



La cubierta ventilada metálica en el clima cálido húmedo

Por Violeta Escobar Ruiz

Tesis para la obtención de
Doctorado en Arquitectura,
Energía y Medio Ambiente

Directores
Helena Coch Roura
Anna Pages - Ramon

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona 2017

I. Resumen

Diversos trabajos se han llevado a cabo demostrando la efectividad de la cubierta ventilada (CV) en la disminución de la transmisión de calor por causa de una elevada radiación solar. En el presente estudio se analizan y clasifican las estrategias utilizadas en este sentido frente a los fenómenos de transmisión de energía, lo cual permitió identificar aquellas variables de diseño que más intervienen en el funcionamiento de una CV.

El estudio se centra en cubiertas ventiladas de hojas metálicas por el frecuente uso de este material en la construcción del estado de Tabasco, México. Lugar en donde se lleva a cabo la presente investigación.

Las características de configuración estudiadas son: anchura de la cavidad ventilada, inclinación de la cubierta y nivel de reflectancia del acabado superficial. Para la evaluación de dichas variables se diseñaron y fabricaron una serie de módulos de CV emplazados en el lugar de estudio, los cuales se monitorearon para valorar su desempeño en la disminución de flujo de calor a través de la cubierta. La efectividad que para este efecto tiene la adecuada ventilación de la cavidad también fue evaluada. Lo que permitió identificar los rangos adecuados de las variables de configuración del sistema de CV para el clima cálido-húmedo.

Se concluye que la radiación solar es el parámetro ambiental con mayor impacto en el aumento de la temperatura superficial interior por encima de la velocidad del aire exterior, ya que la ventilación de la cavidad no presenta correlación importante con el aumento de la temperatura interna de la CV. El grado de reflectancia de la hoja exterior de la CV es la variable de diseño más importante en la prevención del sobrecalentamiento por cubierta, siendo la anchura de la cavidad ventilada y el grado de inclinación de la cubierta las variables con menor repercusión.

Palabras clave: Cubierta ventilada; Cubierta metálica; Cálido húmedo; Confort térmico; Control térmico

ABSTRACT

Several studies have been performed demonstrating the Ventilated Roof effectiveness (VR) in the reduction of heat transfer due to high solar radiation. The present study analyses and classifies the strategies used in this way against the phenomenon of energy transfer by conduction, convection and radiation, which allowed the identification of those strategies with the greatest impact on the operation of a VR. The study is focused on metal sheet ventilated roofs because of the frequent use of this material in the construction in Tabasco, México. Where this investigation takes place.

Configuration features considered in this study were: ventilated cavity ratio, roof tilt and surface reflectance of the extern foil. For the evaluation of the above mentioned

variables, a series of VR building modules were designed and deployed at the study site in order to monitor their performance in reducing heat flow through the roof as well as the effects that a suitable ventilation of the chamber has on this matter, allowing the identification of the efficient ranges of the VR system configuration variables for the warm humid tropic.

It is concluded that solar radiation is the most important environmental parameter in the overheating phenomenon of VR over the exterior air velocity, since the ventilation of the chamber does not present important correlation with its internal superficial temperature increment. Reflectance grade of the VR's external foil is the most important variable in the prevention of the excessive energy transfer through the roof, being the cavity ratio and roof tilt the variables with less repercussion.

Keywords: Ventilated roof; Metal roof; Warm humid; Thermal comfort; Thermal control.

II. ÍNDICE

I. Resumen.....	3
II. ÍNDICE.....	5
1. Introducción.....	10
1.1 Planteamiento.....	14
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos de investigación.....	18
1.3.1 Objetivo General:.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	18
1.4 Antecedentes.....	20
1.4.1 Cubierta Ventilada.....	20
1.4.2 La cubierta ventilada como sistema pasivo de control térmico.....	22
1.4.3 La cubierta ventilada en la arquitectura tradicional de zonas tropicales.....	25
1.4.4 Evolución de la cubierta ventilada en la arquitectura contemporánea.....	27
1.4.5 Confort térmico en el clima cálido húmedo.....	29
2. Estado del Arte.....	37
2.1 Funcionamiento de la cubierta ventilada en la transmisión de energía.....	37
2.1.1 Conducción: variables y efectos.....	37
2.1.2 Convección: variables y efectos.....	38
2.1.3 Radiación: variables y efectos.....	41
2.2 Identificación de los parámetros de diseño de CV.....	44
2.3 Tesina Final de Máster: Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco.....	45
2.3.1 Análisis de las simulaciones.....	47
2.3.2 Conclusiones de las simulaciones.....	51
3. Metodología.....	55
3.1 Descripción general del experimento.....	55
3.2 Descripción de los módulos experimentales.....	59
3.2.1 Módulo de Cubierta Metálica Simple.....	60
3.2.2 Módulos con Cubierta Ventilada.....	61
4. Resultados.....	71
4.1 Selección del día de estudio y criterio de análisis de resultados.....	71
4.2 Evaluación de variables de diseño.....	75

4.2.1	Evaluación de las variables de diseño en el flujo de energía	75
4.2.2	Evaluación de las variables de diseño y los parámetros ambientales en el flujo de aire por la cavidad ventilada.....	89
5.	Otras estrategias de control térmico.	97
5.1	Descripción de los módulos evaluados.....	99
5.1.1	Cubierta metálica simple con acabado de alta reflectancia	99
5.1.2	Cubierta metálica con cámara de aire no ventilada.....	101
5.1.3	Cubierta metálica con aislamiento interior.....	103
5.1.4	Cubierta Ventilada con aislamiento interior	104
5.1.5	Cubierta Ventilada con acabado de alta reflectancia solar.....	105
5.2	Resultados del estudio a otras estrategias de control térmico.	106
5.2.1	Acabado de alta reflectancia.....	109
5.2.2	Cámara de aire no ventilada	112
5.2.3	Aislamiento.....	112
5.2.4	Cubierta ventilada con aislamiento	118
5.2.5	Cubierta Ventilada Blanca	121
5.2.6	CVB vs CVA	124
5.3	Conclusiones del análisis a otras estrategias de control térmico.....	127
6.	Conclusiones.....	131
6.1	Conclusiones generales.	131
6.2	Comportamiento de la Cubierta Ventilada según sus variables de diseño.	133
6.2.1	Comportamiento Térmico	133
6.2.2	Comportamiento del movimiento de aire por la cavidad.	134
6.3	Otras estrategias de control térmico.	136
II.	Índice de tablas y figuras.....	137
IV.	Referencias bibliográficas	142
V.	ANEXOS.....	145
	Planos constructivos módulos experimentales.....	147
	Rendimiento reflectancia solar del acabado superficial de hojas metálicas.	157
1.1	Sistema de medición de luminancias relativas por medio de fotografías digitales	163
1.2	Comportamiento de la reflectancia solar de los diferentes acabados para la hoja metálica.....	165
1.3	Conclusiones del estudio al rendimiento de la reflectancia solar del acabado superficial para las láminas metálicas.	167
	Reporte fotográfico experimento	195

CAPÍTULO I

Introducción

1. Introducción

El quehacer arquitectónico en la actualidad se enfrenta a retos, en los que el agotamiento de los recursos naturales obliga a perseverar en la obtención de un modelo arquitectónico que permita un estilo de vida en el que el ahorro energético sea posible. Que provea a sus habitantes de las condiciones de confort necesarias para el desarrollo de las actividades productivas para los que fueron concebidos.

En el clima cálido húmedo, la temperatura del aire; la radiación solar directa y difusa; y la humedad relativa se encuentran en niveles en los que alcanzar el confort térmico solo permite la utilización de estrategias pasivas muy concretas:[1]

- Máxima protección a la radiación solar directa y difusa
- Ventilación para disipar calor y reducir humedad
- Poca inercia para evitar almacenamiento de calor

Las soluciones que la arquitectura vernácula de estas zonas climáticas ha adoptado para potenciar estas estrategias puede darnos una guía de los sistemas constructivos que han tenido éxito y de cómo se puede complementar la edificación actual de cara a una arquitectura de bajo impacto ambiental pero que al mismo tiempo responda a las circunstancias sociales y económicas vigentes.

“El recurso más abundante en cualquier sociedad es su sabiduría, entendida como la capacidad para combinar equilibradamente tradición y desarrollo al enfrentar los desafíos del habitar. Desafortunadamente este recurso se ha ido sustituyendo por el uso automático e indiscriminado de tecnologías modernas que son muchas veces evitables y no siempre indispensables (que propician el encarecimiento y el aumento en el gasto energético de los edificios). Esta práctica es lamentable si se compara con la disponibilidad de recursos energéticos renovables y baratos que existen y que son despreciados.”[2]

En este sentido resulta importante estudiar a fondo las propiedades de los materiales y las técnicas constructivas heredadas de la arquitectura tradicional; o bien, de los materiales de fácil acceso en la región; para replantear el uso de las tecnologías modernas o en su caso adaptarlas a las necesidades climáticas de la zona en donde se aplican.

En latitudes cercanas a los trópicos, los niveles de radiación solar sobre la cubierta pueden ser hasta 3 veces mayores que los recibidos sobre el resto de los paramentos debido principalmente a que ésta recibe más horas de sol y a que en los trópicos, el ángulo de incidencia está cerca de la normal en las partes más cálidas del día [3]. Por este motivo, resulta de gran importancia proteger tanto las aberturas como las envolventes del espacio de la radiación directa del sol por medio de la vegetación circundante y mediante una adecuada orientación del edificio. Sin embargo la cubierta, que es por sí misma un elemento de protección a la radiación, queda expuesta en la mayoría de los casos a un

sobrecalentamiento que en los días más extremados puede registrar temperaturas superficiales de entre 75°C y 80°C [4]. Conduciendo este calor al interior del recinto.

Paradójicamente, en respuesta a esta problemática existen edificios con sistemas constructivos de cubiertas pesadas, de alta inercia térmica, que no ofrecen protección a los paramentos contra la radiación solar y que provocan condiciones ambientales interiores mucho menos favorables que las exteriores. Lo cual es una contradicción si pensamos en la concepción misma del refugio humano que supone el control de los agentes climáticos que lo rodean. Las cubiertas, como las paredes de un edificio son “*separaciones entre un ambiente controlado y uno que no lo está*” [5], de manera que, un paramento que provoque condiciones ambientales interiores desfavorables al confort humano debe ser replanteado y no perpetuado y mucho menos incentivado por las tendencias estilísticas del momento o programas gubernamentales de rehabilitación habitacional como la repartición de láminas galvanizadas entre los sectores más pobres de la población, siendo este tipo de cubierta una de las menos favorables en la transmisión de calor al interior.

“Cada región debe buscar su camino adaptado a su clima, a su realidad socioeconómica y analizando su acceso a la tecnología. Este camino no se encuentra en la aplicación irreflexiva de reglas y normas universales obviando las especificidades de cada región. Con estos conceptos en mente, hemos insistido en una arquitectura dimensionada a la realidad, con bajos presupuestos, que tenga el potencial de ser replicable, que pueda ser copiada por los maestros de obra y por la autoconstrucción, que utiliza los materiales que mejor conocen los operarios, que su transporte reduzca las emisiones de CO₂ y que no requieran mayor mantenimiento.”[6]

Se necesita hacer un análisis a fondo de las razones por las que en la actualidad en las regiones con clima cálido húmedo, principalmente en América Latina, los materiales y el diseño de los edificios en general no satisfacen las necesidades de confort ni de identidad cultural de sus habitantes. El sincretismo cultural provocado por la enorme influencia extranjera que se hace a través de los medios masivos de comunicación, ha hecho creer que el modelo americano o europeo de edificación es el paradigma de confort y estatus social. O en el otro extremo, lleva a considerar que la perpetuación de las “*estáticas formas vernaculares*” que incentivan “*el folklorismo, el colonial hollywoodense o el exotismo orientalista*” [7] son la fórmula para satisfacer las necesidades de acondicionamiento climático o de identidad arquitectónica.

Como lo describe Fernández Cox: Enfrentar el desafío de la modernidad en América Latina, modernidad entendida como el tránsito desde un orden recibido (cánones estilísticos) hacia un orden producido (una nueva arquitectura). Requiere del análisis de las necesidades específicas de la sociedad que demanda una arquitectura propia; del estudio a los materiales y recursos de la región que respondan a los retos de sustentabilidad que el

nuevo panorama mundial propone, en cuanto a disponibilidad y ahorro energético se refiere; y requiere además de la investigación científica que haga posible la inserción de las potenciales nuevas propuestas que resulten de este análisis en la construcción.

“La verdadera identidad se logra, entonces, cuando el talento y la inventiva de los diseñadores locales decantan la multiplicidad de indicaciones universales preexistentes y materializan las soluciones inéditas que la sociedad necesita. La identidad cultural nacional implica transformación y renovación de la calidad de la vida; es la referencia de la sociedad a su propia historia para forjar su futuro creador, en el cual las infinitas bellezas posibles estarán al alcance de todos los miembros de la comunidad... América Latina y el Caribe poseen su propia identidad cultural reconocida en la música, la literatura, el cine, el teatro, las artes plásticas. Por lo tanto, el desafío es crear el ambiente culturalmente significativo que la resume y la proyecte en la dimensión universal.”[7]

¿De qué forma las conclusiones arrojadas por el presente estudio podrían abonar en la *materialización* de estas *soluciones inéditas* Y por lo tanto de la creación de este *ambiente culturalmente significativo* para la región climática del trópico húmedo? Las respuestas a estas preguntas quedan en realidad fuera del alcance de los objetivos planteados en este trabajo, sin embargo, la motivación del mismo es precisamente la de agotar las posibilidades que los materiales al alcance de la mayor parte de la población - en términos de disponibilidad (materiales producidos y comercializados en México) y de accesibilidad (materiales baratos) - tienen para procurar las condiciones de habitabilidad de los edificios, desde el punto de vista térmico, principalmente, pero también desde el punto de vista técnico, es decir, que cuenten con las características necesarias para implementar sistemas de cómputo, de seguridad e incluso, permitan la inclusión de ambientes controlados muchas veces indispensables para llevar a cabo actividades muy específicas o especializadas.

La “palapa con techo de palma” forma parte de la arquitectura tradicional de los climas cálido-húmedos. Pero nunca será adecuada para realizar ciertas actividades que requieran de condiciones de estanqueidad o aislamiento.

En este sentido, se propone el uso de la hoja metálica galvanizada en la construcción de cubiertas económicas, duraderas, insertas en la tradición constructiva actual, bajo los lineamientos de diseño que la hagan adecuada térmicamente para su uso en la arquitectura local. Esperando que el manejo adecuado de la misma, permita el desarrollo de proyectos complejos de elevado diseño estético, que abonen en la consecución de una arquitectura regional emanada de los requerimientos específicos de la sociedad que la gestiona a través del gremio de arquitectos y constructores que le sirve.

En el presente trabajo se propone el estudio de la cubierta ventilada metálica como sistema de control térmico para edificaciones emplazadas en latitudes con clima cálido húmedo.

Por medio de un análisis experimental se identificarán los parámetros de diseño para cubiertas ventiladas metálicas y su influencia en la reducción de flujo de calor al interior de los recintos que cubre, lo cual permitirá definir el ajuste de las variables encontradas en un modelo tipo de cubierta ventilada cuyo desempeño permita reducir el grado de discomfort de los usuarios en el clima cálido húmedo.

1.1 Planteamiento.

El planteamiento del problema que se aborda en el presente trabajo se centra en el papel que juega la reemisión de calor de la cubierta hacia el espacio interior y de cómo dicha radiación afecta el confort térmico de los usuarios en las latitudes tropicales.

Uno de los medios por los cuales el cuerpo humano intercambia energía con el ambiente es la radiación. Después de la temperatura del aire, el factor físico más importante es el promedio de temperaturas de las superficies que lo rodean. Dependiendo de la distancia y la diferencias de temperatura entre los cuerpos, más o menos calor será cedido o recibido en una u otra dirección. Este proceso afecta al balance de energía en el cuerpo.

Pequeñas diferencias entre la temperatura del aire y la de radiación son aceptables, sin embargo, cuando esta diferencia es mayor, ya sea entre temperatura del aire y de radiación, o bien entre diferentes temperaturas de radiación en un mismo espacio, pueden generar sensación de discomfort. Este es el caso de las cubiertas, que pueden llegar a temperaturas de hasta 25°C por encima de la temperatura exterior del aire.

Un dato que ayudará a conocer mejor este fenómeno es el de la temperatura operativa del espacio en cuestión. La cual se define como el efecto combinado de la temperatura del aire y la temperatura de radiación que incide en la sensación térmica de las personas. Este término es aceptado en el ámbito del acondicionamiento ambiental como parámetro de evaluación del confort térmico [8].

La temperatura operativa de un espacio puede ser diferente en determinados puntos del mismo. Es usualmente aceptado el considerar el promedio de las temperaturas del aire y de radiación de todas las superficies que lo conforman para determinar el desempeño térmico de un edificio. Sin embargo, cuando la diferencia entre la temperatura del aire y la de radiación supera los 4 K o bien, entran en juego velocidades del aire superiores a los 0.2 m/s. Se debe recurrir a una relación que involucre este último parámetro.

En un estudio realizado a un grupo de personas en cámaras climáticas donde fueron expuestos a diferentes temperaturas de planos horizontales calientes por encima de la cabeza mientras la temperatura operativa del local era mantenida a un nivel tal que no alterase la neutralidad térmica de los sujetos. Se estableció una curva de distribución, la cual mostraba el porcentaje de personas con sensación de discomfort debido a planos radiantes por encima de la cabeza en función a una asimetría de temperaturas de radiación.

Por otro lado, diferencias de temperatura mayores a los 3 K entre temperatura del aire y temperatura de radiación de un espacio [8], así como una asimetría de temperaturas de radiación superior a los 4 K [3] pueden generar sensación de discomfort.

Aunque ya se ha hecho referencia a los elevados índices de radiación solar, tanto directa como difusa, presentes en el clima cálido húmedo, en el presente trabajo se ha

considerado importante hacer un énfasis especial al respecto. Debido a que la cubierta ventilada responde principalmente a este problema.

Para dimensionar la proporción en la que la incidencia de la radiación solar por cubierta afecta más a las zonas subtropicales del mundo, se ha realizado un análisis de radiación incidente para las diferentes orientaciones a lo largo de un año tipo.

Esta exposición a la radiación en el plano horizontal, aunada al uso de materiales comunes en la construcción de cubiertas (losas de concreto, láminas de cartón o de acero galvanizado, etc) de colores generalmente oscuros y por lo tanto, de absorancias elevadas, provoca un sobrecalentamiento que llega a niveles mucho mayores que los de la temperatura exterior del aire. Parte del calor que absorben se pierde ya sea por convección o remisión de onda larga al ambiente exterior. El resto es conducido a través de los materiales que conforman la cubierta elevando la temperatura de la cara interior del techo. Con lo que afectan de manera importante el confort térmico de los espacios que cubren.

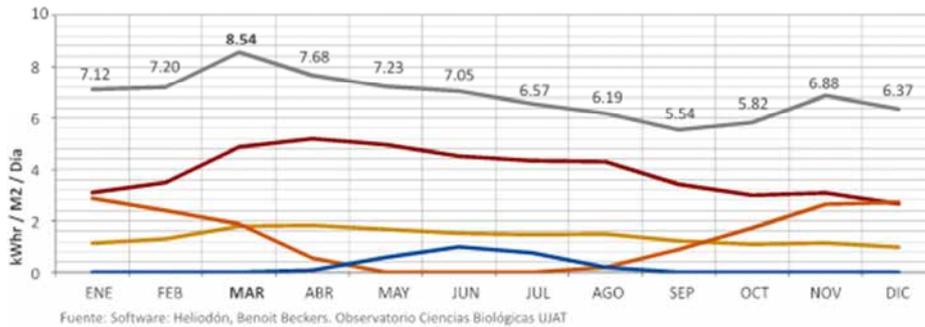


Figura 1: Radiación Solar. Promedio diario calculado con base a radiación real del plano horizontal

	ESTE	SUR	OESTE	NORTE	CUBIERTA	TOTAL
A Día del Solsticio de Verano (21 de Junio)	1.9	0	1.9	1.3	5.7	10.8
B Día del Solsticio de Invierno (21 de Diciembre)	1.0	2.7	1.0	0	2.6	7.2
C Equinoccio de Primavera (21 de Marzo)	2.3	2.4	2.3	0	6.3	13.4
M Mes más Caluroso (Mayo)	52.1	0.0	52.1	18.1	153.9	276.1
N Mes más Frío (Enero)	35.2	89.2	35.2	0	96.2	255.8

Figura 2: Radiación Solar Acumulada. Calculado con Heliodón en base a radiación real en el plano horizontal kWh/m2

En estudios realizados a diferentes tipos de cubiertas en la India para determinar el comportamiento de cada una de ellas en el confort térmico de sus ocupantes, se concluyó que una diferencia de hasta 9 K entre la temperatura media del aire y la superficial interior del techo puede ser aceptable cuando se consideran factores como: la temperatura del aire interior; las dimensiones del local; la posición relativa y distancia entre los usuarios y la cubierta; la neutralidad térmica del usuario (dependiente de factores como temperatura del aire exterior) y la temperatura de radiación media de la habitación. Mientras que para diferencias entre temperaturas medias de radiación y del aire oscila entre los 0.25 y 1.92 K de diferencia máxima [3]. De este modo se puede considerar que el flujo neto de energía transmitido a través de una cubierta no es el único factor a considerar para determinar si dicha configuración es capaz de dotar a los espacios cubiertos de confort térmico.

1.2 Justificación.

La cubierta junto con los muros exteriores son las superficies más grandes que conforman la envolvente de un edificio. La constitución de estos elementos incide notablemente en el aspecto exterior del edificio así como en las cualidades ambientales al interior del mismo.

La construcción a base de lámina metálica autoportante es la más difundida en el estado de Tabasco [9] (Ver **Figura 3**). Esto por su bajo costo, facilidad y rapidez de instalación. En contraste con este dato, se encuentra que son precisamente las cubiertas metálicas las que tienen el comportamiento más desfavorable en la transmisión de energía al interior de las viviendas[3][10] debido a que el calor específico y la conductividad térmica de los metales es muy alta y hace que la temperatura de los mismos se eleve rápidamente a niveles más altos en comparación con otros materiales.

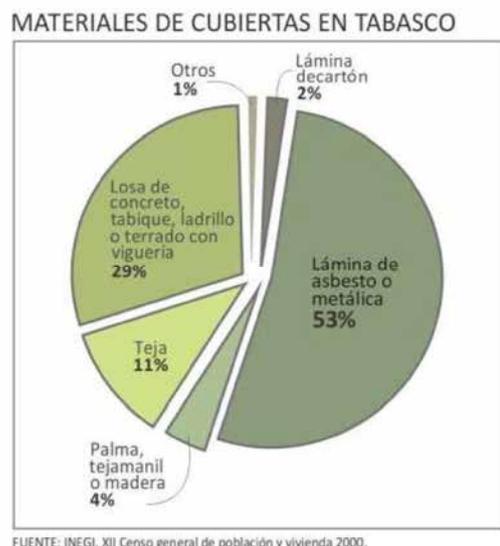


Figura 3: Materiales de cubiertas en viviendas de Tabasco

El impacto negativo de este sobrecalentamiento en el confort térmico de los usuarios, significa un menor rendimiento de las personas que padecen esta problemática en sus hogares o lugares de trabajo e incluso repercusiones en su salud física y mental. Existen estudios que señalan que, la exposición prolongada a condiciones de discomfort térmico, específicamente por calor ambiental, conlleva a la pérdida de capacidades para el desarrollo de actividades que impliquen coordinación motora y concentración. También se han documentado cambios en el comportamiento humano más complejos como: mal humor, accidentes de tránsito, disturbios callejeros, agresiones sexuales y violencia doméstica.[11]

Por otro lado, en el caso de que los espacios que utilizan sistemas de cubierta tradicionales, en los que, como se ha explicado anteriormente el sobrecalentamiento por cubierta es muy común, y que para contrarrestar este efecto hagan uso de sistemas de aire acondicionado, representan un elevado gasto energético.

“El costo de un sistema de aire acondicionado, oscila entre 10% - 15% del costo de construcción del edificio y gasta aproximadamente el 60% de la energía eléctrica en su operación. Por esto es una solución limitada a unos pocos presupuestos.”[6]

Es por esto que se hace evidente la necesidad de realizar mejoras técnicas en las envolventes de los edificios que permitan disminuir las ganancias solares y propicien la disipación del calor para lograr las condiciones de confort necesarias al interior. Lo cual

permitirá por un lado elevar la calidad de vida de la población, y por el otro, hacer más eficientes los sistemas de acondicionamiento climático disminuyendo así su gasto energético.

Siendo la cubierta ventilada conocida en un amplio sector de la investigación en temas de mejoramiento del confort, como una estrategia eficaz en la reducción de cargas solares al interior de los edificios en clima cálido, en la actualidad su implementación en la construcción en el trópico mexicano es prácticamente inexistente. Es por esto que en el presente trabajo se ha considerado importante abordar el estudio de la cubierta ventilada metálica, como sistema de mejoramiento del confort al interior de los edificios. Lo cual permitirá determinar los rangos de las variables de configuración para el adecuado funcionamiento de cubiertas ventiladas para el sistema constructivo de lámina metálica autoportante, que como mencionamos anteriormente es el más común.

De igual forma es de interés conocer el funcionamiento de la cubierta ventilada metálica sin aislamiento interior. La mayoría de estudios realizados a cubiertas ventiladas incluyen siempre un cierto grado de aislamiento como protección para los días fríos. Siendo el caso del clima cálido húmedo de la zona geográfica en cuestión, donde es sólo en invierno en donde se alcanzan las temperaturas de confort, el uso de aislamiento interno supone, no solo un gasto innecesario, sino un impedimento para lograr la posible refrigeración radiativa nocturna.

Conociendo las aportaciones térmicas de la cubierta ventilada metálica y los parámetros de diseño que inciden en su adecuado comportamiento se podría no solo proponer el uso de este sistema para la construcción de nuevas edificaciones, sino implementar el mejoramiento de las ya existentes.

1.3 Objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo General:

- Definir los parámetros para el diseño de cubiertas ventiladas metálicas en el clima cálido húmedo que permitan evitar el sobrecalentamiento por cubierta y mejorar las condiciones térmicas de los edificios.

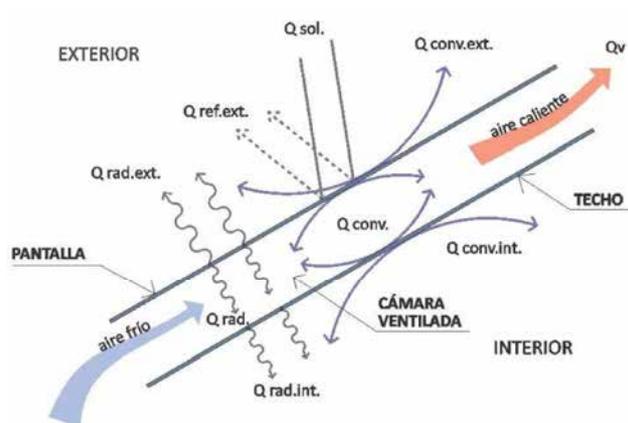
1.3.2 Objetivos Específicos:

- Conocer el funcionamiento de una cubierta ventilada metálica en el clima cálido húmedo.
- Establecer la importancia de cada uno de los parámetros identificados en el funcionamiento de una cubierta ventilada para climas cálido-húmedos.
- Definir los rangos de las variables de configuración de cubiertas ventiladas metálicas que garanticen el adecuado funcionamiento del sistema para el clima cálido húmedo en la prevención del sobrecalentamiento por cubierta.
- Validar la eficacia de la cubierta ventilada metálica mediante su comparación frente a otras estrategias de refrigeración por cubierta.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Cubierta Ventilada

La cubierta ventilada, también conocida como cubierta de hoja doble, está conformada por dos partes separadas entre sí por una “**cámara de aire ventilada**”, es decir, comunicada con el aire exterior. La hoja exterior superior se encuentra en contacto directo con los agentes atmosféricos. La hoja interna inferior; en contacto directo con el espacio, al no recibir radiación directa del sol baja considerablemente su temperatura. El aire contenido entre la hoja exterior y la hoja interior de la cubierta eleva su temperatura por causa de la radiación solar, bajando su densidad y provocando un flujo constante de aire que es remplazado por el externo más frío y por tanto con mayor densidad. De esta forma, es posible disipar parte del calor acumulado en la cámara. Ambas estrategias, la de sombreado y la de intercambio de aire a diferentes temperaturas, permiten disminuir el flujo de calor hacia el espacio debajo de la cubierta ventilada.



$$Q_{sol.} = Q_{ext.} + Q_{int.} + Q_v$$

$$Q_{int.} = Q_{rad.int.} + Q_{conv.int.}$$

$$Q_{ext.} = Q_{ref.ext.} + Q_{rad.ext.} +$$

Simbología:

$Q_{sol.}$	Radiación Solar
$Q_{ext.}$	Calor al exterior
$Q_{int.}$	Calor al interior
Q_v	Calor disipado por la cavidad ventilada
$Q_{rad.int.}$	Calor radiado al interior
$Q_{rad.ext.}$	Calor radiado al exterior
$Q_{conv.int.}$	Calor por convección al interior

Figura 4: Esquema de funcionamiento de una Cubierta Ventilada

Las vías de disipación de energía de la cubierta ventilada se llevan a cabo principalmente en la cara expuesta al exterior y en la cavidad ventilada por diferentes fenómenos: reflexión del acabado superficial, convección del aire en contacto con las hojas que conforman la cubierta y reemisión de onda corta de la energía acumulada en las hojas que la conforman. De esta forma la mayor parte de la energía disipada se va al exterior, pero otra parte llega a elevar la temperatura del espacio cubierto.

El reto es encontrar la conformación de la cubierta ventilada metálica que minimice en la mayor medida posible esta transmisión de energía al interior por medio de diferentes estrategias que analizaremos en el presente estudio.

Dentro de las cubiertas ventiladas, se pueden encontrar muchas variantes en geometría, morfología, materiales,

dimensiones, etc. El funcionamiento de cada una de ellas le conferirá mayor o menor eficiencia frente a problemas específicos como veremos más adelante.

De acuerdo a la conformación de la cámara de aire en la cubierta ventilada, se pueden considerar tres tipos de ventilación: la **microventilación** [12] - donde la circulación de aire sucede entre el elemento de soporte y la hoja externa con espesor de cavidad restringido de 3 a 4 cms -, la **ventilación bajo revestimiento** [13] - donde el espacio entre las hojas interna y externa permiten la creación de una capa de aire con un flujo continuo - y la **ventilación bajo techo** [13] - donde la cámara de aire es amplia e irregular y está comprendida bajo las pendientes de la cubierta y el forjado horizontal inferior. (Ver **Figura 5**)

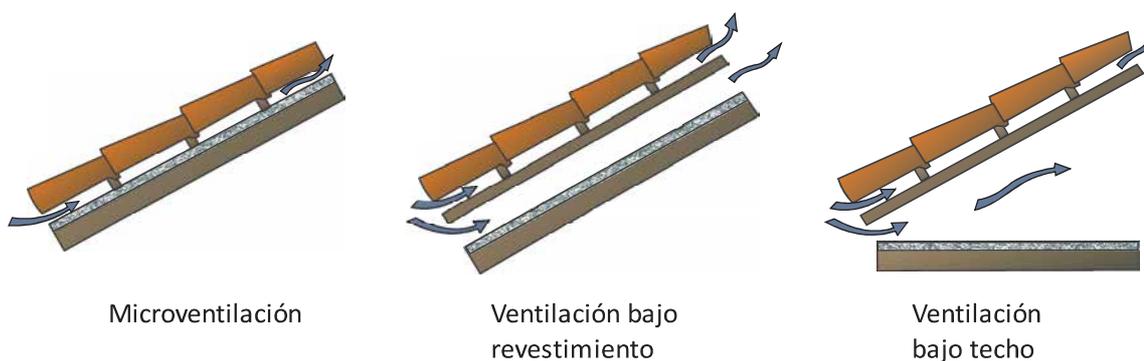


Figura 5: Tipos de ventilación en cubiertas ventiladas

En la actualidad es muy común el uso de cubiertas ventiladas con aislamiento interior, esto debido a que, en latitudes superiores a los trópicos, dicho aislamiento es necesario para evitar pérdidas de calor en invierno. Además de que en muchos casos, su utilización en cerramientos es obligatoria por normativas de construcción. También se pueden encontrar cubiertas que, utilizando materiales de elevada inercia térmica, combinan la disipación de calor por la cámara ventilada, con un retraso en el flujo de energía hacia el interior del espacio cubierto.

Sin embargo, en esta investigación se ha ahondado en el estudio de la cubierta con muy baja inercia térmica como complemento a la ventilación de la cámara y que describiremos a continuación.

1.4.2 La cubierta ventilada como sistema pasivo de control térmico

En los climas cálidos, lograr que el diseño del espacio arquitectónico haga posible la disminución de las ganancias de calor y propicie la disipación del mismo, será siempre el método más eficiente para lograr las condiciones de confort necesarias al interior. La aplicación de sistemas de enfriamiento pasivo de cualquier clase no tiene sentido si el edificio carece del diseño apropiado para el clima en el que se encuentra emplazado.

El concepto de sobrecalentamiento se relaciona con el exceso energético que contribuye a crear discomfort en la atmósfera interior de un espacio determinado. Las condiciones de confort podrán mejorarse por métodos pasivos de refrigeración.

En este sentido, la reducción de la carga térmica para refrigeración podrá conseguirse mediante alguna de las siguientes estrategias o de sus combinaciones [14] [15] [16]

1. **Reducción de las ganancias energía:** Se logra por medio de sombreado o implementación de aislamiento móvil. También la **reducción de las ganancias internas** y la **reducción de las ganancias por conducción** de la piel del edificio evitando puentes térmicos se puede considerar parte de esta estrategia.
2. **Ventilación:** Qué permita la salida del calor no deseado del edificio. Esta ventilación puede ser natural cruzada o bien inducida por estratificación térmica. El movimiento del aire puede además disminuir la sensación térmica de los usuarios cuando está en contacto directo con la piel.
3. **Masa térmica:** La cual permite atenuar las oscilaciones de la temperatura consiguiendo condiciones más estables al interior. La elevada inercia térmica de los materiales de construcción, así como el enterramiento del edificio en el terreno son ejemplos de la implementación de este método de enfriamiento.
4. **Refrigeración por evaporación:** Basada en un cambio adiabático de fase del agua, de estado líquido a gaseoso. El aire humidificado y enfriado de esta forma es introducido al edificio. Esta estrategia es más eficaz en climas secos donde el aire admite la incorporación de agua sin problemas.
5. **Refrigeración nocturna por ventilación.** Enfriando la masa del edificio interior por la noche dejándolo abierto a la ventilación y cerrando el edificio durante el día. Lo que permite bajar la temperatura del aire del interior en las horas de sol.
6. **Refrigeración radiante.** Transfiriendo al edificio “energía fría” generada durante la noche por pérdidas de calor por radiación del techo hacia el cielo. Este sistema puede o no incluir acumulación de frío para las horas diurnas.
7. **Refrigeración del espacio exterior.** Sistemas de enfriamiento aplicables a los espacios exteriores que rodean el edificio. Ejemplo: refrigeración evaporativa.

Habiendo establecido cuáles son los principios bajo los que se rigen los sistemas pasivos de enfriamiento se pueden identificar al menos dos presentes en la cubierta

ventilada. En primer lugar, se encuentra un sombreado general de la cubierta mediante una pantalla exterior y en segundo lugar, la presencia de una cámara ventilada que permite el intercambio de aire con el exterior y por lo tanto disipar parte del calor acumulado en la misma.

Hay un tercer elemento que en el caso de las cubiertas metálicas se presenta con mayor obviedad, y este es el de la refrigeración radiante.

Toda superficie de cara al cielo despejado pierde energía emitiendo radiación de onda larga hacia el exterior, por lo que puede ser considerada un radiador de calor. La cubierta es el elemento del edificio con mayor exposición al cielo, y es por lo tanto el más adecuado para aplicar este principio. Aunque el fenómeno se produce de igual forma durante el día y la noche, es solo durante la noche cuando este balance radiante es negativo, es decir, durante el día la energía solar absorbida contrarresta los efectos de enfriamiento de la emisión de onda larga de la cubierta y produce una ganancia neta de calor radiante hacia el interior [14]. Por lo general, en climas templados o fríos, las cubiertas están aisladas para evitar las pérdidas de calor en invierno y las ganancias de calor en verano. Para un clima como el cálido húmedo, donde no se presentan variaciones de temperatura estacionales importantes que requieran de aislamiento en los cerramientos, podría ser ventajoso el diseño de sistemas que, prescindiendo de esta protección, puedan evitar el sobrecalentamiento diurno y permitir la refrigeración radiante nocturna. Tal es el caso de la cubierta ventilada.

En el caso de la refrigeración radiante nocturna, las pérdidas por radiación de onda larga suceden en la cara exterior de la cubierta, por lo que la implementación de aislamiento interior minimizaría este efecto. Se sabe que la cámara de aire entre las hojas metálicas también podría disminuir la refrigeración nocturna al no estar la cara interna expuesta directamente a la bóveda celeste, sin embargo suponemos que, al omitir el aislamiento, se podrían obtener niveles de refrigeración radiante que consigan elevar las condiciones de confort en los periodos nocturnos en comparación con cubiertas ventiladas que sí presenten aislamiento en la cara interna.

Las propiedades térmicas de las hojas metálicas tales como: su alta conductividad; su alta emisividad y, tratándose de láminas relativamente delgadas, su reducida masa. Les confieren características que, en las horas del día con altos niveles de radiación solar, les son adversas, provocando un sobrecalentamiento al interior de los espacios. Pero que por las noches les permitirían realizar de manera más eficiente la refrigeración por radiación de onda larga a la bóveda celeste, en comparación con cubiertas fabricadas con otro tipo de materiales.

Es importante señalar que la refrigeración radiante es mucho más efectiva en zonas de cielo despejado donde la humedad específica del ambiente sea baja. Esto debido a que las

partículas de agua de las nubes absorben y emiten el espectro total que reciben de la tierra. Los lugares húmedos y nublados, y aquellos expuestos a fuertes vientos, disponen de menores posibilidades de aplicabilidad de este mecanismo de enfriamiento [17].

En resumen: la cubierta ventilada metálica tendrá a su favor, a diferencia de cubiertas ventiladas fabricadas con otros materiales, que podrá desempeñar la función de radiador nocturno en los periodos del año en que la humedad del ambiente sea baja, los cuales son también aquellos con temperaturas más elevadas. Esto además de las ventajas propias de contar con una pantalla exterior que le provea de sombra permanente y una cámara ventilada para contrarrestar las ganancias solares durante el día.

1.4.3 La cubierta ventilada en la arquitectura tradicional de zonas tropicales.

Siendo la cubierta ventilada un concepto contemporáneo, en este trabajo se ha indagado dentro de la tradición constructiva de los sitios con clima cálido húmedo aquellas estrategias en las que los principios mencionados con anterioridad, participantes en la disipación del calor de la cubierta, estuvieran presentes. Sean o no evidentemente reconocibles como cubiertas ventiladas.



Figura 6: Fotografía de viviendas Malayas

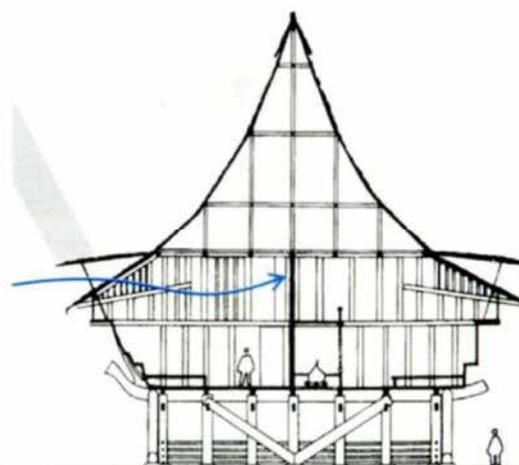


Figura 7: Corte transversal de una vivienda Malaya.

Las cubiertas en esta zona climática se caracterizan por cumplir la función de sombrilla y paraguas. Su forma cónica o piramidal elevada amplía el volumen de aire cubierto y ayuda a alcanzar el confort térmico. Usualmente se ubican en ella aberturas estratégicas que permitan el movimiento de aire y con ello bajar la temperatura y la humedad interior.

Se encuentran de materiales como guano, palma o tejas apoyados sobre estructuras de madera, por mencionar los ejemplos más comunes. El uso de estos materiales semipermeables, permite el flujo del viento a través de ellos, facilitando la salida del aire caliente del interior. Provocando al mismo tiempo un movimiento de aire continuo en el espacio. La utilización de materiales como los antes mencionados, hace posible la proyección de sombras de un elemento sobre otro, minimizando en parte las ganancias de calor por radiación solar al interior del edificio. Además de que, al ser materiales ligeros, cuentan con poca inercia térmica.

Esta solución tiene como ventaja la creación de un microclima interior fresco, en parte por la gran masa de aire y en parte por la cubierta vegetal que permite una ventilación cruzada en todas las direcciones, independientemente de la dirección del viento. Por otro lado existen numerosos ejemplos de viviendas en las que, debido a la permeabilidad de la piel exterior o por aspectos meramente ornamentales, se habilitaba un falso techo construido con estructuras ligeras y enlistonados de madera. Creando una cámara

desocupada (ocupada eventualmente para almacenaje) y ventilada, ya sea por la misma naturaleza permeable de la cubierta o por la habilitación de aberturas en el perímetro para permitir la ventilación de dicho espacio.

