

**COMPARACIÓN TERMO-ECONÓMICA ENTRE DIFERENTES TIPOS DE
TEJAS USADAS COMO CUBIERTA PROTECTORA CONTRA LA
RADIACIÓN SOLAR**

DIANA CATERINNE SANDOVAL CANDELA

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

2015

**COMPARACIÓN TERMO-ECONÓMICA ENTRE DIFERENTES TIPOS DE
TEJAS USADAS COMO CUBIERTA PROTECTORA CONTRA LA
RADIACIÓN SOLAR**

DIANA CATERINNE SANDOVAL CANDELA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR:
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
ING. MECÁNICO**

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

2015

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, la sabiduría y la fuerza para llegar hasta este punto superando todos los obstáculos.

A mis padres, José Orlando y Luz Mery, por apoyarme constantemente y ser mi motor, por acompañarme en cada momento de mi vida y darme alientos cada vez que las cosas se ponían difíciles, sin ellos sería imposible estar acá.

A mi hermana Silvia Alexandra y mi prima Leily Johanna por ser dos de los seres más incondicionales que existen en mi vida y por su infinita complicidad.

A toda mi familia y amigos por haber sido parte de este proceso, por su compañía y constante apoyo.

Diana Caterinne Sandoval Candela

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Omar Armando Gelvez Arocha, por el tiempo invertido al dirigir este proyecto, por su colaboración y constante guía para la culminación del mismo, por estar siempre dispuesto a enseñar y ser parte importante en mi formación académica.

Al Ph.D en Ingeniería Mecánica Julián Ernesto Jaramillo Ibarra por su gran apoyo, el tiempo empleado en consultas, comprender y resolver mis dudas, además de ser también una parte importante en este proceso de formación.

A Juan Sebastián, Diego, Milton y Rubén, ustedes saben lo importantes que fueron para mí en este proceso, no hay palabras para agradecerles por tanto.

A todas las personas que directa o indirectamente hicieron parte de mi vida durante estos años, de ustedes también es este logro.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	15
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVOS GENERALES	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. ANTECEDENTES	18
3. GENERALIDADES.....	21
3.1. TIPOS DE TEJADOS OFRECIDOS COMERCIALMENTE	21
3.2. SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN PASIVOS	23
3.2.1.Descripción.....	24
3.2.2.Ventajas energéticas	24
4. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	26
4.1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	26
4.1.1.Conducción	26
4.1.2.Convección.....	28
4.1.3.Radiación.....	29
5. ECUACIONES DEL MOVIMIENTO SOLAR	31
5.1. DECLINACIÓN.....	31
5.2. ÁNGULO HORARIO.....	33
5.3. ELEVACIÓN O ALTURA SOLAR.....	34
5.4. AZIMUT.....	34
6. RADIACION SOLAR INCIDENTE.....	36
6.1. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA.....	36
6.2. RADIACIÓN SOLAR DIFUSA.....	37
6.3. RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA.....	38
6.3.1. Azimut de Pared.....	38
6.3.2.Casos típicos de orientación de una superficie.....	39
7. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE LOS RECINTOS	41
7.1. ECUACIONES GENERALES PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	41
7.1.1.Determinación de la radiación solar incidente.....	41
7.1.2.Cálculo de coeficientes de convección.....	43
7.1.2.1Coeficiente de convección externo	43

7.1.2. Cálculo del coeficiente de convección interno	43
7.1.2.3.Cálculo de coeficientes radiativos	44
7.2. TECHOS SIMPLES:	46
7.3. TECHOS DOBLES	48
7.4. BALANCE ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LAS PAREDES.....	51
7.5. CÁLCULO DEL CALOR TOTAL INTERNO.....	52
8. MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS DE PRUEBA	53
8.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS RECINTOS	55
8.2. MONTAJE DE TEJADOS.....	55
8.3. SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO	57
8.3.1.Adaptación del sistema de refrigeración	57
8.3.2.Montaje de evaporadores como unidades manejadoras.....	58
8.4. MONTAJE DEL SISTEMA DE BOMBEO	59
8.5. SISTEMA DE MEDICIÓN.....	60
8.5.1.Medición de temperaturas del agua a la entrada y la salida de cada recinto	61
8.5.2.Montaje para la medición indirecta del caudal real instantáneo.....	61
8.5.3.Medición de temperaturas ambientales	62
8.5.4.Medición de la radiación solar directa y difusa.....	62
9. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELAMIENTO	64
9.1. DATOS DE ENTRADA AL MODELO	68
9.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO TEÓRICO	69
9.3. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	73
9.4. COMPARACIÓN DE TODOS LOS TIPOS DE TECHO	74
10. RELACIÓN COSTO BENEFICIO.....	77
10.1. COSTO DE INSTALACIÓN DE LOS TECHOS	77
10.2. COSTO DE RETIRO DE LA CARGA TÉRMICA	78
10.3. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO	80
11. CONCLUSIONES.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	87
BIBLIOGRAFIA.....	88
ANEXOS.....	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Conducción a través de una pared plana.....	27
Figura 2. Tipos de convección.....	28
Figura 3. Declinación de la Tierra.....	32
Figura 4. Variación del ángulo horario.....	33
Figura 5. Ángulo de azimut, elevación solar y cenit.....	35
Figura 6. Radiación solar incidente en una superficie.....	36
Figura 7. Ángulo de azimut de pared.....	38
Figura 8. Flujos de calor incidentes sobre techos.....	47
Figura 9. Efecto invernadero en colectores de placa plana.....	49
Figura 10. Flujos de calor incidentes en los techos dobles.....	49
Figura 11. Red de resistencias para modelamiento de techos dobles.....	50
Figura 12. Esquema general del circuito de prueba.....	54
Figura 13. Recintos de prueba.....	55
Figura 14. Soportes estructurales de los tejados.....	56
Figura 15. Tapa adaptada para el sistema de bombeo.....	58
Figura 16. Sistema de refrigeración adaptado.....	58
Figura 17. Sistema de bombeo.....	59
Figura 18. Montaje de bombas en serie.....	60
Figura 19. Unidad manejadora de aire.....	60

Figura 20. Sensores para la medición de las temperaturas de entrada y salida del agua.....	61
Figura 21. Sistema de extracción de volumen para medición indirecta de caudal.....	62
Figura 22. Pyranómetros.....	63
Figura 23. Diagrama de flujo conceptual.....	67
Figura 24. Radiación solar total.....	68
Figura 25. Temperatura ambiente.....	68
Figura 26. Velocidad del viento.....	69
Figura 27. Teja de fibrocemento vs Arreglo de PVC.....	70
Figura 28. Teja de fibrocemento vs Teja de PVC.....	70
Figura 29. Radiación solar incidente sobre tejados de fibrocemento y PVC....	71
Figura 30. Teja de PVC vs Teja verde.....	71
Figura 31. Radiación solar incidente sobre tejados de PVC y teja verde.....	72
Figura 32. Flujo de calor medido vs modelado. Teja de fibrocemento, Diciembre 17.....	73
Figura 33. Flujo de calor medido vs modelado. Arreglo de tejas de PVC, Diciembre 20.....	74
Figura 34. Flujo de calor medido vs modelado. Policarbonato, Diciembre 26..	74
Figura 35. Comparación de los diferentes tipos de techo bajo las mismas condiciones ambientales.....	75
Figura 36. Flujo de caja general para todos los tipos de techo.....	81

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distribución de las pruebas experimentales.....	66
Tabla 2. Flujo de calor promedio que ingresa a los recintos.....	72
Tabla 3. Calor promedio que ingresa a los recintos para condiciones ambientales iguales.....	76
Tabla 4. Costo de instalación por metro cuadrado de los techos.....	77
Tabla 5. Costo total de los techos.....	81
Tabla 6. Costos de retiro de carga térmica anuales y valor presente neto para cada tipo de tejado.....	82
Tabla 7. Diferencia de costos iniciales de construcción.....	82
Tabla 8. Diferencia del costo diario de retiro de la carga térmica.....	83
Tabla 9. Resultados análisis costo beneficio.....	83

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A. Resultados de las comparaciones de techos modeladas.....	91
ANEXO B. Validación de los resultados obtenidos.....	96

RESUMEN

TITULO: COMPARACIÓN TERMO-ECONÓMICA ENTRE DIFERENTES TIPOS DE TEJAS USADAS COMO CUBIERTA PROTECTORA CONTRA LA RADIACIÓN SOLAR

AUTOR: DIANA CATERINNE SANDOVAL CANDELA**

PALABRAS CLAVE: MODELAMIENTO, SISTEMAS PASIVOS, CARGA TÉRMICA

DESCRIPCIÓN:

El estudio que se presenta a continuación, tiene como objetivo determinar qué tipo de techo ofrece mejores ventajas térmicas en la protección contra la radiación solar, por medio del modelamiento matemático realizado en Matlab[®] de los flujos de calor a los cuales están expuestas viviendas que se encuentren situadas en lugares con condiciones climáticas semejantes a la ciudad de Bucaramanga. La validación del modelo se realizó por medio de pruebas experimentales, para lo cual se construyeron dos recintos que permiten el intercambio fácil de los tipos de tejas que fueron objeto de estudio y la medición de variables importantes para el cálculo de la carga térmica retirada por un sistema de refrigeración, que permite mantener el ambiente interno de cada uno de los recintos en 24°C con cada uno de los techos de prueba. Los tipos de tejas usadas para realizar el estudio son teja de PVC, fibrocemento, teja asfáltica, policarbonato y un arreglo propuesto construido con dos tejas de PVC separadas por un espacio de 5 mm de aire. Además, la forma en la que se planteó el modelo matemático, las condiciones asumidas y los resultados teóricos y experimentales obtenidos se explicarán en detalle.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Omar Armando Gelvez Arocha

ABSTRACT

TITULO: COMPARACIÓN TERMO-ECONÓMICA ENTRE DIFERENTES TIPOS DE TEJAS USADAS COMO CUBIERTA PROTECTORA CONTRA LA RADIACIÓN SOLAR

AUTOR: DIANA CATERINNE SANDOVAL CANDELA**

KEY WORDS: MATHEMATICAL MODEL, PASIVE SYSTEM, THERMAL LOAD

DESCRIPTION:

The following study aims to determine the type of roof that provides better thermal advantages in order to protect against solar radiation by creating a mathematical modeling about the heat rate to which are exposed houses situated in places with a similar environment that Bucaramanga. The mathematical model was performed in Matlab® . To prove the model was built two enclosures that allow change the diferent types of roofs and the measurement of some important variables that will help to calculate the thermal load removed by a refrigeration system that mantains the internal enviroment in 24°C with each type of roof. The roofs used in this study were PVC, fiber cement, asphalt shingles, polycarbonate and a proposed arrangement made of two tiles PVC separated by an air gap. The assumed conditions used in the model, the theoretical and experimental results are explained.

*Bachelor thesis

** physical mechanics Faculty. Mechanical engineering school, Director: Ing. Omar Armando Gelvez Arocha

INTRODUCCION

Actualmente el mundo enfrenta una gran problemática ambiental, el cambio climático producto del calentamiento global, es una de las consecuencias que más preocupa a la sociedad, además del crecimiento exponencial de la población el cual aumenta la demanda de recursos naturales y energéticos. Debido a esto, las industrias diariamente aumentan sus esfuerzos por encontrar nuevas alternativas en la producción tanto de energía, como en la creación de sistemas o tecnologías que permitan ofrecer los niveles de confort necesarios para una persona de una forma económica y amigable con el planeta, con éste fin se realizan investigaciones e implementaciones de alternativas basadas en arquitectura bioclimática que ofrecen grandes ventajas térmicas sin la utilización de energía proveniente de la quema de hidrocarburos.

Generalmente, al construir edificaciones se piensa principalmente en el factor económico, por lo tanto se presta poca atención tanto a las propiedades térmicas de los materiales utilizados en las construcciones, como a factores ambientales claves que pueden marcar una diferencia en la cantidad del flujo de calor que puede ingresar naturalmente a una vivienda. El mal desempeño térmico de los materiales de construcción de las viviendas del común es principalmente solucionado con sistemas que utilizan ya sea energía eléctrica o energía térmica producida por la quema de gases, lo que contribuye con el consumo de estos productos en el mundo.

Si bien es cierto que la arquitectura bioclimática no elimina la necesidad de utilizar otras fuentes energéticas para lograr el confort térmico, es una buena opción para reducir la utilización de los mismos implementando sencillas alternativas que pueden tenerse en cuenta desde el mismo momento en el que son construidas las edificaciones y que no representan mayores costos en el proceso de construcción.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GENERALES

- Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander a través de investigaciones que permitan proveer soluciones económicas y eficaces a la comunidad en la reducción de la ganancia de calor de espacios cerrados.
- Proporcionar una base de conocimiento que pueda servir de pauta para futuros desarrollos en el área.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis comparativo (costo vs beneficio) entre distintos tipos de tejado ofrecidos en el mercado, (láminas de policarbonato, tejas asfálticas, tejas translucidas de PVC en dos arreglos distintos y tejas de fibrocemento) con el fin de determinar cuál de estas ofrece mayor protección contra la radiación solar incidente. Para lo cual se deberá:
 - Diseñar y construir dos estructuras que simulen viviendas con la siguientes características:
 - Paredes en láminas de Drywall prefabricado de 8mm de espesor.
 - Dimensiones: longitud 1,22 m, ancho 0,92 m, alto 1,22 m.
 - Sistema de acople que permita el intercambio rápido del tejado.
 - Cinco tejados construidos en los materiales seleccionados para el análisis comparativo (policarbonato alveolar de 6 mm de espesor, cubierta asfáltica Techoline teja verde de 3 mm de espesor, tejas translucidas de PVC de 0,9mm de

espesor en dos arreglos distintos, tejas de fibrocemento #6 de 6mm de espesor).

- Acoplar un sistema de acondicionamiento de aire que mantenga el interior de los recintos a una temperatura constante de 24°C utilizando serpentines de agua fría en cada uno de ellos con el fin de determinar la carga térmica a través de la medición del incremento de temperatura de esta, para ello el sistema debe contar con las siguientes características:
 - Los serpentines estarán conectados en paralelo con sus respectivas válvulas de regulación del caudal de agua, cada una de ellas controladas por la temperatura del ambiente de cada uno de los recintos.
 - Un sistema de sensado de las temperaturas de entrada y salida del agua en cada uno de los serpentines con el fin de obtener una fuente de estimación de la carga térmica retirada de cada recinto.
- Modelar matemáticamente el sistema y simular cada uno de los casos para realizar un contraste entre lo encontrado experimentalmente y los resultados teóricos.

2. ANTECEDENTES

La búsqueda de una mejor manera de disminuir la ganancia de calor a través de los techos ha sido una constante preocupación en el ámbito académico y práctico, esto se ve reflejado en el creciente número de artículos de tipo investigativo que buscan generar nuevas tecnologías para disminuir la ganancia de calor, además de presentar diferentes estudios comparativos tanto en el costo como en la eficiencia térmica de diversos tipos de tejado. A continuación se enuncian algunas investigaciones realizadas en éste campo.

En la 68ª conferencia de la Asociación Italiana de Ingeniería de Maquinas Térmicas realizada en el año 2013, se expuso una investigación denominada ON A COOL COATING FOR ROOF CLAY TILES: DEVELOPMENT OF THE PROTOTYPE AND THERMAL-ENERGY ASSESSMENT, realizada por Anna Laura Pisello, Franco Cotana y Lucia Brinchi, en la cual se describe el diseño y desarrollo de un recubrimiento con el cual se busca mejorar el desempeño térmico de las tejas de barro que son las más utilizadas como tejado en el país de Italia, la forma con la cual se propone aumentar el desempeño térmico, es generando un recubrimiento más reflectante que el barro, de tal modo que el calor absorbido por el tejado sea menor, y por ende el calor transmitido hacia el interior de las edificaciones se vea reducido, esto consecuentemente busca reducir la energía consumida por los equipos de acondicionamiento de aire sin generar un impacto arquitectónico perceptible.

A principios del año 2014 se realizó en Turquía un estudio llamado COMPARISON OF DIFFERENT ROOF TYPES IN HOUSING PROJECTS IN TURKEY: COST ANALYSIS, hecho por Serdar Ulubeyli, Aynur Kazaz Bayram y Er M. Talat Birgonul, investigación con la cual se buscó comparar los tejados más comúnmente utilizados en Turquía desde el punto de vista de costos de materiales de fabricación e instalación, se hizo un análisis de 20 tipos de

tejados, los cuales fueron clasificados según su aplicación, ya sea industrial o doméstica, y posteriormente se describe cada uno de ellos, enfatizando especialmente en el material o los materiales de los que son construidos y la complejidad y costo de su instalación.

En el artículo denominado LONG-TERM HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF WHITE AND BLACK ROOFS IN NORTH AMERICAN CLIMATES, desarrollado por Hamed H. Saber, Michael C. Swinton, Peter Kalinger y Ralph M. Paroli, en 2011, se hace un estudio del desempeño higrotérmico* de los tejados blancos y los tejados negros, basándose en el hecho de que la mejora de las propiedades reflectivas de un tejado puede afectar su resistencia a la humedad, generando problemas de salubridad y resistencia, reflejados en el tejado a largo plazo. Para el desarrollo de las pruebas se tomaron distintos tipos de tejados negros y blancos, y se probaron en distintas condiciones internas y externas.

En Francia, en 2011, se realizó un estudio llamado COOL ROOFS IMPACT ON BUILDING THERMAL RESPONSE: A FRENCH CASE STUDY, hecho por E.Bozonnet y M.Doya,F.Allard, en el cual se analiza el desempeño térmico durante el verano de los denominados techos frescos como medio de ambientación pasiva, los cuales utilizan un recubrimiento selectivo** para mejorar el comportamiento térmico del tejado, para esto se puso a prueba el tejado en una construcción pequeña sin ningún tipo de dispositivo de ambientación activa.

En el artículo publicado en 2007 en Brazil, THEORETICAL/EXPERIMENTAL COMPARISON OF HEAT FUX REDUCTION IN ROOFS ACHIEVED THROUGH THE USE OF REFLECTIVE THERMAL INSULATORS, realizado por Caren Michels, Roberto Lamberts y Saulo Güths, se realiza una

* Higrotérmico, hace referencia al comportamiento dual que correlaciona la temperatura y la humedad.

** Recubrimiento selectivo, recubrimiento capaz de reflejar o absorber radiación en solo algunas longitudes de onda específicas.

comparación de dos tejados de asfalto y cemento sin cubierta interna, uno con recubrimiento reflectante y el otro sin este aditamento, esto con el fin de comprobar las mejoras térmicas al confort interior de las viviendas del común en Brasil, dado que en climas tropicales la mayor parte de las ganancias de calor de las viviendas se dan a través del techo.

En 2005 se publicó el artículo de investigación: THERMAL PERFORMANCE OF NON AIR-CONDITIONED BUILDINGS WITH VAULTED ROOFS IN COMPARISON WITH FLAT ROOFS, desarrollado por Runsheng Tang, I.A. Meir y Tong Wu, en el cual se detalla un modelo matemático por diferencias finitas, para el estudio del comportamiento térmico de tejados abovedados y tejados planos en áreas con climas cálidos y secos, instalados en edificaciones sin ningún tipo de sistema de acondicionamiento de aire.

En la Universidad Industrial de Santander en el año 2013, se realizó un proyecto de grado denominado ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TÉRMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN BUCARAMANGA, hecho por Romualdo de Jesús Reyes Galvis y Julián Alberto Sánchez Aguirre, en el cual se presenta un modelo matemático que permite comparar dos tipos comunes de tejados con los techos verdes, con el fin de determinar las ventajas térmicas que presentan los techos verdes con respecto de los otros techos estudiados, además de plantear un estudio beneficio/costo, con el fin de comparar la eficiencia térmica y los costos de instalación y montaje para de esta forma determinar cuál opción es más factible.

3. GENERALIDADES

Las condiciones ambientales juegan un papel muy importante en la forma como los seres humanos nos desempeñamos en nuestra vida cotidiana, factores como la temperatura, humedad, ruido y luz, afectan directamente nuestros sentidos y causan una respuesta directa de comodidad o incomodidad hacia los mismos. El confort térmico es aquel que hace referencia al control de la temperatura, humedad y movimiento del aire de un ambiente de tal forma que el cuerpo humano se sienta poco perturbado.

Debido a factores como el calentamiento global, la contaminación y el continuo crecimiento de la población mundial, las condiciones climáticas de las ciudades han variado notoriamente provocando un aumento en la temperatura promedio diaria, esto hace que mantener entornos confortables térmicamente sea cada vez más difícil sin el uso de soluciones externas. Además de esto, los materiales utilizados comúnmente para la construcción, aunque ofrecen cierto grado de protección contra la radiación solar, no son muy efectivos controlando el flujo de energía solar que ingresa a los recintos, ya que generalmente se busca la economía por encima de las propiedades térmicas de los materiales. Cabe resaltar que la mayoría del flujo de calor debido a la radiación solar que ingresa a un recinto se da por el techo del mismo, por lo tanto se hará especial énfasis en los materiales usados como estructura superior de las viviendas.

3.1. TIPOS DE TEJADOS OFRECIDOS COMERCIALMENTE

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad a pesar de que se realizan esfuerzos por producir nuevos materiales con mejores propiedades térmicas se emplean con mayor frecuencia tejados que aunque en la mayoría de sus casos son relativamente de bajo costo no ofrecen una capacidad de regulación del flujo de calor que ingresa a las viviendas, lo cual genera temperaturas interiores

elevadas. A continuación se enuncian los tipos de tejados más utilizados en Colombia:

- **Teja en fibrocemento:** Este tipo de teja es la más utilizada como cubierta o tejado en nuestro país, aunque no ofrecen grandes ventajas en cuanto a proveer ambientes más frescos, su precio, resistencia, y durabilidad la hace la mejor opción en construcciones o viviendas para la mayor parte de la comunidad Colombiana.
- **Teja translúcida en PVC:** Esta teja es muy utilizada en claraboyas, con las que se busca aprovechar al máximo la luz solar, su precio, hace que sea una buena opción como tejado.
- **Teja de Zinc:** Es la teja más utilizada en las zonas rurales de Colombia, debido a su bajo precio, implementada comúnmente en techos de viviendas, fincas, establos, graneros, galpones, bebederos, entre otros, en cuanto al confort térmico que ofrece, es la peor alternativa ya que el uso de un metal como cubierta en un recinto, permite fácilmente el flujo de calor hacia el interior.
- **Teja de barro tipo español:** tiene aplicaciones muy comunes en estética, usadas en cabañas de lujo, hoteles y viviendas coloniales entre otros, es de bajo costo, pero su instalación es bastante compleja, ya que requiere una estructura base que las soporte en su totalidad debido a su reducido tamaño, y se requiere gran cantidad para cubrir un área determinada.
- **Lamina Alveolar en policarbonato:** es una solución muy reciente, y ha demostrado ofrecer espacios con temperaturas confortables, su precio es elevado, por lo que su punto principal a favor es su efectividad como tejado.

- **Teja asfáltica:** Es la teja más reciente traída a Colombia, aunque para su instalación presenta un poco más dificultades que otros tipos de tejas debido a su baja resistencia, es una muy buena opción en términos de precio. Actualmente pocas viviendas se encuentran construidas con este tipo de cubierta, pero sus fabricantes y comercializadores hablan de su excelente capacidad de controlar el flujo de carga solar, ofreciendo espacios frescos y confortables.

Con el fin de mejorar el confort de las viviendas del común, se han desarrollado diferentes mecanismos capaces de ofrecer una mayor protección contra la radiación solar incidente y controlar eficientemente la energía térmica almacenada, estos mecanismos se encargan de controlar la temperatura interna, ya sea disminuyendo el flujo de calor hacia el interior del recinto o extrayendo la carga térmica almacenada, existen dos tipos de soluciones para la climatización de los espacios, activas y pasivas. Las soluciones activas aunque son bastante efectivas necesitan fuentes externas de energía para lograr su objetivo, y en casos específicos como los sistemas de refrigeración y aires acondicionados, utilizan fluidos que son considerados contaminantes, por esta razón y gracias a la creciente preocupación de las industrias por unirse a los esfuerzos que se realizan por la protección y preservación del medio ambiente se han desarrollado nuevas alternativas de soluciones pasivas las cuales buscan generar las condiciones de confort térmico deseadas sin el uso de fuentes de energía externa. A continuación se hará una breve explicación de este tipo de sistemas.

