

DOI: 10.24275/uama.5761.7658

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO

Posgrado en Diseño Bioclimático

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO INDIRECTO EN CUBIERTAS PARA OBTENER CONFORT HIGROTÉRMICO EN EDIFICACIONES EN CLIMAS CÁLIDO-HÚMEDOS

Eréndira Anais Carrillo Salas

Tesis para optar por el grado de:
Doctora en Diseño Bioclimático

Miembros del Jurado:

Dr. José Roberto García Chávez

Director de la Tesis

Dra. Cecilia Bañuelos Barrón

Dr. Iván Garmendia Ramírez

Dr. Luis Fernando Guerrero Baca

Dr. Ricardo Aguayo González

Ciudad de México

Julio de 2020

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO INDIRECTO EN CUBIERTAS PARA OBTENER CONFORT HIGROTÉRMICO EN EDIFICACIONES EN CLIMAS CÁLIDO-HÚMEDOS

Eréndira Anais Carrillo Salas
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

Resumen

En el área de diseño arquitectónico, la problemática ambiental actual en el mundo debido al calentamiento global por el alto consumo de energía convencional, ha generado la preocupación por realizar investigaciones, en donde el principal objetivo es reducir el consumo energético.

En la República mexicana, el consumo de energía eléctrica es provista en un 88% al sector residencial y es empleada principalmente en sistemas de climatización, ya que el 27% del país presenta condiciones de climas cálidos o tropicales. El diseño arquitectónico bioclimático permite, por medio de sistemas pasivos, proveer condiciones de confort al interior de las edificaciones sin la utilización de sistemas activos y, en el caso de climas cálidos, existen diversas técnicas para obtener enfriamiento en los espacios habitables.

La presente investigación aborda técnicas pasivas de enfriamiento para reducir el consumo energético en climas cálido-húmedos en donde el objetivo fue caracterizar diferentes estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto. El trabajo se realizó en la Ciudad de Mérida en modelos físicos a escala en donde se implementaron diferentes estrategias de enfriamiento en la cubierta con base en el sistema de techo-estanque, modificando los materiales. En el experimento 1 se empleó agua y en el 2 se colocó un material de cambio de fase (aceite de coco) encapsulado en una placa de policarbonato de 6 mm.

Se realizaron mediciones durante 20 días en periodos de bajo y sobrecalentamiento; y en el caso del aceite de coco se consideró el periodo más desfavorable, el periodo de sobrecalentamiento.

Los resultados demostraron que los cinco sistemas de enfriamiento, tanto con empleo de agua, como con aceite de coco encapsulado, presentaron una reducción de la TBS al interior de los espacios investigados. El Módulo 5 sin embargo es el experimento que mostró los mejores resultados reduciendo la TBS en 3.7 K (agua) y 4.9 K (aceite de coco).

Palabras clave: Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto / Material de cambio de fase / Confort térmico / Climas cálido-húmedos.

CHARACTERIZATION OF INDIRECT EVAPORATIVE COOLING SYSTEMS ON ROOFS TO OBTAIN HYGROTHERMAL COMFORT IN BUILDINGS IN HOT-HUMID CLIMATES

Eréndira Anais Carrillo Salas
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

Abstract

In the area of architectural design, the current environmental problem in the world due to global warming because of the high consumption of conventional energy, has generated concern for conducting research, where the main objective is to reduce energy consumption.

In the Mexican Republic, 88% of electricity consumption is provided to the residential sector and is mainly used in air conditioning systems, since 27% of the country has hot or tropical climate conditions. The bioclimatic architectural design allows, through passive systems, to provide comfort conditions inside the buildings without the use of active systems and, in the case of hot climates, there are different techniques to obtain cooling in living spaces.

This research addresses passive cooling techniques to reduce energy consumption in hot-humid climates where the objective was to characterize different indirect evaporative cooling strategies. The work was carried out in the City of Merida on physical scale models where different cooling strategies were implemented in the roof based on the roof-pond system, modifying the materials. In Experiment 1 water was used and in Experiment 2 a phase change material (coconut oil) encapsulated in a 6 mm polycarbonate plate was placed.

Measurements were made for 20 days in periods of low and overheating; and in the case of coconut oil, the most unfavorable period was considered, the period of overheating.

The results showed that the five cooling systems, both with the use of water and with encapsulated coconut oil, showed a reduction of the TBS inside the investigated spaces. Module 5 however is the experiment that showed the best results reducing its DBT by 3.7 K (water) and 4.9 K (coconut oil).

Keywords: Indirect evaporative cooling systems / Phase change material / Thermal comfort / Hot-humid climates

INDICE GENERAL

Resumen	I
Abstract	II
Indice de figuras	III
Indice de tablas	VIII
Indice de ecuaciones	IX
Abreviaturas y unidades	X
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	10
1.1.1 Enfriamiento evaporativo indirecto en cubiertas	11
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos particulares	17
1.4 Hipótesis	18
1.5 Justificación de la investigación	18
1.6 Preguntas de investigación	20
1.7 Procedimiento metodológico	20
1.8 Descripción del capitulado	21
1.9 Resultados y aportaciones	24
2 Dispositivos e Investigaciones de Enfriamiento Pasivo en cubiertas: Revisión Histórica	26
2.1 Estado del Arte	26
2.1.1 Enfriamiento pasivo empleando agua como masa térmica	26
2.1.2 Enfriamiento pasivo empleando aceite de coco (MCF)	40
2.2 Casos Análogos	43
3 Sistemas pasivos de enfriamiento, confort higrotérmico y análisis climático	52
3.1 Sistemas pasivos de enfriamiento	52
3.1.1 Sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo indirecto	53
3.1.2 Sistemas pasivos de enfriamiento radiativo nocturno	54
3.1.3 Aislamiento térmico	54
3.1.4 Protección solar	55
3.1.5 Masa térmica	55
3.1.5.1 Materiales de cambio de fase	56

3.2	Confort térmico	59
3.2.1	Variables determinantes del confort térmico	60
3.2.2	Modelos de confort térmico	62
3.3	Caso de estudio: Ciudad de Mérida, análisis climático	68
4	Metodología, diseño experimental y elementos de análisis.....	88
4.1	Método de la investigación	88
4.1.1	Nivel de estudio	88
4.1.2	Enfoque y tipo de estudio	89
4.1.3	Objeto de estudio	89
4.1.4	Objetivo del experimento	89
4.1.5	Preguntas de investigación	89
4.1.6	Alcances y limitaciones	90
4.1.7	Variables de estudio	91
4.2	Diseño del experimento	92
4.2.1	Tipo de experimento	92
4.2.2	Universo de estudio	93
4.2.2.1	Área de referencia	93
4.2.2.2	Área específica	93
4.2.2.3	Escenario experimental	93
4.2.3	Diseño y etapas del procedimiento experimental	93
4.2.4	Módulos experimentales	96
4.2.4.1	Módulo de control (MC)	96
4.2.4.2	Módulo 1: EEI y PS	97
4.2.4.3	Módulo 2: MT y AT	98
4.2.4.4	Módulo 3: ERN y MT	99
4.2.4.5	Módulo 4: EEI, MT y PS	100
4.2.4.6	Módulo 5: ERN, EEI, MT y PS	101
4.2.5	Tipos de experimento	102
4.2.6	Periodo de estudio	104
4.2.7	Instrumental de medición	104
4.2.7.1	Descripción del equipo	104
4.2.7.2	Colocación	105
4.3	Elementos del análisis del comportamiento térmico	106
4.3.1	Temperaturas características en ME	106
4.3.2	PEM	106
4.3.3	Confort térmico	107
5	Experimentación con modelos físicos en la Ciudad de Mérida: Prueba Piloto	111
5.1	Descripción de distribución y colocación de los módulos experimentales	111
5.2	Análisis de resultados	114
5.3	Retroalimentación	118

6 Resultados: Descripción y Análisis.....	119
6.1 Experimento 1	119
6.1.1 Periodo de bajocalentamiento	119
6.1.1.1 Análisis de temperaturas características	119
6.1.1.2 Análisis del PEM	130
6.1.1.3 Análisis de confort térmico	131
6.1.2 Periodo de sobrecalentamiento	137
6.1.2.1 Análisis de temperaturas características	137
6.1.2.2 Análisis de PEM	148
6.1.2.3 Análisis de confort térmico	149
6.2 Experimento 2	155
6.2.1 Análisis de temperaturas características	155
6.2.2 Análisis del PEM	158
6.2.3 Análisis de confort térmico	159
7 Conclusiones.....	162
7.1 Descripción del trabajo realizado	162
7.2 Conclusiones del estudio	163
7.2.1 Experimento 1 (Periodo de bajocalentamiento)	163
7.2.2 Experimento 1 (Periodo de sobrecalentamiento)	165
7.2.3 Experimento 2	167
7.2.4 Conclusiones generales	169
7.3 Aportación al diseño	177
7.4 Recomendación para futuras investigaciones	178
Fuentes de consulta	179
Anexos	189
CV	

INDICE DE FIGURAS

1 Introducción

1-1	Aumento de la temperatura media global en la superficie y proyección al año 2020	1
1-2	Mapa de consumo de energía mundial en 2017 (Kwh per cápita)	2
1-3	Consumo de energía en México (Kwh per cápita)	3
1-4	Generación bruta por tipo de tecnología en México	5
1-5	Evolución anual de clientes de CFE por sector en México	5
1-6	Consumo eléctrico mensual en México	6
1-7	Clasificación de métodos de enfriamiento pasivo para edificaciones	9
1-8	Skytherm, esquema de funcionamiento durante verano e invierno	12
1-9	Harold Hay junto al prototipo de Phoenix	13
1-10	Esquemas ilustrativos de diferentes tipos de roof ponds	15
1-11	Mapa de clasificación climática de Köppen-García	19
1-12	Diagrama de procedimiento metodológico	22

2 Dispositivos e Investigaciones de Enfriamiento Pasivo en cubiertas: Revisión Histórica

2-1	Profundidad máxima de agua a temperaturas mínimas en enero, abril y julio de 1984	27
2-2	Módulo experimental EVITA	29
2-3	Configuración experimental, módulo con toallas lado izquierdo	29
2-4	Esquema de arreglo experimental para simulación	30
2-5	Esquema del modelo: (a) habitación con sistema de enfriamiento; (b) habitación sin sistema de enfriamiento	30
2-6	Módulos experimentales con chimenea solar y sistema de aspersores	32
2-7	Esquema del funcionamiento del modelo experimental	32
2-8	Corte esquemático del arreglo experimental	33
2-9	Corte esquemático del sistema para enfriamiento utilizado en la simulación	34
2-10	De izquierda a derecha en orden descendente: panel móvil, pérgola móvil, de madera, concreto y vigueta sin bovedilla, panel fijo, bóveda de ferrocemento y ladrillo, cañón corrido con descarga de calor, pérgola fija de madera, poliestireno con aberturas verticales y lámina de policarbonato	35
2-11	Vista al interior del experimento	35
2-12	Esquemas de experimento, a la izquierda utilizando cubierta de polietileno y a la derecha tanque abierto	37
2-13	Esquemas ilustrativos del módulo experimental y el de control	38
2-14	Módulo experimental y módulo de control	39
2-15	Balance térmico del roof pond	40
2-16	Arreglo experimental para medición de temperatura	41
2-17	Experimento en paredes empleando MCF	42
2-18	Arreglo experimental de medición para célula de aceite de coco	42
2-19	Esquemas de modelos experimentales	44
2-20	Esquema de módulos experimentales	45
2-21	Esquemas constructivos y fotografía de modelo experimental a escala real	46
2-22	Esquema y fotografías de experimento no. 3	47
2-23	Fotografía y esquema de montaje experimental del módulo de control y equipo de medición utilizado	48
2-24	Esquemas de funcionamiento, detalle constructivo y fotografía de módulo experimental.	49

2-25	Fotografías de montajes experimentales y esquema arquitectónico de módulos experimentales preexistentes.	50
------	--	----

3 Sistemas pasivos de enfriamiento, confort higrotérmico y análisis climático

3-1	Estanque de enfriamiento	53
3-2	Esquema de funcionamiento del sistema “Skytherm” de Harlod Hay	54
3-3	Esquema de intercambio térmico, fachada izquierda sin aislamiento, fachada derecha con aislamiento	55
3-4	Diferentes tipos de protección solar en fachada de edificio	55
3-5	Masa térmica en piso de vivienda	56
3-6	Clasificación de los materiales de cambio de fase	58
3-7	Gráfica de confort térmico en función de la temperatura del aire y la humedad relativa	60
3-8	Gráfica de confort térmico en función de la temperatura del aire y la velocidad del aire	61
3-9	Gráfica de confort térmico en función de la temperatura del aire y la temperatura de las superficies	62
3-10	Categoría de ambientes térmicos de acuerdo con la norma ISO 7730	64
3-11	Escalas de sensación térmica	65
3-12	Ilustración del mapa de la República Mexicana señalando la ubicación de la Ciudad de Mérida	68
3-13	Vista aérea de Ciudad de Mérida con respecto a la Península de Yucatán (2018)	69
3-14	Mapa de entidades federativas de Yucatán.	69
3-15	Mapa de climas según Köppen	70
3-16	Clasificación climática de la Península de Yucatán	71
3-17	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media anual, considerando el rango de confort en 5K	73
3-18	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media anual, considerando el rango de confort en 5K	74
3-19	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media anual, considerando el rango de confort en 7K	75
3-20	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media anual, considerando el rango de confort en 7K	76
3-21	21 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 5K	77
3-22	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 5K	78
3-23	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 7K	79
3-24	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 7K	80
3-25	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media del mes más frío, considerando el rango de confort en 5K	81
3-26	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más frío, considerando el rango de confort en 5K	82
3-27	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media del mes más frío, considerando el rango de	83

	confort en 7K	
3-28	Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más frío, considerando el rango de confort en 7K	84

4 Metodología, diseño experimental y elementos de análisis

4-1	Esquema de variables del experimento	91
4-2	Clasificación climática mundial de Köppen-Geiger actualizada por Kottek, M. et al.	94
4-3	Ciudad de Mérida en la Península de Yucatán	94
4-4	Ubicación de la Ciudad de Mérida dentro del Estado de Yucatán	95
4-5	Ubicación del sitio de experimentación dentro de la mancha urbana de la Ciudad de Mérida	95
4-6	Esquema del MC	97
4-7	Modelos volumétricos del MC	97
4-8	Esquema del M1	98
4-9	Modelos volumétricos del M1	98
4-10	Esquema del M2	98
4-11	Modelos volumétricos del M2	99
4-12	Esquema del M3	99
4-13	Modelos volumétricos del M3	100
4-14	Esquema del M4	100
4-15	Modelos volumétricos del M4	101
4-16	Esquema del M5	101
4-17	Modelos volumétricos del M5	102
4-18	Esquema de placa de policarbonato con aceite de coco	102
4-19	Registro fotográfico de experimento 1	103
4-20	De izq a der. Instrumental de medición en M5 de experimento 2; Placa de policarbonato con MCF; Colocación de sonda de medición en M5	104
4-21	HOBO U-12	104
4-22	Colocación de HOBO U- 12 en M5	105
4-23	Distribución de los ME y MC en la cubierta	105
4-24	Cálculo de U para el caso de estudio.	108

5 Experimentación con modelos físicos en la Ciudad de Mérida: Prueba Piloto

		111
5-1	Colocación de equipos en el MC para calibración	112
5-2	Colocación de Easy Log en MC	112
5-3	Colocación de Hobo U-12 con sensores de superficie y agua dentro del Módulo 4	112
5-4	Colocación de Hobo U-12 dentro de la pantalla de Stevenson	113
5-5	Vaciado de charolas para retiro de equipos de medición	113
5-6	TBS promedio horaria de prueba piloto	117
5-7	HR promedio horaria de prueba piloto	117

6 Resultados: Descripción y análisis

6-1	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA y el MC del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	120
6-2	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA y el MC del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	120
6-3	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M1 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	121
6-4	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados	122

	en la EMA, MC y M1 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	
6-5	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M2 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	122
6-6	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M2 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	123
6-7	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M3 del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	124
6-8	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M3 del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	124
6-9	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M4 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	125
6-10	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M4 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	126
6-11	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M5 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	126
6-12	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M5 del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	127
6-13	Gráfica de análisis de eficiencia por temperaturas características del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	128
6-14	Gráfica de comportamiento de TBS horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	129
6-15	Gráfica de comportamiento de HR horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	129
6-16	Gráfica de potencial de enfriamiento media del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento	131
6-17	Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (5 K)	132
6-18	Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (5K)	134
6-19	Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (5 K)	134
6-20	Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (7K)	135
6-21	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S. y el MC del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento	137
6-22	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S y el MC del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	138
6-23	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M1 del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento	139
6-24	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S, MC y M1 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	140
6-25	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M2 del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento	140
6-26	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M2 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	141
6-27	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M3 del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento	142
6-28	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M3 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	142
6-29	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M4 del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento	143
6-30	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M4 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	144
6-31	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la	144

	EMA, P.S., MC y M5 del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento	
6-32	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M5 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	145
6-33	Gráfica de análisis de eficiencia por temperaturas características del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	146
6-34	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	147
6-35	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	147
6-36	Gráfica de potencial de enfriamiento media del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	148
6-37	Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (5 K)	150
6-38	Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (5K)	152
6-39	Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (7 K)	152
6-40	Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (7K).	153
6-41	Gráfica de TBS promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2	157
6-42	Gráfica de HR promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M6 del experimento 2	158
6-43	Gráfica de confort térmico horaria del experimento 2 (5K)	159
6-44	Gráfica de confort térmico horaria del experimento 2 (7K)	160

7 Conclusiones

7-1	Gráfica de comportamiento de TBS horaria del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	164
7-2	Gráfica de comportamiento de HR horaria del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	164
7-3	Gráfica de comportamiento de temperatura horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	166
7-4	Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	166
7-5	Gráfica de TBS promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2	168
7-6	Gráfica de HR promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2	168
7-7	Gráfica de correlación de TBS entre MC y ME del experimento 1	169
7-8	Gráfica de correlación de TBS entre MC y ME del experimento 1	171
7-9	P.E.M. de diversos casos de estudio	175
7-10	Decremento de temperatura de diversos casos de estudio (MCF).	176

INDICE DE TABLAS

2 Dispositivos e Investigaciones de Enfriamiento Pasivo en cubiertas: Revisión Histórica

2-1	Resumen de investigación “Evaluación de un Techo Estanque como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo (1993)”.	43
2-2	Resumen del estudio “Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions (2003)	45
2-3	Resumen del estudio “Testing and modelling an evaporative passive cooling system in a hot humid climate – Maracaibo (2005)	46
2-4	Resumen de la investigación “Estudio experimental de comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo (2011)	47
2-5	Resumen del trabajo “Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo (2013)	48
2-6	Resumen del trabajo “Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer. (2014)	49
2-7	Resumen del trabajo “Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo. (2015)”.	50

3 Sistemas pasivos de enfriamiento, confort higrotérmico y análisis climático

3-1	Tipos de clima cálidos con lluvias en verano.	70
3-2	Data climática de la Ciudad de Mérida	72
3-3	Nomenclatura de factores climáticos	72
3-4	Valores de rangos de confort para análisis bioclimático	73
3-5	Resumen de requerimientos y valores determinados en análisis bioclimático a través de la carta psicrométrica para la Ciudad de Mérida	86

4 Metodología, diseño experimental y elementos de análisis

4-1	Tabla comparativa de rangos de confort determinados en estudios realizados para climas cálidos-subhúmedos y cálidos-húmedos	109
4-2	Rango de índices térmicos	109
4-3	Valores empleados para análisis de confort térmico	110

5 Experimentación con modelos físicos en la Ciudad de Mérida: Prueba Piloto

5-1	Tabla resumen de resultados – Prueba piloto	114
5-2	Valores de TBS promedio horaria P.S, MC, M1, M2, M3 – Prueba piloto	115
5-3	Valores de HR promedio horaria P.S, MC, M1, M2, M3 – Prueba piloto	116

6 Resultados: Descripción y análisis

6-1	Tabla resumen de resultados del experimento 1 en el periodo de bajo calentamiento	127
6-2	Resumen de resultados del PEM para cada módulo del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento	130
6-3	Valores empleados para análisis de confort térmico en periodo de bajocalentamiento	131
6-4	Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de	133

	bajocalentamiento (5 K)	
6-5	Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de bajocalentamiento (7 K)	136
6-6	Tabla resumen de resultados del experimento 1 en el periodo de sobrecalentamiento	145
6-7	Resumen de resultados del PEM para cada módulo del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento	148
6-8	Valores empleados para análisis de confort térmico en periodo de sobrecalentamiento.	149
6-9	Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de sobrecalentamiento (5 K)	151
6-10	Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de sobrecalentamiento (7 K)	154
6-11	Valores promedio, mínimos y máximos de TBS y HR del experimento 2.	156
6-12	Resumen de resultados del experimento 2	157
6-13	Confort térmico horario del experimento 2 (5 K)	160
6-14	Confort térmico horario del experimento 2 (7 K)	161

7 Conclusiones

7-1	Coeficientes de correlación de los ME VS MC	170
7-2	Ecuaciones de tendencia para los experimentos 1 y 2	171
7-3	Resumen de valores de análisis de temperaturas características, P.E.M. y Confort térmico del experimento 1 durante el periodo de bajo y sobrecalentamiento	172
7-4	Resumen de valores de análisis de temperaturas características, P.E.M. y Confort térmico del experimento 1 y 2 durante el periodo de sobrecalentamiento	173
7-5	P.E.M. en casos de estudio similares	174
7-6	Decremento de temperatura en casos de estudio similares	176

INDICE DE ECUACIONES

3 Sistemas pasivos de enfriamiento, confort higrotérmico y análisis climático

1	Tasa metabólica	63
2	Ecuación de comodidad	63
3	Voto medio previsto	64
4	Porcentaje de personas en discomfort	64
5	Temperatura neutra (Humphreys a)	66
6	Temperatura neutra (Humphreys b)	66
7	Temperatura neutra (Auliciems)	66
8	Temperatura neutra (Griffiths)	67
9	Temperatura neutra (Nicol)	67

4 Metodología, diseño experimental y elementos de análisis

10	Potencial de enfriamiento medio	106
11	Coeficiente de pérdida de calor	107
9	Temperatura neutra (Nicol)	107

ABREVIATURAS

Abreviatura	Concepto
AT	Aislamiento térmico
BC	Bajocalentamiento
E EI	Enfriamiento evaporativo indirecto
EMA	Estación meteorológica automática
ERN	Enfriamiento radiativo nocturno
HR	Humedad relativa
L INF	Límite inferior
L SUP	Límite superior
MC	Módulo de control
MCF	Material de cambio de fase
ME	Módulo experimental
MT	Masa térmica
TBS	Temperatura de bulbo seco
Tn	Temperatura neutra
PEM	Potencial de enfriamiento medio
PS	Protección solar
SC	Sobrecalentamiento
SPE	Sistemas pasivos de enfriamiento
SEEI	Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto
SPEE	Sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo
V	Ventilación

UNIDADES

Unidad	Concepto
°C	Grados Celsius
K	Kelvin
m	metro
hr	hora
s	segundo
m ²	metro cuadrado
W	Watt

1 INTRODUCCIÓN

INDICE

1.1 Antecedentes	10
1.1.1 Enfriamiento evaporativo indirecto en cubiertas	11
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos particulares	17
1.4 Hipótesis	18
1.5 Justificación de la investigación	18
1.6 Preguntas de investigación	20
1.7 Procedimiento metodológico	20
1.8 Descripción del capitulado	21
1.9 Resultados y aportaciones	24

1. Introducción

Actualmente el mundo se encuentra ante una problemática ambiental importante definida por el calentamiento global debido al incremento de los gases de efecto invernadero, principalmente del dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (NxOy), generado por influencia humana (Quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2016).

