 Predicción de temperaturas

Para realizar la predicción de temperaturas de ambiente interior y de las superficies en cada cerramiento se necesitan datos experimentales como radiación solar total, temperatura ambiente exterior, y velocidad del viento que fueron colectados en las instalaciones de la UIS; además algunas propiedades físicas de cada cubierta requeridas en las ecuaciones planteadas y parámetros geométricos necesarios para el cálculo de la radiación solar sobre superficies horizontales e inclinadas.

7.2.1 Primera sesión de pruebas

Las siguientes gráficas muestran las temperaturas medidas en el interior de los habitáculos, las predicciones del modelo y su respectiva validación para cada techo, se manejó el programa MATLAB para la predicción de las temperaturas; Para comenzar el proceso iterativo deben ser conocidas todas las temperaturas iniciales de superficie (paredes y techos) e interna del aire que se obtuvieron gracias a la termografía de los módulos y los sensores instalados en el interior de los habitáculos respectivamente.

Figura 45. Temperatura aire interior de los habitáculos (medida) vs Tiempo.



En la **figura 45** se observa la comparación de las temperaturas de ambiente interior en los tres módulos medidas en la estación experimental; de acuerdo con este resultado se puede apreciar la diferencia en las temperaturas en cualquier momento del experimento que tuvo lugar entre las 10:45 am y 3:20 pm en la primera sesión.

Figura 46. Temperatura aire interior de los habitáculos (modelada) vs tiempo.

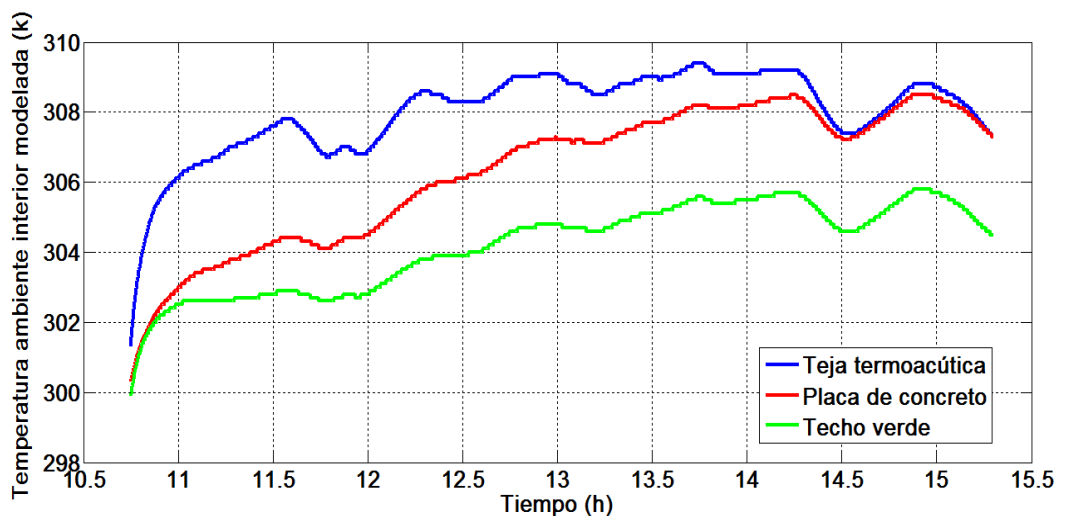


Figura 47. Temperatura aire interior (medida y modelada) en el habitáculo con techo verde vs tiempo.

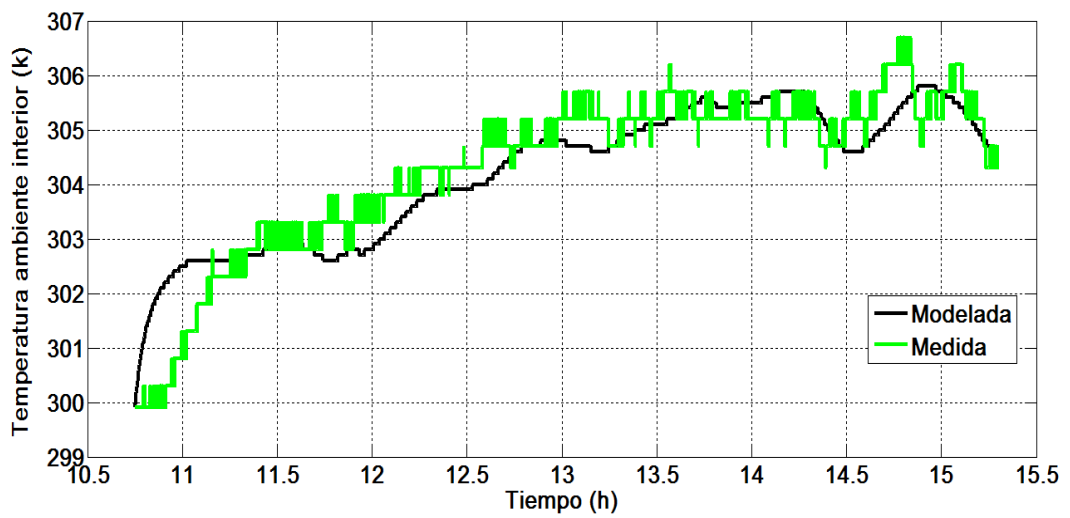


Figura 48. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con placa de concreto vs tiempo.