Luego de la llegada de los españoles a América, el techo pasó a ser un elemento pesado construido con tejas y vigas macizas de madera apoyadas en los muros y formando una cubierta de 2 aguas. El resultado fue una pobre ventilación, ya que las tejas no permiten el movimiento de aire antes descrito además de presentar una mayor inercia térmica.[2]

Otra de las razones por las que los materiales tradicionales utilizados en la construcción de cubiertas en esta zona climática ha cambiado es por cuestiones de costo, practicidad en la construcción, seguridad y durabilidad. Tal es el caso de la vivienda Malaya descrito por Roslan et.al. donde la utilización del concepto de casa tradicional se ha vuelto impopular debido a la modernización del diseño habitacional y a la limitación de la madera y las hojas de palma como materiales de construcción. Actualmente los diseños de cubiertas modernos de Malasia se hacen con menor ventilación o con áticos no ventilados para ahorrar dinero en su construcción; por cuestiones de incendios, protección a la lluvia y para aumentar la seguridad. [18]

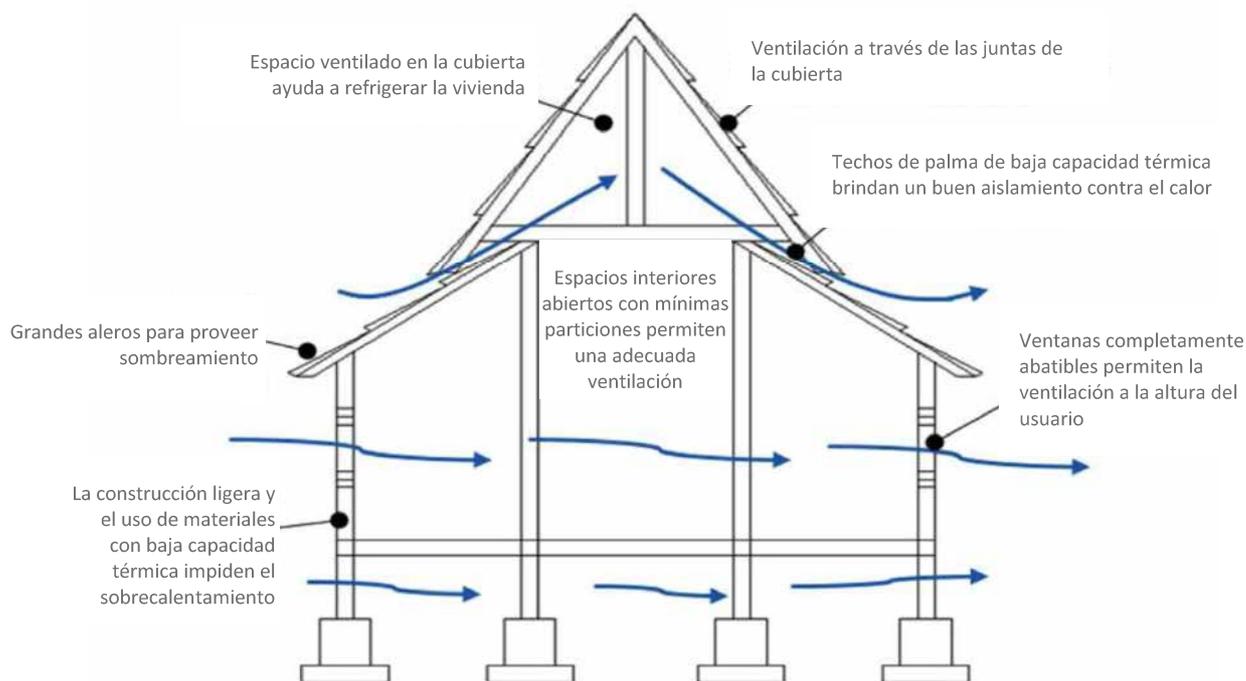


Figura 8: Esquema de características térmicas de la vivienda Malaya

Lo cierto es que, a medida en que los materiales constructivos modernos fueron desplazando a los tradicionales, la ventilación de las cubiertas desapareció, y en muchos casos, el tipo de cubierta de lámina autoportante de aluminio y zinc de una sola hoja o la losa de concreto armado ha sustituido a la cubierta inclinada tradicional que aportaba

condiciones de confort notablemente superiores. Además está decir que un techo plano de concreto armado, como el que frecuentemente existe en las construcciones modernas es una negación de la latitud que conlleva elevados gastos de impermeabilización y mantenimiento. [2]

Siendo la cubierta ventilada conocida en un amplio sector de la investigación en temas de mejoramiento del confort, como una estrategia eficaz en la reducción de cargas solares al interior de los edificios en clima cálido, en la actualidad su implementación en la construcción en el trópico mexicano es prácticamente inexistente. Empleándose en poquísimos casos alguna otra estrategia de refrigeración como el “Cool Roof” o el aislamiento interior.

1.4.4 Evolución de la cubierta ventilada en la arquitectura contemporánea

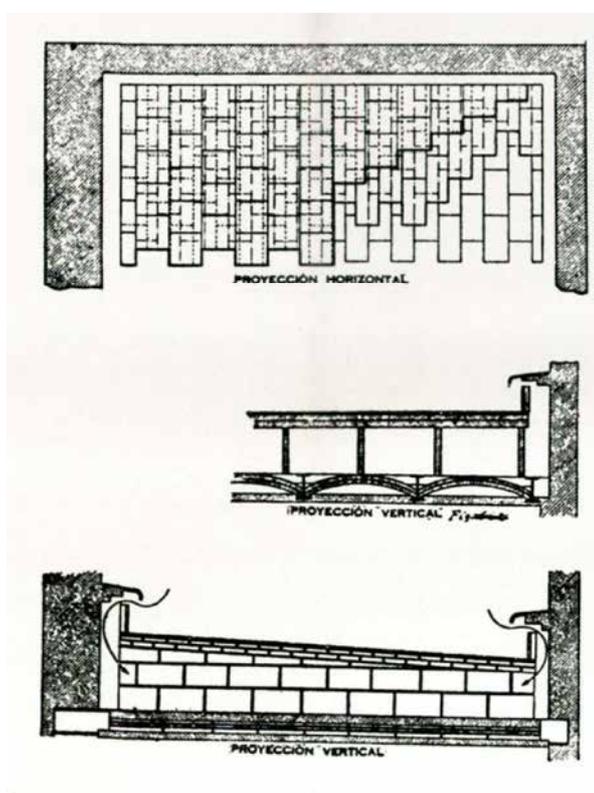


Figura 9. Esquema constructivo de una cubierta catalana

El concepto de cubierta ventilada como elemento en la disminución del sobrecalentamiento por cubierta es relativamente nuevo, la aparición de las cavidades intermedias en la conformación de la cubierta apunta a temas más bien relacionados con la correcta evacuación de la humedad del cuerpo de la cubierta, que de otra forma ocasionaría humedades, condensaciones y consecuentemente el deterioro, tanto de la estructura en cuestión, como de las condiciones de sanidad del espacio interior.

Un ejemplo de cubierta ventilada es la cubierta catalana. Cuya hoja interna es un forjado plano sobre el que descansan una serie de muretes de tabiquillo que apoyan a manera de rastreles un tablero impermeable de baldosín de poca pendiente, creando una cámara ventilada entre ambos. La ventilación de esta cámara está garantizada gracias a la disposición de aberturas continuas en el perímetro.

La versión original no tiene ni impermeabilización añadida al baldosín catalán (no es necesario si éste se conserva adecuadamente) ni aislamiento, más allá del que le confiere la cámara de aire [19].

El típico ejemplo de cubierta inclinada con ventilación, lo constituye la cubierta tradicional de teja sobre rastreles de madera. Hoy, diferentes sistemas comerciales reinterpretan la solución tradicional ligera, incorporando aislamiento e impermeabilización. Montando la teja en seco y liberándola de la exigencia de estanqueidad [20]

La cámara de aire en las cubiertas ventiladas aporta al cerramiento un comportamiento muy eficiente a todos los niveles. Mejora sensiblemente el comportamiento térmico puesto que se introduce un material aislante (aire) y se divide la hoja masiva en dos, lo que permite especializar la hoja interna como acumuladora y la externa como aislante y acabado. Esta división junto con la aparición de materiales aislantes ha permitido implementar soluciones más ligeras donde generalmente la hoja interna sirve de soporte a la externa y al aislamiento [20].

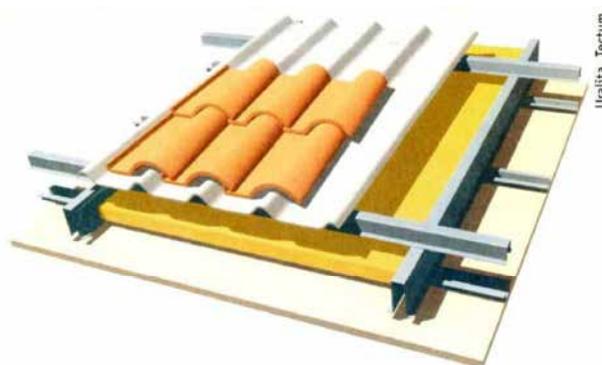


Figura 10: Sistema de Cubierta Ventilada con hoja interna aislada y hoja externa de chapa metálica y tejas de barro.

Actualmente existen muchos sistemas de cubiertas con cavidades ventiladas, que pueden ser planas o inclinadas. Las diferentes familias de soluciones técnicas para la hoja externa corresponden a tableros de madera o yeso; baldosas cerámicas o de piedra y chapas metálicas sobre armazón de largueros. Muchos cerramientos estandarizados responden a éste último tipo. Donde el bastidor es de perfiles ligeros, la hoja interna de diversos materiales y la externa de chapa perfilada, fijada al bastidor con tornillos o remaches vistos y con solapes. Con el aislamiento colocado en la hoja interna, los pliegues de la chapa perfilada actúan como canales de ventilación, disipando el calor acumulado por la chapa metálica. La chapa metálica puede sustituirse por sistemas más sofisticados: planchas o lamas metálicas y plásticas con refinados remates y sistemas de anclaje y regulación. Estos sistemas pueden plantearse con juntas abiertas, que facilitan el montaje, evitan los sellados y permiten juntas limpias [20]. En este caso la cámara quedará ventilada y la hoja interna debe impermeabilizarse y drenarse. (Ver **Figura 10**)

Existen hoy multitud de sistemas patentados para construir cubiertas como las descritas con anterioridad, sin embargo, la utilidad de la cámara ventilada queda en entredicho, ya que en muchas ocasiones ésta es muy angosta y queda obstruida por elementos estructurales o de instalaciones ocultas. Con lo que frecuentemente su aplicación en la construcción se reduce a motivos estéticos y funcionales más que térmicos[21].

1.4.5 Confort térmico en el clima cálido húmedo.

- ***Clima Cálido Húmedo.***

En la bibliografía existen diferentes criterios para la clasificación de los climas en el planeta. La combinación de las variables climáticas existentes hace imposible identificar solo uno de ellos como verdadero. Se deberá identificar el objetivo por el cual esa categorización es necesaria [14].

Desde el punto de vista del diseño arquitectónico, la temperatura del aire y su contenido de humedad serán determinantes en la elección del criterio de clasificación a utilizar, ya que el efecto térmico de los materiales involucrados en la configuración de los edificios dependerá de la interrelación de ambos factores. La prevención en la penetración de agua de lluvia al interior de los espacios hace también indispensable la consideración de los periodos de tormentas para la zona climática estudiada [14].

El clima cálido húmedo de las zonas tropicales marítimas se caracteriza por contar con temperaturas medias altas, presentando variaciones poco acusadas día-noche y estacionales. La humedad es muy alta, frecuente nubosidad y fuertes precipitaciones irregulares. La radiación es relativamente difusa y los vientos muy variables, que fácilmente pueden ser huracanados [1].

- ***El clima en Tabasco***

El estado de Tabasco se encuentra situado en una región tropical, entre los paralelos 18° 39' y 17° 19' de latitud norte; los meridianos 90° 57' y 94° 8' de longitud oeste; con una altitud cercana al nivel del mar. Por lo tanto, el clima que prevalece es el cálido húmedo [4].

El 95.5% de su superficie presenta clima cálido húmedo, el restante 4.5% es clima cálido subhúmedo hacia la parte este del estado. La temperatura media anual en la entidad es de 27°C, la temperatura máxima promedio mensual es de 36°C y se presenta en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio mensual es de 18.5°C durante el mes de enero. La precipitación media estatal es de 2 550 mm anuales, las lluvias se presentan todo el año, siendo más abundantes en los meses de junio a octubre [4].

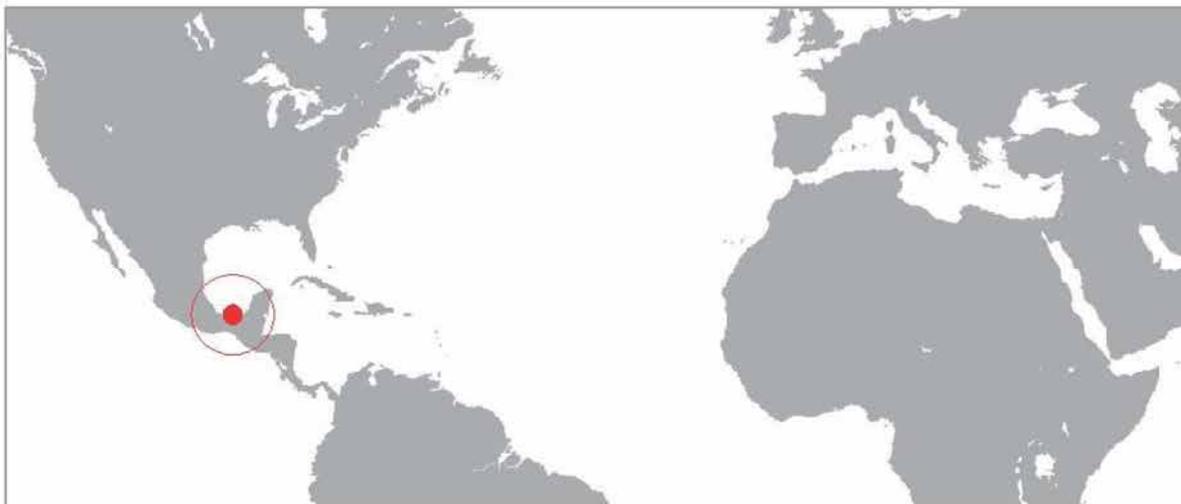


Figura 14: Localización de Villahermosa, Tabasco.

Coordenadas geográficas:

Latitud: 17° 59' N

Longitud: 92 55' O



Figura 13: Vista Aérea de la ciudad de Villahermosa, Tabasco

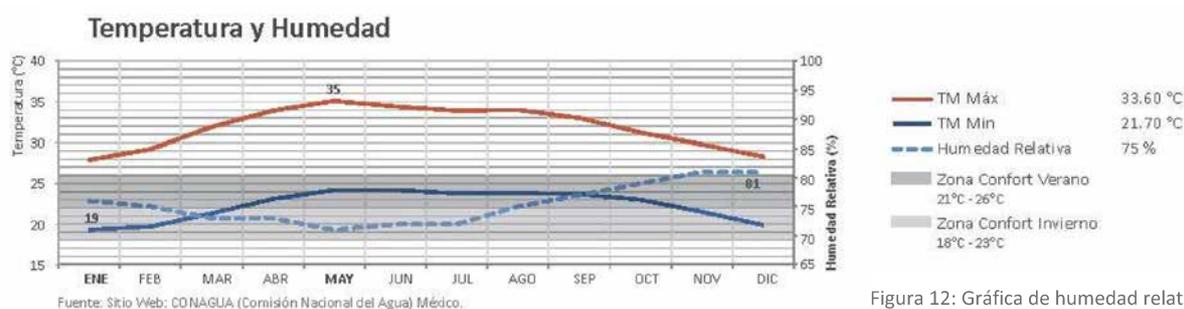


Figura 12: Gráfica de humedad relativa y temperaturas promedio mensuales máximas y mínimas del estado de Tabasco.

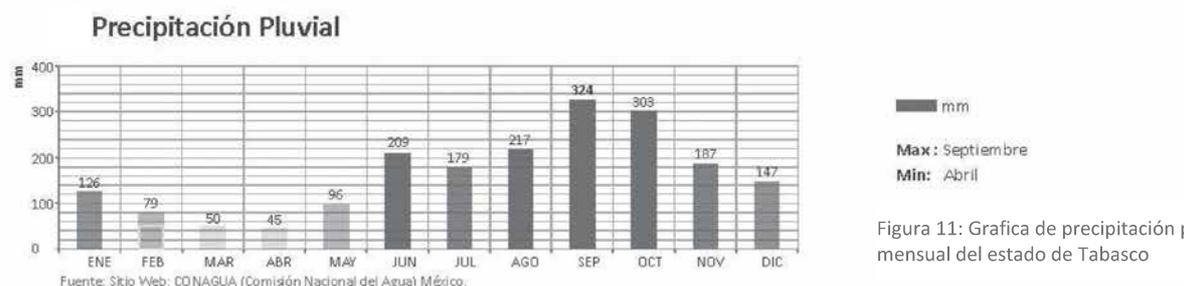


Figura 11: Grafica de precipitación pluvial mensual del estado de Tabasco

• *Confort y Confort térmico*

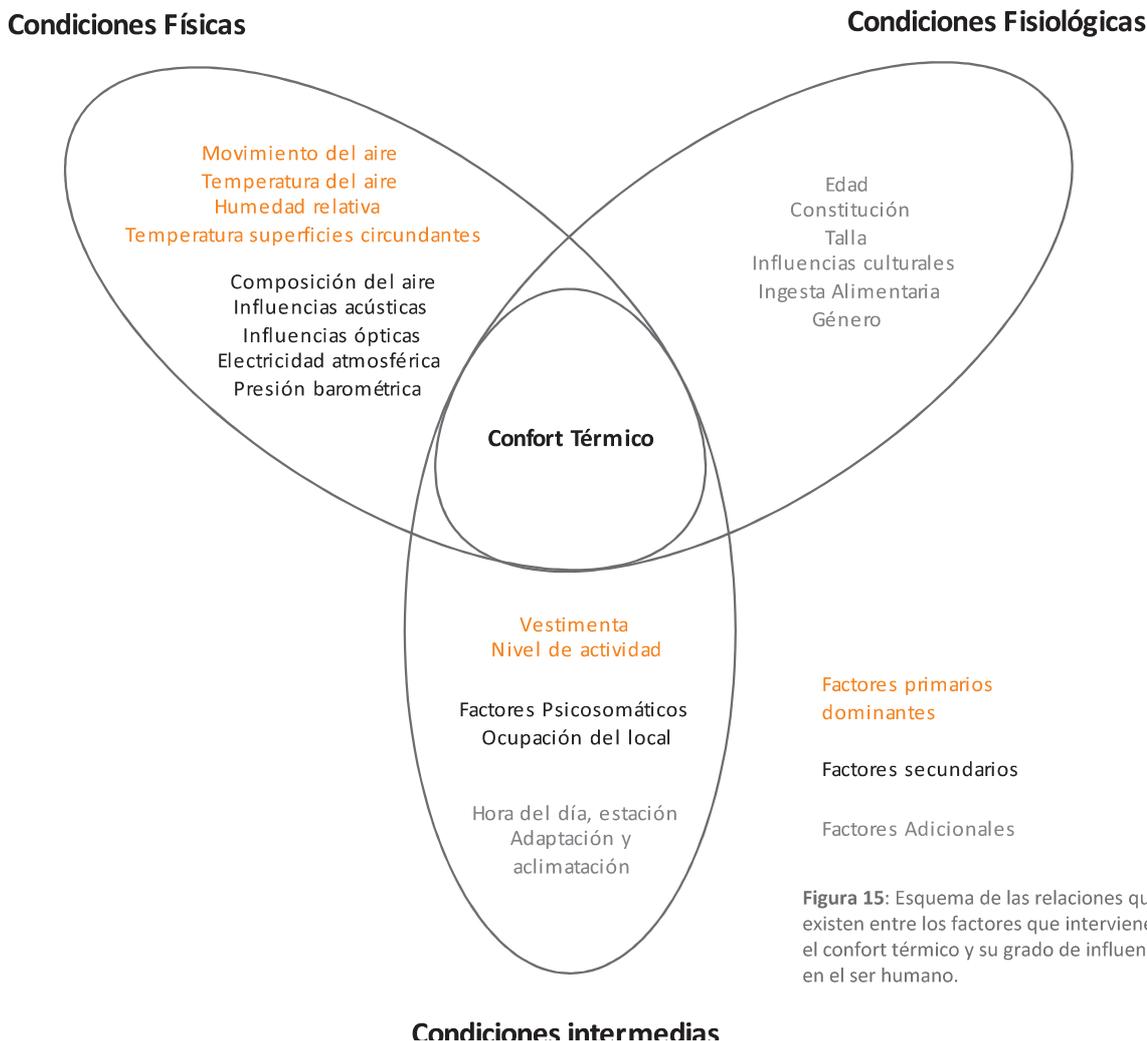


Figura 15: Esquema de las relaciones que existen entre los factores que intervienen en el confort térmico y su grado de influencia en el ser humano.

El confort en la arquitectura es un concepto amplio y complejo. Puede definirse como los parámetros objetivables del ambiente (térmicos, lumínicos y acústicos), que en combinación con los factores del usuario (físico-fisiológicos, sociales y psicológicos) , intervienen en la percepción del espacio que lo rodea y que le permiten desarrollar sus actividades fisiológicas y productivas de manera satisfactoria [15]. Por lo tanto, un espacio arquitectónico confortable es aquel que permita aproximarse a las condiciones óptimas de habitabilidad mediante el uso adecuado y eficiente de los elementos que lo componen y que tome en cuenta esta dualidad, física y psicológica del ser humano.

Por otra parte Victor Olgay define la “zona de confort térmico” como aquella en la que las condiciones del ambiente físico incidente en el cuerpo humano le demandan un mínimo de energía para conseguir el equilibrio biológico, lo que le permite invertir la mayor parte de su energía al desarrollo de actividades productivas. [16]

Para mantener el confort térmico, el cuerpo humano debe disipar el calor metabólico excedente hacia el ambiente mediante sistemas naturales de regulación, con los cuales la superficie de la piel cede una determinada cantidad de calor, dependiendo de la temperatura ambiente y al su nivel de actividad física, pero solo hasta lograr el equilibrio. En otras palabras, las ganancias de calor del cuerpo deben ser equivalentes al calor que pierde hacia el exterior. Cuando se rompe este equilibrio, es relativamente fácil llegar a un estado que se conoce como *disconfort térmico* [17]. En el esquema anterior se ilustran las relaciones que existen entre los diferentes factores que intervienen en el confort térmico así como su grado de influencia en el ser humano. El autor los clasifica en: condiciones físicas, psicológicas e intermedias [18].

- ***Parámetros de confort térmico***

Los parámetros del ambiente que intervienen en el confort térmico son los siguientes: Temperatura del aire, Temperatura de radiación, Movimiento del aire, y Humedad del ambiente [1].

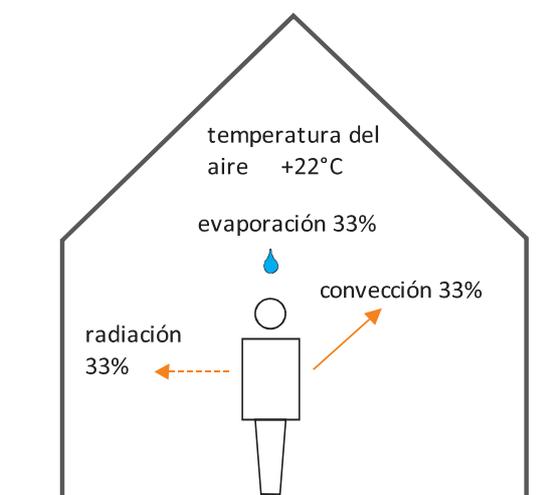


Figura 16: Esquema de como el ser humano disipa calor al ambiente

Los medios a través de los cuales el cuerpo humano intercambia calor con su entorno se rigen de la misma forma que en el resto de los cuerpos existentes conocidos y pueden clasificarse en cuatro procesos principales, que se relacionan directamente con los parámetros antes mencionados: **Radiación, Conducción, Convección y Evaporación** [1]. De esta forma, la temperatura del aire influye en la sensación de calor a través del contacto directo con la piel. La humedad relativa del aire, cuando es baja, permite una mayor evaporación de agua de nuestra transpiración, siendo éste un sistema de refrigeración del cuerpo. Mientras que el movimiento del aire incrementa la cesión de calor y humedad de la piel al ambiente (Ver **Figura 16**)

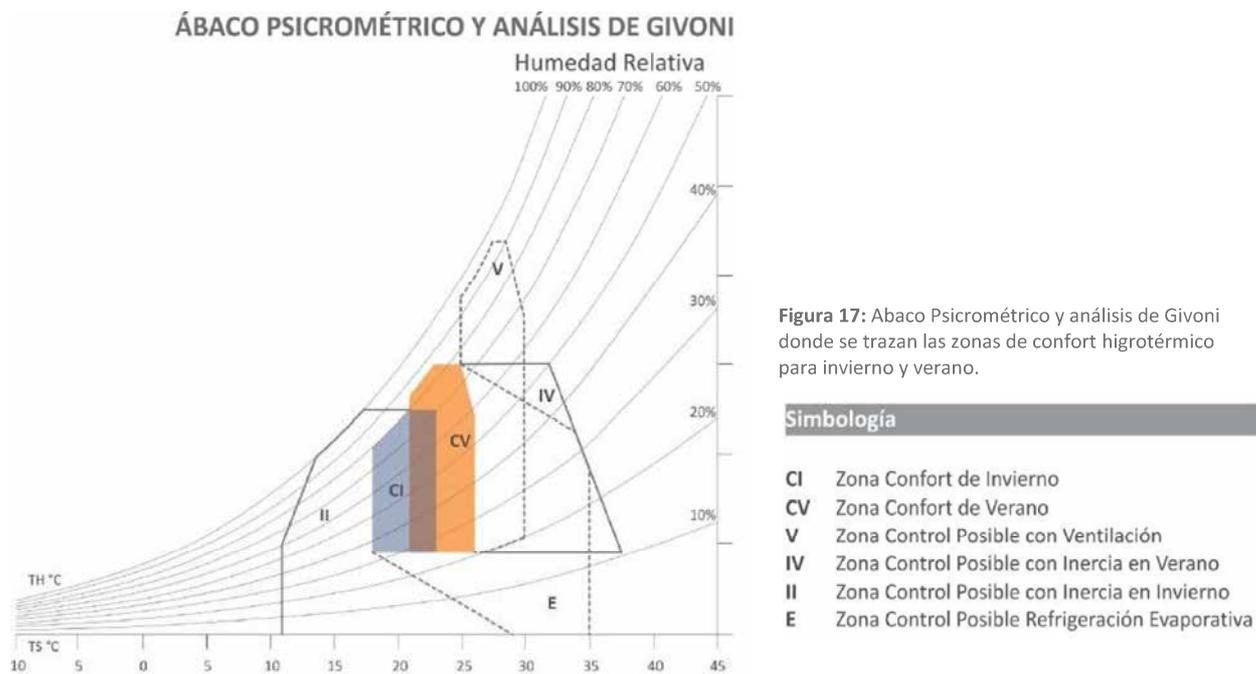


Figura 17: Abaco Psicrométrico y análisis de Givoni donde se trazan las zonas de confort higrotérmico para invierno y verano.

Un gráfico que permite leer las relaciones entre los parámetros antes mencionados frente a la sensación térmica del ser humano es el climograma realizado sobre un diagrama psicrométrico por B. Givoni en el cual traza una zona de confort higrotérmico para invierno y para verano respectivamente (Ver **Figura 17**). Del mismo modo propone otras zonas donde alcanzar el confort térmico es posible mediante la implementación de estrategias pasivas de acondicionamiento térmico [1].

- ***Estrategias de confort para climas tropicales***

Una vez descritas las características del clima cálido húmedo a continuación se expone un breve repaso de las estrategias generales que en el diseño de la arquitectura vernácula de esta zona geográfica se han implementado para mejorar las condiciones de confort de sus habitantes, y de esta forma contextualizar a la cubierta ventilada como un sistema que responde a varios de los postulados aquí descritos [1][15][16]

1. **Ligereza de los materiales de construcción** para evitar acumulación de calor en los cerramientos.
2. **Grandes aberturas** de los cerramientos son recomendables para conseguir el paso del aire. Deben estar siempre protegidos de la radiación.
3. **Permeabilidad de los cerramientos**, que permitan la rápida evacuación de la humedad a través de la ventilación.
4. **Inclinación de los techos y provisión de grandes aleros** en todas las orientaciones, como protección contra la radiación excesiva y la lluvia. Generando eventualmente espacios sombreados perimetrales.
5. **Disposición aislada de los edificios**, que permita el movimiento libre del aire entre ellos y la ubicación de vegetación intermedia para aportar sombra.
6. **Edificios estrechos y alargados con sus caras más angostas orientadas hacia el este-oeste** para proporcionar una superficie reducida a este asoleamiento, considerado el más perjudicial después del de la cubierta.
7. **Construcción elevada del suelo**, para obtener una mejor exposición a las brisas.

En resumen se pueden englobar las anteriores estrategias en tres principios básicos: protección a la radiación, máxima ventilación y evitar inercia térmica.

La cubierta ventilada metálica responde a estos principios de varias formas: en primer lugar, al contar con una doble capa, minimiza el impacto de la radiación en el sobrecalentamiento del espacio; en segundo lugar, al ser metálica, prácticamente no cuenta con inercia térmica; y por último, la ventilación, aunque no en contacto directo con el usuario, donde tiene un efecto fisiológico directo, sí interviene de manera indirecta en la disminución del flujo de calor al espacio interior.

CAPÍTULO II

Estado del Arte

2. Estado del Arte.

2.1 Funcionamiento de la cubierta ventilada en la transmisión de energía

La transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor se realiza entre dos sistemas u objetos debido a una diferencia de temperatura entre ellos.

Como parte de la metodología de análisis en la revisión de los estudios recientes que se han realizado a los sistemas de cubiertas ventiladas, se propone una clasificación de las diferentes estrategias implementadas en éstos sistemas de acuerdo a la vía de transferencia energética sobre la que actúan.

2.1.1 Conducción: variables y efectos

La transmisión por conducción se realiza cuando la energía calorífica se propaga de molécula a molécula en un cuerpo. En el caso de la cubierta, la estrategia más recurrida es el uso de materiales aislantes que dificulten el paso del calor a través del material expuesto a la radiación solar, bajando de este modo la temperatura superficial de la cara interior.

En el 2008, P.H. Biwole et. al. [22] pusieron a prueba diferentes tipos de cubierta ventilada con aislamiento interior, donde comprobaron que un aumento en el espesor del aislamiento tenía un impacto mayor en la reducción del flujo neto de energía a través del cerramiento que el aumento de altura en la cavidad ventilada

En otro estudio llevado a cabo en cubiertas ventiladas de láminas corrugadas galvanizadas con plafones de cartón yeso de 1/4", se comprobó que la colocación de aislamiento de vemiculita o lana mineral en el techo disminuía hasta 16°C su temperatura superficial máxima. Pero que un aumento gradual en el espesor del aislamiento mejora su desempeño de manera logarítmica: 1" de aislamiento redujo en un 50% el efecto de 6" con una diferencia de 8°C, mientras que la diferencia entre 4" y 6" de aislamiento fue de apenas 0.5 °C [23].

La mayor parte de los experimentos llevados a cabo en cubiertas ventiladas proponen este tipo de aislamiento, ya que se han implementado en muchos de los casos en ubicaciones geográficas donde las bajas temperaturas en invierno representan un problema de confort, siendo el aislamiento en los cerramientos obligatorio en las normativas de construcción [24][4][22][25][26][27].

En un estudio comparativo a 14 tipos de cubiertas se demostró que aquellas con áticos ventilados y aislamiento presentaban una menor transferencia de calor que aquellas sin aislamiento. Y que el aislamiento colocado directamente sobre las caras interiores de las

cubiertas provocó en todos los casos un mejor comportamiento térmico para los periodos de verano [28]

No se han encontrado investigaciones comparativas de cubiertas ventiladas metálicas sin aislamiento lo cual podría dejar de manifiesto la verdadera eficacia del sistema sin este componente. Tampoco se han encontrado estudios acerca del impacto de los elementos estructurales de unión entre las dos hojas que conforman la cámara, los cuales podrían hacer las veces de puente térmico entre ellas.

2.1.2 Convección: variables y efectos

La propagación del calor por convección en el aire, que en realidad consiste en un desplazamiento de la materia, hace que éste disminuya su densidad y tienda a subir. Siendo sustituido por otra parte más fría del fluido [1]. La ventilación de la cavidad tiene un efecto directo en la transmisión de calor por convección a través de la cubierta, ya que el aire expulsado lleva consigo energía calorífica, disminuyendo el flujo de calor hacia el interior del recinto.

Al respecto, un estudio que pone de manifiesto la efectividad de la ventilación de la cámara de aire provocando un menor flujo de calor hacia el interior es aquel en el cual se compara el comportamiento de una cubierta ventilada de baldosas de cemento contra otra del mismo material pero con la cámara cerrada. Esto comprueba que la transmisión de calor por convección es más efectiva al no renovarse el aire en la cámara. [29]

Para potenciar esta disipación de se han implementado diferentes acciones.

- ***Aumento de la temperatura del aire interior***

Comúnmente los materiales con los que se construyen los techos inclinados son de colores oscuros. Al absorber por este motivo la mayor parte de la radiación solar, su temperatura aumenta mucho con respecto a la del aire exterior. Las láminas metálicas de acero galvanizado o aluminio pierden gran parte de su reflectancia con el tiempo y por lo tanto se calientan de igual manera. Al ser estas superficies muy delgadas y tener una alta conductividad térmica, la temperatura de la cara interior se eleva al mismo nivel que la cara exterior, este calor se transfiere a la segunda hoja de la cubierta calentando el aire de la cavidad y reemitiendo energía de onda larga. Al elevarse la temperatura de la cámara de aire de la cubierta ventilada se potencia el efecto térmico de ventilación y por tanto el nivel de intercambio de aire con el exterior. Esta ganancia de calor depende en gran medida de los materiales y color de la hoja exterior [23]

Al respecto Givoni afirma que la ventilación del espacio intermedio se vuelve más efectiva en la prevención de sobrecalentamiento del techo cuando la hoja exterior es oscura, sellada, delgada y de alta conductividad térmica. Cuando estas condiciones son

contrarias, la disipación de calor debido al flujo de aire a través de la ventilación especial puede ser despreciable [23].

En estudios realizados a viviendas con áticos ventilados practicables en Israel se monitorearon las temperaturas superficiales y del aire interior de las cubiertas para probar la eficacia del sistema. Se comprobó que un cambio en el color (de oscuro a blanco) del tejado era más efectivo en la prevención de sobrecalentamiento interior que la ventilación del ático. También se comprobó que el desempeño de la cubierta pintada de blanco era prácticamente el mismo con la ventilación clausurada, demostrando que la ventilación no tuvo lugar al no lograr elevarse la temperatura del aire interior [23].

Biwole et. al. [22] determinaron que, entre mayor fuera el aislamiento bajo la cámara las temperaturas del aire alcanzarían niveles más altos, aumentando la velocidad del flujo medido en la boca de salida de la cámara.

S. Lee et. al. [25] mediante estudios realizados en diversos modelos de cubiertas en laboratorio, encontraron que: el flujo de aire es mayor cuando éste se mueve a través de conductos longitudinales conformados por la contraposición de dos paneles uno liso y otro acanalado que dentro de una cavidad única. Debido principalmente a que la superficie de contacto del aire con las paredes del conducto es mayor y hace que este alcance temperaturas más elevadas. La temperatura del aire medida en la boca de salida de la cámara ventilada con conductos y sin conductos registró 10.4 °C y 5.7°C respectivamente. Mientras que las velocidades del aire registraron 0.61 m/s para la primera y 0.22 m/s para la segunda. Con lo que se confirma la mayor disipación de calor por medio de los conductos. Sin embargo, se puede decir que esta última estrategia, sin el apropiado aislamiento de la cara inferior, no sería suficiente para contrarrestar los efectos de la transmisión del calor a través de las paredes del conducto en contacto directo con el espacio interior.

En un estudio realizado a una serie de cubiertas ventiladas con anchuras de cámara de 5, 10 y 20 cms se demostró que una menor apertura de la cámara provoca incrementos en la temperatura del aire interno, incrementando la velocidad del aire que se mueve a través de la misma por efectos de flotabilidad térmica. (Manca, O. 2014)[29]

De hecho, en cualquier caso, el aumento de la temperatura del aire interior de la cavidad ventilada obligaría a la implementación de aislamiento en el techo, el cual complementaría el efecto de disipación de calor por medio del aire expulsado, al permitir elevar la temperatura del aire al interior de la cavidad, con el bloqueo del flujo de calor al interior del espacio.

- ***Regulación de la anchura de la cámara***

Con respecto al espesor de la cavidad hay un acuerdo general en que el movimiento del aire es proporcional al aumento en la altura de la cavidad. [25][24][30][31] debido principalmente a la disminución de la fricción del aire por las paredes. Sin embargo este aumento de velocidad no es necesariamente proporcional a la disminución del flujo de energía a través de la cubierta. Este fenómeno se debe a que la cantidad de calor disipado por el flujo de aire expulsado de la cámara está más relacionado a la cantidad de energía que éste pueda acumular (aumento de temperatura de la masa de aire), la cual depende de otras características de la cubierta tales como la emisividad de los componentes y el aislamiento de la capa inferior principalmente [22].

También hay coincidencias en que ni la velocidad del aire al interior de la cámara ni el flujo de calor a través de la cubierta se ven afectados favorablemente cuando la cavidad excede los 10cm de altura. [22][24].

P. Chang et al. [24] constataron que cuando la distancia entre las paredes de la cavidad ventilada es menor a 5cm los flujos de aire moviéndose a lo largo de las sus caras interfieren entre sí haciendo que las turbulencias aparezcan rápidamente, incrementando la transmisión de calor y por lo tanto el flujo del mismo al interior del espacio.

En un estudio realizado a cubiertas ventiladas se calculó la velocidad que el aire alcanzaría en cavidades de 5, 10 y 20 cms de anchura. Comprobándose que en el ducto de 5 cm el aire alcanzó velocidades de aire más elevadas, sin embargo, fue la cubierta de 20 cm la que presentó un menor flujo de calor al interior, seguida muy de cerca por la cubierta con cámara de 10 cm de amplitud. [29]

- ***Incremento de la inclinación de la cubierta y flotabilidad del aire***

Otras investigaciones han monitoreado el comportamiento de la cubierta ventilada cambiando el ángulo de inclinación de la misma. [25][22][24][29]. Las cuales han demostrado que un aumento en la inclinación de la cubierta facilita la salida del aire por flotabilidad. Aunque dicho aumento reporta incrementos en el caudal de flujo de aire, hay un acuerdo general en el manejo de pendientes alrededor de los 30°, que permitan una integración más adecuada a la arquitectura.

- ***Orientación con respecto a vientos dominantes***

Aunque es indudable que la acción del viento tiene un papel fundamental en el comportamiento del aire al interior de la cavidad, son pocos los estudios que se han realizado en cubiertas ventiladas que registren los cambios en la eficiencia del sistema por este motivo. Esto debido principalmente a que el viento es muy variable a lo largo del día,

lo cual dificulta su inclusión en la elaboración de modelos matemáticos o computacionales para la predicción del comportamiento de fluidos [4].

Consideramos importante no obviar la acción del viento ya que éste puede ser un factor decisivo en el éxito del sistema de cubierta ventilada. Por un lado el viento puede generar ventilación forzada en la cámara de la cubierta que incremente exponencialmente el flujo de aire, y por lo tanto, la cantidad de energía evacuada de la cubierta. Y por otro, puede inducir turbulencias que entorpezcan el flujo del aire por la cavidad.

M. Labat et. al. asegura en sus estudios sobre una fachada ventilada de juntas abiertas [32] que aunque el viento puede tener un impacto en la tasa de flujo de aire vertical al interior de la cámara, su influencia es menos significativa para los valores medios que el efecto de la flotabilidad provocado por los fenómenos térmicos. Por otro lado B. Černe y S. Medved [26] detectaron un decremento en la transmisión de calor por la cubierta de un 50% cuando la velocidad del viento exterior aumentaba de 0.5 a 4 m/s.

Otro estudio que apoya esta teoría es el de C. Afonso y A. Oliveira en el cual, al comparar varios modelos de chimeneas solares experimentales y calculados se encontró que el método analítico presentó enormes variaciones con respecto al modelo real, con lo que se concluyó que los registros de velocidad del aire son afectados de manera importante por el viento exterior [33].

De cualquier forma, considerar la orientación de la cubierta con respecto a la dirección de los vientos dominantes del sitio donde se planea implementar el sistema es importante para que, en el peor de los casos, se asegure el funcionamiento por convección de la cubierta ventilada. Y en el mejor de los casos, se potencie aprovechando la ventilación forzada que éste ejerce.

2.1.3 Radiación: variables y efectos

La transferencia de calor por la cubierta ventilada se da principalmente a través de la radiación que se recibe y reemite tanto en la pantalla como en el techo. Dentro de esta clasificación existen también diversas estrategias para minimizar la cantidad de calor transmitido por radiación que actúan en los diferentes componentes de la cubierta ventilada.

- ***Aumento de la reflectancia y emisividad de la pantalla***

La estrategia más recurrida en el diseño de cubiertas de todo tipo, que como objetivo tenga la disminución del sobrecalentamiento por ganancias solares, es la de utilizar recubrimientos de alta reflectancia en la superficie exterior. Un ejemplo de ello es el sistema Cool Roof.

Un “Cool Roof (CR)” es una tipología de construcción que reduce la demanda de refrigeración. Los CR tienen superficies destinadas a reflejar la luz solar y emiten el calor de manera más eficiente que los techos oscuros o “calientes”[34]. Según consta en la base de datos del European Cool Roofs Council, los materiales utilizados tienen reflectancia que van de 0.74 a 0.80, mientras que su emisividad infrarroja es de 0.9 para todos los casos [35].

Los trabajos más documentados en la experimentación del “Cool Roof” se han llevado a cabo por el European Cool Roof Project junto con el Intelligent Energy Europe Programme [36] en donde se han monitoreado cubiertas antes y después de la aplicación del acabado reflectante para determinar la reducción del flujo de calor por la cubierta así como la reducción en gastos de refrigeración de los edificios en cuestión. Los resultados han arrojado disminuciones de 25°C de la temperatura superficial de la cubierta en comparación con la de la superficie antes de la aplicación del acabado, para periodos de verano [37]. Y reducciones de un promedio del 70% en gastos de refrigeración para los periodos de mayor radiación solar [36].

Otro estudio que involucra la emisividad de las superficies, pero esta vez, específicamente de los sistemas ventilados, es el desarrollado por Biwole et. al. en el cual, demuestra que un aumento en la emisividad de las superficies que conforman la cubierta es significativo en la reducción del flujo de calor por ganancias solares al interior en el siguiente orden de importancia [22]: 1. Superficie en contacto con la cavidad de la hoja interior de la cubierta. 2. Superficie en contacto con la cavidad de la hoja exterior de la cubierta 3. Superficie en contacto con el exterior de la hoja exterior de la cubierta.

- ***Inclusión de barreras de radiación (materiales de baja emisividad)***

También se han llevado a cabo análisis que contemplan barreras a la trasmisión de calor por radiación a base de hojas de aluminio y polipropileno [24] o combinaciones de aluminio y aislamiento [26][27]. Un estudio realizado a cubiertas ventiladas con hoja exterior metálica determinó que un revestimiento reflectante de calor con una emisividad de 0.09 de 0.25 mm de espesor instalado sobre el aislamiento de la hoja interior redujo el promedio diario de transferencia de calor hacia el interior de un 23 a un 25 % en el periodo de verano en comparación con una cubierta ventilada de iguales características sin este revestimiento reflectante. Y que incluir este material en medio de la cavidad ventilada, es decir sin contacto con la hoja interior de la cubierta, puede disminuir el promedio de transferencia de calor de las horas diurnas hasta un 29.4% [38].

Aunque en general se han demostrado mejoramientos en el sistema de cubiertas ventiladas con la utilización este tipo de barreras, se han encontrado algunos inconvenientes en cuanto al mantenimiento necesario para asegurar su funcionamiento, además de ser materiales que pueden elevar el costo de la cubierta significativamente.

Estudios para determinar la colocación óptima de este tipo de aislamiento en las cavidades ventiladas para minimizar los efectos de la acumulación de polvo en la lámina de aluminio - la cual disminuye considerablemente su capacidad de reflejar la radiación - han demostrado que una colocación elevada dentro de la cavidad, que permita que la cara inferior de la lámina reflectante no acumule polvo por efectos de la gravedad, puede prolongar su efectividad [23].

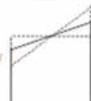
- ***Situación adecuada de la cubierta con respecto al usuario.***

La distancia que hay entre la cubierta y el espacio habitado, así como el grado de inclinación de la misma, afecta directamente su desempeño de cara a un aumento en el confort térmico interior. Ya que el nivel de incidencia de la remisión de calor de la cubierta sobre los usuarios es directamente proporcional a la distancia que existe entre ellos y se ve afectada por el factor de ángulo entre la normal de la cubierta y la del plano inferior.

Al respecto, Chitrarekha, K. et.al. implementaron un sistema de evaluación al desempeño de diferentes cubiertas para el clima cálido húmedo, en el que destacó la importancia que hay entre la radiación de calor del plano superior y el nivel de confort de los usuarios al interior. Y cómo interviene la geometría de la cubierta en este fenómeno [3].