Mencionando algunas consecuencias del calentamiento global se encuentra el continuo retroceso de los glaciares, el permafrost y la banquisa, fenómenos meteorológicos más extremos y frecuentes, acidificación del océano y el incremento de la temperatura superficial, entre otros. Las proyecciones de los modelos climáticos (Fig. 1-1) indican que la temperatura incrementará entre 0.3 y 1.7 °C, en el caso del escenario de emisiones más bajas.

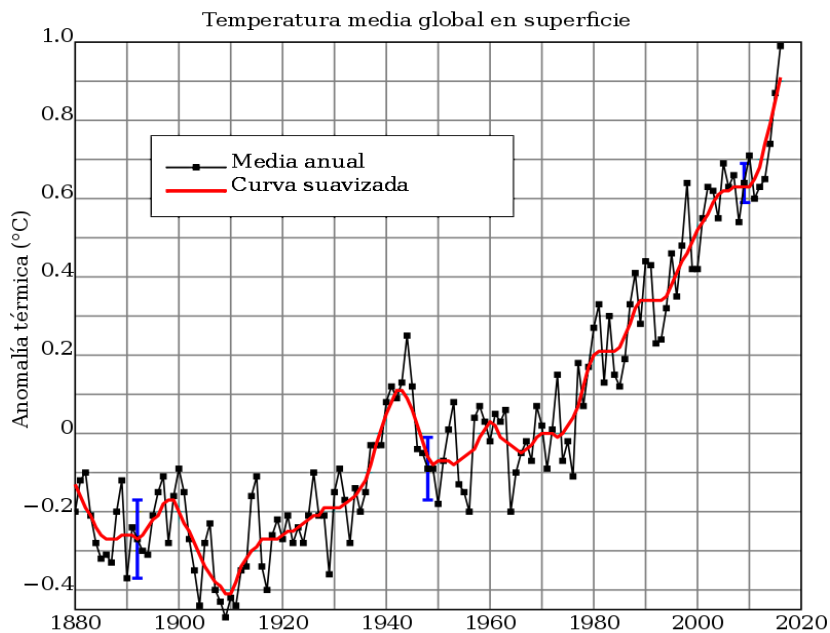


Fig. 1-1 Aumento de la temperatura media global en la superficie y proyección al año 2020. Fuente: National Aeronautics and Space Administration NASA (2018) <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>

Las consecuencias pueden ser generadas por diversas acciones humanas, sin embargo, una de las más importantes se refiere a la generación de la energía y es que a través de los años el ser humano ha incrementado la utilización de los recursos naturales debido al crecimiento poblacional y al modelo actual del estilo de vida. Cada país debe de cubrir las necesidades de iluminación,

transporte, calefacción o refrigeración, desarrollo industrial y alimentación, entre otros, necesidades que crean una dependencia energética.

Año con año, esta dependencia aumenta y Canadá es el país que consume alrededor del 49% de la energía mundial con un indicador de más de 15.55 miles de KWh per cápita (Fig. 1-2), siguiendo en decremento con Noruega, Estados Unidos, Alaska, Países Bajos, Rusia, Australia, Europa Central, África, Asia Central y Sur, México y América del Sur,

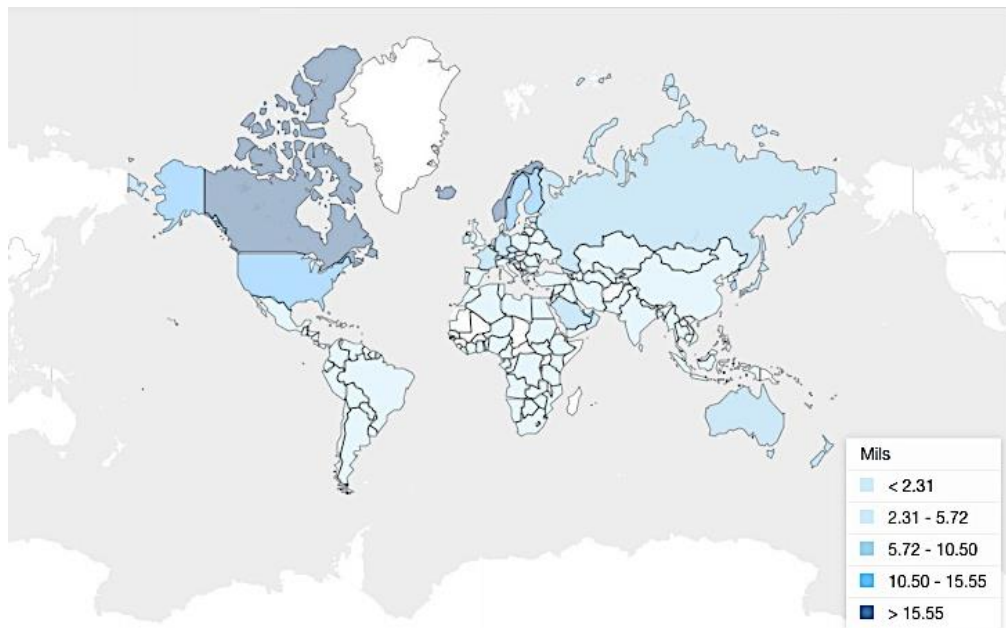


Fig. 1-2 Mapa de consumo de energía mundial en 2017 (Kwh per cápita) Fuente: IEA (International Energy Agency) a través del Banco Mundial.

La tendencia del consumo energético ha aumentado exponencialmente y en México se ha registrado un incremento (Fig. 1-3) de 1.2 kWh en 1970 a 3.3 kWh en 2017 (per cápita). Existen diversos factores en los que se puede analizar el incremento tales como el aumento poblacional y el incremento económico, entre otros.

Sin embargo, una de las problemáticas más importantes que se liga al cambio climático es la forma en la que se genera el 90% de esta energía (a nivel mundial), la cual es través de los combustibles fósiles (Ángeles, 2016) tales como el petróleo, el carbón y el gas, recursos no renovables y altamente contaminantes.

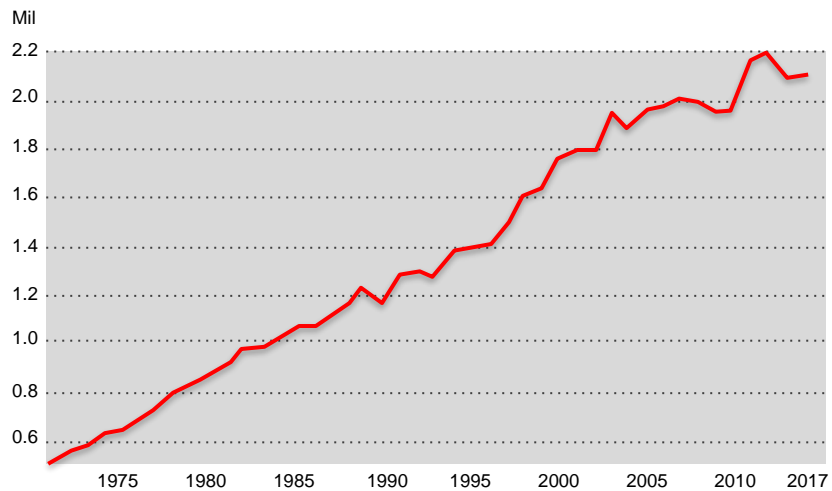


Fig. 1-3 Consumo de energía en México (Kwh per cápita). Fuente: Elaboración propia basado en datos de la IEA (International Energy Agency), a través del Banco Mundial.

Las energías renovables o limpias son aquellas que permiten el aprovechamiento de recursos locales suministrando energía a menores costos ambientales a comparación de las convencionales, por lo que representan una opción interesante pero poco explotada debido a los intereses económicos. De acuerdo con Ángeles, 2016, se dividen en:

- Energía Eólica: Energía obtenida de las corrientes del aire terrestre.
- Energía Solar: Sistemas que aprovechan la radiación solar incidente sobre la Tierra.
- Energía Geotérmica: Aquella obtenida del calor del interior de la Tierra.
- Energía Hidráulica: Obtenida del aprovechamiento de la energía potencial gravitatoria del agua.
- Energía de las Olas: Obtenida del movimiento del agua en la superficie de los océanos y mares.
- Biogás: Gas generado por la descomposición de materia orgánica.
- Energía a partir del Hidrógeno: Extraído del Metanol, que a su vez es extraído del gas Metano de las tierras de relleno sanitario y el estiércol de cerdo, entre otros. El hidrógeno sólido almacenado en una píldora es el nuevo equivalente de la gasolina para los vehículos.

- Biocombustibles: Obtenidos a partir de la transformación de materias primas (como la soya, el girasol, maíz, ricino y cártamo, entre otros) en aceites vegetales, utilizados para el abastecimiento de combustible.

Por otra parte, existen energías que se consideran limpias en el proceso de obtención de energía, sin embargo, los componentes resultantes son contaminantes:

- Energía Nuclear: Una reacción nuclear consiste en la modificación de la composición del núcleo atómico de un elemento, que muta y pasa a ser otro elemento como consecuencia del proceso. Para convertirla en calor, existe el proceso de la fisión nuclear, en la que un núcleo atómico se subdivide en dos o más grupos de partículas. La energía nuclear, tiene como principal ventaja que no utiliza combustibles fósiles con lo que no emite a la atmósfera gases tóxicos o de efecto invernadero, sin embargo, es altamente riesgoso y genera residuos altamente tóxicos.
- Combustión interna y lecho fluidizado: Es una tecnología de combustión usada en centrales eléctricas. Esta tecnología permite una mayor flexibilidad en el uso de combustible como carbón, biomasa, basura, entre otros, además de un mayor aprovechamiento del combustible y una mejor transferencia del calor producido durante la combustión. Un lecho fluido está formado por el combustible en pedazos (aproximadamente es un 2 - 5% del peso total del lecho) y el lecho propiamente dicho (cenizas, piedra caliza, material adicional, ente otros). No se permite la fundición del lecho, por lo que la temperatura está limitada a 850-900°C. El lecho fluido sustenta el combustible sólido mientras se bombea aire hacia arriba durante la combustión. El resultado es la formación de remolinos que favorecen la mezcla del gas y del combustible. Los gases son liberados a la atmósfera.
- Turbogas: Se obtiene de la energía cinética resultante de la expansión de aire comprimido y los gases de combustión. La turbina está unida al generador de rotor, dando lugar a la producción de energía eléctrica. Los gases de la combustión se descargan directamente a la atmósfera después de trabajar en la turbina.

En México, la generación de energía (Fig. 1-4) se divide en tecnologías convencionales (83.4%) y energías limpias (20.3%), en donde la geotérmica y solar equivalen únicamente a 2.1%, eólica a 2.8% y bioenergía y cogeneración en un 1.7%.

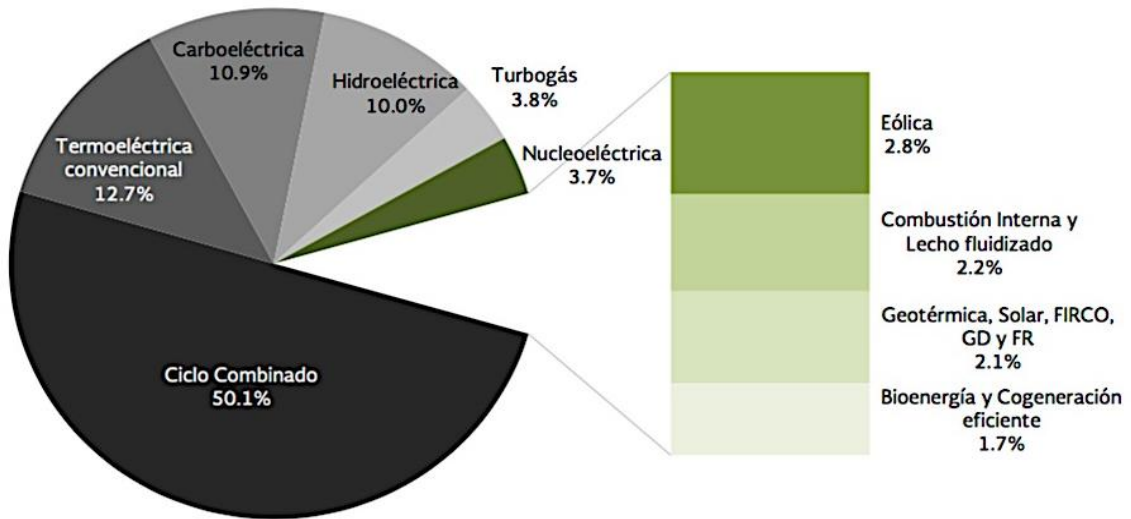


Fig. 1-4 Generación bruta por tipo de tecnología en México. Fuente: SENER (Secretaría de Energía) Prospectiva del Sector Energético 2016-2030.

Otro aspecto importante es la cantidad de la energía utilizada que en más de un 80% de su generación es contaminante. En México, la compañía que abastece de energía eléctrica (CFE) reporta en el 2015 (Fig. 1-5), en promedio el 88.8% de sus clientes proviene del sector residencial, en comparación con el comercial de aproximadamente 10%, el industrial de 0.8%, los servicios, con un 0.5% y el agrícola de 0.3%. El sector residencial es el que presenta el mayor incremento desde el año 2007 con un 0.06%.

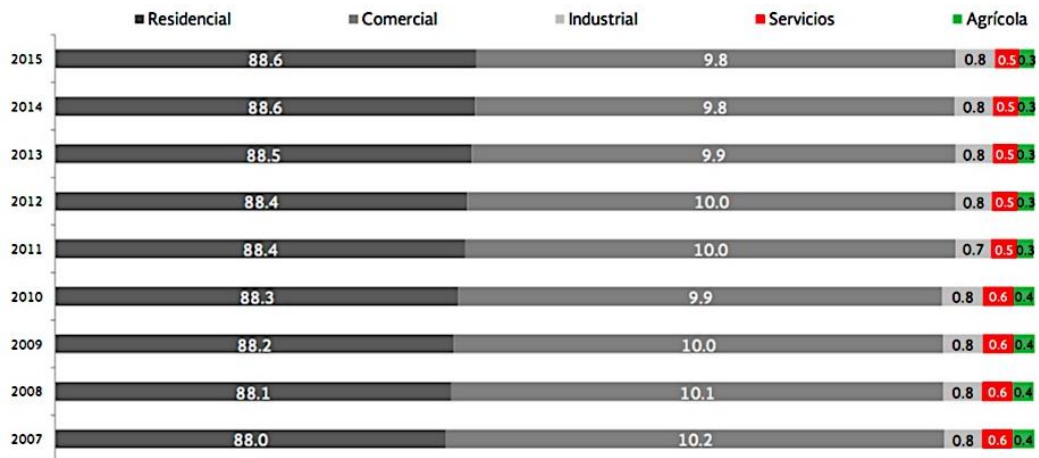


Fig. 1-5 Evolución anual de clientes de CFE por sector en México. Fuente: SENER (Secretaría de Energía) Prospectiva del Sector Energético 2016-2030.

Por otra parte, muestra que el consumo de energía eléctrica en 2015, tuvo 3 periodos con diferentes comportamientos estacionales (Fig. 1-6). El primero de enero a marzo, mismo que se caracterizó por una disminución del 1,816.8 GWh en el mes de febrero. El segundo periodo, entre los meses de abril a septiembre, concentró el 53.7% del consumo anual, y se mantuvo con un comportamiento al alza. Finalmente, el tercer periodo, de octubre a diciembre, presentó una tendencia a la baja, para ajustarse a cifras similares al mes de enero, lo cual permite concluir que durante los meses más cálidos existe un mayor requerimiento de la energía para el uso de sistemas activos de enfriamiento como los ventiladores o los aires acondicionados.

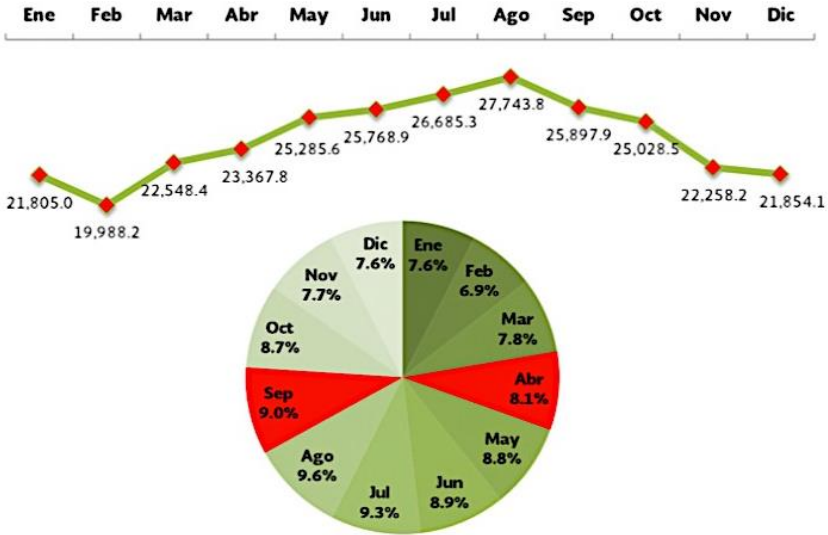


Fig. 1-6 Consumo eléctrico mensual en México. Fuente: SENER (Secretaría de Energía) Prospectiva del Sector Energético 2016-2030.

Como conclusión, el hombre ha generado su desarrollo a partir de los combustibles fósiles, lo cual ha provocado que en los procesos tecnológicos se contamine el medio ambiente a través de residuos que generan la interrupción de los procesos naturales, así como la emisión de gases ahora denominados de efecto invernadero que ocasionan, entre otros aspectos, el incremento de la temperatura superficial. Uno de los servicios que ha contribuido en mayor importancia al desarrollo de las ciudades es la energía eléctrica, misma que actualmente es considerada como uno de los procesos más contaminantes, ya que se genera en un 80 a 90% a través de los combustibles fósiles, recursos no renovables. Si se considera que el mayor sector de consumo es el residencial en los periodos más cálidos, se puede vislumbrar que es un área importante de oportunidad. El objetivo principal sería reducir el consumo del sector edilicio por uso de equipos

electromecánicos o eléctricos para ventilación y enfriamiento y así contribuir al decremento de emisiones nocivas para el ser humano y para nuestro planeta.

Una de las estrategias para lograr ese objetivo es a través del estudio e investigación de la aplicabilidad de los métodos para el enfriamiento pasivo en edificios.

Éstos han sido estudiados extensamente y clasificados. De acuerdo con Gheetha y Velra (2012) a través de Al-Obaidi et al. (2014) existen tres estrategias principales: Técnicas de protección solar y reducción de calor, las técnicas de amortiguamiento o retardo térmico y las técnicas de disipación de la energía o calor (Fig. 1-7).

Las técnicas de protección solar y reducción de calor se pueden dividir en control solar; donde se considera la apertura al exterior, siendo la mejor orientación cuando se recibe la máxima cantidad de radiación solar en invierno y la cantidad mínima en verano; el acristalamiento, en el cual las propiedades térmicas de las superficies acristaladas de una edificación afectan la penetración de radiación solar al interior; y el sombreado, que indica la obstrucción parcial o completa del rayo de sol dirigido hacia una superficie por un objeto o superficie que interviene. La sombra varía en posición y tamaño dependiendo de la relación geométrica entre el sol y la superficie de que se trate.

Por otra parte, las estrategias del microclima; aquellas en donde se protege a la edificación por medio del uso de la vegetación, el paisaje o superficies con agua.

El amortiguamiento o retardo térmico se divide en dos técnicas: La ventilación nocturna y la masa térmica. Dentro de la masa térmica existen dos variantes: Con almacenamiento de energía térmica y sin él. Aquel que cuenta con almacenamiento se refiere a los materiales de cambio de fase (MCF). Aquellos que se utilizan para compensar la pequeña capacidad de almacenamiento de edificaciones livianas que suelen sufrir un sobrecalentamiento importante en verano. Pueden ser utilizados en paredes o techumbres.

Por último, se encuentran las técnicas de disipación de la energía o calor. Pueden dividirse en dos rubros: Con almacenamiento de energía térmica y sin él. Aquella que presenta almacenamiento se divide en dos ramas:

a) Ventilación Natural: Puede dividirse en ventilación cruzada conducida por el viento, cuando se

generan zonas de alta presión a sotavento y baja presión a barlovento. También existe el concepto de ventilación por flotabilidad, que surge debido a las diferencias en la densidad del aire interior y exterior, que en gran parte se debe a las diferencias de temperatura. Cuando hay una diferencia de temperatura entre dos volúmenes de aire contiguos, el aire más caliente tendrá una menor densidad y será más “flotante”, por lo que se elevará por encima del aire frío creando una corriente de aire ascendente.

Ésta se puede dividir en dos conceptos: el muro Trombe y la chimenea solar. El muro Trombe es un muro o pared orientada al sol, preferentemente al norte en el hemisferio sur y al sur en el hemisferio norte, construida con materiales que puedan acumular “calor” bajo el efecto de masa térmica (tales como piedra, hormigón, adobe o agua), combinado con un espacio de aire, una lámina de vidrio y ventilaciones formando un colector solar térmico. La chimenea solar se conceptualiza como un eje vertical que utiliza energía solar para realizar la ventilación natural por medio de la diferencia de presiones del aire que en ella se acumula. Por último, se encuentra la ventilación simple, por ejemplo, por una ventana, en donde la cantidad de aire que pasa por esa abertura dependerá de la velocidad del viento cerca del edificio, las temperaturas dentro y fuera de la habitación, la dirección del viento, las características de turbulencia en el viento y las variaciones de presión causadas por las ráfagas de viento. También depende del tamaño, el tipo y la ubicación de la apertura.

b) Enfriamiento Natural: Se puede dividir en tres rubros: El enfriamiento por suelo, el enfriamiento radiativo, el enfriamiento evaporativo, Éstos dos últimos son las técnicas que se evaluarán en la presente investigación y se explicarán detalladamente en el Capítulo no. 3.

El enfriamiento por suelo puede ser por contacto directo (ya que la tierra posee cualidades de masa térmica) y de tierra a aire, enfriando una masa de aire a través de la temperatura del suelo (por ejemplo, conductos enterrados en el suelo).

Los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto, (SEEI) son aquellos que permiten la pérdida de energía de algún componente de la edificación para enfriar el espacio interior sin aumentar el contenido de humedad y los sistemas de enfriamiento radiativo nocturno (SERN) aquellos capaces de captar, almacenar y distribuir la energía de menor temperatura o “fría” durante el periodo nocturno (González, 2002).