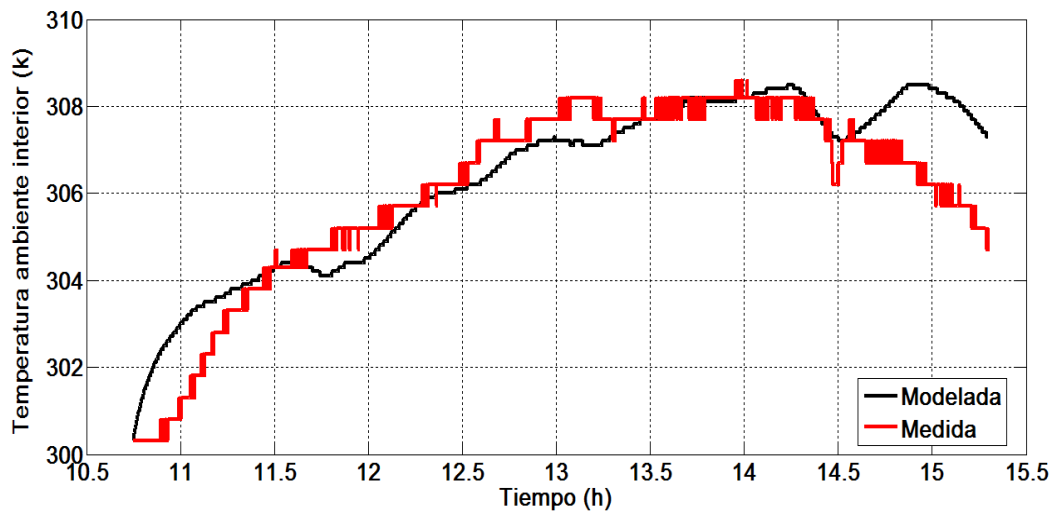
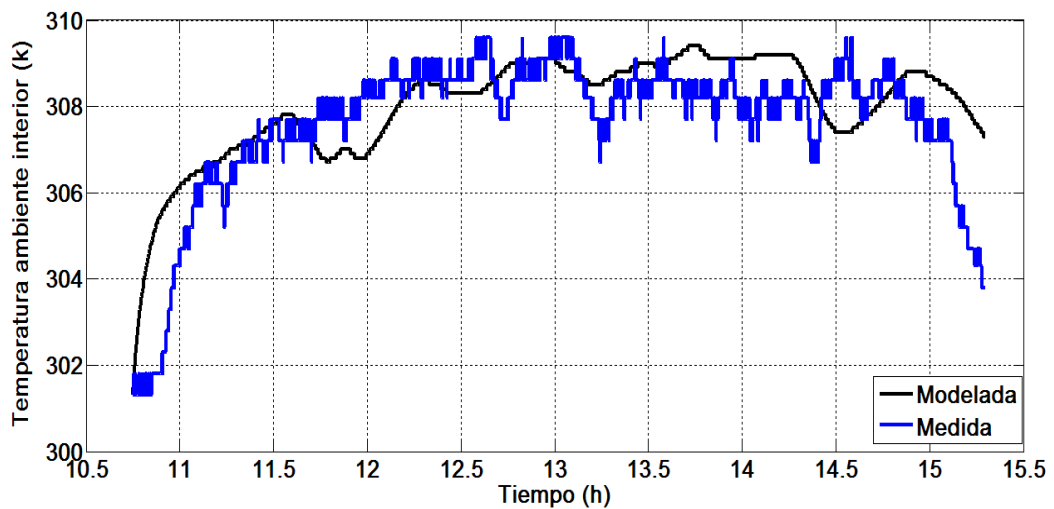


Figura 49. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con teja termoacústica vs tiempo.



7.2.2 Ajustes realizados al modelo

En los resultados observados de las primeras pruebas, surgen varias inquietudes sobre la veracidad de las predicciones, ya que en algunas de las gráficas comparativas existen algunas desviaciones de la gráfica real respecto a la modelada; por lo que se realiza una segunda sesión de pruebas con el fin de ajustar el modelo matemático y verificar los datos medidos.

Dentro de los ajustes realizados se encuentra la verificación de las temperaturas iniciales de pared en el exterior de los habitáculos que en las primeras pruebas presentaron valores muy elevados, el ajuste que se hizo fue elevar las temperaturas de fondo en la cámara termográfica debido a que existen otras fuentes (paredes aledañas y personas) que emiten radiación y de no ser tenidas en cuenta pueden alterar la medición de la cámara.

Durante la sesiones de pruebas algunos de los datos de velocidad del viento eran cero por lo que el coeficiente de convección también lo era, debido a esto hubo discrepancias en las gráficas de temperatura medidas y predichas. El ajuste realizado en este caso fue promediar datos de velocidad del viento o tomar valores que se repetían constantemente y así evitar coeficientes de

convección nulos, estos ajustes se hicieron teniendo en cuenta la complejidad que tiene medir la velocidad del viento.

En la gráficas 48 y 49 hay una diferencia entre las temperaturas modeladas y medidas al final de la sesión de pruebas, esto es debido a que las condiciones del ambiente en esos momentos han variado y se presenta sombra en el módulo con placa de concreto alrededor de las 3 p.m (ver **figura 27**) y en el de teja termoacústica alrededor de las 4 p.m, esto hace que las temperaturas medidas empiecen a bajar mientras el modelo asume que hay radiación directa sobre los módulos hasta el final de las pruebas, escenario que no es cierto. Para evitar este inconveniente en la segunda sesión de pruebas se prestó especial atención al momento en que empezaba a caer sombra sobre el modulo con placa de concreto para suspender las pruebas y garantizar condiciones iguales en los tres módulos.

7.2.3 Segunda sesión de pruebas

A continuación se muestran los gráficos de las temperaturas medidas en el interior de los habitáculos, las predicciones del modelo y su respectiva validación para cada techo después de tener en cuenta los ajustes realizados al modelo.

Figura 50. Temperatura aire interior de los habitáculos (medida) vs tiempo.

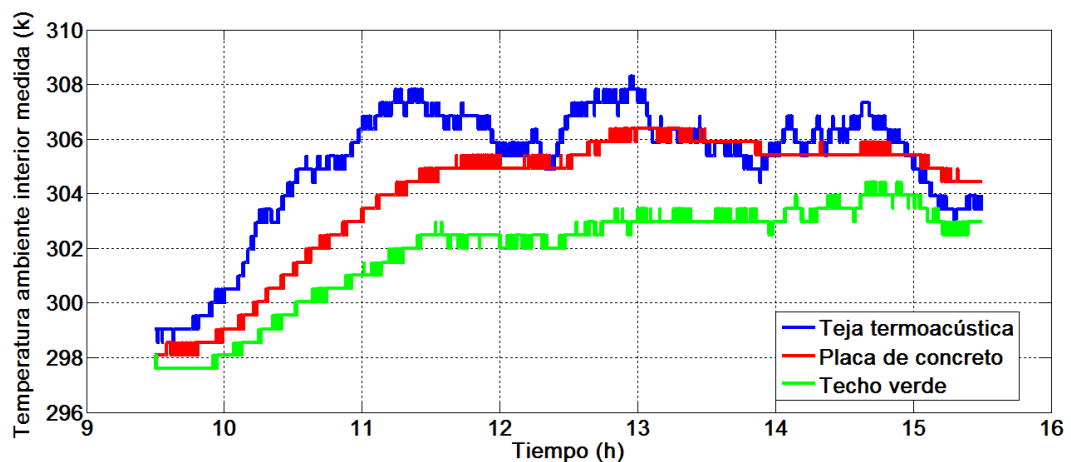


Figura 51. Temperatura aire interior de los habitáculos (modelada) vs tiempo.

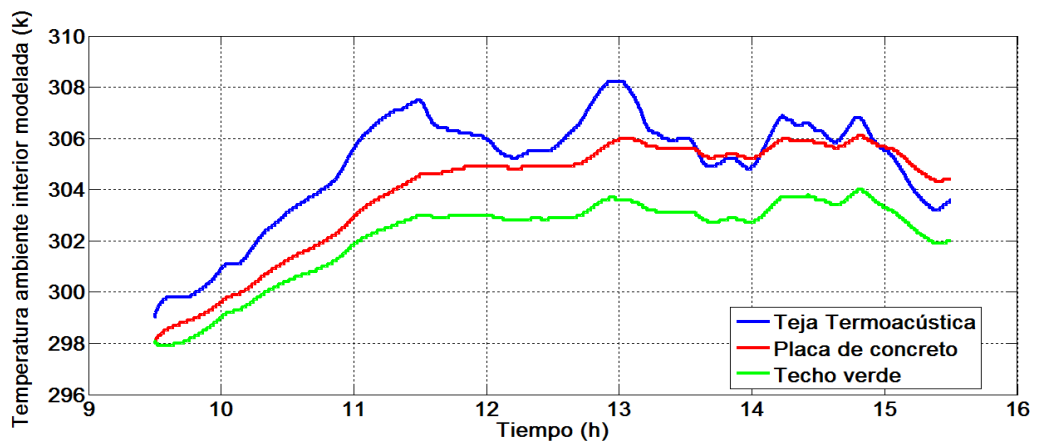


Figura 52. Temperatura aire interior (medida y modelada) en el habitáculo con techo verde vs tiempo.