2.2 Identificación de los parámetros de diseño de CV.

Gracias al análisis de la información antes expuesta, se ha logrado comprender que, como en todo sistema termodinámico, los tipos de transmisión energética están estrechamente relacionados unos con otros. De esta forma se puede decir que, un cambio en las características físicas o morfológicas de la cubierta ventilada, necesariamente intervendrá en el funcionamiento del sistema en su totalidad. Por lo que se ha considerado pertinente resumir a manera de cuadro sinóptico las relaciones existentes entre cada una de las variables identificadas y el tipo de transmisión energética sobre el que actúan.

VARIABLES:		CONVECCIÓN	RADIACIÓN	CONDUCCIÓN	
1	 Aislamiento techo	+	Aumento Temperatura y flotabilidad térmica del aire de la cámara	—	Disminución flujo de calor al interior del espacio
		-	Disminución Temperatura y flotabilidad térmica del aire de la cámara	—	Aumento flujo de calor al interior del espacio
2	 Absortancia pantalla	+	Aumento Temperatura y flotabilidad térmica del aire de la cámara	Mayor reemisión de calor al interior del espacio	—
		-	Disminución Temperatura y flotabilidad térmica del aire de la cámara	Menor reemisión de calor al interior del espacio	—
3	 Anchura cavidad	+	Disminución fricción y aumento velocidad del aire	—	—
		-	Aumento fricción y disminución velocidad del aire	—	—
4	 Inclinación	+	Mayor empuje del aire por flotabilidad térmica	* Menor incidencia de radiación reemitida por cubierta	—
		-	Menor empuje del aire por flotabilidad térmica	* Mayor incidencia de radiación reemitida por cubierta	—
5	 Orientación vientos	+	Inducción de ventilación forzada por la cámara. Aumento caudal de aire	—	—
		-	Obstrucción de ventilación por flotabilidad térmica. Disminución caudal de aire	—	—

* Situación relativa cubierta - usuario

Figura 19: Esquema que ilustra las relaciones existentes entre las variables identificadas en el diseño de Cubiertas Ventiladas y el tipo de transmisión energética sobre el que actúan



Figura 18: Agrupación de la variables de diseño de acuerdo a el tipo de transmisión energética sobre la que actúan.

2.3 Tesina Final de Máster: Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco

Como parte del trabajo de Tesina Final de Máster llevado a cabo por la autora de la presente tesis se desarrolló un estudio en el programa Design Builder de las variables de diseño de las cubiertas ventiladas metálicas para el clima cálido húmedo. Dicho estudio permitió definir los niveles de las variables identificadas en el presente trabajo para el diseño del experimento implementado.

Se procedió al diseño de una serie de modelos digitales que sirvieron para determinar la adecuada calibración de las variables a analizar en la configuración de un modelo de cubierta ventilada para el clima cálido húmedo y latitud de 18°N. [39]

Para ello se determinó un modelo base de 5 x 5 m de planta y 4.25 m de altura promedio. Con muros de block de hormigón de 10 cm. de espesor y revoco de mortero cemento – arena de 2 cms de espesor por ambos lados acabados con pintura blanca (0.4 reflectancia). El piso de losa de hormigón simple con acabado en duela de madera de 3 cms de espesor. La cubierta con lámina metálica acanalada de 1 mm de espesor y una pendiente del 30% (17°) a un agua, la cual coincide con las especificaciones de láminas autoportantes para evitar infiltraciones de agua.

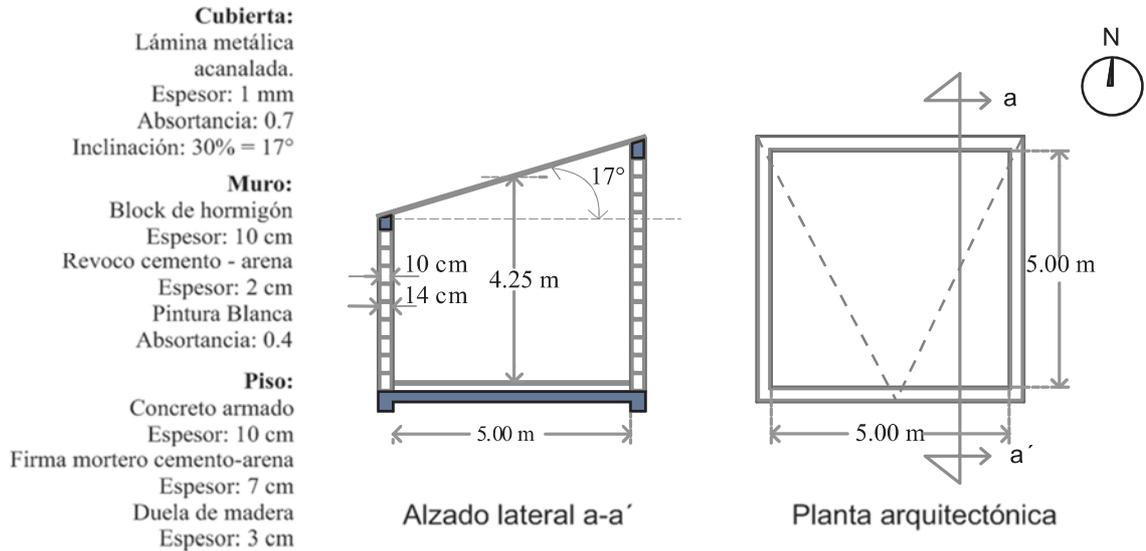


Figura 20: Dimensiones y materiales que conforman el modelo base digital utilizado para realizar los cálculos en Design Builder

Se fijó una absortancia solar de la cubierta del 70%, correspondiente a una lámina de aluminio y zinc con pátina de oxidación. El edificio se orientó con la pendiente de cara al sur, considerando esta orientación como la más desfavorable por permitir una mayor exposición a la radiación solar. No se consideraron ventanas para eliminar fuentes de ganancia o pérdida de calor adicionales al transmitido por la cubierta y los muros.

Las variaciones al modelo base fueron en primer lugar la implementación de hojas adicionales de lámina metálica para conformar las cámaras ventiladas con aberturas norte y sur, que corresponden a los puntos más altos y más bajos de las cubiertas.

En segundo lugar se procedió a la modificación de la anchura de la cámara. Se evaluaron diferentes modelos con anchuras que fueron desde los 5 hasta los 25 cm, Se seleccionó la anchura que presentó mejor comportamiento, lo cual permitió fijar este parámetro para los siguientes modelos.

Una vez fijada la amplitud de la cámara, se procedió a la evaluación del modelo a diferentes inclinaciones y reflectancias del acabado superficial de la cubierta. Por eliminación se obtuvo un modelo de cubierta ventilada donde se establecieron aquellos parámetros que mejor comportamiento observaron durante las simulaciones en Design Builder. (Ver **Figura 21**)

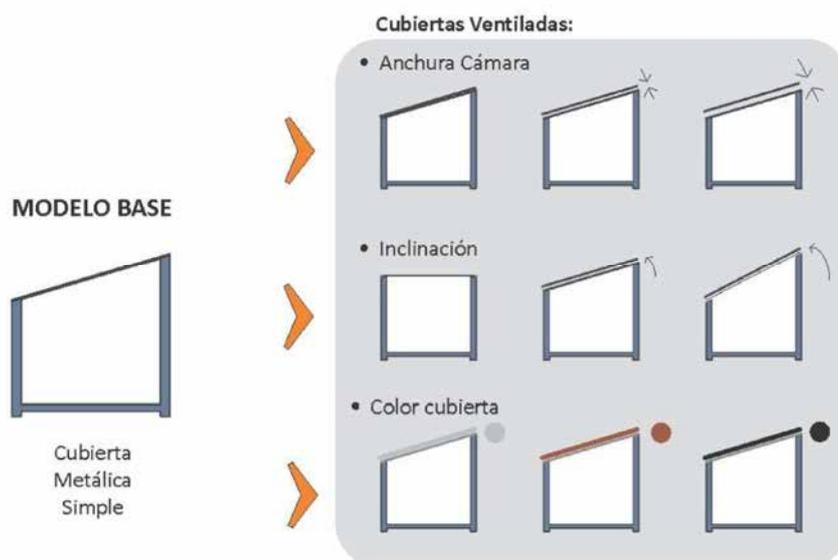
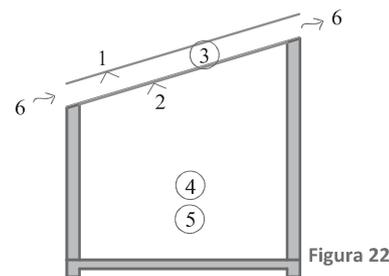


Figura 21: Esquema de las modificaciones a las variables de diseño realizadas al modelo base para los cálculos de los módulos de cubiertas ventiladas en el programa Design Builder

En todos los casos, las simulaciones se realizaron para una semana del mes de mayo, por ser éste el mes que presenta los periodos de radiación solar más críticos del año. Se decidió abarcar una semana completa para poder leer una muestra con variaciones significativas de radiación y temperatura exterior de bulbo seco que permitieran una comprensión más amplia del comportamiento de la cubierta. El factor del viento se eliminó en todos los modelos para, en el caso de las cubiertas ventiladas, poder evaluar la ventilación de la cámara solo por efectos de flotabilidad térmica.

Para determinar el desempeño de los modelos, se analizaron los datos obtenidos para cada hora de la semana muestra, a partir de las simulaciones en Design Builder). Los cuales fueron:

1. Temperatura superficial de la hoja exterior de la cubierta
2. Temperatura superficial de la hoja interior de la cubierta
3. Temperatura del aire de la cavidad ventilada
4. Temperatura del aire del interior del local
5. Temperatura de operación del interior del local
6. Caudal de aire de entrada y salida de la cavidad ventilada



El análisis de éstos resultados por medio de gráficas y cuadros comparativos, permitió jerarquizar las variables estudiadas para cubiertas ventiladas de acuerdo a su grado de intervención en el funcionamiento del sistema para el clima cálido – húmedo.

2.3.1 Análisis de las simulaciones

Una vez realizadas las simulaciones de los modelos planteados se procedió a comparar los resultados obtenidos para establecer aquellos parámetros con una mayor repercusión en el funcionamiento de la cavidad ventilada de las cubiertas.

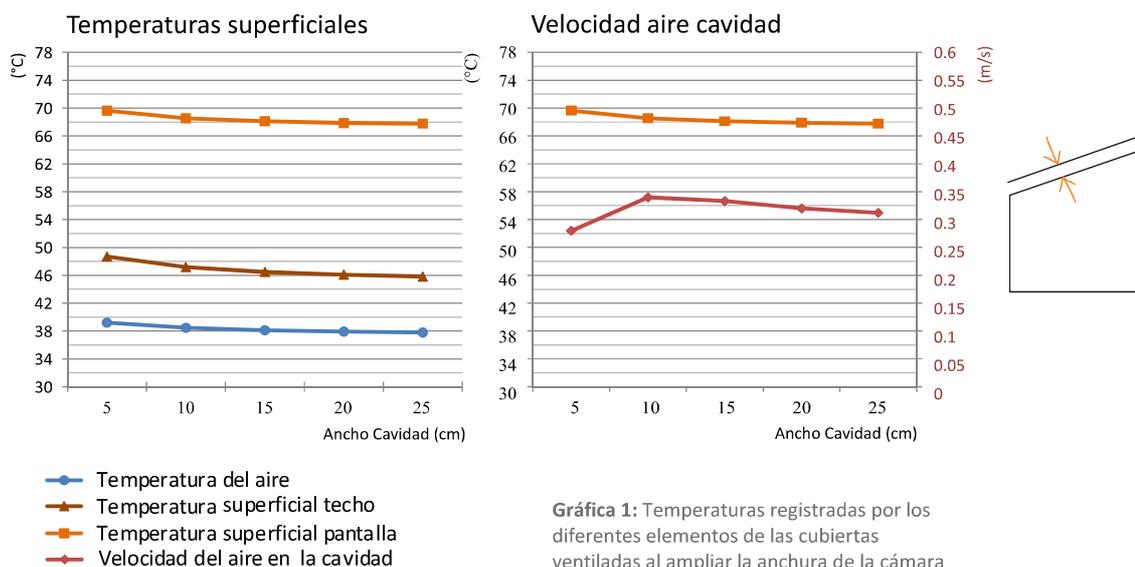
En primer lugar se procedió a la elaboración de una ficha para cada modelo evaluado, donde se registró su comportamiento hora a hora para la semana de 8 al 14 de mayo. Posteriormente se procedió a la comparación de los resultados de las simulaciones de cada modelo para la hora de esa semana que registró las máximas temperaturas del aire interior y temperaturas superficiales de cubierta.

- ***Anchura de la cavidad ventilada:***

Se realizaron 4 simulaciones a partir del modelo base, donde se añadió la pantalla para generar la cavidad ventilada a diferentes alturas: desde 5 cm hasta 25 cm

Se obtuvieron las fichas del comportamiento de cada una de ellas y se vaciaron en la siguiente grafica comparativa: (Ver **Gráfica 1**)

COMPARACIÓN ANCHO CAVIDAD VENTILADA



Se puede observar que la anchura de la cavidad repercute directamente en la velocidad del aire en su interior. Siendo la de 10 cm la que presenta las velocidades más altas. Las anchuras menores a 10 cm presentan una caída importante de velocidad, mientras que las mayores van disminuyendo de manera menos pronunciada. Este comportamiento se debe a que, cuando el espacio entre las paredes de la cavidad es reducido, la fricción del aire entre ellas aumenta mucho. Al aumentar la cavidad, la temperatura, tanto de la pantalla como del techo, presentan pequeñas reducciones. La reducción más importante de temperaturas se presenta al aumentar la cavidad de 5 a 10 cm. Todavía se observa una pequeña reducción al aumentarla a 15, pero a partir de este valor, las temperaturas se mantienen casi al mismo nivel.

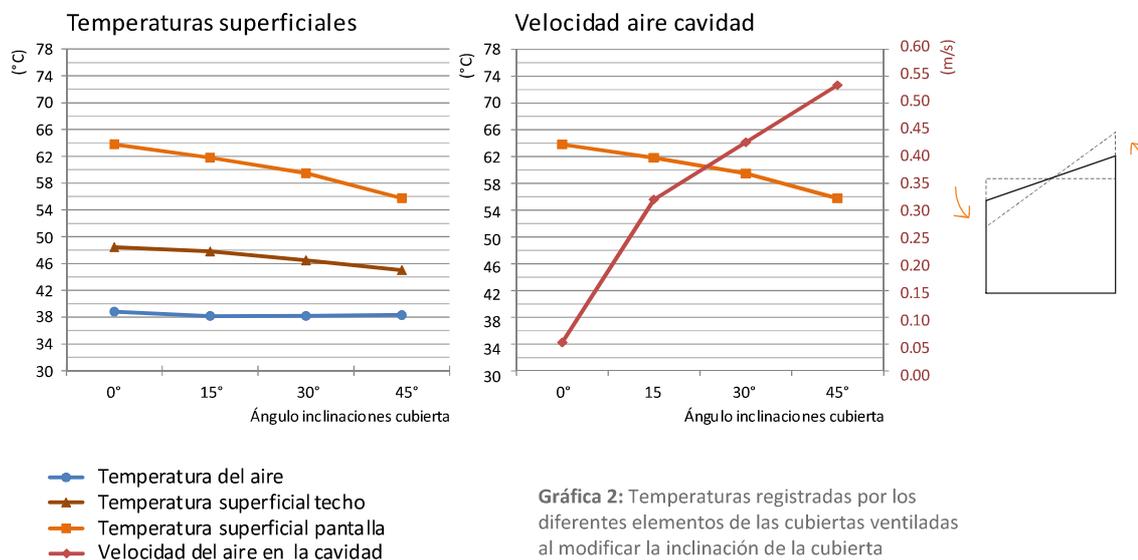
- ***Inclinación de la cubierta:***

El siguiente grupo de simulaciones corresponden a la variación en la inclinación de la cubierta. Desde los 0° hasta los 45°. La gráfica comparativa (Ver **Gráfica 2**) indica que el mayor sobrecalentamiento se presenta en una cubierta ventilada plana. Esto es principalmente porque presenta una mayor captación de radiación por metro cuadrado de superficie debido a su mayor perpendicularidad a los rayos del sol. Por otro lado, se puede observar cómo el flujo de aire por la cavidad también presenta las menores velocidades a 0° de inclinación, incrementándose de manera importante (hasta un 500%) cuando aumentamos la inclinación 15°. Sin embargo cuando aumentamos dicha inclinación 15° más, la velocidad aumenta solo un 33%

Aun cuando las temperaturas superficiales tanto de la pantalla exterior, como del techo disminuyen considerablemente a medida que se inclina la cubierta. Siendo la de la pantalla exterior la que presenta mayores reducciones. No sucede lo mismo con la temperatura del

aire, la cual presenta reducciones apenas mayores a 0.5 °C al inclinar la cubierta de 0° a 15°. Y a partir de los 15° de inclinación no presenta variación.

COMPARACIÓN INCLINACIÓN CUBIERTA



Gráfica 2: Temperaturas registradas por los diferentes elementos de las cubiertas ventiladas al modificar la inclinación de la cubierta

En cuanto a la velocidad del flujo de aire a través de la cámara, se puede constatar en base a los resultados obtenidos, que el factor más importante en el incremento del empuje por flotabilidad térmica lo constituye la inclinación de la cubierta, antes que el aumento de la temperatura de la pantalla. Por el contrario, aun cuando para inclinaciones menores la temperatura superficial aumenta, la velocidad del aire es más baja que en las cubiertas con mayor inclinación y temperaturas superficiales menores. También se puede afirmar que el incremento al caudal de aire de salida de la cámara no tiene repercusiones importantes en la disminución de la temperatura del aire interior del local estudiado.

- **Absortancia solar de la pantalla exterior**

El último de los parámetros considerados dentro de la configuración de la cubierta ventilada es el del color de la superficie en contacto directo con el exterior.

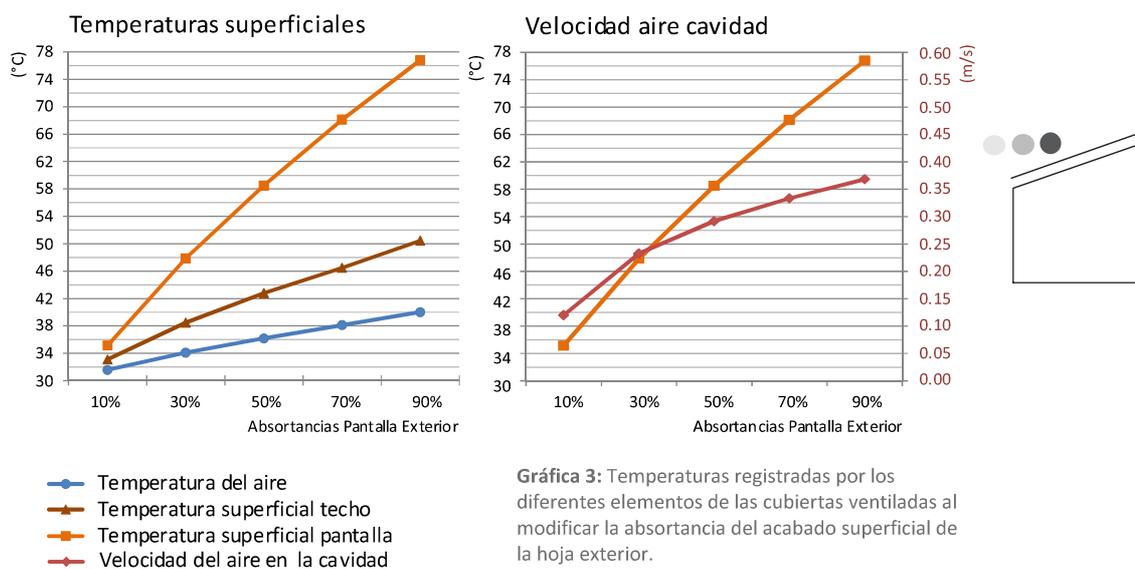
Se realizaron cinco modelos que van desde el 10% de absorbencia solar de la pantalla, es decir un blanco puro, hasta un 90% de absorbencia solar, es decir un negro muy saturado. Aunque entre los materiales de construcción, estas características son difíciles de conseguir, se propuso realizar estas simulaciones para leer un comportamiento más amplio de las cubiertas ventiladas con respecto a la variación de su reflexión (Ver **Gráfica 3**).

Al comparar los resultados de las simulaciones, se encuentra que la absortancia solar de la pantalla exterior es el factor más importante en cuanto a la reducción o aumento de la temperatura interior del edificio. Siendo casi directamente proporcional al grado de absorción de la cubierta. La variación de las temperaturas superficiales de la cubierta se ven

aún más afectadas por este factor. Cada vez que la absorción de la cubierta se incrementa en un 10%; la temperatura interior se eleva 1°C; la temperatura superficial del techo se eleva 2°C; mientras que la temperatura superficial de la pantalla se eleva entre 4°C y 5°C.

También se observa un incremento considerable de la velocidad del aire dentro de la cámara. Aunque en este caso no es lineal, es decir, para un incremento del 10% a 30% de absorción de la pantalla, la velocidad del aire se duplica, mientras que para un incremento del 30% - 50% la velocidad aumenta solo un 25%. Para incrementos subsecuentes del 50% - 70% y del 70% - 90% de absorción solar de la pantalla, los aumentos a la velocidad del aire son de 14% y 10% respectivamente. Con esto confirmamos que la velocidad del aire de la cámara no está directamente relacionada a los incrementos de temperatura del aire interior del edificio. También se confirma la información encontrada en la revisión bibliográfica en donde se afirma que para colores blancos de las pantallas exteriores de las cubiertas ventiladas, los movimientos de aire por flotabilidad térmica disminuyen mucho. Siendo esta propiedad reflectiva de la superficie el factor más importante en la prevención del sobrecalentamiento de la cubierta.

COMPARACIÓN ABSORTANCIA SOLAR DE LA PANTALLA



2.3.2 Conclusiones de las simulaciones

- ***Configuración de la cubierta ventilada.***

Después de haber analizado los resultados de las simulaciones, se puede llegar a las siguientes conclusiones sobre la configuración de las cubiertas ventiladas metálicas. (Ver **Figura 23**)

1. El factor más importante en la disminución de la temperatura del aire interior de los modelos analizados fue el de la absorción solar de la pantalla. Cuando este factor se acerca a 0, la transmisión de energía por cubierta tiende a desaparecer, sin embargo, los materiales constructivos difícilmente alcanzarán el 20%, y considerando que las condiciones de intemperismo bajo las que se encuentran harán que éste se eleve con mucha facilidad, se ha considerado una máxima eficiencia del sistema cuando la pantalla exterior se encuentre entre el 20% y el 40% de absorción solar.

2. La anchura de la cavidad es el siguiente factor a considerar, sin embargo éste es con mucho menos significativo que el coeficiente de absorción solar de la hoja exterior. Se observaron importantes reducciones cuando el espacio entre las paredes de la cavidad superó los 5 cm. Disminuyendo de manera menos acusada hasta llegar a los 15 cm. Rebasada esta distancia, la temperatura interior se mantiene prácticamente estable. Por lo que consideramos un rango óptimo de eficiencia de la cubierta cuando sus hojas se separan entre 10 y 15 cm.

3. La inclinación de la cubierta es el último factor en importancia. Aunque sí se encontraron disminuciones de temperatura más o menos importantes cuando se va de 0° a 15° de inclinación. Para inclinaciones mayores a los 30° no se observaron repercusiones importantes en la disminución de la temperatura del aire interior ni de la temperatura superficial del techo. Tomando esto en cuenta, se puede considerar una máxima eficiencia del sistema entre los 15° y 30° de inclinación de la cubierta cuando el criterio para determinar dicha inclinación no dependa de otros factores más que los de optimizar su desempeño.

- ***Comportamiento de la cavidad ventilada***

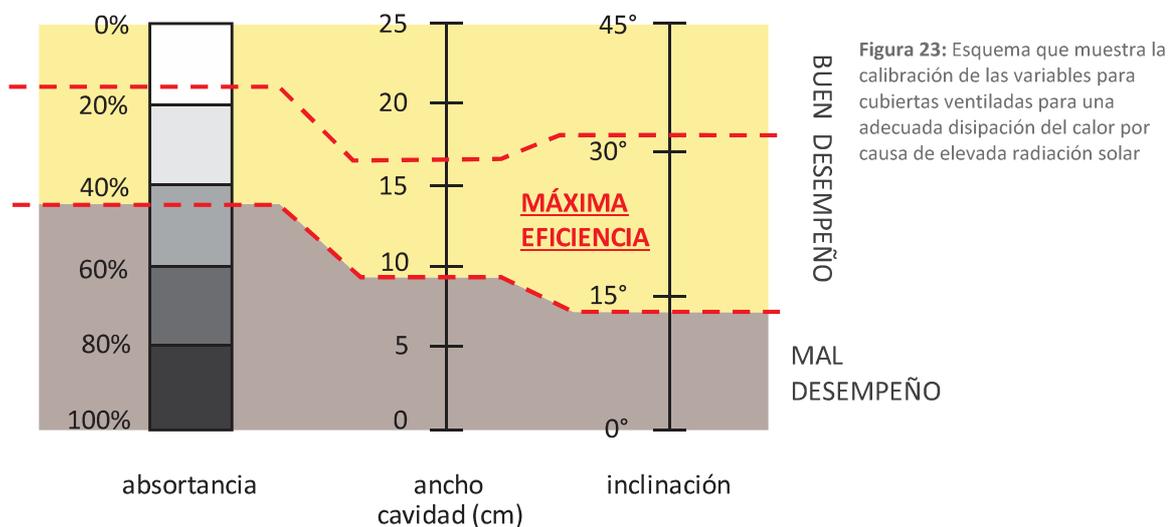
Debido a que uno de los principales argumentos manejados para la utilización de cubiertas ventiladas en el clima cálido es el de la disipación de calor a través del intercambio de aire de la cavidad con el exterior. Se considera importante destacar las conclusiones obtenidas gracias al análisis de las simulaciones en Design Builder.

1. En primer lugar se observa que en todos los casos, un aumento en el caudal de aire de salida de la cámara no impacta de manera importante en la disminución de la temperatura del aire interior.

2. Los mayores incrementos en la velocidad del aire a través de la cámara se registraron en primer lugar: al elevar la inclinación de la cubierta, en segundo lugar: al elevar la absorptancia de la pantalla (y por tanto la temperatura del aire de la cavidad) y por último al aumentar la anchura de la cavidad, siendo la separación de 10 cm entre las paredes de la cámara la que registró las mayores velocidades.

3. Al aplicar la acción del viento para inducir ventilación forzada, se observó la disminución de temperatura del aire interior más importante de todas las simulaciones, (donde se consideró solo el efecto de ventilación de la cámara). Sin embargo, en comparación con el efecto de otros factores como: disminución de la absorptancia solar de la pantalla o aumento de la anchura de la cavidad. El efecto de la acción del viento es menor.

CONFIGURACIÓN CUBIERTAS VENTILADAS METÁLICAS PARA EVITAR SOBRECALENTAMIENTO



CAPÍTULO III

Metodología

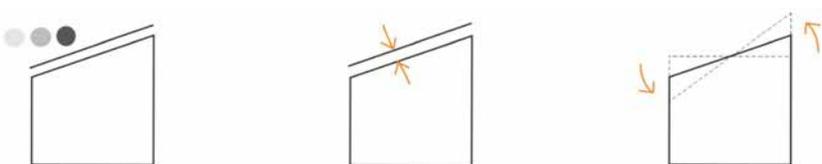
3. Metodología

3.1 Descripción general del experimento

Para determinar el grado de incidencia de las diferentes variables de configuración de una cubierta ventilada metálica en las condiciones térmicas interiores se realizó un experimento, en el cual se construyeron 4 módulos de Cubierta Ventilada Metálica, a los cuales se les realizaron diferentes modificaciones, registrándose sus temperaturas del aire interior y superficiales de las láminas.

Gracias a la revisión de los diferentes estudios a sistemas de cubiertas ventiladas y habiendo identificado aquellas variables de diseño aplicables a la fabricación de cubiertas de lámina metálica se determinaron las tres variables de configuración para llevar a cabo dicho experimento: **anchura de la cavidad ventilada, reflectancia del acabado superficial y grado de inclinación de la cubierta** [39].

En el estudio previo titulado “Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco” expuesto con anterioridad. Se definieron las variables de configuración de cubiertas ventiladas metálicas utilizadas en el presente experimento. Se realizaron las simulaciones energéticas que permitieron calcular 5 niveles para cada una de las variables. Con lo cual, pudimos determinar los niveles críticos y así reducir el número de niveles para el presente estudio[39]. Quedando establecidos de la siguiente manera. (Ver **Figura 24**)



Color acabado superficial	Anchura cavidad	Inclinación
Natural	5 cm	6°
Blanco	10 cm	21°
Rojo	20 cm	36°

Figura 24: Variables y niveles de configuración de las cubiertas ventiladas metálicas analizadas

Para determinar el número y características de los módulos a censar, se realizó un **diseño experimental factorial**.

Este tipo de experimentos permiten estudiar los efectos interactivos de las diferentes variables objeto de estudio, es decir, el efecto simultáneo de dos o más variables independientes (variables de diseño) sobre la variable dependiente (flujo de energía por la cubierta)[40].

Sin embargo, debido a que nuestro experimento cuenta con una base de tres variables, la cantidad de grupos de tratamiento necesarios para llevarlo a cabo excedía las posibilidades de realizarlo, lo cual obligó a la implementación de un **diseño factorial fraccionado**. En este tipo de experimento se utiliza solo una parte de la totalidad de las combinaciones de tratamientos que incluiría un diseño factorial completo[41].

Debido a que al reducir la cantidad de grupos experimentales no es posible estimar algunas de las interacciones de las variables, este tipo de experimentos requieren partir del supuesto de que existen razones teóricas para asumir que las interacciones son nulas entre los tratamientos omitidos[42].

En el caso del presente experimento se realizó un diseño factorial completo para dos de las variables de estudio: Anchura de la cavidad y Color del acabado superficial.

A fin de disminuir el número de combinaciones del experimento se determinó el siguiente criterio: se sabe que la variación de la inclinación de la cubierta, la tercera de las variables, impactará principalmente en el movimiento por flotabilidad del aire de la cavidad o bien, debido al cambio en la incidencia de la radiación solar sobre la hoja exterior. Suponemos que al fijar un nivel para las variables: anchura de la cavidad y color del acabado, podremos conocer la tendencia que el cambio de la inclinación podría tener en el aumento o disminución del flujo de energía al interior del espacio con independencia del nivel de las otras variables.

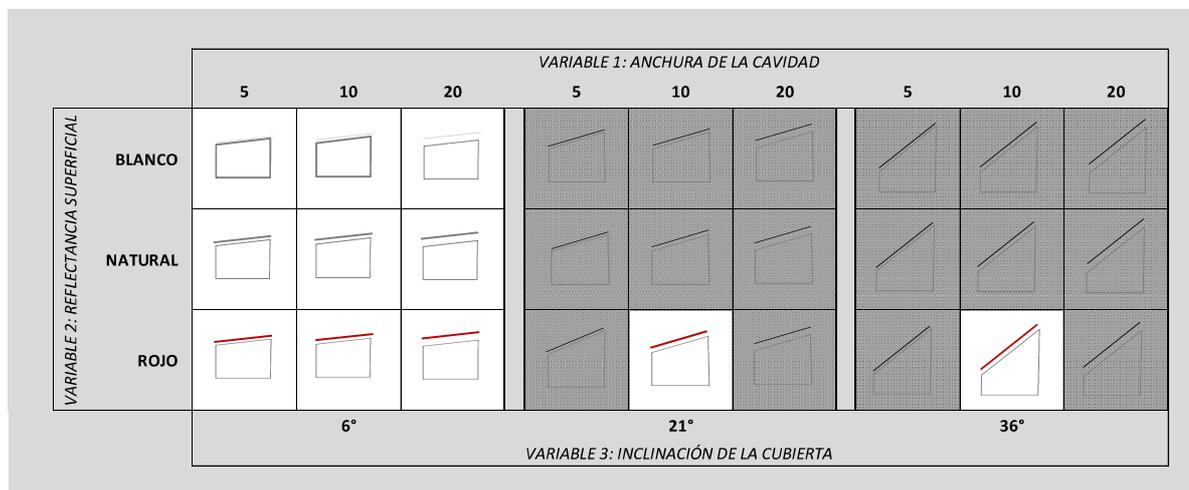


Figura 25: Esquema en donde se ilustra el diseño experimental factorial fraccionado del presente estudio. Las casillas ashuradas representan las interacciones omitidas de las variables.

Se sabe de antemano que en el caso del color blanco del acabado superficial ésta tendencia podría no ser fácilmente verificable debido al menor calentamiento de las superficies que conforman la cubierta ventilada, por lo que se decidió utilizar sólo uno de los acabados con alta absorbancia solar.

Para establecer la anchura de cavidad adecuada para la evaluación de la última variable se optó por utilizar aquella que en las simulaciones había demostrado obtener las mayores velocidades de aire al interior, esto es: 10 cms [39]

Habiendo eliminado dos de los niveles para dos de las variables de estudio, se pudo realizar el experimento con solo 11 combinaciones de las 27 posibles. (Ver **Figura 25**)

De esta forma, fue necesario el diseño de tres modelos a escala real. Con los cuales se pudieron monitorear simultáneamente los tres niveles de cada variable analizada. Se diseñó además un cuarto modelo con cubierta metálica simple (Modelo Base). Este modelo se monitoreó a lo largo de todo el experimento. Con lo cual pudimos obtener la disminución neta del flujo de energía a través de la cubierta al implementar la cubierta ventilada y a su vez, el menor o mayor aumento de dicho flujo para cada nivel de la variable estudiada.[38]

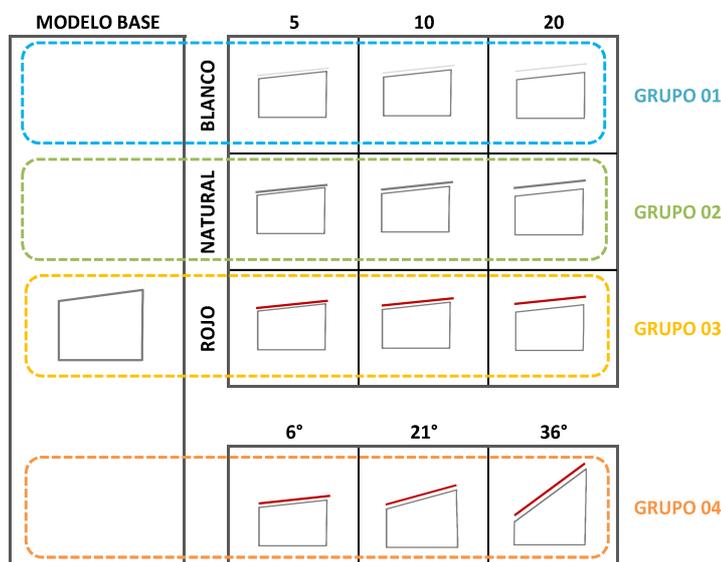


Figura 26: Grupos de experimentación.

Aquí se observa la manera es que se organizaron los grupos de módulos censados simultáneamente y la combinación de las variables para cada uno de ellos.

En total se analizaron 12 modelos de cubiertas ventiladas y un modelo de cubierta metálica simple con un máximo de 4 modelos monitoreados simultáneamente. (Ver **Figura 26**) Esto permitió conocer el comportamiento térmico de la variable analizada para cada etapa y contrastar los resultados de cada uno de los modelos con el modelo base, el cual presentó el comportamiento menos favorable en la conducción de calor al interior.

Para la evaluación del comportamiento térmico de los modelos experimentales fue necesaria la adquisición de los siguientes equipos:

- **Estación meteorológica alámbrica Davis VantagePro2 6252C**, un sensor de radiación solar Davis 6450, el dispositivo de comunicación con la computadora y el software WeatherLink Computer Interface. Así como sus accesorios de montaje. Con este dispositivo fue posible el registro de:

temperatura de bulbo seco, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento del sitio de estudio.

- El registro de la velocidad del aire dentro de la cavidad ventilada de la cubierta se realizó mediante un **anemómetro de hilo caliente Marca General Tools & Instruments. Modelo CIH20DL**. Indicado para medidas que van de 0 – 25 m/s con precisión milimétrica.
- Para la toma de temperaturas superficiales de las láminas metálicas de las cubiertas se requirió la instrumentación de un **sistema de adquisición de datos**. Dicho sistema está integrado por tres elementos principalmente: Dos módulos con 8 sensores de temperatura lm35 cada uno y un registrador de datos que cuenta con un contador de tiempo real (RTC); una pantalla LCD y memoria SD para el almacenamiento de los datos. Los módulos transmisores están conectados a un microcontrolador ATMEGA32 interfazado mediante una conexión R5485 al registrador de datos. El registrador adquiere la señal de ambos módulos solicitando minuto a minuto la información de los módulos, misma que se registra en la memoria SD alojada en él. Información que se descargó regularmente en hojas de cálculo para su posterior análisis.

El periodo de mediciones se realizó de la siguiente manera: (Ver **Figura 27**)

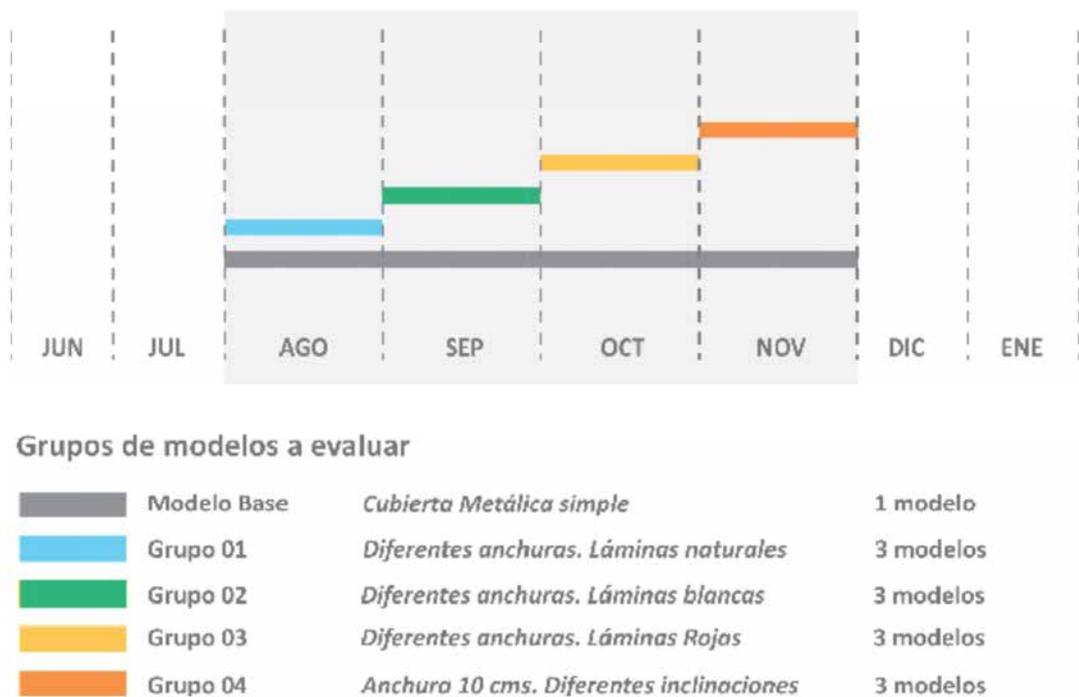


Figura 27: Duración total del experimento y tiempo en que se realizó el monitoreo para cada uno de los grupos de medición

3.2 Descripción de los módulos experimentales

Al ser necesario el seguimiento simultáneo de éstos 4 modelos, de los cuales, tres fueron sometidos a sucesivas modificaciones con el fin de evaluar las variables de estudio, se procedió a diseñar una estructura modular de partes móviles intercambiables con la cual fuese factible realizar las mencionadas modificaciones de manera rápida, limpia y sencilla.

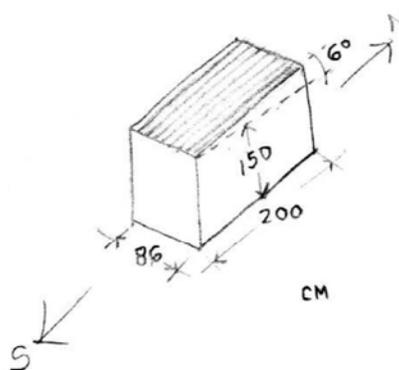
La necesidad de hacer una estructura modificable que permitiera su fácil transportación a un emplazamiento adecuado para su correcto funcionamiento - esto es, un sitio con suficiente altura sin obstrucciones a la radiación solar o vientos dominantes - hizo necesario elegir materiales ligeros de fácil instalación, como son los perfiles de acero galvanizado y los paneles de tablamento.



En el conocimiento de que los fenómenos térmicos no se pueden escalar, se decidió basar el experimento en un análisis de las tendencias que las diferentes configuraciones analizadas podrían seguir, es decir, aunque las temperaturas registradas en los modelos podrían no necesariamente corresponder a las de espacios habitados de mayores dimensiones, sí se puede considerar que una disminución significativa de la temperatura registrada en los modelos de cubierta ventilada estudiados con respecto al del modelo base de cubierta simple significaría un mejor desempeño de la cubierta ventilada frente a la cubierta de una sola hoja. De igual modo, disminuciones de temperatura graduales entre los modelos de cubierta ventilada con diferentes configuraciones de sus variables hacen posible evaluar el grado de incidencia de cada una de estas variables en la disminución del flujo de energía a través de las cubiertas ventiladas metálicas.

Para el dimensionado de los modelos se tuvo que considerar por un lado el espacio disponible para su adecuado emplazamiento, y por otro que las medidas interiores de los mismos permitiesen el acceso de una persona en su interior para manipular los instrumentos de medición adecuadamente, esto es: instalación de los sensores de medición así como carga y descarga de la información de los registradores de datos.

3.2.1 Módulo de Cubierta Metálica Simple



La construcción de este módulo fué indispensable en el desarrollo del resto de las etapas del experimento, ya que los registros de temperatura de este modelo permitieron valorar las aportaciones térmicas de las diferentes variables de diseño de las cubiertas ventiladas analizadas.

Para ello se determinó un modelo de 0.86 x 2.00 m. de planta y 1.5 m. de altura promedio.

El modelo está conformado por una estructura de perfiles metálicos rectangulares galvanizados de 1" que soportan paneles de yeso de 13 mm de espesor en su cara interior y exterior. En la cara exterior se reforzaron las juntas entre paneles con malla de fibra de vidrio y finalmente se recubrieron con una mezcla de cemento portland y resinas polimérica para evitar filtraciones al interior. Al final se aplicó una pintura acrílica blanca para obtener una alta reflectancia de la superficie exterior disminuyendo así la transmisión de energía por los muros evitando un aumento de la temperatura al interior de los modelos.

El piso del modelo es de triplay de madera de 12 mm de espesor apoyado sobre un bastidor de ángulos de 1" soldado a la estructura principal.

La cubierta está conformada por una hoja de lámina galvanizada calibre 20 fijada directamente a la estructura metálica, con una pendiente de 6 ° (10% de pendiente, mínima recomendada en los manuales de instalación de este material) a un agua.

El modelo se orientó con la cubierta inclinada hacia el sur, ya que se considera ésta la orientación más desfavorable.

El espacio interior no tiene ventanas, lo que permite que no existan fuentes de ganancia o pérdida de calor adicionales al transmitido por la cubierta y los muros.

Este modelo se monitoreó a lo largo de la duración total del experimento. Obteniendo los siguientes datos:

1. Temperatura superficial interior de la cubierta
2. Temperatura interior del espacio cubierto

3.2.2 Módulos con Cubierta Ventilada

- *Cubiertas Ventiladas con diferentes anchuras de la cavidad.*



En este punto del experimento, se procedió a la evaluación de un grupo de 3 modelos de cubiertas ventiladas con anchuras de cavidad de 5, 10 y 20 cms cada una. Que se monitorearon junto con el Modelo Base de cubierta metálica simple.