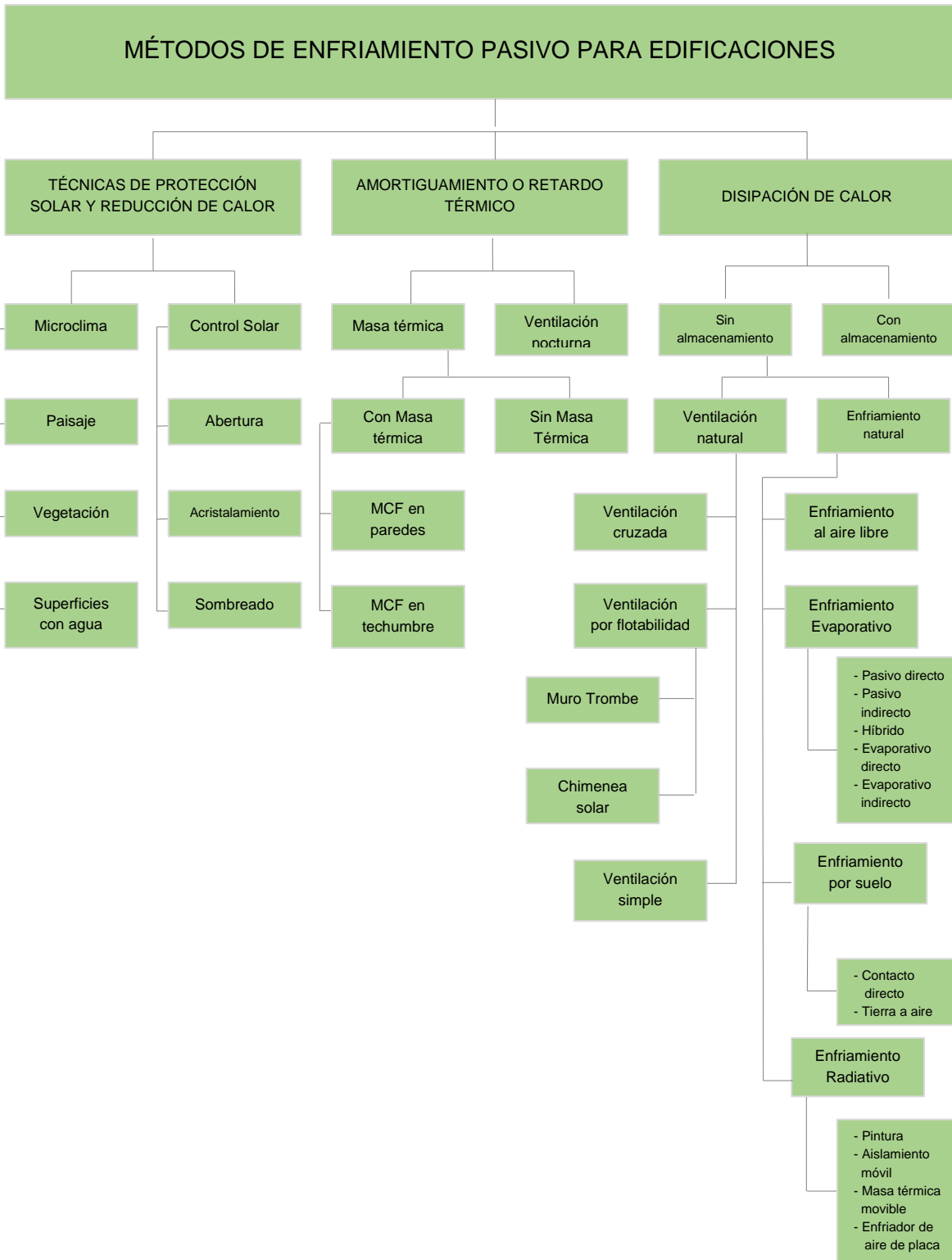


Fig. 1-7 Clasificación de métodos de enfriamiento pasivo para edificaciones. Fuente: Elaboración propia, basado en Geetha y Velra (2012) a través de Al-Obaidi et al. (2013).

Como conclusión, los sistemas pasivos de enfriamiento han contribuido al mejoramiento de las condiciones ambientales permitiendo el ahorro energético durante la fase de operación de las edificaciones y por lo tanto disminuyendo la demanda de la producción de energía, sin embargo, es un campo que aún sigue siendo una opción y no una obligación dentro del diseño arquitectónico por lo que se supone necesaria la continuación de la labor investigativa dentro del área de la Arquitectura Bioclimática.

1.1 Antecedentes

El hombre desde sus inicios ha necesitado refugio. En un principio se establecía en moradas temporales (grutas y cavernas entre otras) y posteriormente desarrolló técnicas de construcción que le permitieron edificar hábitáculos que respondían a las necesidades climáticas de la región. A este tipo de Arquitectura se le dio el nombre de “Vernácula” y es un testimonio cultural popular en donde el uso de sistemas y materiales constructivos son una adaptación al medio. que tiene como propósito. crear microclimas para obtener confort en diversos aspectos, por ejemplo: el lumínico, el acústico y, el higrotérmico, entre otros.

Actualmente la Arquitectura Bioclimática es una interpretación de los principios de la Arquitectura Vernácula, es un concepto que fue evolucionando, en donde, el común denominador es la adaptación del espacio al bioclima.

El término “bioclima” se le atribuye al climatólogo y botánico alemán Wladimir Peter Köppen, quien desarrolló la clasificación climática a principios del siglo XX. La primera aplicación, en el campo de la Arquitectura, se debe a los hermanos Víctor y Aladar Olgyay, arquitectos estadounidenses de origen húngaro.

En el libro de Víctor Olgyay “Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas” (1963) se establecen los postulados que muestran las bases teórico-prácticas de la Arquitectura Bioclimática.

Propone un método general de diseño que responde al ambiente inmediato para favorecer el confort humano. De igual manera desarrolló la gráfica bioclimática, la cual integra un conjunto de herramientas metodológicas que constituyen la base de lo que hoy en día es conocido como análisis o diagnóstico climático.

1.1.1 Enfriamiento evaporativo indirecto en cubiertas

En los climas cálido-húmedos, desde la antigüedad, en las edificaciones se ha empleado el uso de los receptáculos ambientales (aire, agua y tierra) como pozos térmicos, en donde la finalidad es disminuir la cantidad de energía en forma de calor acumulada al interior.

El enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) en azoteas es un concepto, que si bien no es tan antiguo como el directo (utilizado por los persas y egipcios), ha sido estudiado, de acuerdo con González-Fernández (2010), desde mediados del Siglo XIX en la “Sebastopol House”, diseñada por el coronel Joshua Young en Texas.

Cook (citado por González-Fernández, 2010), y Tiwari (1982) exponen que probablemente la primera ocasión en la que se estudió la reducción de la temperatura al interior de un espacio a través de un techo estanque (roof pond) fue alrededor de los años veinte en la Universidad de Texas, sin embargo, se detuvieron las investigaciones debido a problemas estructurales.

En los años cuarenta Houghten et al. (citado en S.P. Jain y Rao, 1974) elaboraron proyectos de investigación para generar enfriamiento a partir de un techo estanque y un techo rociado. Se demostró su eficiencia en todo tipo de techos y señalan que no existen cambios significativos de temperatura del plafón si se modifica el espesor del estanque entre 0.05 y 0.15 m (Esparza, 2015).

A finales de los años sesenta Harold Hay y John Yellot (1976) investigaron diversos SEEI en cubiertas en Arizona y California.

En el año de 1971 Harold Hay estudió un sistema pasivo que aprovechaba la energía captada por la techumbre de las edificaciones para calentar o enfriar un espacio. Publicó un artículo titulado “New roofs for hot dry regions” el cual fue el precursor de un sistema que actualmente sigue siendo investigado.

Hay patentó la tecnología y la llamó “Skytherm”. Consta de un roof pond (techo-estanque) que puede ser utilizado para cubrir las necesidades de enfriamiento o calentamiento de una edificación que conste de un nivel (Fig. 1-8). La cubierta se construye para albergar una película de agua de mínimo 10 cms. de espesor. Si se requiere enfriar el espacio se sombrea el roof pond por medio de paneles (pueden ser de diversos materiales reflejantes) para evitar el incremento de la ganancia de calor y en el periodo nocturno se remueven los mismos para perder energía hacia el cielo nocturno. Si se requiere calentar el espacio, se mantiene abierto durante el día para que capte la radiación solar y en el periodo nocturno se cubre para evitar la pérdida de la energía

ya obtenida. Existe una variación en donde se sombrea el roof pond con materiales absorbentes que crean efecto invernadero y potencialmente aumentan el calor de la masa térmica (agua).

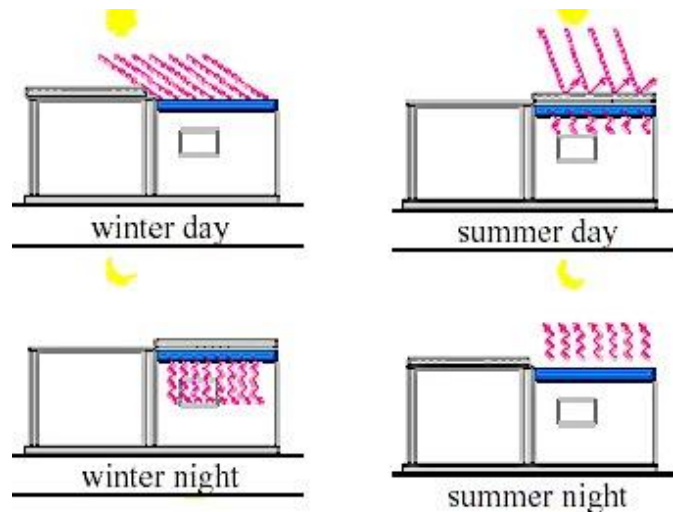


Fig. 1-8 Skytherm, esquema de funcionamiento durante verano e invierno. Fuente: <http://www.solarmirror.com/fom/fom-serve/cache/30.html>

Este sistema pasivo fue patentado por Hay en Febrero de 1971 en Estados Unidos y el cual tituló “Process and apparatus for modulating temperatures with in enclosures”. Posteriormente en el año 2004 realizó simplificaciones al sistema y lo patentó de nuevo con el nombre “Process and apparatus for modulating temperatures in thermal storage”. El sistema sigue vigente y ha sido estudiado por numerosos autores en diversos tipos de climas y materiales (Fig 1-9).

A partir de los años ochenta se han desarrollado y analizado una gran cantidad de variaciones de sistemas de EEI (Fig. 1-10) para distintos climas que de acuerdo con Spanaki, (2007) pueden dividirse en:

- Estanque descubierto con aspersores: Estanque sobre la losa o azotea que contiene agua. En la parte superior se encuentran los aspersores, mismos que enfrían la superficie de la masa térmica.
- Estanque descubierto sin aspersores: Misma configuración sin aspersores.

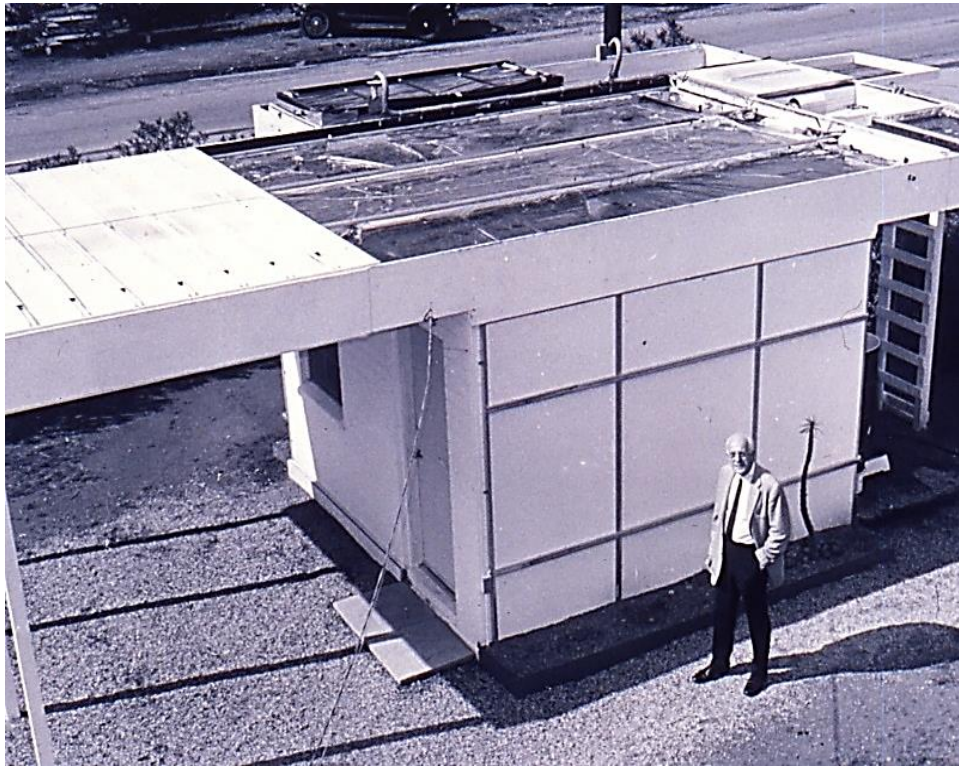


Fig. 1-9 Harold Hay junto al prototipo de Phoenix. Fuente: Hay, H. (1971) New roofs for hot dry regions. Ekistics. E.U.

- Cubierto con aspersores: Estanque cubierto por un aislamiento ya sea movable o no con aspersores.
- Cubierto sin aspersores: Misma configuración sin aspersores
- Skytherm: Sistema de techo-estanque con aislamiento movable.
- Eneery Roof: En este sistema, el agua está contenida dentro del parapeto y las capas de aislamiento térmico en el agua debajo de una película delgada y transparente de plástico. El lavabo del techo está lleno con aproximadamente 400 mm de agua [40] y se apoya en un techo de metal. Para el enfriamiento durante el verano, el agua se bombea por la noche a un tubo de distribución, lo que permite que fluya en una capa delgada sobre el aislamiento, donde luego se enfría mediante radiación de onda larga durante la noche. Una pulverización de agua promueve el enfriamiento por evaporación en la superficie superior de la película de plástico. El sistema está patentado por A.L. Pittinger y W.R. White en los Estados Unidos.

- Cool roof: En esta variación, el agua circula por la noche sobre el aislamiento del recubrimiento. La temperatura del techo en el caso del techo de concreto varía aproximadamente 2°K por encima de la temperatura del agua. Los paneles de aislamiento deben ser de un material impermeable al agua, como poliestireno extruido.
- Estanque “caminable” (Walkable pond): El aislamiento en este sistema está integrado en el estanque. Durante el verano, el estanque se llena con agua a un nivel de aproximadamente 3 cm por encima del aislamiento. Las placas de aislamiento dividen el agua en dos capas, inferior y superior, con huecos que permiten la circulación termosifónica. El sistema es aplicable específicamente para edificios con hormigón armado en tejados en regiones desérticas con inviernos suaves.
- Bolsas de yute mojadas (Wet gunny bags): La última variante inventada del estanque de techo consiste en bolsas de yute colocadas sobre una rejilla o malla con tiras de poliestireno u otros materiales incrustados unidos debajo. El aislamiento inhibe la disipación de calor por la noche y un sistema de pulverización se vuelve esencial. La profundidad de agua óptima es de 20 cm para techos cubiertos de metal y de aproximadamente 5 cm para techos de hormigón. El sistema primero sugerido y probado por T. Runsheng, Y. Etzion y E. Erell en 2002.
- Estanque frío (cool pool): El sistema consiste en un estanque de agua abierto sombreado por persianas inclinadas y sostenido por un techo de hormigón. El agua enfriada se bombea a un tubo de almacenamiento en el edificio inferior mediante tubos concéntricos de termosifón en los que el agua enfriada baja lentamente a través de un tubo central y luego se calienta mediante intercambio térmico con el aire interior, vuelve a la piscina. Karen Crowther y Melzer patentaron este sistema en 1979 en los Estados Unidos.
- Estanque de techo ventilado: El estanque de techo ventilado tiene un techo secundario ligero y aislado sobre el estanque que da sombra al agua. Grandes aberturas entre el agua y la sombra permiten un flujo de aire permanente sobre el agua y aumentan la evaporación. La ventaja del estanque ventilado radica en el hecho de que no hay demanda de ninguna operación, excepto cerrar las aberturas y drenar el agua en invierno. También se puede aplicar en un techo inclinado con una superficie inferior húmeda y mantenida de la cavidad sobre la que se ve el aire externo. En este caso, el reabastecimiento de agua solo se necesita 1 a 2 veces al mes.

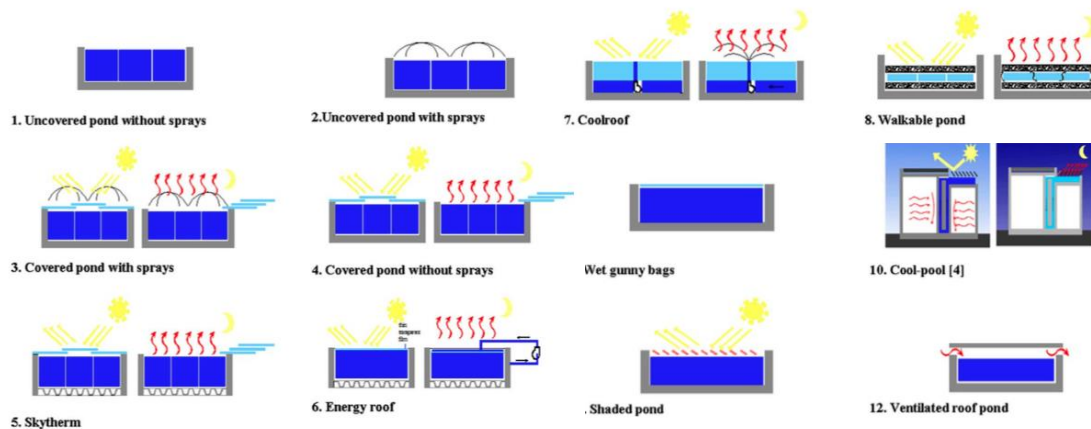


Fig. 1-10 Esquemas ilustrativos de diferentes tipos de roof ponds. Fuente: Spanaki, A. et al. (2010) Review of the Parameters affecting the selection of a roof pond variant for cooling purposes.

1.2 Planteamiento del problema

Para obtener el confort térmico al interior de un espacio en sitios de clima cálido-húmedo se recomienda que las condiciones de temperatura interior sean menores a las del exterior. Las recomendaciones generales de sistemas pasivos son las de proponer sombreado y envolventes de baja capacidad térmica (livianas) que permitan la ventilación cruzada para eliminar por medio y a través de su superficie el exceso de ganancia de calor. Según Koenigsberger et al. (1974), el flujo de ventilación debe conducirse para aliviar la incomodidad térmica sobre la superficie del cuerpo de los ocupantes de la edificación.

Por otra parte, Koenigsberger et al. (1974), Szokolay (1987) y Givoni (1997), indican que si, la oscilación térmica es pequeña y la humedad es alta durante un largo periodo del día (característica de los climas cálido-húmedos), no es eficaz utilizar la masa térmica beneficiándose del enfriamiento nocturno, por lo que se descarta cualquier sistema pasivo de enfriamiento evaporativo.

Aunque los argumentos mostrados siguen siendo aceptados y transmitidos a nivel académico, desde los años noventa se han realizado diversas investigaciones que sugieren lo contrario. González y Krüger (2013) mencionan que la ventilación cruzada permanente durante el día en edificaciones con envolventes livianas no permite reducir la temperatura interior con relación a los niveles del aire libre, es decir, la temperatura máxima interior presentará valores cercanos a la máxima exterior, lo cual en climas cálido-húmedo representa la falta de confort térmico.

Como oposición al argumento de Koenigsberger, Szokolay y Givoni; González, en 1997 realizó un estudio en el cual analizó la efectividad de los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (como techo-estanque) para enfriar componentes de la estructura de una edificación sin aportar humedad adicional al aire interior mostrando resultados favorables.

La investigación se contrapuso a los estudios de Givoni (1994), en donde se aconsejaba la utilización de los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (SEEI) únicamente en regiones áridas y subhúmedas. Lugares con temperatura de bulbo húmedo (TBH) no mayores a 22 °C y máximos valores de temperatura de bulbo seco (TBS) de 46 °C.

Posteriormente en el año 2004, una vez que González realizó un mayor número de estudios que comprobaban la utilidad de los SEEI en climas cálido-húmedos, Givoni y González colaboraron en una investigación la cual tenía como objetivo desarrollar ecuaciones predictivas del comportamiento térmico de SEEI. Givoni basó su trabajo en los resultados de los modelos experimentales de González en Maracaibo, Venezuela e incrementó las variables considerando la nubosidad y la humedad, estableciendo la conclusión de que los SEEI también pueden ser empleados en climas cálido-húmedos.

De acuerdo con González y Krüger (2013) la eficiencia radica en que en los SEEI la temperatura del agua es cercana a la TBH promedio y el techo, enfriado por el estanque, actúa como un disipador de calor del espacio debajo de él. Posteriormente González (2013) y Sabrina González (2013) realizaron estudios de distintas configuraciones de techos-estanque en clima cálido-húmedo con SEEI y enfriamiento radiativo nocturno (ERN) estableciendo la conclusión de que la temperatura al interior se reducía de 0.8 °C a 2.4 °C con respecto a la temperatura media del ambiente, por lo que se concluye que el potencial de enfriamiento del sistema funciona.

Como conclusión, desde el año de 1997 González comprobó la efectividad de los SEEI en climas cálido-húmedos en Venezuela, empero en recomendaciones bioclimáticas actuales no se presentan aún como una estrategia viable. Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo mostrar la efectividad de los SEEI en climas cálido-húmedos en México, así como comprobar un mayor potencial de enfriamiento mediante las diferentes configuraciones de los módulos experimentales analizados, variando el material de la masa térmica en cubierta o superficie horizontal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Objetivo general

Caracterizar¹ sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto en cubiertas para proporcionar confort térmico en edificaciones de climas cálido-húmedos de México por medio del estudio del comportamiento de dos tipos de masa térmica en módulos experimentales.

1.3.2 Objetivos particulares

- a) Analizar el comportamiento térmico en cada módulo experimental por medio de los valores de temperatura y humedad características.
- b) Conocer el sistema más eficiente para reemplazar el material de la masa térmica.
- c) Determinar las temperaturas medias, mínimas y máximas, así como el potencial de enfriamiento medio² (P.E.M.) de cada experimento.
- d) Determinar por medio del modelo adaptativo³, las condiciones de confort para determinar la eficiencia de cada sistema en función del porcentaje de tiempo de permanencia dentro del rango de confort.

¹Desde una perspectiva investigativa la caracterización es una parte descriptiva con fines de identificación, de los componentes, acontecimientos, procesos y contexto de una experiencia, un hecho o un proceso (Sánchez Upegui, 2010).

Existen dos objetivos de caracterización de la investigación:

a) Determinar los resultados cuantitativos de eficiencia higrotérmica entendida en términos de confort.

b) Describir y explicar cuantitativamente el fenómeno existente de cada módulo y la correlación de las variables que integran cada una de las estrategias estudiadas.

² El potencial de enfriamiento medio (P.E.M.) (Givoni y González, 2004), se define como la cantidad de energía por unidad de tiempo y superficie capaz de ser retirada por el sistema, obtenida como valor medio durante un periodo de 24 horas.

$$PEM = (CPC \times (T_{mcontrol} - T_{m experimental}) \times 24h) / A$$

CPC= Coeficiente de pérdida de calor por módulo (W/°K)

Tm control = Temperatura media del módulo de control en 24h (°C)

Tm experimental = Temperatura media del módulo experimental en 24h (°C)

A=Área de superficie efectiva del techo (m²)

³ El modelo de confort adaptativo tiene como objetivo establecer temperaturas con las cuales la mayoría de las personas de una región se sentirían razonablemente cómodas. Los investigadores de Dear y Brager (1998) indican

1.4 Hipótesis

En climas cálido-húmedos de México los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto en cubierta pueden favorecer el confort higrotérmico al interior de un espacio arquitectónico.

1.5 Justificación de la investigación

Las características de una edificación, la forma, los materiales, la disposición y su relación con el entorno, entre otros, definen el clima interior del mismo. El diseño arquitectónico, por lo tanto, es una práctica que debe realizarse de una forma consciente y holística, de esta manera, es posible optimizar la sensación térmica al interior de un espacio, así como determinar los sistemas activos y pasivos que se requerirán dentro de ella para obtener el confort del usuario.

El diseñador, durante el proceso creativo, debe comprender y ligar diversos conceptos, entre ellos los bioclimáticos, tales como la geometría solar, la acústica, la iluminación, la ventilación, la temperatura y la humedad, entre otros y permitir que, aunado al bienestar de los ocupantes, la edificación represente un ahorro energético por los motivos mencionados previamente en la introducción.

Debido a que las exigencias climáticas en una construcción no son homogéneas (Jacobo, 2004), debido a las variaciones climáticas durante el día (día y noche) y el año (estaciones), desde el punto de vista higrotérmico, las edificaciones deben adaptarse a las condiciones que las definen y aumentar su posibilidad de climatización pasiva.

El interés por la utilización y mejora de los sistemas pasivos de energía surge debido a la creciente exposición de la problemática ambiental actual. El desarrollo industrial se ha manifestado en la rama de climatización de edificios por medio de la creación y evolución de los equipos electromecánicos propiciando el control térmico artificial, que de acuerdo con Sánchez (1993), ha generado el distanciamiento entre los diseñadores y su relación con los factores climáticos, que

que la adaptación puede definirse como la reducción gradual de la respuesta de un individuo a una estimulación repetitiva en el ambiente.

evidentemente ha resultado en la falta del desarrollo conceptual térmico por medio de control térmico natural.