3.2. SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN PASIVOS

Los sistemas pasivos se caracterizan por su independencia de recursos energéticos convencionales, tales como combustibles y electricidad, contribuyendo de manera contundente al ahorro y uso eficiente de los recursos no renovables. Además de esto, están altamente ligados con la arquitectura bioclimática la cual se encarga de aprovechar al máximo las condiciones

ambientales que rodean a los edificios, viviendas, locales o recintos para proveer condiciones de confort tanto térmico como lumínico. Factores como los vientos, el sol, la lluvia en el caso del medio ambiente y la forma, materiales de construcción, orientación de las edificaciones, etc., son tenidos en cuenta a la hora de realizar las acciones que permitan lograr tal fin.

3.2.1. Descripción: Como se mencionó anteriormente los sistemas pasivos se utilizan principalmente para generar condiciones de confort térmico y lumínico en recintos sin el uso de dispositivos eléctricos y mecánicos, aprovechando principalmente fuentes de energía prácticamente inagotables como el sol, además, se caracterizan por formar parte de la misma estructura de la edificación y utilizar principios de transferencia de calor como la conducción, convección y radiación para aprovechar al máximo las condiciones del entorno en el que se encuentra.

Los sistemas pasivos tienen diferentes formas de clasificarse, una de sus principales clasificaciones está dada por el tipo de necesidad que deben suplir (calentamiento, enfriamiento, protección solar, etc.) para cada una de estas funciones se tienen diferentes tipos de soluciones que permiten lograr el calentamiento o enfriamiento de los recintos según sea necesario. Debido a la posición geográfica que ocupa nuestro país, las necesidades de regulación de la temperatura interna de viviendas y edificios va dirigida principalmente a extraer calor del interior del recinto para lograr una condición de temperatura menor a la del ambiente externo, por lo tanto los sistemas pasivos más utilizados son los que llevan a generar enfriamiento de ambiente dentro de los habitáculos, utilizando alternativas como el uso de aislantes térmicos y de protecciones solares en las paredes y ventanas, la orientación correcta de la estructura con respecto al sol, entre otros.

3.2.2. Ventajas energéticas: Las ventajas energéticas que presentan los sistemas pasivos son muchas, la principal se debe al ahorro energético que ofrece específicamente en el control de la temperatura de las habitaciones o

recintos eliminando en muchos casos por completo la necesidad de utilizar sistemas activos como ventiladores, sistemas de calefacción o aire acondicionado, esto lo logra por medio de la utilización de materiales de construcción de las paredes que presentan propiedades térmicas que hacen que la transferencia de calor desde el ambiente externo hacia los recintos sea menor. Otra de las opciones que se utilizan hoy en día y que está en creciente estudio es la adecuación de techos para utilizarlos de manera eficiente en este fin, teniendo en cuenta características específicas como peso, densidad, calor específico, reflectividad o implementando diferentes tipos de arreglos, manteniendo espacios de aire o vegetación que reducen el flujo de calor que ingresa y mantienen una temperatura interna confortable. Además, como su diseño va dirigido a la máxima utilización de los recursos ambientales disponibles, la reducción del consumo energético no se debe únicamente al acondicionamiento de la temperatura, sino que también se presentan ahorros producto de la reducción de utilización de energía lumínica gracias a la distribución y orientación de la estructura con respecto a los puntos cardinales para obtener la mejor iluminación posible, sin comprometer las condiciones de temperatura del recinto. Según estudios, el uso de sistemas pasivos de climatización puede ofrecer una reducción en el consumo energético de un hogar del 50%. Además de esto, si se combinan estas técnicas con un adecuado diseño bioclimático se puede llegar a tener un grado de reducción de hasta un 70%.

Al utilizar las estrategias de diseño propias de la arquitectura bioclimática los sistemas pasivos aumentan las ventajas que ofrecen respecto a los sistemas activos ya que además de ser una alternativa amigable con el planeta permite tener aire más limpio gracias a la ventilación natural y temperaturas más uniformes en las habitaciones.

4. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En los capítulos posteriores se realizarán balances de energía basados principalmente en la transferencia de calor que se presentan entre los materiales utilizados y el entorno que los rodea, con el fin de hacer más fácil la comprensión de dichos balances de energía se realizará una breve explicación de los conceptos básicos de transferencia de calor y los mecanismos existentes.

4.1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

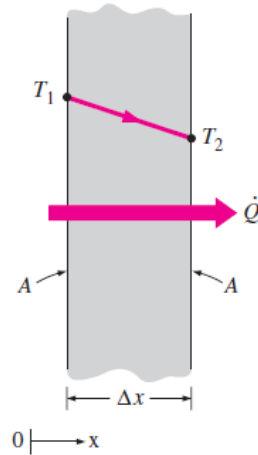
El calor se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia, es decir, en términos prácticos, energía en tránsito. La ley cero de la termodinámica establece que si se pone en contacto un cuerpo de mayor temperatura con uno de menos temperatura, estas variarán hasta llegar a una condición de equilibrio en el cual las temperaturas de cada uno de los objetos serán iguales. De este principio parte todo el concepto de transferencia de calor en el cual el calor se transfiere principalmente debido a una diferencia de potencial, en este caso como consecuencia de una diferencia de temperatura. Para lograr alcanzar el equilibrio mencionado anteriormente intervienen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

4.1.1. Conducción: La conducción se debe a la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a la interacción entre las mismas [1].

Este mecanismo de transferencia de calor puede darse en gases y líquidos (cuando no se tiene movimiento del fluido) y sólidos, en los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas y en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de

las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres [2].

Figura 1. Conducción a través de una pared plana



Fuente: Transferencia de calor y masa Cengel [2]

La cantidad de energía que se puede transmitir a través de la conducción depende de la diferencia de temperatura existente entre las superficies, el espesor del material y el área superficial perpendicular al flujo de calor. La expresión matemática que demuestra la influencia de estas variables en forma diferencial es la Ley de Fourier:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Dónde:

Q_{cond} = Flujo de calor [W]

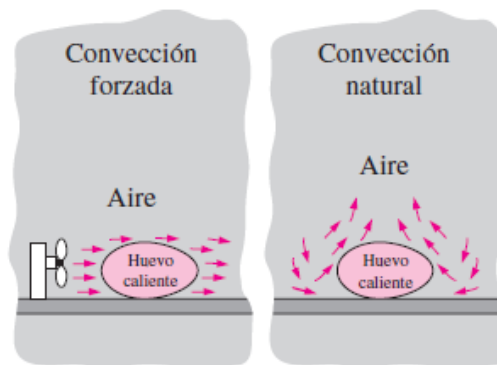
k = Conductividad térmica [W/m · K]

A = Área superficial [m²]

$\frac{dT}{dx}$ = Variación de la temperatura respecto al espesor

4.1.2. Convección: Este mecanismo de transferencia de calor se caracteriza por comprender los efectos de la conducción entre un fluido ya sea gas o líquido y un sólido, y el movimiento macroscópico del mismo, esto implica que es completamente necesario que exista movimiento del fluido para que se dé la transferencia de calor por convección.

Figura 2. Tipos de convección



Fuente: Transferencia de calor y masa Cengel [2]

Existen principalmente dos tipos de convección, la convección forzada y la convección natural. Si el movimiento del fluido se da por medio de elementos externos que le aporten velocidad al mismo como bombas, ventiladores o incluso el viento, estaremos tratando con convección forzada, la cual puede ser interna cuando el flujo se da a través de tuberías o ductos o externa cuando el fluido está en contacto con placas o la superficie externa de cualquier elemento. Para el caso de la convección natural, el movimiento del fluido se da gracias a los cambios de temperatura que provocan una variación en la densidad del mismo permitiendo en el caso de los gases que el fluido más caliente ascienda por la reducción de su densidad y que de la misma forma el fluido al enfriarse aumente su densidad y descienda debido a este incremento.

Para estudiar el fenómeno de la convección se hace uso de la ley de enfriamiento de Newton donde aparece un parámetro conocido como coeficiente de transferencia de calor (h), el cual depende de las propiedades del fluido, su velocidad, la configuración geométrica de la superficie con la que

tiene contacto, etc.. Además de este coeficiente, el flujo de calor que se transfiere por medio de este mecanismo depende de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

$$Q_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Dónde:

Q_{conv} = Flujo de calor por convección

h = Coeficiente convectivo de transferencia de calor

A_s = Area de la superficie

T_s = Temperatura de la superficie

T_{∞} = Temperatura del fluido

Cabe resaltar que para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor existen diferentes correlaciones que son aplicables según el caso que se está manejando, puesto que ellas varían según el tipo de flujo que se tenga (laminar o turbulento), la geometría sobre la cual se trabaja (cilindros, ductos, esferas, placas planas) y el tipo de convección con el cual se está realizando el proceso de transferencia de calor (forzado externo, forzado interno, natural).

4.1.3. Radiación: La transferencia de calor por radiación es el único mecanismo que no necesita de un medio de propagación para realizar el traspaso de energía, a diferencia de la conducción y la convección este mecanismo puede darse en el vacío sin ningún inconveniente ya que es emitido a través de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, por lo tanto es considerado como el tipo de transferencia de calor más rápido.

La radiación es el mecanismo por el cual la energía proveniente del sol llega a nuestro planeta. Para nuestro caso de interés tomaremos en cuenta la radiación térmica la cual es la que emiten los cuerpos debido a su temperatura al estar por encima del cero absoluto (-273 K), con longitudes de onda entre

0,1 μ m a 100 μ m. Así como existen diferentes formas para cuantificar el calor transferido por la conducción y la convección se tiene una relación para obtener la radiación emitida por un cuerpo negro, esta relación es conocida como la Ley de Stefan-Boltzmann.

$$Q_{rad} = \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (3)$$

Para conocer la radiación que emiten las superficies reales, es necesario conocer la emisividad de la superficie, la cual es una medida de qué tan cerca está una superficie real de emitir radiación como lo hace un cuerpo negro, el valor de la emisividad está siempre en un rango de 0 a 1. La radiación emitida por las superficies reales se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (4)$$

Debido a que todos los cuerpos son radiantes es importante determinar la tasa neta de transferencia de calor, ya que al mismo tiempo que una superficie está emitiendo radiación, está también recibiendo radiación emitida por otra superficie. En nuestro caso de interés, es importante cuantificar la tasa neta de transferencia de calor existente entre una superficie y el medio circundante que la rodea, es decir, los alrededores, en este caso, el calor por radiación está dado por:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (5)$$

5. ECUACIONES DEL MOVIMIENTO SOLAR

La principal fuente de energía para nuestro planeta y los seres que habitamos en él es el sol. La radiación solar que llega a la tierra sufre algunos cambios durante su viaje producido por factores como los componentes de nuestra atmósfera que absorben cierta parte de la radiación solar atenuando la intensidad de los rayos provenientes del sol.

La manera como el sol afecta las superficies terrestres depende de la dirección de los rayos solares y la magnitud del rayo, esto puede ser cuantificado encontrando una relación para la radiación difusa que es aquella que es atenuada por los componentes atmosféricos y la radiación directa la cual pasa directamente sin ser modificada. Posteriormente se explicará en detalle estos dos tipos de radiaciones para dar claridad sobre el tema, en este capítulo se explicarán ciertos factores que influyen en la determinación de la radiación solar que incide en una superficie horizontal como los factores dependientes del movimiento terrestre.

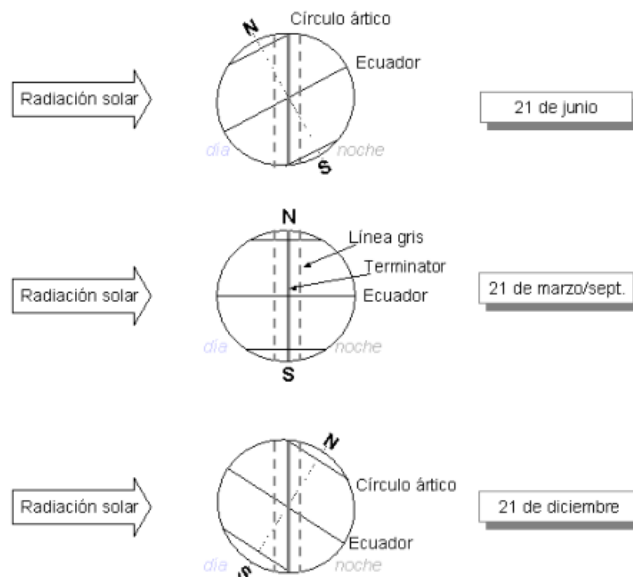
La tierra posee cuatro tipos de movimiento, la rotación, traslación, precesión de los equinoccios y la nutación. Entre estos tipos de movimientos, los más influyentes en la determinación de la radiación sobre una superficie son la rotación y la traslación que definen ángulos como la declinación y el ángulo horario. Además de esto se explicarán factores importantes para la determinación del posicionamiento solar como el ángulo de elevación del sol y el azimut.

5.1. DECLINACIÓN

El ángulo de declinación es el ángulo formado entre el eje horizontal del sol y la línea del ecuador, gracias al movimiento de traslación de la tierra. El ángulo de declinación es un factor influyente en la manera como los rayos provenientes

del sol llegan a las superficies terrestres. Este ángulo presenta una variación de 47° pasando desde 23.5° el 21 de Junio hasta -23.5° el 21 de diciembre.

Figura 3. Declinación de la Tierra



Fuente: ea5dy. [citado 13 Agosto de 2014]

Disponible página web <http://ea5dy.ure.es/espa/articulos/index_3.htm>

Debido a la variación que se presenta en el ángulo de declinación durante el correr de todo el año es importante tener una correlación que permita establecer el valor de esta inclinación en días específicos, esta relación está dada por la siguiente ecuación.

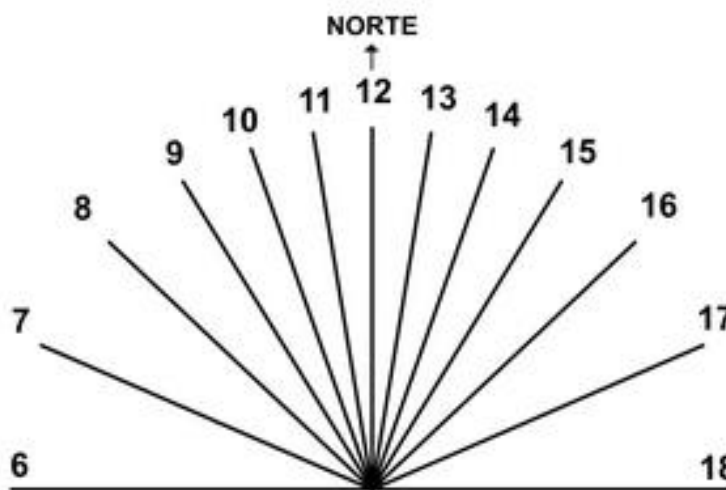
$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (6)$$

En esta relación n representa el día del año para el cual se desea calcular el ángulo de declinación teniendo como $n = 1$ el primero de Enero.

5.2. ÁNGULO HORARIO

El ángulo horario (ω) está determinado por el movimiento de rotación de la tierra, la variación de este ángulo corresponde también a la variación de la hora del día y mide la desviación del sol con respecto a un punto de referencia, que es tomado en el momento en el que el sol alcanza su altura máxima, este punto de máxima altura donde el ángulo horario es de 0° se da a las 12 del mediodía (ver figura 4). Por lo tanto, el ángulo horario toma valores negativos en las horas de la mañana y positivos en las horas de la tarde llegando a 90° en las horas de amanecer y anochecer que corresponden a las 6am y 6pm respectivamente para el Ecuador.

Figura 4. Variación del ángulo horario



Fuente: Manual del científico. [citado 13 Agosto de 2014]

Disponible página web <<http://manualdelcientifico.blogspot.com>>

Existe una relación para convertir las horas del día variando de 0 a 24 en su respectivo valor del ángulo horario:

$$\omega = (\text{hora militar} - 12) \cdot 15^\circ \quad (7)$$

Cabe resaltar que la hora solar para los cálculos astronómicos puede ser diferente de la hora del reloj, debido a que la tierra se mueve en una órbita

elíptica alrededor del sol, generando que al estar más cerca de él el movimiento de traslación de la tierra sea más rápido que cuando está en su punto más lejano. Por ésta razón existen los días no duran lo mismo en todas las épocas del año.

5.3. ELEVACIÓN O ALTURA SOLAR

El ángulo de elevación solar (α_s) es el formado entre la línea que une al sol con el punto de referencia escogido en un plano horizontal en la tierra y dicho plano. Además del ángulo de elevación solar se conoce también el ángulo de cenit (θ_z) el cual se forma entre la misma línea que uno al sol con el punto de referencia escogido y la normal al plano de referencia, por tanto:

$$\alpha_s + \theta_z = 90^\circ \quad (8)$$

Existe una expresión que permite relacionar el ángulo de cenit con otros factores como la declinación la latitud y el ángulo horario.

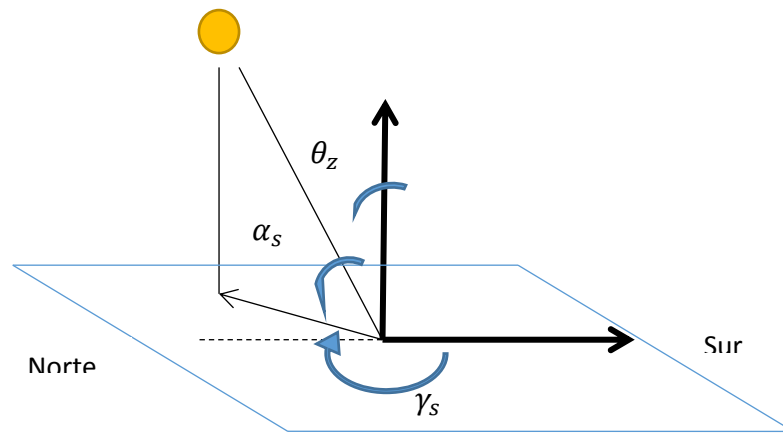
$$\cos \theta_z = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega) \quad (9)$$

5.4. AZIMUT

El ángulo de azimut (γ_s) es junto con el ángulo de elevación la forma de determinar la posición del sol, el azimut corresponde al ángulo formado entre la proyección del rayo solar sobre el horizonte y la línea norte-sur.

El ángulo de azimut toma valores positivos en la dirección sur-este y negativos en la dirección sur-oeste. En la figura 5 se pueden observar tanto el ángulo cenit, como la elevación solar y el ángulo de azimut.

Figura 5. Ángulo de azimut, elevación solar y cenit



De la misma forma que para el ángulo cenit, también existe una relación para expresar el ángulo de azimut en términos de la declinación, el ángulo horario y el ángulo de elevación solar.

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\alpha_s)} \quad (10)$$

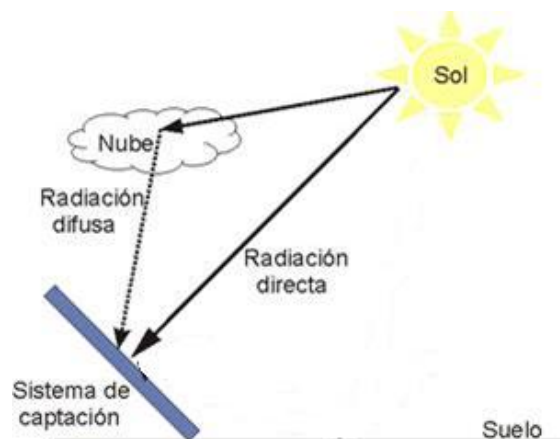
6. RADIACION SOLAR INCIDENTE

En el capítulo anterior se mencionó la existencia de dos tipos de radiación en nuestro planeta, aquella que pasa directamente desde el sol, llega a nosotros y a las superficies que nos rodean, y aquella radiación que es dispersada por las moléculas de los componentes en nuestra atmosfera.

6.1. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

La radiación solar directa (H_b) se caracteriza por no presentar cambio alguno durante su viaje desde el sol hasta la llegada a la tierra y a nosotros, tanto en su longitud de onda como en su dirección. Este tipo de radiación es la que provoca la aparición de sombras de los objetos que se interponen en su paso. Para la determinación de la radiación total incidente es necesario cuantificar tanto la radiación directa como la difusa, siendo la suma de estas dos la radiación total incidente sobre una superficie (Ver figura 6).

Figura 6. Radiación solar incidente en una superficie



Fuente: Monografías. [citado 20 Septiembre de 2014]

Disponible página web <<http://www.monografias.com/trabajos82/>>

La radiación solar directa se puede expresar en términos del rayo solar incidente (I_b) el cual depende solo de la distancia del sol a la tierra y el ángulo cenit (θ_z), el cual como se explicó anteriormente es el formado por el rayo con un eje normal a la superficie (ver ecuación 9), de esta forma la relación que permite cuantificar la radiación directa es expresada como:

$$H_b = I_b \cdot \cos(\theta_z) \quad (11)$$

6.2. RADIACIÓN SOLAR DIFUSA

A diferencia de la radiación directa, la radiación solar difusa (H_d) sufre cambios de dirección durante su llegada a la superficie terrestre. Además de esto, al pasar por medio de las nubes y en general de la atmósfera se dispersa y la intensidad con la que irradia las superficies se ve reducida en aproximadamente un 25%. Por esta razón, este tipo de radiación es considerada en la determinación de la totalidad de energía radiante que incide sobre una superficie.

Existen diversos aparatos utilizados para la medición de la radiación, el más utilizado es el piranómetro, el cual permite medir el valor de la radiación total incidente o sólo la radiación difusa, por otro lado el pirheliómetro permite obtener una medición de la intensidad del rayo que incide sobre la superficie.

Al obtener los datos de la radiación directa y difusa se puede determinar la radiación total incidente:

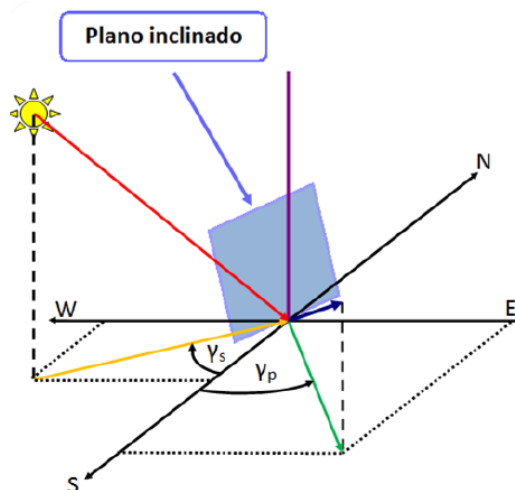
$$H = H_b + H_d \quad (12)$$

6.3. RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

Con el fin de determinar la radiación total incidente en una superficie inclinada es necesario conocer otros factores, además de los que han sido mencionados, que también influyen en la cantidad de energía que incide sobre una superficie como la inclinación de la superficie con respecto a la horizontal (β), su orientación y el ángulo de azimut de pared (γ_p).

6.3.1. Azimut de Pared: De la misma forma que se tiene un ángulo de azimut solar para el rayo incidente en una superficie, es necesario definir el ángulo de azimut de pared (γ_p) para una superficie inclinada y orientada en cualquier dirección. El azimut de pared se define como el ángulo formado entre la proyección sobre la horizontal de la línea normal a la superficie y la línea norte sur.

Figura 7. Ángulo de azimut de pared



Fuente: Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío [13]

En la figura 7 se observa tanto el ángulo de azimut solar como el azimut de pared. El vector trazado en color verde representa la proyección sobre el plano horizontal del vector normal al plano inclinado, señalado en la figura en color

azul, de la misma forma que en el caso del azimut solar, el ángulo de azimut de pared toma valores positivos en la dirección sur-este y negativos en la dirección sur-oeste.

6.3.2. Casos típicos de orientación de una superficie: Existen 3 casos principales para los cuales se puede determinar la inclinación del rayo solar incidente (θ)

- Superficie horizontal:

En la cual tanto el ángulo de inclinación β toma un valor de 0° y el azimut de pared γ_p no influye en la determinación de la inclinación del rayo solar. Por lo tanto esta inclinación puede ser determinada de la misma forma que se obtiene el ángulo de cenit determinado por la ecuación 9.

- Superficie inclinada al sur:

Este tipo de superficies tienen un valor $\beta \neq 0$ pero al estar orientadas hacia el sur el azimut de pared mantiene al igual que en las superficies horizontales un valor igual a cero. Por lo tanto puede comportarse como una superficie horizontal en una latitud aparente $\phi_1 = \phi - \beta$. Para este tipo de superficies el ángulo de inclinación se determina por medio de la siguiente relación.