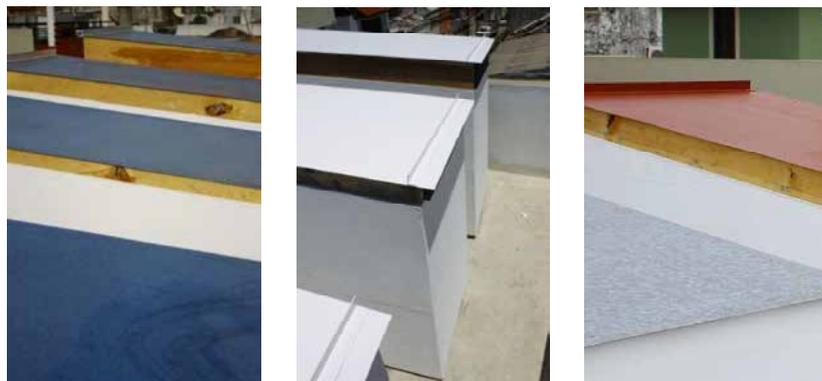
El sistema constructivo de los modelos de cubierta ventilada fue el mismo que el del modelo de CV. Las dimensiones también fueron las mismas. La cubierta se conformó por dos hojas de lámina galvanizada calibre 20. La primera hoja, fijada directamente a la estructura metálica y la segunda fijada a 2 vigas de madera. Conformando entre ambas láminas una cámara de aire ventilada. Las aberturas de la cavidad se orientaron hacia el norte y hacia el sur, es decir, los puntos más altos y más bajos respectivamente. Dejando el hueco de la cavidad libre de cualquier obstrucción al paso del aire.

De esta serie de pruebas se obtuvieron las temperaturas de cada uno de los elementos de la cubierta ventilada para conocer el aumento o disminución del flujo de energía al ampliar la distancia entre las hojas metálicas.



Para poder evaluar el aumento de la temperatura en los diferentes puntos de medición se colocaron sensores lm35 adheridos a la cara interna de las hojas metálicas interiores y exteriores por medio de cinta de aluminio auto adherible y grasa disipadora de calor para mejorar el contacto entre el sensor y la superficie. También se colocaron sensores lm35 para registrar la temperatura del aire tanto al interior de la cavidad ventilada como al interior del espacio del módulo. Para lo cual ambos sensores se suspendieron en la parte central de los espacios mencionados evitando el contacto directo con alguna superficie.

- *Cubiertas ventiladas con diferentes colores del acabado superficial.*



Una vez configuradas las cubiertas ventiladas con las diferentes anchuras de cavidad a analizar y la inclinación de 6° propuesta para el modelo base. Se procedió al monitoreo de las temperaturas de sus componentes con diferentes acabados de la lámina galvanizada exterior. Esto es: Natural (sin ningún acabado), Pintura acrílica blanca (acabado de alta reflectancia) y Pintura Rojo Oxido acabado mate (equivalente a una pátina de oxidación). El criterio para la elección de éstos materiales fue el siguiente: Conocer el comportamiento térmico de la lámina metálica recién instalada, sin suciedad, oxido o polvo que pudieran aumentar su absorbancia térmica. Conocer el comportamiento de la cubierta ventilada con un acabado de alta reflectancia y por último, conocer el comportamiento de la cubierta ventilada cuando la falta de mantenimiento del acabado superficial permitiese la aparición de óxido. De esto modo, establecer límites del comportamiento de la cubierta ventilada a lo largo de la vida útil de su acabado superficial.

Primero con el acabado natural de la lámina galvanizada. Luego aplicando la pintura blanca y por último la rojo óxido. Esto solo en la hoja exterior de las cubiertas ventiladas.

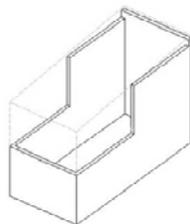
- ***Cubiertas Ventiladas con diferentes inclinaciones.***



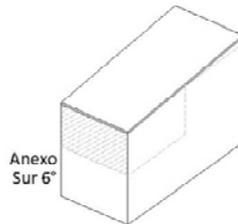
Para evaluar la incidencia de la inclinación de la cubierta ventilada en la disminución de flujo de energía por sobrecalentamiento al interior del espacio, se procedió a realizar un cambio de inclinación de los modelos de cubierta ventilada puestos a prueba.

Uno de los parámetros que se consideraron para el dimensionado de los módulos al momento de realizar el cambio de inclinación de la cubierta fue el volumen de aire interior. Considerando que el aumento de dicha inclinación podría suponer un aumento del volumen de aire, y a fin de no añadir variables que pudieran incidir en los registros de temperatura se debió garantizar la conservación de un mismo volumen de aire interior para todas las pruebas independientemente del grado de inclinación de la cubierta en cuestión. Para lograrlo, se determinó mantener una misma altura promedio lo cual condicionó el diseño de las estructuras portantes de los módulos.

6° inclinación

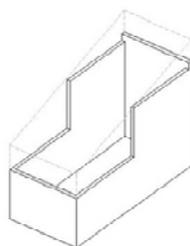


Módulo Base

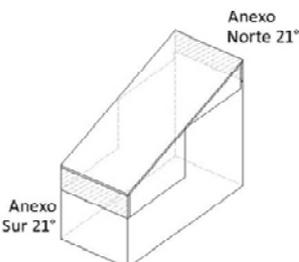


Configuración final

21° inclinación

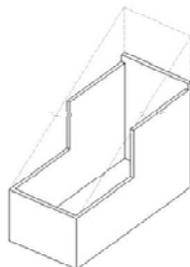


Módulo Base

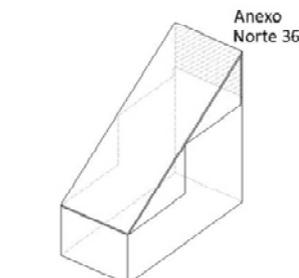


Configuración final

36° inclinación



Módulo Base



Configuración final

El diseño de las estructuras metálicas de los modelos de cubierta ventilada contempló un sistema de ensamblaje que permitiese realizar estas modificaciones de manera rápida y sencilla. Mediante extensiones a las paredes norte, retirando secciones de muro de la pared sur y añadiendo secciones triangulares de los muros laterales fue posible obtener las 3 diferentes inclinaciones de las cubiertas ventiladas a estudiar. Pudiendo regresar en cualquier punto a la configuración anterior. De igual forma, las hojas metálicas de las cubiertas se instalaron sobre bastidores intercambiables. Los cuales variaron en su acabado superficial y en su longitud (resultante del cambio en la inclinación, ya que al aumentar la inclinación aumenta la longitud de la cubierta). Dichos bastidores descansan sobre un eje de rotación de la estructura base, lo cual permitió la adecuada calibración del ángulo de inclinación deseado sin afectar las medidas de referencia del modelo.

El acabado superficial de la hoja externa elegido para este set de pruebas fue el de



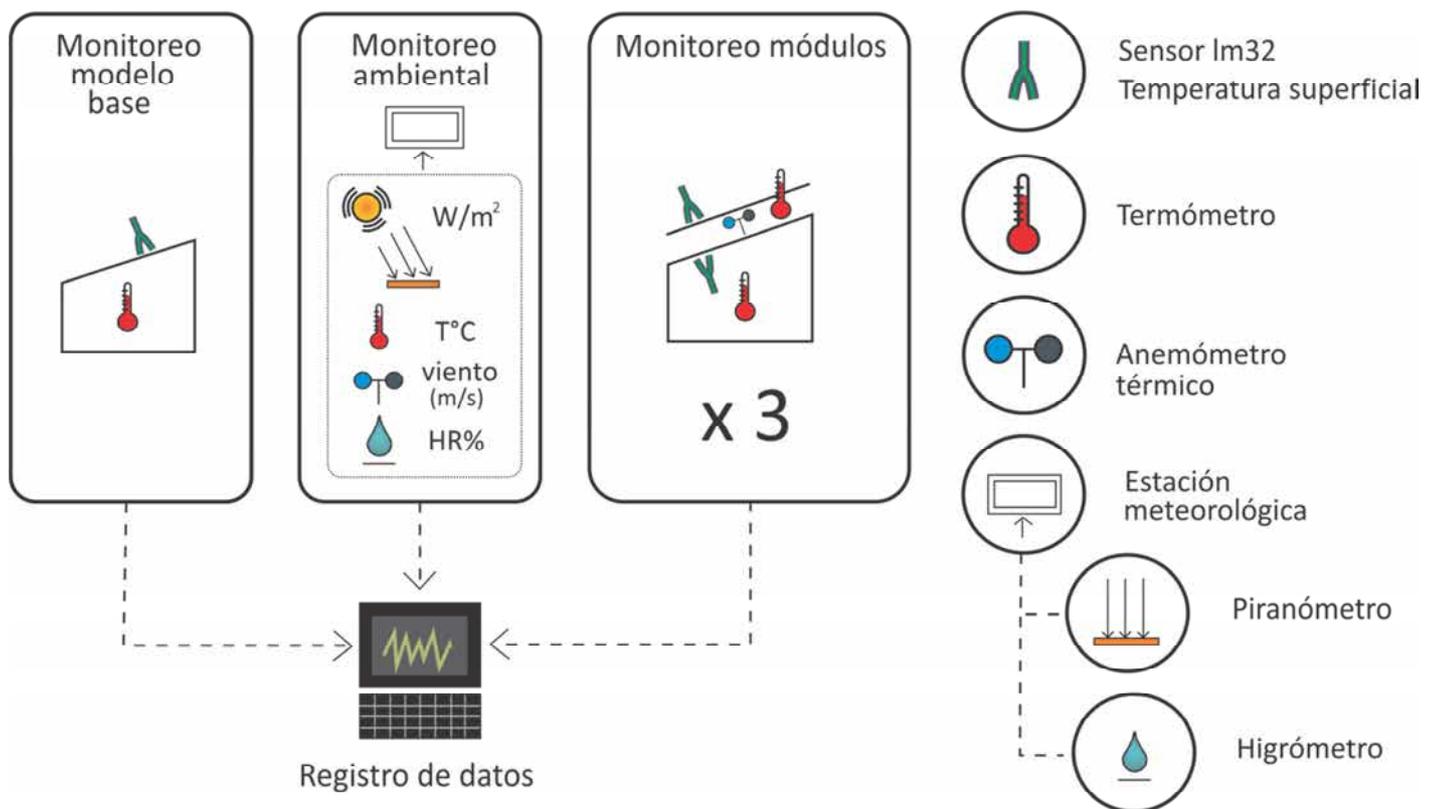
Pintura Rojo Oxido. La razón fue que, sabiendo que un acabado superficial de la cubierta de baja reflectancia solar propiciaría un mayor calentamiento de aire de la cavidad, podríamos conocer la incidencia que una determinada inclinación de la cubierta podría tener en el desalojo de aire caliente de la cavidad por flotabilidad térmica. Y cómo este fenómeno interviene en la disminución tanto de la temperatura superficial de las hojas interior y exterior de la cubierta como del aire al interior del modelo.

La anchura de cavidad seleccionada para este grupo de experimentación se determinó en primer lugar gracias a la información que en estudios previos a cubiertas ventiladas indicaba que una distancia de 10 cms entre las hojas que conforman la cubierta era adecuada para permitir el flujo de aire a lo largo de la cavidad. En segundo lugar, dadas las dimensiones de los modelos de estudio, resultaba técnicamente más viable la configuración de una cavidad de 10 cms en lugar de una de 20.

De cualquier forma, el análisis a los modelos con cavidad de 10 cms a diferentes inclinaciones propone identificar una tendencia en el funcionamiento de las cubiertas, la cual podría coincidir con la tendencia de CV con anchuras de cavidad mayores. No así en las de 5cms, en las que ya se han reportado bajas tasas de movimiento de aire por flotabilidad térmica

De estas tres series de pruebas se obtuvieron los siguientes datos para cada uno de los modelos de cubiertas ventiladas:

1. Temperatura superficial interior de la hoja exterior de la cubierta
2. Temperatura superficial interior de la hoja interior de la cubierta
3. Temperatura del aire de la cavidad ventilada
4. Temperatura del aire interior del espacio cubierto
5. Velocidad del aire al interior de la cámara ventilada



- ***Localización del experimento***

El experimento se encuentra localizado cerca del centro histórico de la ciudad de Villahermosa, Tabasco en México.

La ubicación de los módulos del experimento se realizó en la planta de azotea de un edificio de 2 niveles, para evitar obstrucciones del sol y del viento que pudieran interferir con las mediciones.



El medio urbano en el cual se encuentra localizado el edificio en cuestión es denso pero con construcciones en su mayoría de no más de 2 niveles. Por lo que una ubicación relativa alta de los módulos experimentales con respecto a la edificación en la cual se emplazaron fue suficiente para evitar obstrucciones de viento y radiación que pudieran influir en las mediciones tanto de los módulos como de la estación meteorológica.

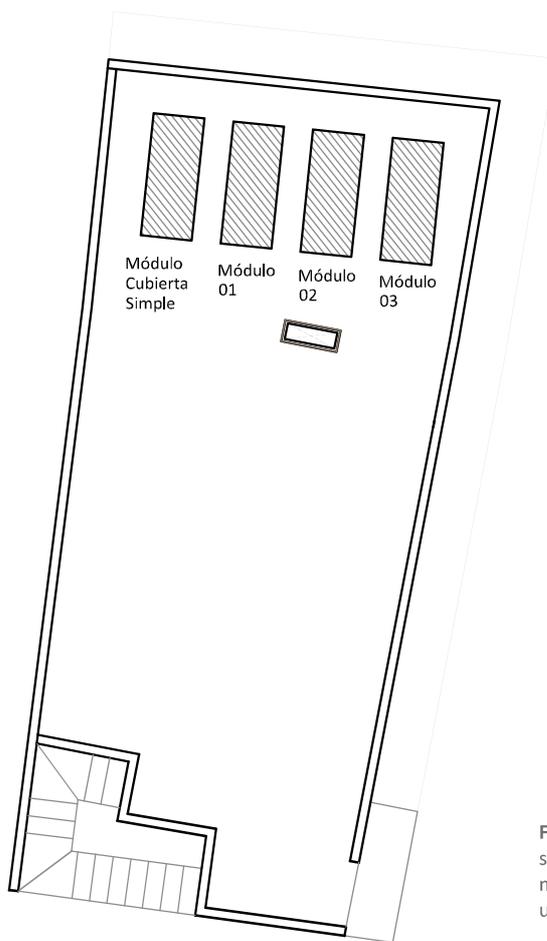


Figura 29: Planta de conjunto del sitio en el cual se instalaron los módulos de Cubiertas Ventiladas utilizadas en el experimento

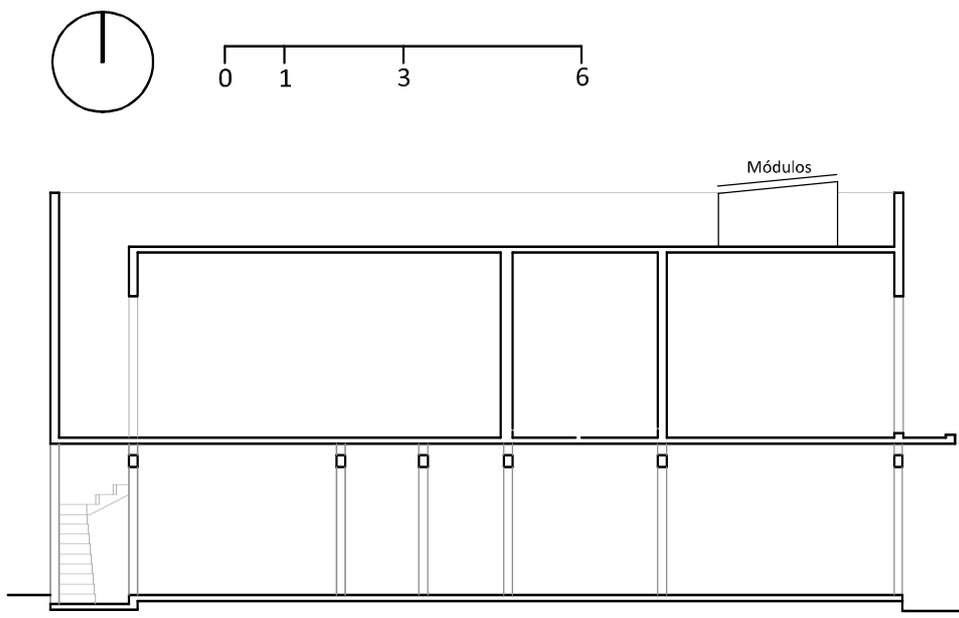


Figura 28: Corte Longitudinal del edificio donde se muestra el sitio en el cual se emplazaron los módulos de Cubiertas Ventiladas utilizados en el experimento.

CAPÍTULO IV

Resultados

4. Resultados

4.1 Selección del día de estudio y criterio de análisis de resultados

Una vez concluido el experimento y habiendo obtenido los registros de varios días de temperaturas de las diferentes partes de los modelos de cubierta ventilada estudiados a lo largo de todas las etapas comprendidas en el experimento. Se procedió a la clasificación de los días de estudio de acuerdo principalmente a la radiación acumulada que presentaron y, en segundo lugar, a la temperatura media de bulbo seco. De esta forma podríamos comparar de manera más homogénea los datos obtenidos de cada set de pruebas y lograr así establecer aquellos parámetros de diseño que tuvieron una menor incidencia en el sobrecalentamiento de los modelos por efectos de la radiación solar.

Para clasificar los días de estudio de acuerdo a la cantidad de radiación solar registrada, se obtuvo la cantidad de energía acumulada a lo largo de todo el día (R_{acum}). De forma similar, para clasificar los días de acuerdo a la temperatura de bulbo seco, se sumaron los registros de temperatura de cada hora del día, obteniendo una temperatura acumulada (T_{acum}).

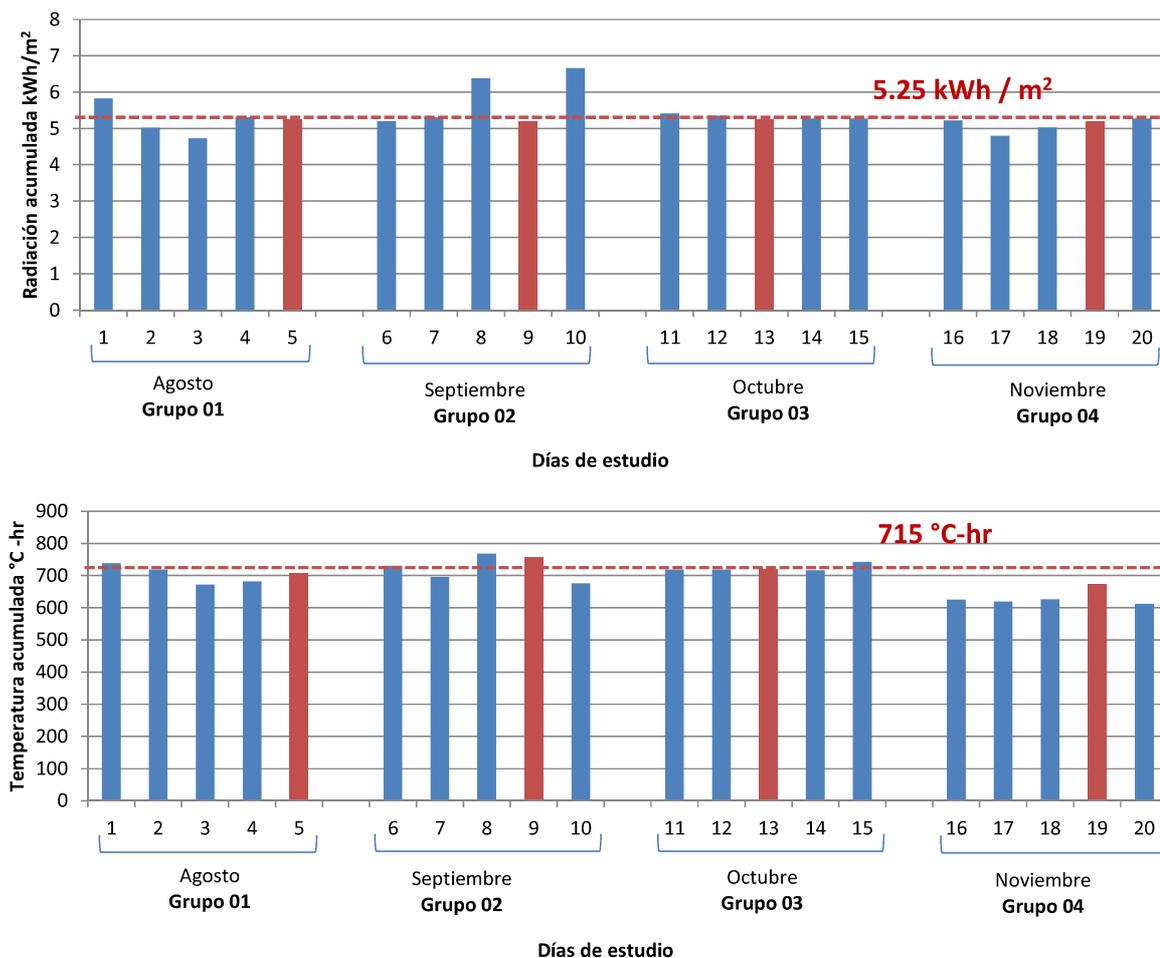
$$R_{acum} \text{ (kWh/m}^2\text{)} = R_{1hrs} + R_{2hrs} + \dots R_{24hrs}$$

$$T_{acum} \text{ (}^\circ\text{C-hr)} = T_{1hrs} + T_{2hrs} + \dots T_{24hrs}$$

Debido a que el experimento completo se llevó a cabo a lo largo de un año, la radiación máxima alcanzada para cada periodo del año fue variando. De manera que un día soleado de verano llegó a alcanzar radiaciones acumuladas de casi 7kWh/m^2 , mientras que un día de invierno ronda los 5kWh/m^2 .

Por este motivo se procedió a identificar la media de radiación acumulada para los días más despejados del periodo con menor radiación, el cual corresponde a los meses de invierno y que es de 5.25 kWh/m^2 . Posteriormente se seleccionaron los días con una radiación cercana a los 5.25 kWh/m^2 de los meses de verano y otoño. De esta forma se obtuvo una muestra lo más homogénea posible de los días a analizar de la totalidad del periodo de mediciones.

Como segundo criterio, una vez identificados los días de acuerdo a su radiación acumulada, se descartaron aquellos con temperaturas acumuladas más alejadas a la media de los días preseleccionados. Obteniendo así sólo un día seleccionado para cada grupo de mediciones.



Gráfica 4: En estas gráficas se muestra el criterio de selección de los días de estudio para el análisis de temperaturas de los modelos medidos. Se seleccionó el día con mayor radiación de noviembre (periodo con menor radiación del estudio) cuya temperatura del aire acumulada fuera más aproximada entre sí.

Habiendo identificado los días de estudio se procedió a graficar las temperaturas de los diferentes puntos de medición de los modelos correspondientes a cada grupo de pruebas. Lo cual permitió observar su comportamiento a lo largo de las 24 horas del día con respecto a la radiación solar y a la temperatura del aire exterior registrada por la estación meteorológica.

Al sobreponer los registros de temperatura de las distintas configuraciones de CV pudimos observar cómo la temperatura de la cubierta ventilada responde al aumentar o disminuir la radiación solar o la temperatura del aire exterior. Además de observar las diferencias que reportaron cada una de las variables de diseño estudiadas (anchura de la cavidad, color del acabado superficial e inclinación) en el comportamiento de dichos registros.

Para comparar el desempeño térmico de los módulos puestos a prueba se vaciaron los registros de temperatura de los diferentes elementos de las CV censados (hojas interior y exterior de la cubierta, aire interior de la cavidad y aire interior del modelo) en gráficos en

donde fue posible observar los cambios de temperatura con respecto a los registros de radiación solar y de temperatura exterior de bulbo seco. De esta forma fue posible observar la incidencia de las variables estudiadas para cada uno de los niveles propuestos. De forma paralela se graficaron las temperaturas superficiales y del aire interior del Modelo Base de cubierta simple, que sirvió de referencia para el análisis de cada uno de los grupos de estudio.

Debido a que las variaciones de la temperatura exterior del aire con respecto a las temperaturas alcanzadas por los diferentes elementos de los modelos de cubiertas no son constantes a lo largo del día, es difícil evaluar el comportamiento de una cubierta frente a otra. Es decir, a primeras horas de la mañana, las diferencias de temperaturas registradas entre ellas son menores, siendo esta diferencia mayor para el medio día.

Es por esto que con el fin de identificar con mayor claridad el nivel de sobrecalentamiento alcanzado por las cubiertas, independientemente de la temperatura de bulbo seco del día de estudio, se optó por realizar un análisis del incremento de la temperatura de los diferentes puntos de medición con respecto a la temperatura del aire exterior.

De esta forma, pudimos determinar cuál de las configuraciones de CV logró un menor aumento de su temperatura a lo largo del día independientemente de sus registros máximos y mínimos. Esto debido a que, como se explicó con anterioridad, dependiendo de la hora del día observada esta diferencia puede no ser evidente, e incluso, por las noches, el comportamiento térmico de un módulo de CV puede invertirse con respecto a la de algún otro de los módulos del experimento.

Otra razón por la que resulta útil evaluar el nivel de sobrecalentamiento de los modelos estudiados con respecto a la temperatura exterior del aire, es que, a diferencia de las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el experimento, donde el espacio interior tiene una ventilación prácticamente nula, en una edificación naturalmente ventilada, la temperatura del aire exterior se igualaría en gran medida con la del aire interior [3]. Con lo cual, aun logrando eliminar el sobrecalentamiento de la cubierta, ésta podría sólo llegar a tener la misma temperatura que el aire exterior.

Obteniendo el promedio de la temperatura de los modelos alcanzada para cada hora del día (\bar{T}_i) y sustrayendo el promedio de la temperatura de bulbo seco de la hora en cuestión (\bar{T}_{ai}) obtendremos el nivel de sobrecalentamiento del punto de medición estudiado (ΔT_i). Si luego realizamos la sumatoria de esta resta, obtendremos el nivel de sobrecalentamiento alcanzado en el día de estudio ($\Delta \Sigma T_i$) para cada módulo de CV estudiado.

$$\Delta T_i = \bar{T}_i - \bar{T}_{ai}$$

$$\Delta\Sigma T_i = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \dots \Delta T_n \quad \therefore$$

$$\Delta\Sigma T_i = \Sigma T_i - \Sigma T_{ai}$$

De esta forma fue posible no solo identificar las configuraciones de cubierta que obtuvieron un mejor desempeño, sino además, encontrar aquellos periodos del día que presentaron los mayores grados de sobrecalentamiento o, en el caso opuesto, de enfriamiento con respecto a la temperatura exterior de bulbo seco.

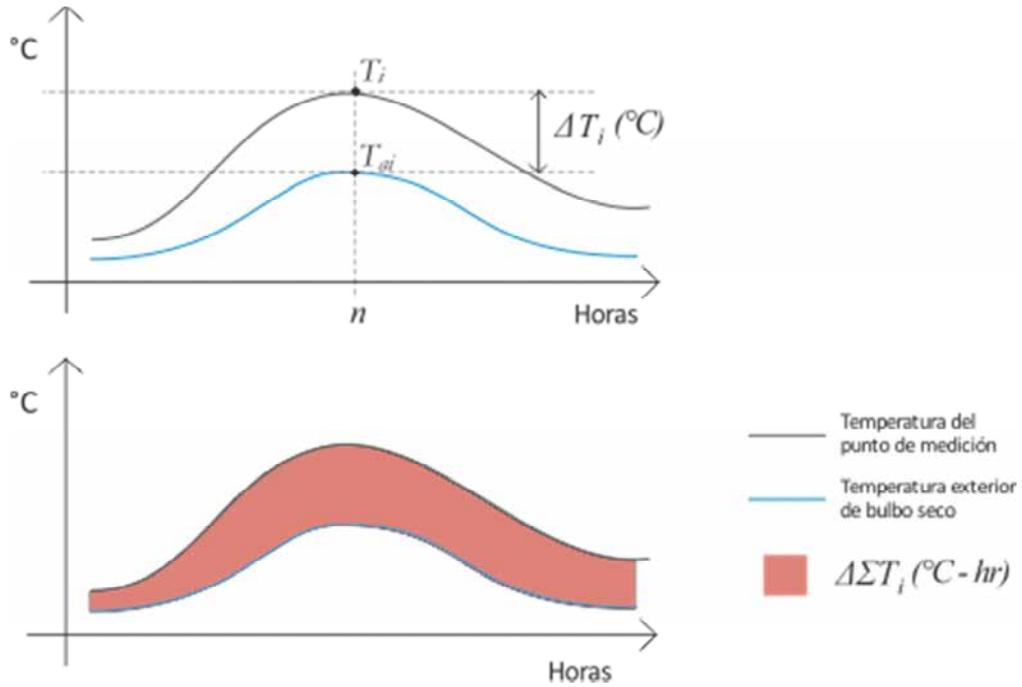


Figura 30: El área comprendida entre las curvas de los registros de temperatura del aire exterior y de la cubierta ventilada metálica representa el sobrecalentamiento de la cubierta sobre la temperatura del aire exterior en °C-h

4.2 Evaluación de variables de diseño.

El estudio de las repercusiones de la configuración de las variables de diseño en el comportamiento de las cubiertas ventiladas analizadas permitió identificar una diferencia importante entre su comportamiento térmico y el de los movimientos de aire por la cavidad. Por lo que para el análisis de los resultados obtenidos se ha decidido dividir el análisis en dos partes, para tratar con independencia las conclusiones arrojadas en ambos sentidos.

4.2.1 Evaluación de las variables de diseño en el flujo de energía

- ***Anchura de la cavidad ventilada:***

Para evaluar la incidencia de variar la anchura de la cavidad ventilada, es decir, la distancia entre las hojas interior y exterior de la CV. Se procedió a la configuración de tres modelos de CV con anchuras de cavidad de 5, 10 y 20 cms cada una. Y se compararon con el comportamiento del Modelo Base con cubierta metálica de una sola hoja, es decir sin cavidad.

Como resultado de esta variación de la cavidad ventilada pudimos observar una disminución de la temperatura superficial de la hoja interior de CV así como del aire de la cavidad ventilada cuando se amplía la distancia entre las hojas metálicas. Siendo esta diferencia de alrededor de 2° en su punto crítico cada vez que duplicamos la distancia entre las hojas. Es decir, una disminución de hasta 4° C de temperatura superficial de la hoja interior en las horas de mayor radiación entre del modelo de CV de 20 cms con respecto al de 5 cms. Mientras que los registros de temperaturas del aire interior de los modelos no se ven afectados significativamente al modificar esta variable.

En cuanto a la hoja exterior de la cubierta ventilada se pudo observar una relación con la radiación solar muy directa y casi inmediata en el aumento o disminución de su temperatura superficial. Siendo siempre el modelo de 20 cms de cavidad el que mantuvo las temperaturas superficiales más bajas.

Las temperaturas alcanzadas por la cubierta metálica simple fueron de hasta 79°C en los momentos de mayor radiación, que en el día estudiado fueron de 880 w/m². Al crear la cavidad ventilada se observa una muy importante disminución de la temperatura superficial de la hoja interior, que va de los 36°C a los 39 °C de diferencia entre la temperatura superficial alcanzada por la cubierta simple y la superficial máxima registrada por la hoja interior de los modelos de cubierta ventilada de 5 y 20 cms de cavidad respectivamente.

Al configurar la cavidad ventilada, se observa también una disminución considerable en la temperatura superficial de la hoja exterior de las cubiertas ventiladas con respecto a la

hoja única del Modelo Base. Siendo esta disminución de entre 15°C y 20°C para las anchuras de 5 y 20 cms del canal.

En la revisión de las temperaturas acumuladas pudimos observar una disminución de entre el 80 y 90% de sobrecalentamiento de la hoja interior de los modelos de CV con respecto al modelo de CS. Siendo la cavidad de 5 cms la que presentó el mayor nivel de sobrecalentamiento. Sin embargo, las diferencias entre las cavidades de 5, 10 y 20 cms son prácticamente despreciables.

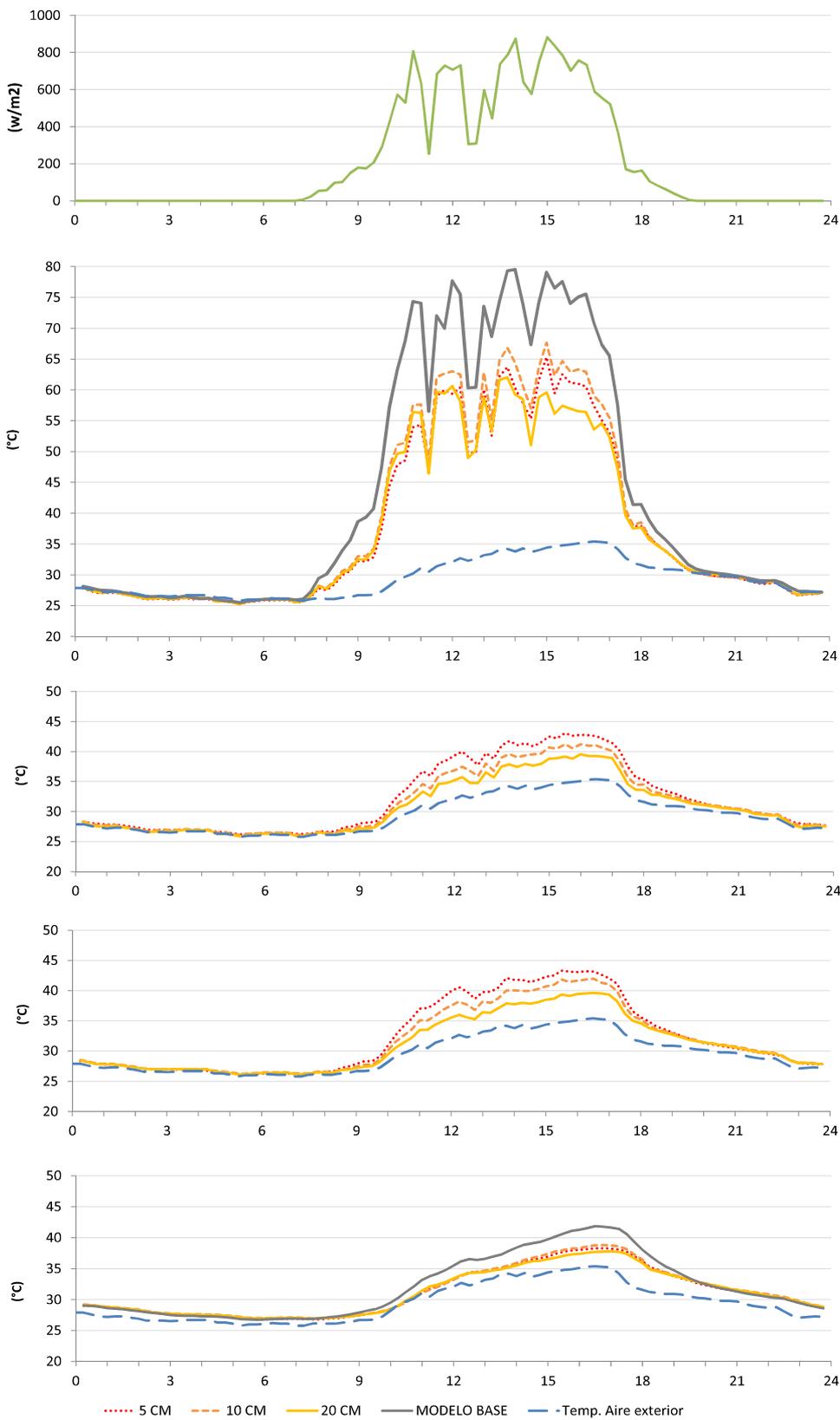
La reducción del sobrecalentamiento del aire interior de los modelos es menos acusada, aunque no menos importante. Encontrando un sobrecalentamiento de entre un 30% y un 35% menor al presentado en CS.

Con lo cual se puede concluir que la configuración de una cubierta ventilada es por si misma muy favorable en la reducción de la temperatura transmitida al interior de los espacios. Y que, aunque la anchura de la cavidad repercute de manera poco importante en esta disminución, se puede considerar una mayor separación de las hojas para obtener un mejor desempeño.

LÁMINAS NATURALES

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

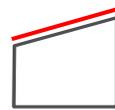
Fecha: 31/08/2015
 Radiación Acumulada: 5.24 kWh/m2
 Temp. Exterior Acumulada: 699 °C-hr



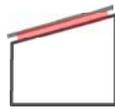
Radiación



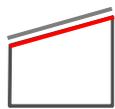
Temperatura hoja exterior



Temperatura aire cavidad



Temperatura hoja interior



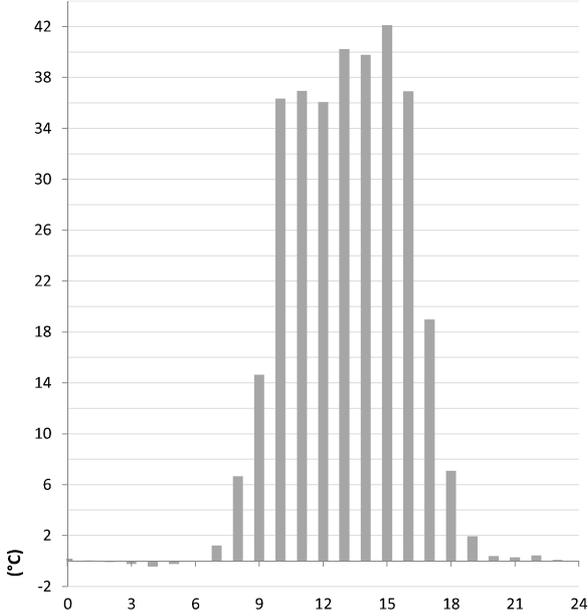
Temperatura aire interior



Gráfica 5: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV naturales. Grupo 01

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
(Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)

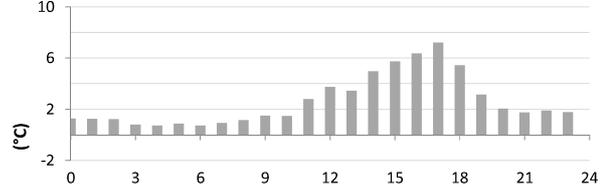
Temp. Sup. Hoja int/ext Cubierta simple



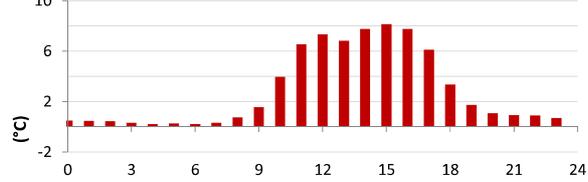
NATURALES

Fecha:	31-ago.-2015
Radiación Acumulada	5.24 kWh/m2
Temp. exterior acumulada:	699 °C-hr

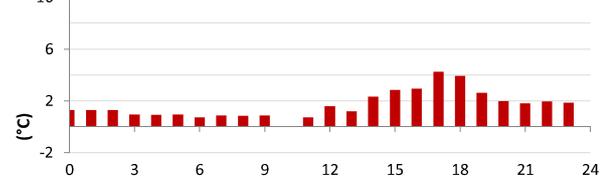
Temp. Aire Interior Cubierta Simple



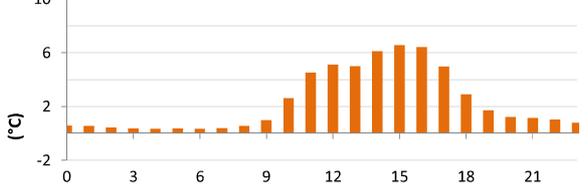
Temp. Sup. Hoja Interior CV 5cm



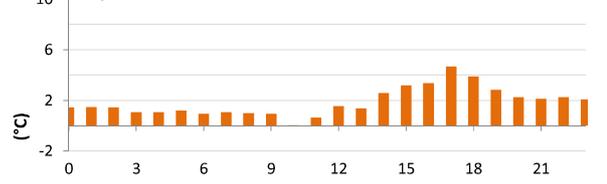
Temp. Aire Interior CV 5cm



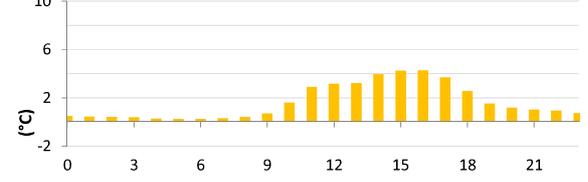
Temp. Sup. Hoja Interior CV 10cm



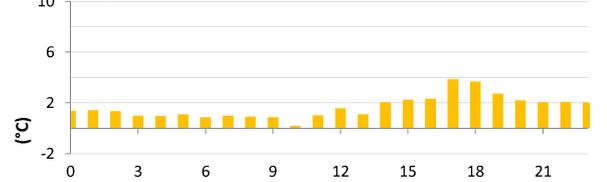
Temp. Aire Interior CV 10cm



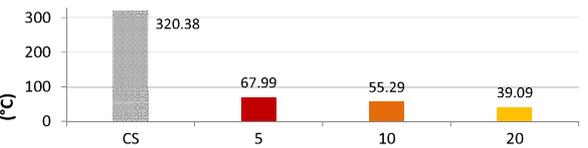
Temp. Sup. Hoja Interior CV 20cm



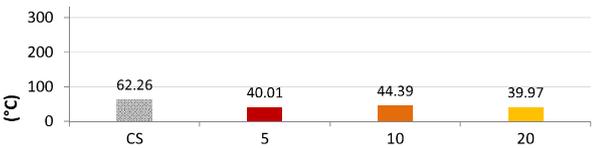
Temp. Aire Interior CV 20cm



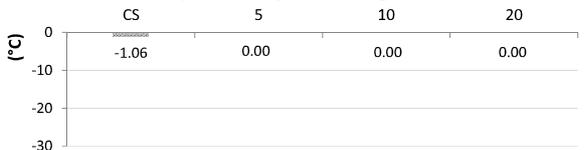
Sumatoria temperaturas superficiales positivas



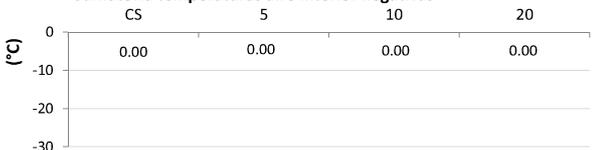
Sumatoria temperaturas aire interior positivas



Sumatoria temperaturas superficiales negativas



Sumatoria temperaturas aire interior negativas



Gráfica 6: Gráficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV naturales. Grupo 01

- ***Acabado de la hoja exterior***

Una vez concluidas las mediciones hechas a las cubiertas ventiladas de 5, 10 y 20 cms de cavidad, con las hojas metálicas naturales, es decir, sin ningún acabado especial, se procedió a aplicar pintura vinil-acrílica blanca a toda la superficie de la hoja metálica exterior de cada uno de los modelos de CV. A excepción del Modelo Base que serviría de referencia en todos los sets de pruebas.

Los resultados de la aplicación de un acabado de alta reflectancia solar son contundentes en cuanto a la disminución del sobrecalentamiento por cubierta. La disminución de la temperatura superficial de la hoja interior de las cubiertas ventiladas con respecto a la temperatura superficial de la cubierta metálica del modelo base fue de alrededor de 45 °C en sus puntos críticos.

La diferencia en la anchura de la cavidad de las cubiertas ventiladas cuando se aplicó la pintura blanca a la hoja externa no afectó en ninguna forma el comportamiento térmico de los modelos. Registrando todos ellos prácticamente las mismas temperaturas en todos los puntos de medición para los modelos de 5, 10 y 20 cms de cavidad.