Los sistemas pasivos de energía se dividen por su finalidad en dos rubros: de calentamiento y de enfriamiento. En México, debido a su localización geográfica (latitud N de 14° a 32°), existen, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), múltiples tipos de climas (Fig. 1-11), desde climas tropicales o cálidos (A, semi-húmedos o húmedos), secos (B, cálidos, fríos, semi-áridos y/o áridos), templados (C, mediterráneo, con verano cálido, con verano suave, invierno seco, subpolar, subtropical húmedo, oceánico o subpolar), hasta fríos (E, tundra y glaciario), por lo que se presentan tanto requerimientos de calentamiento como de enfriamiento, de acuerdo a los modelos de confort.

En la República mexicana, alrededor del 27% del país representa el clima A (tropicales lluviosos, con temperatura media del mes más frío mayor de 18 °C, mismos que:

“Se extienden a lo largo de las vertientes mexicanas de ambos mares. En la del Pacífico desde el paralelo 24° norte hacia el sur y abarcan desde el nivel del mar hasta una altitud de unos 800 a 1000 m. Por el lado del Golfo de México comprenden desde el paralelo 23° norte hacia el sur a lo largo de la llanura costera y de la base de los declives correspondientes de la Sierra Madre Oriental y de las montañas del norte de Chiapas; se encuentran también, en la mayor parte de la península de Yucatán, así como en algunas zonas interiores,

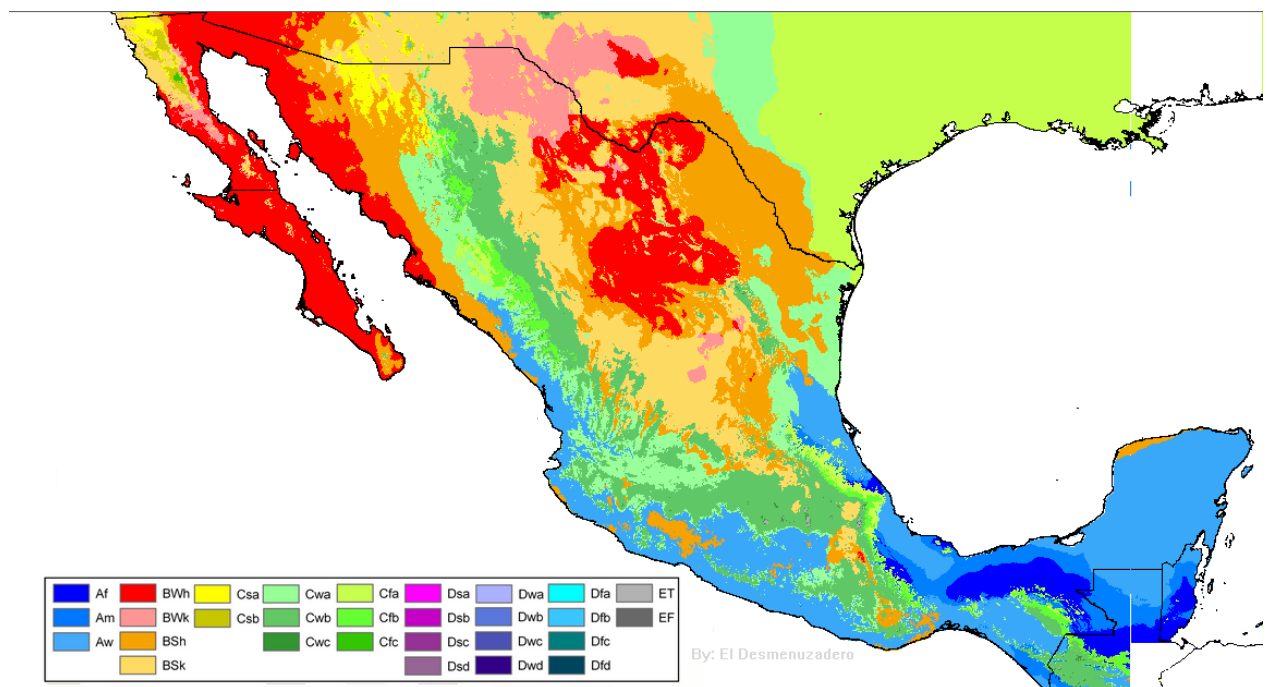


Fig. 1-11 Mapa de clasificación climática de Köppen-García. Fuente: <http://www.inegi.org.mx/rde/2015/05/10/politica-del-cambio-climatico-en-mexico-avances-obstaculos-y-retos/>

tales como la Cuenca de Balsas y la Depresión Central de Chiapas en donde se extienden hasta una altitud de 1300 m.” (Brichambaut, 1985:136 a través de García 2004:20)

Para este tipo de climas se requiere de enfriamiento en un gran porcentaje del año (dependiendo de cada caso específico) y en la presente investigación se abordará el estudio, en la Ciudad de Mérida, en Yucatán, de diferentes tipos de SEEI para obtener temperaturas interiores de confort higrotérmico, análisis que contribuirá a la disminución del consumo energético por utilización de equipos electromecánicos para refrigeración.

1.6 Preguntas de investigación

¿Qué cantidad de energía térmica es retirada durante 24 hrs (P.E.M.) al interior de cada sistema propuesto?

Preguntas secundarias

- ¿Cuál es la duración en horas dentro del rango de confort térmico (modelo adaptativo) de la temperatura interior de cada módulo experimental?
- ¿El sistema de enfriamiento más eficiente será aquel que utilice mayor número de estrategias?
- ¿En los sistemas con control de apertura, que utilicen el ERN, la oscilación térmica se reducirá?
- ¿Al decrecer la temperatura interior con respecto a la media exterior, la humedad relativa al interior aumentará?

1.7 Procedimiento metodológico

Para la realización de la investigación se desarrollaron las siguientes actividades (Fig. 1-12) :

- Análisis del estado de arte por medio de la consulta de fuentes impresas y electrónicas.
- Identificación de las diversas investigaciones de estrategias de enfriamiento pasivo en climas cálido-húmedos.

- Evaluación y diseño de posibles configuraciones de SEEI para el diseño del experimento.
- Análisis y selección del área de estudio representativa (clima cálido-húmedo) para consulta de las normales climatológicas.
- Obtención de los requerimientos de enfriamiento a través de la realización del análisis climático en Meteonorm y posteriormente en Climate Consultant⁴.
- Análisis bibliográfico de los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en el enfriamiento de la envolvente de una edificación.
- Planteamiento y construcción del arreglo experimental; colocación del instrumental de monitoreo y realización de la prueba piloto en campo.
- Consulta de bibliografía de instrumental de medición de factores climáticos.
- Selección, adquisición y calibración de instrumental de monitoreo.
- Medición del experimento en dos diferentes periodos representativos (de bajocalentamiento y sobrecalentamiento).
- Determinación de la configuración con mejor desempeño para realizar una segunda prueba modificando el material de masa térmica (agua por aceite de coco).
- Recopilación, síntesis y análisis de resultados para la caracterización de sistemas de enfriamiento pasivo.

1.8 Descripción del capitulado

Este documento está integrado por siete capítulos. La introducción, en donde se definen principalmente el objetivo e hipótesis del trabajo; el estado del arte, en donde se resumen las principales investigaciones realizadas de los SEEI; el marco teórico, donde se presentan los tipos de sistemas pasivos de enfriamiento en cubiertas, los elementos y tipos de confort térmico, así como el análisis climático del caso de estudio; la metodología, donde se expone el diseño y etapas del procedimiento experimental; los resultados de la prueba piloto, cuyo objetivo principal fue conocer las posibles mejoras a efectuar; los resultados, en donde se presenta la descripción y análisis de los experimentos 1 y 2; y por último las conclusiones, en donde se presentan la

⁴ Meteonorm y Climate consultant son herramientas informáticas para la creación, análisis y presentación de datos climáticos.

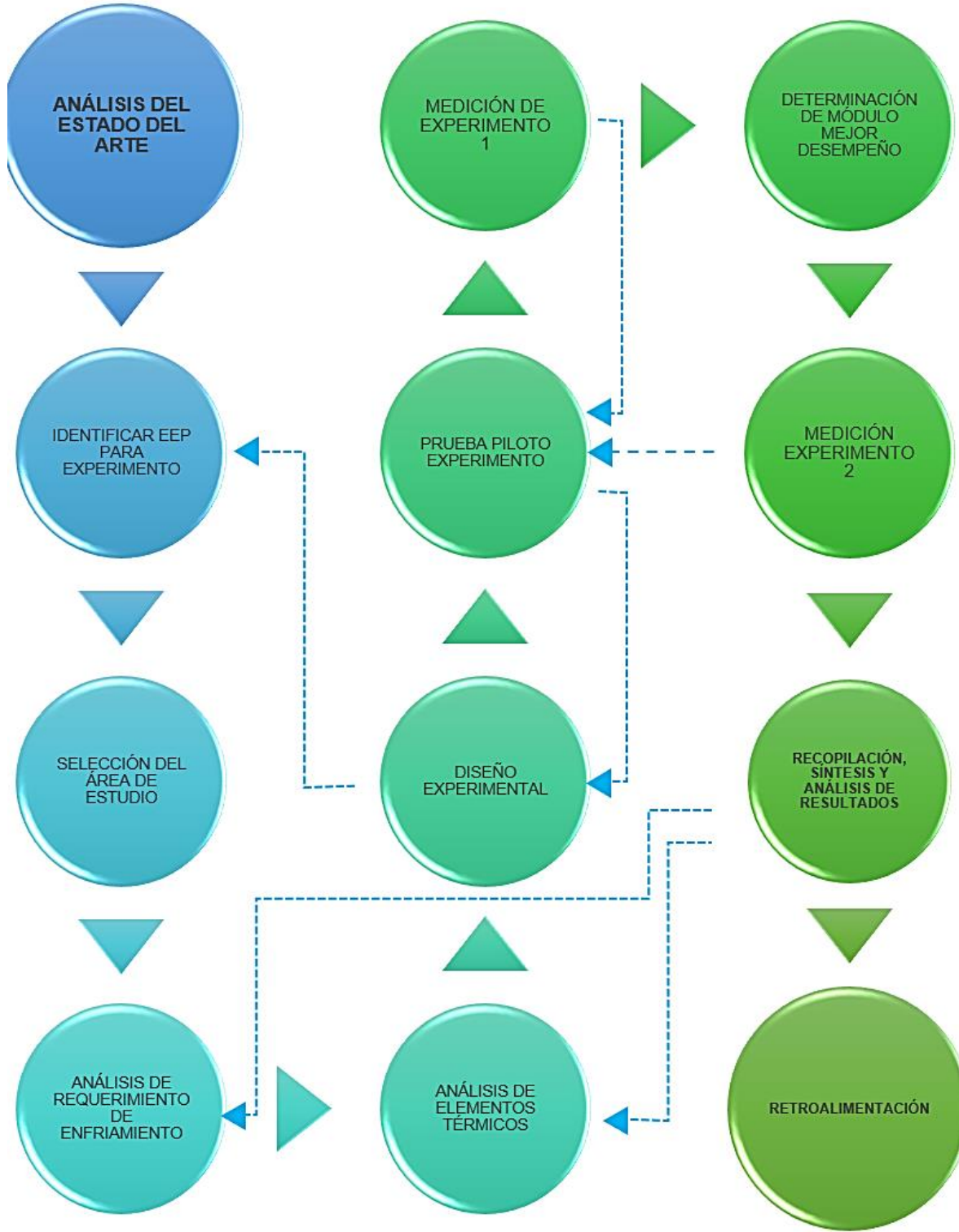


Fig. 1-12 Diagrama de procedimiento metodológico. Fuente: Elaboración propia.

descripción y análisis de los experimentos 1 y 2; y por último las conclusiones, en donde se presentan la descripción del trabajo, conclusiones generales, aportación al diseño y recomendaciones a futuras investigaciones.

Capítulo 1: Introducción

En el primer capítulo se describen los elementos que definen la investigación, tales como: el planteamiento del problema, la justificación del estudio, los objetivos, la hipótesis de trabajo, la aportación de la investigación al diseño bioclimático y por último se describen los alcances y limitaciones del estudio.

Capítulo 2: Dispositivos e investigaciones de enfriamiento pasivo en cubiertas: Revisión Histórica

En la parte introductoria se describen los diferentes tipos roof ponds (techos estanque) que han sido desarrollados y estudiados hasta en año 2020. Posteriormente se realiza una descripción de los diversos dispositivos e investigaciones que han sido conducidos en diferentes partes del mundo desde los años setenta hasta la actualidad. Se muestran trabajos de tipo experimental físico y matemático, en donde el objetivo principal ha sido el cubrir los requerimientos de calentamiento y enfriamiento de espacios por medio de roof ponds en diferentes tipos de climas. En la última parte del capítulo se realiza un análisis de casos análogos, en el que se consideran sólo los trabajos que se localizan en climas cálido-húmedos, cálido sub-húmedos o mediterráneos, además de ser estudios realizados a través de experimentación con modelos físicos cuyo objetivo principal es conocer el comportamiento higrotérmico.

Capítulo 3: Sistemas pasivos de enfriamiento en cubiertas, confort higrotérmico y su relación con el clima

En la primera parte del capítulo se describen los diferentes sistemas pasivos de enfriamiento investigados en este proyecto, tales como: Enfriamiento evaporativo indirecto, Enfriamiento radiativo nocturno, Masa térmica, Protección solar y Aislamiento térmico. Posteriormente se muestran las variables determinantes del confort higrotérmico y los diferentes modelos de confort. De igual manera se presentan las recomendaciones de estrategias para climas cálido-húmedos.

Finalmente se muestran los resultados del análisis climático para el caso de estudio elaborado en Meteororm y Climate Consultant, análisis imprescindible para la determinación posterior de la eficiencia de los experimentos.

Capítulo 4: Metodología, diseño experimental y elementos de análisis

Se presenta la selección de la metodología de la investigación, así como el diseño del experimento, el cual incluye la descripción y esquemas conceptuales y constructivos de los módulos experimentales y de control. Se expone el instrumental a utilizar, así como su calibración y las cédulas de registro a emplear para los datos obtenidos. Posteriormente se muestra el esquema, el cual resume las acciones de las diferentes etapas que conforman el procedimiento experimental. Finalmente se describen los elementos del análisis del comportamiento y la eficiencia térmica necesarios para determinar la eficiencia de los sistemas.

Capítulo 5: Experimentación con modelos físicos en la Ciudad de Mérida: Prueba Piloto

Se presentan los resultados de una primera medición en la ubicación del caso de estudio seleccionado con los módulos experimentales antes descritos. Se analizan los valores obtenidos y las variables que no se consideraron realizando ajustes para la medición definitiva durante los periodos de bajocalentamiento y sobrecalentamiento.

Capítulo 6: Resultados: descripción y análisis

Se describen los resultados obtenidos de las mediciones en los módulos experimentales durante los periodos de bajocalentamiento y sobrecalentamiento con la utilización de agua (experimento 1) y aceite de coco (experimento 2). Se expone el análisis de temperaturas características, P.E.M. y confort higrotérmico de cada módulo.

Capítulo 7: Conclusiones

Se presenta una descripción general del trabajo, la comparativa del comportamiento y desempeño de cada experimento para determinar las conclusiones de la investigación. Por último, se describe la aportación al diseño y las recomendaciones para futuras investigaciones.

1.9 Resultados y Aportaciones

En la investigación desarrollada, con la estrategia de agua y aceite coco, como elementos de masa térmica y de cambio de fase, se concluye que el sistema con un mayor número de estrategias investigadas es el de mejor eficiencia obtenida.

Lo anterior confirma que la utilización complementaria del aceite de coco, como material de fase de cambio, en una configuración de techo estanque que integra cuatro diferentes estrategias en climas cálido-húmedos podría significar un ahorro energético considerable en edificaciones de hasta dos niveles.

La presente investigación realiza tres aportaciones principales:

- Comprueba la efectividad de los sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo indirecto que emplean agua como masa térmica en climas cálido-húmedos.
- Demuestra que el aceite de coco, empleado en la misma configuración, aumenta el potencial de enfriamiento para climas cálido-húmedos.
- Presenta las ecuaciones de tendencia para la predicción del comportamiento de cada uno de los módulos experimentales con respecto a la TBS del MC.



2

DISPOSITIVOS E INVESTIGACIONES DE ENFRIAMIENTO PASIVO EN CUBIERTAS: REVISIÓN HISTÓRICA

INDICE

2.1 Estado del Arte	26
2.1.1 Enfriamiento pasivo empleando agua como masa térmica	26
2.1.2 Enfriamiento pasivo empleando aceite de coco (MCF)	40
2.2 Casos Análogos	43

Capítulo 2. Dispositivos e Investigaciones de Enfriamiento Pasivo en cubiertas: Revisión Histórica

Las estrategias de enfriamiento en azoteas por medio del enfriamiento evaporativo indirecto han sido estudiadas en diversos tipos de climas desde aproximadamente los años veinte del S. XX. Se ha innovado tanto en el sistema como en los materiales.

Debido a que el experimento de este trabajo se realizó con dos tipos de materiales: agua, como masa térmica, y aceite de coco, como material de cambio de fase. Se desarrollaron investigaciones para ambos casos, las cuales, constituyeron las bases del presente trabajo.

2.1 Estado del arte

2.1.1 Enfriamiento pasivo empleando agua como masa térmica

Yadav y Rao en 1982 realizaron el estudio “Digital simulation of indoor temperatures of buildings with roof ponds”, donde se desarrolló un modelo teórico para predecir el comportamiento térmico de roofponds. Se demostró que, para Delhi, la temperatura interior puede ser mantenida en verano debajo de los 30 °C mientras que la temperatura exterior es de 40 °C.

Posteriormente en el año de 1982 en India Tiwari, Kumar y Sodha realizaron el estudio “A review - Cooling by water evaporation over roof” en donde se realizó un análisis matemático de tres distintos casos de estudio: Un roof pond y bolsas de yute con aspersores.

En el año de 1983 Kaushik y Rao, donde publicaron el artículo “Non-convective roof pond with movable insulation for passive solar space heating in cold climates” donde se simuló numéricamente la utilización de la masa térmica con polímeros añadidos. Mostró resultados favorables para climas fríos en donde se requiere de calentamiento. Se comparó con los resultados de un roof pond con aislamiento móvil mejorando su rendimiento.

Posteriormente, Chu Sydney y Boon-Long Piyawat realizaron un estudio en 1992 de un roof pond en donde el objetivo era mejorar por medio de la configuración los requerimientos de enfriamiento. Para ello se realizó un análisis matemático para optimizar el diseño de un roof pond en un

almacén de productos de agricultura de un nivel en Tailandia. Variaron la altura de la película de agua y las dimensiones del espacio hasta alcanzar un desempeño óptimo (Fig. 2-1).

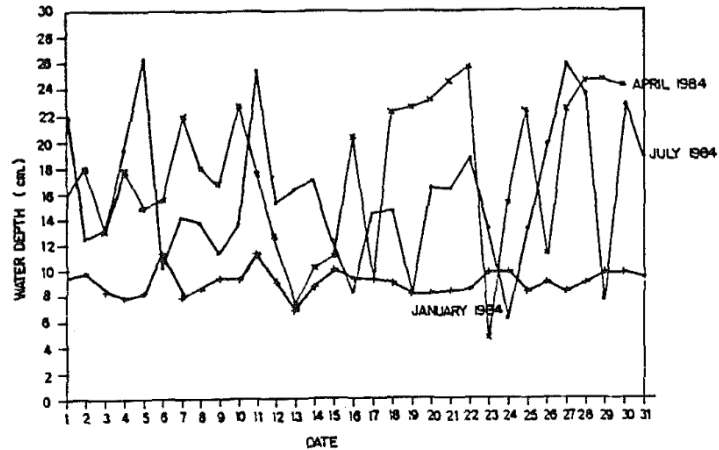


Fig. 2-1 Profundidad máxima de agua a temperaturas mínimas en enero, abril y julio de 1984. Fuente: Chu, S. y Boon-Long, P. (1992) Design optimization of passively cooled room. Energy Engineering pp. 24.

Humberto Sánchez en el año de 1993 escribió la tesis de Maestría en Diseño Bioclimático en la Universidad de Colima. El título del documento es “Evaluación de un Techo Estanque como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo”. En el trabajo se realizó un análisis de días-grado con diferentes configuraciones de módulos experimentales: 1) Sistema de techo estanque con aislante móvil, 2) Con cubierta fija y ventilado, 3) Con aislante fijo y regadera, 4) Sistema de losa de concreto con aislante móvil, 5) Con losa de concreto sombreada y ventilada. Se concluyó que la más eficiente para clima cálido semi-húmedo era la configuración no. 5.

Raessi y Taheri en 1995 presentaron el trabajo titulado “Cooling load reduction of buildings using passive roof options”. Se presenta un modelo matemático para predecir el comportamiento térmico de edificaciones sombreadas y con roof ponds . Se realizó un estudio con viviendas ubicadas en Shiraz, Irán en donde se encontró que la demanda de enfriamiento se reduce 79%, 58.1% y 43.6% utilizando un roof pond sombreado, un roof pond sin protección y techo sombreado respectivamente.

En el año de 1997 Eduardo González realizó la tesis doctoral “Etude de materiaux et de techniques de refroidissement passif pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide” en Francia. Estudió los sistemas pasivos de enfriamiento para climas cálido-

húmedos y en su trabajo muestra el análisis del comportamiento térmico de los modelos experimentales EUSECE A.C., mismos que se explican en sus siguientes publicaciones.

En el año de 1999, una vez patentado el Skytherm, (Hay, 1971) Raessi y Taheri realizan el estudio "Skytherm: an approach to year-round thermal energy sufficient houses", en donde se escribió un programa computacional para predecir las demandas de calentamiento y enfriamiento de una vivienda de 141 m² en Irán considerando un roof pond sobre concreto y otro sobre metal. Las simulaciones muestran que se reduce la demanda de calentamiento en un 86% y de enfriamiento en un 52%.

En noviembre del 2000, Rincón, Almao y González publicaron el artículo "Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions". Para el estudio se desarrolló un modelo matemático para simular la temperatura interior de un roof pond. Se compararon dos células de medición, un MC y un roof pond en Maracaibo con una cubierta movable. Como conclusiones se mostró que es posible reducir a carga térmica de un 41 a un 66% en relación con la célula adiabática. También se concluyó que bajo condiciones de cielo despejado 16% del total de enfriamiento se debe a la evaporación. El modelo desarrollado "EVITA" constituye una herramienta valiosa para el estudio, diseño y optimización de eficiencia en edificaciones de un nivel (Figura 2-1).

En Israel en el año 2003, Tang y Etzion publicaron el artículo titulado "Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface". En el estudio se realizó una comparación de dos estanques de 116 x116 x 22 cm para medir el grado de evaporación de cada uno.

El primer estanque se llenó con agua y el otro con toallas colocadas sobre un panel de pvc perforado (Fig. 2-3). Se concluyó que para ambos casos cuando la velocidad del viento es baja la evaporación es mayor, cuando la velocidad es alta el estanque con toallas la evaporación es menor, mientras que con el estanque abierto la evaporación es mayor.