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi - \beta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\omega) \quad (13)$$

- Superficie genérica:

El caso expuesto en la figura 7 es un claro ejemplo de una superficie genérica, la cual tiene valores de β y de γ_p diferentes de 0 por lo tanto hace que la determinación del ángulo de inclinación de pared dependa de muchos más factores y su relación sea más compleja

$$\cos(\theta) = \cos(\gamma_s - \gamma_p) \cdot \cos(\alpha_s) \cdot \sin(\beta) + \sin(\alpha_s) \cdot \cos(\beta) \quad (14)$$

Para el caso de estudio de este proyecto de grado se analizarán superficies horizontales por lo cual no se tendrán en cuenta los factores mencionados anteriormente y se deja esta información como base para otros experimentos en los cuales se quiera tener en cuenta la inclinación que se presenta en los techos de las viviendas de las construcciones comunes.

7. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE LOS RECINTOS

Este capítulo está destinado a explicar detalladamente la obtención de las ecuaciones que permiten realizar el modelamiento matemático del flujo de calor que ingresa a cada uno de los recintos. Con el fin de obtener una fuente de comparación con los datos prácticos que se obtuvieron por medio de las pruebas realizadas que se explicarán en capítulos posteriores, se realizaron mediciones de otras variables importantes para el desarrollo de este modelamiento como la radiación solar directa y difusa, la temperatura ambiental externa y la temperatura ambiental interna de los recintos, que como se ha dicho en ocasiones anteriores se mantuvo en 24°C manteniendo confort térmico al interior de cada una de las estructuras de prueba.

7.1.ECUACIONES GENERALES PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

En las secciones 7.2, 7.3 y 7.4 se encuentran los balances energéticos realizados para los techos simples, dobles y las paredes de los recintos respectivamente. Estos balances de energía cuentan con factores que es necesario calcular previamente para poder obtener el flujo de calor que ingresa a cada una de las estructuras, como los coeficientes de transferencia de calor, la radiación total incidente y los coeficientes radiativos. A continuación se dará una explicación general de las relaciones que permiten obtener cada uno de éstos factores.

7.1.1. Determinación de la radiación solar incidente: En los capítulos 5 y 6 se explicaron algunos de los factores que influyen en la determinación de la radiación solar incidente, en ésta sección se profundizará sobre ellos para

obtener el balance energético requerido para completar el modelamiento matemático.

La ecuación **15** muestra la expresión general para obtener la radiación que realmente incide sobre una superficie, en ésta expresión aparecen tres términos que corresponden a la radiación directa, difusa y la que es reflejada por el piso respectivamente, de esta forma, para las superficies horizontales, el factor R_b que depende de los ángulos θ_z y θ (ver ecuaciones 9 y 13) toma un valor de 1 ya que el β para una superficie horizontal es igual a cero, así mismo R_d y R_r se convierten en 1 y 0 respectivamente.

$$q_{s,\beta} = H_b \cdot R_b + H_d \cdot R_d + H \cdot \rho_r \cdot R_r \quad (15)$$

Dónde:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (16)$$

$$R_d = \left[\cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]^2 \quad (17)$$

$$R_r = \left[\text{sen} \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]^2 \quad (18)$$

Por tanto, la expresión que permite obtener la radiación total incidente en los techos es:

$$q_{s,\beta} = H_b + H_d \quad (19)$$

Para el caso de las paredes por ser superficies con un β diferente de cero el factor R_b tendrá un valor diferente de 1 y la radiación total reflejada por el suelo será tenida en cuenta.

7.1.2. Cálculo de coeficientes de convección

7.1.2.1. Coeficiente de convección externo: Para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección se utilizó una correlación encontrada por Watmuff et al. [4]

$$h_o = 2.8 + 3.0 * u \quad (20)$$

En esta ecuación el coeficiente de convección solo depende de la velocidad del viento (u) y desprecia los efectos de la convección natural y la radiación.

7.1.2.2. Cálculo del coeficiente de convección interno: Es importante resaltar que en el interior de los recintos la transferencia de calor se da por convección natural, por lo tanto las relaciones utilizadas para obtener el coeficiente convectivo son las propuestas por Yunus Cengel [2] para éste mecanismo de transferencia de calor.

Para el caso de la transferencia de calor por convección existe un coeficiente adimensional de transferencia de calor conocido como número de Nusselt (Nu) y que a su vez está expresado en términos del coeficiente dimensional h , la conductividad térmica del fluido en estudio k y la longitud característica L_c de la siguiente manera.

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (21)$$

En el estudio de la convección existen varias relaciones para el cálculo del número de Nusselt dependiendo tanto de las características del fluido como de la geometría de las superficies con las que realiza el intercambio de calor.

Además de estar expresado en términos de h , k y L_c el cálculo del número de Nusselt se realiza por medio de otros factores como el Número de Grashoff (Gr), el cual representa la razón entre la fuerza de empuje y la fuerza viscosa

que actúan sobre el fluido [2], y el número de Prandtl (Pr), el producto de estos dos números adimensionales da como resultado el número de Rayleigh (Ra).

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (22)$$

Dónde:

g : Gravedad

T_s : Temperatura superficial

T_∞ : Temperatura del aire

β : Coeficiente de expansión volumétrica $\left(\frac{1}{T[k]}\right)$

ν : Viscosidad cinemática

Para el caso de los techos, independientemente de su configuración simple o doble, las relaciones para calcular el número de Nusselt son las mostradas en las ecuaciones 23 y 24, por otra parte, para las paredes se aplica la relación mostrada en la ecuación 25, que es utilizada para paredes ubicadas verticalmente.

$$Nu = 0.54 \cdot Ra^{1/4} \quad Ra[10^4 - 10^7] \quad (23)$$

$$Nu = 0.15 \cdot Ra^{1/3} \quad Ra[10^7 - 10^{11}] \quad (24)$$

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 \quad (25)$$

7.1.2.3. Cálculo de coeficientes radiativos: Las ecuaciones que permitieron realizar el modelo matemático para los techos dobles (ver sección

7.3) fueron tomadas del estudio realizado por Duffie-Beckman [4] para colectores de placa plana, los coeficientes que permiten calcular el calor por radiación están dados por las siguientes ecuaciones:

○ **Cálculo de los coeficientes externos**

La relación que permite obtener el coeficiente de transferencia de calor por radiación existente entre la superficie del techo y los alrededores es:

$$h_{r_{t1-\infty}} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{t1} \cdot (T_s + T_{alr}) \cdot (T_s^2 + T_{alr}^2) \cdot (T_s - T_{alr})}{T_s - T_{\infty}} \quad (26)$$

Donde:

T_{alr} : Temperatura de los alrededores y se asume como 6° menor que la temperatura ambiente.

T_s : Temperatura superficial

T_{∞} : Temperatura del ambiente externo

ε_{t1} : Emisividad de la superficie

.

○ **Cálculo de los coeficientes entre las cubiertas**

El coeficiente que tiene en cuenta la radiación existente entre las dos cubiertas y el fenómeno de efecto invernadero que ocurre entre ellas ésta dado por la siguiente ecuación.

$$h_{r_{t1-t2}} = \frac{\sigma \cdot (T_{s2} + T_{s1}) \cdot (T_{s2}^2 + T_{s1}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{s2}} + \frac{1}{\varepsilon_{s1}} - 1} \quad (27)$$

Donde:

T_{s1} : Temperatura superficial superficie superior

T_{s2} : Temperatura superficial superficie inferior

ε_{s1} : Emisividad de la superficie superior

ε_{s2} : Emisividad de la superficie inferior

- **Cálculo de los coeficientes internos**

Al interior de los recintos se dan dos mecanismos de transferencia de calor, convección y radiación, para el caso de la radiación y haciendo uso de relaciones propuestas por Duffie Beckman [4] en su libro, se hizo uso de la siguiente expresión

$$h_{rad_{t-\infty_i}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_s + T_{\infty_i}) \cdot (T_s^2 + T_{\infty_i}^2) \quad (28)$$

Donde:

T_s : Temperatura superficial

T_{∞_i} : Temperatura del ambiente interno

ε : Emisividad de la superficie

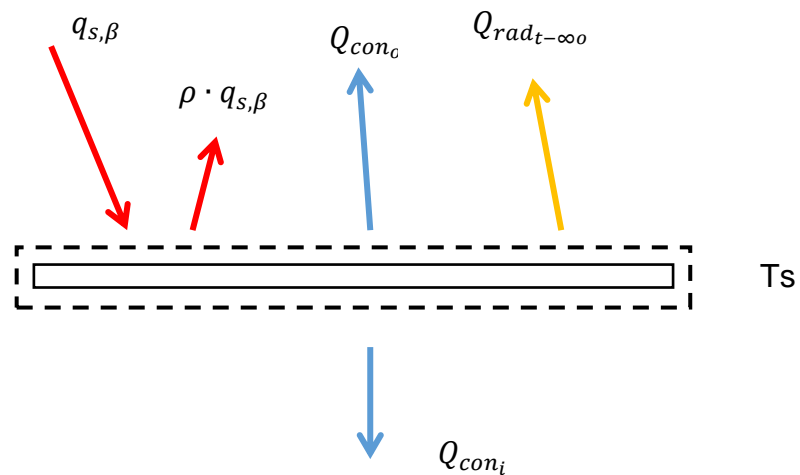
Debido a que las pruebas se realizaron con diferentes tipos de techos existirán dos balances energéticos diferentes, uno para los techos sencillos lo cuales son el fibrocemento, la teja asfáltica y la teja de PVC, y el otro para los techos con policarbonato y el arreglo propuesto con dos tejas de PVC separadas por un espacio de aire, ya que en este último caso se deben tener en cuenta otros aspectos importantes que no se dan en el caso de los techos simples y que se explicaran más adelante.

7.2. TECHOS SIMPLES:

El siguiente balance de energía se basa en el análisis realizado por Stuart Gaffin en el artículo "Techos verdes en la región metropolitana de Nueva York". [3] A pesar de que este artículo se enfoca en el estudio de techos verdes, el

balance energético realizado es aplicado para techos comunes, ya que la única diferencia radica en que para los techos no verdes se omite la pérdida por calor latente que aparece en la figura 8 y se explicará a continuación.

Figura 8. Flujos de calor incidentes sobre techos sencillos



Para el caso de los techos sencillos se tienen diferentes flujos de calor entrando y saliendo de la superficie (ver figura 8), la radiación solar tanto directa (H_b) como difusa (H_d) incide constantemente en el tejado, de la misma forma que lo hacen los alrededores. Como se explicó en el capítulo 4, todos los cuerpos emiten cierta cantidad de energía en forma de radiación dependiendo de su temperatura, por lo tanto, el entorno en el que se encuentren los recintos de prueba es un factor importante a la hora de determinar la energía total que incide en el tejado. Debido a la diferencia de las propiedades de los materiales con los que fueron fabricados cada uno de los tejados que se sometieron a prueba, cierta parte de la energía que incide en cada uno de ellos por la radiación solar es absorbida, otra parte es transmitida y la restante es reflejada y se devuelve a la atmósfera. Además de esto, la emisividad propia del material permite que el techo radíe cierta cantidad de energía hacia los alrededores. Por tanto este flujo de calor, que también será cuantificado, estará saliendo del techo.

Por otra parte, además de la radiación se tienen dos flujos de calor por convección, el que realiza el ambiente externo con la superficie del tejado y el que realiza el ambiente interno también con el techo, de esta forma se obtiene el siguiente balance de energía.

$$q_{s,\beta} - \rho \cdot q_{s,\beta} - Q_{rad_{t-\infty o}} - Q_{con_o} - Q_{con_i} = 0 \quad (29)$$

Dónde:

$$q_{s,\beta} = H_b + H_d \quad (30)$$

$$Q_{rad_{t-\infty o}} = \varepsilon_{tech} \cdot \sigma \cdot (T_{alr}^4 - T_{sup}^4) \quad (31)$$

$$Q_{con_o} = h_o \cdot (T_\infty - T_{sup}) \quad (32)$$

$$Q_{con_i} = (h_i + h_{rad_{t-\infty i}}) \cdot (T_{sup} - T_\infty) \quad (33)$$

H_b : Radiación difusa

H_d : Radiación directa

ε_{tech} : Emisividad del techo

T_{alr} : Temperatura de los alrededores

T_{sup} : Temperatura superficial del techo

T_∞ : Temperatura del ambiente

h_o : Coeficiente de convección con el ambiente externo

h_i : Coeficiente de convección con el ambiente interno

$h_{rad_{t-\infty i}}$: Coeficiente de radiación del techo con el ambiente interno.

7.3. TECHOS DOBLES

Para modelar los techos dobles se tomó como base el análisis realizado por Duffie Beckman [4] para colectores de placa plana, en los cuales, debido al

espacio existente entre la cubierta protectora y la lámina absorbente se genera un efecto invernadero que también ocurre en nuestro caso de estudio.

El efecto invernadero se da básicamente por una transmisión de la energía que incide en la placa superior, al transmitirse al espacio de aire que está entre las dos placas puede incidir en la placa inferior la cual absorbe y transmite una cantidad de energía hacia el interior de los recintos y refleja otra fracción que queda nuevamente en el espacio de aire entre las dos placas y vuelve a incidir en la placa superior, repitiendo el mismo fenómeno. En la figura 9 se puede observar este comportamiento.

Figura 9. Efecto invernadero en colectores de placa plana

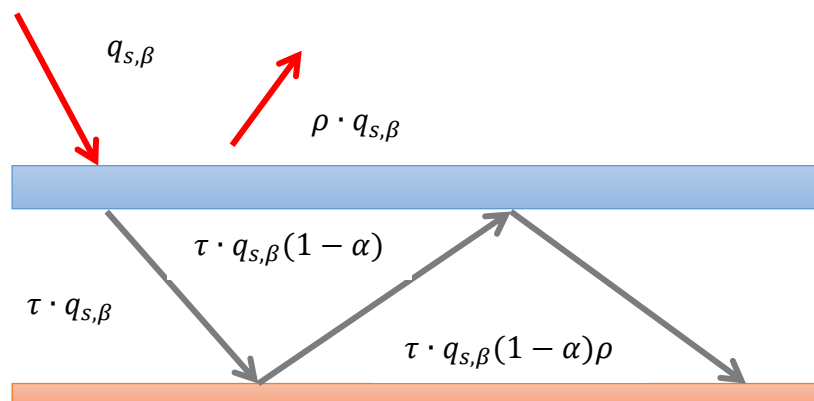
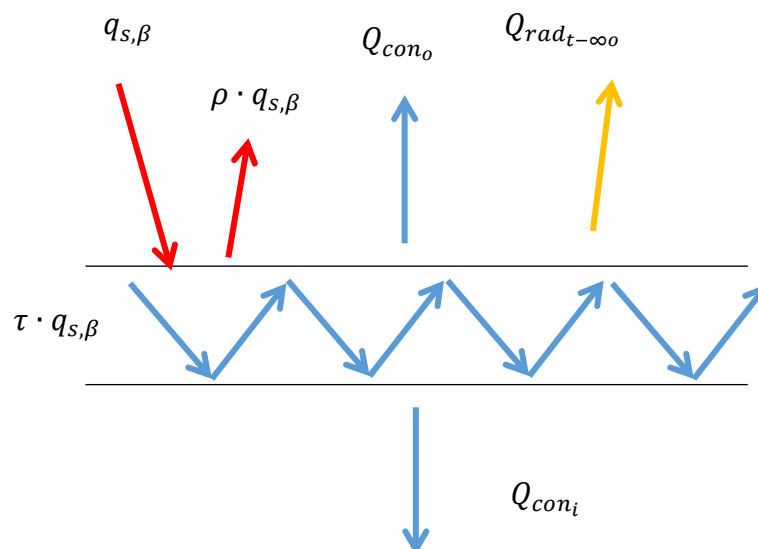
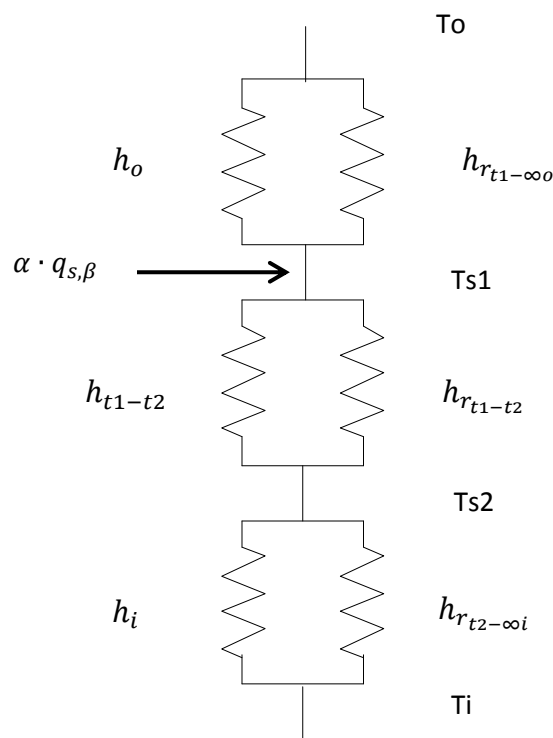


Figura 10. Flujos de calor incidentes en los techos dobles



En el análisis realizado por Duffie-Beckman se tiene en cuenta la convección externa, el intercambio radiativo con los alrededores y la energía solar que incide sobre la placa superior. Además de esto y como se mencionó anteriormente para el espacio de aire existente entre las dos superficies que componen el techo, se tiene en cuenta el efecto invernadero y la convección que también se realiza entre las placas y el aire existente entre ellas. Por último y al igual que en el caso de los techos sencillos la radiación y la convección con el ambiente interno. En las figuras 10 y 11 se observan los flujos de calor que inciden en el techo y se tienen en cuenta en el balance de energía y el circuito de resistencias que representa los flujos de calor respectivamente.

Figura 11. Red de resistencias para modelamiento de techos dobles



Para simplificar el circuito de resistencias mostrado en la figura anterior se calcularon 3 resistencias equivalentes, una para cada par de resistencias encontradas en el ambiente externo, interno y en el intermedio de las dos placas, realizando esta simplificación se obtuvo el siguiente balance de energía.

$$\frac{T_{\infty o} - T_{s1}}{R_1} + \frac{T_{s2} - T_{s1}}{R_2} + \alpha \cdot q_{s,\beta} = \frac{T_{s2} - T_{\infty i}}{R_3} \quad (34)$$

Dónde:

$$R_1 = \frac{1}{h_o + h_{r_{t1-\infty o}}} \quad (35)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{t1-t2} + h_{r_{t1-t2}}} \quad (36)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_i + h_{r_{t2-\infty i}}} \quad (37)$$

Cabe resaltar que para el coeficiente de convección existente entre las dos placas se hizo uso de las relaciones propuestas por Cengel [2] para recintos cerrados, en éste caso podemos aplicar las relaciones para placas horizontales en las cuales debe tenerse en cuenta cuál de la superficies posee mayor temperatura. En el caso en el que la temperatura de la capa superior es mayor que la temperatura de la capa inferior, no se crean corrientes de convección por lo tanto es posible asumir un $Nu=1$, lo que significa que la transferencia de calor se da por conducción.

7.4. BALANCE ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LAS PAREDES.

El balance energético realizado a través de las paredes es prácticamente igual al realizado para los techos simples, pero difiere en algunos aspectos tales como la determinación de la radiación solar incidente y la relación utilizada para encontrar el coeficiente de convección. Al igual que en el caso de los techos, se desprecia el espesor de las paredes, por tanto, la acumulación de energía. Teniendo en cuenta esto, el balance energético para las paredes es expresado de la siguiente manera.

$$q_{s,\beta_{wall}} - \rho \cdot q_{s,\beta_{wall}} - Q_{rad_{t-\infty o}} - Q_{con_o} - Q_{con_{ipar}} = 0 \quad (38)$$

7.5. CÁLCULO DEL CALOR TOTAL INTERNO.

Para terminar el modelamiento matemático realizado para cada uno de los recintos es necesario calcular el calor total que ingresó al recinto tanto por el techo como por cada una de las paredes, debido a que cada uno de los balances presentados anteriormente tiene como fin calcular el calor que ingresa por cada superficie, el calor total será la suma de estos generando la siguiente expresión.

$$\dot{Q}_{conv_i} + 4 \cdot \dot{Q}_{conv_{ipar}} = \dot{Q}_{Totrec} \quad (39)$$

8. MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS DE PRUEBA

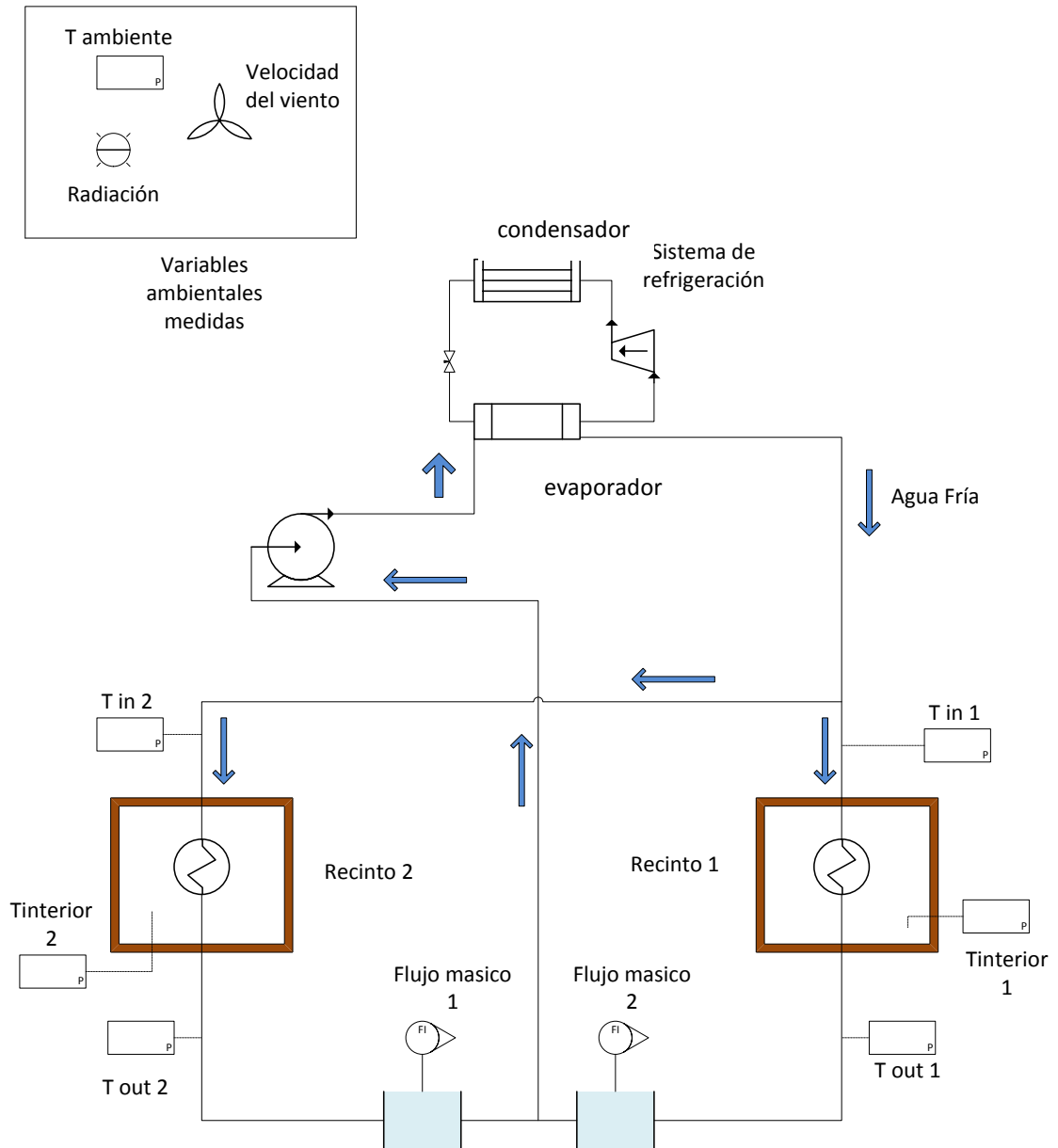
El sistema planteado para realizar la toma de datos experimentales del estudio térmico consta de dos recintos que permiten poner a prueba los diferentes tipos de techo. Además, de diferentes subsistemas que cumplen con funciones específicas para la determinación del flujo de calor que ingresa a cada uno de los recintos, los subsistemas que permiten realizar ésta tarea son:

- Subsistema de prueba
 - 2 Recintos de prueba
 - 5 tipos de tejado
 - Tanques para recirculación de agua
 - Bombas acopladas en serie
- Subsistema de enfriamiento de agua
 - Sistema de refrigeración
 - 2 radiadores que permiten el intercambio de calor del agua enfriada con el aire del ambiente interno de los recintos.
 - Circuito de bombeo
- Subsistema de medición
 - Sensores de temperatura
 - Temperatura de entrada del agua a cada recinto
 - Temperatura de salida del agua después del recinto
 - Temperatura del ambiente interno de cada una de las estructuras
 - Temperatura ambiente
 - Medición de la radiación solar
 - Medición de la velocidad del viento

La figura 12 muestra el diagrama esquemático de todo el sistema, en donde se pueden observar las variables medidas que se tuvieron en cuenta para el

cálculo del calor teórico y experimental, y el funcionamiento básico del circuito de prueba.