Además se observó que las temperaturas registradas fueron en general muy cercanas a la temperatura del aire exterior. Siendo la hoja exterior la que más se elevó con solo 6°C por encima de la temperatura del aire exterior. Mientras que el aire de la cavidad de la cubierta así como la hoja interior igualaron sus temperaturas y se elevaron apenas 1.5°C por encima de la temperatura del aire exterior en su cota máxima.

Seguidas de las temperaturas de la hoja exterior, se encuentran las del aire interior de los modelos. Que se elevaron hasta 3.5°C por encima de la temperatura del aire exterior. Cabe destacar que en las mediciones realizadas a las cubiertas ventiladas blancas, se encuentra que la temperatura de la hoja interior es menor casi 1.5°C que la del aire interior de los modelos. A diferencia de las pruebas realizadas con absortancias solares mayores, donde siempre las temperaturas de la hoja interior rebasaron a las del aire interior del modelo. Lo cual significa que, **al aplicar un acabado de baja absorbancia solar a la cubierta ventilada anulamos el efecto de sobrecalentamiento por cubierta del espacio techado.**

Luego de las pruebas a los modelos con las cubiertas pintadas de blanco se procedió a pintarlas con el acabado rojo oxido. Esto para simular la aparición de una pátina de oxidación en las láminas y poder así comprobar su comportamiento al cabo de algunos años de bajo o nulo mantenimiento.

En general se puede decir que el comportamiento de las cubiertas rojas con respecto a las de acabado natural fue el mismo. No se observaron comportamientos diferenciables en

ninguno de los casos por lo que se puede inferir que ambos acabados presentan reflectancias solares muy parecidas.

En cuanto al comportamiento de las temperaturas acumuladas de los modelos se encontró que al aplicar el acabado blanco a la hoja exterior de la CV la disminución del calentamiento de la hoja interior fue del 95% para todas las anchuras de cavidad ventilada. Lo que permite concluir nuevamente que, este parámetro, el de la anchura de la cavidad, no impacta de ninguna forma en el comportamiento térmico de la CV al contar ésta con un acabado de alta reflectancia solar.

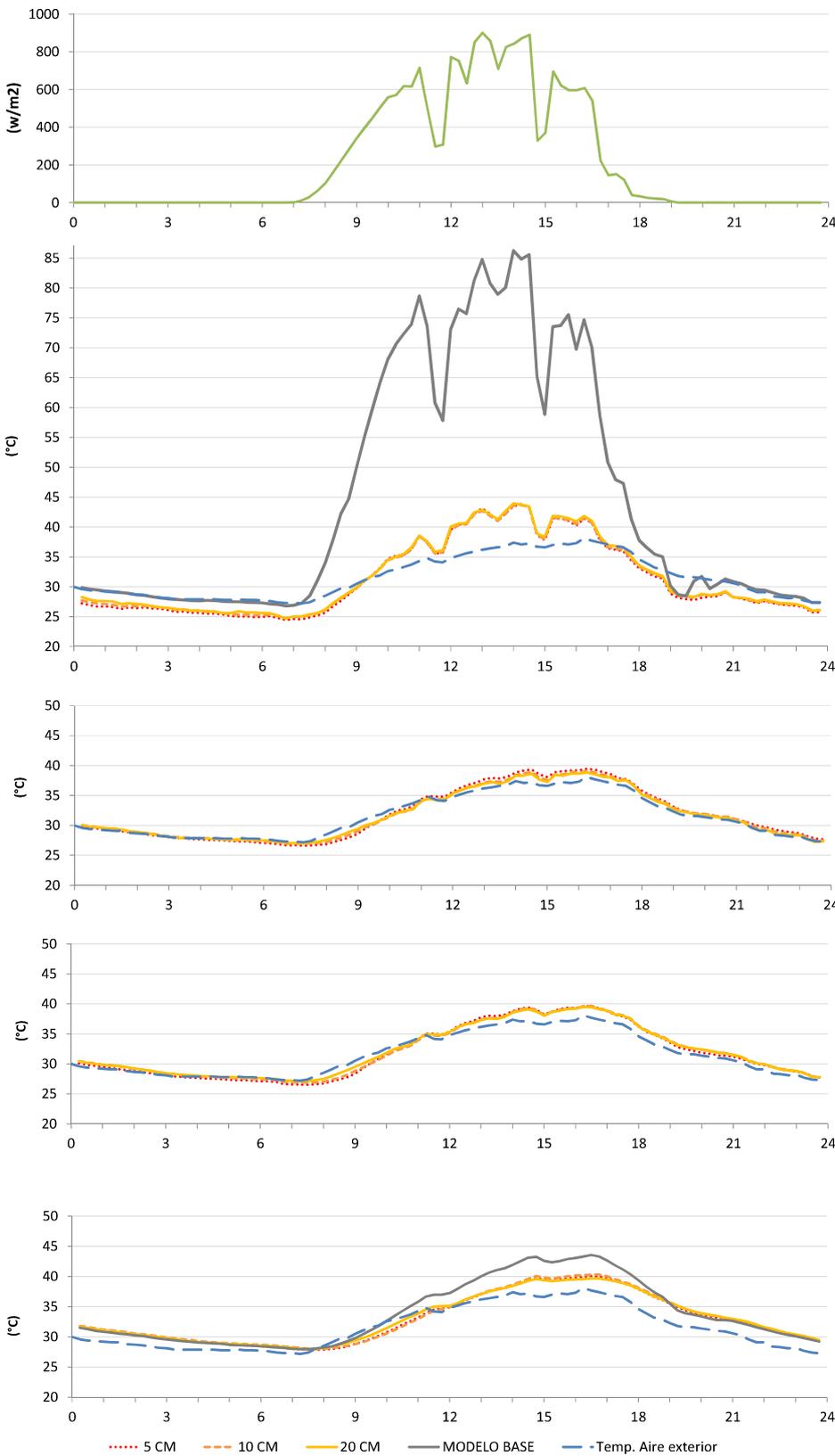
Un resultado interesante fue el de constatar que en el análisis de las temperaturas acumuladas se observa un mayor grado de refrigeración nocturna que de sobrecalentamiento diurno en las CV pintadas de blanco, es decir, el acabado blanco no sólo permite a la cubierta transmitir muy poco calor hacia el interior de espacio, sino que además, permite se lleve a cabo de manera más eficiente la refrigeración radiativa nocturna en comparación con las CV naturales o rojas.

Aun cuando los resultados de la aplicación de un acabado de alta reflectancia reportaron una muy importante disminución de la temperatura superficial de la cubierta, el aire interior de los modelos no se ve afectado en la misma medida, reportándose una temperatura acumulada muy similar en los modelos de CV antes y después de la aplicación de los acabados de la hoja exterior.

LÁMINAS BLANCAS

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

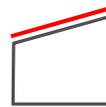
Fecha: 12/09/2015
 Radiación Acumulada: 5.20 kWh/m²
 Temp. Exterior Acumulada: 749 °C-hr



Radiación



Temperatura hoja exterior



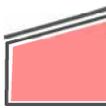
Temperatura aire cavidad



Temperatura hoja interior



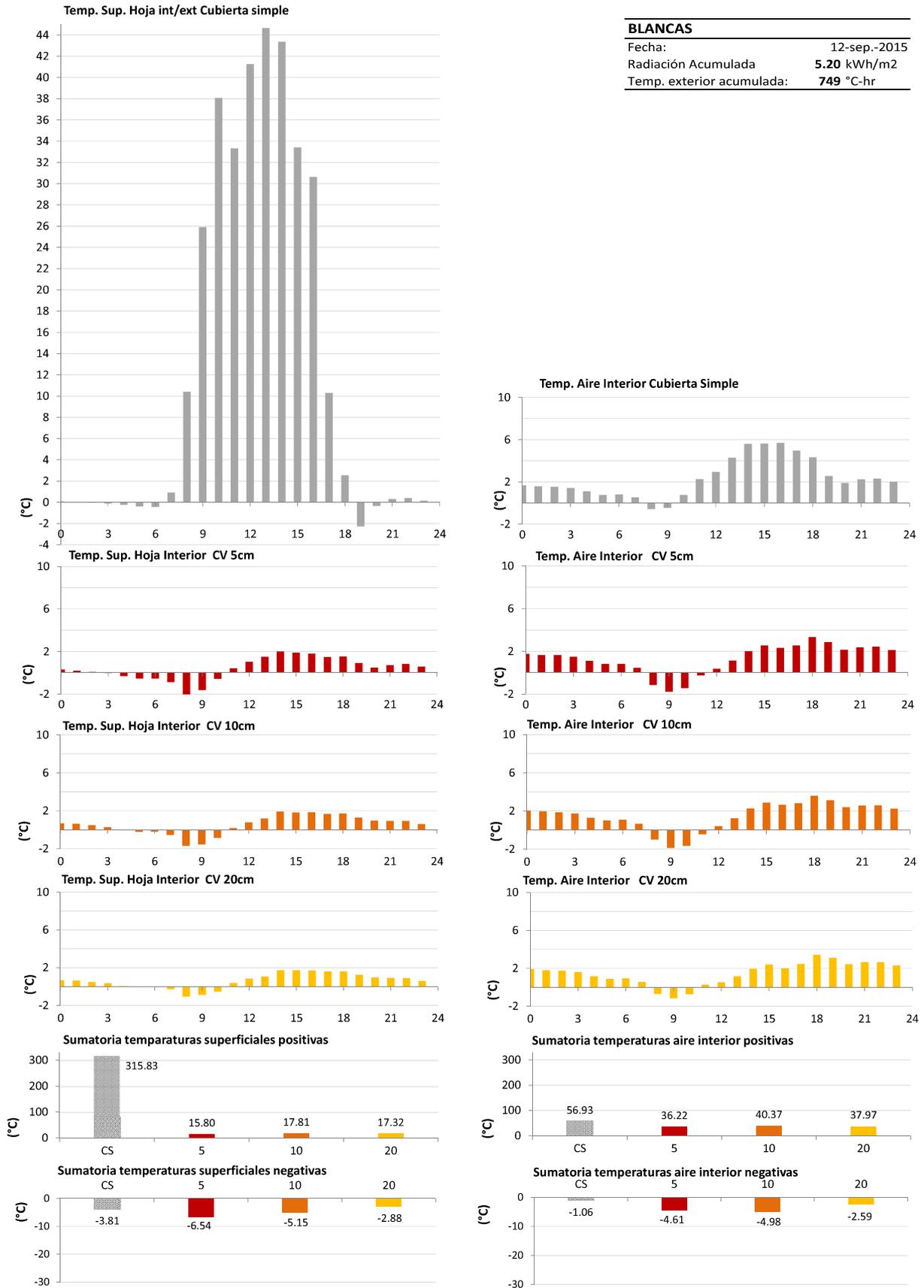
Temperatura aire interior



Gráfica 7: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV Blancas. Grupo 02

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora

(Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)

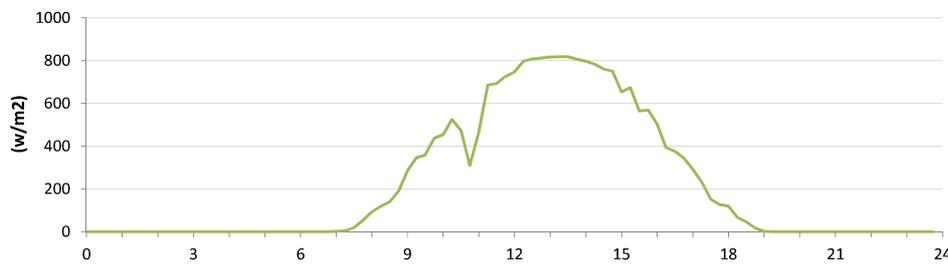


Gráfica 8: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV blancas. Grupo 02

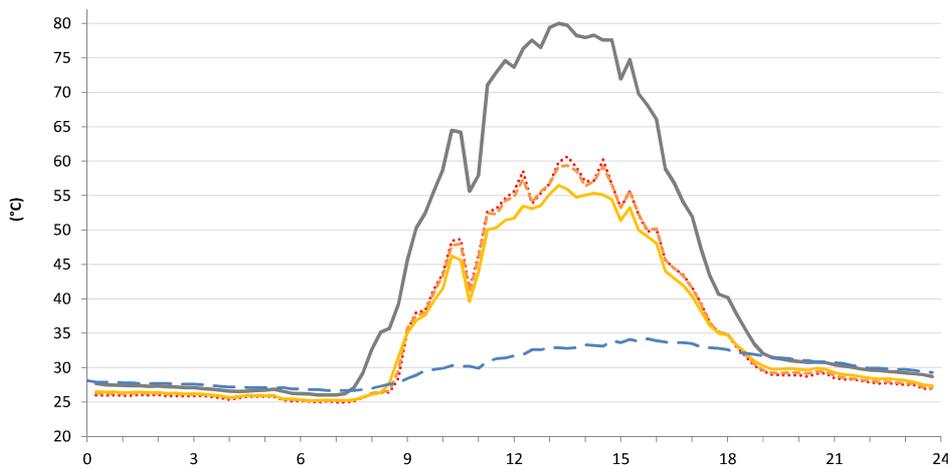
LÁMINAS ROJAS

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

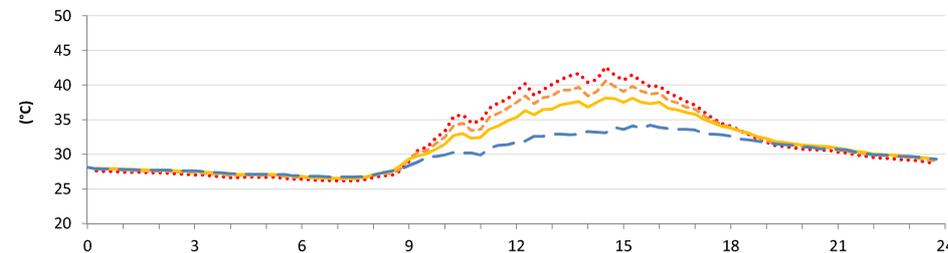
Fecha: 24/10/2015
 Radiación Acumulada: 5.26 kWh/m2
 Temp. Exterior Acumulada: 713 °C-hr



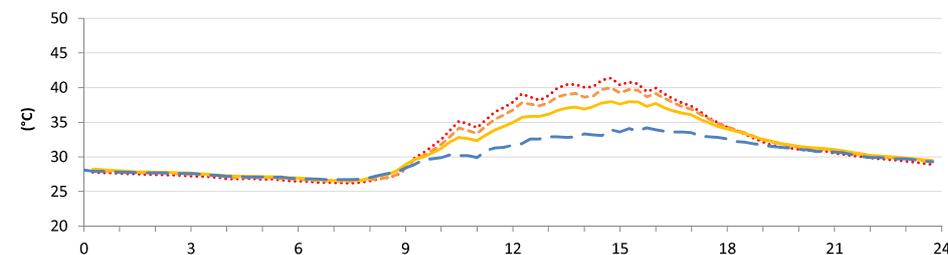
Radiación



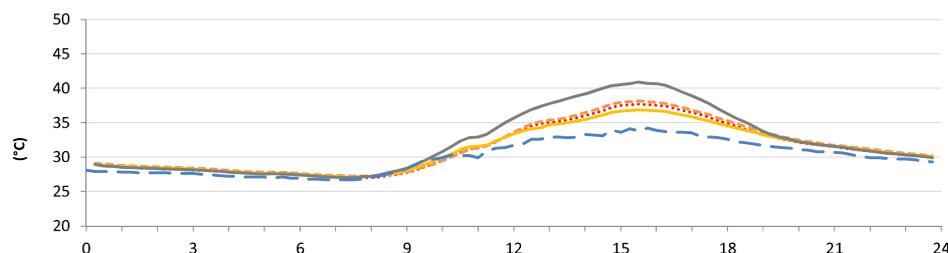
Temperatura hoja exterior



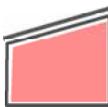
Temperatura aire cavidad



Temperatura hoja interior



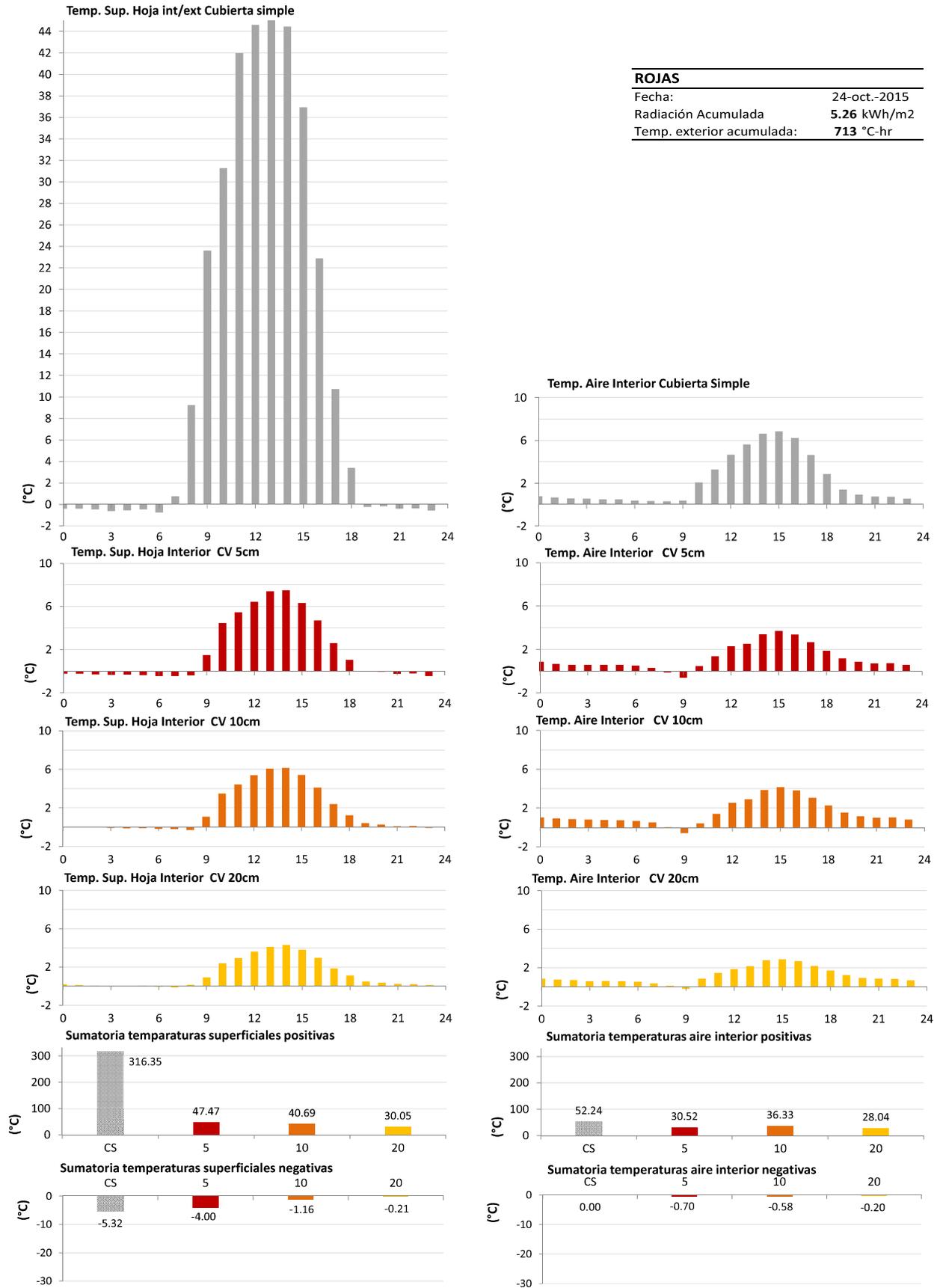
Temperatura aire interior



..... 5 CM - - - 10 CM ——— 20 CM ——— MODELO BASE - - - Temp. Aire exterior

Gráfica 9: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV Rojas. Grupo 03

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
 (Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



Gráfica 10: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV rojas. Grupo 03

- ***Inclinación de la cubierta ventilada***

A continuación se procedió a estudiar el efecto que un aumento en la inclinación de la CV podría tener en la disminución del flujo de energía a través de la misma. El estudio de esta variable se centra en el supuesto de que una mayor inclinación de la cubierta ventilada facilitaría la movilización del aire por flotabilidad térmica y, por lo tanto, permitiría la evacuación más rápida de calor al exterior de la cavidad.

Se procedió a la reconfiguración de dos de los modelos de estudio que permitieran la instalación de las cubiertas a 21° y 36° con 10 cms de separación de las hojas. Uno de los modelos no sufrió modificaciones, ya que conservó su anchura de cavidad e inclinación inicial de 6°.

Al comparar los registros de los modelos a diferentes inclinaciones pudimos observar que es el modelo con 6° de inclinación el que presentó las temperaturas más bajas para la hoja exterior de la cubierta ventilada. Sin embargo, para el resto de los puntos de control, los registros son muy cercanos entre sí en todos los modelos.

Solamente en los periodos de mayor radiación del día de estudio, esto es, al medio día, se observa un ligero aumento de la temperatura para la hoja interior de la cubierta ventilada con 6° de inclinación sobre las cubiertas de 21° y 36°. Siendo esta diferencia de apenas 3°C entre la cubierta más fría, correspondiente a los 36° de inclinación; y la más caliente, correspondiente a los 6° de inclinación. Una vez los valores de radiación solar disminuyen, las temperaturas de los modelos tienden a igualarse.

Una explicación para este fenómeno puede encontrarse en el comportamiento del movimiento del aire al interior de las cavidades, donde se identifica que, el parámetro que más influyó en el aumento de la velocidad del aire por la cavidad fue el de la velocidad del viento exterior. Es decir, una disposición de la cavidad que oponga una menor resistencia a la circulación del viento exterior puede permitirle disipar una mayor cantidad de calor, a diferencia de las cubiertas más inclinadas. Y es sólo cuando la intensidad de la radiación solar es significativamente más intensa (al medio día), cuando este fenómeno es revertido, ya que es precisamente la cubierta menos inclinada, la que recibe la mayor cantidad de radiación solar a la hora en que los rayos del sol inciden de manera más vertical.

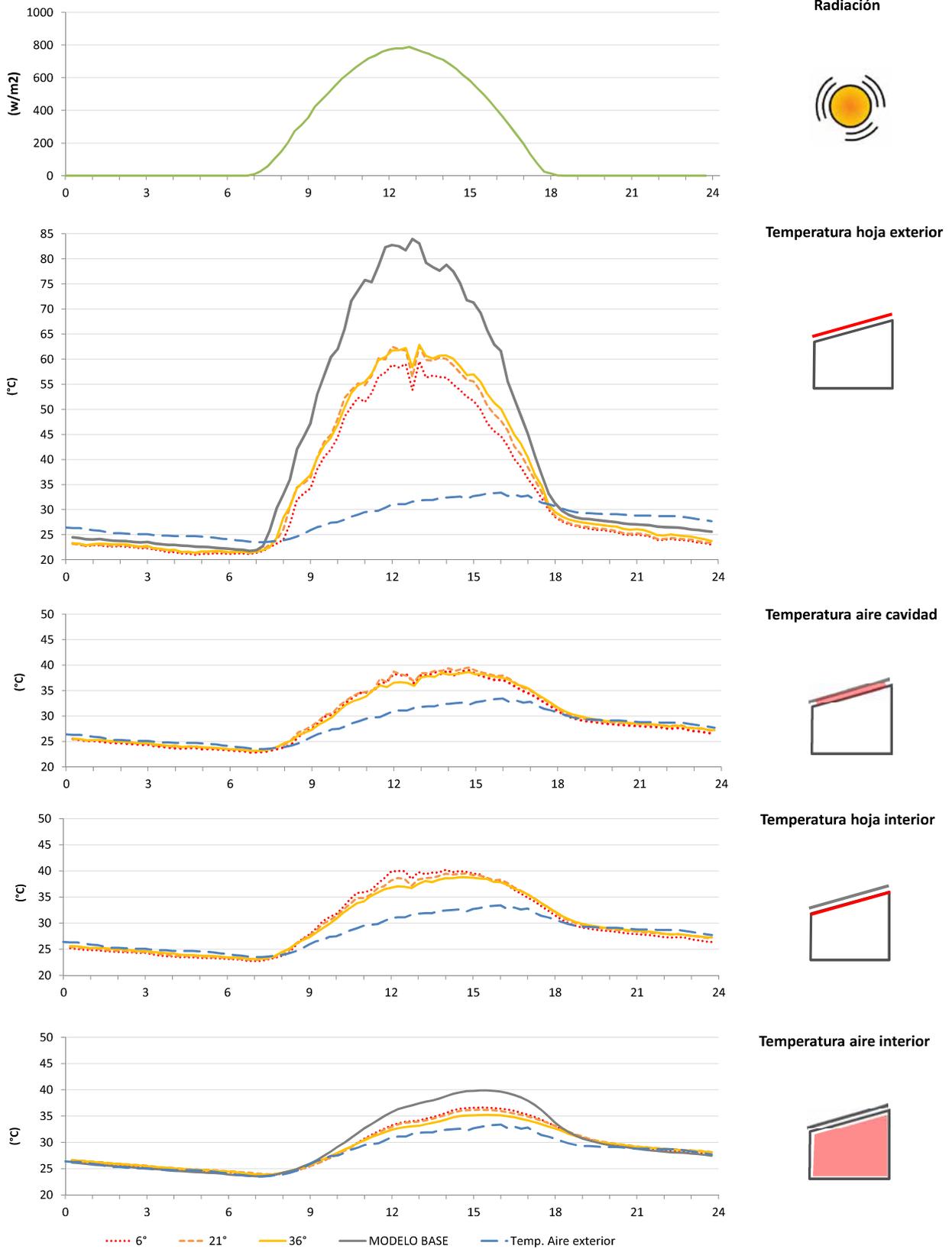
Las temperaturas acumuladas para el día de estudio permiten observar este ligero aumento de la temperatura de la hoja interior de los modelos de la CV con inclinación de 6° con respecto a las más inclinadas. Presentando una diferencia de sólo un 1% entre ellas. De igual forma, las diferentes inclinaciones de las cubiertas no reportaron diferencias significativas en el análisis de las temperaturas acumuladas para el aire interior de los modelos.

Por lo que se puede concluir que los diferentes grados de inclinación de las cubiertas ventiladas, si bien pudieran tener repercusiones sobre las tasas de movimiento de aire de la cavidad, no impactan de manera importante en el comportamiento térmico de la cubierta.

INCLINACIONES

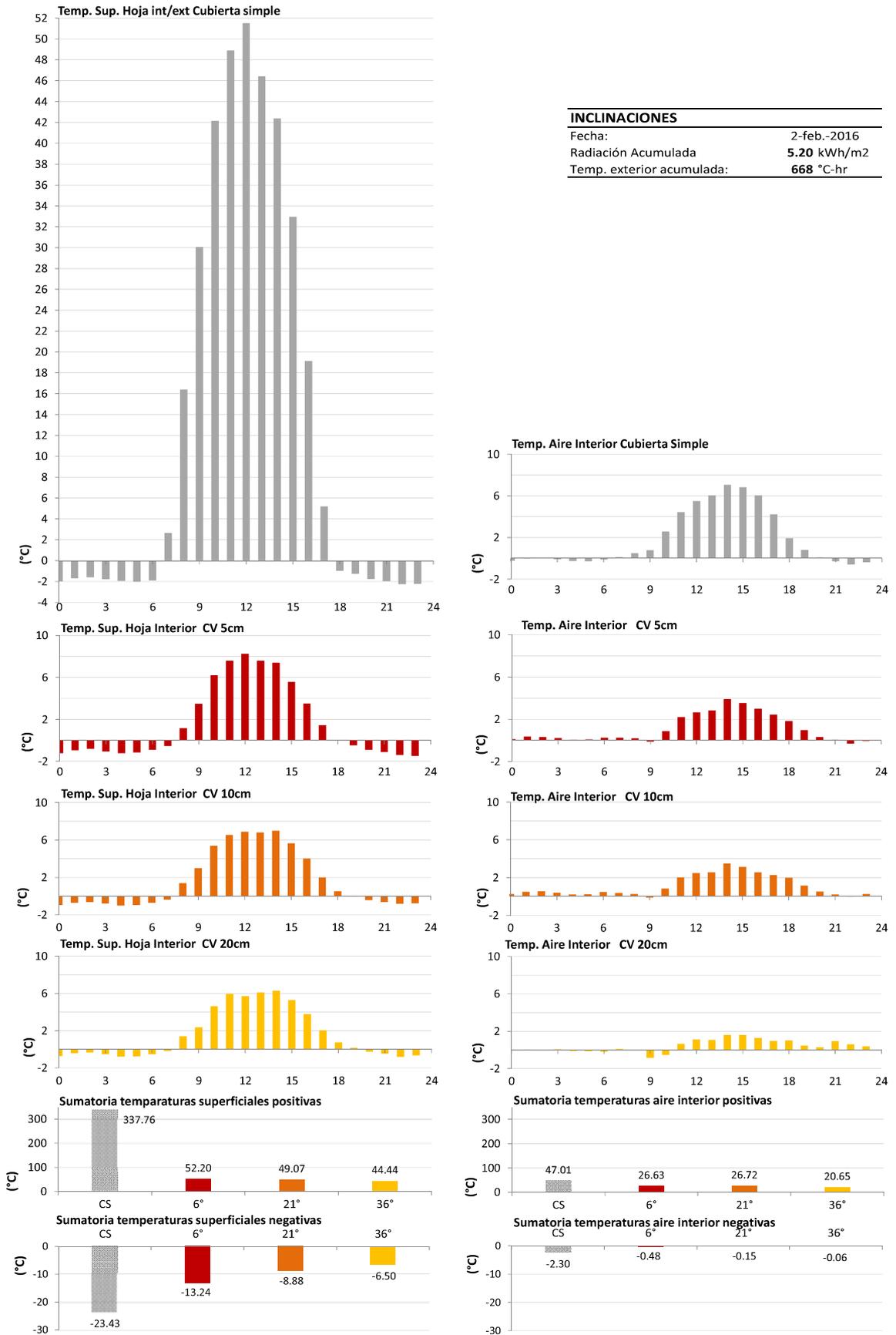
Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

Fecha: 02/02/2016
 Radiación Acumulada: 5.20 kWh/m2
 Temp. Exterior Acumulada: 668 °C-hr



Gráfica 11: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV con diferentes inclinaciones. Grupo 04

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
(Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



Gráfica 12: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV con diferentes inclinaciones. Grupo 04

4.2.2 Evaluación de las variables de diseño y los parámetros ambientales en el flujo de aire por la cavidad ventilada.

Como ya se dijo con anterioridad, uno de los principales objetivos en la creación de la cavidad en los sistemas de cubierta ventilada consiste en la creación de un flujo de aire que recorra el canal y que lleve consigo parte del calor transmitido por convección a través de la cubierta hacia el exterior de la misma. Minimizando así el aumento de la temperatura de la hoja interna de la cubierta, lo cual propiciaría una mejoría en el confort térmico de los espacios cubiertos.

Por esta razón se realizó un estudio a la velocidad del aire alcanzada al interior de las cavidades para cada uno de los modelos analizados a fin de identificar los parámetros de diseño de la cubierta ventilada metálica que propician el desalojo de aire por la cavidad de manera más eficiente.

Dado que las mediciones de la velocidad del aire de la cavidad no se hicieron de manera simultánea, se tomaron muestras de 3 días de estudio para cada uno de los modelos. De este modo podríamos encontrar un rango de velocidad de aire alcanzado para la cavidad de cada caso analizado. Además de la velocidad del aire por la cavidad, se registraron los datos climatológicos de cada día de estudio, esto es: Radiación Solar, Velocidad y Orientación del viento. Esta información se agrupó de acuerdo a la variable analizada en cada etapa del experimento, para así proceder a su análisis. Es decir, para cada modelo de CV analizado se seleccionaron 3 días de mediciones, de manera que para cada grupo de mediciones se seleccionaron 9 días. (Ver **Figura 31**)

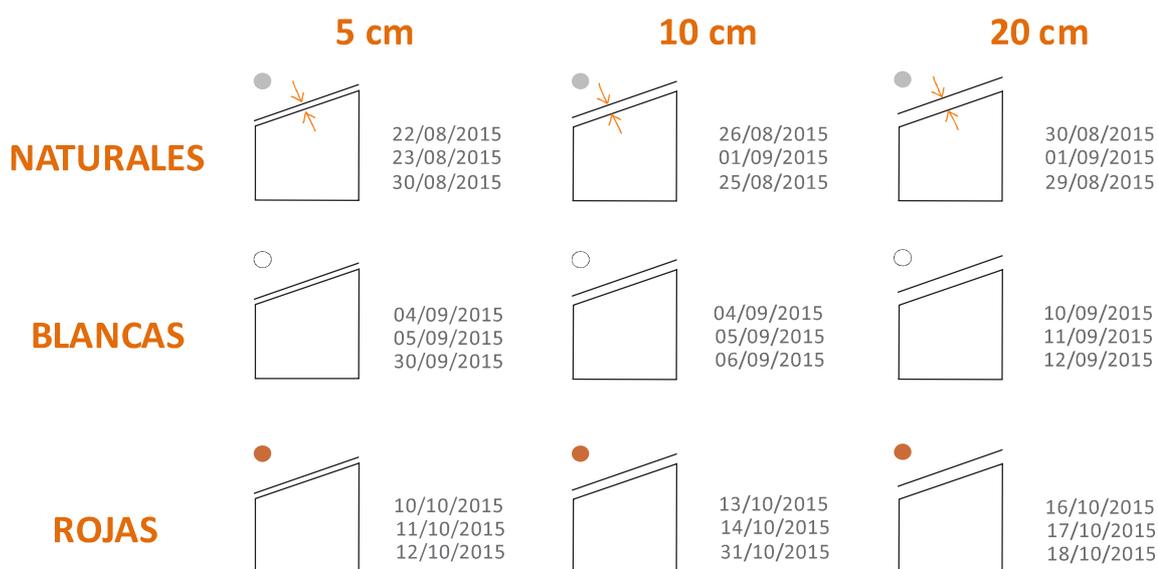


Figura 31: Días de estudio para el análisis de movimientos del aire para cada módulo de CV

A fin de conseguir hacer la comparación de velocidad de aire en el interior de la cubierta fue necesaria la obtención de los siguientes registros: **velocidad de aire de la**

cavidad (VC) - la cual es la velocidad del aire alcanzada al interior de la cavidad -, **velocidad del viento (VV)** - la cual es la velocidad del viento exterior, a lo largo de las 12 horas de radiación solar del día de estudio.

Para este análisis las horas de los días estudiados fueron sólo las que presentaron radiación solar, es decir, de 7:00 a 19:00 hrs. Ya que el análisis del movimiento del aire por la cavidad sin radiación solar no forma parte de este estudio.

Sin embargo, a fin de lograr observar la incidencia que las diferentes configuraciones de las cubiertas ventiladas tuvieron en el aumento de la velocidad del aire de la cavidad para cada caso, era necesario eliminar el factor viento. Ya que es lógico suponer que una elevada velocidad del aire exterior propiciaría una elevada velocidad del aire de la cavidad.

Es por esto que se llevó a cabo un segundo análisis. Con la obtención de un **Factor de penetración del viento por la cavidad** ($f_c = VC/VV$), lo cual no es otra cosa que la proporción del viento exterior que incide en el movimiento del aire dentro de la cubierta. Es decir, considerando que la velocidad del aire dentro de la cavidad nunca llegará a ser mayor a la del viento exterior, si por ejemplo, el registro del viento exterior (VV) es de 1 m/s a una determinada hora del día y la velocidad del aire dentro de la cavidad (VC) logra llegar a 1 m/s en esa misma hora para una configuración de cubierta determinada, quiere decir que esta configuración permite un flujo del aire del 100% con respecto a lo alcanzado por el aire exterior. Obteniendo un $f_c=1$.

Si por otro lado para otra configuración de CV la velocidad dentro de la cavidad (VC) es baja a pesar de velocidades del viento exterior (VV) importantes, el factor de penetración (f_c) será cercano a 0, y por tanto se podrá deducir que esta configuración es menos adecuada para garantizar el flujo de aire por la cavidad.

De modo que un mayor valor de f_c , significaría por un lado, que la configuración puesta a prueba permite una mayor incidencia de la velocidad del viento exterior en la velocidad del aire al interior de la cavidad - y por tanto una mayor eficiencia de las variables del modelo de cubierta ventilada estudiada en el desalojo de aire - y por el otro, una mayor efectividad de las características de la CV estudiada para garantizar el movimiento de aire por flotabilidad térmica.

$$f_c=1, \text{ cuando } VC = VV$$

$$f_c=0, \text{ cuando } VC = 0$$

Otro aspecto a analizar en esta etapa del experimento es el de la incidencia de los vientos dominantes en la velocidad del aire alcanzada al interior de la CV. Ya que los vientos dominantes del sur o del norte, al coincidir con los huecos de entrada o de salida de la cavidad ventilada, podrían potenciar el movimiento del aire a través de la cubierta o, en caso contrario, impedir la salida del aire de la misma. Dicho de otra forma, la magnitud de

VC se ve afectada no solo por la magnitud de VV sino también por la adecuada orientación de la CV a los vientos dominantes.

A fin de evaluar la incidencia de la orientación de los vientos dominantes en el incremento de VC, se procedió a aplicar un factor de orientación (fo) para el valor de VV de cada uno de los registros. Este factor no es otra cosa que la ponderación de la velocidad del viento de acuerdo a su orientación, siendo de 1.00 para las orientaciones Norte y Sur y de 0 para las orientaciones Este y Oeste. De este modo obtuvimos el valor de VVo, es decir, la velocidad del viento ponderada según la orientación Norte-Sur. (Ver **Tabla 1** y **Figura 32**)

$$VV_o = VV (f_o)$$

Orientación		Factorización por orientación
		<i>f_o</i>
Norte	0°	1
Nor - noreste	22.5°	0.92
Noreste	45°	0.71
Este - noreste	67.5°	0.38
Este	90°	0
Este - sureste	112.5°	0.38
Sureste	135°	0.71
Sur - sureste	157.5°	0.92
Sur	180°	1
Sur - suroeste	202.5°	0.92
Suroeste	225°	0.71
Oeste - suroeste	247.5°	0.38
Oeste	270°	0
Oeste - noroeste	292.5°	0.38
Noroeste	315°	0.71
Nor - noroeste	337.5°	0.92

Tabla 1: Valor del factor de ponderación del viento exterior (fo) según su orientación .

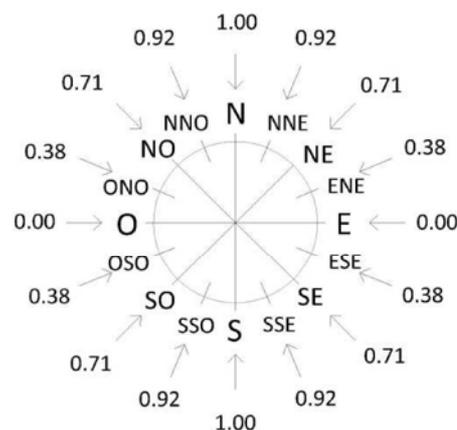


Figura 32: Esquema donde se muestra el valor de fo dependiendo de la procedencia del viento

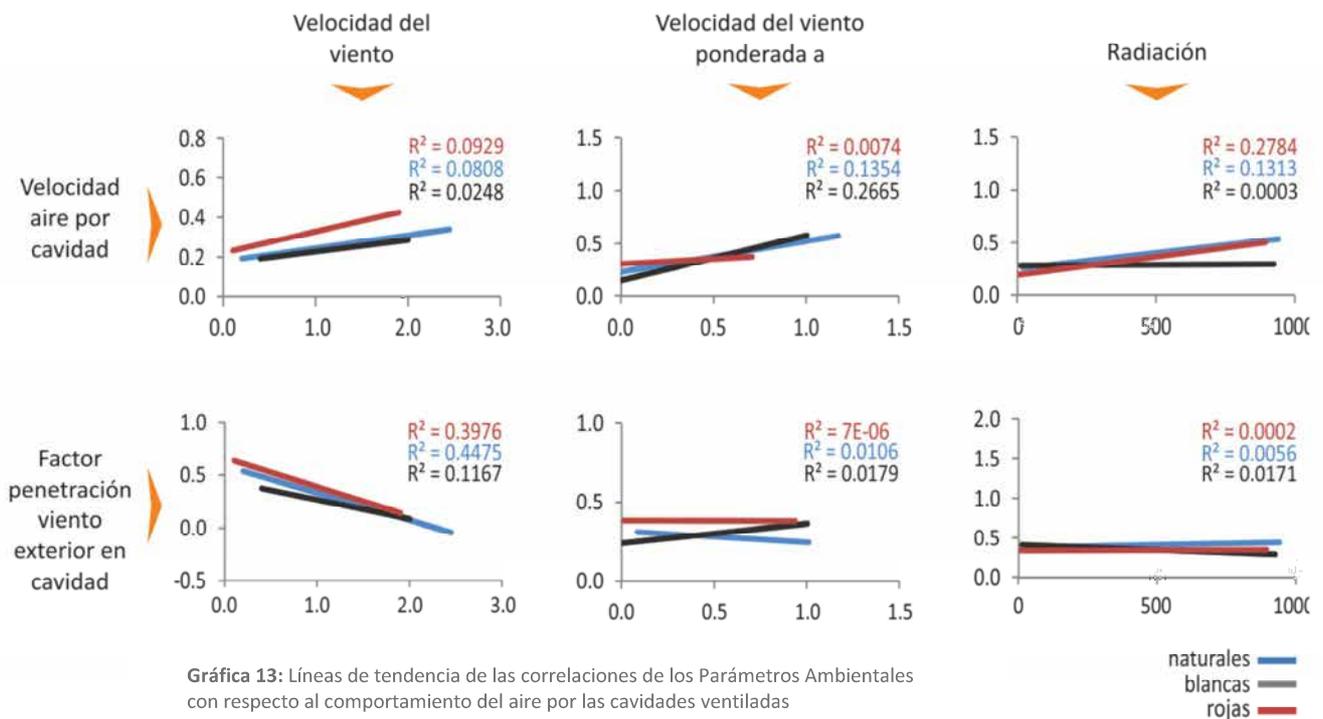
Una vez graficados los valores de VC, VV, f_c y VV_o pudimos observar que la tendencia en el aumento o disminución de la velocidad del aire a través de la cavidad ventilada de la cubierta no responde directamente a la modificación de las variables de diseño puestas a prueba en el experimento sino que son resultado de la conjugación de otros factores como velocidad y orientación del viento.

Para evaluar la incidencia de los parámetros climáticos y de los parámetros de diseño en el aumento de la velocidad del aire desalojado por la cavidad se realizó un análisis correlacional de las variables siguientes: **Tabla 2**

Variables dependientes Y:	Variables independientes X:	Variables independientes X:
	Parámetros ambientales	Parámetros de diseño
Velocidad del aire de CV en m/s VC	Velocidad del viento exterior del día de estudio en m/s VV	Anchura de la cavidad ventilada en cms. A
Factor de penetración del viento exterior en la cavidad ventilada del día de estudio. fc	Velocidad del viento exterior afectada por la orientación de CV en m/s VVO	Reflectancia del acabado superficial VVO
	Radiación en kWh/m2 Rad	Inclinación de la Cubierta Ventilada Rad

Tabla 2: Variables dependientes e independientes del estudio correlacional utilizado en el análisis de los movimientos de aire por las cavidades ventiladas de las CV.