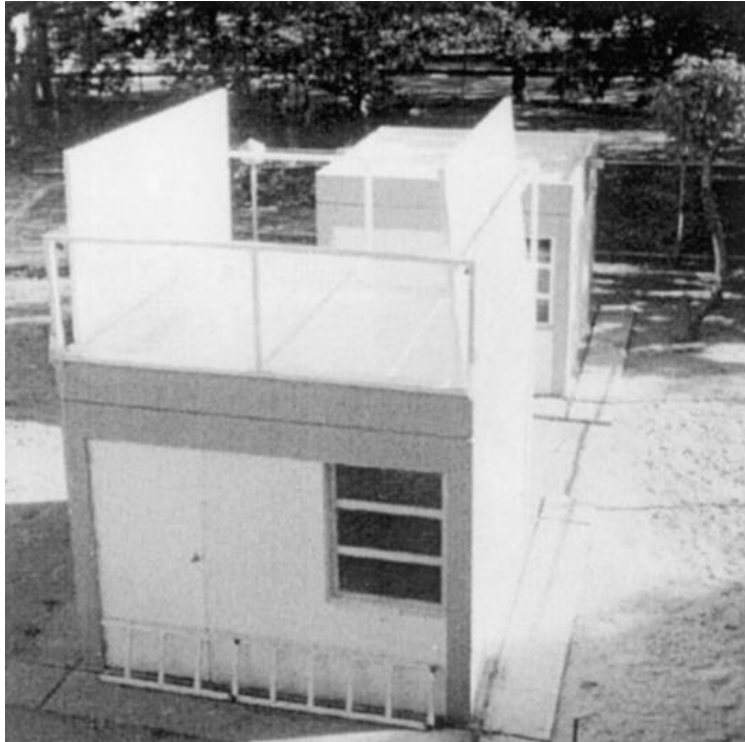


Fig. 2-2 Módulo experimental EVITA. Fuente: Rincón, J. (2000) Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions. Solar energy Vol. 71 pp. 72.



Fig. 2-3 Configuración experimental, módulo con toallas lado izquierdo. Fuente: Tang, R. y Etzion, Y. (2003) Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface. Building and Environment 39 pp. 80.

Tang y Etzion en el mismo año (2003) publicaron el trabajo “On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings”. En él se muestra un estudio de simulación térmica para roof ponds con bolsas de yute (Fig. 2-4). Como conclusión el espesor óptimo recomendado de la masa térmica es de 20 cm. para techo de concreto y 5 cms para techumbre de metal.

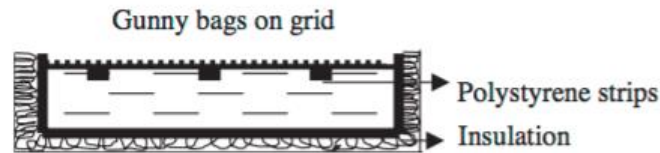


Fig. 2-4 Esquema de arreglo experimental para simulación.
Fuente: Tang, R. y Etzion, Y. (2003) On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings. Building and Environment 39 pp. 202.

Posteriormente Krüger, Fernandes y Lange en el año 2003 presentaron el artículo titulado “Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions”. En él se muestra la metodología para realizar un análisis de dos módulos experimentales con diferentes configuraciones en un clima tropical. Trata el tema de la evaporación y el sombreado como factor importante.

En diciembre del 2003, Bencheikh y Bouchair publicaron el artículo titulado “Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates” en donde realizaron una simulación por computadora de un roof pond con sobre techo de concreto y una cama de piedra en Argelia (Fig. 2-5). Se redujo un promedio de 4 °C.

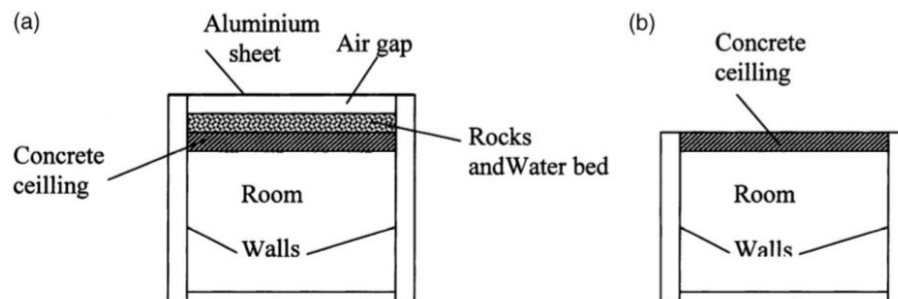


Fig. 2-5 Esquema del modelo: (a) habitación con sistema de enfriamiento; (b) habitación sin sistema de enfriamiento. Fuente: Bencheikh, H. y Bouchair, A. (2003) Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. Renewable Energy No. 29 pp. 1880.

En Israel, en el año 2004 Tang y Etzion presentaron en estudio “Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared”. En él se muestra el mejoramiento de un programa computacional para predecir el comportamiento térmico de un roof pond con bolsas de yute que previamente habían desarrollado.

En el año 2004, Eduardo González y Baruch Givoni presentaron en la conferencia de PLEA el estudio que realizaron en Maracaibo, Venezuela. El título de la conferencia fue “Radiative and radiative/evaporative passive cooling systems for a hot humid climate – Maracaibo”. Mostraron un estudio de fórmulas predictivas elaboradas por Givoni basadas en los resultados de las edificaciones prueba de González en Maracaibo (EUSECE A.C.). Consideró la nubosidad y humedad como variables y se llegó a la conclusión de que los sistemas pasivos de enfriamiento indirecto también pueden ser empleados en climas cálido-húmedos.

Posteriormente González y Givoni continuaron trabajando en 2005 en el tema de roof ponds. Publicaron el artículo “Testing and modelling an evaporative passive cooling system in a hot humid climate – Maracaibo”. En él se muestra el proceso metodológico del estudio de dos módulos escala real con roof ponds. También se muestra la explicación física del fenómeno y se muestra el tratamiento de los datos. Los resultados extensos se encuentran en el artículo “Radiative and radiative/evaporative passive cooling systems for a hot humid climate - Maracaibo”.

En el año 2006, Sudaporn Chungloo y Bundit Limmeechokchai publicaron el artículo que lleva por título “Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of a solar chimney and wetted roof in Thailand” en donde se probaron dos tipos de sistemas pasivos, una chimenea solar y aspersores en la techumbre en un clima cálido húmedo (Fig. 2-6). Se encontró que la chimenea disminuía de 1.0 a 3.5 °C, mientras que el techo con aspersores disminuía de 1.0 a 1.3 °C. Combinando ambos sistemas se logró una reducción de 2.0 a 6.2 °C.

También en el año 2006, Kharrufa y Adil en Irak realizaron el estudio “Roof pond cooling of buildings in hot arid climates”, en donde muestran el análisis de un roof pond en tamaño real de tabique (Fig. 2-7). El experimento se analiza con un sistema convencional abierto y uno más agregando un ventilador. Muestra que la oscilación disminuye y reduce en promedio 3.36 °C.



Fig. 2-6 Módulos experimentales con chimenea solar y sistema de aspersores. Fuente: Chungloo, S. y Limmeechokchai, B. (2006) Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of a solar chimney and wetted roof in Thailand. Building and Environment No. 47 pp. 3343.

Artemisa Spanaki en el año 2007 en Grecia publica el artículo “Comparative studies on different type of roof ponds for cooling purposes: literature review”. En él se muestra una revisión de los diferentes de roof ponds que existen, tales como cubiertos, descubiertos, cool pool, con aspersores, gunny bags y walkable ponds, entre otros.

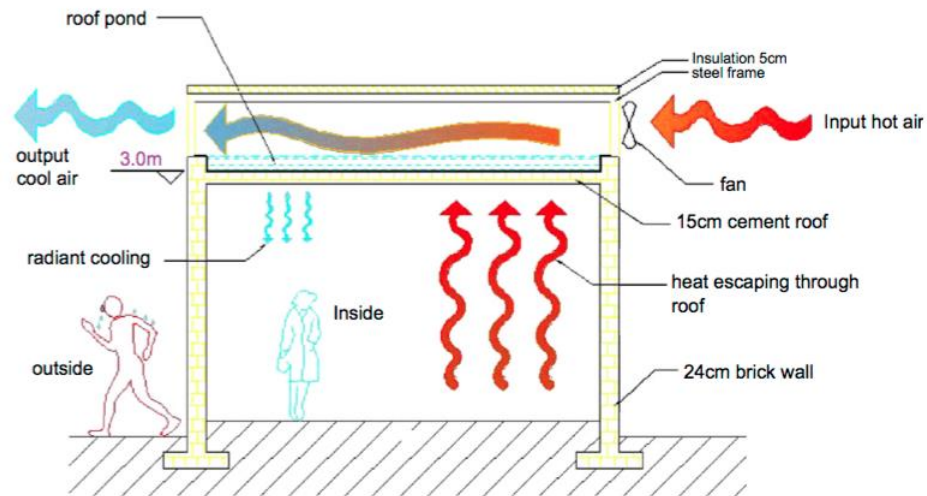


Fig. 2-7 Esquema del funcionamiento del modelo experimental. Fuente: Kharrufa, S. y Adil, Y. (noviembre de 2006) Roof pond cooling of buildings in hot arid climates. Building and Environment Journal. Vol. 4, (3) pp. 83.

De igual manera, en el año 2007 en India, David Pearlmutter y Sigal Ronsenfeld presentan el artículo “Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives”. En él se analizó el comportamiento de una técnica de enfriamiento en zonas cálido-áridas que consiste en una capa de 16 cms de grava sobre la techumbre con irrigación y sobre ella una malla (Fig. 2-8). Los resultados arrojaron que mientras que el funcionamiento de la malla es adecuado durante el día, en la noche el rendimiento mejora si es retirada.

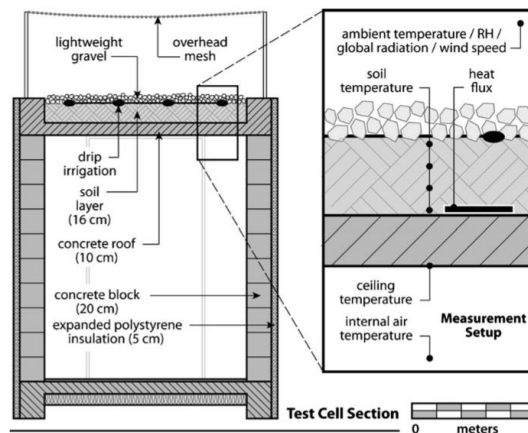


Fig. 2-8 Corte esquemático del arreglo experimental. Fuente: Pearlmutter, D. y Rosenfeld, S. (2007) Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives. Energy and Buildings No. 40 pp. 856.

En el año 2009, Baruch Givoni desarrolló el trabajo “Indoor temperature reduction by passive cooling systems” en donde se centró en los roof ponds. Realizó ecuaciones predictivas iniciales (de un periodo) basándose en los diferentes estudios experimentales de campo realizados por sus colegas (Krüger y González, entre otros). Muestra una revisión del estado del arte y también los principios físicos de los roof ponds.

Las ecuaciones fueron base para el desarrollo de las ecuaciones predictivas de Krüger (2016).

En 2009, Eduardo Krüger, González y Givoni presentan el artículo “Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate” donde se compararon por medio de simulaciones dos viviendas con el mismo roof pond (Fig. 2-9), uno en Israel y el segundo en Venezuela, mostrando resultados similares

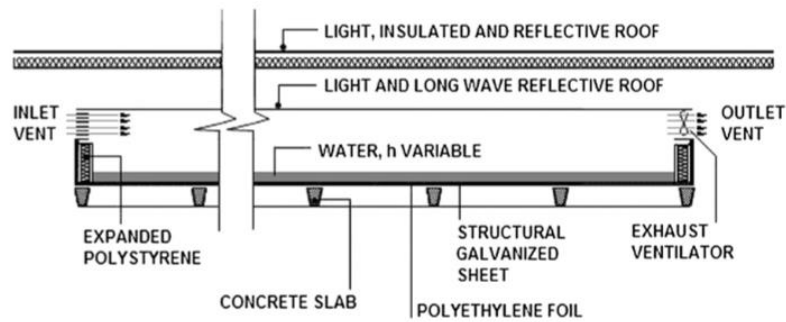


Fig. 2-9 Corte esquemático del sistema para enfriamiento utilizado en la simulación. Fuente: Krüger, E. et al. (2009) Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate. Building and Environment 45 pp. 1427.

En el año 2008 Vázquez, González y Elizondo publican el artículo “Cubiertas y estanques para optimizar el sistema pasivo de techo estanque metálico en clima cálido seco extremo: estudio experimental exploratorio”. En él se muestra un experimento de 13 módulos con 9 diferentes tipos de cubiertas para clima seco (Fig. 2-10). Se realiza un análisis de varianza y correlación simple de la temperatura del agua. Es un estudio exploratorio, mismo que fue estudiado en posteriores artículos.

Posteriormente en Grecia, Spanaki, Tsoutsos y Kolokotsa en septiembre del 2010 publican el artículo “Review of the Parameters affecting the selection of a roof pond variant for cooling purposes”. Muestra una revisión de los diferentes tipos de roof ponds que existen académica y comercialmente.

En el año 2012, Spanaki, Tsoutsos, Kolokotsa y Zacharopoulos publican el artículo “Theoretical and experimental analysis of a novel low emissivity water pond in summer” en donde se desarrolló una prueba de simulación y física para elaborar una modificación al sistema de roof ponds con bolsas de yute o gunny bags. Se eligió un material con emisividad menor en 50% reduciendo así en 2.6 °C la temperatura del fondo y se incrementó el 100% del espesor del agua, de 10 a 20 cm. logrando una reducción en la temperatura del agua de 1.3 °C.

En Septiembre del 2013, Eduardo González y Eduardo Krüger publican el artículo “Enfriamiento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas”. Se exponen los resultados del comportamiento térmico de un experimento, así como un modelo matemático.



Fig. 2-10 De izquierda a derecha en orden descendente: panel móvil, pérgola móvil, de madera, concreto y vigueta sin bovedilla, panel fijo, bóveda de ferrocemento y ladrillo, cañón corrido con descarga de calor, pérgola fija de madera, poliestireno con aberturas verticales y lámina de policarbonato. Fuente: Vázquez, J. et al. (octubre de 2008) Cubiertas y estanques para optimizar el sistema pasivo de techo estanque metálico en clima cálido seco extremo: estudio experimental exploratorio. Revista PALAPA. Vol. 3, pp. 46 y 47.



Fig. 2-11 Vista al interior del experimento. Fuente: Cruz, E. y Krüger E. (septiembre 2013) Enfriamiento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas. Recuperado de: [<http://www.infohab.org.br/encac/files/2013/topico8artigo7.pdf>]

Para ello se construyó un cuarto de tabique y cemento en Maracaibo, Venezuela con un roof pond abierto para validar las ecuaciones predictivas desarrolladas por Krüger (Fig. 2-11). Se trata el concepto de “eficiencia de enfriamiento” de González y se analizan los resultados basados en el rango de confort adaptativo. En las pruebas se reduce la temperatura interior hasta 2.1 °C.

En el mismo año (2013) Eduardo González y Sabrina González publican el artículo “Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo”, mismo que se desprende de la tesis de Maestría de Sabrina González en donde se realizaron mediciones con módulos experimentales de poliestireno con seis diferentes configuraciones. Muestra que el más apto para utilización en climas cálido-húmedos es aquel que combina la masa térmica, protección solar y EEI.

Posteriormente Adqus, M. (2013) realizó la tesis de maestría titulada “Enhancing the Cooling Capacity of Roof Ponds Using Polyethylene Band Filter” en donde comprobó la hipótesis de que los roof ponds pueden ser más efectivos cubriéndolos con filtros de banda, bloqueando la ganancia por radiación permitiendo que el agua reduzca su temperatura, así como potencializar el decremento de ganancia de calor por convección. Para este estudio se utilizó un filtro de banda de polietileno de 50 m y se obtuvo un 10 % de efectividad sobre un roof pond con estanque descubierto (Fig. 2-12). De igual manera se ahorra hasta un 45% de los requerimientos de enfriamiento.

En el año 2014, Spanaki, Tsoutsos, Kolokotsa y Zacharopoulos publican el artículo “Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer”. En el estudio se midió un módulo a escala real con un techo con roof pond y 15 cm., sobre ella una capa de papel aluminio, lo cual reduce un 30% la temperatura más alta en un clima cálido-húmedo.

Bencheikh, en el año 2014 en su tesis doctoral en ciencias “Etude et realisation d’un systeme de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-evaporative dans les climats chauds et arides” desarrolló un modelo matemático dinámico para predecir el rendimiento de un techo evaporativo para edificios ubicados en Laghouat. El sistema de enfriamiento consiste en un techo compuesto por un techo de hormigón y una placa de aluminio, separados por un espacio de aire lleno de pedacera de barro inmersa en agua. Las placas de aluminio reflejan la radiación durante el día, el tratamiento externo del techo proporciona la transferencia de la masa hacia el exterior (vapor de agua).

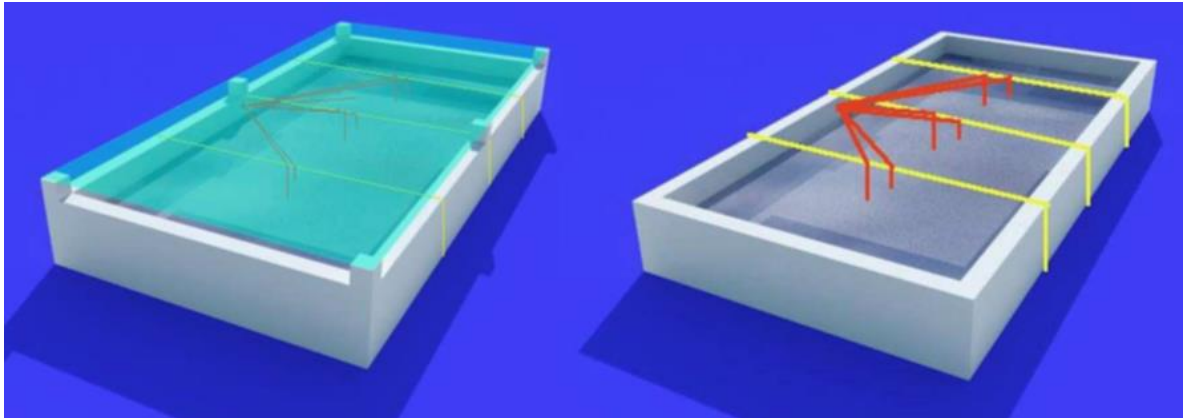


Fig. 2-12 Esquemas de experimento, a la izquierda utilizando cubierta de polietileno y a la derecha tanque abierto. Fuente: Adqus, M. (2013) Enhancing the Cooling Capacity of Roof Ponds Using Polyethylene Band Filter (Tesis de Maestría en Ciencias) Arizona State University, Arizona. Pp. 29.

Bencheikh continuó trabajando sobre sistemas pasivos de enfriamiento en climas cálido-áridos y en el 2014 publicó el artículo titulado “Full scale experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas” en donde se colocó un roof pond sobre un habitáculo, mismo que tenía una cama de roca en la charola que sostiene la masa térmica. Encima de él se colocó una cubierta que tiene la función de condensar el vapor y que el agua se reintegre al roof pond por gravedad. Como conclusión obtuvo una reducción de 6 a 10 °K.

En el año 2014 Carlos Herrera, en Ciudad Juárez en México realizó el estudio “Eficiencia de estrategias de enfriamiento pasivo en clima cálido seco” en donde muestra 6 tipos de módulos experimentales para clima cálido-seco. El cálculo del potencial de enfriamiento y la eficiencia de enfriamiento. Concluyó que el tipo de módulo más eficiente fue el que utilizaba el enfriamiento evaporativo indirecto, el enfriamiento radiativo nocturno y el aislamiento térmico.

Posteriormente Lapisa, Bozonnet, Abadie, Salagnac y Perrin en Francia en Junio del 2014 presentaron el artículo titulado “Etude de l’impact des « cool roofs », de la ventilation naturelle et de l’inertie thermique du sol sur les performances énergétiques de bâtiments commerciaux”, donde se simuló el comportamiento térmico de una edificación de carácter comercial con la estrategia de roof ponds en ayuda con la ventilación natural para conocer el porcentaje de reducción de demanda de enfriamiento. Se calculó que se reduce en un 49.4%

Ayyoob Sharifi y Yoshiki Yamagata en el año 2015 en Japón publicaron el trabajo “Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review”. Es una investigación que muestra una revisión de diferentes aspectos de los roof ponds tales como condiciones meteorológicas, espesor de la masa térmica, materiales y forma de los paneles para lograr un buen desempeño térmico.

Krüger, Lange, Fernandes y Rossi en septiembre del 2016 publican el artículo “Evaluation of the cooling potential of a roof-pond system under subtropical conditions”. Muestra un estudio en el que realizó la medición de dos módulos experimentales de poliestireno con roof ponds para elaborar ecuaciones predictivas, continuando con el trabajo de Givoni (Fig. 2-13).

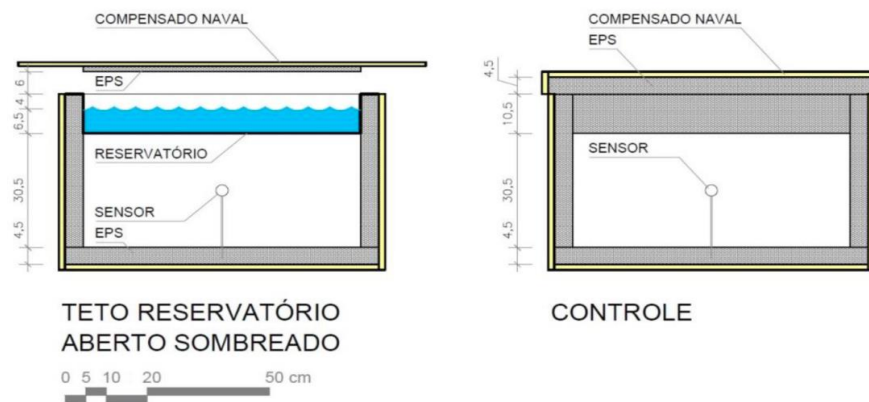


Fig. 2-13 Esquemas ilustrativos del módulo experimental y el de control. Fuente: Krüger, E. et al. (septiembre de 2016) Evaluation of the cooling potential of a roof-pond system under subtropical conditions. Revista Ambiente Construido (versión electrónica) Vol. 16, (3) Recuperado de [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212016000300107&lang=pt]

En el mismo año (2014) Alfredo Fernández González presentó la conferencia titulada “Characterization of a Thermal Comfort in a passively cooled building located in hot-arid climate” donde se midió la eficiencia de dos tipos de roof ponds en Nevada. Uno seco y uno húmedo. Se utilizaron bolsas de plástico que contenían agua y ambas se colocaron en dos habitáculos idénticos. Uno se mantenía húmedo en su superficie (Fig. 2-14). Se comprobó que el roof pond seco mantenía la temperatura al interior 1.8 °C debajo de la temperatura exterior mientras que el húmedo reducía 8.5 °C. Ninguno de los dos logró llegar a la temperatura de confort.



Fig. 2-14 Módulo experimental y módulo de control. Fuente: Fernández, A. (2014) Characterization of a Thermal Comfort in a passively cooled building located in hot-arid climate. Proceedings of 8th Windson Conference. Counting the Cost of Comfort in a changing world. Londres.

En el año 2017, Khalifa continuó su investigación y publicó el artículo “Effect of roof pond on the energy and exergy performance of single space building” donde realizó un modelado para conocer el comportamiento térmico de un roof pond (Fig. 2-15) en una zona árida con las ecuaciones de Fourier con variables dependientes del tiempo. El resultado muestra que la temperatura interior puede decrecer hasta 4 °C en comparación con la vivienda vernácula.

Posteriormente en el año 2017, Krüger, Fernandes, Cardoso y Kavamura presentan el estudio “Proposition of a simplified method for predicting hourly indoor temperatures in test cells”. Se presenta un método para medir la eficiencia térmica de diferentes sistemas pasivos en módulos experimentales basados en la experiencia previa de estudios similares.

Los Sistemas de Enfriamiento Evaporativo que emplean agua como masa térmica han sido ampliamente estudiados desde los años setenta y se han realizado distintos dispositivos y diversas investigaciones que actualmente forman parte del desarrollo de los sistemas de enfriamiento pasivo para edificaciones.