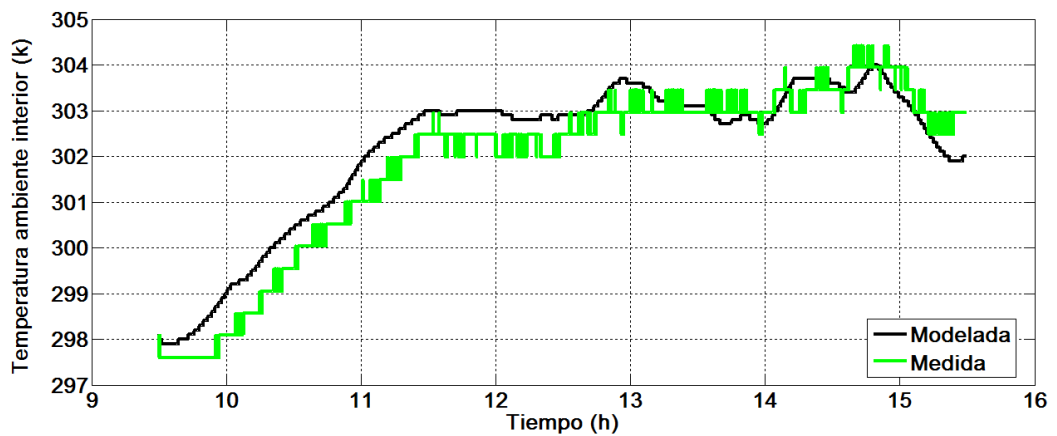


Figura 53. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con placa de concreto vs tiempo.

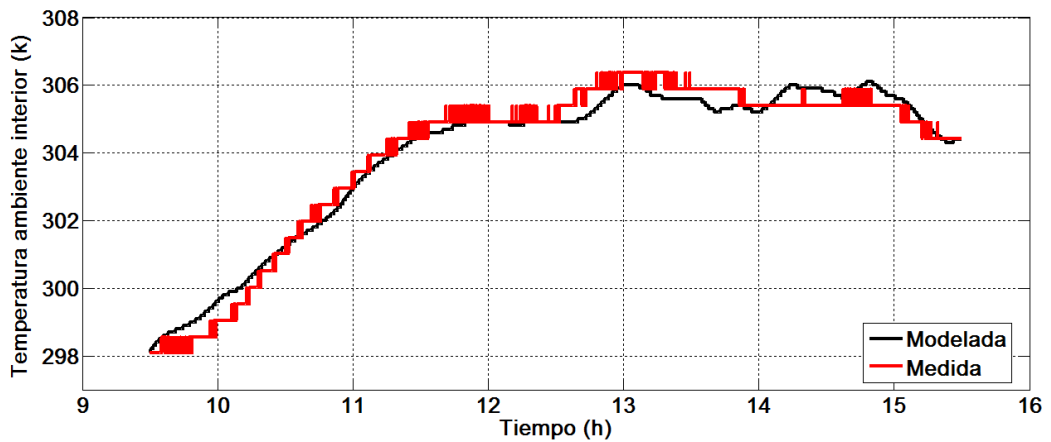
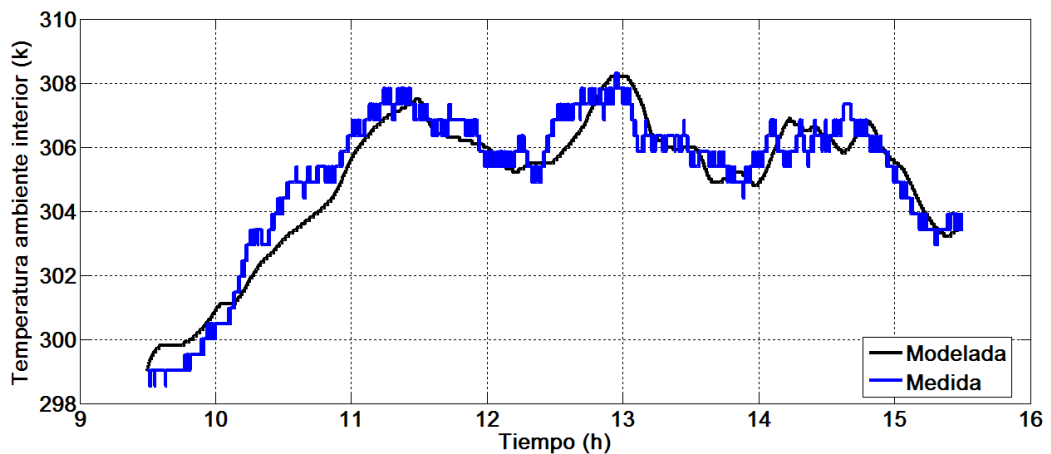


Figura 54. Temperatura interior del aire (medida y modelada) en el habitáculo con teja termoacústica vs tiempo.



Los resultados obtenidos en esta segunda sesión de pruebas muestran bastante consistencia por lo que se considera que el modelo fue validado.

7.3 cálculo de la carga térmica

Dentro de los objetivos se planteó determinar las temperaturas del aire en el interior del recinto además de determinar la carga térmica adquirida en cada habitáculo durante la sesión de pruebas, a continuación se determina este valor.

Para la determinación de la carga térmica o sumatoria de los flujos de calor que adquiere el aire durante el periodo de toma de datos, se suman los flujos de calor sensible por paredes en el interior del recinto y se resta el calor por infiltraciones como lo muestra la **ecuación 54**.

$$Q_T = Q_{si} + Q_{sip1} + Q_{sip2} + Q_{sip3} + Q_{sip4} + Q_{inf} \quad (54)$$

Llamando el flujo de calor neto para el modulo con teja termoacústica Q_{Tt} , para el de techo verde Q_{Tv} y para el de placa de concreto Q_{Tp} .

Se obtienen para la primera sesión de pruebas del 9 de abril de 2013 durante cuatro horas y media de experimentación los siguientes resultados.

$$Q_{Tt} = 7979.75 \text{ [W]}$$

$$Q_{Tv} = 6110.93 \text{ [W]}$$

$$Q_{Tp} = 9339.19 \text{ [W]}$$

En la segunda sesión de pruebas que se hizo durante 6 horas el día 28 de Mayo de 2013 se obtienen los siguientes resultados.

$$Q_{Tt} = 6091.78 \text{ [W]}$$

$$Q_{Tv} = 5340.34 \text{ [W]}$$

$$Q_{Tp} = 8442.58 \text{ [W]}$$

En la siguiente sección de análisis beneficio costo se plantea un caso hipotético, en el cual se determina el valor en pesos que tendría el consumo de una máquina de acondicionamiento al retirar la carga térmica hallada en cada habitáculo.

8. ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO

8.1 Costo que valdría retirar la carga térmica acumulada en los módulos

La potencia consumida (W_C) por una máquina térmica (unidad) para retirar el calor total (Q_T) que adquiere el aire en cada habitáculo se calcula por medio de la **ecuación 55**.

$$W_C = \frac{Q_T}{COP} \quad (55)$$

Donde el COP es un coeficiente de desempeño del aire acondicionado trabajando en frío. Valores comunes de COP están entre 2.2 denominado bajo rendimiento a un buen rendimiento del aire acondicionado de 3.2.

La potencia que consumiría una unidad de acondicionamiento térmico para retirar la carga térmica en el módulo de teja termoacústica (W_{Ct}), Techo verde (W_{Cv}) y placa de concreto (W_{Cc}) en las primeras pruebas, asumiendo un COP de 3.2, tomado del catálogo para aire acondicionado Daitsu 2011⁶ son:

$$W_{Ct} = 2.493 \text{ [KW]}$$

$$W_{Cv} = 1.909 \text{ [KW]}$$

$$W_{Cp} = 2.918 \text{ [KW]}$$

Para las segundas pruebas

$$W_{Ct} = 1.903 \text{ [KW]}$$

$$W_{Cv} = 1.668 \text{ [KW]}$$

$$W_{Cp} = 2.638 \text{ [KW]}$$

⁶ Catálogo Daitsu: ww.eurofred.com/downloads/Daitsu11_spanish.pdf

A continuación se realiza un cálculo hipotético utilizando la ecuación 56 para estimar el valor en pesos de la potencia que consumiría una máquina térmica al retirar el flujo de calor neto en cada uno de los habitáculos.

$$\text{Valor (\$)} = 350 \left(\frac{\$}{\text{KWh}} \right) * Wc(\text{KW}) * t (\text{h}) \quad (56)$$

Teniendo en cuenta que el cobro del KW-h oscila alrededor de los 350 pesos para zonas residenciales de estrato 3 y 4, y el tiempo (t) de experimentación fue de cuatro horas y media en las primeras pruebas y seis en la segunda, el precio en pesos de la potencia que consume la unidad de acondicionamiento térmico en el módulo con techo verde ($\text{Valor}_v (\$)$), teja termoacústica ($\text{Valor}_t (\$)$) y placa de concreto ($\text{Valor}_p (\$)$) es:

Para la primera sesión de pruebas:

$$\text{Valor}_v (\$) = 3006.675 \text{ pesos}$$

$$\text{Valor}_t (\$) = 3926.475 \text{ pesos}$$

$$\text{Valor}_p (\$) = 4595.85 \text{ pesos}$$

Para la segunda sesión de pruebas:

$$\text{Valor}_v (\$) = 3502.8 \text{ pesos}$$

$$\text{Valor}_t (\$) = 3996.3 \text{ pesos}$$

$$\text{Valor}_p (\$) = 5539.8 \text{ pesos}$$

8.2 Costo por metro cuadrado de techo

La tabla 8 muestra cantidades estimadas para determinar el costo en pesos de un metro cuadrado de techo verde, placa de concreto y de teja termoacústica.

Tabla 8. Costo de los techos por metro cuadrado.

| PLACA CONCRETO DE 1X1X0.1 (m) | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|------------------|------------------|----------------------|
| MATERIAL | CANTIDAD Xm ³ | LARGO PLACA (m) | ANCHO PLACA (m) | ESPESOR (m) | CANTIDAD | VALOR (\$) | TOTAL | UNI |
| CEMENTO | 350.00 | 1.00 | 1.00 | 0.10 | 35.00 | 504.00 | 17640.00 | Kg |
| ARENA | 0.54 | 1.00 | 1.00 | 0.10 | 0.05 | 80000.00 | 4280.00 | m ³ |
| GRAVILLA | 0.86 | 1.00 | 1.00 | 0.10 | 0.09 | 100000.00 | 8550.00 | m ³ |
| AGUA | 170.00 | 1.00 | 1.00 | 0.10 | 17.00 | 2.50 | 42.50 | Lts |
| VARILLA | | 1.00 | 1.00 | 0.20 | 5.00 | 10.00 | 15516.67 | ml |
| ALAMBRE | | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3500.00 | 3500.00 | Kg |
| | | | | | | | 49529.17 | m² |
| TEJA TERMOACUSTICA CON ESTRUCTURA EN MADERA | | | | | | | | |
| MATERIAL | LARGO (m) | ANCHO (m) | CANTIDAD | AREA (m ²) | CANTIDAD X m | VALOR (\$ ml) | TOTAL | |
| TEJA | 1.00 | 0.80 | | 0.80 | 1.25 | 10599.18 | 13248.98 | m ² |
| MADERA | 1.00 | 0.70 | 3.00 | | 2.10 | 6000.00 | 12600.00 | ml |
| | 1.00 | 1.00 | 2.00 | | 2.00 | 6000.00 | 12000.00 | ml |
| OTROS | 1.00 | | | | 1.00 | 2000.00 | 2000.00 | lb |
| | | | | | | | 39848.98 | m² |
| TECHO VERDE | | | | | | | | |
| MATERIAL | LARGO (m) | ANCHO (m) | CANTIDAD | AREA (m ²) | CANTIDAD A X m | VALOR (\$ ml) | TOTAL | |
| TABLA | 1.00 | 0.30 | 3.00 | 0.90 | 1.11 | 4500.00 | 5000.00 | ml |
| GEOTEXTIL | 1.20 | 1.20 | 1.00 | 1.44 | 1.44 | 11500.00 | 16560.00 | m ² |
| TELA AISLANTE | 1.20 | 1.20 | 1.00 | 1.44 | 1.44 | 15000.00 | 21600.00 | m ² |
| TABLA DE 10 cm X 1 m | 1.00 | | 2.66 | | | 500.00 | 1330.00 | ml |
| OTROS | 1.00 | | | | 1.00 | 2000.00 | 2000.00 | lb |
| | | | | | | | 46.490.00 | m² |

El costo en pesos por metro cuadrado de techo verde es denominado $T_v(\$)$, de teja termoacústica $T_a(\$)$ y para la placa de concreto $T_p(\$)$.

$$T_v(\$) = 46490.00 \text{ pesos/m}^2$$

$$T_a(\$) = 38848.98 \text{ pesos/m}^2$$

$$T_p(\$) = 49529.17 \text{ pesos/m}^2$$

8.3 Procedimiento para el análisis de costo-beneficio

Por medio del siguiente procedimiento se hace el cálculo del número de días requerido para recuperar la inversión inicial realizada en la construcción de los techos, asumiendo días con condiciones similares a las que se realizó el experimento.