La correlación encontrada de las variables analizadas fue en todos los casos de débil a moderada. Las variables independientes que mostraron una mayor repercusión en la velocidad del aire interior de la cavidad fueron: la velocidad del aire exterior (VV) y la predominancia de los vientos provenientes del norte y del sur (VVo). En contraste, el factor de penetración del viento exterior en la cavidad (fc) presentó una correlación negativa en relación con la velocidad del viento exterior, es decir, una mayor velocidad del viento provoca proporcionalmente, una menor velocidad del aire por la cavidad. (Ver Gráfica 13)

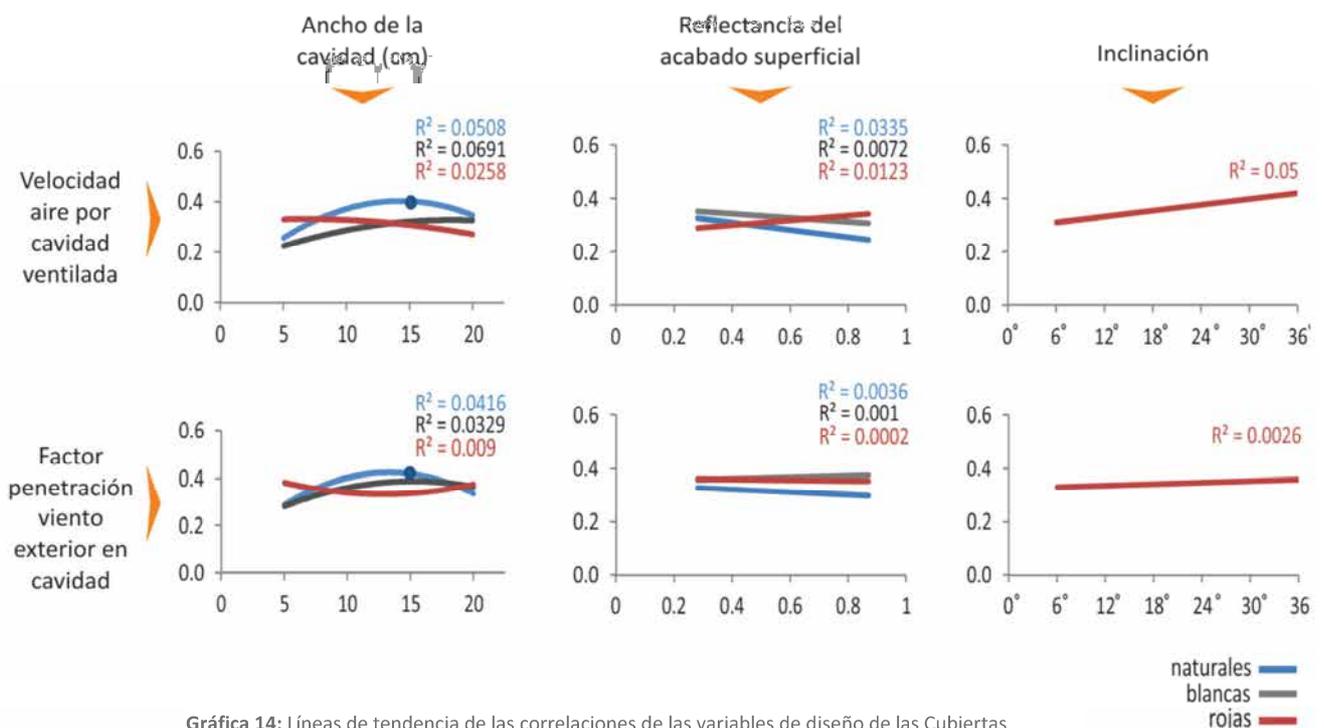


La Radiación total del día de estudio no presentó correlación significativa para ninguna de las variables dependientes. De igual modo, la orientación de las aberturas de entradas y

salidas de las cubiertas ventiladas con respecto a los vientos dominantes no demostraron aumentar la proporción de la velocidad del viento exterior (VV) con relación a la velocidad del aire dentro de las cavidades (VVo).

En cuanto a la repercusión de la anchura de la cavidad (A) en la velocidad del aire al interior (Vc), en la regresión polinomial de segundo grado se pudo observar una tendencia débil que indica que una cavidad de 15 cms registraría velocidades más altas en comparación con las de 5 10 y 20 cms. Del mismo modo, una cavidad de 15 cms provocaría una mayor incidencia de la velocidad del viento en la velocidad de la cavidad (fc)

El grado de inclinación de la cubierta ventilada provocó una mayor tasa de movimiento de aire por la cavidad, aunque la correlación positiva encontrada fue más baja de lo esperado. Con lo que este parámetro de diseño no parece influir de manera importante en el funcionamiento de la cubierta. (Ver **Gráfica 14**)



Gráfica 14: Líneas de tendencia de las correlaciones de las variables de diseño de las Cubiertas Ventiladas con respecto al comportamiento del aire a través de las cavidades ventiladas.

- ***Parámetros ambientales en el movimiento de aire de la cavidad.***

En el análisis de los resultados obtenidos en esta parte del estudio pudimos identificar una repercusión importante de los parámetros ambientales en la velocidad del aire alcanzada en las cavidades ventiladas independientemente de la configuración de las variables de diseño de las cubiertas. Por lo que se decidió abordar el análisis desde ambas perspectivas para tratar así de identificar la preponderancia de los parámetros de diseño frente a los ambientales.

La velocidad del viento exterior así como la orientación relativa de la cubierta a los vientos dominantes demostraron tener las mayores repercusiones en la velocidad de aire por la cavidad ventilada, sin embargo, esta correlación no es fuerte.

De lo observado en los experimentos se puede concluir que **una elevada velocidad del viento exterior produce aumentos en la velocidad del aire por la cavidad de las cubiertas**, no obstante, la proporción entre la velocidad del viento exterior y la del movimiento de aire por la cavidad ventilada es menor en tanto el aumento de la velocidad de aire exterior es mayor. Es decir, el aumento en la velocidad del aire exterior no provoca un aumento proporcional en la velocidad del aire en las cubiertas ventiladas, por lo que, **a mayor velocidad del viento exterior su incidencia en el aumento del aire en las cavidades disminuye.**

Esto se puede deber a que el viento a mayor velocidad provoca mayor turbulencia al interior de las cavidades no permitiendo elevar de manera proporcional la velocidad del aire al interior. Por el contrario, velocidades de viento menores inducen flujos laminares a través de la cavidad, haciendo que su incidencia en el movimiento de aire interior sea mayor.

En cuanto a la orientación de los vientos, sí se observa una correlación de débil a moderada con la velocidad del aire por la cavidad. Pero esta correlación no es mucho mayor a la que se observa con respecto a la velocidad del viento exterior. Por lo tanto, se puede concluir que **la orientación de la cubierta ventilada con respecto a los vientos dominantes sí propicia una mayor ventilación de la cavidad, pero siendo esta correlación poco importante, no será un parámetro decisivo en el diseño de una CV.**

Por otro lado, los niveles de radiación solar no presentaron repercusiones observables en los registros de velocidades de aire por las cavidades ventiladas.

CAPÍTULO V

Otras estrategias de control térmico

5. Otras estrategias de control térmico.

Uno de los objetivos de la presente investigación es la de validar el comportamiento de la cubierta ventilada como estrategia de control térmico mediante la reducción del flujo energético hacia el espacio interior. Y cómo esta estrategia se puede comparar con otras soluciones. Esto con el fin de evaluar la conveniencia de la aplicación de la cubierta ventilada en el diseño de un edificio en particular sobre otras opciones de cubiertas con el mismo fin.

De igual modo, se comparó la configuración de una CV metálica con otras cubiertas ventiladas con las mismas características pero que combinaran algún otro sistema de control térmico. Con lo cual se podría verificar la medida en que su comportamiento térmico pudiera ser mejorado y en qué proporción.

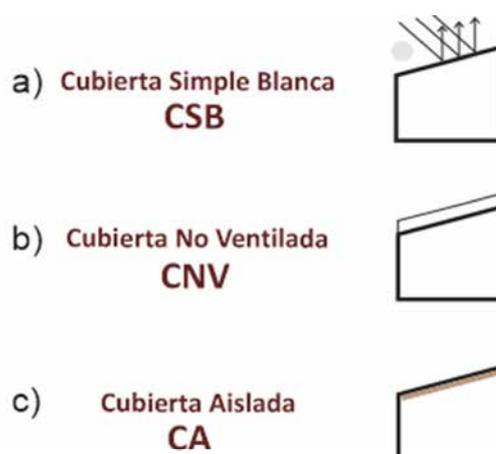
Por esta razón se decidió realizar un estudio adicional, el cual se describe a continuación:

CV vs otras estrategias.

Se sabe de la existencia de otros sistemas de control térmico para cubiertas en climas cálidos especialmente aquellos aplicables a cubiertas metálicas que como ya se ha mencionado es el material que presenta los niveles de sobrecalentamiento más altos causados por una elevada radiación solar. Entre estos sistemas de control térmico se encuentran: **materiales aislantes, barreras radiantes, acabados reflectantes** (Cool Roof), **cámaras de aire y materiales de cambio de fase** (Phase Change Material PCM). En la mayoría de los estudios analizados, se detectó una combinación de uno o más de éstos elementos, por lo que en el presente estudio, se optó por identificar los sistemas compuestos por sólo uno de ellos y cuya aplicación represente una inversión económica similar a la de una cubierta ventilada.

Por lo que en base a la revisión bibliográfica y siguiendo el criterio anteriormente expuesto se

CV vs otras estrategias



CV + otras estrategias



Figura 33: Otras estrategias de control térmico analizadas como alternativa al sistema de cubierta ventilada, o bien, como complemento para aumentar su eficiencia.

identificaron las siguientes estrategias para la reducción del flujo de calor del exterior al interior causado por una elevada radiación solar que podían ser comparadas con el desempeño de la cubierta ventilada:

- a) Acabados de alta reflectancia.
- b) Configuración de una cámara de aire no ventilada
- c) Aislamiento interior

CV + otras estrategias.

Además en esta parte del estudio se propone la posibilidad de incluir alguna de las estrategias antes mencionadas para mejorar el desempeño térmico de las cubiertas ventiladas. Para lo cual se estudió el comportamiento de algunos modelos de cubiertas ventiladas en donde estas estrategias fueran incluidas y se contrastaran con el comportamiento de la cubierta ventilada metálica simple.

Dentro de las estrategias a analizar están:

- d) La inclusión de un aislamiento térmico en la hoja interior de la cubierta
- e) La aplicación de un acabado de alta reflectancia (Pintura vinil-acrítica blanca) en la hoja exterior de la cubierta ventilada.

Para el monitoreo del comportamiento térmico de los 5 modelos de cubiertas metálicas antes descritos, se monitorearon las cubiertas mediante una serie de sensores colocados sobre las caras interiores de las láminas y en el interior de los módulos. Una vez obtenidos los registros de temperatura se compararon con el desempeño de la cubierta metálica simple para tener una referencia homogénea.

De esta forma se obtuvieron los registros minuto a minuto de:

- Temperatura superficial de la cara interior (en contacto con el aire interior de los modelos) (**T_{si}**)
- Temperatura del aire interior de los modelos. (**T_{ai}**)
- Temperatura del aire exterior (**T_{ae}**)

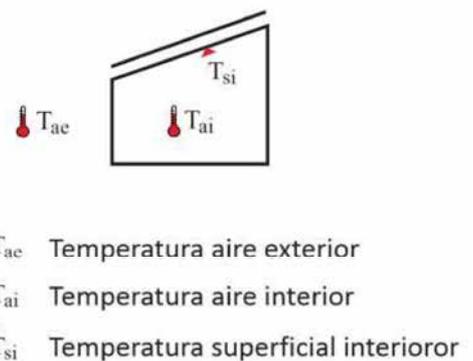


Figura 34: Puntos de medición de los módulos de cubiertas puestos a prueba en la etapa final del experimento: Otras estrategias de control térmico.

Las características del estudio se detallan a continuación:

5.1 Descripción de los módulos evaluados

5.1.1 Cubierta metálica simple con acabado de alta reflectancia

El principio fundamental del acabado de alta reflectancia solar como sistema de control térmico lo constituye su color blanco, ya que éste refleja la mayor parte del espectro solar. Impidiendo a los materiales sobre los que se coloca absorber el calor y transmitirlo al interior de los edificios. En el caso específico de los acabados denominados “Cool Roof”, esta característica se complementa con la alta emisividad de sus materiales (0.90) lo cual le permite también disipar con mayor facilidad el calor que haya alcanzado a absorber.

Las propiedades térmicas de la lámina metálica hacen que su desempeño como cubierta sea el más desfavorable cuando la radiación solar es más intensa, sin embargo, una vez que el sol se ha ocultado, estas mismas propiedades le permiten enfriarse muy rápidamente e incluso llegar a temperaturas menores que las de la temperatura ambiente. Disminuyendo significativamente la temperatura radiante de los espacios que cubre e incluso – luego de varias horas de no existir exposición a la radiación solar- disminuir la temperatura del aire interior.

El uso de un acabado reflectante permitiría entonces amortiguar el incremento de temperatura al medio día, en las horas pico de radiación, y contribuir, gracias a su alta emisividad a la adecuada disipación de calor hacia la bóveda celeste.

Para el desarrollo de esta parte del experimento no se utilizó un acabado “Cool Roof” propiamente, sino una pintura vinil – acrílica blanca. Las diferencias entre una y otra radican por una parte en su composición, ya que los acabados denominados Cool Roof, en teoría, incluyen materiales de una mayor emisividad infrarroja y una mayor reflectancia solar que acabados convencionales del mismo color, y por otra parte en que los CR cuentan con certificaciones que determinan que dichos productos cumplen con las normas establecidas por los consejos correspondientes a sus demarcaciones [43]. Sin embargo, para efectos prácticos, una pintura blanca comercial ronda valores de emisividad de 0.90 y valores de reflectancia solar de 0.80. Con lo que consideramos a este acabado con las características térmicas suficientes como para ser considerado un acabado de alta reflectividad solar.

Para llevar a cabo este análisis se compararon los desempeños de un modelo de cubierta metálica simple (**CS**) con otro de las mismas características pero a cuya superficie exterior se le aplicó un acabado de pintura vinil-acrílica blanca (**CB**), lo cual permitió determinar en qué medida el acabado de alta reflectancia es capaz de impedir el sobrecalentamiento de la hoja metálica a lo largo de un día soleado tipo.

Además, se monitoreó un módulo de **CV** sin acabado en la hoja exterior, a fin de verificar la eficacia de este sistema frente al del módulo de **CB**



Figura 35: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta simple con aplicación de acabado de alta reflectividad.

5.1.2 Cubierta metálica con cámara de aire no ventilada

Como parte del estudio a las cubiertas ventiladas se propone el estudio de una cubierta con cámara de aire no ventilada, lo cual permitirá conocer la verdadera efectividad de la ventilación de la cámara en la disipación de calor por medio del intercambio de aire con el exterior.

Se sabe que la sola presencia de una cámara de aire entre las hojas metálicas que componen el sistema de cubierta es suficiente para impedir en gran medida la transmisión de energía desde su hoja exterior hasta el espacio que cubre. Sin embargo al estar este aire atrapado se propicia una mayor transmisión de calor por convección hacia la hoja interna de la cubierta que cuando la cámara se encuentra ventilada, ya que los propios movimientos convectivos del aire propiciarían la entrada de aire fresco del exterior y la salida por flotabilidad térmica del aire caliente. Sin embargo, gracias a la información bibliográfica se sabe también que este movimiento se ve potenciado al contar con inclinaciones importantes de la cámara.

Dentro de la revisión bibliográfica se encontraron algunos ejemplos en donde se han realizado comparaciones similares. Experimentos en los que diferentes características de una cubierta con ático ventilado se compararon con un ático no ventilado permitieron conocer cuál de ellas impactaba verdaderamente en el movimiento de aire interior y en la disipación de calor al exterior. [23]

De igual forma existe un estudio en donde se compara un modelo analítico de cubierta ventilada con cavidad de 10 cms e inclinación de 15° con otro de cubierta no ventilada de las mismas características. En él se comprueba que la ventilación de la cubierta disminuye considerablemente el flujo de energía a través de la misma [29].

Para casos de edificaciones donde inclinar la techumbre no sea una opción viable, resulta importante conocer el desempeño de una cubierta metálica ventilada con una inclinación mínima contra una cubierta no ventilada para saber si efectivamente el intercambio de aire en la cubierta ventilada se refleja en una disipación de energía relevante para considerar conservar o no la ventilación de la cámara interior.

La presencia de una cámara ventilada en la cubierta metálica conlleva algunos inconvenientes técnicos como son el de trasladar la permeabilidad de la hoja exterior a la interior. El mantenimiento de la cubierta también se ve comprometido al estar esta cámara poco accesible para realizar trabajos de limpieza e impermeabilización, o simplemente para verificar el estado de las láminas interiores.

Por otro lado la configuración de una cámara de aire entre las láminas metálicas implica la presencia de una estructura interior, la cual, dependiendo de las dimensiones del

tablero que se trate, podría significar una disposición de los elementos estructurales que impidieran la adecuada evacuación del aire por flotabilidad térmica.

Por todas estas razones y otras que pudiéramos estar omitiendo, la presencia de una cámara ventilada puede resultar en la complicación del diseño de la cubierta y en el aumento de los gastos de construcción y mantenimiento.

Con lo cual, verificar el beneficio térmico que la implementación de una cámara ventilada en un sistema de cubierta metálica tiene para disipar calor por efectos de una elevada radiación solar resulta de gran utilidad.

En la realización de esta parte del análisis fue necesario registrar tanto la temperatura interior del aire como la temperatura superficial de la cara interior de dos modelos de cubiertas: uno ventilado (**CV**) y uno no ventilado (**CNV**). Ambos con cavidades de 10 cms e inclinación de la techumbre de 6°. Estando la hoja metálica exterior sin acabado adicional.



Figura 36: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta metálica con cámara de aire no ventilada

Simultáneamente se registraron las temperaturas del modelo base de cubierta de una sola hoja (**CS**) para conservar la referencia del comportamiento térmico menos eficiente de todos los modelos.

5.1.3 Cubierta metálica con aislamiento interior

En la comparación del desempeño térmico de la cubierta ventilada frente a otras estrategias de refrigeración se encuentra esta última parte del estudio. Con este análisis se pretende conocer la repercusión térmica de reemplazar la cámara ventilada con el de un aislamiento térmico interior. Considerando que esta última pudiera dificultar el mantenimiento y/o elevar el costo de la cubierta en general.

Sin embargo, se sabe que la implementación de un aislamiento térmico, dependiendo de la naturaleza del mismo, así como del espesor a utilizar, puede tener repercusiones no solo en el costo económico de la cubierta sino también en su costo ambiental. Es por esto que consideramos que la opción de instalar un aislamiento térmico de bajo impacto ambiental y económico puede resultar más conveniente que la creación de una cubierta ventilada.

Además, la rehabilitación de edificaciones que ya cuenten con una cubierta metálica puede simplificarse implementando sólo un aislamiento en lugar de habilitando una segunda hoja metálica, que, al ser más pesada, requeriría de un posible reforzamiento de la estructura del techado.

El uso de aislamientos en los cerramientos deja la posibilidad de hacer cálculos bastante precisos del espesor necesario para lograr tal o cual nivel de resistencia térmica, sin embargo, en este análisis se propone la puesta a prueba de una cubierta metálica con una sola hoja de poliestireno extruido de 3/4" (la más delgada de su tipo en el mercado), con lo cual se propone la implementación de un aislamiento económico y de fácil instalación bajo la hoja metálica.

Los modelos puestos a prueba fueron dos: el de la cubierta ventilada metálica de 10 cms son inclinación de 6° (CV) y otra similar de una sola hoja con aislamiento interior de poliestireno extruido de 3/4" (CA). De los cuales se registraron sus temperaturas de aire interior, así como la temperatura superficial alcanzada en la cara interna de ambas cubiertas. Teniendo siempre como referencia el registro de los mismos puntos de medición del modelos de cubierta metálica simple (CS)

Este análisis servirá solo de referencia, ya que la comprobación del comportamiento de los diferentes tipos de aislamientos térmicos no forma parte de los alcances de este estudio.



Figura 37: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta metálica de una sola hoja con instalación de aislamiento interior.

5.1.4 Cubierta Ventilada con aislamiento interior

Para esta parte del análisis se configuraron dos modelos de cubierta ventilada, a uno de los cuales se le colocó un aislamiento de poliestireno extruido de $\frac{3}{4}$ " sobre la cara interna de la hoja inferior de la cubierta ventilada (**CVA**). Considerando que es ésta la posición más favorable en la disminución de flujo de energía al interior del espacio a cubrir [28].

Se realizaron los registros de temperatura superficial de la hoja interior y de temperatura del aire interior de ambos modelos para poder determinar en qué medida la instalación de un aislamiento puede mejorar el comportamiento térmico de la cubierta ventilada. Y se contrastaron a su vez con el comportamiento de un modelo de cubierta metálica simple (de una sola hoja) (**CS**)



Figura 38: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta ventilada metálica con instalación de aislamiento interior.

5.1.5 Cubierta Ventilada con acabado de alta reflectancia solar

Aun cuando en la bibliografía se ha encontrado registrado que la aplicación de un acabado de alta reflectancia solar no favorece a los movimientos del aire interno de la cavidad ventilada por flotabilidad térmica [23], es importante determinar en qué medida puede ayudar en la disminución de la temperatura superficial de la hoja interna de la cubierta ventilada.

Un acabado de alta reflectancia no permite que el aire interior de la cavidad aumente su temperatura. De tal manera que la diferencia de densidad del aire no llega a ser suficiente para provocar el movimiento de aire por flotabilidad térmica a través de la cubierta ventilada. Sin embargo, aun cuando la disipación de calor por efecto de la ventilación de la cámara no se lleve a cabo, estaremos garantizando una menor captación de energía de la hoja exterior y con ello, una menor transmisión de calor al interior del espacio cubierto.

Con lo cual, al hacer este análisis podremos conocer la efectividad de la disipación de energía que se lleva a cabo a través de la cavidad ventilada y verificar la conveniencia de complementar su diseño con la aplicación de acabados de alta reflectancia solar.



Figura 39: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta ventilada metálica con aplicación de acabado superficial de alta reflectividad para la hoja exterior.

Para ello se registraron las temperaturas superficiales interiores de la hoja interna de la cubierta así como la temperatura del aire interior de dos modelos de cubierta ventilada metálica de 10 cms de cavidad y 6° de inclinación, a uno de los cuales se le aplicó un acabado de pintura vinil-acrílica blanca (CVB).

5.2 Resultados del estudio a otras estrategias de control térmico.

Uno de los objetivos planteados en el presente estudio es el de establecer la efectividad de la cubierta ventilada en la prevención del sobrecalentamiento por causa de elevada radiación solar y su mayor o menor efectividad en comparación con otras estrategias de control térmico. De igual modo se desean conocer las posibilidades de mejoramiento de su capacidad para disipar el calor provocado por una alta radiación solar.

Los resultados de este estudio comparativo permitirán saber la conveniencia de utilizar un sistema de cubierta ventilada sobre otros sistemas que podrían tener mejores resultados, o bien resultar más adecuados desde un punto de vista de diseño o económico. Y, por otro lado, saber si la complementación del sistema con alguna de estas estrategias, es decir, aunadas al sistema de cavidad ventilada, puede mejorar de manera significativa su comportamiento térmico.

Como se describió en el apartado anterior, las estrategias a analizar fueron las siguientes:

- a) Acabados de alta reflectancia solar
- b) Cámaras de aire no ventiladas
- c) Aislamiento térmico interno
- d) Aplicación de un aislante térmico al interior de la hoja interior de CV
- e) Aplicación de un acabado exterior de alta reflectancia en la hoja exterior de la CV

En la observación de los datos recabados se advierte que los registros de temperatura del aire interior de los módulos fueron muy cercanos entre sí, y en varios de los casos la tendencia del comportamiento térmico de la hoja interior de las cubiertas no corresponde con el del aire interior. Por ejemplo, aun cuando la temperatura superficial de la CV registra temperaturas superficiales de su hoja interior menores a las del modelo de CNV, no sucede lo mismo con los registros de temperatura del aire interior, donde el modelo CV observa temperaturas ligeramente mayores a las de CNV.

Considerando que la temperatura del aire interior de los módulos es fácilmente influenciada por su posición con respecto al resto de los elementos circundantes - incluidos los propios módulos - y que la diferencia registrada es prácticamente despreciable; en la evaluación del desempeño térmico de las cubiertas se ha dado prioridad a lo observado en los registros de temperaturas superficiales sobre los de la temperatura del aire.

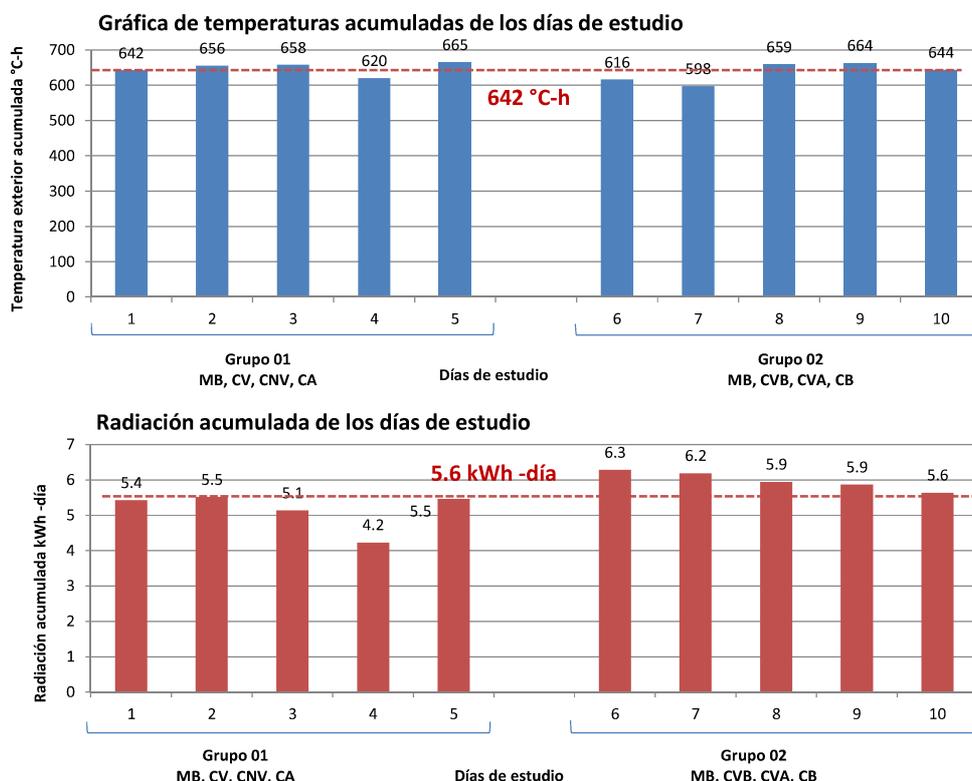
Debido a que, por el número de módulos disponibles no fue posible realizar el monitoreo de los 7 modelos de cubierta necesarios para realizar el estudio de manera simultánea, fue necesario distribuirlos en grupos, obteniendo lecturas de varias semanas.

Es por esto que para el análisis de los datos en esta etapa del estudio, se eligieron días con radiación acumulada cercana a los 5.64 kWh/m² y se registraron las temperaturas superficiales de la hoja interior de las cubiertas así como las del aire interior de los módulos.

Con los registros de temperatura de los diferentes elementos de las cubiertas puestas a prueba se obtuvieron las gráficas de su comportamiento térmico a lo largo de los días de estudio, gracias a las cuales fue posible realizar la lectura correspondiente para determinar su eficacia en el control térmico de los espacios cubiertos así como su comportamiento a lo largo del día.

En una segunda etapa del análisis se procedió a realizar una comparativa de los 5 modelos de cubiertas propuestos de manera simultánea y compararlos a su vez con el desempeño de la CS y la CV

Debido a que los registros de temperaturas obtenidos no corresponden a los mismos días de estudio y para lograr una comparación lo más homogénea posible de los datos se realizó el siguiente procedimiento: Para cada grupo de estudio se eligió una muestra de 5 días en la que los registros tanto de radiación solar como de temperatura exterior de bulbo seco fueran similares.

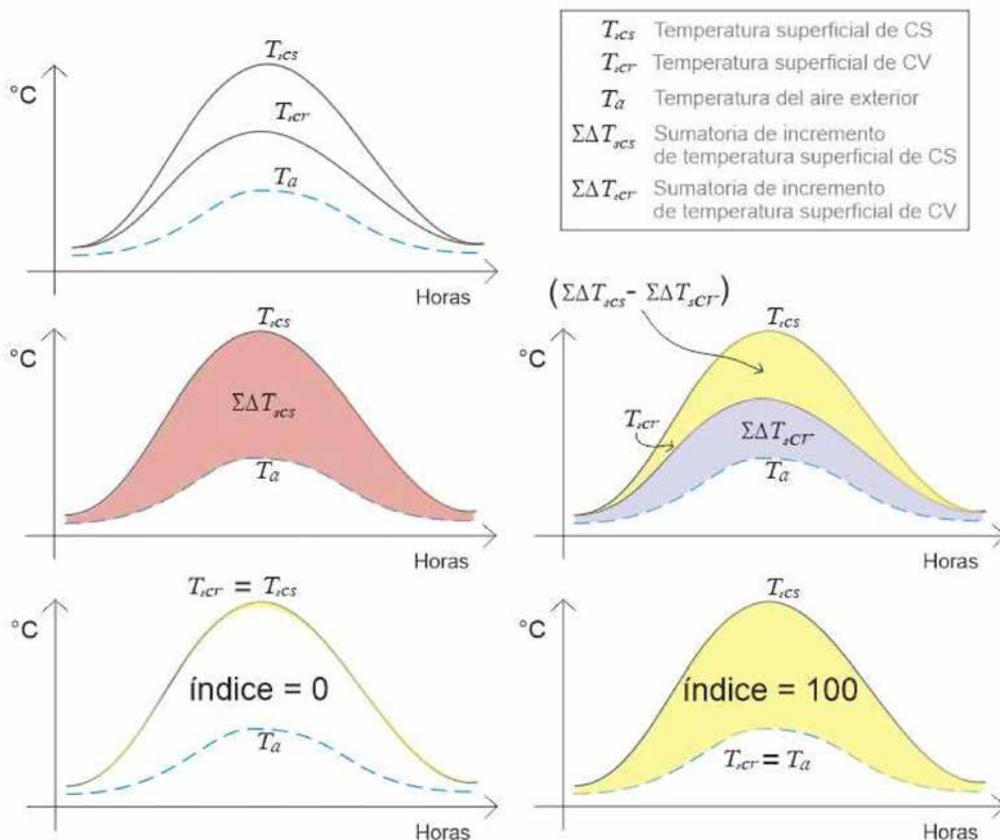


Gráfica 15: Graficas que muestran la temperatura acumulada y la radiación acumulada de los días de estudio seleccionados para llevar a cabo el análisis de los grupos de modelos de cubiertas que se compararon con el desempeño de la CV.

Se obtuvieron las temperaturas acumuladas superficiales interiores de las cubiertas ΣT_s - incluida la CS - y de temperatura del aire exterior ΣT_a de los días seleccionados

Con estos datos, se procedió a obtener la diferencia entre la temperatura acumulada alcanzada por la superficie interior de la lámina de la cubierta CS y la temperatura acumulada del aire exterior ($\Delta \Sigma T_{sCS}$) de los 10 días seleccionados. Del mismo modo se obtuvo la diferencia de la temperatura acumulada de las caras interiores de las láminas de los 5 modelos sujetos a estudio y de la CV, es decir: $\Delta \Sigma T_{sCV}$, $\Delta \Sigma T_{sCSB}$, $\Delta \Sigma T_{sCA}$, $\Delta \Sigma T_{sCNV}$, $\Delta \Sigma T_{sCVB}$ y $\Delta \Sigma T_{sCVA}$

Con estos datos y siguiendo el criterio en el cual se considera el incremento de temperatura de la CS sobre la temperatura exterior ($\Delta \Sigma T_{sCS}$) como el más alto posible, se procedió a la obtención de un Índice de Eficiencia para cada uno de los modelos propuestos. Con lo cual, una cubierta que llegue a igualar este incremento llegaría a obtener un Índice de Eficiencia de 0. Y aquella en la que el incremento sea nulo, es decir, la temperatura superficial interior nunca rebase la temperatura del aire exterior obtendría un índice de 100.



$$\text{Índice de eficiencia térmica} = \frac{\Sigma \Delta T_{sCS} - \Sigma \Delta T_{sCV}}{\Sigma \Delta T_{sCV}} \times 100$$

Figura 40: Esquema que muestra el método de obtención del índice de eficiencia térmica utilizado en la comparación de los diferentes sistemas de control térmico y cuyas referencias son: la temperatura del aire exterior - como la mínima posible - y la temperatura alcanzada por la cubierta metálica simple - como la máxima posible.

5.2.1 Acabado de alta reflectancia.

Los resultados son contundentes en lo que se refiere a las repercusiones térmicas del grado de reflectancia del acabado superficial de la lámina metálica. Encontrando una disminución de la temperatura superficial de la lámina metálica de hasta 50°C en las horas de mayor radiación solar al aplicar un acabado de pintura acrílica blanca.

Otro fenómeno a destacar es que las oscilaciones en la temperatura superficial de la lámina pintada de blanco son mucho menos acusadas que las de la lámina metálica sin acabado, al variar la intensidad de la radiación.

Sin embargo, una de las características más importantes es que la temperatura superficial de la cubierta simple blanca (**CSB**) por la noche consigue una refrigeración radiativa importante, alcanzando en promedio 2°C menos que la temperatura del aire exterior. Fenómeno que, aunque sí se presenta en la lámina metálica sin acabado (**CS**), sólo llega a estar alrededor de 1°C por debajo de la temperatura del aire exterior.

En lo que se refiere al aire interior de los modelos, la diferencia de temperatura es considerable para las horas del día. Siendo de hasta 7°C entre el modelo de **CSB** con respecto al de **CS** en las horas de mayor radiación. Sin embargo en la noche estas temperaturas se igualan obteniendo ambos modelos temperaturas, en promedio, 2°C por arriba de la temperatura del aire exterior.

Al observar los resultados del análisis realizado a las temperaturas acumuladas de los modelos, se puede ver que la diferencia de temperaturas acumuladas de las horas diurnas entre un modelo y otro es mínima, sin embargo, es durante la noche cuando se puede observar una gran diferencia en la capacidad refrigerante de las cubiertas.

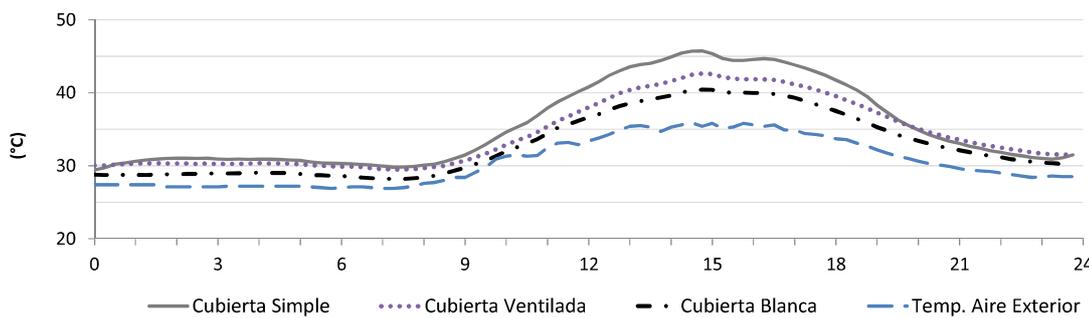
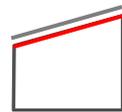
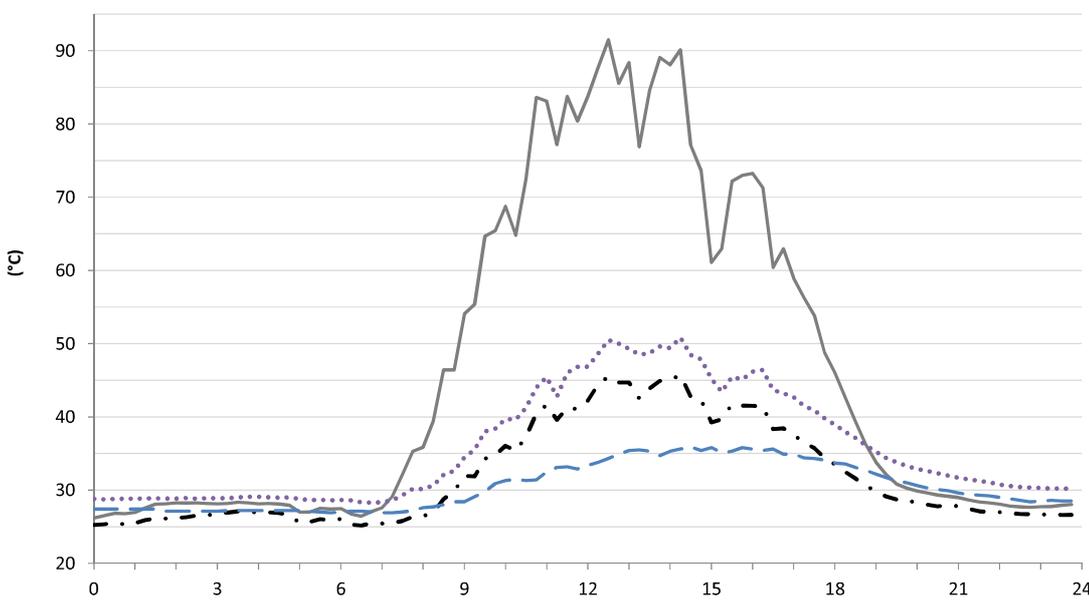
Habiendo encontrado siempre mayores tasas de refrigeración nocturna en la lámina del modelo de cubierta simple, al aplicar la pintura vinil-acrílica, esta refrigeración es casi triplicada. En cambio, en el modelo de CV no se presenta esta refrigeración.

Debido a la relevancia de los resultados, un estudio adicional se llevó a cabo en el que se comparó el desempeño de la CVB con el de la CB, registrando sus temperaturas superficiales y del aire interior de manera simultánea. En el análisis de éstos resultados pudimos observar que la CVB logra alcanzar temperaturas casi un grado por debajo de los registros de temperatura de la CB además de una perceptible menor oscilación. Sin embargo, al contar con una cámara de aire, la refrigeración nocturna no se lleva a cabo en absoluto, lo cual la pone de nuevo en desventaja frente a al desempeño de la CB

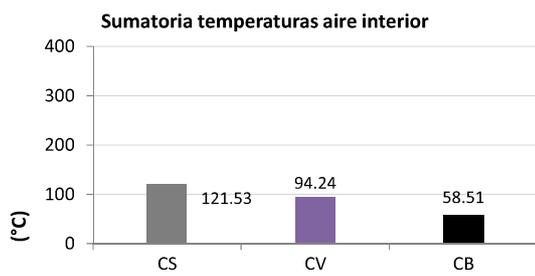
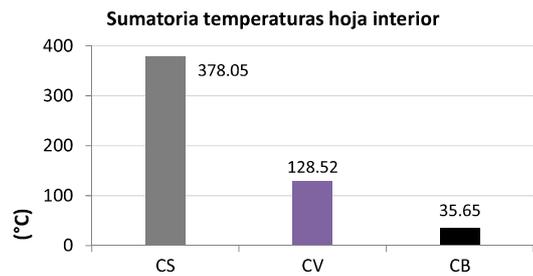
CV vs CB

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

Fecha:	2-may.-2017
Radiación Acumulada:	5.64 kWh/m2
Temp. Exterior Acumulada:	731 °C-hr

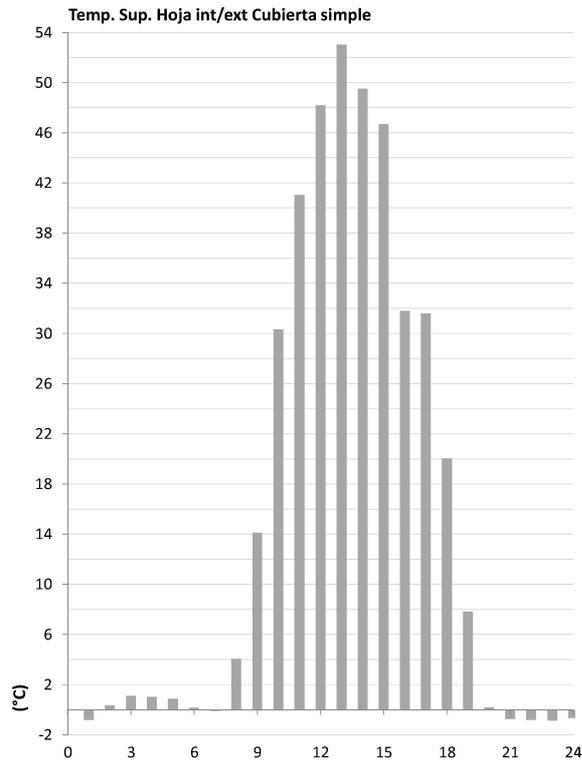


— Cubierta Simple Cubierta Ventilada - - - Cubierta Blanca - - - Temp. Aire Exterior

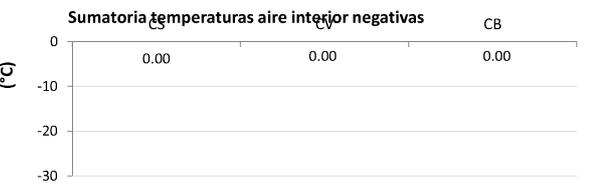
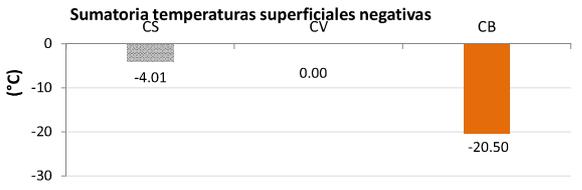
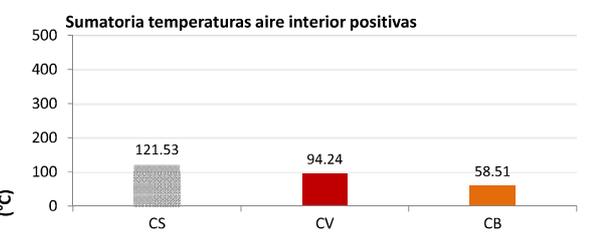
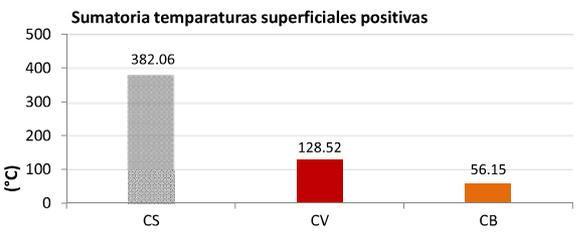
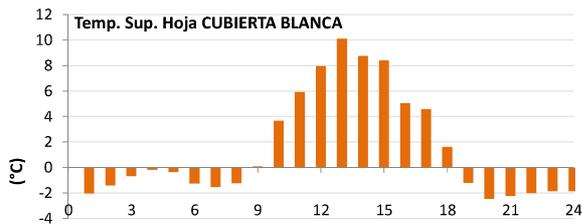
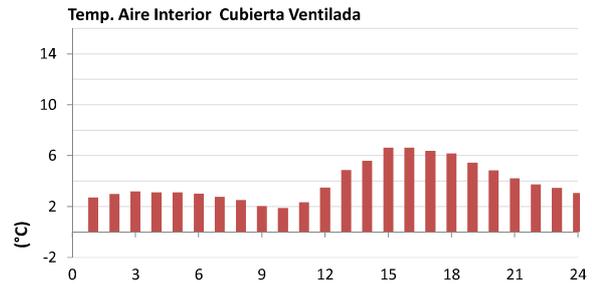
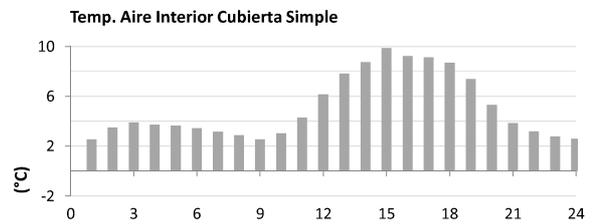
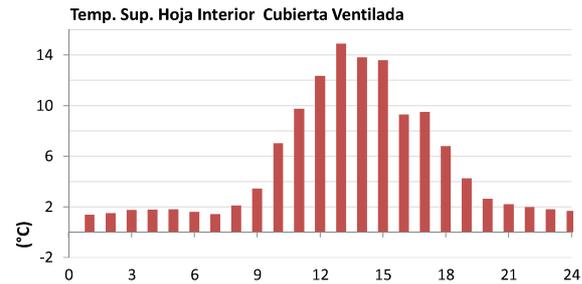


Gráfica 16: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Simple Blanca (CSB).