Figura 12. Esquema general del circuito de prueba



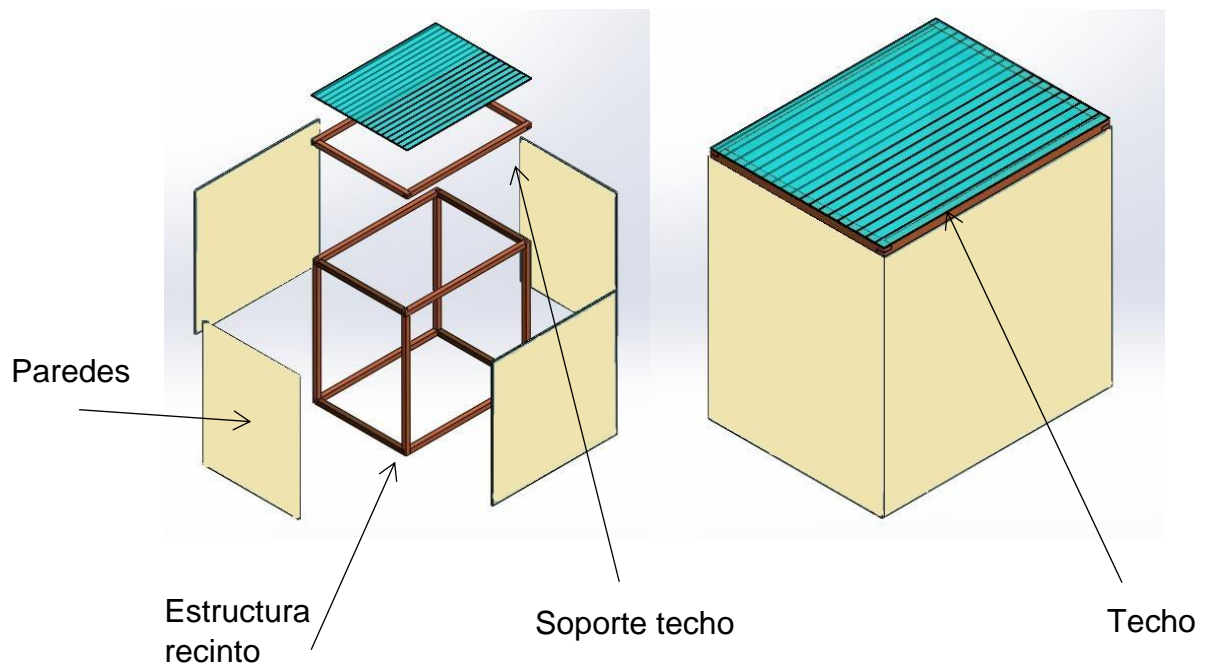
A continuación se hace una descripción detallada de la construcción y montaje de los recintos de prueba así como la adecuación del sistema de refrigeración utilizado y cada uno de los subsistemas que permiten la correcta operación y medición de las variables necesarias para realizar tanto el modelamiento, como

calcular los resultados experimentales con los que se realizó la comparación del estudio.

8.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS RECINTOS

Como recintos de prueba se diseñaron dos estructuras con una marco de madera de 1.20 [m] de largo y 0.95 [m] de ancho usadas como soporte para paredes prefabricadas en yeso DRYWALL de 1/2" de espesor, las cuales solo van colocadas lateralmente de manera que la parte superior queda descubierta para permitir el intercambio del techo. En la figura 13 se puede observar el marco construido como estructura soporte para cada uno de los recintos.

Figura 13. Recintos de prueba



8.2. MONTAJE DE TEJADOS

Para facilitar la realización de las pruebas que permiten hacer la comparación termo económica de dos tipos de tejados al tiempo, fue necesario permitir el intercambio sencillo de los mismos, para esto se diseñaron estructuras de

soporte simple para cada uno de ellos, las cuales constan de un marco de madera al cual van atornillados cada uno de los tipos de techo que se sometieron a prueba.

Figura 14. Soportes estructurales de los tejados



8.3. SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

Con el fin de evaluar la cantidad neta de calor que ingresa a cada recinto se utiliza un sistema de acondicionamiento de aire enfriado por agua, el cual utiliza un banco del laboratorio de sistemas térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica que originalmente fue diseñado para la producción de hielo tubular. Para lograr que este banco cumpliera la función de un sistema de refrigeración, se realizaron una serie de adaptaciones que se explicarán a continuación.

8.3.1. Adaptación del sistema de refrigeración: El banco de producción de hielo tubular tomado del laboratorio de sistemas térmicos, tenía un sistema de control diseñado para la producción de hielo. Con el fin adecuar el sistema para ser usado en el acondicionamiento del aire, se suspendió el sistema de corte con el que contaba y este se reemplazó por una tapa para el bombeo a través del mismo (Figura 15). Además de esto, se reemplazó el compresor original del sistema y se integró una unidad condensadora (Figura 16) que también hacía parte del laboratorio de sistemas térmicos, el cambio del compresor y condensador con el que contaba inicialmente el banco por la unidad condensadora, requirió realizar un cambio de refrigerante de R404 a R134a puesto que la unidad estaba diseñada para manejar éste tipo de refrigerante. Éste cambio de refrigerante no demandó mayores modificaciones a los demás componentes del sistema de refrigeración puesto que cuentan con propiedades bastante similares y las presiones y temperaturas de operación se mantenían en un rango en el que los demás componentes aún podían operar sin ningún tipo de problema.

Figura 15. Adaptación de la tapa para el sistema de bombeo

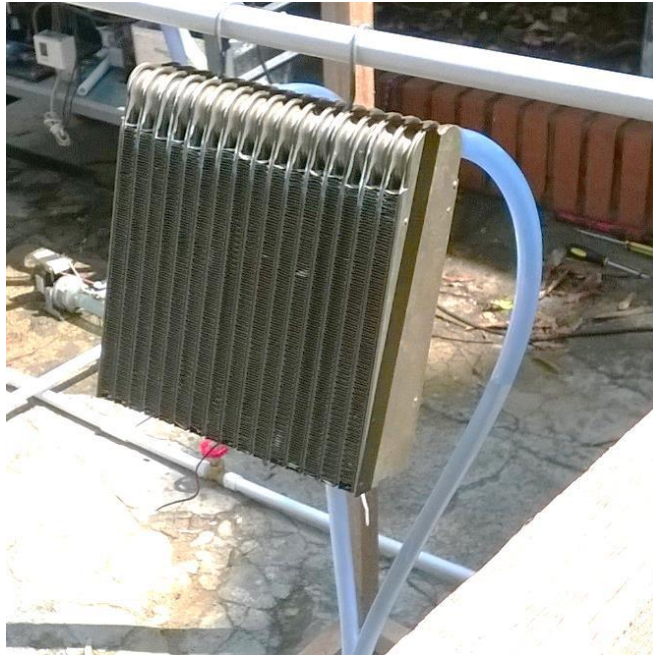


Figura 16. Sistema de refrigeración adaptado



8.3.2. Montaje de evaporadores como unidades manejadoras: Para el enfriamiento del aire al interior de cada recinto se adaptaron dos evaporadores usados en el acondicionamiento de aire en automóviles (figura 17), para esto se integraron dos ventiladores, los cuales permiten elevar el coeficiente de transferencia de calor por convección además de recircular el aire por todo el recinto, lo que permite establecer una temperatura aproximadamente uniforme al interior del mismo.

Figura 17. Unidad manejadora de aire



8.4. MONTAJE DEL SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo es el encargado de llevar y controlar el flujo de agua a baja temperatura que llega a realizar el intercambio de calor con el aire de cada recinto, y recircularlo hacia el sistema de refrigeración. Para esto se diseñó el circuito de bombeo mostrado en la figura 18, y se utilizaron 2 bombas acopladas en serie mostradas en la figura 19 para garantizar el flujo correcto por todo el sistema.

Figura 18. Sistema de bombeo



Figura 19. Montaje de bombas en serie



8.5. SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición es el encargado de sensar los parámetros necesarios para el cálculo del calor extraído de cada recinto y para el modelamiento matemático de los mismos. A continuación se especifica cada una de estas variables y la forma en que fueron medidas en el sistema:

8.5.1. Medición de temperaturas del agua a la entrada y la salida de cada recinto: Para la medición del calor retirado por el sistema de aire acondicionado, se debe medir el cambio de temperatura del agua a la entrada y la salida de cada recinto, con el fin de medir estas temperaturas se utilizaron sensores de acuario, con un rango de temperaturas de -50° a 70° , y con una precisión de 0.1° que además están directamente acoplados a un display que permite observar el valor de la temperatura continuamente.

Figura 20. Sensores para la medición de las temperaturas de entrada y salida del agua



8.5.2. Montaje para la medición indirecta del caudal real instantáneo: Como se especificó anteriormente, el flujo másico de agua es una variable indispensable para la medición del calor retirado, para cumplir con este fin se adecuó el sistema de bombeo, de tal forma que se pueda regular el caudal de agua que pasa por cada uno de los recintos por medio de válvulas de compuerta. Además de esto se construyó el sistema de bombeo de forma que permitiera tomar muestras de agua fácilmente para calcular el caudal que ingresa a cada una de las estructuras de prueba, en la figura 21 se muestra la forma como fue construido el sistema para que permitiera la medición indirecta, extrayendo un volumen conocido de agua que llega a cada tanque mientras se toma el tiempo requerido para extraer dicho volumen.

Figura 21. Sistema de extracción de volumen para medición indirecta de caudal



8.5.3. Medición de temperaturas ambientales: Como se explicó en el capítulo anterior, unas variables importantes para el modelamiento matemático del sistema son las temperaturas ambientales interna y externa, para este fin se utilizaron sensores similares a los utilizados para la medición de la temperatura de entrada y salida del agua, los cuales son sensores resistivos tipo RTD con una velocidad de respuesta bastante rápida y que también permiten la continua visualización de la temperatura sensada por medio de un display.

8.5.4. Medición de la radiación solar directa y difusa: Para el cálculo del flujo de calor a través del tejado y las paredes, es necesario medir la energía incidente que genera este flujo, por ende fue preciso medir la radiación solar incidente, tanto directa como difusa. Estas mediciones se realizaron mediante dos piranómetros (figura 22), cada uno encargado de medir uno de estos tipos de radiación conectados a un sistema de adquisición de datos de National Instruments que por medio de labview permitió tomar los datos de la radiación a lo largo del día en tiempo real.

Figura 22. Pyranómetros



9. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELAMIENTO

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo matemático planteado, los balances de energía y las condiciones asumidas para dar solución al mismo, es necesario realizar pruebas experimentales que permitan obtener una comparación entre los datos calculados teóricamente y los alcanzados por la práctica.

- Calor teórico:

En el capítulo 7 se explicó en detalle las ecuaciones que fueron planteadas para calcular el calor que ingresa al recinto. Dichas ecuaciones permiten obtener el flujo de calor a partir de variables como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento, que fueron medidas durante los días en los que se sometieron a prueba los techos.

- Calor experimental:

Por otra parte, las variables que se tomaron en cuenta para determinar el flujo de calor de manera experimental fueron la temperatura de entrada y salida del agua, antes y después de cada recinto y el flujo másico que circulaba por cada uno de ellos. De ésta forma, fue posible calcular el calor que retiraba el sistema de refrigeración. Cabe resaltar, que debido a que la temperatura del ambiente interior de cada una de las estructuras se mantuvo a 24°C, por medio de la regulación del flujo másico que ingresa a cada recinto, el calor retirado por el sistema de refrigeración corresponde a la carga térmica que logra ingresar a cada una de ellos.

Entonces, según lo expresado por el balance energético dado por la primera ley de la termodinámica:

$$Q_{Retirado} = \dot{m}_w * C_p * (T_o - T_i) \quad (40)$$

donde:

$Q_{retirado}$ = Calor retirado por el agua

\dot{m}_w = Flujo másico de agua

C_p = Calor específico del agua a una temperatura promedio

T_o = Temperatura del agua a la salida del recinto

T_i = temperatura de agua a la entrada del recinto

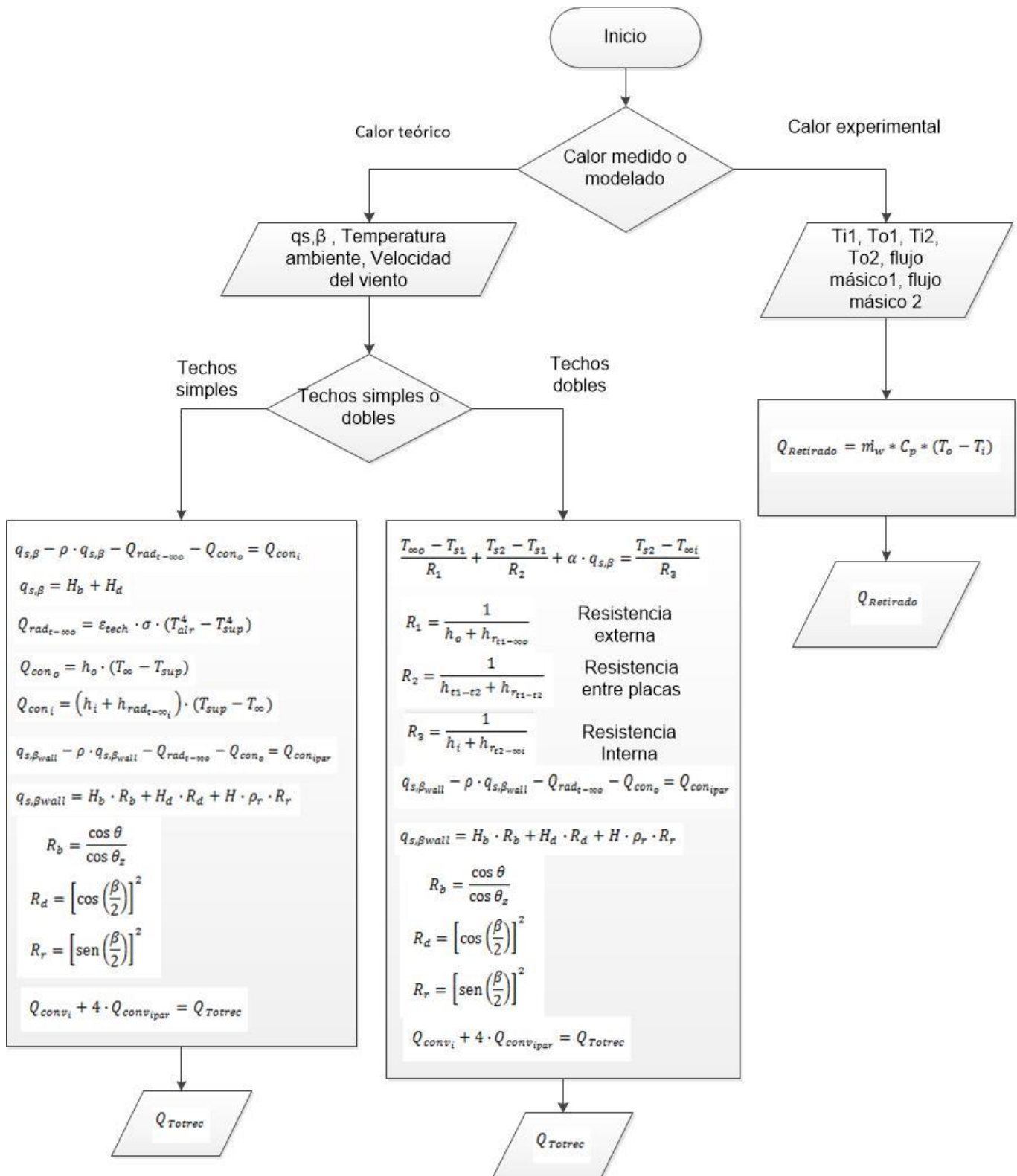
La figura 23 muestra un diagrama de flujo conceptual, donde se puede observar el proceso a seguir para calcular el flujo de calor experimental y teórico con sus principales ecuaciones. Cabe resaltar que para el caso del calor teórico se deben tener en cuenta las ecuaciones planteadas en el capítulo 7 dedicadas a encontrar los coeficientes de transferencia de calor de cada uno de los casos presentados.

Teniendo en cuenta que sólo se crearon dos módulos para realizar la toma de datos experimentales fue necesario hacer pruebas de a parejas de techos lo cual generó la necesidad de realizar diez combinaciones diferentes para tener una fuente de datos completa y realizar el cotejo entre ellos. La tabla 1 muestra las combinaciones de techos en el orden en el que fueron realizadas las tomas de datos. Cada una de las pruebas se realizó durante 6 horas, de 9:00 am a 3:00 pm, por ser las horas con mayor radiación solar.

Tabla 1. Distribución de pruebas experimentales

Día de Prueba	Recinto 1	Recinto 2
16 de Diciembre	Fibrocemento	Arreglo PVC
17 de Diciembre	Fibrocemento	Policarbonato
18 de Diciembre	Fibrocemento	PVC
19 de Diciembre	Fibrocemento	Teja verde
20 de Diciembre	PVC	Arreglo PVC
21 de Diciembre	PVC	Policarbonato
22 de Diciembre	PVC	Teja verde
23 de Diciembre	Teja Verde	Policarbonato
24 de Diciembre	Teja Verde	Arreglo PVC
26 de Diciembre	Policarbonato	Arreglo PVC

Figura 23. Diagrama de flujo conceptual



9.1. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Las variables que sirvieron como datos de entrada al modelo matemático realizado fueron, como se mencionó anteriormente, la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento, además de algunas características físicas propias de cada uno de los materiales utilizados, como reflectividad, emisividad y conductividad. En la figura 24, 25 y 26 se puede observar el comportamiento de la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento respectivamente, medidas el día 16 de Diciembre durante las 6 horas de prueba.

Figura 24. Radiación solar total

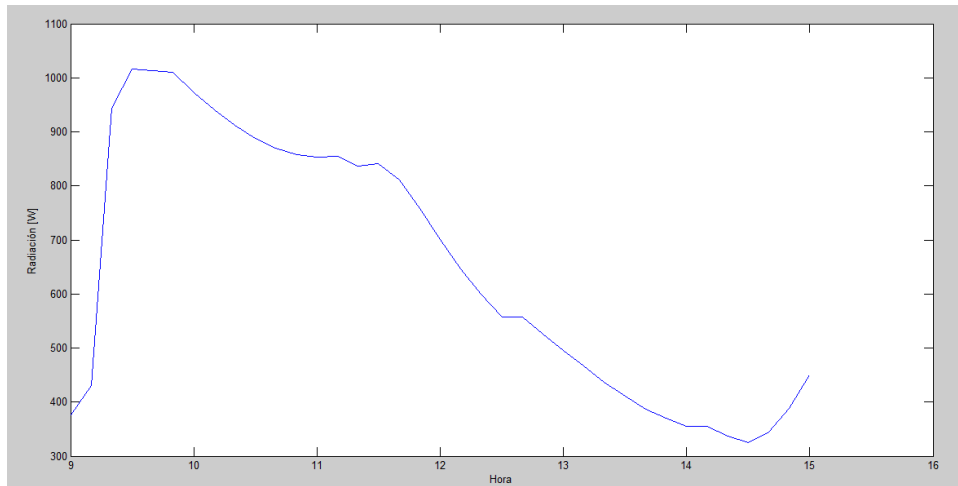


Figura 25. Temperatura ambiente

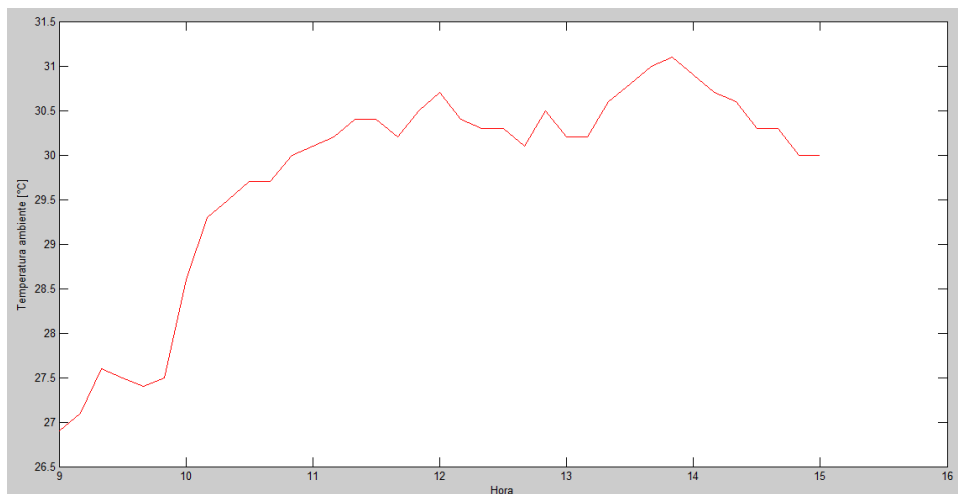
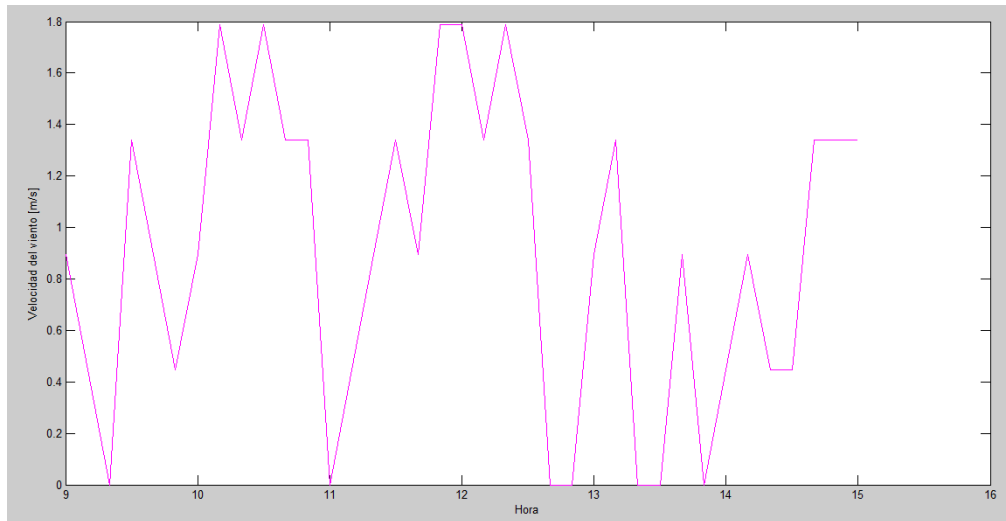


Figura 26. Velocidad del viento



9.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

Las pruebas finales se realizaron desde el día 16 al día 26 de Diciembre. En las figuras 27, 28 y 30 se puede observar un ejemplo de los resultados obtenidos del modelamiento en donde se grafica el flujo de calor que ingresa a los recintos en función de las horas del día en las que se realizó la prueba. Las figuras 29 y 31 muestran los perfiles de la radiación solar medida para los días de prueba de los techos de fibrocemento-PVC y PVC-Teja verde respectivamente. La totalidad de las gráficas obtenidas del modelo matemático se pueden observar en el ANEXO A.

La radiación solar incidente en la prueba realizada para la comparación entre la Teja de fibrocemento y el arreglo propuesto para la teja de PVC mostrado en la figura 27 corresponde al perfil de radiación de la figura 24.