1. Determinar el costo de los techos construidos (C_t) para el estudio por medio de la ecuación 57, multiplicando su área (A_t) por el costo del metro cuadrado ver tabla 8.

$$C_t = T(\$) \cdot A_t \quad (57)$$

2. Hallar la diferencia del costo inicial invertido en el techo verde con respecto a la teja termoacústica (D_{cit}) y la placa de concreto (D_{cip}), utilizando las ecuaciones 58 y 59; siendo la diferencia positiva cuando existe un ahorro.

$$D_{cit} = C_{tv} - C_{ta} \quad (58)$$

$$D_{cip} = C_{tv} - C_{tp} \quad (59)$$

3. Determinar la diferencia del costo en pesos para retirar la carga térmica en los módulos con teja termoacústica (D_{pt}) y la placa de concreto (D_{pp}) con respecto al de techo verde, utilizando las ecuaciones 60 y 61, teniendo en cuenta los cálculos de la sección 6.1.

$$D_{pt} = \text{Valor}_t (\$) - \text{Valor}_v (\$) \quad (60)$$

$$D_{pp} = \text{Valor}_p (\$) - \text{Valor}_v (\$) \quad (61)$$

4. Estimar el tiempo en que se recuperaría la diferencia en la inversión inicial ($T_{ri}(\text{días})$) utilizando la ecuación 62, teniendo en cuenta las

diferencias calculadas en el paso 2 y 3, y despreciando los costos de operación que acarrea el mantenimiento de los módulos.

$$Tri = \frac{Dcit}{Dpt} \quad (62)$$

8.4 Cálculos de costo-beneficio

De la ecuación 57 se obtienen los valores del primer paso del procedimiento de la sección 6.3, en donde el costo del techo verde (Ctv), el de teja termoacústica es (Cta) y el de placa de concreto (Ctp).

Ctv = 104602.5 pesos

Cta = 87410.205 pesos

Ctp = 111440.63 pesos

Para determinar los valores del segundo paso de la sección 6.3 se utilizan las ecuaciones 58 y 59.

Dcit = 17192.295 pesos

Dcip = -6838.13 pesos

Los siguientes valores son los cálculos contemplados en el paso 3 del procedimiento de la sección anterior, basados en las ecuaciones 60 y 61.

Dpt = 493.5 pesos

Dpp = 2037 pesos

Por último se realiza el cálculo del número de días requeridos para recuperar la inversión por medio de la ecuación 62, sólo se puede hacer para el caso de la teja termoacústica, en el caso de la placa de concreto ya existe un ahorro en la inversión inicial.

$$Tri = 34 \text{ días} = 1.16 \text{ meses}$$

9. CONCLUSIONES

- Se construyeron en las instalaciones de la UIS tres módulos propuestos para la experimentación con características geométricas similares y con diferente cubierta (teja termoacústica, placa de concreto y techo verde).
- Se implementó un sistema de monitoreo (sensórica y adquisición de datos) que permitió determinar las variables (temperaturas, velocidad del viento y radiación solar) que se requirieron en el estudio para validar los modelos matemáticos.
- Se hizo la modelización térmica de cada habitáculo con tres modelos matemáticos aplicados al techo, las paredes y el aire interno del recinto, los cuales fueron validados por medio de la experimentación realizada, como lo muestran las figuras 52, 53 y 54 los resultados obtenidos (temperaturas modeladas) presentan concordancia con los datos medidos.
- En las dos sesiones de prueba en el módulo con techo verde se obtuvieron menores temperaturas promedio del ambiente interior comparado con los módulos de teja termoacústica y placa de concreto. Los resultados obtenidos de la primera sesión de pruebas mostraron que en horas de máxima radiación la temperatura en el interior del recinto con techo verde es menor 5 °C que la temperatura interior del módulo con teja termo-acústica y 3 °C menor que la del módulo con placa de concreto, mientras en la segunda sesión la temperatura en el techo verde es menor 4 °C que la temperatura en la teja termoacústica y 2 °C menor que la placa de concreto alrededor de la 1:00 pm, hora de máxima radiación solar. Esto se debe al enfriamiento evaporativo y al alto porcentaje de reflectividad que presenta comparado con los otros techos.
- La carga térmica o flujo de calor neto absorbido por el aire interior calculado para cada habitáculo en la segunda sesión de pruebas mostró que fue menor en el módulo con techo verde con (5.3 KW), seguido por el módulo con teja termoacústica con (6.1 KW) y siendo el módulo con placa de concreto (8.4 KW)

el de mayor carga térmica a retirar. De acuerdo con estos resultados el recinto con techo verde demandaría menor consumo de energía de un equipo de acondicionamiento de aire.

- Aunque el modulo con la teja termoacústica presenta las más altas temperaturas en el interior del recinto, no es el que exhibe la mayor carga térmica, ya que tiene una elevada difusividad térmica; esto se debe a que la teja almacena poco calor y permite que a través de ella el calor pase más rápido, ya sea desde el exterior hacia el interior del recinto o viceversa.
- Del cálculo realizado para determinar el valor en pesos de la potencia que consumiría una máquina de acondicionamiento térmico al retirar el flujo de calor neto en cada recinto se encontró que en el módulo con techo verde se presenta un ahorro diario de \$ 494 pesos con respecto al módulo con teja termoacústica y de \$ 2037 pesos al de placa de concreto.
- En el análisis de costo-beneficio elaborado, se determina que se requerirán aproximadamente 1.16 meses para recuperar la inversión inicial hecha en el techo verde con respecto a la teja termoacústica, mientras que en relación a la placa de concreto ya existe un ahorro en la inversión inicial.
- Para estudios futuros relacionados con esta tesis el modelo matemático realizado podría ser aplicado en viviendas ubicadas en diferentes lugares que presenten otras condiciones climáticas, con el fin de obtener información sobre el comportamiento térmico del ambiente interno.

10. RECOMENDACIONES

- A pesar de que el modelo matemático propuesto por Stuart Gaffin aplicado al techo verde presenta resultados aproximados como lo demuestra el estudio, existen otros modelos en el que no solo se hace un balance de transferencia de energía sino que también presentan modelos con transferencia de masa complejos que podrían ser más acertados para predecir el comportamiento del techo verde, por ejemplo el modelo propuesto en la tesis doctoral de Paulo Cesar Tabares Velasco.
- Aunque la cámara termográfica es una herramienta sofisticada se presentaron inconvenientes en la determinación de las temperaturas de superficie debido a que sus medidas pueden ser fácilmente alteradas por fuentes externas de radiación, por lo que se recomienda el uso de sensores prácticos que puedan ser adheridos a la superficie.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] TORRES RODRÍGUEZ, Agustín Y MORILLÓN GÁLVEZ David, grupo ASADES. Evaluación del uso de techos verdes en clima templado: caso Ecatepec de Morelos, estado de México, México, 2007.
- [2] HARO CARBAJAL, Elba Teresa, Comportamiento de dos tipos de cubiertas vegetales, como dispositivo de climatización, para climas cálidos sub-húmedos, Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Colima, 2009.
- [3] MINKE, Gernot, Techos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos.
- [4] CENGEL, Yunus A, Transferencia de calor, segunda edición, 2004.
- [5] MONROY, Manuel Martín, Comportamiento térmico de recintos soleados, un modelo de diferencias finitas, Tesis Doctoral en Arquitectura, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1995.
- [6] PATANKAR, Suhas V, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Series in computational methods in mechanics and thermal sciences, 1980.
- [7] GAFFIN, Stuart; ROSENZWEIG, Cynthia; PARSHALL, Lily; BEATTIE, David; BERGHAGE, Robert; O'KEEFFE, Greg; BRAMAN, Dan. Techos verdes en la región metropolitana de nueva York., reporte de investigación, 2006.