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
 (Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



CV vs CB	
Fecha:	2-may.-2017
Radiación Acumulada	5.64 kWh/m2
Temp. exterior acumulada:	731 °C-hr



Gráfica 17: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Simple Blanca (CSB).

5.2.2 Cámara de aire no ventilada

En la comparación de dos modelos de cubierta metálica; el primero con una cavidad ventilada (CV) y el segundo con una cavidad no ventilada (CNV). Pudimos observar que efectivamente la ventilación de la cavidad permite una mayor disipación de calor, registrándose temperaturas superficiales hasta 5° más bajas en la hoja interior del modelo de CV en las horas de mayor radiación solar.

Llegada la noche, se puede observar que las temperaturas superficiales tienden a igualarse con las del aire exterior, sin embargo no es posible alcanzar la temperatura superficial del modelo de CS que por las noches logra bajar la temperatura hasta 2.5° con respecto a la del aire exterior.

Los registros de temperatura del aire interior no arrojan diferencias significativas entre los modelos de CV y CNV, llegando a reportar apenas 1° de diferencia en su punto crítico.

Con respecto al análisis de las temperaturas acumuladas de la hoja interna de las cubiertas se observa que la CV logra disminuciones de hasta un 67% con respecto a la CS contra sólo un 55% de disminución de la CNV

En conclusión, se puede decir que sí se encontró una diferencia significativa entre las temperaturas superficiales alcanzadas por la cubierta metálica cuando la cavidad de aire se encuentra ventilada, por lo que sí existe un cierto grado de disipación de energía por efectos de intercambio de aire a través de la cubierta ventilada.

5.2.3 Aislamiento.

Mediante la implementación de aislamiento es posible disminuir en gran parte la transmisión de calor al interior del espacio cubierto. Sin embargo, al comparar con la CV, se puede observar que ésta es capaz de transmitir menos calor a través de la cubierta registrando temperaturas superficiales de la hoja interior 2.5°C menores a las alcanzadas por la CA.

En el análisis realizado a las temperaturas acumuladas se confirma este aumento de la temperatura superficial de la cubierta para CA, aunque no parece ser muy acusado puesto que por las noches las temperaturas de ambos módulos se igualan.

Para las temperaturas acumuladas del aire interior se observa un menor incremento para CA con respecto a CV. Aunque para los registros hora a hora se puede ver que esta diferencia es de apenas 0.5°C. Por lo que se puede considerar que ambos modelos registran prácticamente las mismas temperaturas en este punto de medición.

Habiendo tantas variables no estudiadas para este análisis - como puede ser el espesor o el tipo de aislamiento considerado - se puede concluir que **para un aislamiento de poliuretano extruido de espesor mínimo, la CV puede otorgar mejores condiciones**

térmicas al interior de los espacios puesto que permite alcanzar menores temperaturas superficiales de la cubierta. Sin embargo se podrían realizar los cálculos necesarios para determinar el espesor necesario para igualar o mejorar la resistencia térmica de la cubierta. Para a partir de este dato determinar la conveniencia económica o el costo medioambiental de la utilización de un aislamiento frente a la creación de la cavidad ventilada.

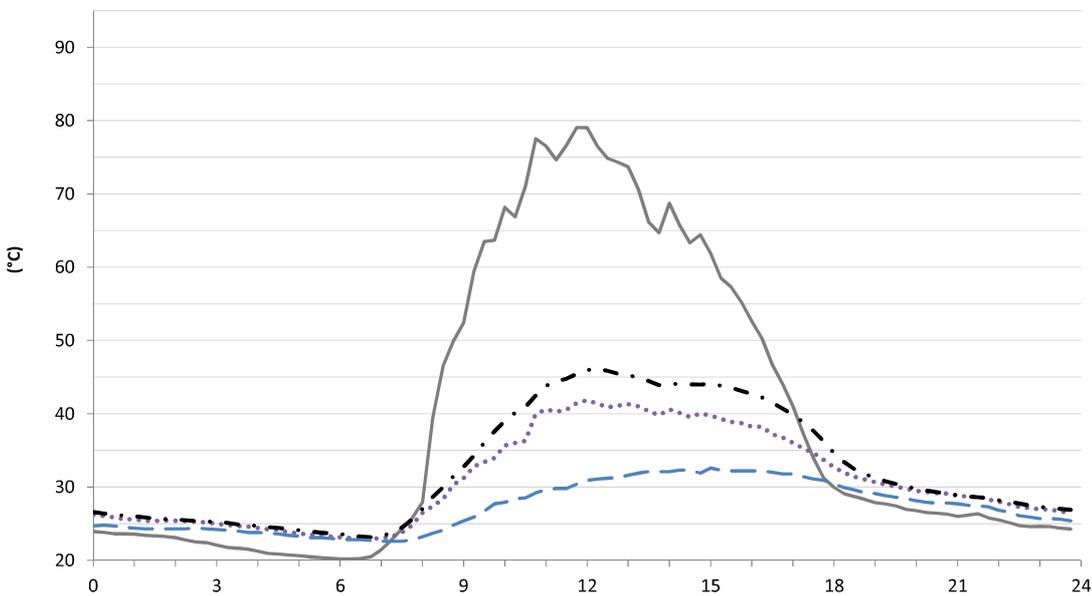
CV vs CNV

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

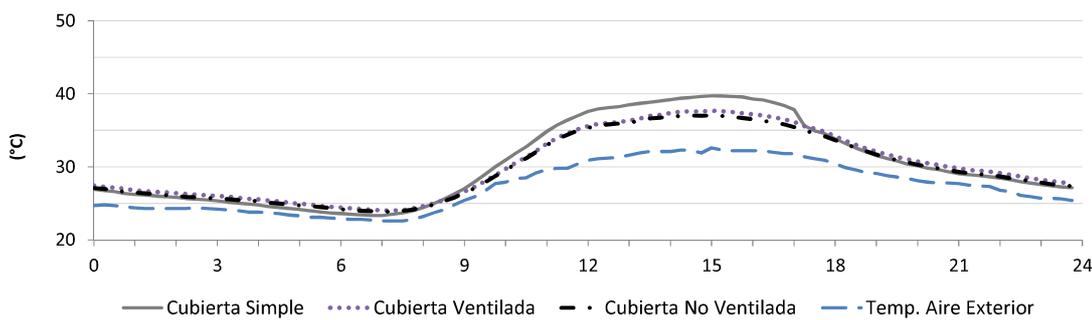
Fecha:	11-feb.-2017
Radiación Acumulada:	5.65 kWh/m2
Temp. Exterior Acumulada:	655 °C-hr



Radiación



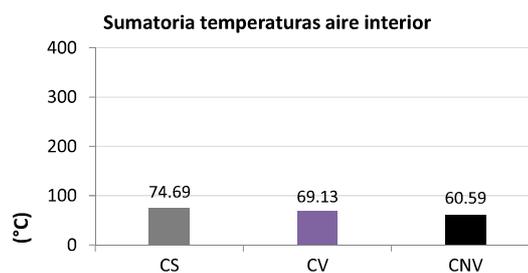
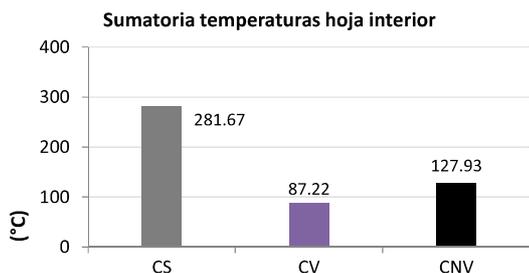
Temperatura hoja interior



Temperatura aire interior

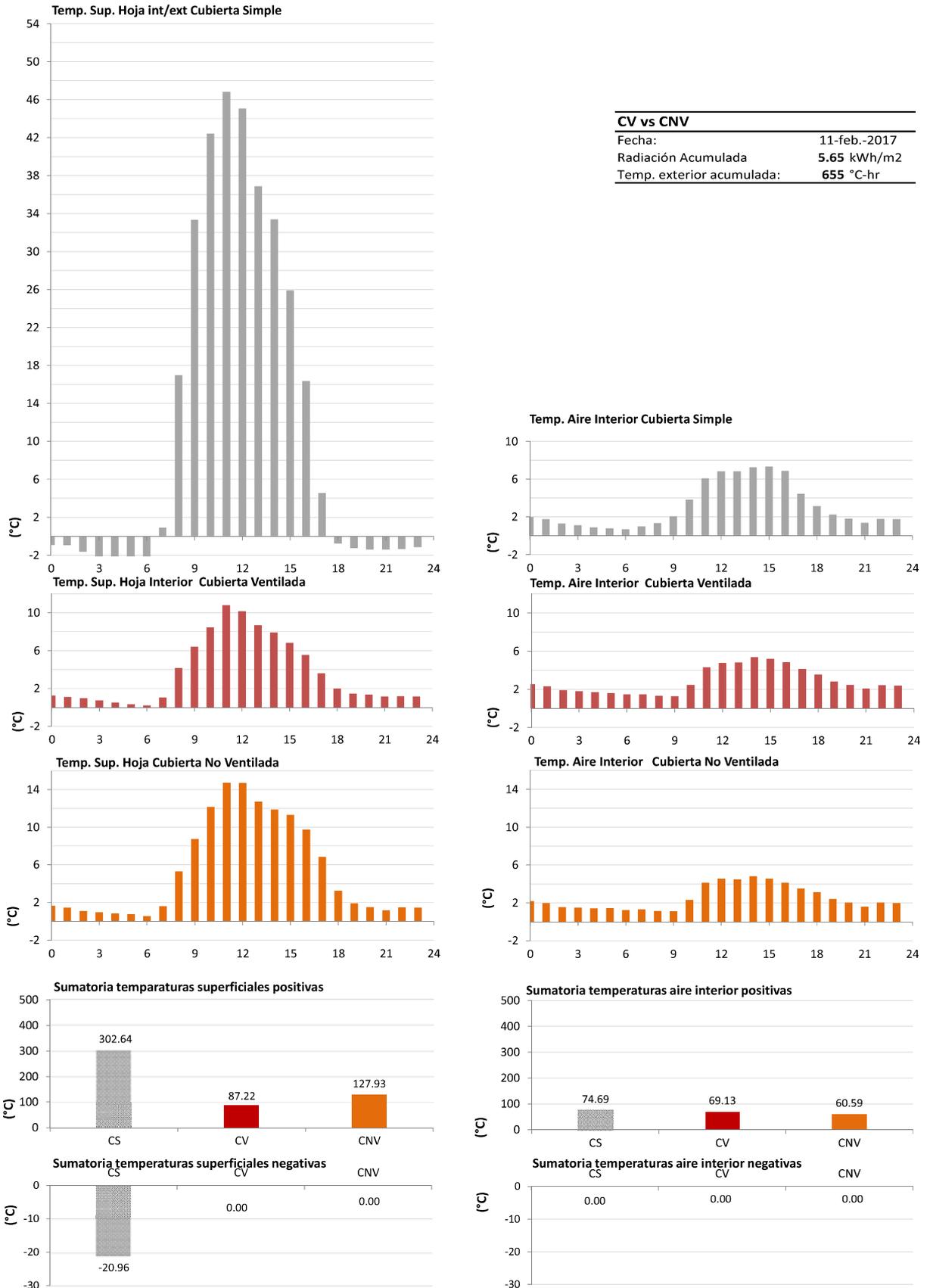


— Cubierta Simple Cubierta Ventilada - - - Cubierta No Ventilada - - - Temp. Aire Exterior



Gráfica 18: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta No Ventilada (CNV).

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
 (Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



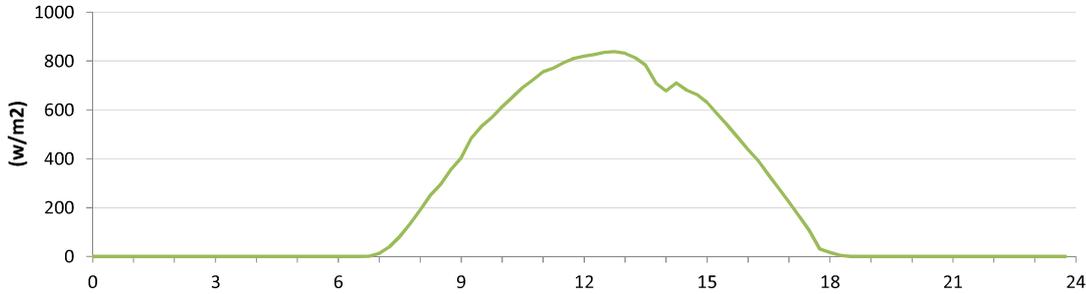
Gráfica 19: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta No Ventilada (CNV).

CV vs CA

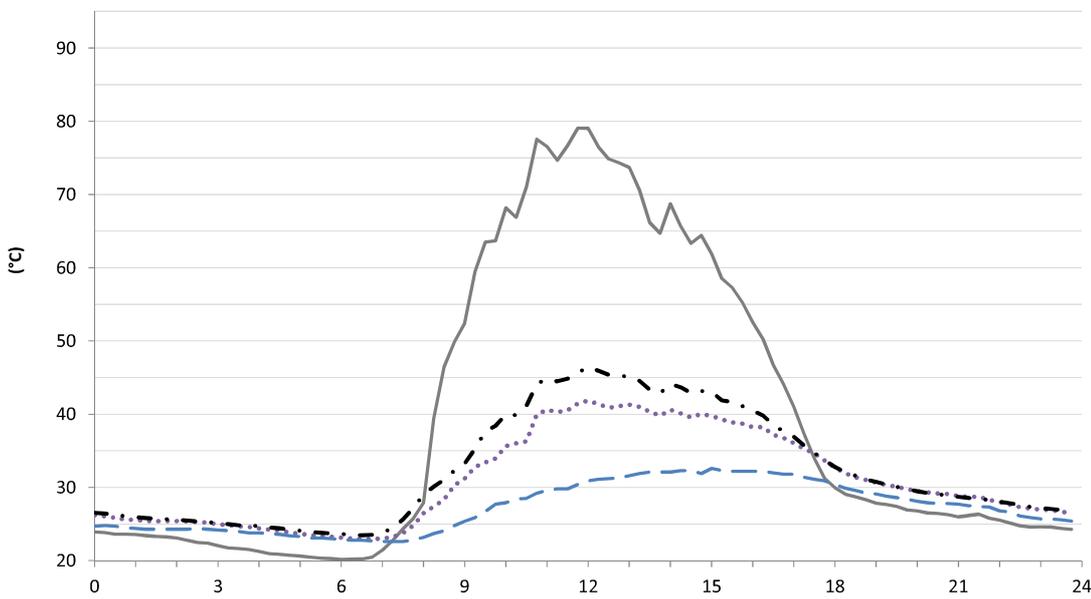
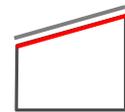
Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

Fecha:	11-feb.-2017
Radiación Acumulada:	5.65 kWh/m ²
Temp. Exterior Acumulada:	655 °C-hr

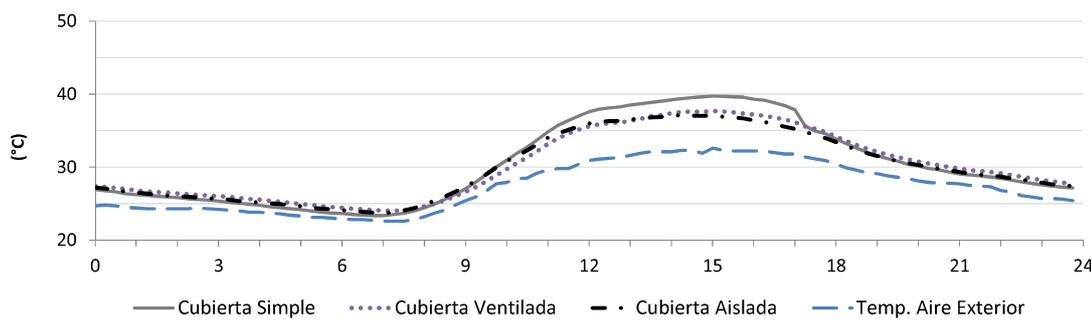
Radiación



Temperatura hoja interior

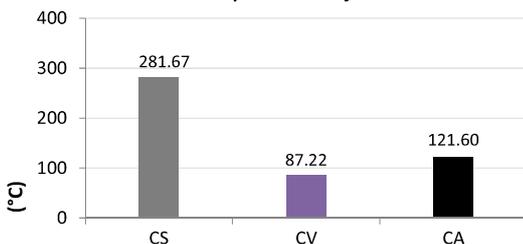


Temperatura aire interior

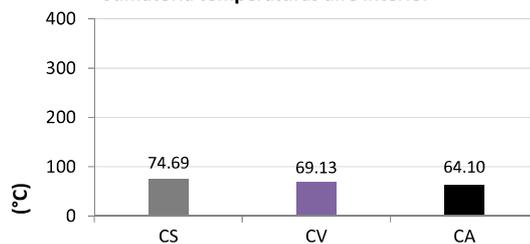


— Cubierta Simple Cubierta Ventilada - - - Cubierta Aislada - - - Temp. Aire Exterior

Sumatoria temperaturas hoja interior

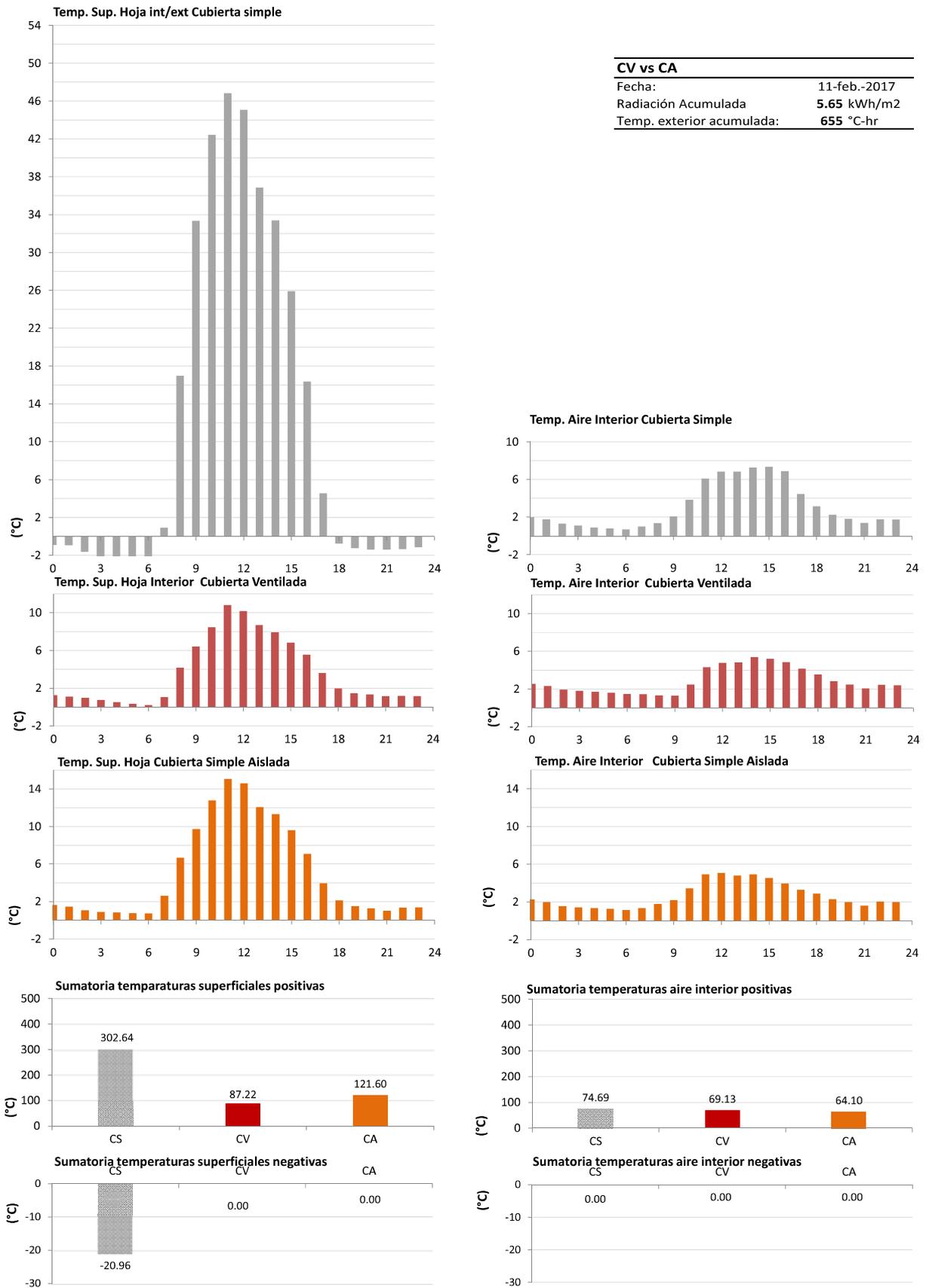


Sumatoria temperaturas aire interior



Gráfica 20: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Aislada de una sola hoja (CA).

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
 (Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



Gráfica 21: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Aislada de una sola hoja (CA).

5.2.4 Cubierta ventilada con aislamiento

La colocación de un aislante térmico en la parte inferior de la cubierta ventilada (CVA) disminuyó de manera muy importante la temperatura superficial de la hoja interior del módulo. Presentando temperaturas de hasta 11°C de diferencia con respecto a la cubierta ventilada sin aislamiento (CV).

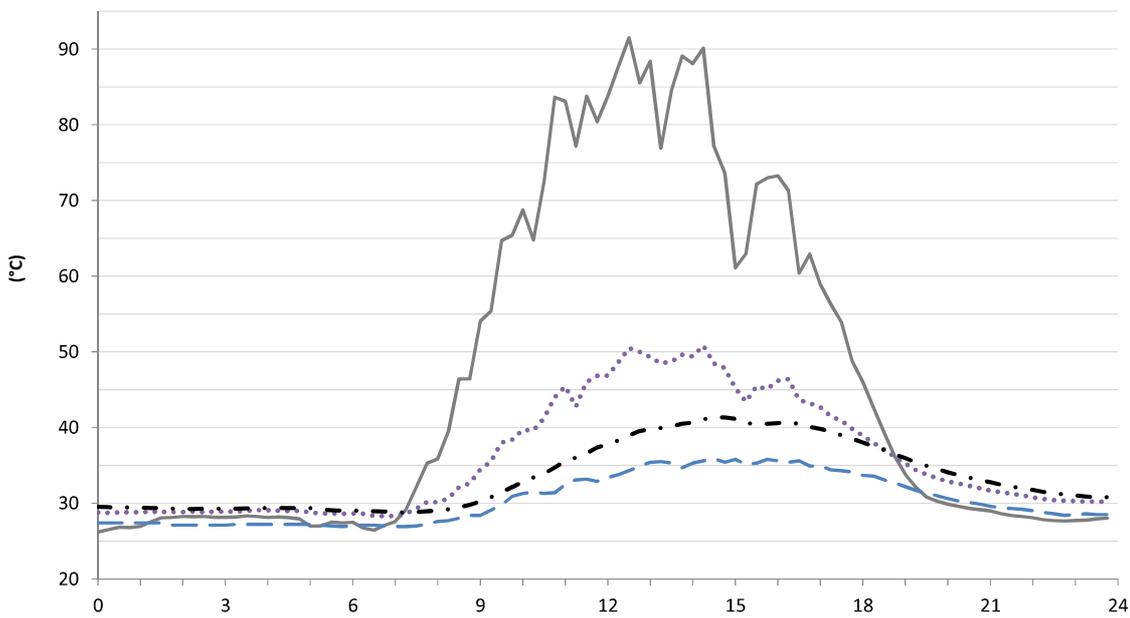
En cuanto a los registros de temperatura interior, también se puede observar un mejor desempeño térmico de CVA presentando casi 2.5°C por debajo de los registros de temperatura interior del aire del modelo de CV en las horas con temperaturas más elevadas.

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

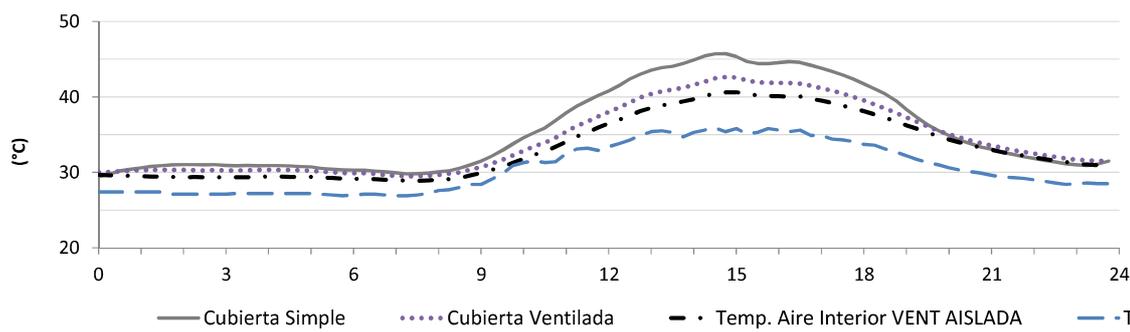
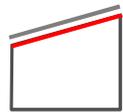
Fecha: 2-may.-2017
 Radiación Acumulada: 5.64 kWh/m²
 Temp. Exterior Acumulada: 731 °C-hr



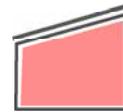
Radiación



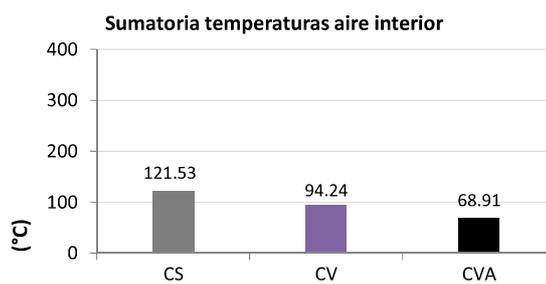
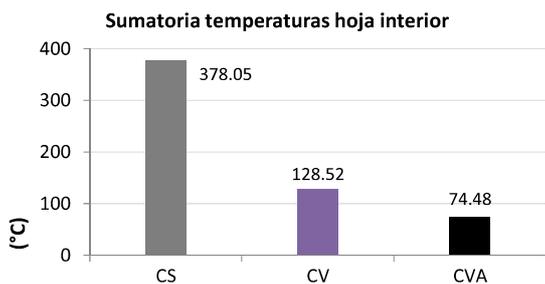
Temperatura hoja interior



Temperatura aire interior

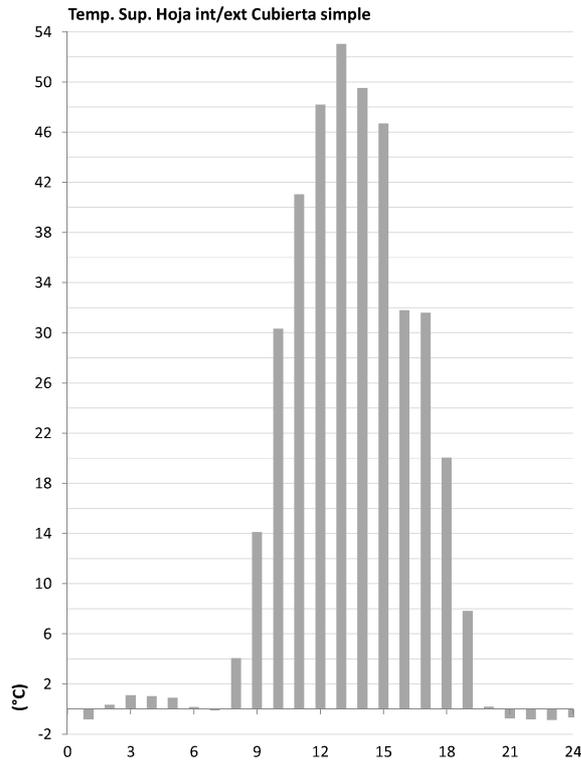


— Cubierto Simple Cubierto Ventilada - · - Temp. Aire Interior VENT AISLADA - - - Temp. Aire Exterior

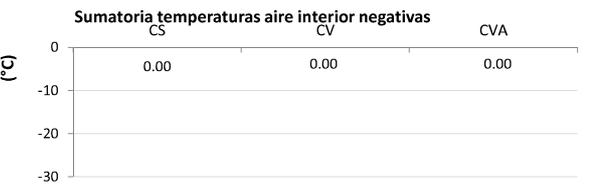
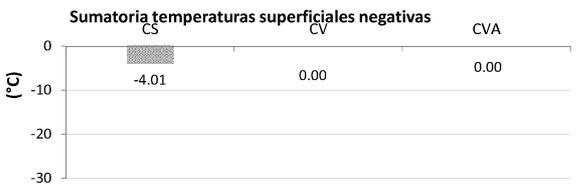
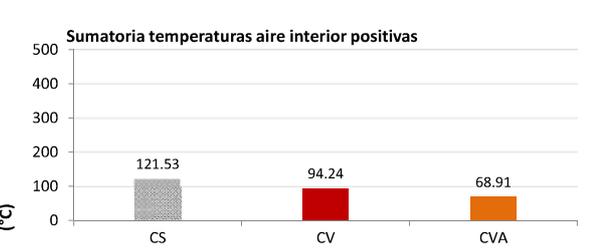
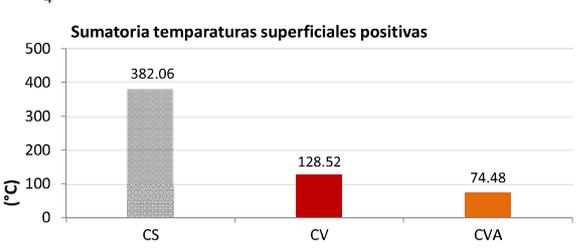
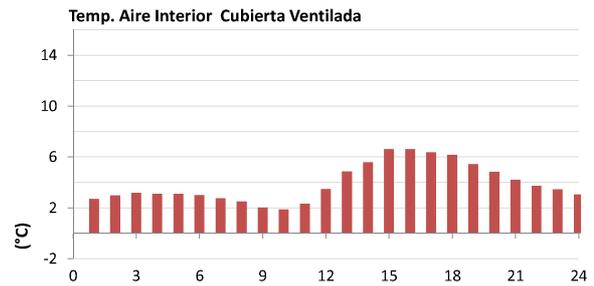
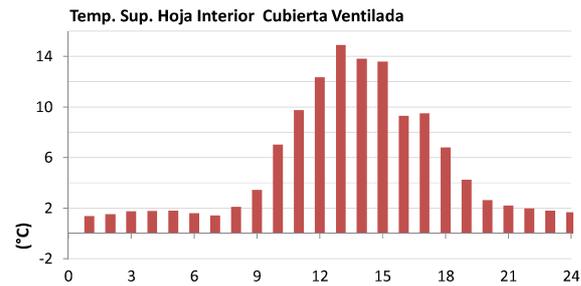
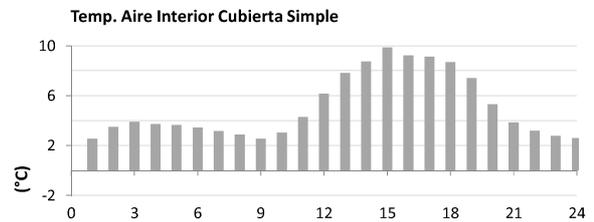


Gráfica 22: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierto Ventilada (CV) y la Cubierto Ventilada con aislamiento en la cara interior (CVA).

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
 (Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



CV vs CVA	
Fecha:	2-may.-2017
Radiación Acumulada	5.64 kWh/m ²
Temp. exterior acumulada:	731 °C-hr



Gráfica 23: Gráficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con aislamiento en la cara interior (CVA).

5.2.5 Cubierta Ventilada Blanca

La aplicación de un acabado de alta reflectancia (pintura vinil-acrítica color blanco) para la hoja exterior de la cubierta ventilada (CVB) presentó disminuciones importantes en la temperatura superficial de la hoja interior en comparación con la cubierta ventilada sin acabado (CV). Siendo de casi 5°C en el periodo de mayor radiación. Además se observaron temperaturas ligeramente inferiores a la temperatura del aire exterior en algunas horas de la madrugada.

La temperatura interior del aire de los modelos no presenta diferencias perceptibles entre uno y otro para los registros hora a hora, sin embargo, se puede observar un ligero aumento en la temperatura acumulada del día estudiado para el modelo de CVB con respecto al de CV. Aumento no necesariamente atribuible al comportamiento de la cubierta, sino a aspectos relativos a su ubicación o proximidad a fuentes de calor, por ejemplo.

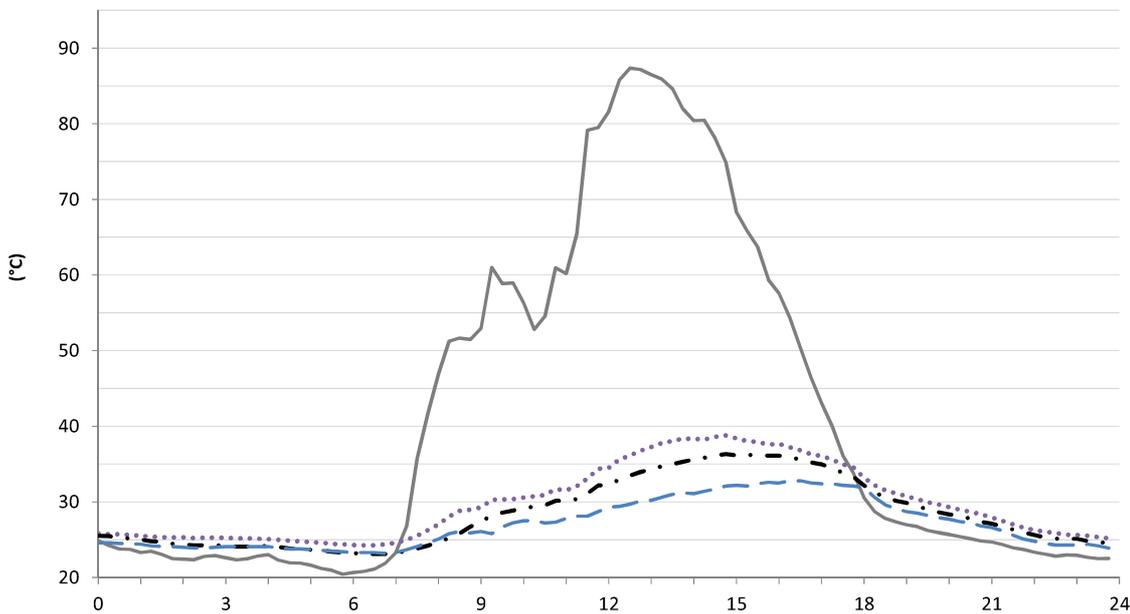
CV vs CVB

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

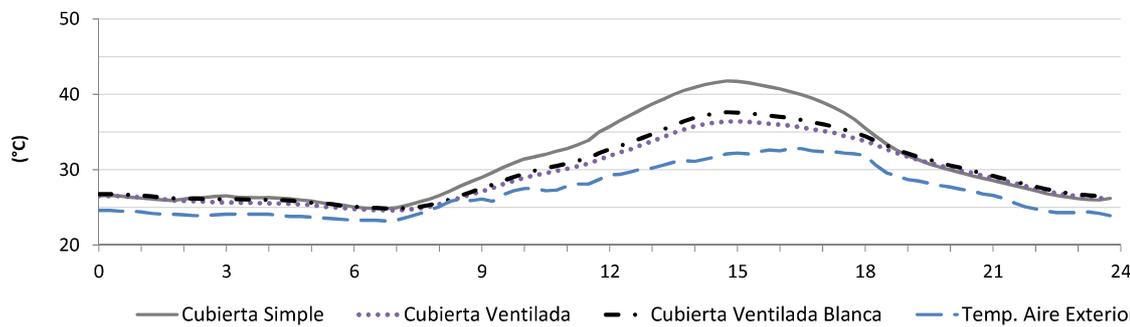
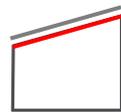
Fecha: 23-mar.-2017
 Radiación Acumulada: 5.64 kWh/m²
 Temp. Exterior Acumulada: 649 °C-hr



Radiación



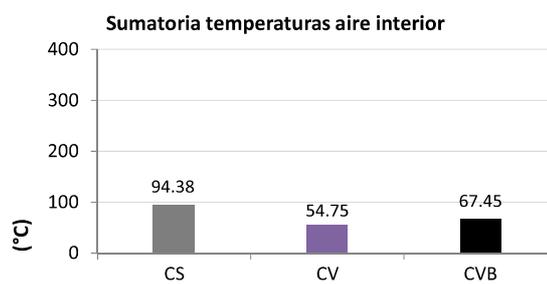
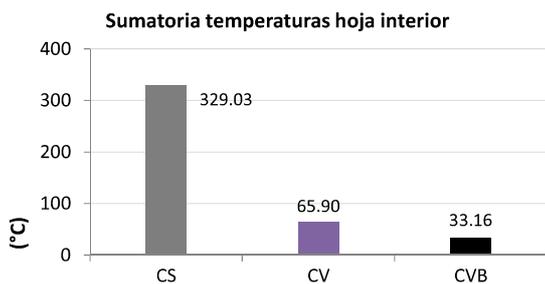
Temperatura hoja interior



Temperatura aire interior

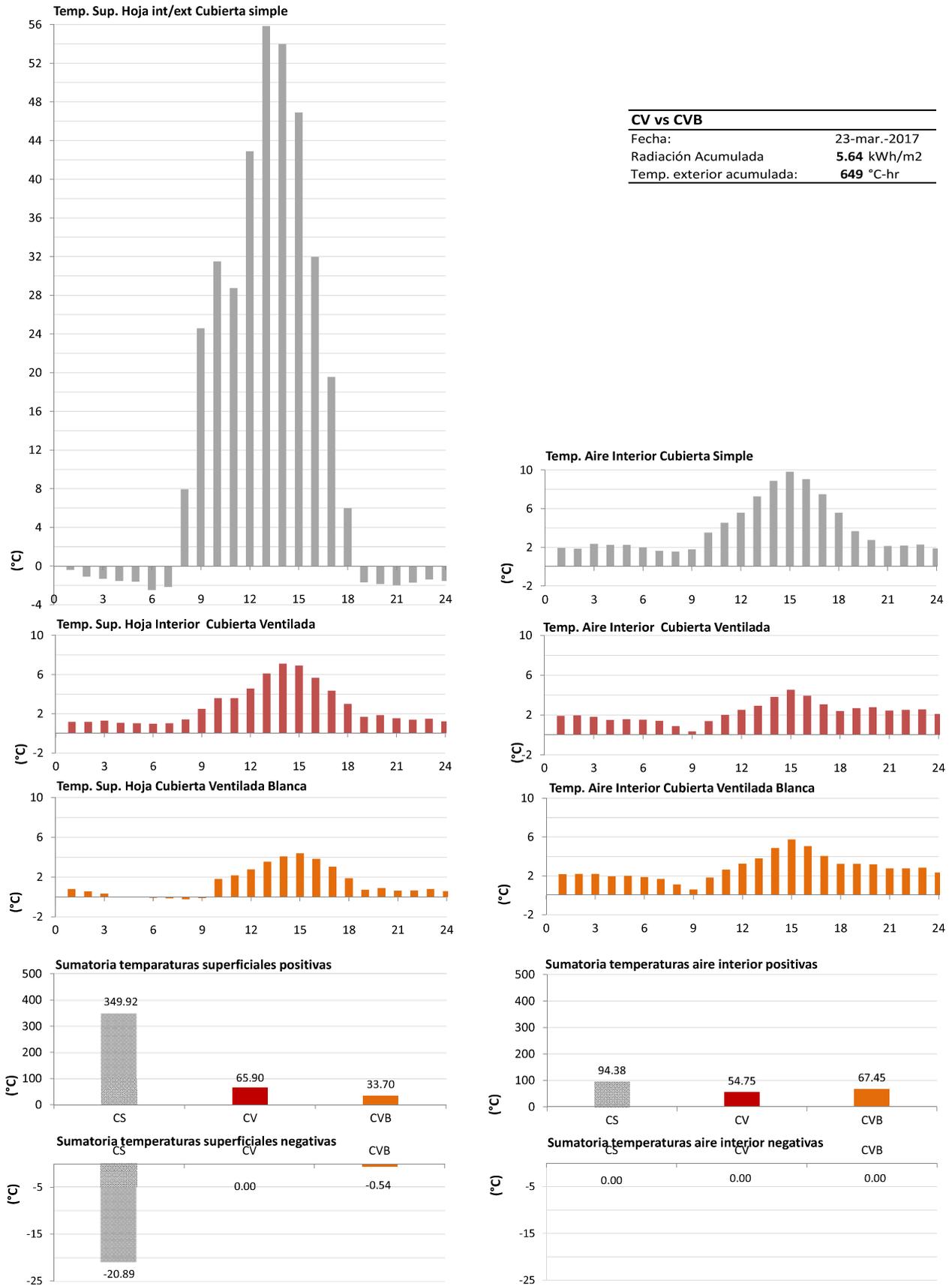


— Cubierta Simple Cubierta Ventilada - - - Cubierta Ventilada Blanca - - - Temp. Aire Exterior



Gráfica 24: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con acabado de alta reflectividad solar (CVB).

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
(Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



Gráfica 25: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con acabado de alta reflectividad solar (CVB).

5.2.6 CVB vs CVA

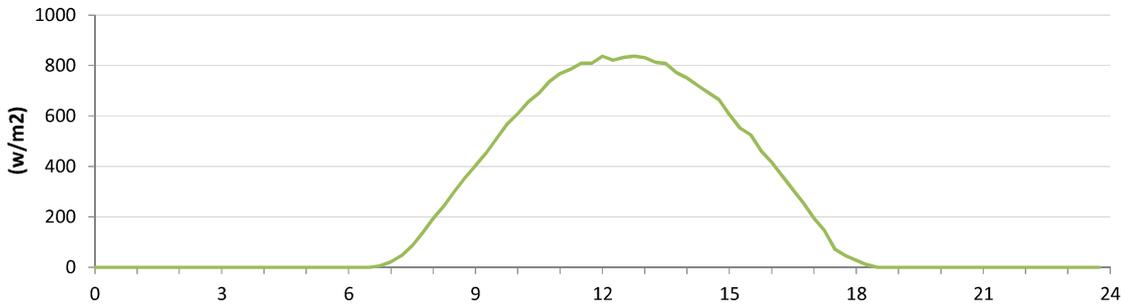
Para conocer el desempeño de las dos estrategias de mejoramiento propuestas en el presente estudio, se compararon los modelos de CVB y CVA para el mismo día de estudio. Es decir, se registraron sus temperaturas superficiales de la hoja interior así como las del aire interior de los módulos simultáneamente.

En la revisión de los registros de temperaturas se encontró un desempeño muy similar de ambos modelos, con diferencias apenas superiores a 1°C de temperatura superficial de la hoja interior de CVA. Siendo esta tendencia inversa para los registros de temperatura del aire interior. Donde el modelo de CVB presento temperaturas 1°C superiores a las de CVA.