Figura 27. Teja de fibrocemento vs Arreglo de PVC

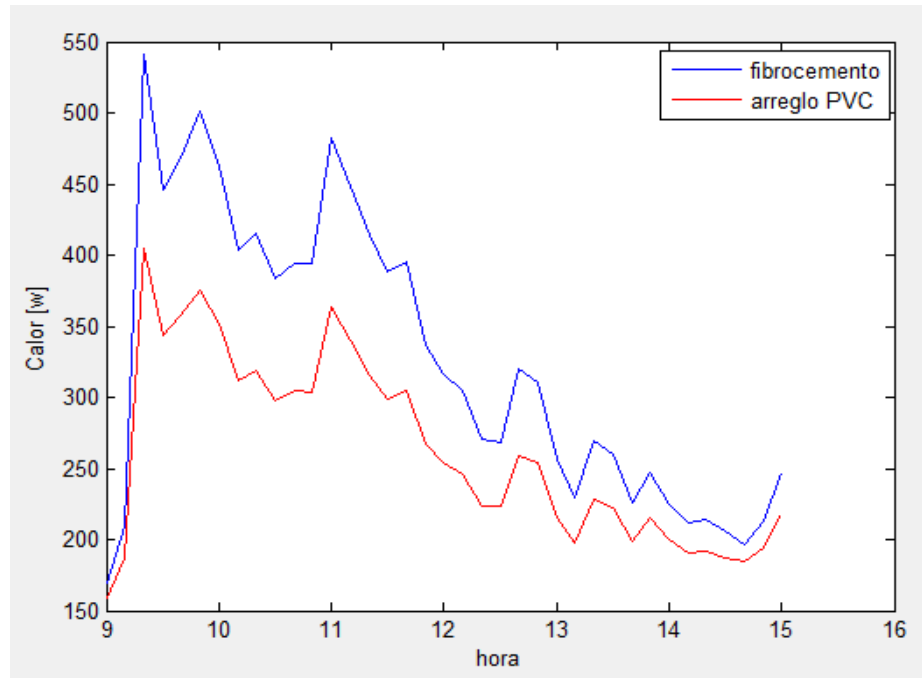


Figura 28. Teja de fibrocemento vs Teja de PVC

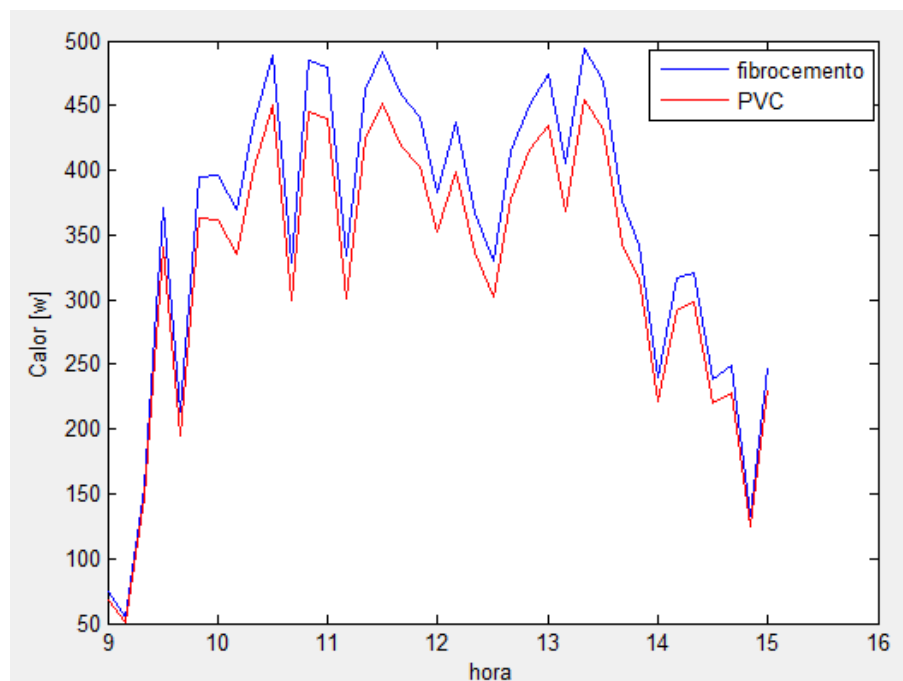


Figura 29. Radiación solar incidente sobre tejados de fibrocemento y PVC

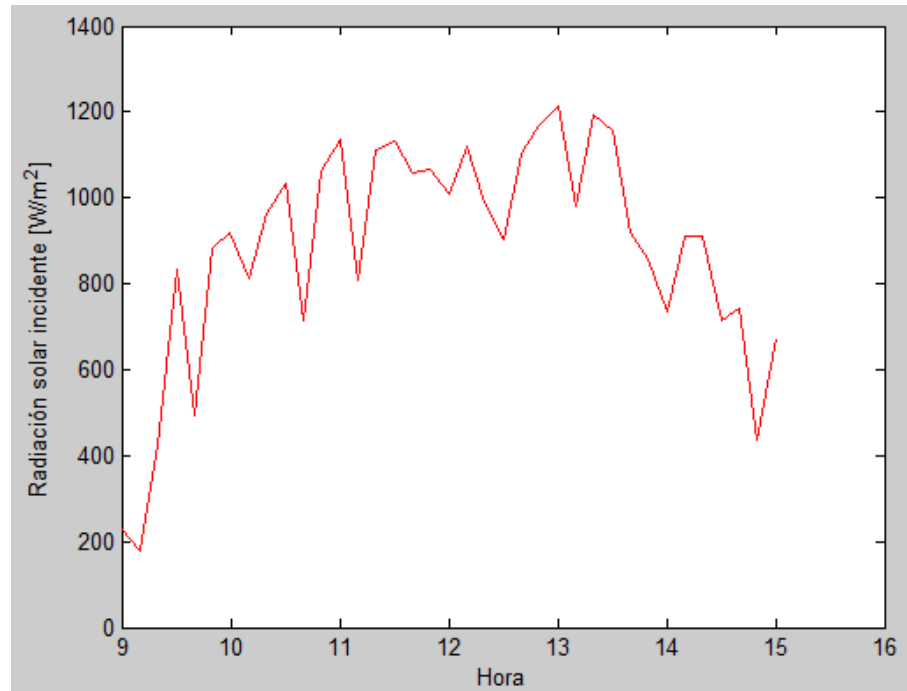


Figura 30. Teja de PVC vs Teja verde

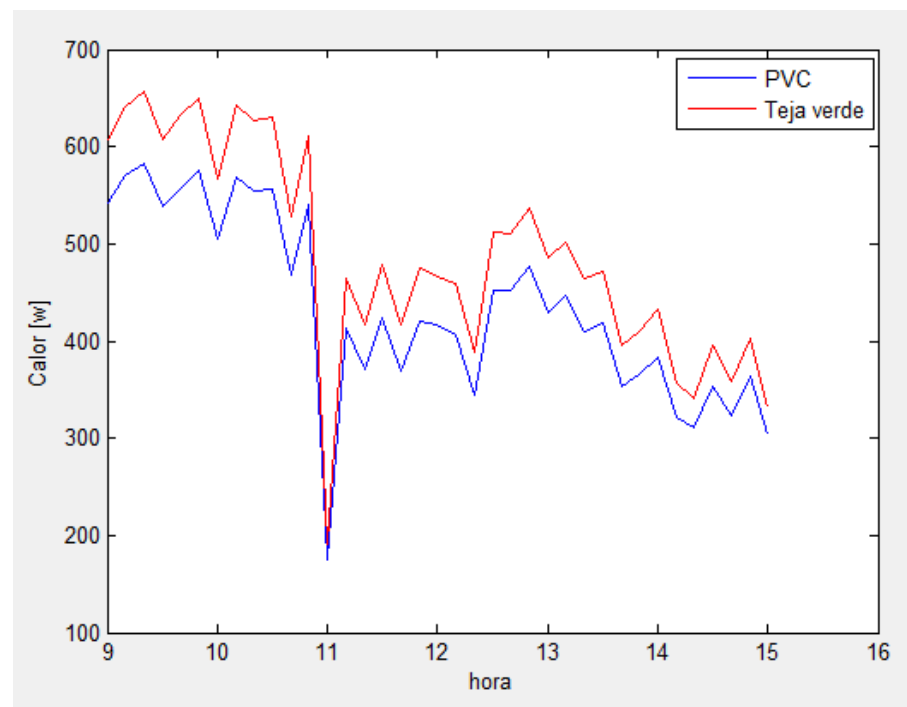
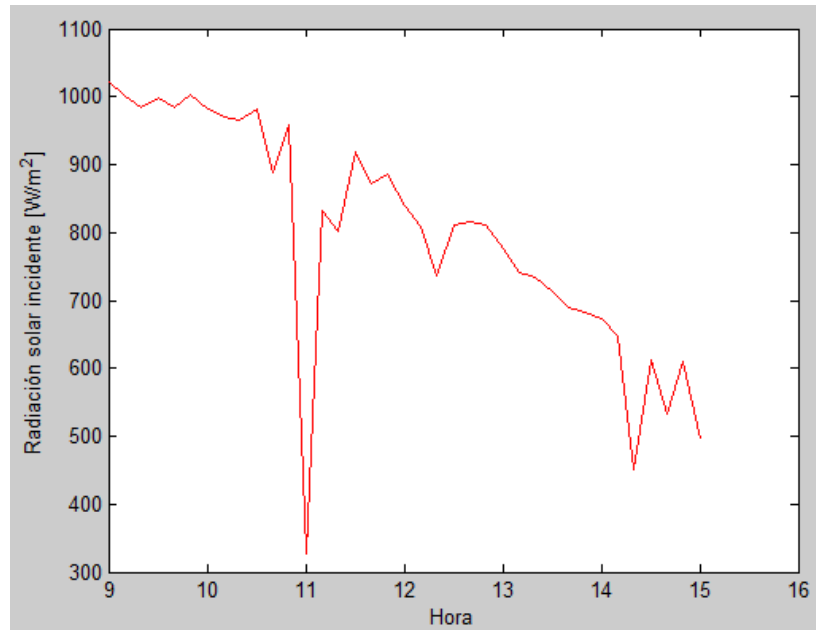


Figura 31. Radiación solar incidente sobre tejados de PVC y teja verde



La tabla 2 muestra el promedio del calor medido que ingresa a cada uno de los recintos durante los 10 días de prueba.

Tabla 2. Flujo de calor promedio que ingresa a los recintos

Día prueba	Q ingresa Recinto 1 [W]		Q ingresa Recinto 2 [W]	
16 Diciembre	Fibro cemento	325.55	Arreglo PVC	262.40
17 Diciembre	Fibro cemento	361.77	Policarbonato	283.69
18 Diciembre	Fibro cemento	354.69	PVC	325.50
19 Diciembre	Fibro cemento	394.31	Teja verde	409.37
20 Diciembre	PVC	464.69	Arreglo PVC	382.70
21 Diciembre	PVC	344.14	Policarbonato	266.17
22 Diciembre	PVC	434.10	Teja verde	488.08
23 Diciembre	Teja Verde	415.87	Policarbonato	316.625
24 Diciembre	Teja Verde	398.8	Arreglo PVC	298.54
26 Diciembre	Policarbonato	330.49	Arreglo PVC	346.28

9.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

Con el fin de obtener datos prácticos que permitieran validar los resultados obtenidos por el modelo matemático, en cada prueba se realizó la medición de otras variables que como se mencionó al principio de éste capítulo, permitieron calcular experimentalmente el flujo de calor que ingresa a cada recinto en los mismos intervalos de tiempo en los que se obtuvieron los datos teóricos. En el ANEXO B se encuentra la comparación de todos los datos teóricos y experimentales realizados para cada uno de los techos, las figuras 32, 33 y 34 muestran algunos de éstos resultados comparando el flujo de calor que ingresa para cada uno de los recintos en función de la hora. Para los tres casos que se presentan en estas figuras, se puede observar que si bien el comportamiento del calor experimental tiene varios picos, en general la tendencia se asimila a los datos obtenidos del modelo matemático.

Figura 32. Flujo de calor medido vs modelado. Teja de fibrocemento, Diciembre 17

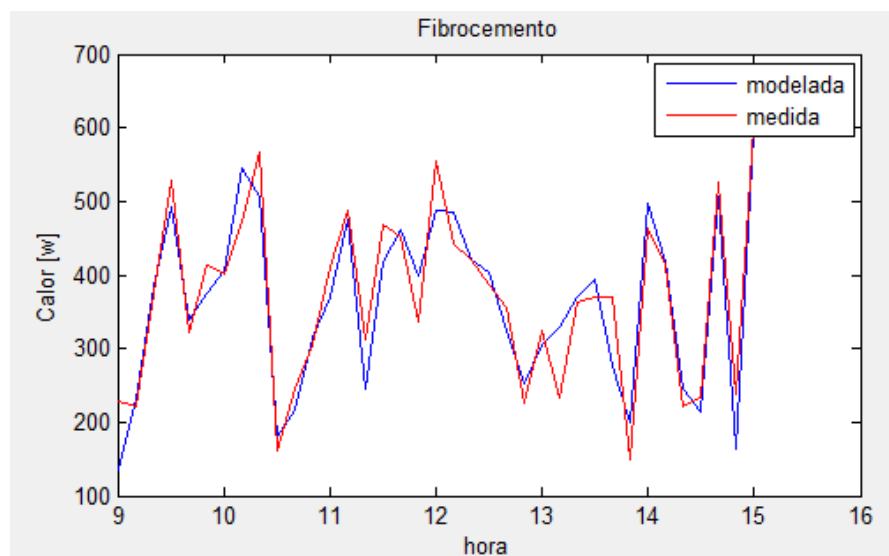


Figura 33. Flujo de calor medido vs modelado. Arreglo de tejas de PVC, Diciembre 20

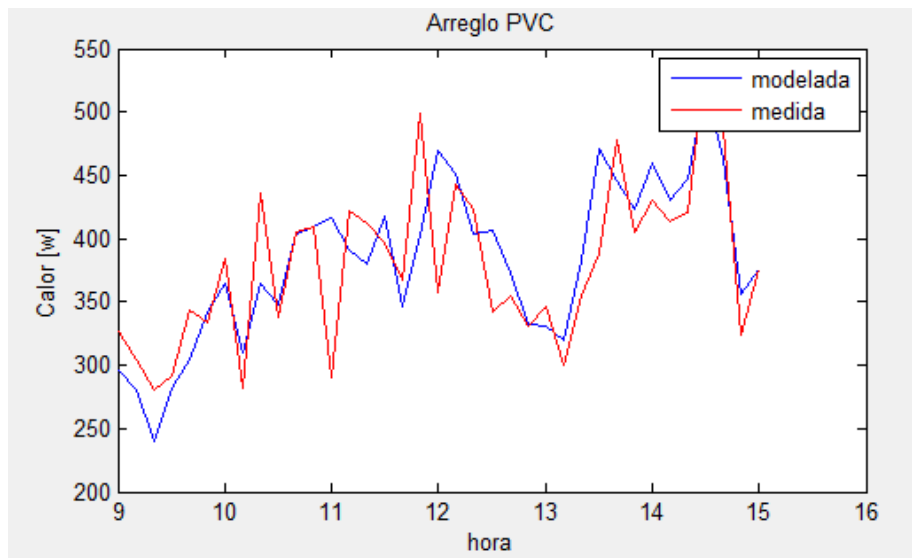
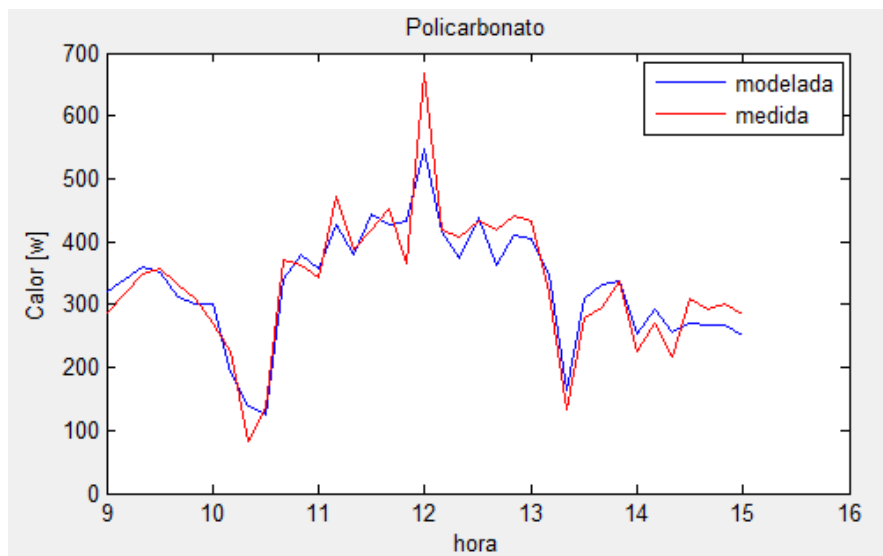


Figura 34. Flujo de calor medido vs modelado. Policarbonato, Diciembre 26

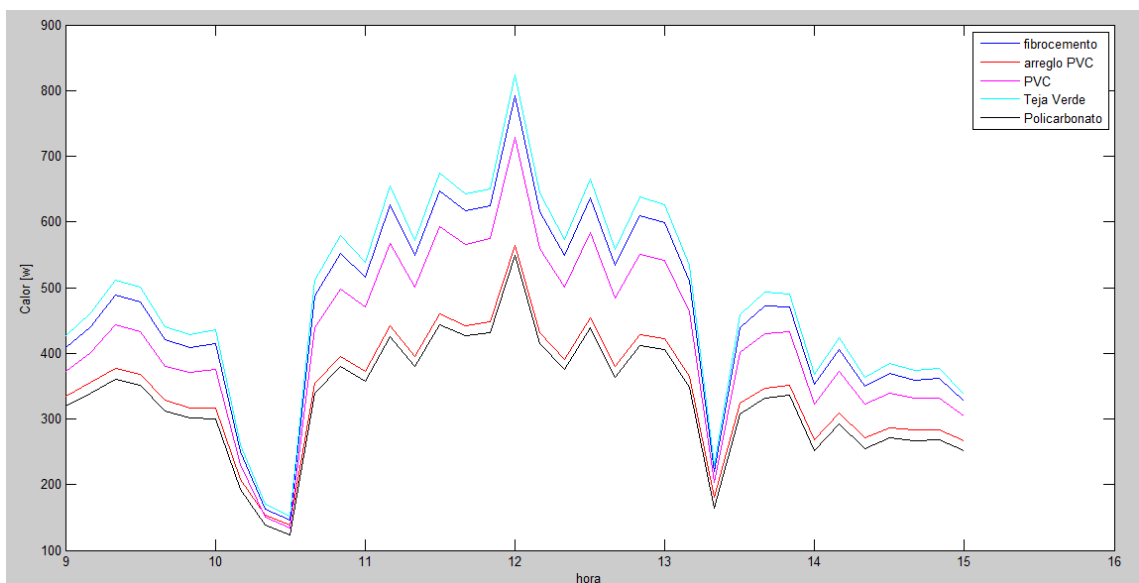


9.4. COMPARACIÓN DE TODOS LOS TIPOS DE TECHO

Debido a que las condiciones ambientales de las pruebas experimentales realizadas no fueron iguales para los cinco tipos de techos, por haber tomado datos en días diferentes, no es posible cuantificar el beneficio térmico que tiene

un techo con respecto a los otros cuatro. Por tanto, y gracias a que la validación del modelamiento permitió confirmar los datos teóricos obtenidos de él, se realizó una prueba más al modelo sometiendo todos los tipos de techo a las condiciones de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento más críticas que se tuvieron en los diez días de prueba, éstas se dieron para el día 26 de Diciembre. En la figura 35 se puede observar el resultado obtenido, en el cuál el policarbonato presenta el menor ingreso de flujo de calor hacia el interior del recinto, seguido por el arreglo propuesto, la teja de PVC, el fibrocemento y por último la teja verde.

Figura 35. Comparación de los diferentes tipos de techo bajo las mismas condiciones ambientales



La carga térmica que teóricamente ingresa a cada recinto con los diferentes tipos de prueba se muestra a continuación.

Tabla 3. Calor promedio que ingresa a los recintos para condiciones ambientales iguales.

TIPO DE TECHO	Q PROMEDIO [W]
Fibro cemento	465.042
PVC	424.423
Teja Verde	485.913
Policarbonato	330.490
Arreglo propuesto	346.282

Con éstos datos es posible tener una base para determinar cuál tipo de techo ofrece las mejores ventajas tanto térmicas como económicas, en el siguiente capítulo se explicará el proceso para obtener la relación costo beneficio y se cuantificará en términos económicos las ventajas que ofrece implementar cada uno de ellos.

10.RELACIÓN COSTO BENEFICIO

Una de las etapas importantes del estudio realizado es la relación costo beneficio, ya que nos permite tener una medida económica de las ventajas térmicas que ofrece cada uno de los techos. En éste capítulo se explicará detalladamente el proceso por medio del cual se calculó el beneficio económico de la utilización de estos techos.

10.1. COSTO DE INSTALACIÓN DE LOS TECHOS

Es importante además de conocer la cantidad de calor que ingresa a cada uno de los recintos, saber cuánto es la inversión necesaria para instalar cada una de las cubiertas y de ésta manera tomar decisiones sobre la viabilidad de utilizar cualquiera de los tipos de tejado. Por lo tanto se calculó el costo de instalación por metro cuadrado de cada uno de los techos estudiados, la siguiente tabla muestra el detalle de los elementos necesarios para la instalación y su respectivo costo.

Cabe resaltar que a pesar de que los cálculos mostrados a continuación se realizaron para una cubierta de 1m² los techos utilizados en las pruebas cuentan con un área de 1.1875 m², por lo tanto, el valor de la tabla será multiplicado por el área de las cubiertas.

Tabla 4. Costo de instalación por metro cuadrado de los techos

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNIT	VALOR TOTAL
PVC			
Teja	1	\$10.302	\$10.302
Madera	2	\$7.000	\$14.000
Amarres	8	\$300	\$2.400

			\$26.702
TEJA TERMOACÚSTICA			
Teja	1	\$18.894	\$18.894
Madera	2	\$7.000	\$14.000
Tornillos	18	\$299	\$5.382
			\$38.276
FIBROCEMENTO			
Teja	1	\$11.147	\$11.147
Madera	2	\$7.000	\$14.000
Ganchos	2	\$329	\$660
Tornillos	4	\$110	\$440
			\$26.247
POLICARBONATO			
Lámina	1	\$25.800	\$25.800
Perfiles	1	\$2.000	\$2.000
Tornillos	8	\$100	\$800
Madera	2	\$7.000	\$14.000
Cinta respirable	2	\$750	\$1.500
			\$44.100
ARREGLO PVC			
Tejas	2	\$10.302	\$20.604
Madera	2	\$7.000	\$14.000
Amarres	8	\$300	\$2.400
Cinta doble faz	4	\$1000	\$4.000
			\$41.004

10.2. COSTO DE RETIRO DE LA CARGA TÉRMICA

La carga térmica ganada por cada uno de los recintos debido al flujo de calor que logra pasar por los techos y las paredes se retiró constantemente por

medio de la adaptación del sistema de refrigeración expuesto en el capítulo 8. Durante las pruebas realizadas se hicieron mediciones que permitieron obtener el coeficiente de operación (COP) del sistema utilizado.

Para obtener el valor del COP se tuvo en cuenta además del calor ganado por el agua al retirar la carga térmica de los recintos en las condiciones más críticas, el calor sensible extra que se ganaba al realizar el recorrido por el sistema de distribución y por mantener los tanques en los que se realizó la medición del flujo másico expuestos al ambiente y a la incidencia de la radiación solar.

Se estimó un delta de temperatura de 0.6°C producto de estos procesos extras que se dan durante el recorrido del agua para realizar su función principal de retirar el calor que ingresa a los recintos y mantener una temperatura de 24°C al interior de los mismos. El COP obtenido después de éste análisis fue de 2.87.