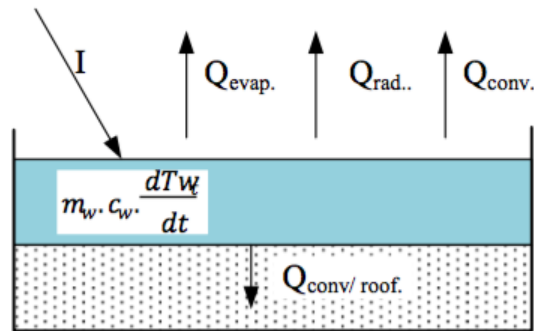


Fig. 2-15 Balance térmico del roof pond. Fuente: Khalifa, A. (Julio de 2017) Effect of roof pond on the energy and exergy performance of a single space building. Journal of Thermal Engineering. Vol. 3 Pp. 1282.

2.1.2 Enfriamiento pasivo empleando aceite de coco (MCF)

El empleo de aceite de coco como estrategia de enfriamiento pasivo ha sido poco estudiada ya que se considera un material de cambio de fase con eficiencia no establecida, en comparación, por ejemplo con las parafinas, sin embargo, se ha empleado como parte de estrategias activas y por lo tanto las investigaciones han sido conducidas al estudio de las propiedades del material. A continuación, se muestran las investigaciones realizadas como estrategia de enfriamiento pasivo en edificaciones.

Irsyad, M. en el año 2016 realizó la investigación en Indonesia que lleva por título “Características de transferencia de calor del aceite de coco como material de cambio de fase para aplicación de enfriamiento de interiores”. Realizó un experimento en el cual colocó una película de 8 cm de aceite de coco sobre una charola de aluminio en tres escenarios: el primero modificando la temperatura, el segundo aplicando ventilación natural y el tercero aplicando ventilación forzada (Fig. 2-16).

Como conclusión se presentó que a temperaturas de 30 °C el tiempo de cambio de fase fue de 1700 min y fue estable a temperaturas de 27 °C. El aumento en la temperatura del aire aceleró el cambio de fase, mientras que a convección forzada redujo la temperatura del aire de 30 a 35 °C a 1 o 2 °C con una velocidad de 1 a 3 m/s.

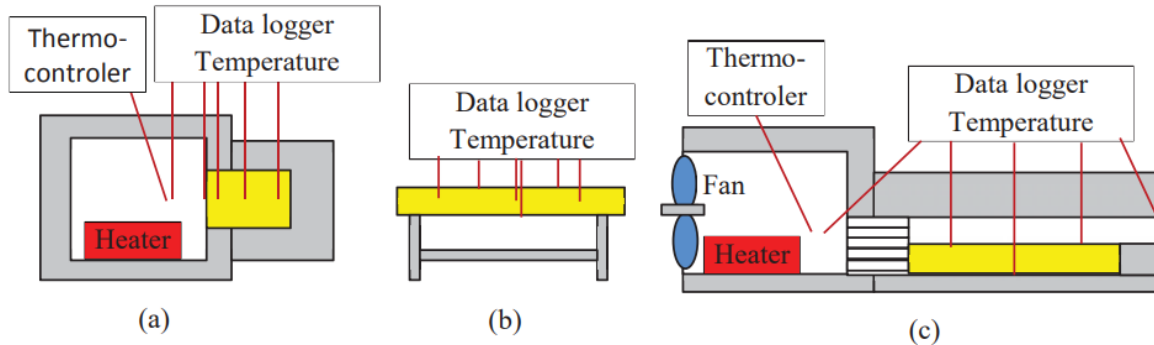


Fig. 2-16 Arreglo experimental para medición de temperatura. Fuente: Irsyad, M. (2016) Heat transfer characteristics of coconut oil as phase change material to room cooling application 1st International Symposium on Green Technology for Value Chains 2016, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 60 (2017) 012027.

En una segunda investigación realizada por Isryad M. et. al. (2016) se demostró que es posible reducir la temperatura interior hasta 2 °C empleando el aceite de coco encapsulado dentro tabiques. El experimento se realizó en módulos experimentales para conocer el decremento de la temperatura interior en paredes (Fig. 2-17).

En el año 2018, en Indonesia Wonorahardj, S. et. al. condujeron la investigación que lleva por nombre “Potencial de almacenamiento de energía térmica con aceite de coco para control de temperatura del aire” en donde realizan un experimento con aceite de coco encapsulado en vidrio de tres diferentes espesores (8, 12 y 16 cm).

Las mediciones se llevaron a cabo en una cámara térmica a temperatura ambiente. Los resultados determinaron que el espesor no era determinante y que el aceite podría ser empleado como control de temperatura en ambientes mayores a 20 °C, aunque sólo puede ser empleado el 50% de su capacidad térmica. Se concluyó que la descarga de calor latente se producía entre 16 y 18 °C, mientras que el almacenamiento se producía entre 20 y 25 °C, por lo que recomendaban una estrategia de enfriamiento pasivo indirecto para obtener posiblemente mejores resultados (Fig. 2-18).

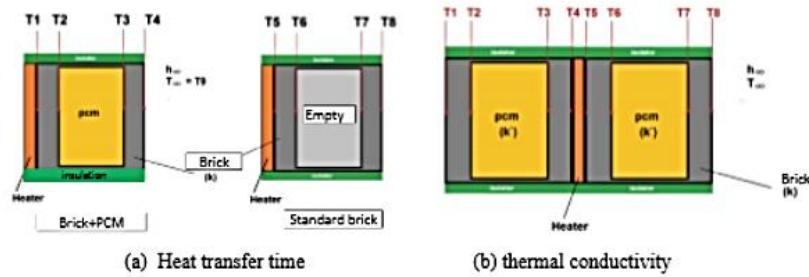


Figure 2. Test equipment scheme of heat transfer characteristics in brick.

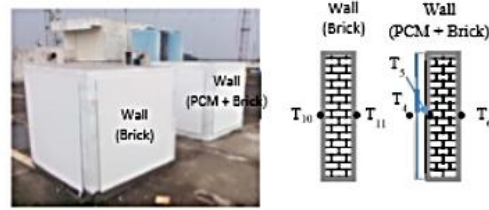


Figure 3. Heat transfer test on walls in building models.

Fig 2-17 Experimento en paredes empleando MCF. Fuente: Isryad, M. (2016) Heat transfer characteristics of building walls using phase change material.

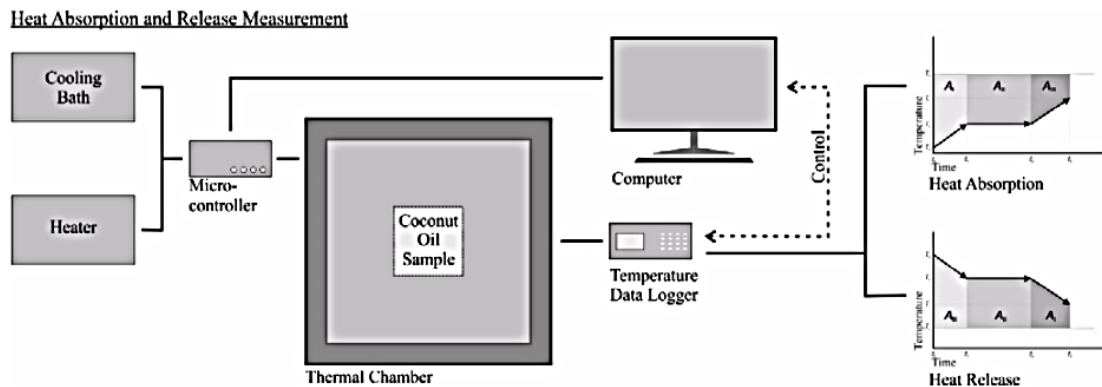


Fig. 2-18 Arreglo experimental de medición para célula de aceite de coco. Fuente: Wonorahardj, S. et. Al. (2018) file:///C:/Users/eanas/Downloads/buildings-08-00095.pdf

Las investigaciones en climas cálido-húmedo han comenzado a proponer el uso del aceite de coco para su utilización en sistemas de enfriamiento pasivo indirecto como estrategia para enfriamiento. En el presente trabajo se conocerá el desempeño de este material en comparación con agua y se conocerá si es un material viable para considerar realizar futuros estudios.

2.2 Casos análogos

Para el análisis de los casos de estudio análogos se consideraron sólo aquellos que se localizan en climas cálido-húmedos, cálido sub-húmedos o mediterráneo, además de ser estudios realizados a través de experimentación con modelos físicos, cuyo objetivo principal es conocer el comportamiento higrotérmico. Se descartaron los modelos matemáticos que en algunos casos de desarrollaron con base en los resultados de los experimentos físicos.

1. Evaluación de un Techo Estanque como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo (Tesis de Maestría en Diseño Bioclimático).

Año:1993

Autor: Humberto Sánchez Guzmán.

Tabla 2-1 Resumen de investigación “Evaluación de un Techo Estanque como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo (1993)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Se construyeron cinco módulos escala real con paredes de tabique. 1. Sistema de techo-estanque con aislante móvil. 2. Sistema de techo estanque con cubierta fija y ventilado. 3. Sistema de techo estanque con aislante fijo y regadera. 4. Sistema de losa de concreto con aislante móvil. 5. Módulo con losa de concreto sombreada y ventilada.	Techo-estanque: 1. ERN ¹ (5) 2. AT y V (4) 3. AT y E (3) Sistema de losa de concreto: 1. ERN (6) 2. PS y V (2)	Se realizó un registro de datos anual (desfase en días) Se registraron temperaturas características en °C. 1. Temp. interior 2. Temp. ambiente de bulbo seco 3. Temperatura ambiente de bulbo húmedo 4. Temperatura del agua Se dividieron los resultados por épocas.	Se realizó una evaluación por grados-hora de enfriamiento. Se definen como la suma de las diferencias entre la temperatura interna del módulo y una temperatura base (25°C por ser la temp. neutra de los aires acondicionados) al principio de cada hora del día. Solo se consideran las diferencias positivas, es decir, aquellas temperaturas internas que están por encima de la temperatura base.	Como conclusión establece que aunque el techo estanque con aislante móvil es el más eficiente, considerando la capacidad de enfriamiento, operación y mantenimiento el autor considera que el sistema de losa de concreto con aislante móvil es una buena opción. Eficiencia: Módulo 2: 38% Módulo 3: 63% Módulo 4: 58% Módulo 5: 73% Módulo 6: 24%

Como uno de los primeros trabajos en techos-estanque en México, el autor considera un análisis de días-grado. Sin embargo, los siguientes trabajos consideraron análisis un poco más complejos (Tabla 2-1 y Fig. 2-19).

¹ Abreviaturas

EEI: Enfriamiento Evaporativo Indirecto / ERN: Enfriamiento Radiativo Nocturno / MT: Masa térmica / AT: Aislamiento térmico / PS: Protección solar / V: Ventilación / E: Evaporación

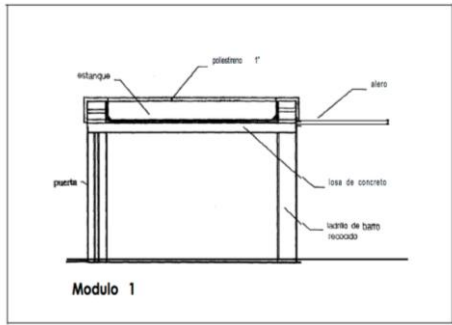


Figura 8. Módulo 1, sin techo estanque, representa a una construcción convencional

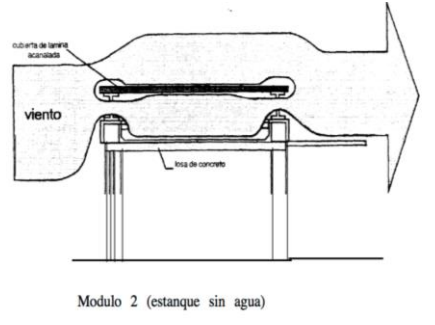


Figura 9. Módulo 2, sin techo estanque, con cubierta fija y ventilado

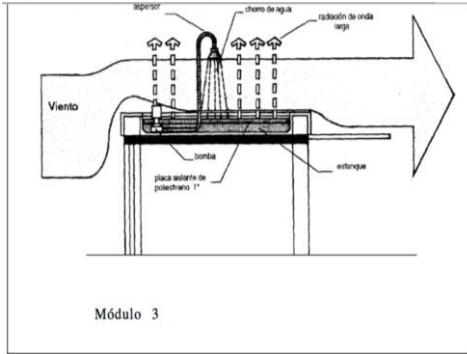


Figura 10. Módulo 3, techo estanque con aislante fijo y regadera

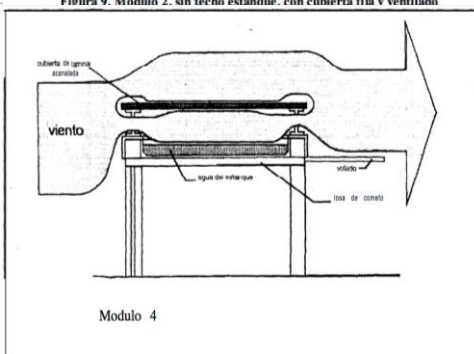


Figura 11. Módulo 4, techo estanque con cubierta fija y ventilado

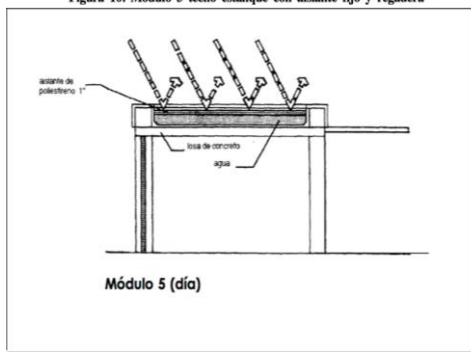


Figura 12. Módulo 5, techo estanque con aislante móvil (día)

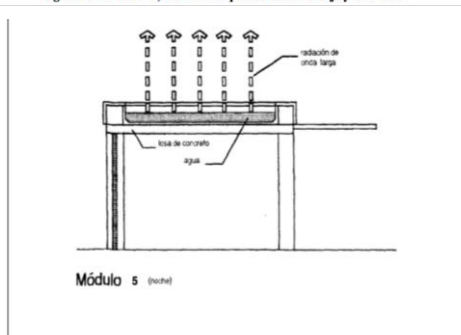


Figura 13. Módulo 5, techo estanque con aislante móvil (noche)

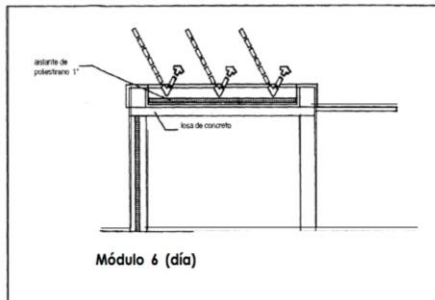


Figura 14. Losa de concreto con aislante móvil

Fig. 2-19 Esquemas de modelos experimentales. Fuente: Sánchez, H. (1993) Evaluación de un Techo Estanque como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo (Tesis de Maestría en Diseño Bioclimático). Universidad de Colima. Pp. 50 a 56.

2. Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions.

Año: 2003

Autores: E. Krüger, L. Fernandes y S. Lange

Tabla 2-2 Resumen del estudio “Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions (2003)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Se construyeron dos módulos experimentales de poliestireno en su interior y madera en el exterior. 1. Utilizando EEI. 2. Se usó de diferentes formas: a) Como módulo de control, b) MT con V (sellado y ventilado), c) EEI (sin cubierta. Se midió durante 24 días en primavera, posteriormente durante 40 días en verano	1. EEI 2. MT + V 3. EEI + ERN	1. Análisis de temperatura y humedad característica (temperatura y humedad al interior, temperatura del agua, radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad exterior).	Análisis de temperatura y humedad característica por regresión lineal considerando día y noche, además de comparar temperatura media, mínima y máxima.	En general se logró una reducción de 2°C al interior y se hace hincapié de que los techos-estanque con evaporación presentan un mejor rendimiento en climas cálidos-húmedos. Observa que para futuras investigaciones es necesario estudiar la profundidad de la charola de agua, así como la altura de la techumbre.

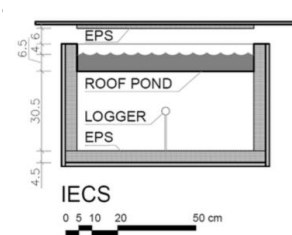


Fig. 2. Test cells tested during the first monitoring round – IECS, with shaded and naturally ventilated roof pond vs. control test cell CtrlU.

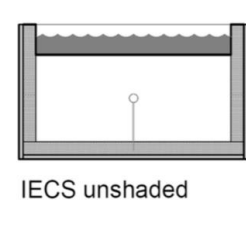
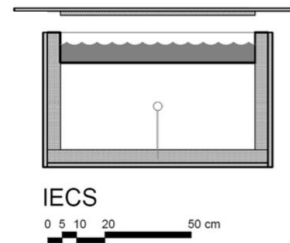
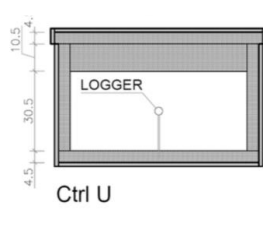


Fig. 4. Test cells tested during the third monitoring round – IECS with shaded and naturally ventilated roof pond vs. IECS without cover (IECS_{unshaded}).

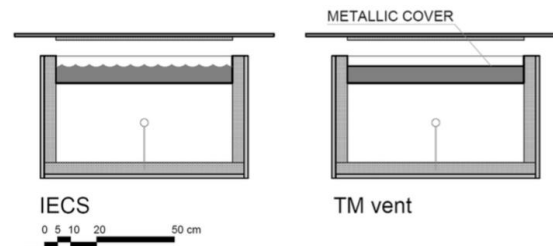


Fig. 3. Test cells tested during the second monitoring round – IECS, with shaded and naturally ventilated roof pond vs. experimental test cell with sealed water reservoir, with natural ventilation on top (TM_{vent}).

Fig. 2-20 Esquema de módulos experimentales. Fuente: Krüger, E. et al. (2003) Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions. Building and Environment 107 pp. 92.

Fue un trabajo en el que los módulos experimentales no fueron medidos simultáneamente, sin embargo, realizó un análisis un poco más complejo que Sánchez y comenzó a dar explicación del fenómeno físico por medio de ecuaciones predictivas (Tabla 2-2 y Fig. 2-20).

3. Testing and modelling an evaporative passive cooling system in a hot humid climate –

Maracaibo.

Autores: Eduardo González y Baruch Givoni

Año: 2005

Tabla 2-3 Resumen del estudio “Testing and modelling an evaporative passive cooling system in a hot humid climate – Maracaibo (2005)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Se utilizaron dos habitáculos experimentales construidos en 1992 en la Universidad de Zulia. Ambos son idénticos y miden 9 m ² , muros de 2.45 m de altura de tabique. Uno de ellos se utilizó como módulo de control y el otro como módulo experimental, mismo que en su techumbre tiene una lámina galvanizada sobre la cual descansa una cama de agua de 10 cms de espesor con paneles móviles.	EEl	1. Temperatura interior y exterior 2. Humedad exterior e interior	Se analizó por medio de: 1. Humedad y temperatura características 2. Potencial de enfriamiento medio 3. Indice de desempeño de enfriamiento	Concluye que el enfriamiento evaporativo indirecto es una estrategia que puede ser utilizada en climas cálido-húmedos. Se redujo la temperatura 2.7 C con respecto al módulo de referencia.



Fig. 1: The test facility (experimental and reference cells) with the continuous evaporative passive cooling system.

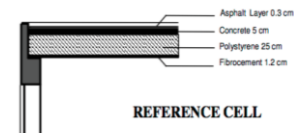


Fig. 2: Roof section of the reference cell.

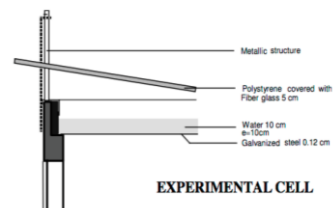


Fig. 2-21 Esquemas constructivos y fotografía de modelo experimental a escala real. Fuente González, E. y Givoni, B. (2005) Testing and modelling an evaporative passive cooling system in a hot humid climate - Maracaibo. Proceedings of ISES 2005 Solar World, pp. 2.

Es un trabajo importante en el tema de los sistemas de enfriamiento evaporativo en climas cálidos, ya que en él se desarrollaron índices para medir la eficiencia de los módulos experimentales. Los índices son utilizados actualmente en las investigaciones contemporáneas. (Tabla 2-3 y Fig. 2-21).

4. Estudio experimental de comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo.

Año: 2011

Autora: Sabrina González

Tabla 2-4 Resumen de la investigación “Estudio experimental de comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo (2011)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Se construyeron siete experimentos y un módulo de control de poliestireno y triplay en su exterior.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cámara de aire + AT 2. Cámara de aire + AT + ERN 3. EEI + PS 4. MT + AT 5. ERN + MT 6. EEI + MT + PS 7. ERN + EEI + MT + PS 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Temperatura interior y exterior 2. Humedad exterior e interior 	<p>Se analizó por medio de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Humedad y temperatura características 2. Factores decrementales 3. Potencial de enfriamiento medio 	<p>En los experimentos 3,5,6 y 7 las temperaturas máximas del ME son siempre inferiores a la temperatura media, sin embargo e experimento 3 de EEI + PS es el más eficiente.</p>



Figura 3-24. Módulo experimental y de control.



Figura 3-22. Sensor de medición de Toe.



Figura 3-23. Módulo experimental y de control.



Figura 3-21. Módulo experimental.

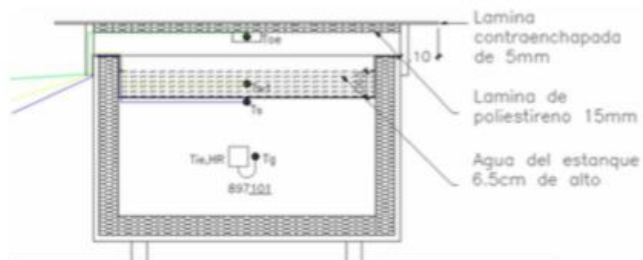


Fig. 2-22 Esquema y fotografías de experimento no. 3. Fuente: González, I. (2011) Estudio experimental de comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo. Tesis de maestría. Universidad de Andalucía, España.

Es un trabajo que continúa las investigaciones de González y Givoni (2005). Se basa en los índices que desarrollaron caracterizando además el efecto de la masa térmica para explicar el enfriamiento de cada módulo (Tabla 2-4 y Fig. 2-22).

5. Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estaque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo

Año: 2013

Autores: Eduardo González y Sabrina González

Tabla 2-5 Resumen del trabajo “Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estaque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo (2013)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Se utilizaron módulos experimentales de 80 x 80 cm y 47 cm de altura con exterior de triplay y revestimiento interior de poliestireno. Se utilizaron cinc configuraciones y un módulo de control.	<ol style="list-style-type: none"> 1. EEI + PS 2. MT + AT 3. ERN + MT 4. EEI + MT + PS 5. ERN + EEI + MT + PS 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis de temperatura y humedad característica (temperatura y humedad al interior, temperatura del agua, radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad exterior). 	<p>Se analizó por medio de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Humedad y temperatura características 2. Factores decrementales 3. Potencial de enfriamiento medio 	Muestra que el más apto para utilización en climas cálido-húmedos es aquel que combina la masa térmica, protección solar y EEI (Experimento 5).



Figura 2 - Montaje experimental



Figura 6 - Equipo registrador Hobo U12-001

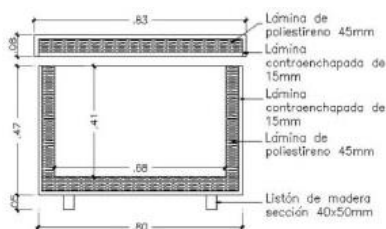


Figura 3 - Dimensiones de los módulos



Figura 7 - Sensor TMC20-HD USB

Fig. 2-23 Fotografía y esquema de montaje experimental del módulo de control y equipo de medición utilizado. Fuente: González, M. y González, S. (diciembre de 2013) Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estaque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. Revista Ambiente Construido (versión electrónica) Vol. 13.