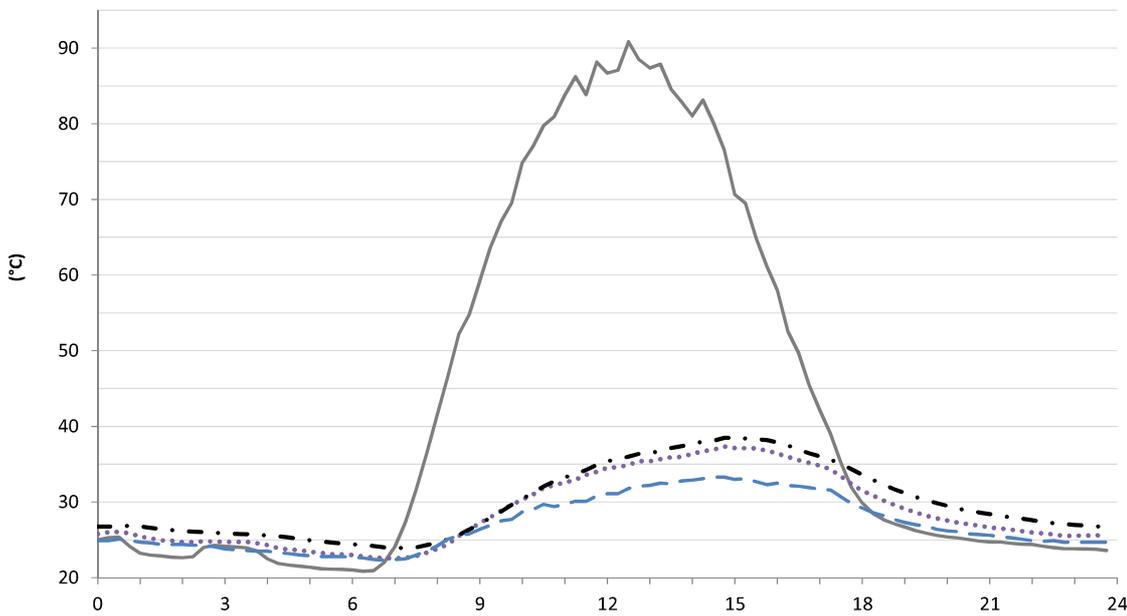
CVB vs CVA

Análisis de las temperaturas de los modelos experimentales

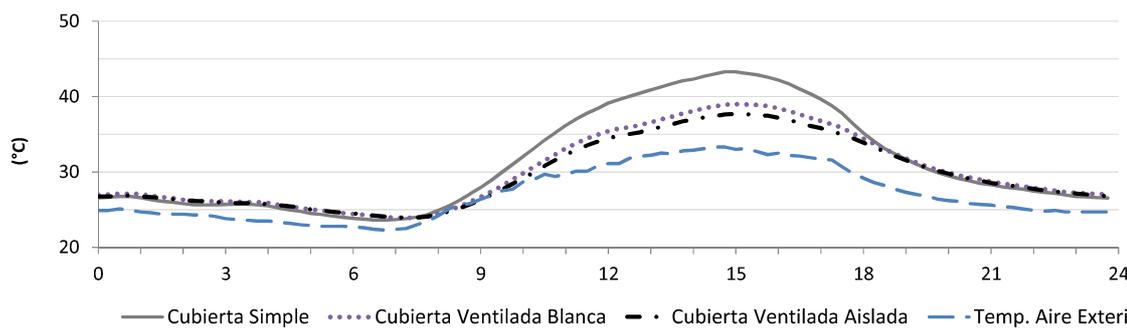
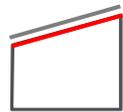
Fecha:	26-feb.-2017
Radiación Acumulada:	5.64 kWh/m ²
Temp. Exterior Acumulada:	650 °C-hr



Radiación



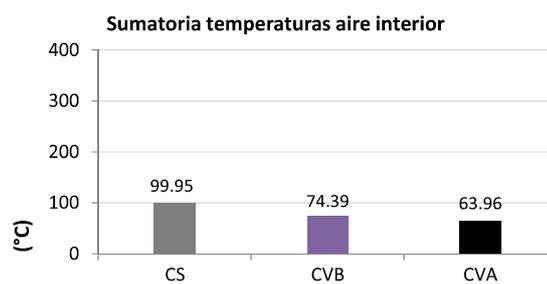
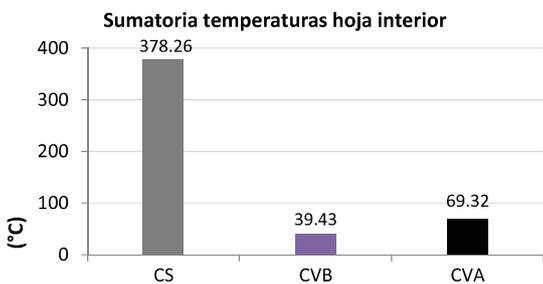
Temperatura hoja interior



Temperatura aire interior

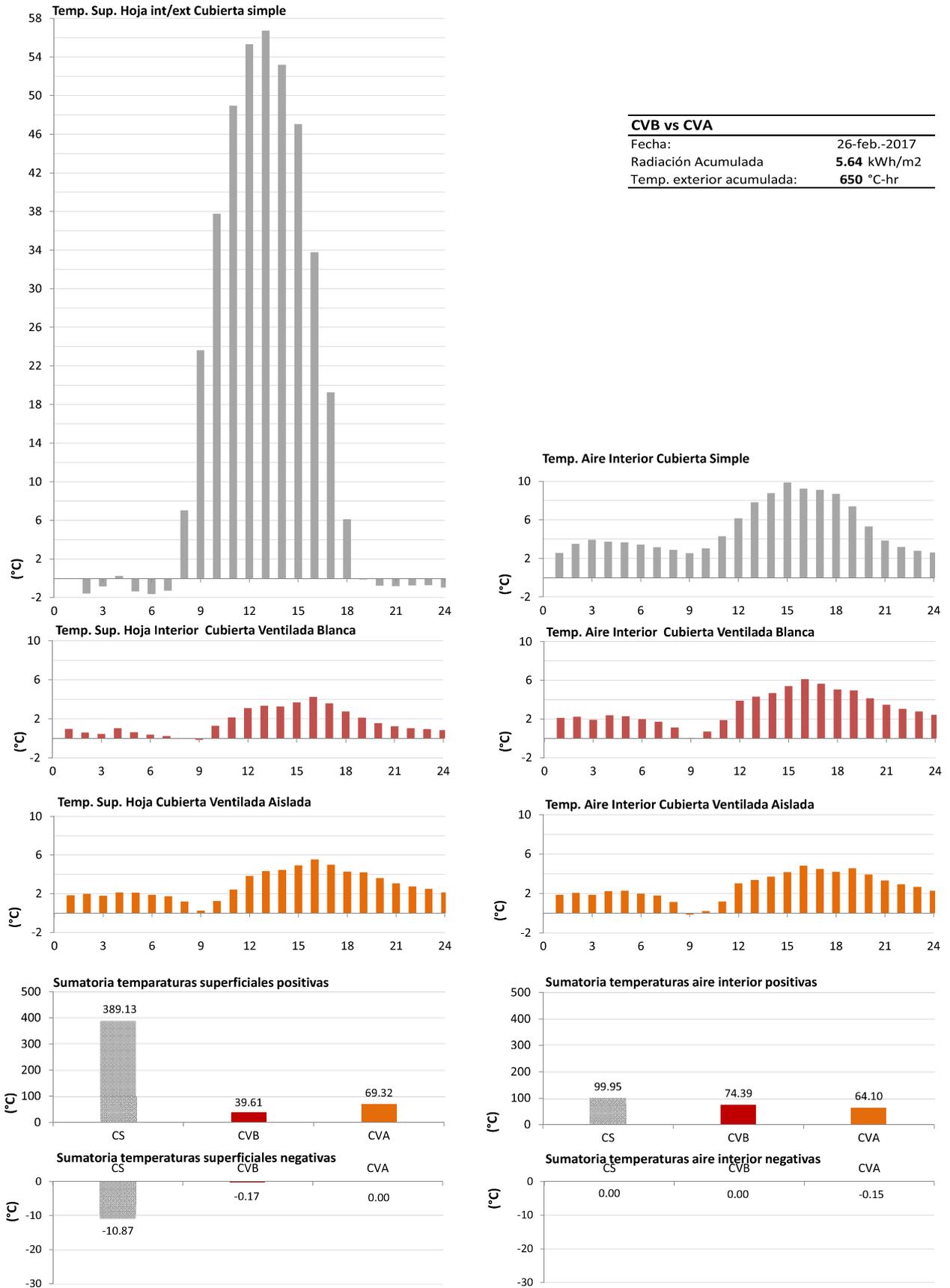


— Cubierta Simple Cubierta Ventilada Blanca - · - Cubierta Ventilada Aislada - - - Temp. Aire Exterior



Gráfica 26: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada Blanca (CVA) y la Cubierta Ventilada con aislamiento en la cara interior (CVA).

Análisis de diferencias de temperaturas acumuladas hora a hora
 (Temp. Módulos - Temp. Exterior bulbo seco)



Gráfica 27: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada Blanca (CVB) y la Cubierta Ventilada con aislamiento interior (CVA).

5.3 Conclusiones del análisis a otras estrategias de control térmico.

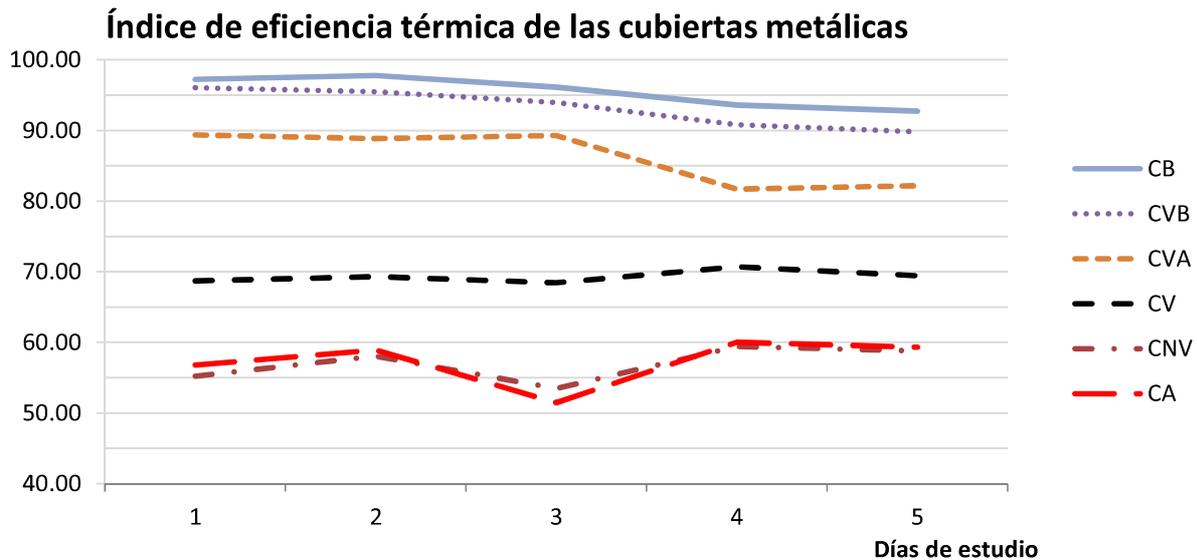
Del el análisis realizado a las cubiertas metálicas con estrategias de control térmico diferentes a las de la cámara ventilada y de acuerdo a la obtención de un Índice de Eficiencia resultado de su desempeño térmico en comparación con el de la CS, así como de las observaciones realizadas a sus registros de temperatura a lo largo de los días de estudio seleccionados de manera individual se desprenden las siguientes conclusiones:

1. La cubierta simple con pintura blanca (**CSB**) demostró tener un comportamiento térmico superior al del resto de las estrategias analizadas. En segundo lugar, encontramos a la cubierta ventilada (**CV**), la cual presentó un mejor desempeño térmico que la cubierta aislada (**CSA**) y la no ventilada (**CNV**).
2. La **CSB** registró temperaturas diurnas inferiores a las del resto de las cubiertas. Registró también temperaturas nocturnas notablemente inferiores a las del aire exterior. Con lo que se comprueba que el efecto de refrigeración radiativa se lleva a cabo de manera eficiente a través de la lámina metálica cuando ésta cuenta con un acabado de Pintura Blanca Vinil Acrílica.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, el potencial del efecto refrigerante nocturno que la combinación de las propiedades de la hoja metálica tiene con las de los materiales que conforman la pintura blanca aplicada sobre su superficie debe ser objeto de estudios posteriores. Así como también la experimentación con acabados blancos con diferentes valores de emisividad.

3. De esta etapa del estudio se puede sacar otra conclusión importante: al demostrarse que la **CNV** registra temperaturas superficiales superiores a las de la **CV**. Existe evidencia de que, aun cuando en la comparación de los registros de velocidad del aire alcanzados al interior de la cavidad con respecto a las variaciones de temperatura de los diferentes elementos monitoreados en los modelos de CV, no se observaron correlaciones significativas, sí existe un importante efecto de disipación de energía a través del intercambio de aire que se lleva a cabo en la cavidad ventilada.

Por lo que probablemente en el futuro sea necesario un estudio más concienzudo a través de un número mayor de sensores colocados en diferentes puntos de la cavidad ventilada para detectar posibles flujos de aire que en la presente investigación no hayan podido detectarse, para volver a comparar las tasas de flujo de aire a través de la cavidad con respecto a las variaciones de temperatura y determinar si efectivamente existe correlación significativa entre estas variables.



Gráfica 28: Gráfica de los índices de eficiencia térmica que obtuvieron cada uno de los módulos de cubiertas analizadas para los 5 días muestra analizados.

Como se ha mencionado con anterioridad, el parámetro ambiental que más influye en elevar la temperatura superficial de las cubiertas es la radiación solar, muy por encima del efecto refrigerante que pueda tener una adecuada ventilación de la cámara. Es por esto que aquellas estrategias que complementen el funcionamiento de la CV mitigando la radiación solar abonarán en el mejor desempeño térmico del sistema.

En la comparación realizada a tres módulos de CV: uno con lámina natural (CV), otro con aplicación de pintura blanca en su hoja exterior (CVB) y el último con instalación de aislante térmico en su hoja interior (CVA). Pudimos llegar a las siguientes conclusiones:

1. Tanto la aplicación de un acabado de alta reflectancia solar, como la de la instalación de un aislante térmico interior permiten disminuir el sobrecalentamiento de la CV de manera similar
2. La aplicación de un acabado de blanco a la hoja exterior de la CV es ligeramente más efectivo en abatir el sobrecalentamiento por cubierta además de permitir un cierto grado de refrigeración nocturna.

Al respecto, en estudios posteriores se podría analizar la conveniencia de combinar ambas estrategias y verificar si hay disminuciones importantes que lo ameriten. Además de hacer estudios específicos para determinar si un mayor grado de aislamiento pudiera tener un mejor funcionamiento térmico.

CAPÍTULO VI

Conclusiones

6. Conclusiones

6.1 Conclusiones generales.

El parámetro ambiental que más impacto tiene en el comportamiento térmico de la CV es la radiación solar. Por lo tanto:

1. Orientar la cubierta ventilada de forma tal que pueda captar una menor radiación solar tendrá un mayor impacto en evitar el sobrecalentamiento de su cara interior que la orientación de la misma con respecto a los vientos dominantes.
2. La ventilación al interior de las cubiertas no parece tener una influencia importante en la capacidad de control térmico de la CV.

El efecto de sombreado o barrera a la radiación que supone la superposición de una pantalla sobre el paramento en contacto directo con el espacio interior es lo que en realidad le confiere sobresalientes ventajas térmicas a la CV frente a otros sistemas de control térmico por cubierta.

Es por esto que, cualquier estrategia para reducir el impacto de la radiación solar sobre la cubierta ventilada mejorará su desempeño. Aun cuando esto signifique no aumentar la temperatura del aire al interior de la cavidad, y por lo tanto, minimizar la ventilación por efectos de flotabilidad térmica. La prueba está en que, al aplicar el acabado de alta reflectancia a la hoja exterior de la CV la anchura de la cavidad no impactó de ninguna manera en su comportamiento térmico, aun cuando sí lo hizo en sus tasas de movimiento de aire. Y, aunque las interacciones de las variables de color del acabado superficial con el nivel de inclinación de la cubierta fueron omitidas del experimento, se puede inferir que, un acabado de alta reflectancia de la hoja exterior de CV anularía también el efecto que la inclinación de la cubierta pudiera tener en el aumento de la ventilación de la cavidad por flotabilidad del aire.

Por esta razón se puede concluir que:

3. Una mayor reflectancia del acabado superficial de la cubierta ventilada – por ejemplo la instalación de una pintura blanca - permitirá un menor sobrecalentamiento por cubierta, no importando mayormente la distancia entre las hojas que la conforman ni su inclinación.

Sin embargo, cuando la reflectancia del acabado superficial de la CV se vea comprometido por requerimientos especiales de diseño o bien por restricciones en la periodicidad del mantenimiento necesario para conservar un grado de reflectancia idóneo podremos considerar la adecuada calibración de los parámetros de diseño que demostraron ventajas térmicas en la configuración de una CV, los cuales fueron los siguientes:

4. Cuanto mayor sea el espacio entre las hojas que conforman la cavidad, menor será la temperatura superficial de la cubierta en su hoja interior.
5. Una mayor inclinación produce un menor sobrecalentamiento de la hoja interior de la CV.

Considerando siempre que el impacto de estas variables (ancho cavidad e inclinación de la hoja exterior) en la capacidad de la CV de evitar el sobrecalentamiento es bastante menor que el de la reflectancia de la hoja exterior.

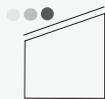
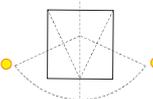
PARÁMETRO DISEÑO	nivel de la variable	Repercusión en la temperatura superficial	PRIORIDAD
 Reflectancia	+	Disminución Temperatura	1
	-	Aumento Temperatura	
 Anchura cavidad	+	Disminución Temperatura	2
	-	Aumento Temperatura	
 Inclinación	+	Disminución Temperatura	3
	-	Aumento Temperatura	
 Orientación hacia radiación solar	+	Aumento Temperatura	1
	-	Disminución Temperatura	
 Orientación vientos	+	_____	2
	-	_____	

Figura 41: Variables de diseño y sus repercusiones en el aumento o disminución de la temperatura superficial de la cubierta ventilada

6.2 Comportamiento de la Cubierta Ventilada según sus variables de diseño.

Gracias al análisis de los datos obtenidos del monitoreo a los módulos de cubiertas ventiladas, en donde se pusieron a prueba los diferentes grados de las variables de configuración de las cubiertas ventiladas se pudo llegar a las siguientes conclusiones con respecto al grado de influencia de cada una de ellas en su comportamiento, y con ello, su más adecuada configuración para evitar el flujo de energía a través de la misma y hacia el espacio interior. Y para hacer más eficiente la ventilación de la cámara.

6.2.1 Comportamiento Térmico

- ***Anchura de la cavidad ventilada y su repercusión en el comportamiento térmico de la CV:***

Dentro de las variables de configuración de la cubierta ventilada se pudo constatar que una distancia de 20 cms entre las hojas metálicas de la cubierta ventilada permitió un menor sobrecalentamiento de la hoja interior de la cubierta con respecto a las cavidades de 5 y 10 cms. Y que entre menor sea esta distancia mayor es el sobrecalentamiento presentado.

De éstos resultados se puede concluir que a mayor distancia entre las hojas de la cubierta ventilada menor será el sobrecalentamiento de la hoja interior. Esto puede deberse a que la reemisión de onda larga entre las hojas metálicas es más efectiva al ser menor la distancia entre ellas, o bien a que el flujo de energía por convección es más efectivo al existir un menor volumen de aire contenido.

Un estudio adicional que evalúe el comportamiento de la proporción entre la distancia entre las hojas metálicas y el largo y ancho del canal ventilado podría ser de utilidad para definir la adecuada distancia que debe existir entre las hojas que conforman la cubierta para garantizar la disminución de su temperatura superficial para el diseño de la CV de un edificio de mayores dimensiones.

- ***Reflectancia de la hoja exterior y su repercusión en el comportamiento térmico de la CV***

La variable que presentó una mayor repercusión en la temperatura superficial de la hoja interior de la cubierta ventilada fue la del grado de reflectancia del acabado superficial de la hoja exterior.

La CV con acabado de pintura vinil-acrílica blanca presentó una disminución del 95% en la temperatura superficial interior de los módulos de CV con respecto al del módulo de cubierta metálica simple. La disminución más importante de temperatura en todas las series de cubiertas puestas a prueba. No quedando esta capacidad supeditada a la anchura de la

cavidad, ya que las tres cubiertas ventiladas pintadas de color blanco igualaron sus temperaturas en todos los puntos de medición.

- ***Inclinación de la Cubierta Ventilada y su repercusión en el comportamiento térmico de la CV.***

El grado de inclinación de la cubierta ventilada no presenta repercusiones importantes en la disminución de la temperatura superficial de la hoja interior de las cubiertas. Sin embargo se puede decir que **una mayor inclinación de la cubierta demostró conseguir un menor calentamiento superficial de su cara interior** en los periodos de mayor insolación del día de estudio.

6.2.2 Comportamiento del movimiento de aire por la cavidad.

Como se mencionó anteriormente, las correlaciones encontradas para las variables estudiadas con respecto a las tasas de movimiento de aire al interior de las cubiertas ventiladas fueron de débiles a moderadas. Lo cual lleva a concluir que su influencia en el movimiento de aire al interior de la cavidad responde a la interacción de todas en su conjunto. Por lo que resulta difícil evidenciar la repercusión de cada una de ellas de manera aislada. Sin embargo es importante identificar la tendencia que tienen en la ventilación de la cubierta para promover, en la mayor medida posible, la adecuada ventilación de la cavidad ventilada.

Los resultados arrojados por el análisis de los registros de velocidad de los modelos de CV puestos a prueba al modificar las variables de diseño, permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- ***Anchura de la cavidad ventilada y su repercusión en el movimiento de aire:***

La anchura de la cavidad ventilada no repercute de manera importante en el aumento o disminución del movimiento de aire en el interior. Sin embargo, en la regresión polinomial realizada con los datos obtenidos de los experimentos, sí se observa un ligero aumento de las velocidades de aire en cavidades de 15 cms. Con lo que se puede concluir **que para garantizar una adecuada ventilación de la cubierta, una separación de 15 cms es la más adecuada**. Quedando para futuras investigaciones el estudio de la adecuada proporción entre esta separación y el área total del canal ventilado, que garantice que esta tendencia se conserve.

- ***Reflectancia de la hoja exterior y su repercusión en el movimiento de aire:***

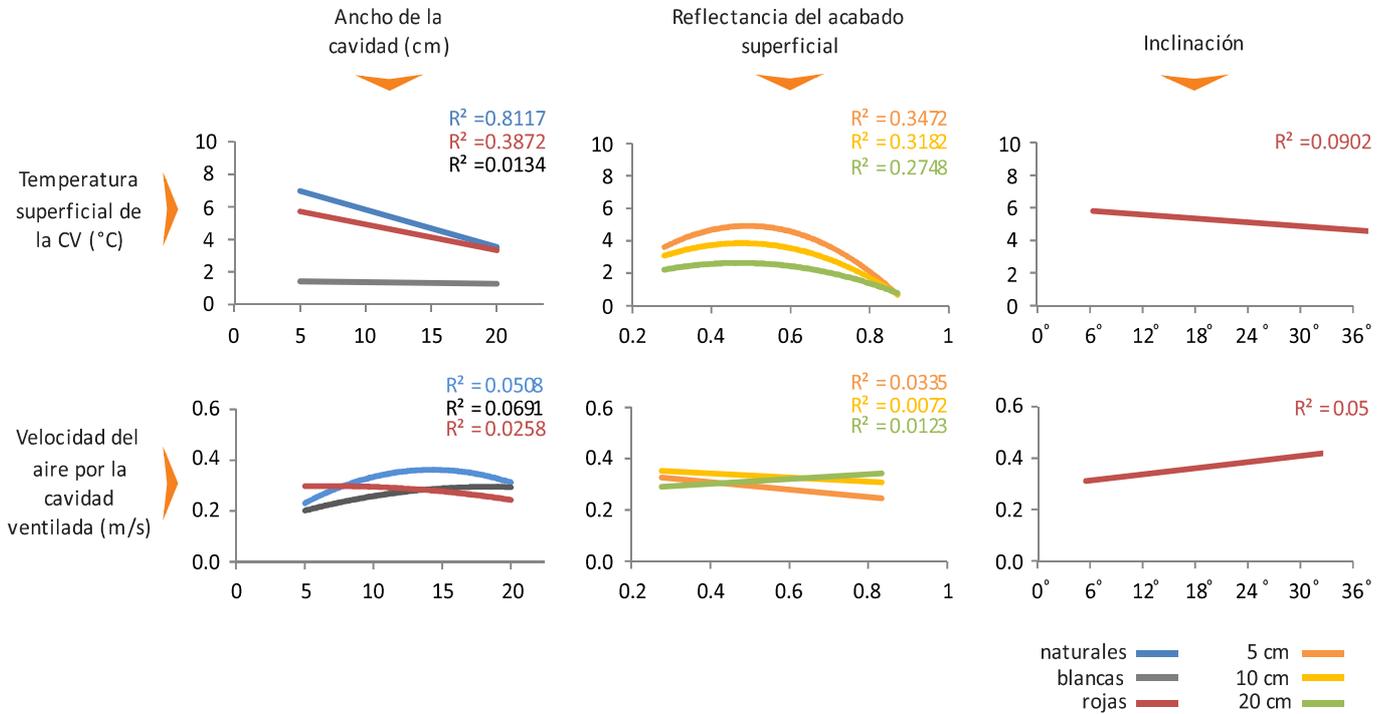
A diferencia de lo encontrado en la revisión bibliográfica, en donde se reportaban disminuciones drásticas del movimiento de aire por la cavidad al aplicar un acabado blanco en la hoja exterior, en el presente estudio la correlación negativa encontrada entre el

aumento en la reflectancia de la hoja exterior y la disminución de la velocidad del aire por la cavidad fue muy débil. Y en el caso de las cubiertas de 20 cms fue incluso positiva.

Por lo que se concluye que la aplicación del acabado de alta reflectancia no tiene un impacto importante en las tasas de movimiento de aire por la cubierta ventilada.

• ***Inclinación de la cubierta Ventilada y su repercusión en el movimiento de aire:***

El aumento en la inclinación de la cubierta ventilada presentó aumentos en la velocidad del aire por la cavidad, sin embargo, la correlación encontrada fue baja. Con lo que se puede concluir que **una mayor inclinación puede inducir mayores velocidades de aire por la cavidad ventilada**, aunque no es un parámetro de diseño que mejore de manera importante la ventilación de la cubierta.



6.3 Otras estrategias de control térmico.

Gracias al estudio comparativo descrito en el Capítulo 5, fue posible validar la eficiencia del sistema de CV frente a otras estrategias para la prevención de sobrecalentamiento por causa de elevados índices de radiación solar. Así como el funcionamiento de estas estrategias en combinación con la CV para verificar si es posible y en qué medida disminuir las tasas de transmisión de energía al interior de los espacios que cubren.

Las conclusiones arrojadas se describen con mayor amplitud en el apartado 5.3 y aquí las resumimos:

1. La cubierta que registró el mayor índice de eficiencia térmica fue la Cubierta Simple Blanca, seguida de la Cubierta Ventilada Blanca (CVB), la Cubierta Ventilada Aislada (CVA), la Cubierta Ventilada (CV) y las cubiertas aislada (CA) y no ventilada (CNV) en último lugar.
2. La CSB registró además temperaturas nocturnas inferiores a las del aire exterior. Con lo que se comprueba que en este caso existe una refrigeración radiativa importante.
3. La aplicación de un acabado de alta reflectancia solar y la instalación de un aislante térmico interior permiten disminuir el sobrecalentamiento de la CV de manera similar
4. La aplicación de un acabado de blanco a la hoja exterior de la CV permite disminuir el sobrecalentamiento por cubierta además de una cierta refrigeración nocturna.

La cubierta ventilada es un sistema eficaz de control térmico que puede ser complementado mediante la aplicación de aislamiento térmico y/o acabados de alta reflectancia solar. Sin embargo, la cubierta metálica de una sola hoja con acabado de alta reflectividad solar podría ser un sistema que, además de tener un comportamiento térmico más adecuado, sea económicamente más conveniente.

Será tema de futuras investigaciones el definir bajo qué condiciones podría decidirse el utilizar un sistema por encima de otro. Y los pros y contras de cada uno de ellos en cuanto a: economía, mantenimiento, aislamiento acústico, rapidez de instalación, etc.

II. Índice de tablas y figuras

Figuras

Figura 1: Radiación Solar. Promedio diario calculado con base a radiación real del plano horizontal.....	15
Figura 2: Radiación Solar Acumulada. Calculado con Heliodón en base a radiación real en el plano horizontal kWh/m2	15
Figura 3: Materiales de cubiertas en viviendas de Tabasco.....	16
Figura 4: Esquema de funcionamiento de una Cubierta Ventilada	20
Figura 5: Tipos de ventilación en cubiertas ventiladas.....	21
Figura 6: Fotografía de viviendas Malayas.....	25
Figura 7: Corte transversal de una vivienda Malaya.....	25
Figura 8: Esquema de características térmicas de la vivienda Malaya.....	26
Figura 9: Esquema constructivo de una cubierta catalana	27
Figura 10: Sistema de Cubierta Ventilada con hoja interna aislada y hoja externa de chapa metálica y tejas de barro.....	28
Figura 11: Gráfica de precipitación pluvial mensual del estado de Tabasco.....	30
Figura 12: Gráfica de humedad relativa y temperaturas promedio mensuales máximas y mínimas del estado de Tabasco.....	30
Figura 13: Vista Aérea de la ciudad de Villahermosa, Tabasco	30
Figura 14: Localización de Villahermosa, Tabasco.....	30
Figura 15: Esquema de las relaciones que existen entre los factores que intervienen en el confort térmico y su grado de influencia en el ser humano.....	31
Figura 16: Abaco Psicrométrico y análisis de Givoni donde se trazan las zonas de confort higrotérmico para invierno y verano.....	33
Figura 17: Esquema de como el ser humano disipa calor al ambiente.....	32
Figura 18: Agrupación de la variables de diseño de acuerdo a el tipo de transmisión energética sobre la que actúan.....	44
Figura 19: Esquema que ilustra las relaciones existentes entre las variables identificadas en el diseño de Cubiertas Ventiladas y el tipo de transmisión energética sobre el que actúan	44
Figura 20: Dimensiones y materiales que conforman el modelo base digital utilizado para realizar los cálculos en Design Builder	45
Figura 21: Esquema de las modificaciones a las variables de diseño realizadas al modelo base para los cálculos de los módulos de cubiertas ventiladas en el programa Design Builder.....	46
Figura 22	47

Figura 23: Esquema que muestra la calibración de las variables para cubiertas ventiladas para una adecuada disipación del calor por causa de elevada radiación solar	52
Figura 24: Variables y niveles de configuración de las cubiertas ventiladas metálicas analizadas.....	55
Figura 25: Esquema en donde se ilustra el diseño experimental factorial fraccionado del presente estudio. Las casillas ashuradas representan las interacciones omitidas de las variables.....	56
Figura 26: Grupos de experimentación.....	57
Figura 27: Duración total del experimento y tiempo en que se realizó el monitoreo para cada uno de los grupos de medición	58
Figura 28: Corte Longitudinal del edificio donde se muestra el sitio en el cual se emplazaron los módulos de Cubiertas Ventiladas utilizados en el experimento.	68
Figura 29: Planta de conjunto del sitio en el cual se instalaron los módulos de Cubiertas Ventiladas utilizadas en el experimento	68
Figura 30: El área comprendida entre las curvas de los registros de temperatura del aire exterior y de la cubierta ventilada metálica representa el sobrecalentamiento de la cubierta sobre la temperatura del aire exterior en °C-h.....	74
Figura 31: Días de estudio para el análisis de movimientos del aire para cada módulo de CV.....	89
Figura 32: Esquema donde se muestra el valor de f_0 dependiendo de la procedencia del viento.....	91
Figura 33: Otras estrategias de control térmico analizadas como alternativa al sistema de cubierta ventilada, o bien, como complemento para aumentar su eficiencia.	97
Figura 34: Puntos de medición de los módulos de cubiertas puestos a prueba en la etapa final del experimento: Otras estrategias de control térmico.	98
Figura 35: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta simple con aplicación de acabado de alta reflectividad.....	100
Figura 36: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta metálica con cámara de aire no ventilada.....	102
Figura 37: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta metálica de una sola hoja con instalación de aislamiento interior.	103
Figura 38: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta ventilada metálica con instalación de aislamiento interior.....	104
Figura 39: Esquema del grupo de medición utilizado para comparar el desempeño de la CV y el de la cubierta ventilada metálica con	

	aplicación de acabado superficial de alta reflectividad para la hoja exterior.....	105
Figura 40:	Esquema que muestra el método de obtención del índice de eficiencia térmica utilizado en la comparación de los diferentes sistemas de control térmico y cuyas referencias son: la temperatura del aire exterior - como la mínima posible – y la temperatura alcanzada por la cubierta metálica simple – como la máxima posible.	108
Figura 41:	VARIABLES DE DISEÑO Y SUS REPERCUSIONES EN EL AUMENTO O DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA CUBIERTA VENTILADA.....	132

Tablas

Tabla 1:	Valor del factor de ponderación del viento exterior (fo) según su orientación	91
Tabla 2:	VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES DEL ESTUDIO CORRELACIONAL UTILIZADO EN EL ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS DE AIRE POR LAS CAVIDADES VENTILADAS DE LAS CV.	92

Gráficas

Gráfica 1:	Temperaturas registradas por los diferentes elementos de las cubiertas ventiladas al ampliar la anchura de la cámara	48
Gráfica 2:	Temperaturas registradas por los diferentes elementos de las cubiertas ventiladas al modificar la inclinación de la cubierta.....	49
Gráfica 3:	Temperaturas registradas por los diferentes elementos de las cubiertas ventiladas al modificar la absorción del acabado superficial de la hoja exterior.	50
Gráfica 4:	En estas gráficas se muestra el criterio de selección de los días de estudio para el análisis de temperaturas de los modelos medidos. Se seleccionó el día con mayor radiación de noviembre (periodo con menor radiación del estudio) cuya temperatura del aire acumulada fuera más aproximada entre sí.	72
Gráfica 5:	Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV naturales. Grupo 01	77
Gráfica 6:	Gráficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV naturales. Grupo 01	78
Gráfica 7:	Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV Blancas. Grupo 02.....	81
Gráfica 8:	Gráficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV blancas. Grupo 02.....	82
Gráfica 9:	Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV Rojas. Grupo 03.....	83

Gráfica 10: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV rojas. Grupo 03	84
Gráfica 11: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de las CV con diferentes inclinaciones. Grupo 04.....	87
Gráfica 12: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de las CV con diferentes inclinaciones. Grupo 04.....	88
Gráfica 13: Líneas de tendencia de las correlaciones de los Parámetros Ambientales con respecto al comportamiento del aire por las cavidades ventiladas	92
Gráfica 14: Líneas de tendencia de las correlaciones de las variables de diseño de las Cubiertas Ventiladas con respecto al comportamiento del aire a través de las cavidades ventiladas.	93
Gráfica 15: Graficas que muestran la temperatura acumulada y la radiación acumulada de los días de estudio seleccionados para llevar a cabo el análisis de los grupos de modelos de cubiertas que se compararon con el desempeño de la CV.....	107
Gráfica 16: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Simple Blanca (CSB).	110
Gráfica 17: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Simple Blanca (CSB).	111
Gráfica 18: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta No Ventilada(CNV).....	114
Gráfica 19: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta No Ventilada (CNV).....	115
Gráfica 20: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Aislada de una sola hoja (CA).....	116
Gráfica 21: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Aislada de una sola hoja (CA).....	117
Gráfica 22: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con aislamiento en la cara interior (CVA).....	119
Gráfica 23: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con aislamiento en la cara interior (CVA).....	120
Gráfica 24: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con acabado de alta reflectividad solar (CVB).....	122

Gráfica 25: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada (CV) y la Cubierta Ventilada con acabado de alta reflectividad solar (CVB).	123
Gráfica 26: Gráficas de las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada Blanca (CVA) y la Cubierta Ventilada con aislamiento en la cara interior (CVA).....	125
Gráfica 27: Graficas de los incrementos de temperatura que presentaron los diferentes puntos de medición de la Cubierta Ventilada Blanca (CVB) y la Cubierta Ventilada con aislamiento interior (CVA).....	126
Gráfica 28: Gráfica de los índices de eficiencia térmica que obtuvieron cada uno de los módulos de cubiertas analizados para los 5 días muestra analizados.....	128

IV. Referencias bibliográficas

- [1] R. Serra Florensa and H. Coch Roura, *Arquitectura y energía natural*, 1st ed. Barcelona: Edicions UPC, 1995.
- [2] B. Stagno, “La Creatividad En El Techo Bioclimático Tropical,” 2007.
- [3] C. Kabre, “A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 3, pp. 727–738, Mar. 2010.
- [4] a. Gagliano, F. Patania, F. Nocera, a. Ferlito, and a. Galesi, “Thermal performance of ventilated roofs during summer period,” *Energy Build.*, vol. 49, pp. 611–618, Jun. 2012.
- [5] R. Serra Florensa, *Arquitectura y climas*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1999.
- [6] B. Stagno, “Affordable Sustainable Construction. Construcción Sostenible Abordable,” *Inst. Arq. Trop.*, 2013.
- [7] R. Segre, “En búsqueda de la Identidad olvidada,” 2014.
- [8] O. Klein and J. Schlenger, *Room Conditioning*. Birkhäuser.
- [9] INEGI, “México en cifras. Información Nacional por entidad federativa y municipios.” [Online]. Available: <http://www3.inegi.org.mx/>.
- [10] G. Barrios, G. Huelsz, J. Rojas, J. M. Ochoa, and I. Marincic, “Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings,” *Energy Build.*, vol. 50, pp. 120–127, Jul. 2012.
- [11] A. Auliciems and S. V Szokolay, “Thermal comfort,” in *Passive and Low Energy Architecture International. DESIGN TOOLS AND TECHNIQUES. Note 3*, 2007, p. 66.
- [12] M. Fernández Perez, J. Costal Blanco, and J. I. Del Campo Dominguez, *Albañil. Manual práctico de enfoscados, guarnecidos, enlucidos y construcción de cimientos, saneamientos, obra de fabrica y cubiertas*. Ideas Propias Editorial, 2004.
- [13] M. Gimaraes Merçon, “Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo Análisis térmico de la cubierta ventilada Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo Análisis térmico de la cubierta ventilada,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.
- [14] B. Givoni, *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [15] A. Mitja and J. A. Cusidó, “Refrigeracion natural en los edificios,” in *Tecnologías Avanzadas en Aborro y Eficiencia Energética.*, J. Jorge, Ed. Generalitat de Catalunya Departament de Industria y Energía, 1993.
- [16] M. Santamouris and D. Kolokotsa, “Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art,” *Energy Build.*, vol. 57, pp. 74–94, Feb. 2013.
- [17] E. M. G. C, “Enfriamiento radiativo en edificaciones,” no. 58, pp. 9–42, 2002.
- [18] Q. Roslan, S. H. Ibrahim, R. Affandi, M. N. Mohd Nawi, and A. Baharun, “A literature review on the improvement strategies of passive design for the roofing system of the modern house in a hot and humid climate region,” *Front. Archit. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 126–133, 2015.
- [19] C. Sambricio and M. Á. Mira, “Manual de directrices para la conservación de Casa las Flores. Ficha de elementos,” E.008.01, 2007.
- [20] R. Araujo Armero, *La arquitectura como técnica*. A.T.C Ediciones, 2007.

- [21] I. Paricio and C. Pardal, “Añagazas de la fachada ventilada: ¿pluvial o revestida?,” *Palimpsesto*, no. 9, p. 5.
- [22] P. H. Biwole, M. Woloszyn, and C. Pompeo, “Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 8, pp. 1487–1497, Jan. 2008.
- [23] B. Givoni, *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Publishing Company Limited, 1969.
- [24] P.-C. Chang, C.-M. Chiang, and C.-M. Lai, “Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system),” *Energy Build.*, vol. 40, no. 2, pp. 140–147, Jan. 2008.
- [25] S. Lee, S. H. Park, M. S. Yeo, and K. W. Kim, “An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 7, pp. 1431–1439, Jul. 2009.
- [26] B. Černe and S. Medved, “Determination of transient two-dimensional heat transfer in ventilated lightweight low sloped roof using Fourier series,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 6, pp. 2279–2288, Jun. 2007.
- [27] J. Košny, K. Biswas, W. Miller, and S. Kriner, “Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2504–2514, Sep. 2012.
- [28] M. B. Özdeniz and P. Hançer, “Suitable roof constructions for warm climates - Gazimäusa case,” *Energy Build.*, vol. 37, no. 6, pp. 643–649, 2005.
- [29] O. Manca, A. Mangiacapra, S. Marino, and S. Nardini, “Numerical Investigation on Thermal Behaviors of an Inclined Ventilated Roof,” *Vol. 2 Dyn. Vib. Control. Energy; Fluids Eng. Micro Nano Manuf.*, vol. 2, p. V002T09A017, 2014.
- [30] a. Dimoudi, a. Androutsopoulos, and S. Lykoudis, “Summer performance of a ventilated roof component,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 6, pp. 610–617, Jun. 2006.
- [31] M. Ciampi, F. Leccese, and G. Tuoni, “Energy analysis of ventilated and microventilated roofs,” *Sol. Energy*, vol. 79, no. 2, pp. 183–192, Aug. 2005.
- [32] M. Labat, M. Woloszyn, G. Garnier, G. Rusaouen, and J. J. Roux, “Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: Experimental and numerical investigations,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2549–2560, Sep. 2012.
- [33] C. Afonso and A. C. Oliveira, “Solar chimneys: simulation and experiment,” *Energy Build.*, vol. 32, pp. 71 – 79, 2000.
- [34] D. Borge-Diez, A. Colmenar-Santos, C. Pérez-Molina, and M. Castro-Gil, “Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti,” *Build. Environ.*, vol. 59, pp. 116–126, Jan. 2013.
- [35] I. E. Europe, T. A. Task, D. Dissemination, P. U. Due, and M. Zinzi, “COOL ROOFS ‘ The Cool Roofs Material DATABASE ,” no. September 2008, 2009.
- [36] E. Cool and R. Council, “COOL ROOFS CASE STUDIES IN EU LEVEL.”
- [37] a. Synnefa, M. Saliari, and M. Santamouris, “Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens,” *Energy Build.*, vol. 55, pp. 7–15, Dec. 2012.
- [38] K. Banionis, E. Monstvilas, V. Stankevičius, R. Bliūdžius, and K. Miškinis, “Impact of heat reflective coatings on heat flows through the ventilated roof with steel coatings,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 18, no. 4, pp. 505–511, 2012.

- [39] V. (UPC) Escobar Ruiz, “Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [40] I. Peña Núñez, “Psicología,” p. 82, 2013.
- [41] L. Nekane Balluerka and A. I. Vergara Iraeta, *Diseño de investigación experimental en psicología*. 2002.
- [42] R. E. Kirk, *Experimental Design: Procedures for the Behavioral Sciences*, 3° ed. 1995.
- [43] E. C. R. Council, “Product Rating Program.” [Online]. Available: <http://coolroofcouncil.eu/prp.php>.
- [44] C. A. Poynton, *Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces*, 2° ed. Elsevier, 2012.