BIBLIOGRAFÍA

CENGEL, Yunus A, Transferencia de calor, segunda edición, 2004.

DUFFIE, John A, AND BECKMAN, William A, Solar engineering of thermal processes, second edition, 1980.

GAFFIN, Stuart; ROSENZWEIG, Cynthia; PARSHALL, Lily; BEATTIE, David; BERGHAGE, Robert; O'KEEFFE, Greg; BRAMAN, Dan. Techos verdes en la región metropolitana de nueva York., reporte de investigación, Editorial Fin de Siglo, 2006.

HARO CARBAJAL, Elba Teresa, Comportamiento de dos tipos de cubiertas vegetales, como dispositivo de climatización, para climas cálidos sub-húmedos, Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Colima, 2009.

MINKE, Gernot, Techos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos.

MONROY, Manuel Martín, Comportamiento térmico de recintos soleados, un modelo de diferencias finitas, Tesis Doctoral en Arquitectura, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1995.

PATANKAR, Suhas V, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Series in computational methods in mechanics and thermal sciences, 1980.

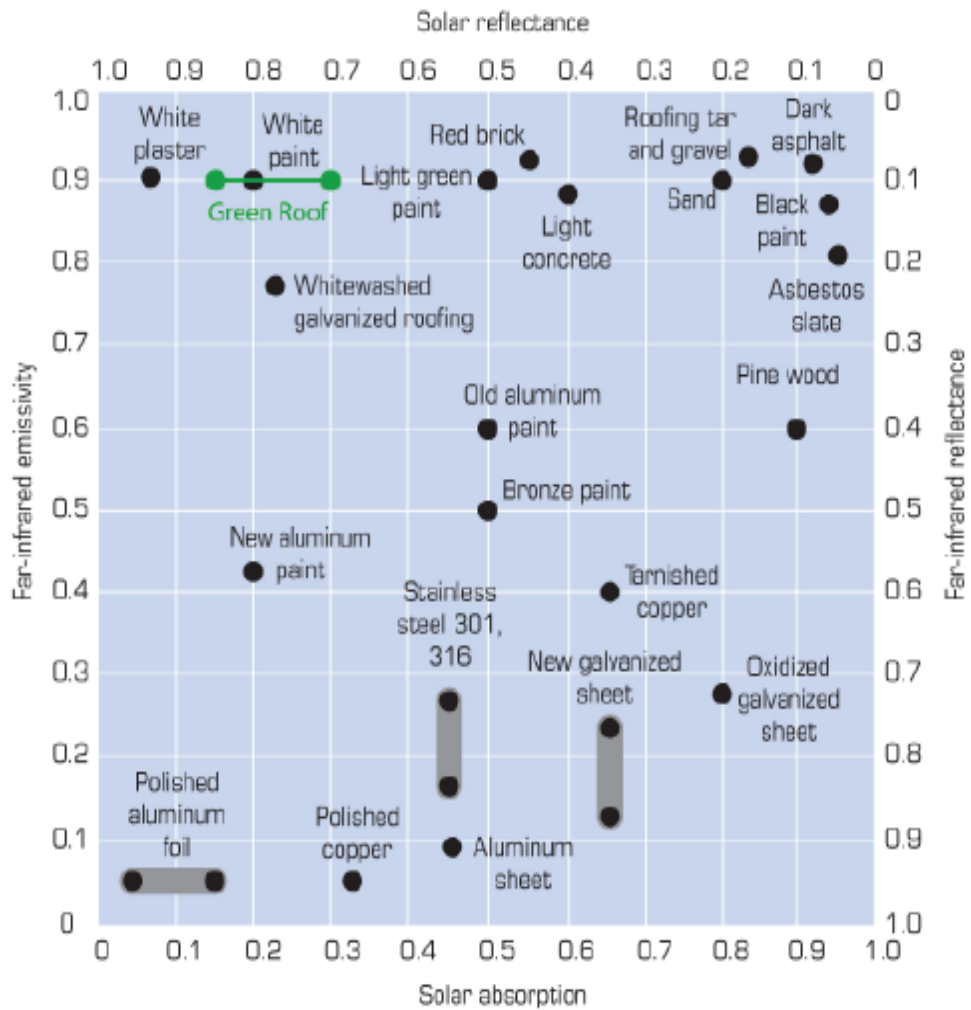
TABARES VELASCO, Paulo César. Predictive heat and mass transfer model of plant-based roofing materials for assessment of energy savings. Tesis Doctoral en Filosofía, Universidad Estatal de Pensilvania, 2009.

TORRES RODRÍGUEZ, Agustín Y MORILLÓN GÁLVEZ David, Evaluación del uso de techos verdes en clima templado: caso Ecatepec de Morelos, estado de México, México, grupo ASADES, 2007.

ANEXOS

ANEXO A. PROPIEDADES DE MATERIALES

A.1 Propiedades superficiales de algunos materiales.



Fuente: Techos verdes en la región metropolitana de nueva York., reporte de investigación [3].

A.2 Propiedades físicas de materiales de construcción

Propiedades de materiales de construcción (conclusión)
(a una temperatura media de 24°C)

| Material | Espesor, L , mm | Densidad, ρ kg/m ³ | Conductividad térmica, k W/m · K | Calor específico, c_p kJ/kg · K | Valor R (para los espesores de la lista, L/R), K · m ² /W |
|--|----------------------|---------------------------------------|--|---|--|
| Material para techos | | | | | |
| Tejas de asbesto-cemento | | 1 900 | — | 1.00 | 0.037 |
| Asfalto en rollos | | 1 100 | — | 1.51 | 0.026 |
| Tejas de asfalto | | 1 100 | — | 1.26 | 0.077 |
| Techado incorporado | 10 mm | 1 100 | — | 1.46 | 0.058 |
| Pizarra | 13 mm | — | — | 1.26 | 0.009 |
| Tejas de madera (simples o con cara de plástico/película) | | — | — | 1.30 | 0.166 |
| Materiales para revoque | | | | | |
| Revoque de cemento, agregado de arena | 19 mm | 1 860 | 0.72 | 0.84 | 0.026 |
| Revoque de yeso: | | | | | |
| Agregado ligero | 13 mm | 720 | — | — | 0.055 |
| Agregado de arena | 13 mm | 1 680 | 0.81 | 0.84 | 0.016 |
| Agregado de perlita | — | 720 | 0.22 | 1.34 | — |
| Material para forro exterior (sobre superficies planas) | | | | | |
| Tejas de asbesto-cemento | — | 1 900 | — | — | 0.037 |
| Forro de tablero duro | 11 mm | — | — | 1.17 | 0.12 |
| Forro de madera (rebajada) | 25 mm | — | — | 1.30 | 0.139 |
| Forro de madera (contrachapada, traslapada) | 10 mm | — | — | 1.21 | 0.111 |
| Forro de aluminio o acero (sobre encofrado): | | | | | |
| Con respaldo hueco | 10 mm | — | — | 1.22 | 0.11 |
| Con respaldo de tablero aislante | 10 mm | — | — | 1.34 | 0.32 |
| Vidrio arquitectónico | — | 2 530 | 1.0 | 0.84 | 0.018 |
| Maderas | | | | | |
| Maderas duras (arce, roble, etc.) | — | 721 | 0.159 | 1.26 | — |
| Maderas suaves (abeto, pino, etc.) | — | 513 | 0.115 | 1.38 | — |
| Metales | | | | | |
| Aluminio (1 100) | — | 2 739 | 222 | 0.896 | — |
| Acero dulce | — | 7 833 | 45.3 | 0.502 | — |
| Acero inoxidable | — | 7 913 | 15.6 | 0.456 | — |