Artículo desprendido de la tesis de maestría de Sabrina González en donde la mejor estrategia fue aquella conformada por las estrategias de enfriamiento radiativo nocturno, enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (Tabla 2-5 y Fig. 2-23).

6. Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer.

Año: 2014

Autores: Artemisa Spanaki, Theocharis Tsoutsos, Dionysia Kolokotsa e Ilias Zacharopoulos

Tabla 2-6 Resumen del trabajo “Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer. (2014)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Un estanque en el techo se llena con agua de hasta 0.10-0.12 m de profundidad, mientras que una capa de aluminio se mantiene 0.15 arriba de la superficie de agua libre, permitiendo la ventilación entre el nivel del agua y el escudo de aluminio.	EEI + PS + V	Se midió temperatura: 1. Agua 2. Ambiente 3. Interior 4. Punto de rocío	1. Análisis de temperatura y humedad característica	La temperatura mínima diaria del agua es prácticamente igual a la temperatura del aire correspondiente, mientras que la temperatura máxima diaria del agua es aproximadamente 8-13 ° C más baja en comparación con el valor correspondiente del aire.

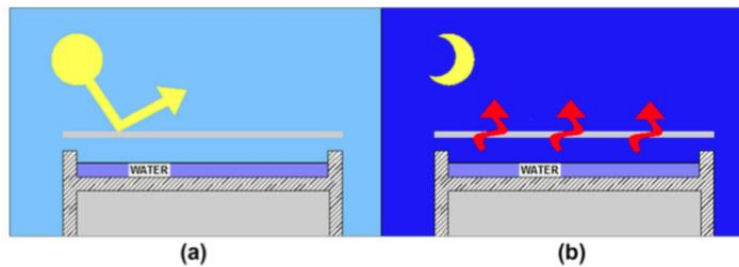


Fig. 1. Ventilated pond with aluminium layer during summer day (a) and night (b).

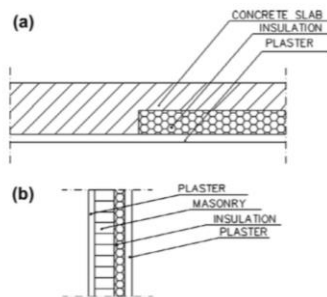


Fig. 4. (a) and (b) Roof and wall section.



Fig. 7. The tested device: ventilated pond covered with aluminium.

Fig. 2-24 Esquemas de funcionamiento, detalle constructivo y fotografía de módulo experimental. Fuente: Spanaki, A. (2014) Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer. Applied Energy No.123 pp. 275.

Es un estudio importante ya que no se habían investigado las variantes de los materiales de la cubierta. Muestra resultados favorables y es una nueva rama de oportunidad. (Tabla 2-6 y Fig. 2-24).

7. Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo

Año: 2015

Autor: Carlos Javier Esparza López

Tabla 2-7 Resumen del trabajo “Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo. (2015)”. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	VARIABLES	FACTORES DE EFICIENCIA	TRATAMIENTO DE DATOS	RESULTADOS
Se analizó un módulo experimental con techo estanque y fieltro flotante contra un módulo experimental. Una vez comprobada su eficacia se construyó un dispositivo de enfriamiento evaporativo indirecto por medio de una fibra minimizando el volumen del líquido en la azotea.	Se modificaron a las condiciones de humectación del dispositivo propuesto con la finalidad de reducir el consumo de agua en el mismo. Se propusieron cuatro regímenes: humectación continua de la fibra, humectación de una hora cada cuatro horas, humectación de una hora cada seis horas y humectación de una hora cada ocho horas.	1. Análisis de temperatura y humedad característica (temperatura y humedad al interior, temperatura del agua, radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad exterior). 2. Régimen de humectación.	Se analizó por estadística. Se resumieron los resultados por medio de regímenes (continuo, cuatro, seis y ocho horas).	Se mostro que el dispositivo funciona de forma similar al techo estanque en las temporadas templada semi-húmeda y cálido semi-húmeda y respecto al fieltro flotante en las tres temporadas. Se observa una disminución de la temperatura máxima exterior para la temporada templada de hasta 8K y de hasta 6K para las otras dos temporadas.

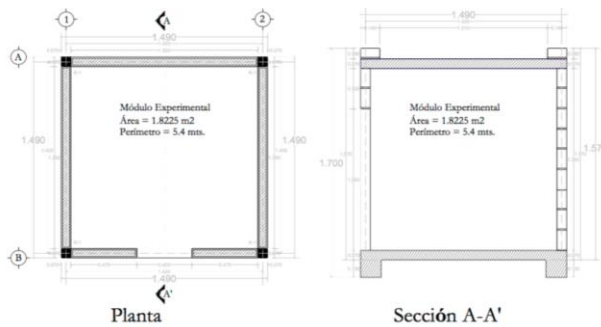


Fig. 10. Planta y sección de los módulos experimentales de la FAyD-UCOL. Fuente: Modificado a partir del diseño de M.Arq. Marcos Eduardo González Treviño.



Fig. 12. Módulo experimental forrado con 0.04 m de poliestireno. Fuente: Autor.



Fig. 18. Dispositivo de película húmeda inmersa en fibras en módulo 07. Fuente: Autor.



Fig. 14. Sobrecubierta instalada en módulo 07. Fuente: Autor.

Fig. 2-25 Fotografías de montajes experimentales y esquema arquitectónico de módulos experimentales preexistentes. Fuente: Esparza, C. (2015) Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo. Tesis de Doctorado en Arquitectura. Universidad de Colima, México, pp. 69 a 72.

Es una tesis doctoral dirigida por González Cruz. Es desprendida de los estudios del mismo e incluye el análisis de un sistema de “tela húmeda” en reemplazo de un roof pond. Realiza además un análisis de factor de evaporación (Tabla 2-7 y Fig. 2-25).

Como conclusión, en climas cálidos con porcentaje de humedad relativa en el ambiente exterior mayor al 50% se han realizado diversos estudios que contemplan los modelos físicos a escala para conocer el comportamiento térmico a través de estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto. Se ha desarrollado metodología experimental, así como índices o conceptos para el estudio del tratamiento de los datos, sin embargo, aún existen diversos temas por abordar como seguimiento de cada una de las investigaciones mencionadas.

3

SISTEMAS PASIVOS DE ENFRIAMIENTO, CONFORT HIGROTÉRMICO Y ANÁLISIS CLIMÁTICO

INDICE

3.1 Sistemas pasivos de enfriamiento	52
3.1.1 Sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo indirecto	53
3.1.2 Sistemas pasivos de enfriamiento radiativo nocturno	54
3.1.3 Aislamiento térmico	54
3.1.4 Protección solar	55
3.1.5 Masa térmica	55
3.1.5.1 Materiales de cambio de fase	56
3.2 Confort térmico	59
3.2.1 Variables determinantes del confort térmico	60
3.2.2 Modelos de confort térmico	62
3.3 Caso de estudio: Ciudad de Mérida, análisis climático	68

Capítulo 3: Sistemas pasivos de enfriamiento, confort higrotérmico y análisis climático

Una edificación presenta diversos tipos de intercambio energético con su ambiente, siendo estos los que determinan la característica higrotérmica, lo cual puede o no proporcionar confort.

Todos los cuerpos con temperatura superior a 0 °K emiten radiación electromagnética a diferentes longitudes de onda dependiendo de su temperatura. La radiación común en la Tierra, considerando su temperatura ambiental, se encuentra en longitudes de onda larga entre 5 y 100 μm (González, 2002).

Cuando un cuerpo (individuo, edificación, entre otros) es expuesto a otro cuerpo considerado como pozo térmico a temperatura constante, se produce un enfriamiento radiativo. En el caso de las edificaciones, para obtener confort térmico se emplean los sistemas pasivos.

Los sistemas pasivos son aquellos integrados a una edificación que tienen por objetivo captar, controlar, almacenar, distribuir o emitir los aportes de energía natural sin intervención de alguna fuente de energía (Alonso, 2016) para generar confort al ser humano.

Los sistemas pasivos pueden ser, de acuerdo con las necesidades de un microclima, de calentamiento; en donde a grandes rasgos se necesita promover ganancias y evitar pérdidas energéticas; y, por el contrario, de enfriamiento donde es necesario evitar ganancias y promover pérdidas energéticas.

En el caso específico de este trabajo se abordan los sistemas pasivos de enfriamiento.

3.1 Sistemas pasivos de enfriamiento

De acuerdo con (Morillón, 2002) el enfriamiento pasivo involucra una descarga de energía de la edificación con las partes más frías del medio ambiente, siendo estas: el cielo, la atmósfera y el suelo.

La clasificación de los procesos de enfriamiento se presenta de la siguiente forma:

- a) Enfriamiento directo: Se presenta cuando las superficies y los componentes del interior se encuentran expuestos directamente al (los) medio(s) del ambiente.
- b) Enfriamiento indirecto: Se presenta cuando el espacio es enfriado por transferencia de calor hacia una superficie, misma que ha sido enfriada por exposición directa al medio

ambiente y que su capacidad de almacenamiento térmico le permite continuar el proceso de enfriamiento.

- c) Enfriamiento aislado: Se presenta cuando el espacio es enfriado por medio de un fluido con el objetivo de controlar la transferencia de calor.

Generalmente el enfriamiento en las edificaciones muestra una combinación de procesos y en el caso del presente estudio uno de los objetivos es conocer el desempeño de las diversas combinaciones de estrategias.

3.1.1 Sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo indirecto

El enfriamiento evaporativo implica el cambio de fase del agua del estado líquido al gaseoso. De acuerdo con Mihalakakou y Santamouris (1996), es un proceso que emplea la evaporación como pozo térmico natural (un elemento en donde la energía se descarga). Es un proceso en donde el calor sensible (que es la energía calorífica suministrada a un elemento para desencadenar el aumento de su temperatura sin afectar su estructura molecular) que la evaporación del agua requiere (aire o agua) es utilizada como calor latente de vaporización. (que es la cantidad de energía requerida por una sustancia para cambiar de fase).

El enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) son técnicas que emplean el mismo principio de evaporación para enfriar algún componente de una edificación (Fig. 3-1) y donde el resultado es el decremento de temperatura en el espacio interior sin aumentar su contenido de humedad.

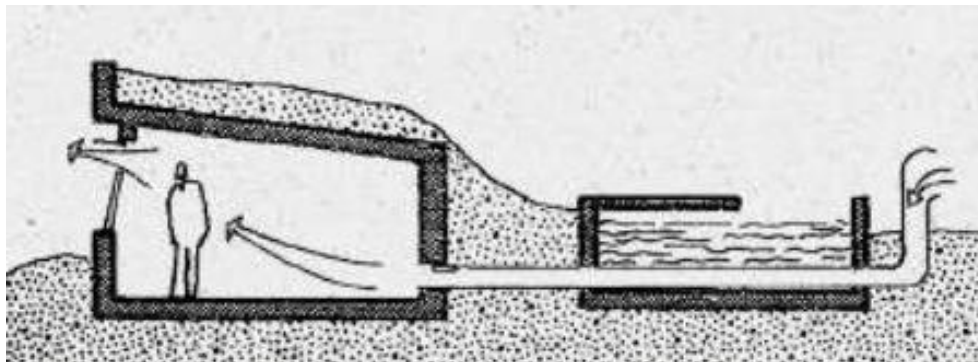


Fig. 3-1 Estanque de enfriamiento. Fuente: <https://es.slideshare.net/Norbri/enfriamiento-y-calentamiento> (2019).

Generalmente se recomienda su utilización en regiones áridas y subhúmedas (Givoni, 1994) en donde la temperatura de bulbo húmedo (TBH) no sea mayor a 25 °C y temperatura de bulbo seco (TBS) no mayor a 46 °C.

3.1.2 Sistemas pasivos de enfriamiento radiativo nocturno

Un sistema pasivo de enfriamiento radiativo es aquel capaz de captar, almacenar y distribuir el frío sin la utilización de dispositivos electromecánicos (González, 2002).

El Sol emite radiación de onda corta y la Tierra emite radiación de calor en forma de onda larga al cielo, considerado el pozo térmico más importante. La capacidad de “captar frío” es la capacidad de emitir fácilmente radiación de onda larga, por lo que para su empleo en una edificación se deberá de considerar la utilización de una parte de la misma y un material que garantice la pérdida de calor por radiación durante las horas nocturnas (Fig. 3-2).

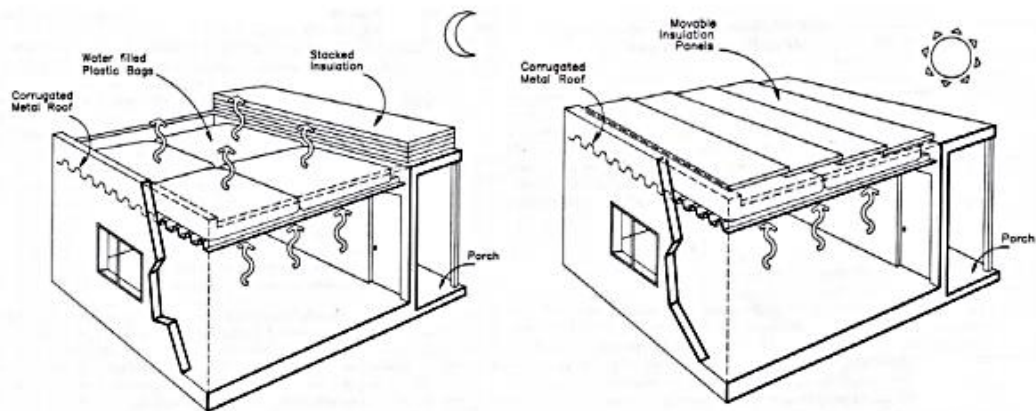


Fig. 3-2 Esquema de funcionamiento del sistema “Skytherm” de Harlod Hay. Fuente: González, E. Enfriamiento radiativo en edificaciones, 2002).

3.1.3 Aislamiento térmico

El aislamiento térmico es una propiedad de los materiales que se emplea para bloquear el paso por conducción de energía y se evalúan por medio de la resistencia térmica.

La resistencia térmica se define como el producto del valor de la conductividad del material y el espesor del mismo.

Dependiendo de las condiciones ambientales y necesidades de confort, el aislamiento térmico resulta en una estrategia eficaz de diseño (Fig. 3-3).

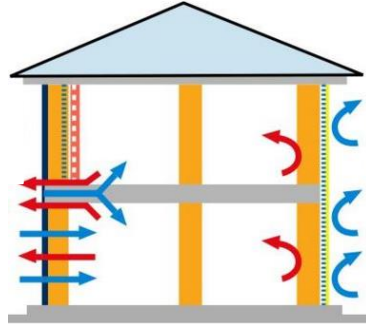


Fig. 3-3 Esquema de intercambio térmico, fachada izquierda sin aislamiento, fachada derecha con aislamiento. Fuente: http://www.pinturasdispival.com/blog/10_Sistema-de-aislamiento-t%C3%A9rmico-por-el-exterior (2019).

3.1.4 Protección solar

La protección solar es una estrategia empleada para evitar el sobrecalentamiento al interior de las edificaciones. Mediante un adecuado control, la energía puede ser reflejada y disipada hacia un receptáculo ambiental natural, reduciendo así la demanda energética (Fig. 3-4).

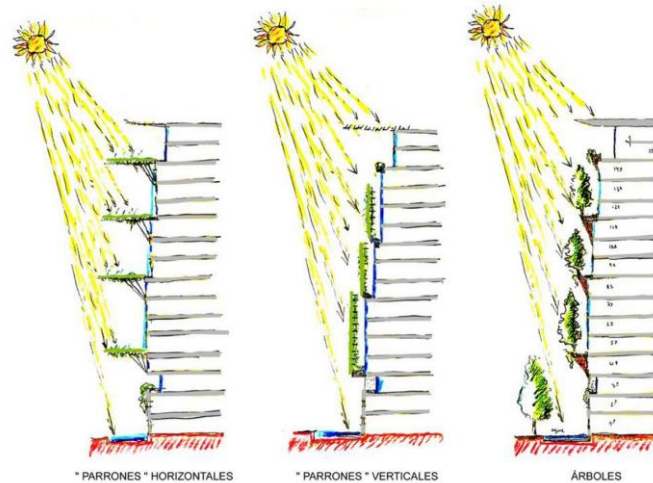


Fig. 3-4 Diferentes tipos de protección solar en fachada de edificio. Fuente: <https://www.archdaily.mx/mx/02-14392/> (2019)

3.1.5 Masa térmica

La masa térmica es el material de construcción capaz de absorber y almacenar la energía recibida, ya sea por el ambiente externo o interno. Puede ser empleada en cualquier elemento

de una edificación (piso, pared y techo). De acuerdo con González, (1997), el material ideal es aquel que posea alto calor específico, alta densidad y alta conductividad térmica.

Para obtener condiciones de confort al interior de una edificación, es recomendable presentar una oscilación o amplitud de temperatura (DT) poco variable y depende de forma importante de la cantidad de “masa térmica efectiva” (González, 2011).

Las edificaciones ligeras presentan oscilaciones internas de gran amplitud, con crestas superiores a la temperatura exterior, sin embargo, las edificaciones masivas, construidas con materiales densos y de espesor considerable tienden a presentar oscilaciones menores.

Entre los materiales comunes empleados como masa térmica se encuentran: el adobe, arcilla, rocas, hormigón y agua (Fig. 3-5).



Fig. 3-5 Masa térmica en piso de vivienda. Fuente <https://www.arkiplus.com/masa-termica/> (2019).

3.1.5.1 Materiales de cambio de fase (MCF)

El almacenamiento térmico ha sido una forma de obtener confort en los espacios desde la antigüedad mediante construcciones masivas.

Actualmente el interés por una forma de almacenamiento de calor latente se ha incrementado, esto a través de los materiales de cambio de fase.

Estos materiales mantienen la temperatura constante mientras que almacenan o ceden energía (Oliver, 2012) y el interés radica en que el calor latente (que es la cantidad de energía que se

almacena en un material cuando cambia su estructura molecular, estado de hidratación o fase), posee gran densidad de almacenamiento.

El material más común de cambio de fase es el hielo, que, al 0 °C, cuando se le aplica energía, pasa del estado sólido a líquido sin variar su temperatura, siendo éste un proceso reversible.

Desde 1932 se han realizado experimentos con MCF, comenzando con Douglas, A., quien propuso un dispositivo de almacenamiento térmico compuesto por parafina y ácido esteárico. Posteriormente a finales de 1948 la Dra. María Telkes realizó una serie de 8 colectores solares en una azotea de 135 m², en donde la energía se almacenaba en cinco bidones que contenían sal de Glauber. Posteriormente Gardenhire en 1953 realizó un experimento similar en donde además de la sal añadió bórax como agente nucleador. En otro experimento similar realizado por Huley, R. se añadió cromo para evitar la corrosión. Éstos tres experimentos fallidos fueron los precursores de diversas investigaciones que impulsaron a la creación en 1960 a la construcción del vehículo lunar Rover en donde se utilizó parafina como medio de almacenamiento térmico y cuyo objetivo fue ser empleado en tres sistemas de la misión espacial.

3.1.5.1.1 Tipos de materiales de cambio de fase.

De entre los posibles cambios de fase, el más eficaz es el de sólido a líquido, en donde la cantidad de energía almacenada es inferior que entre sólido a gas y la variación de su volumen es menor (Oliver, 2012).

Los MCF de líquido a sólido más comunes en el rango de temperaturas de entre 20 °C y 80 °C son las sales hidratadas, mezclas eutécticas, ceras de parafina y ácidos grasos (Fig. 3-6).

Los materiales eutécticos son mezclas homogéneas que se realizan para alcanzar un punto de fusión más bajo que el que poseen individualmente.

Los MCF inorgánicos compuestos de sales hidratadas fueron ampliamente estudiadas por su bajo costo y su gran capacidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen. No existe alguna sal hidratada que se solidifique en su punto de congelación.



Fig. 3-6 Clasificación de los materiales de cambio de fase. Fuente: Oliver, A. Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica., 2016, pp. 133

Los materiales orgánicos son más estables químicamente que las sustancias inorgánicas. Se funden y solidifican sin necesidad de agentes nucleadores (sustancias químicas cuyo objetivo es crear núcleos y formar cristales dentro del polímero) y no sufren subenfriamiento. Muestran que son más compatibles y adecuados para la adsorción en diferentes materiales constructivos. Las desventajas que muestran es que son inflamables y emiten gases tóxicos durante su combustión, así como envejecimiento por oxidación y volumen apreciables.

Las parafinas se obtienen de la destilación del petróleo o de materias bituminosas naturales y muestran dos rangos de enfriamiento, uno breve y otro un poco más extendido, en donde se presenta una transición líquida a amorfo-sólida y a cristalino-sólida. Han sido ampliamente empleadas debido a su temperatura de fusión además de su bajo costo en comparación a los ácidos grasos.

Los ácidos grasos son derivados de productos animales y vegetales, pueden ser saturados o insaturados. Muestran excelentes características térmicas (punto de fusión y congelación) y no

se produce subenfriamiento. Algunos ejemplos son aceite de palma, germen de trigo, soya, oliva, maíz, girasol, cártamo y coco, entre otros.

3.1.5.1.2 Aceite de coco

El aceite de coco es un aceite vegetal y es una sustancia grasa que contiene 90% de ácidos saturados extraídos mediante el prensado de la pulpa.

El rendimiento del aceite coco como almacenamiento efectivo de masa térmica ha sido demostrado en sistemas activos en diversas ocasiones debido a su baja temperatura de fusión (26 °C). Su densidad es de 916 kg/m³ y su conductividad térmica de 0.321 W/m.K (Isryad, 2017).

En diversas investigaciones se ha empleado el aceite de coco en sistemas activos como refrigerante secundario y como agente para reducir la cantidad inicial de la temperatura de fluido.

El aceite como MCF orgánico posee una vida útil relativamente larga ya que es térmicamente estable y no tiene separación de fases (Wonorahardjo, S et al, 2018).

Actualmente ha comenzado el interés por conocer el desempeño del aceite de coco como amortiguador térmico en sistemas pasivos para edificaciones, objetivo principal en el presente trabajo.

3.2 Confort térmico

El confort térmico es la sensación que experimenta el ser humano con respecto a su entorno, es subjetivo y depende de diversos factores.

El ser humano mantiene una temperatura corporal promedio de 37 °C, cuando se realiza la digestión, se genera calor residual, mismo que es disipado por medio de conducción, convección, radiación y evaporación. Cuando la temperatura corporal promedio se equilibra con la temperatura ambiental, ya no se transmite energía debido a la falta de un gradiente térmico y como mecanismo de enfriamiento se emplea la evaporación.

En la sensación térmica influyen el clima exterior, la hora del día, la estación del año, la radiación, la iluminación eléctrica y la calidad del aire interior, entre otros.

3.2.1 Variables determinantes del confort térmico

La producción de energía del cuerpo humano depende de diversos factores, sin embargo, depende principalmente del nivel de actividad de la persona, así como de su vestimenta. (Blender, 2015).

a) Factores ambientales

- Temperatura del aire: La temperatura del aire determina la cantidad de calor que se disipa de un cuerpo, principalmente por convección. Cuando la humedad, la velocidad del aire y el calor radiante no influyen en el clima interior, es posible determinar el confort por medio de la temperatura del aire. Es importante que entre la cabeza y los pies no exista una diferencia mayor a 3 K.
- Humedad relativa del aire: La evaporación de la humedad en la piel es una función de la humedad del aire, ya que el aire seco absorbe la humedad y enfría el cuerpo. Se recomienda que la HR se encuentre mínimo en un rango de entre 30% y 40% y como máximo de 60% a 70% (Fig. 3-7).