La potencia eléctrica consumida para eliminar la carga térmica que ingresa a cada uno de los recintos se obtiene por medio de la siguiente expresión

$$W_e = \frac{Q_{total}}{COP} \quad (41)$$

$$W_{e-fibrosc} = 162.035 [KW]$$

$$W_{e-PVC} = 147.883 [KW]$$

$$W_{e-Tejav} = 169.308 [KW]$$

$$W_{e-polio} = 115.153 [KW]$$

$$W_{e-Arreglo} = 120.656 [KW]$$

El cálculo del costo que tiene eliminar la carga térmica se obtiene a partir de la potencia eléctrica consumida multiplicándolo por el costo del KW-h para un estrato 3 o 4 en la ciudad de Bucaramanga [5].

$$Costo = 392.667 \left[\frac{\$}{KW - h} \right] \cdot W_e [KW] \cdot tiempo\ prueba [h] \quad (42)$$

Haciendo uso de la ecuación 42 se obtiene para cada tipo de techo el costo diario del retiro de la carga térmica:

$$Costo_{fib} = \$ 381.7$$

$$Costo_{PVC} = \$ 348.4$$

$$Costo_{Tejav} = \$ 398.8$$

$$Costo_{policar} = \$ 271.3$$

$$Costo_{arreglo} = \$ 284.2$$

10.3. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

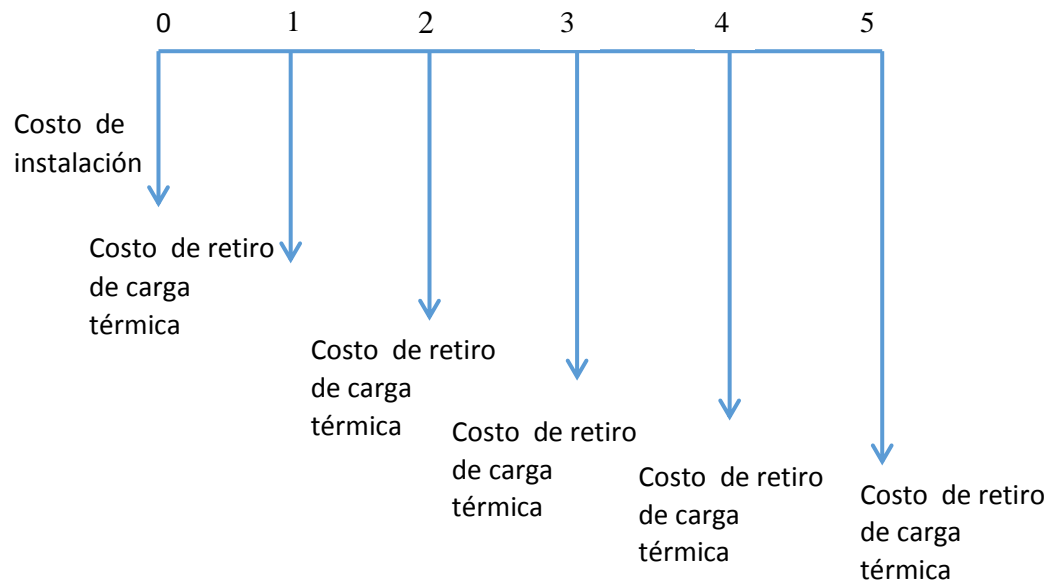
Para el análisis costo beneficio es necesario realizar una tabla de comparación entre los tipos de techos para determinar el ahorro de implementar un tejado en contraste con otro, para tal fin se plantea un análisis de costos a 5 años donde se tendrá en cuenta los costos de retiro de la carga térmica durante cada año, asumiendo el flujo de calor promedio constante y un aumento en el costo del Kw-h del 2% anual. Cabe resaltar que los costos de mantenimiento se asumen casi iguales para los tipos de tejado, por tanto no se tendrán en cuenta en el análisis realizado.

La tabla 5 muestra los costos de instalación y los costos de retiro de la carga térmica para el primer año de cada uno de los tipos de tejado.

Tabla 5. Costo total de los techos

TIPO DE TECHO	COSTO DE INSTALACIÓN	COSTO DE RETIRO DE LA CARGA TERMICA (PRIMER AÑO)	TOTAL
Fibrocemento	\$ 30420	\$ 138959	\$ 169379
PVC	\$ 30947	\$ 126821	\$ 157768
Teja Verde	\$ 44361	\$ 145195	\$ 189556
Polycarbonato	\$ 51111	\$ 98753	\$ 149864
Arreglo propuesto	\$ 47523	\$ 103472	\$ 150995

Figura 36. Flujo de caja general para todos los tipos de techo



Utilizando la ecuación número 43 se calcula el valor presente neto de los costos de cada uno de los techos y se presentan en la tabla 6.

$$\begin{aligned}
 VPN = & \left[costo\ inst + \left(\frac{costo\ 1}{0.02^1} \right) + \left(\frac{costo\ 2}{0.02^2} \right) + \left(\frac{costo\ 3}{0.02^3} \right) + \left(\frac{costo\ 4}{0.02^4} \right) \right. \\
 & \left. + \left(\frac{costo\ 5}{0.02^5} \right) \right] \quad (43)
 \end{aligned}$$

Donde:

costo inst : Costo de instalación del tejado

costoi : Costo de retiro de la carga térmica de cada año

Tabla 6. Costos de retiro de carga térmica anuales y valor presente neto para cada tipo de tejado

Tipo de techo	costo retiro carga año 1	costo retiro carga año 2	costo retiro carga año 3	costo retiro carga año 4	costo retiro carga año 5	VPN
Fibrocemento	138959	141738	144572	147464	150413	711591
Teja PVC	126821	129357	131944	134583	137275	652618
Teja verde	145195	148098	151060	154082	157163	756101
Policarbonato	98753	100728	102742	104797	106893	535194
Arreglo PVC	103472	105541	107652	109805	112001	554738

Debido a que el VPN para el techo con policarbonato es menor, la relación costo beneficio se planteará realizando comparaciones de costos de los tejados tomando como punto de comparación éste tipo de techo, para lo cual se siguen los pasos nombrados a continuación:

- Calcular la diferencia entre los costos iniciales entre el techo de policarbonato que fue escogido como punto de referencia y los demás tipos de techo estudiados.

Tabla 7. Diferencia de costos iniciales de construcción

PAREJAS DE TECHOS	DIFERENCIA DE COSTOS INICIALES
Policarb – Fibroc	\$ 20691
Policarb – PVC	\$ 20164
Policarb – Teja Verde	\$ 6750
Policarb – Arreglo	\$ 3588

- Calcular la diferencia entre el costo diario de retiro de la carga térmica ganada por los recintos.

Tabla 8. Diferencia del costo diario de retiro de la carga térmica

PAREJAS DE TECHOS	DIFERENCIA DE COSTO DIARIO DE RETIRO DE LA CARGA TERMICA
Policarb – Fibroc	\$ 110.4
Policarb – PVC	\$ 77.1
Policarb – Teja Verde	\$127.5
Policarb – Arreglo PVC	\$ 12.9

- Determinar el número de días requeridos para recuperar la inversión inicial que supondría construir un techo con policarbonato y el ahorro anual que presenta en términos de consumo energético.

$$Tiempo_{recin} = \frac{\Delta_{costoin}}{\Delta_{costoret}} \quad (43)$$

Tabla 9. Resultados del análisis comparativo con respecto al techo construido con policarbonato

PAREJAS DE TECHOS	TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSION	AHORRO EN LOS 5 AÑOS	% DE AHORRO
Policarb – Fibroc	187 días	\$ 201578.75	40.7%
Policarb – PVC	261 días	\$ 140725.75	28.4%
Policarb – Teja Verde	52 días	\$ 232847.2	47.02%
Policarb – Arreglo PVC	276 días	\$ 23658.2	4.78%

Se puede observar que en todos los casos el tiempo de recuperación de la inversión se da en menos de un año lo que hace que la implementación de éste tipo de tejado sea una buena alternativa.

11. CONCLUSIONES

- Se implementó un sistema que permitió someter a prueba diferentes tipos de techo para establecer una comparación termo-económica entre los mismos, teniendo en cuenta las ventajas térmicas de su utilización protegiendo contra el ingreso del flujo de calor producido por la radiación solar y los costos de instalación de los mismos.
- Se realizó el modelamiento matemático de los recintos puestos a prueba utilizando tres balances de energía, aplicados a los techos simples, a los techos dobles y a las paredes del recinto, estos balances de energía y el modelo realizado en conjunto fueron validados por medio de las pruebas experimentales realizadas mostradas en el ANEXO B.
- El sistema de refrigeración adaptado para retirar la carga térmica que ingresaba a cada uno de los recintos permitió por medio de la regulación del flujo másico calcular la carga térmica que se retiraba, y validar de forma satisfactoria el modelo planteado.
- La comparación de los tipos de techo realizada con el modelo matemático en la cual se sometieron todos a las mismas condiciones de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento permitió determinar que el policarbonato ofrece las mejores ventajas térmicas en la protección contra la radiación solar, teniendo un promedio de flujo de calor que ingresa al recinto de 330 [W]; seguido por el arreglo con dos tejas de PVC separadas por un espacio de aire de 5 [mm], el cual en promedio obtuvo 346 [W]; la teja sencilla de PVC con 424 [W]; el techo con fibrocemento 465 [W] y por último la teja asfáltica o teja Verde que permitió el ingreso del mayor flujo de calor, con un promedio de 485 [W].

- En la primer sección del análisis costo-beneficio realizado se determinó que los costos de instalación más elevados se obtenían para el policarbonato, a pesar de esto, gracias a las ventajas térmicas que éste ofrece, presenta un ahorro diario en el retiro de la carga térmica de \$110 con respecto al fibrocemento, \$77 con respecto a la teja de PVC, \$127 en contraste con la teja verde y \$12 con el arreglo propuesto.
- Del estudio tanto térmico como económico realizado, se pudo observar que el arreglo propuesto y el policarbonato presentan comportamientos similares y que para la implementación de cada uno de éstos techos en viviendas de dimensiones reales los costos de instalación del policarbonato pueden verse considerablemente elevados, por tanto a pesar de que éste estudio arroja como mejor opción al tejado construido con policarbonato, el arreglo que se propuso sigue siendo una buena opción para viviendas del común ofreciendo una protección similar a la que ofrece el policarbonato alveolar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] INCROPERA, F. Fundamentos de transferencia de calor y masa. 6 ed. USA.: J. Wyley & Sons, 1994. 997 p.
- [2] CENGEL, Yunus. Transferencia de calor y masa. 2 ed. Mexico.: Mc Graw-Hill, 2004. 852 p.
- [3] GAFFIN, Stuart; et al. Techos verdes en la región metropolitana de Nueva York, reporte de investigación. Editorial Fin de siglo, 2006.
- [4] DUFFIE, John A; BEKCMAN, William. Solar engineering of termal processes. 2 ed. USA.: 1980.
- [5] Electrificadora de Santander, ESSA.
(http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202015/Tarifa_ES SA_201502.pdf).
- Consultado: 20 de Enero, 2015.

BIBLIOGRAFIA

BOZONNET, E.; DOYA, M. y ALLARD, F. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. En: Energy and Buildings. Noviembre, 2011. Vol 43, p. 3006–3012.

Sailing airwaves, Ea5dy. (http://ea5dy.ure.es/espa/articulos/index_3.htm)
Consultado: 13 de Agosto, 2014.

JAIMES, Nelson; RIVERO, Sergio. Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío. Trabajo de grado. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica, 2012. 233p.

Manual del científico. (<http://manualdelcientifico.blogspot.com/>)
Consultado: 13 de Agosto, 2014.

MICHELSA, Caren; LAMBERTSA, Roberto y GÜTHSB, Saulo. Theoretical/experimental comparison of heat flux reduction in roofs achieved through the use of reflective thermal insulators. En: Building and Environment. 2008. vol. 40, p. 438–444.

Monografías. (<http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones2.shtml>).
Consultado: 20 de Septiembre, 2014.

PISSELLO, Anna; COTANA, Franco y BRINCHI Lucia. On a cool coating for roof clay tiles: development of the prototype and thermal-energy assessment. ATI 2013 - 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association. Italia. Enero, 2014, vol. 4, pag 453-462.

REYES, Romualdo; SANCHEZ, Julián. Estudio de la ventajas térmicas de los techos verdes en Bucaramanga. Trabajo de grado. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica, 2013. 109p.

SABERA, Hamed; SWINTONA, Michael; KALINGERB, Peter y PAROLIA, Ralph. Long-term hygrothermal performance of white and black roofs in North American climates. En: Building and Environment. Abril, 2012. vol. 50, p. 141–154.

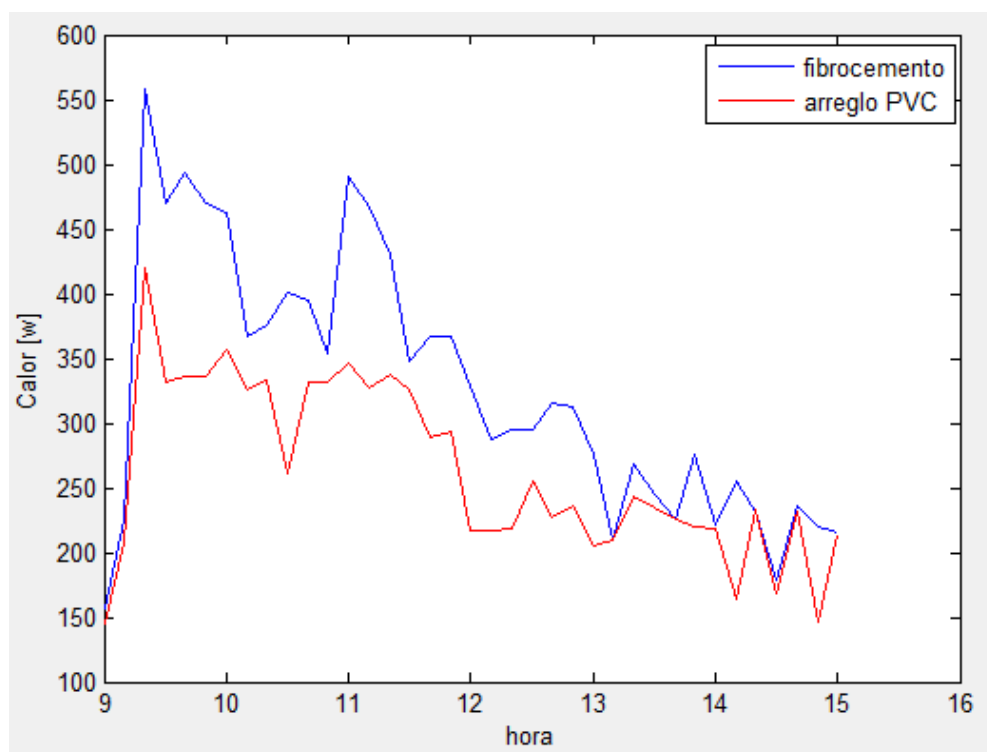
TANGA, Runsheng; MEIRB, I.A. y WUA, Tong. Thermal performance of non air-conditioned buildings with vaulted roofs in comparison with flat roofs. . En: Building and Environment. Marzo, 2006. vol. 41, p. 268–276.

ULUBEYLI, Serdar; BAYRAM, Aynur y TALAT, Er M. Comparison of different roof types in housing projects in turkey: cost analysis. En: Procedia - Social and Behavioral Sciences. Marzo, 2014. vol. 119, p. 20-29.