Fuente: Las tablas A-5 y A-6 se adaptaron tomándolas del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1993), Cap. 22, tabla 4. Usadas con autorización.

Fuente: Fundamentos de transferencia de calor Cengel [1]

ANEXO B. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A continuación se muestran las especificaciones técnicas de los instrumentos y sensores usados en la investigación.

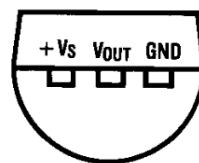
B.1 Sensor LM35dz

El circuito integrado LM35dz es un sensor de temperatura cuya tensión de salida es linealmente proporcional con la temperatura en la escala Celsius. Posee una precisión aceptable para la aplicación requerida, no necesita calibración externa, posee tres terminales y es de bajo costo. Algunas de las especificaciones de este sensor son:

- Factor de escala: $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ (garantizado entre $9,8$ y $10,2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$)
- Rango de utilización: $-55^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$
- Precisión de: $\sim 1,5^{\circ}\text{C}$ (peor caso)
- No linealidad: $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ (peor caso)
- Generación de calor baja

Diagrama de conexión del LM35

TO-92
Plastic Package



BOTTOM VIEW

DS005516-2

Order Number LM35CZ,
LM35CAZ or LM35DZ

Fuente: datasheetreference.com/lm35-datasheet.htm

B.2 Tarjeta Arduino Mega

El Arduino Mega tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset. Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador, la tabla presenta un resumen de las especificaciones técnicas.

| | |
|----------------------------------|--|
| Micro controlador | ATmega1280 |
| Voltaje de funcionamiento | 5V |
| Voltaje de entrada (recomendado) | 7-12V |
| Voltaje de entrada (limite) | 6-20V |
| Pines E/S digitales | 54 (14 proporcionan salida PWM) |
| Pines de entrada analógica | 16 |
| Intensidad por pin | 40 mA |
| Intensidad en pin 3.3V | 50 mA |
| Velocidad de reloj | 16 MHz |
| SRAM | 8 KB |
| EEPROM | 4 KB |
| Memoria Flash | 128 KB de las cuales 4 KB las usa el gestor de arranque (bootloader) |

Fuente: arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardMega

B.3 Especificaciones técnicas cámara termográfica Fluke Ti110

| | |
|--|--|
| Resolución IR (tamaño de la matriz de plano focal) | Matriz de plano focal de 160 x 120 con microbolómetro no refrigerado |
| Banda espectral | 7,5 μm a 14 μm (onda larga) |
| Velocidad de captura o actualización | Versiones de 9 Hz o 30 Hz |
| Sensibilidad térmica (NETD) | $\leq 0,10$ °C a 30 °C temp. destino (100 mK) |
| Campo de visión (FOV) | 22,5 °H x 31 °V |
| Resolución espacial (IFOV) | 3,39 mRad |
| Rango de medición de temperatura (sin calibrar por debajo de -10 °C) | -20 °C to + 250 °C (-4 °F a 482 °F) |
| Precisión de la medición de temperatura | ± 2 °C o 2% (a 25 °C nominales, la mayor de ambas) |
| Mecanismo de enfoque | Sistema de enfoque IR-OptiFlex™ |

| | |
|--|---|
| Tecnología IR-Fusion® | PIP, VISTA INTEGRAL POR INFRARROJOS, VISTA INTEGRAL |
| CNX inalámbrico habilitado | Sí |
| Alarmas de colores | Alta temperatura |
| Paletas estándar | Azul-rojo, escala de grises, escala de grises invertida, alto contraste, metal caliente, arco de hierro, ámbar, ámbar invertido |
| Paletas Ultra Contrast™ | Azul-rojo, escala de grises, arco de hierro |
| Marcadores frío/calor | — |
| Marcadores de zona definibles por el usuario | Tres en la cámara y en SmartView® |
| Centerbox (MÍN/PROMEDIO/MÁX) | — |
| Control de nivel y amplitud | Manual y automático |
| Amplitud mínima en modo automático | 5 °C |
| Amplitud mínima en modo manual | 2,5 °C |
| Distancia focal IR mínima | 15,25 cm (6 pulg.) |
| Peso | 0,726 kg (1,6 libras) |
| Tamaño | 28,4 x 8,6 x 13,5 cm (11,2 x 3,4 x 5,3 pulg.) |
| Pantalla LCD | 3,5 pulg. en diagonal (vertical) |
| Cámara visible | Calidad industrial de 2 megapíxeles |
| Corrección de paralaje automática mínima | ~18-22 pulgadas |
| Sistema de anotación IR-PhotoNotes™ | Sí (3 imágenes) |
| Puntero láser | Sí |
| Linterna | Sí |

| | |
|--|--|
| Compás electrónico (puntos cardinales) | Sí |
| Corrección de emisividad | Sí |
| Corrección de la transmisión | Sí |
| Compensación de fondo (reflejada) | Sí |
| Notas de voz (audio) | Sí (60 segundos) por imagen |
| Salida de vídeo en varios modos | — |
| Grabación de vídeo en varios modos (codificación .AVI con MPEG estándar) | Sí (codificación .AVI con MPEG, hasta 5 minutos) |
| Grabación de vídeo en varios modos (radiométrico [.IS3]) | — |
| Revisión de memoria | Revisión de miniaturas |
| Batería (reemplazable in situ, recargable) | Una |
| Duración de la batería | 4+ horas* |
| Base de carga de batería externa | Opcional (accesorio) |
| Fuente de alimentación de carga | Sí |
| Prueba de caída | 2 metros (6,5 pies) |
| Clasificación de protección de ingreso (IP) (IEC 60529) | IP 54 |
| Ciclo de calibración recomendado | Dos años |
| Lector de tarjetas multifunción | — |
| Almacenamiento en memoria | Tarjeta de memoria SD de 2 GB |
| Capacidad de descarga directa | Descarga directa de mini USB a PC |
| Rango de temperatura de Funcionamiento | -10 °C a +50 °C (14 °F a 122 °F) |

| | |
|---|--|
| Rango de temperatura de almacenamiento | -20 °C a +50 °C (-4 °F a 122 °F) |
| Humedad de funcionamiento | Funcionamiento y almacenamiento, de 10 a 95%, sin condensación |
| Vibraciones e impactos | 2G, IEC 68-2-26 y 25G, IEC 68-2-29 |
| Normas de seguridad | CSA (EE.UU. y Canadá): C22.2 N° 61010-1-04, UL: UL STD 61010-1 (2ª edición), ISA: 82.02.01 |
| Marca C | IEC/EN 61326-1 |
| EMI, RFI, EMC | EN61326-1; FCC Parte 5 |
| Manuales de usuario | Checo, inglés, finés, francés, alemán, italiano, japonés, coreano, polaco, portugués, ruso, chino simplificado, español, sueco, chino tradicional, turco, neerlandés y húngaro |
| Período de garantía estándar | Dos años |
| Garantía extendida y planes de servicio | Sí |