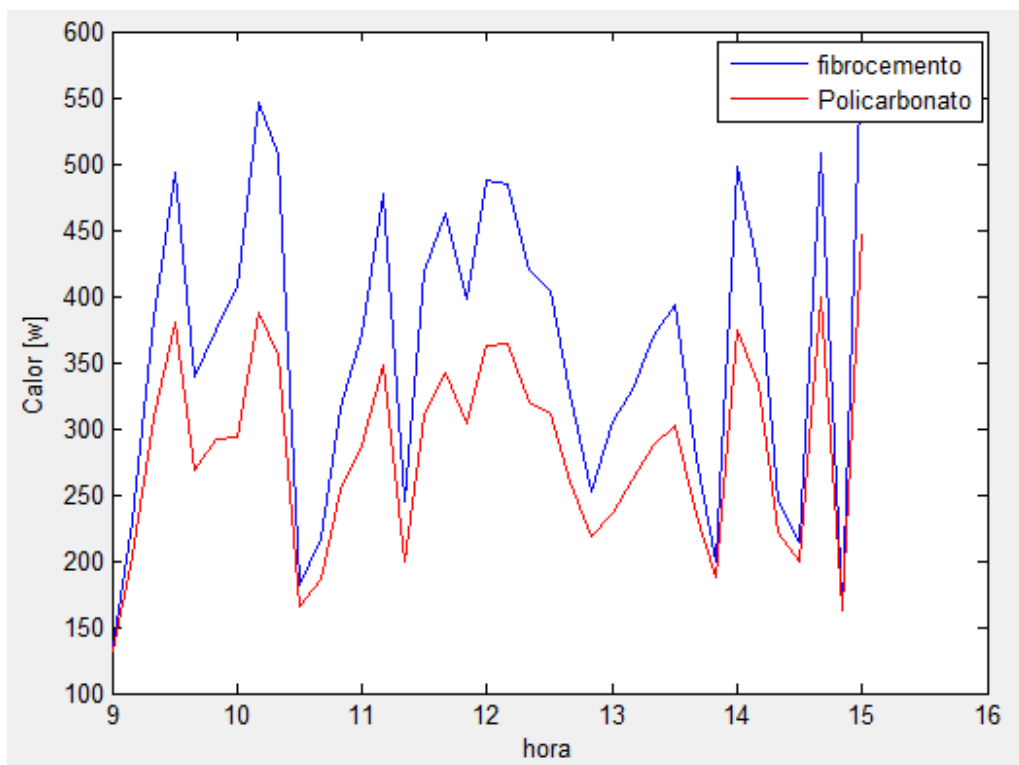
ANEXOS

ANEXO A. Resultados de las comparaciones de techos modeladas

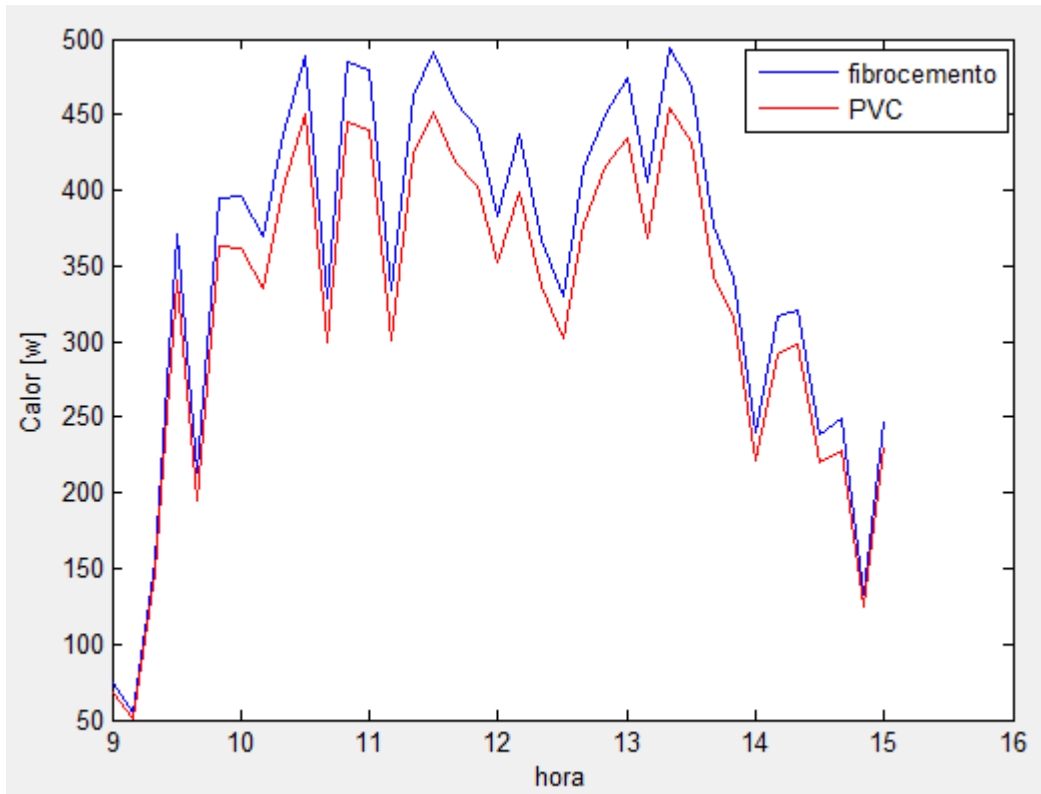
Diciembre 16



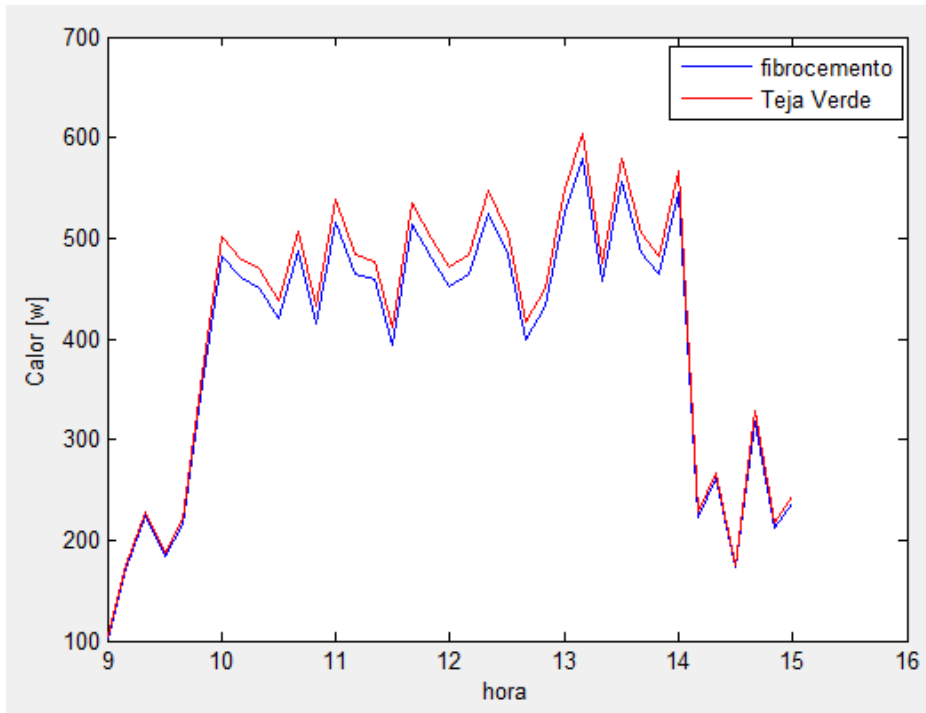
Diciembre 17



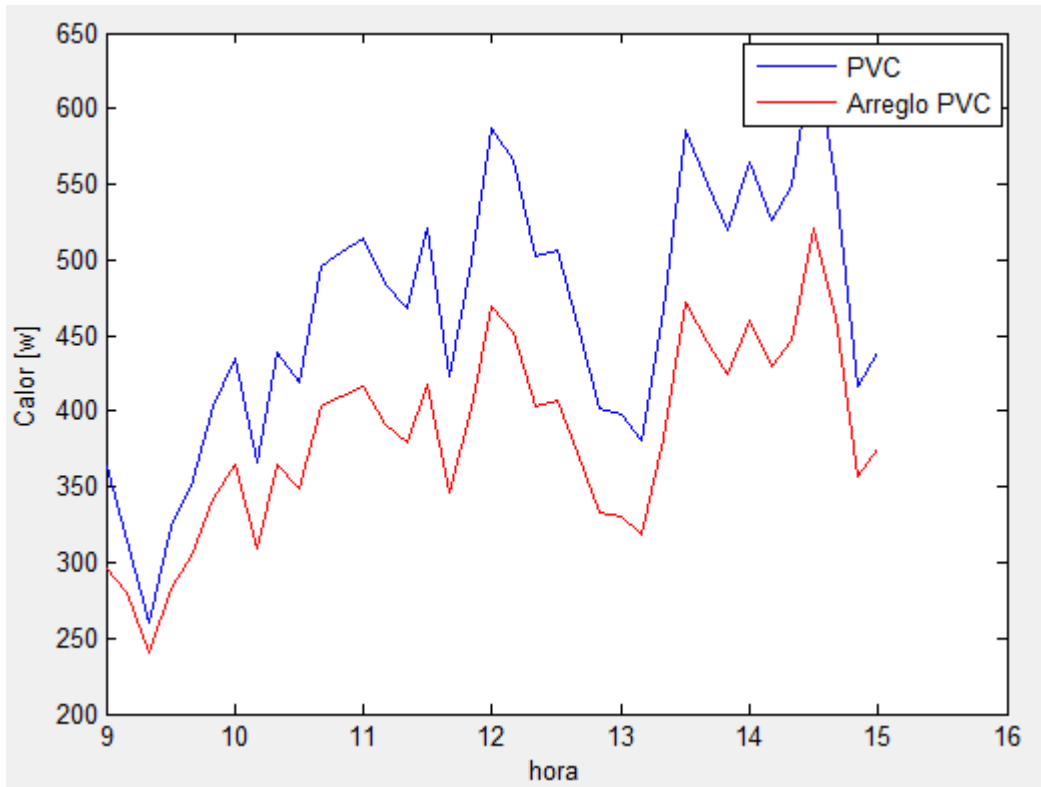
Diciembre 18



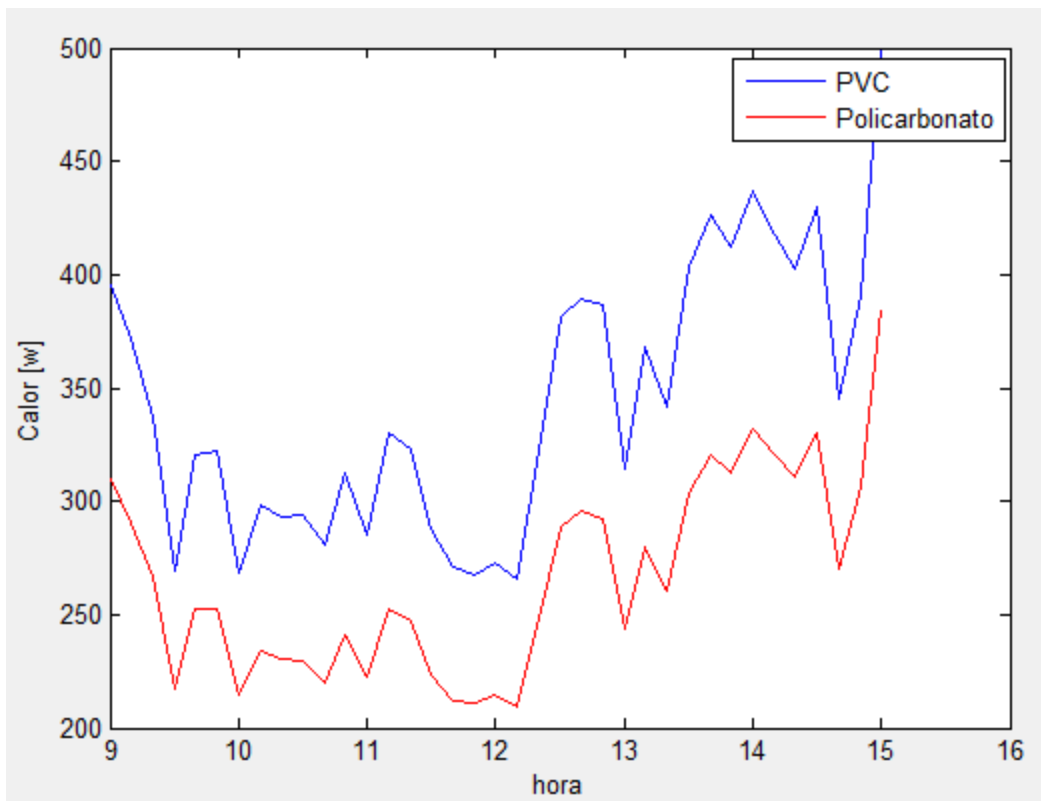
Diciembre 19



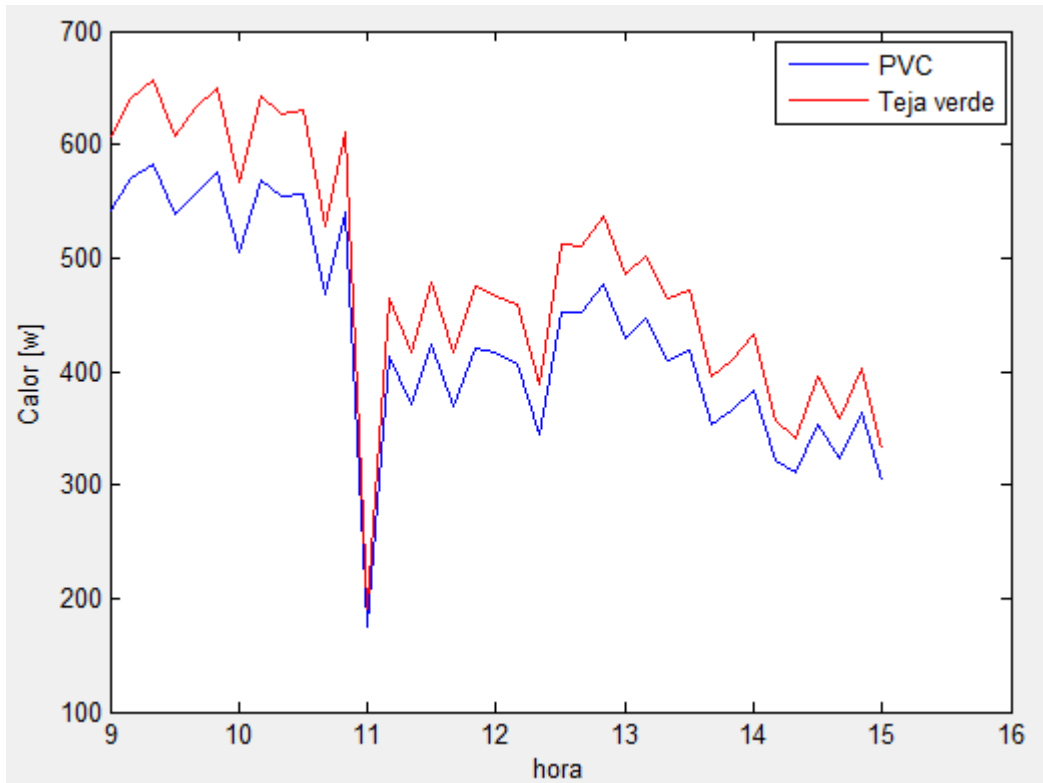
Diciembre 20



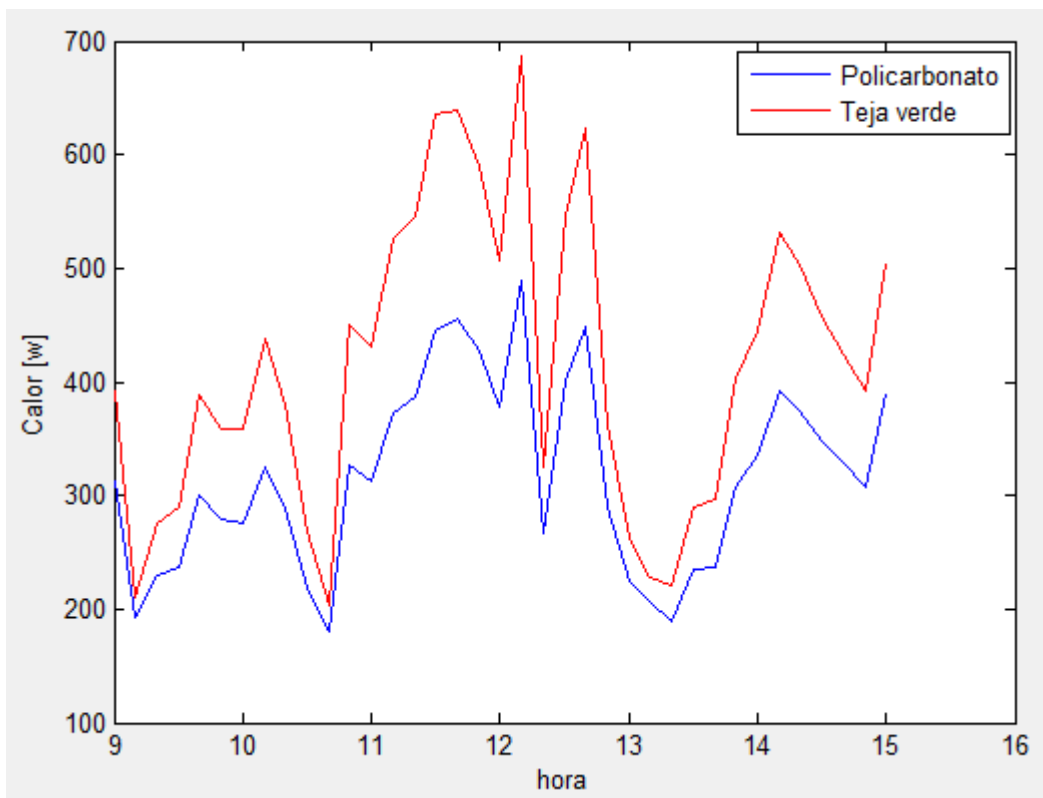
Diciembre 21



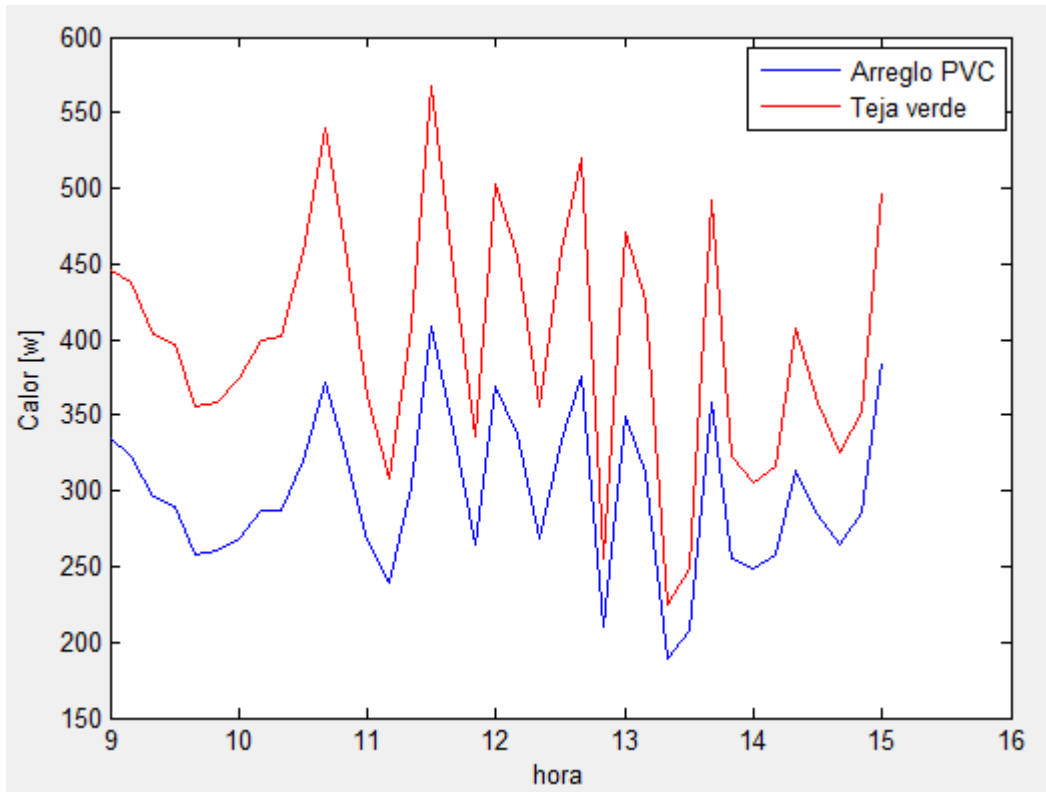
Diciembre 22



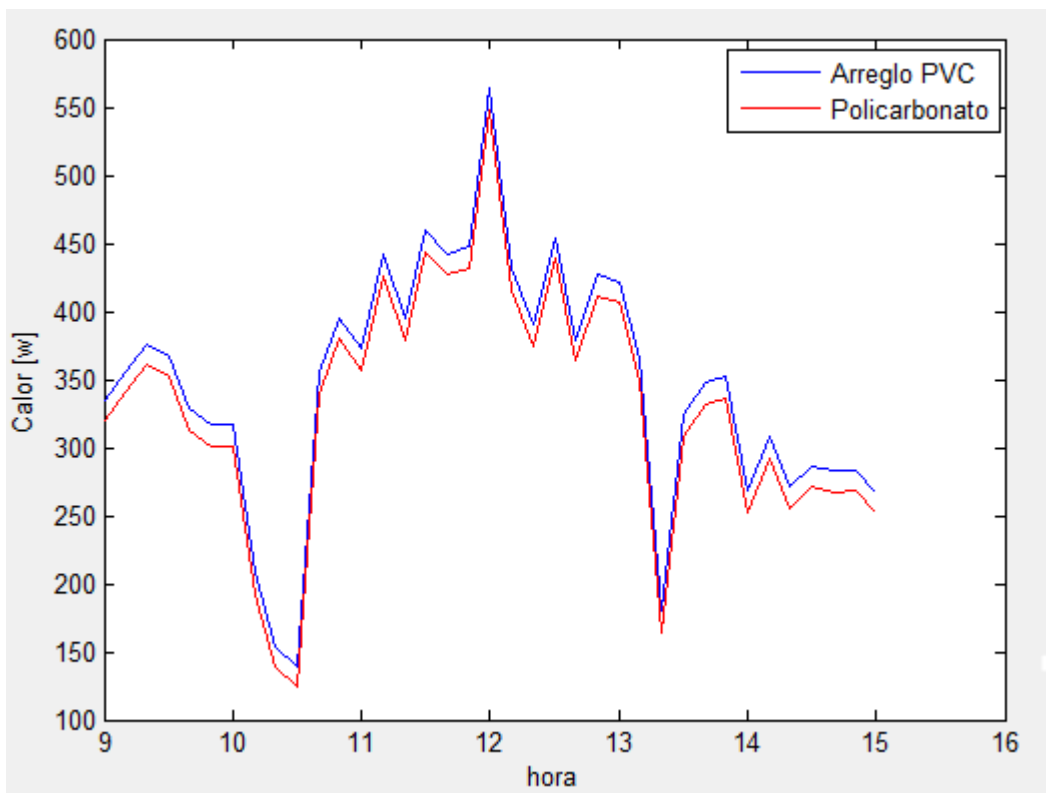
Diciembre 23



Diciembre 24

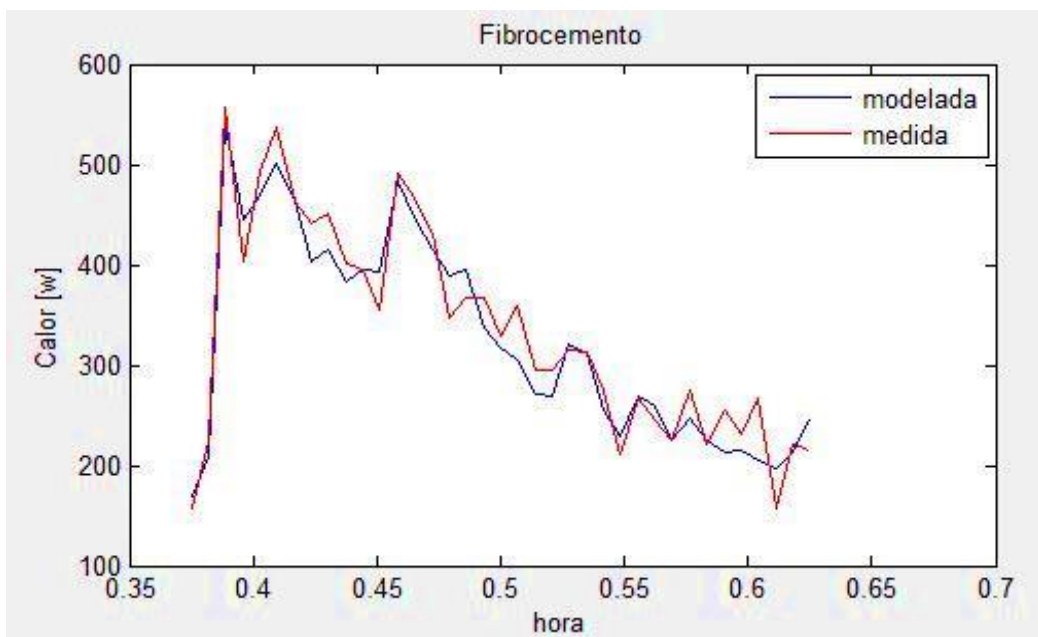
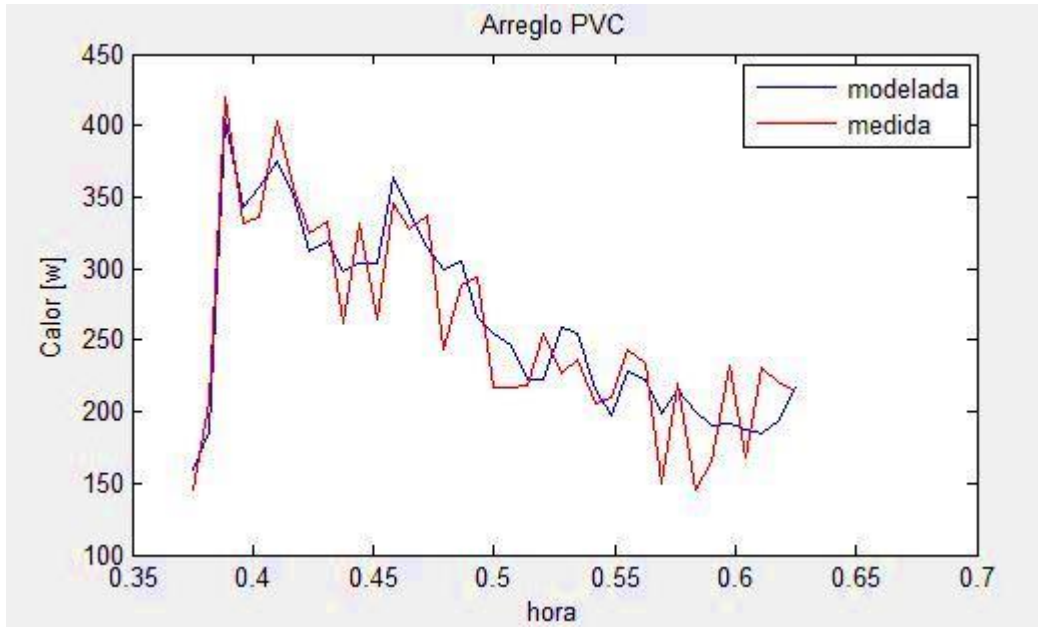


Diciembre 26

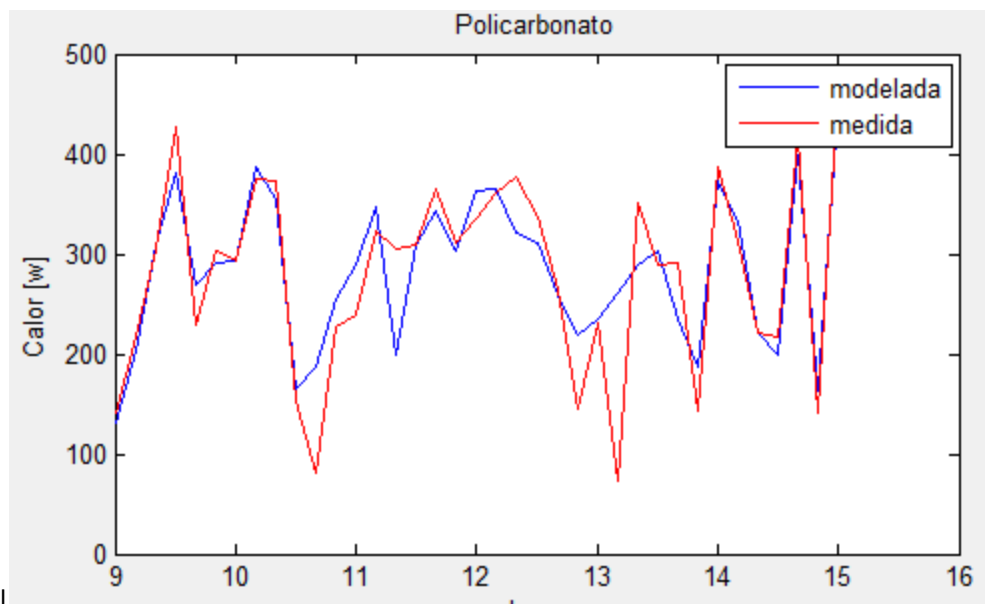
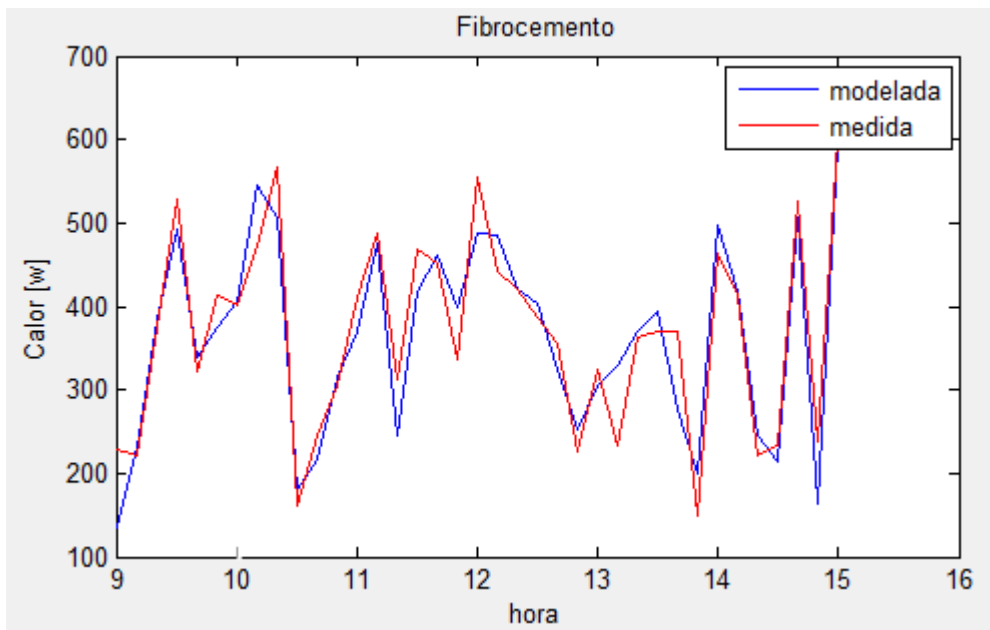


ANEXO B. Validación de los resultados obtenidos

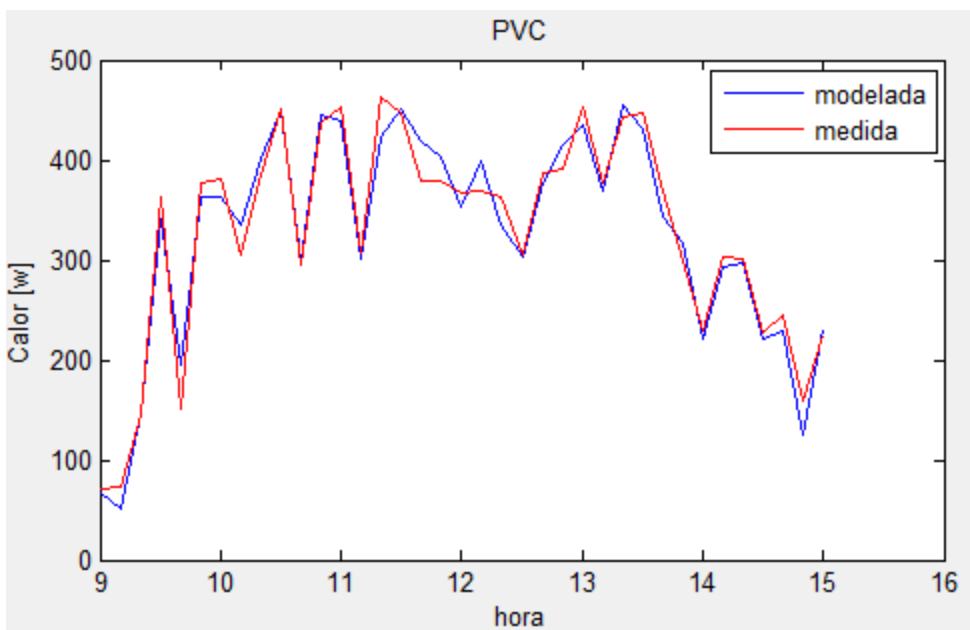
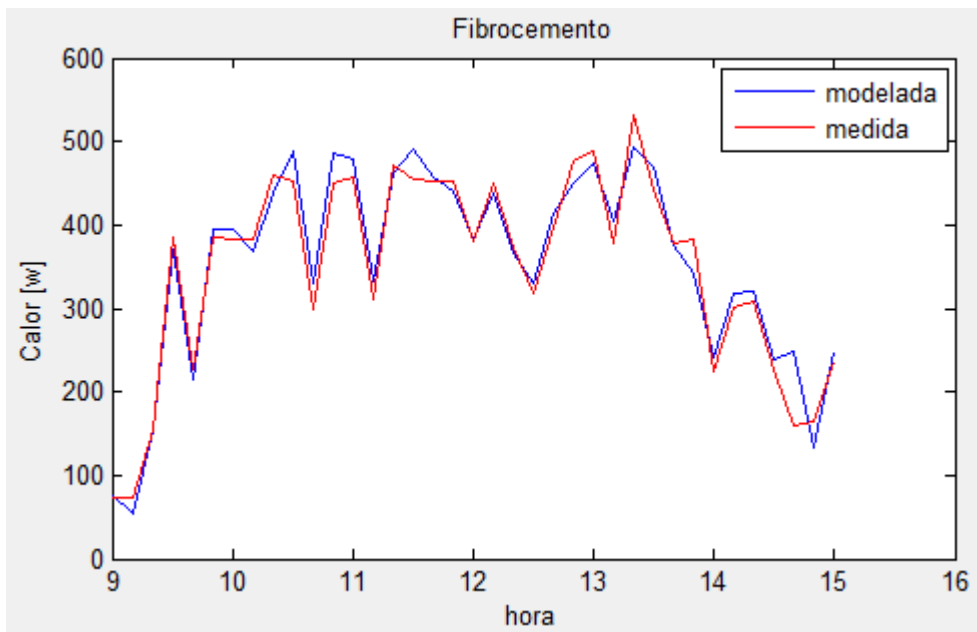
Diciembre 16



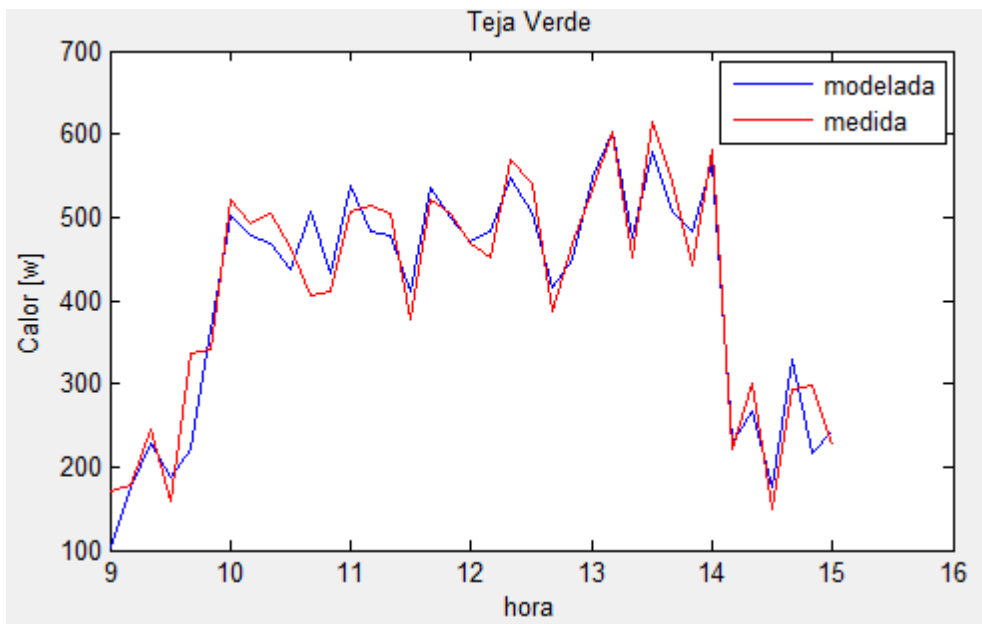
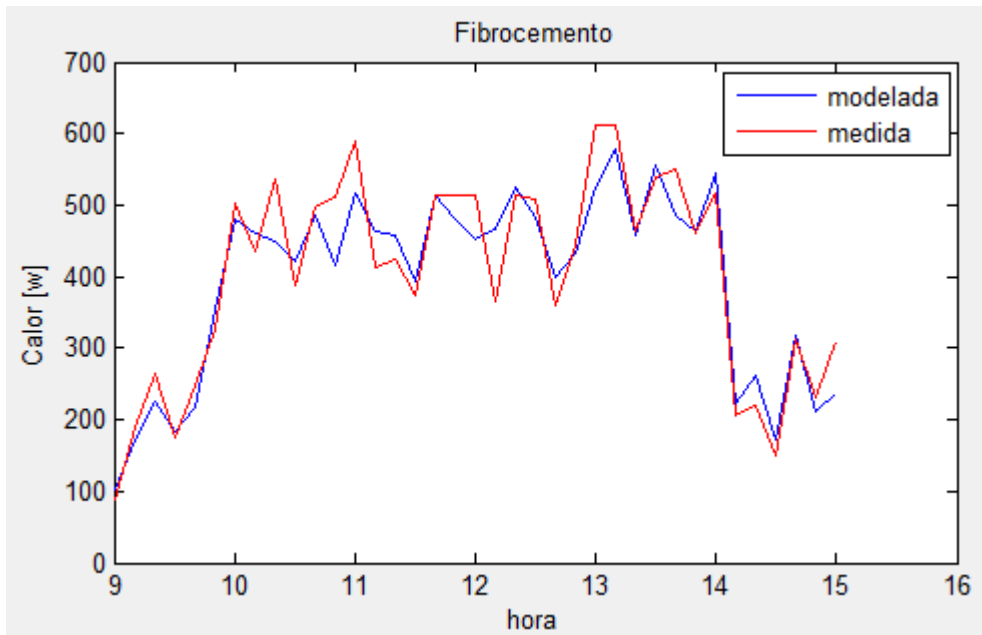
Diciembre 17



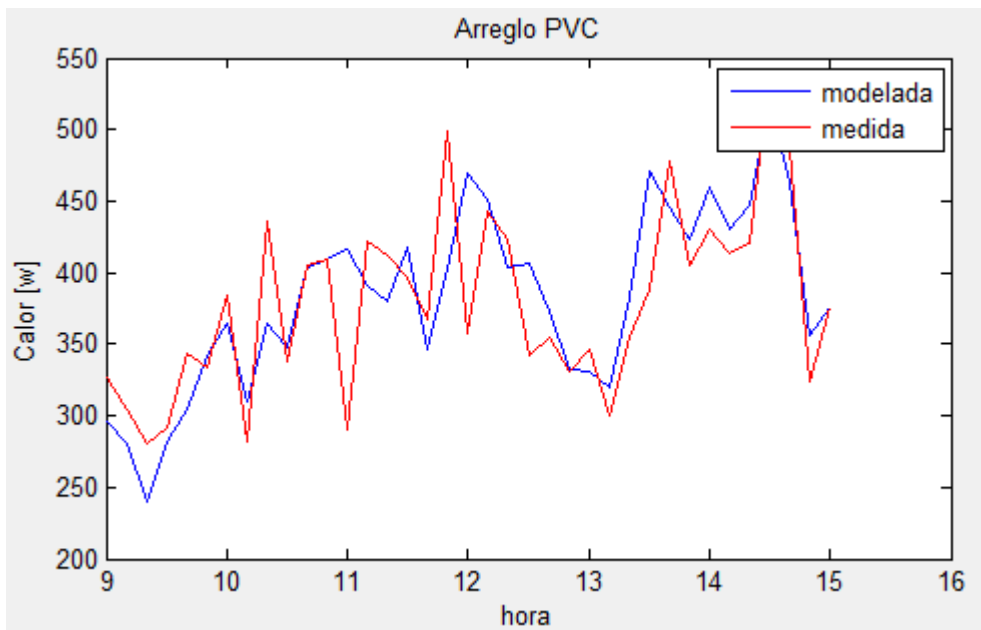
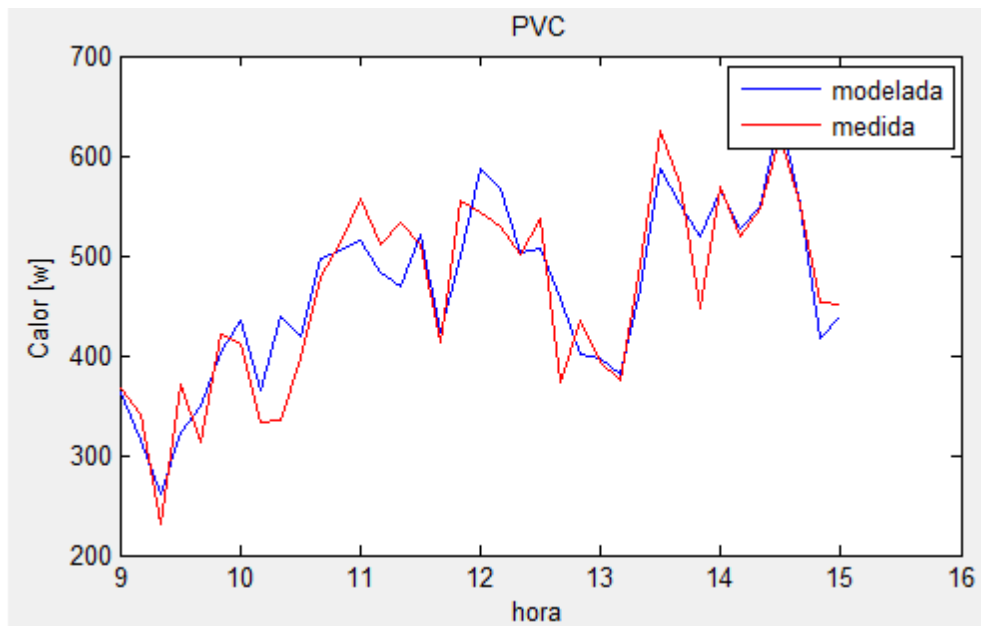
Diciembre 18



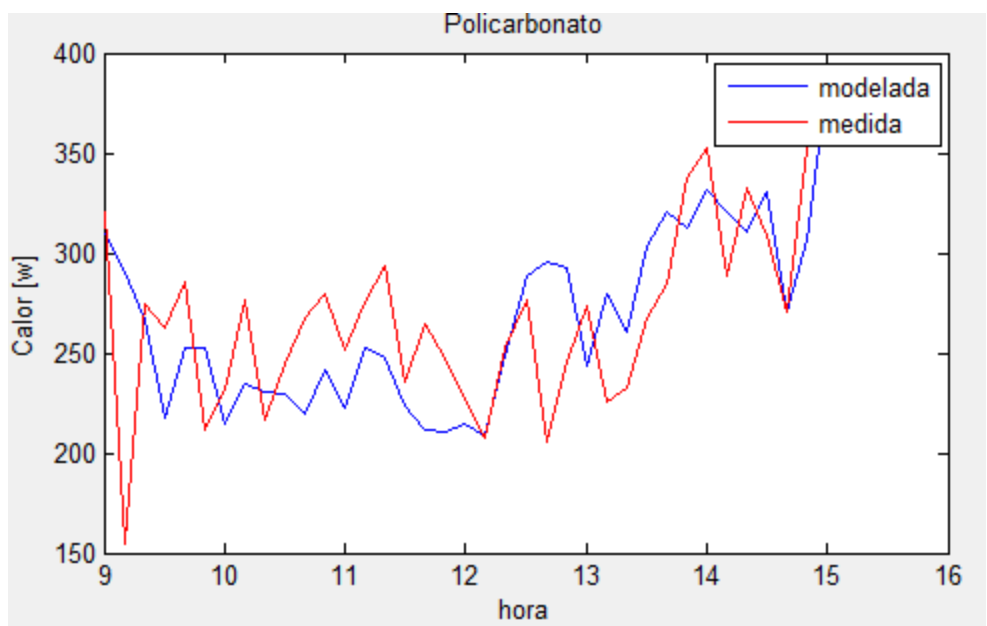
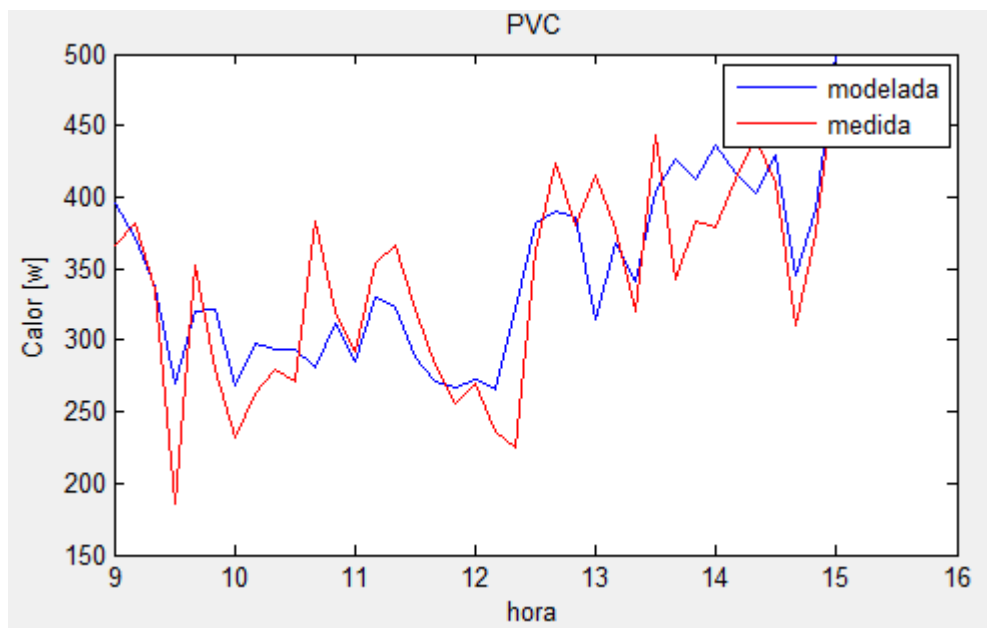
Diciembre 19



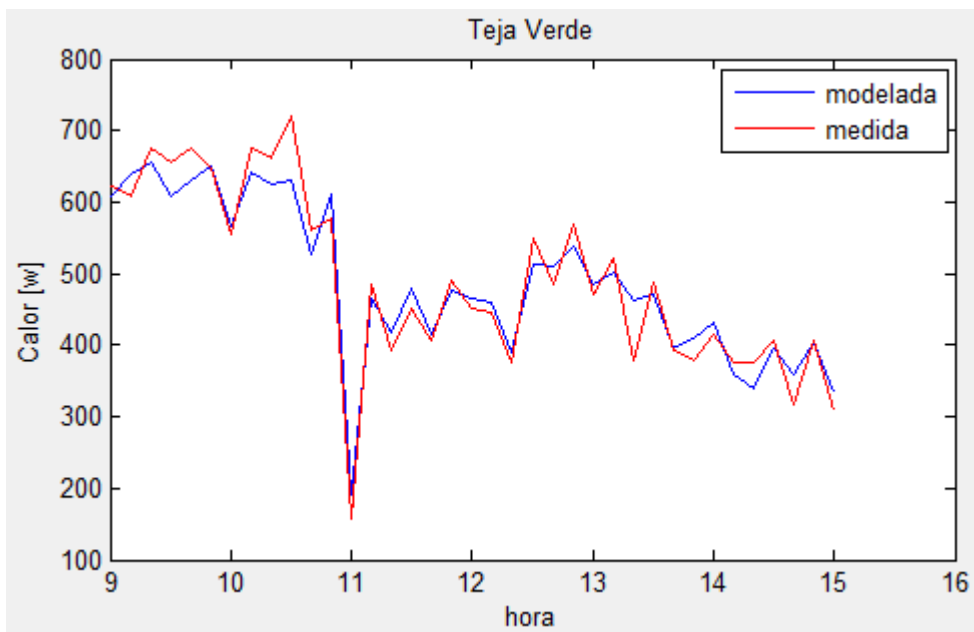
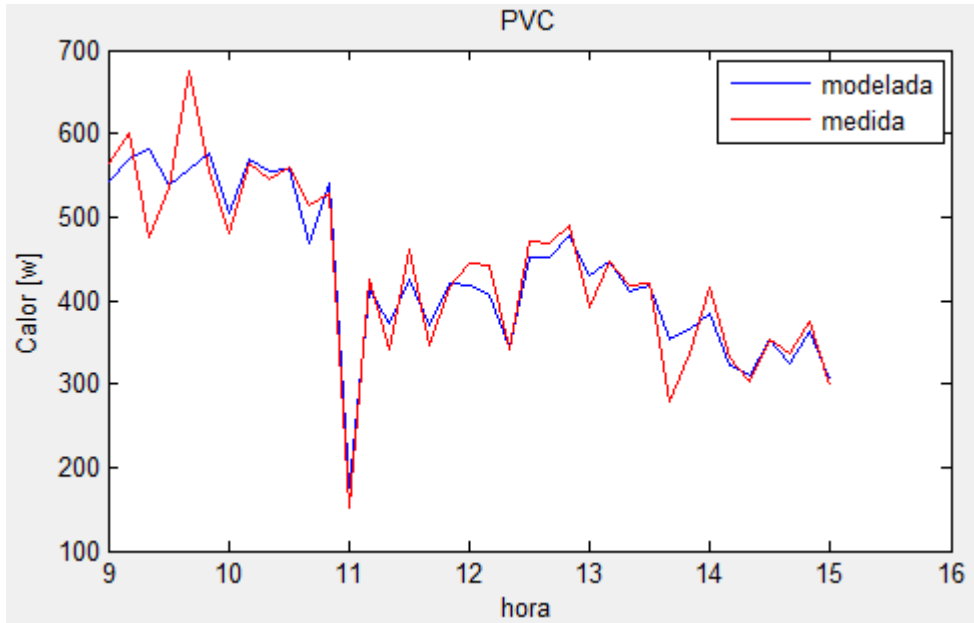
Diciembre 20



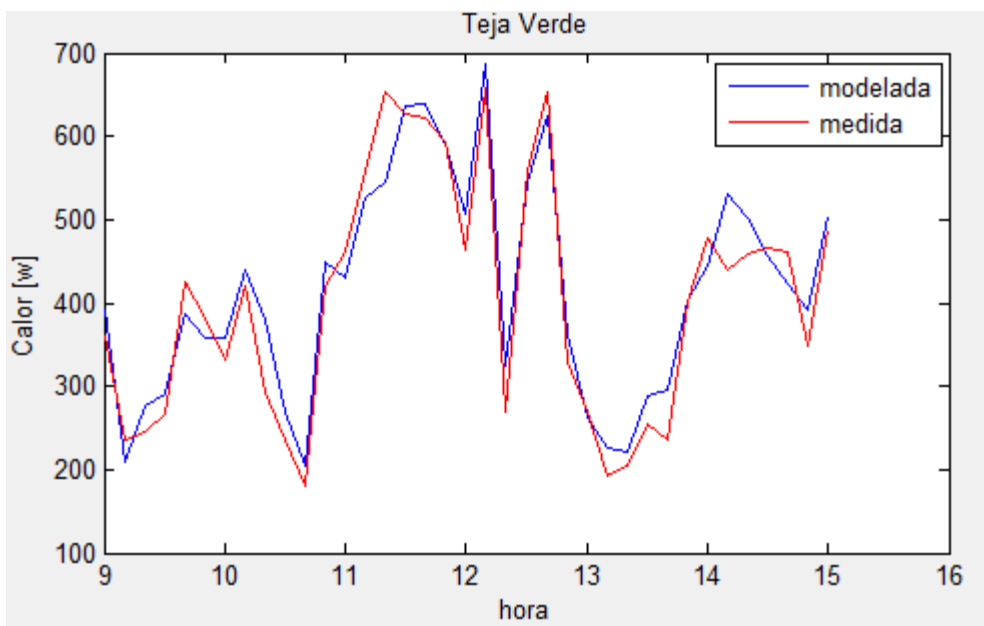
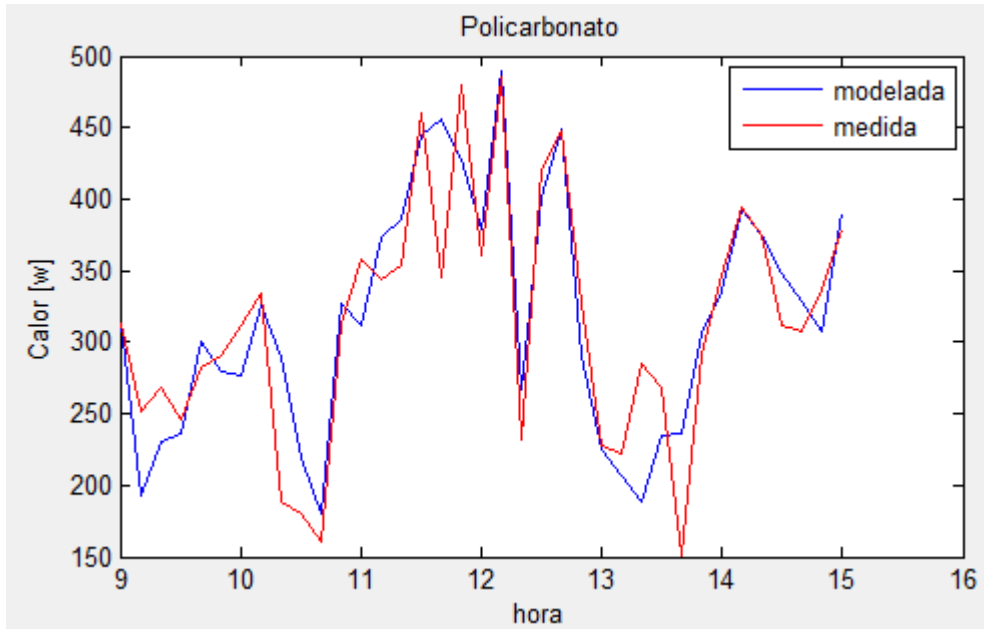
Diciembre 21



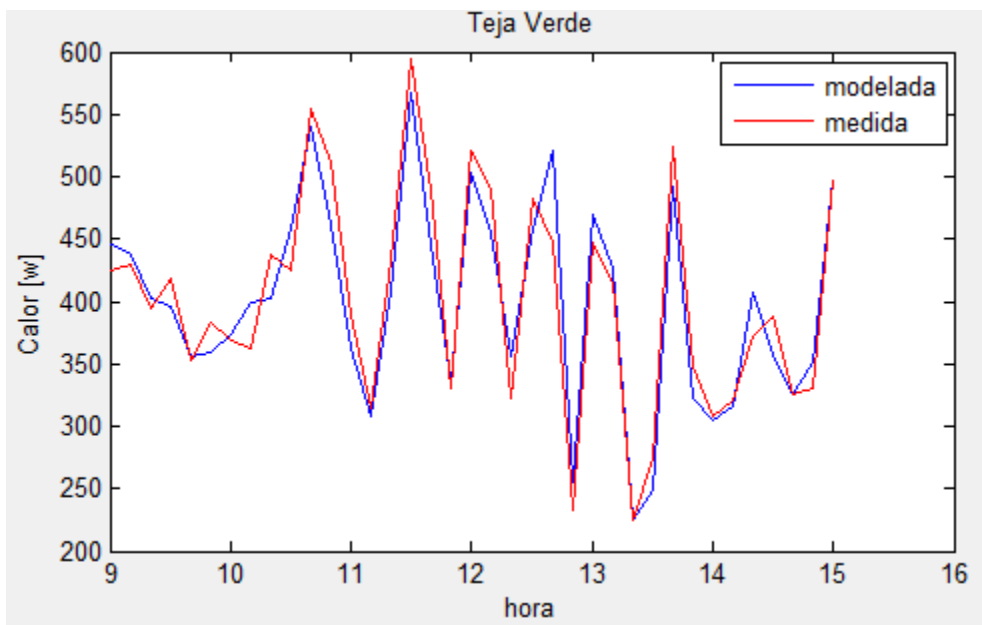
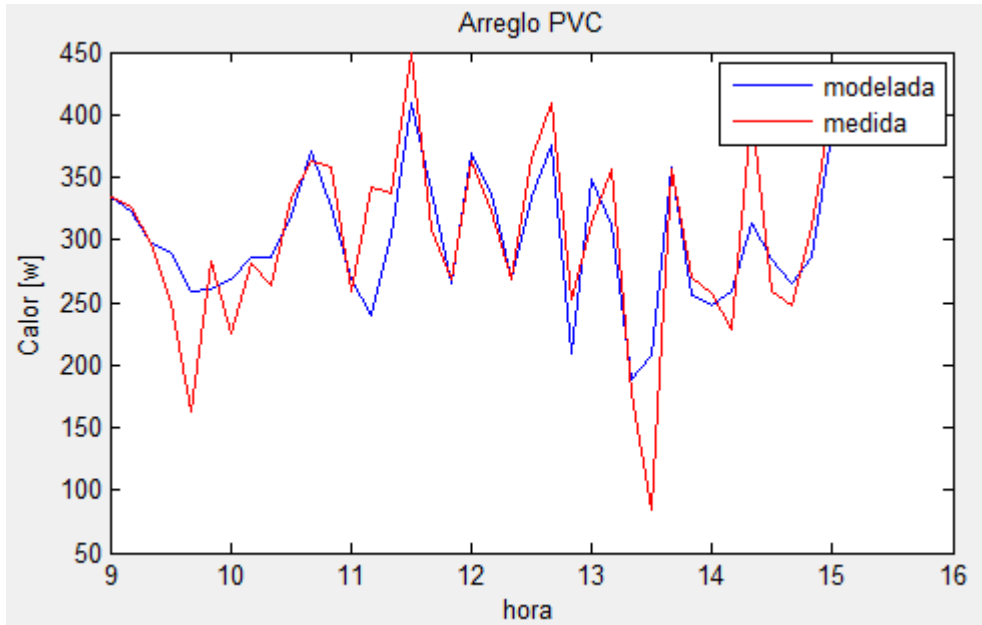
Diciembre 22



Diciembre 23



Diciembre 24



Diciembre 26