Fuente: www.fluke.com

B.4 Especificaciones técnicas de medidor Fluke 975

| Especificaciones medidas | |
|--------------------------|---|
| Temperatura | <p>Rango: De -20 °C a 50 °C (de -5 °F a 122 °F)</p> <p>Resolución de 0,1 °C (0,1 °F)</p> <p>la pantalla:</p> <p>± 0,9 °C/± 1,62 °F de 40 °C a 60 °C</p> <p>Precisión: ± 0,5 °C/± 1,00 °F de 5 °C a 40 °C</p> <p>± 1,1 °C/± 1,98 °F de -20 °C a 5 °C</p> |
| Humedad relativa | <p>Rango: 10% a 90% H.R., sin condensación</p> <p>Resolución 100%</p> <p>de la pantalla:</p> |

| | |
|-------------------------------|---|
| | Precisión: $\pm 2\%$ H.R. (10% H.R. a 90% H.R.) |
| Velocidad del aire | <p>Rango: 50,0 p/min. a 3000 p/min. 0,25 m/s a 15 m/s</p> <p>Resolución de la pantalla: 1 p/min. (0,005 m/s)</p> <p>Precisión: $\pm 4\%$ o 4 p/min.* $\pm 4\%$ o 0,02 m/s*, la mayor de ambas</p> <p>*La especificación de precisión sólo es válida para lecturas de velocidad superiores a 50 p/min.</p> |
| CO ₂ | <p>Rango: 0 a 500 ppm</p> <p>Resolución de la pantalla: 1 ppm</p> <p>Precisión: $\pm 5\%$ o ± 3 ppm, la mayor de ambas, a 20 °C y 50% H.R.</p> |
| CO ₂ | <p>Rango: 0 a 5000 ppm</p> <p>Resolución de la pantalla: 1 ppm</p> <p>Precisión: Tiempo de calentamiento 1 min (5 minutos para la especificación completa) 2,75% + 75 ppm</p> |
| Especificaciones calculadas | |
| Temperatura de punto de rocío | <p>Rango: De -44 °C a 50 °C (de 47 °F a 122 °F)</p> <p>Resolución de la pantalla: 0,1 °C (0,1 °F)</p> <p>Precisión: ± 1 °C si temp.: -20 °C a 50 °C H.R.: 40% a 90% ± 2 °C si temp.: -20 °C a 50 °C H.R.: 20% a 40%</p> |

| | |
|---|---|
| | $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ si H.R.: 10% a 20% |
| Temperatura de bulbo húmedo | Rango: De $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, (de $3\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $122\text{ }^{\circ}\text{F}$) Resolución de la pantalla: $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$; ($0,1\text{ }^{\circ}\text{F}$) Precisión: $\pm 1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ si H.R.: 20% a 90% temp.: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ si H.R.: 10% a 20% |
| Caudal (en un conducto) | Rango: 0 a $3,965\text{ m}^3/\text{m}$, (0 a 140,000 cfm) Resolución de la pantalla: $0,001\text{ m}^3/\text{min.}$, (1 cfm) Precisión: N/A: El cálculo del caudal se realizará multiplicando el valor promedio de los datos registrados en el conducto por las dimensiones del área del conducto que se esté midiendo. |
| % de aire exterior (en función de la temperatura) | Rango: 0 a 100% Resolución de la pantalla: 0,1 |
| % de aire exterior (en función del nivel de CO ₂) | Rango: 0 a 100% Resolución de la pantalla: 0,1% N/A |
| Especificaciones generales | |
| Temperatura de trabajo y de almacenamiento: | De $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (de $-4\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $122\text{ }^{\circ}\text{F}$) |
| Humedad | 10 a 90% (sin condensación) |
| Altitud | Hasta 2000 m |

| | |
|----------------------------|--|
| Golpes y vibraciones | MIL-PRF-28800F: Clase 2 |
| Interfaz en varios idiomas | Inglés, francés, español, portugués y alemán |
| Batería | Batería de ión-litio recargable (principal), tres tipo AA (repuesto) |
| Registro de datos | Registro de datos: 25.000 registros (modo continuo), 99 registros (modo discontinuo) |
| Garantía | Dos años |

Fuente: www.fluke.com

ANEXO C. DATOS MEDIDOS

Se muestran los datos medidos el 28 de mayo de 2013, aunque los datos se tomaron cada tres segundos se colocaron en la tabla datos cada media hora para evitar llenar centenares de páginas debido a la gran cantidad de datos.

| hora | Radiacion solar [w/m ²] | Temperatura ambiente exterior [k] | Temperatura interior modulo teja termoacústica [k] | Temperatura interior modulo placa de concreto [k] | Temperatura interior modulo techo verde [k] | Velocidad del viento [m/s] |
|------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|----------------------------|
| 09:30 a.m. | 198.4 | 25.9 | 299.03 | 298.08 | 298.08 | 3.32 |
| 10:00 a.m. | 309.9 | 26.5 | 300.49 | 299.05 | 298.08 | 6.7 |
| 10:30 a.m. | 698.14 | 27.3 | 304.4 | 301.01 | 299.54 | 3.42 |
| 11:00 a.m. | 309.95 | 27.6 | 306.35 | 302.96 | 301.01 | 4.09 |
| 11:30 a.m. | 813.61 | 27.3 | 306.84 | 304.91 | 302.47 | 6.55 |
| 12:00 p.m. | 287.22 | 27.8 | 305.38 | 304.91 | 302.47 | 5.76 |
| 12:30 p.m. | 386.23 | 27 | 306.84 | 304.91 | 302.47 | 5.83 |
| 01:00 p.m. | 884.4 | 27.3 | 307.82 | 306.38 | 302.96 | 6.63 |
| 01:30 p.m. | 870.3 | 27.1 | 305.86 | 305.89 | 302.96 | 3.88 |
| 02:00 p.m. | 511.88 | 27.1 | 305.38 | 305.4 | 302.96 | 4.35 |
| 02:30 p.m. | 699.45 | 27.4 | 306.5 | 305.4 | 303.45 | 4.61 |
| 03:00 p.m. | 267.89 | 26.4 | 305.38 | 304.42 | 302.96 | 4.61 |