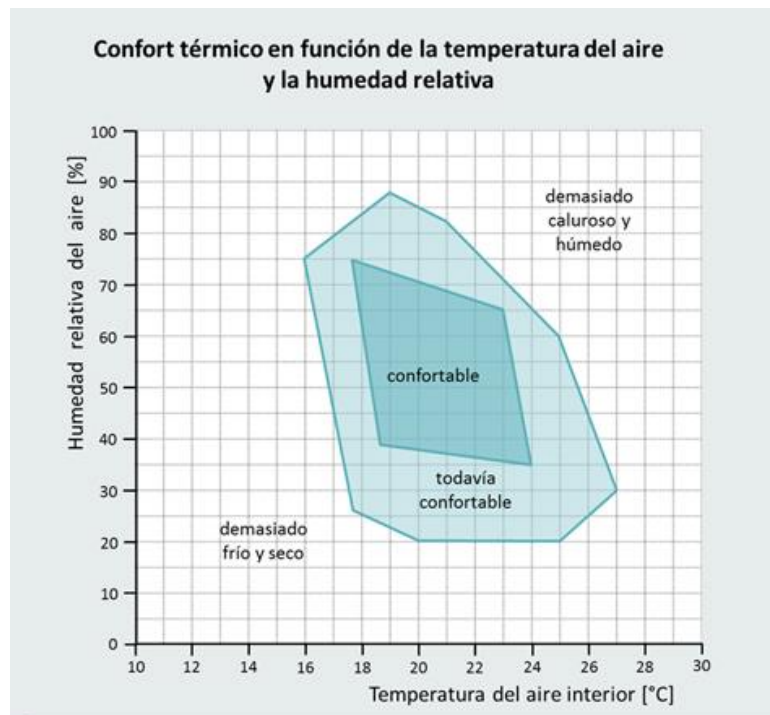


Fig. 3-7 Gráfica de confort térmico en función de la temperatura del aire y la humedad relativa. Blender, M. (2015) El confort térmico. Recuperado de: [<http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>]

- Ventilación: La ventilación influye en la pérdida de calor del cuerpo por convección y evaporación. Cuando la temperatura corporal rebasa los 37 C, la ventilación calienta la piel por convección y al mismo tiempo la enfría por medio de evaporación. Los movimientos de aire de 0.1 a 0.2 m/s se perciben como “agradables”, mientras que cuando la ventilación rebasa esos límites y enfrían el cuerpo humano, se nombran corrientes (Fig. 3.8).

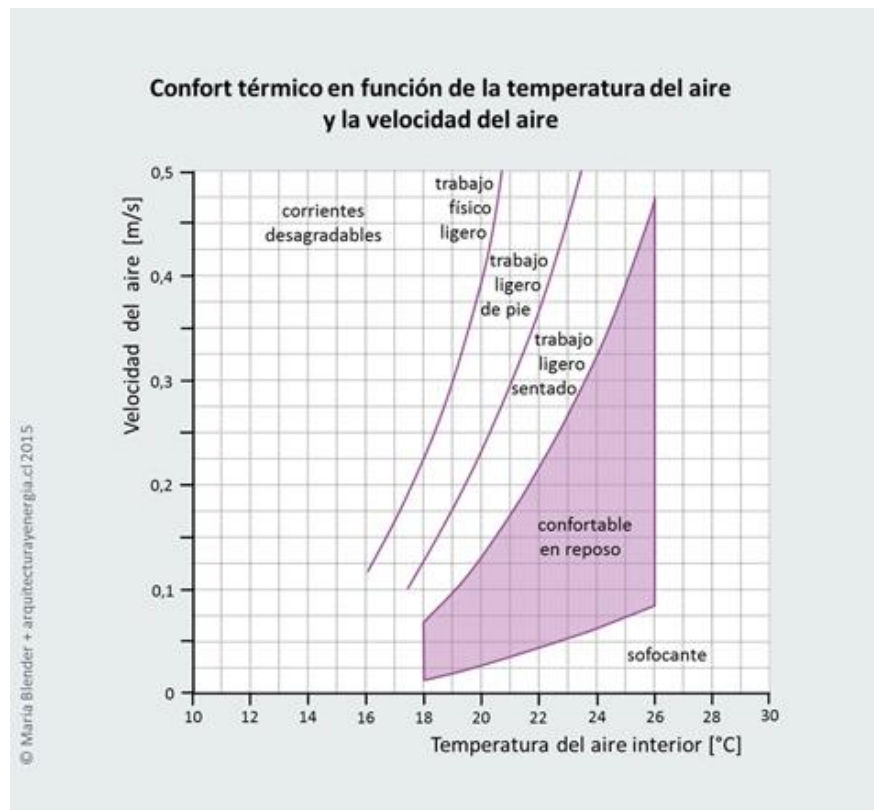


Fig. 3-8 Gráfica de confort térmico en función de la temperatura del aire y la velocidad del aire. Blender, M. (2015) El confort térmico. Recuperado de: [<http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>]

- Temperatura radiante media: Representa el calor emitido en forma de radiación por los diferentes elementos del entorno y es deseable que no difiera ampliamente de la temperatura del aire (Fig. 3-9).

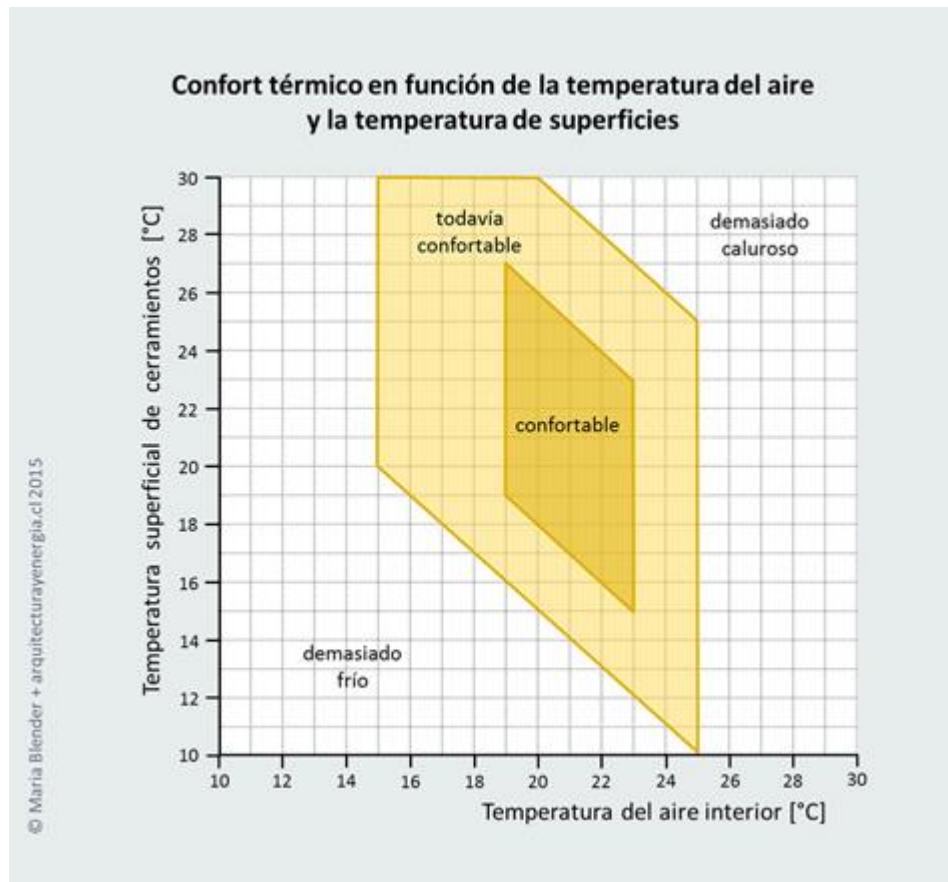


Fig. 3-9 Gráfica de confort térmico en función de la temperatura del aire y la temperatura de las superficies. Blender, M. (2015) El confort térmico. Recuperado de: [http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/]

3.2.1 Modelos de confort térmico

Existen dos tipos de modelos de confort, los modelos matemáticos y los modelos adaptativos. Ambos suelen desarrollar el experimento en cámaras térmicas con condiciones ambientales controladas y a través de encuestas a participantes con el fin de conocer su sensación térmica considerando diversas variables, entre ellas, se encuentran tres tipos:

- a) Variables personales indirectas: Tal como la resistencia térmica de la vestimenta y la tasa metabólica
- b) Variables ambientales directas: Temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad relativa del aire y la presión de vapor de agua en el aire.
- c) Variables fisiológicas: Temperatura de la piel, temperatura interna, tasa de sudoración, humidificación en la piel y la conductancia entre la temperatura interior y la piel.

3.2.1.1 Enfoque cuantitativo, modelos matemáticos

Los modelos matemáticos con mayor reconocimiento han sido desarrollados por P.O. Fanger (Modelo de confort de Fanger), la Fundación J.B. Pierce (Modelo de doble nodo de Pierce) y los investigadores de Kansas State University (Modelo de doble nodo KSU) (Djongyang, 2010).

1) Modelo de confort de Fanger

Pionero en el área de confort, publicado en 1967 y actualizado en 1972 es un modelo desarrollado en la Universidad Estatal de Kansas y en la Universidad Técnica de Dinamarca.

La investigación se desarrolló en cámaras climatizadas en donde cada persona debía de elegir un número entre una escala para describir su estado, en donde determinaron que debía de presentarse por medio de dos indicadores principales: el Voto Medio Previsto (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas con las condiciones ambientales en el interior (PPD).

El Voto Medio Previsto es el valor medio de la sensación subjetiva de confort expresada por medio de la siguiente ecuación:

$$M - V = H + E + C_{res} + E_{res} \dots\dots\dots 1$$

Donde:

M = Tasa metabólica, cantidad de energía química transformada en calor y trabajo (W/m²).

W = Potencia mecánica efectiva (W/m²)

H= Pérdida de calor por convección, radiación y conducción (W/m²)

E= Pérdida de calor por evaporación en la piel (W/m²)

C_{res} = Intercambio de calor por convección a través de la respiración (W/m²)

E_{res} = Intercambio de calor por evaporación a través de la respiración (W/m²)

Ecuación de comodidad:

$$M - V = H + E_c + C_{res} + E_{res} \dots\dots\dots 2$$

Donde:

E_c = Pérdida de calor por evaporación en la piel con sensación térmica neutra (W/m²)

Ecuación de PMV:

$$PMV = (0.303 \times \exp^{-0.036 \times M} + 0.028) \times [(M - W) - h - E_c + C_{res} + E_{res}] \dots\dots\dots 3$$

El porcentaje de personas insatisfechas con las condiciones ambientales en el interior

Debido a que el índice PMV no aplica a un porcentaje de personas ante ciertas condiciones se estableció la siguiente fórmula:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp - (0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times pmv^2) \dots\dots\dots 4$$

En la norma ISO 7730 se plantean tres categorías de ambientes térmicos interpretados como niveles de calidad ambiental (Fig. 3-10).

Categoría	Estado térmico del cuerpo		Disconfort local (% de personas en disconfort)			
	PPD (%)	PMV	Corrientes de aire	Diferencia vertical de temperatura	Suelo caliente o frío	Radiación asimétrica
A	< 6	Entre -0.2 y +0.2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	Entre -0.5 y +0.5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	Entre -0.7 y +0.7	< 30	< 10	< 15	< 10

Fig. 3-10 Categoría de ambientes térmicos de acuerdo con la norma ISO 7730.

2) Modelo de doble nodo de Pierce

El modelo de Pierce (1970) emplea cuatro índices de confort térmico: PMVET (PMV, Voto medio previsto y ET, temperatura de bulbo seco en un ambiente hipotético con 50% de HR), PMVSET (SET, Temperatura efectiva estándar), TSENS (temperatura media del cuerpo humano) y DISC (esfuerzo relativo de termorregulación).

El modelo concibe el cuerpo humano como dos compartimentos concéntricos e isotérmicos. Siendo el primero el núcleo en donde se genera el calor metabólico y el segundo es la envolvente, es decir, la piel).

3) Modelo de doble nodo de KSU

Desarrollado en 1977, el modelo de doble nodo de KSU predice la sensación térmica (TSV) de forma distinta en ambientes cálidos y fríos. Presenta ecuaciones muy similares a las de Pierce.

En los ambientes fríos el modelo se basa en los cambios que ocurren en la conductancia térmica entre el núcleo y la piel, sin embargo, en ambientes cálidos se basa en los cambios de humectación de la piel.

Para definir el nivel de confort de las personas, la mayoría de las escalas emplean entre 7 y 9 valores de sensación térmica (Fig. 3-11), siendo 0 la temperatura neutra (Djongyang, 2010).

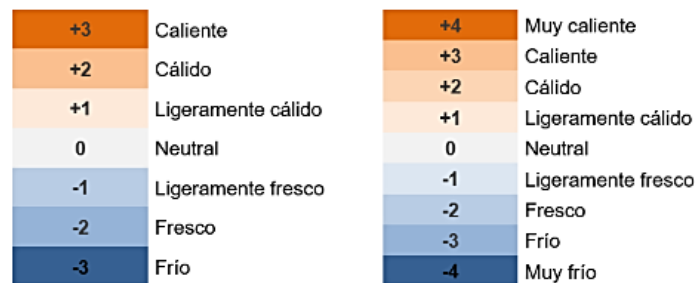


Fig. 3-11 Escalas de sensación térmica. Fuente: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/modelos-matematicos-de-confort>, 2020)

3.2.1.2 Enfoque cualitativo y los modelos adaptativos

Debido a que existe variabilidad en la manera en que las personas perciben el confort térmico, se han desarrollado diversos modelos adaptativos. El concepto de confort adaptativo se origina como resultado de diversos estudios de campo que, con métodos generalmente estadísticos, han registrado las sensaciones y comportamiento de ocupantes en un espacio determinado.

Los investigadores de Dear y Brager (1998) indican que la adaptación puede definirse como la reducción gradual de la respuesta de un individuo a una estimulación repetitiva en el ambiente y es posible describir tres tipos de adaptación ambiental:

- a) Adaptación comportamental: Cuando las personas realizan acciones conscientes para modificar su balance térmico (quitarse una prenda, abrir una ventana, activar un sistema de aire acondicionado).

- b) Adaptación fisiológica: Conocido también como aclimatación, es cuando la persona por exposición prolongada a un ambiente diferente se acostumbra a esas nuevas condiciones ambientales.
- c) Adaptación psicológica: Cuando existen cambios en la percepción y respuesta de la información sensorial recibida.

Los modelos adaptativos poseen gran importancia ya que consideran la capacidad de adaptación de los seres humanos. A continuación, se muestran distintos modelos adaptativos.

1) Humphreys

En 1975 Humphreys realizó una revisión de estudios de campo en donde una fuerte dependencia de las neutralidades térmicas fue encontrada. La temperatura neutra es una temperatura en la que un mínimo estrés fue reportado y estableció los resultados entre 17 °C y 30 °C y lo plasmó mediante la siguiente expresión:

$$T_n = 2.56 + 0.83 \times T_i \dots\dots\dots 5$$

Donde T_i es temperatura interior

Posteriormente realizó una revisión y la estableció de la siguiente manera:

$$T_n = 11.9 + 0.534 \times T_m \dots\dots\dots 6$$

Donde: T_m = temperatura media exterior.

2) Auliciems

Utilizando bases de datos de edificios con sistemas mecánicos y pasivos, Auliciems en 1981 formuló una ecuación para la Temperatura Neutra abarcando entre 18 °C y 28 °C.

$$T_n = 17.6 + 0.31 \times T_m \dots\dots\dots 7$$

Donde: T_m = temperatura media exterior.

3) Griffiths

En 1990 Griffiths realizó su estudio en edificios europeos con sistemas pasivos en donde concluyó una ecuación similar a la de Humphreys.

$$T_n = 12.1 + 0.534 \times T_m \dots\dots\dots 8$$

Donde: T_m = temperatura media exterior.

4) Nicol

Realizando estudios en Pakistán, Nicol y Roaf en 1996 para sistemas pasivos desarrollaron la siguiente fórmula:

$$T_n = 17 + 0.38 \times T_m \dots\dots\dots 9$$

Donde: T_m = temperatura media exterior.

Existe una gran cantidad de modelos de confort térmico, en el caso específico del trabajo se considera la fórmula de Auliciems para describir la temperatura neutra del caso de estudio.

3.3 Caso de estudio: Ciudad de Mérida, análisis climático

La Ciudad de Mérida se ubica a 50 km del Golfo de México en la parte noroeste del Estado de Yucatán y a una distancia de 1557 km de la Ciudad de México (Fig. 3-12).



Fig. 3-12 Ilustración del mapa de la República Mexicana señalando la ubicación de la Ciudad de Mérida. Fuente: <http://atlasturistico.sectur.gob.mx/AtlasTuristico/bienvenido.do> (2020)

Colinda al este con Quintana Roo, al oeste con Campeche y al norte con el Golfo de México (Fig. 3-13). Se localiza en las coordenadas 28°58'04"N y 89°37'18"O (20.9677, -89.6216) y posee una altitud de 9m sobre el nivel del mar. Es el principal núcleo de población del área conurbada de la Zona Metropolitana de Mérida (2,097,175 de habitantes) y colinda con Kanasin, Umán y Hunucmá (Fig. 3-14).

Su orografía es plana, clasificada como llanura de barrera y el tipo de suelo es rocoso (calizo), clasificado como leptosol.

El municipio pertenece a la región hidrológica de Yucatán del Norte, donde los recursos hidrológicos provienen de corrientes subterráneas interconectadas que desembocan en el mar.

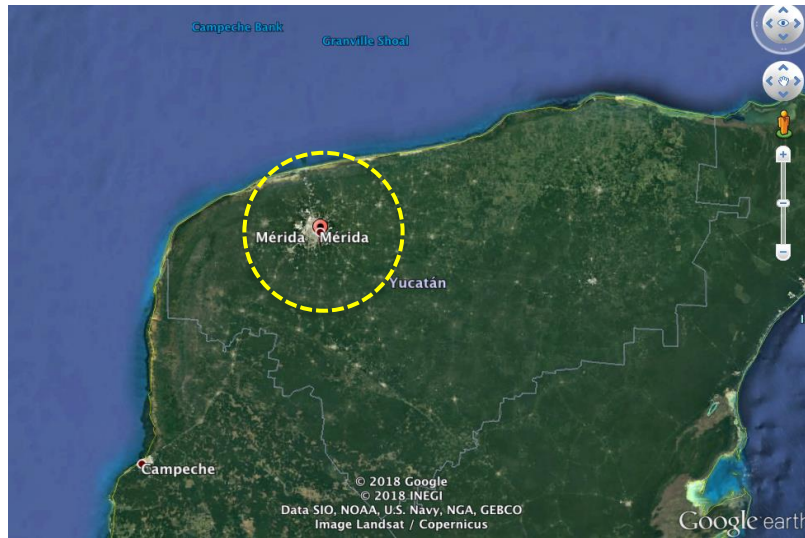


Fig. 3-13 Vista aérea de Ciudad de Mérida con respecto a la Península de Yucatán (2018). Fuente: Google Earth.



Fig. 3-14 Mapa de entidades federativas de Yucatán. Fuente: <https://www.cicloescolar.com/2014/02/yucatan-entidades-federativas-de-mexico.html>

De acuerdo con Köppen (1936) la Ciudad de Mérida, corresponde a la nomenclatura Aw, clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Fig. 3-15), y de acuerdo con García (1998) se clasifica como Aw₀:

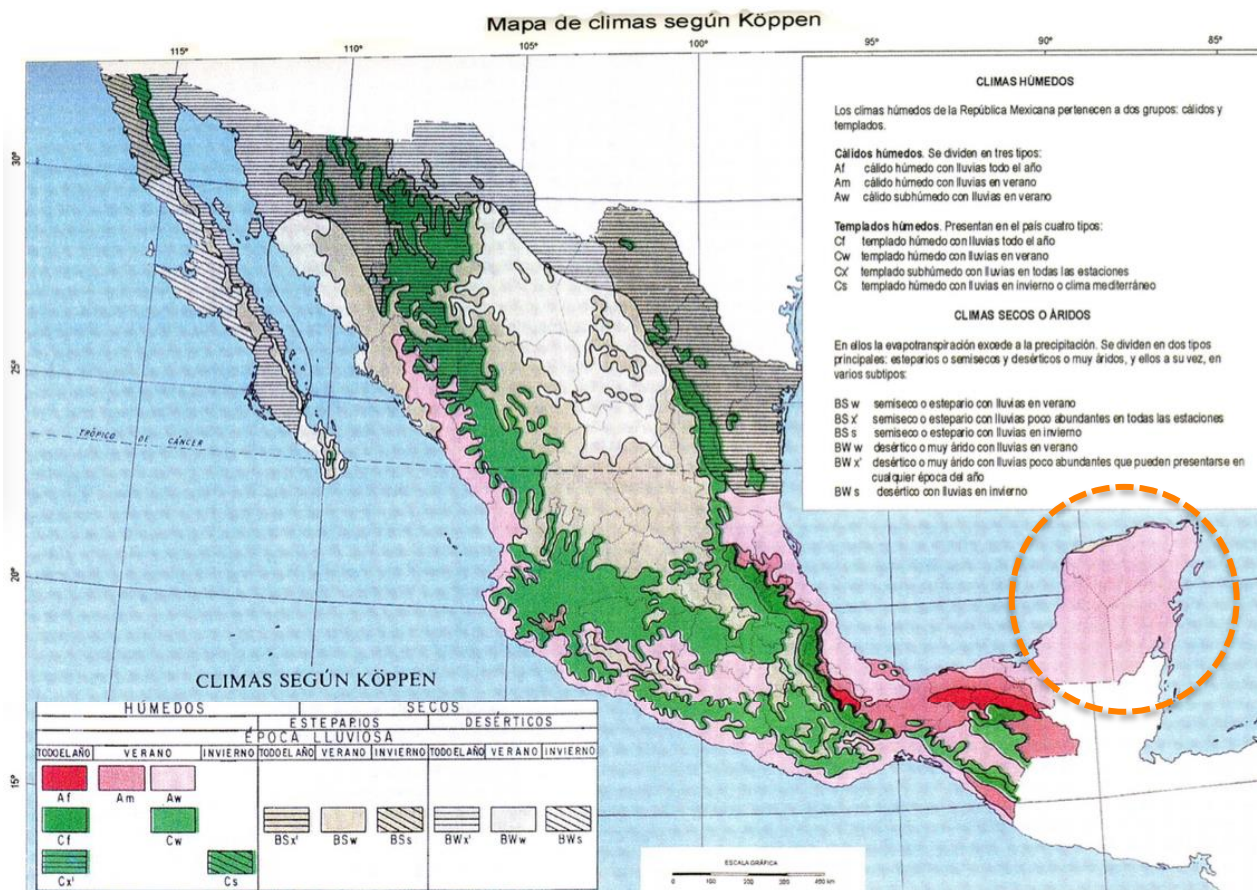


Fig. 3-15 Mapa de climas según Köppen. Fuente: García, E. (1998) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, pp. 21.

“A”, refiriéndose a cálido (temperatura media anual entre 22 y 26 °C y temperatura del mes más frío mayor a 18 °C); w con referencia al régimen de lluvias en verano, el cual debe de ser por lo menos diez veces mayor a la cantidad de lluvias en el mes más húmedo de la mitad cálida del año y “o” el cual implica que es el menos húmedo de los tres tipos, w_0 , w_1 y w_2 debido a la relación P/T (precipitación total anual en mm entre la temperatura media anual en °C) mismo que corresponde con los siguiente parámetros (Tabla 3.1):

Tabla 3-1 Tipos de clima cálidos con lluvias en verano. Fuente: Fuente: García, E. (1998) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, pp. 52.

Símbolo	Cociente P/T	Designaciones
A_{w_0}	Menor que 43.2	El más seco de los subhúmedos
A_{w_1}	Entre 43.2 y 55.3	Intermedio entre A_{w_0} y A_{w_2}
A_{w_2}	Mayor que 55.3	El más húmedo de los subhúmedos

Por lo anterior, el clima de la Ciudad de Mérida se clasifica como cálido subhúmedo (con lluvias en verano, menor a 43.2) (Fig. 3-16).

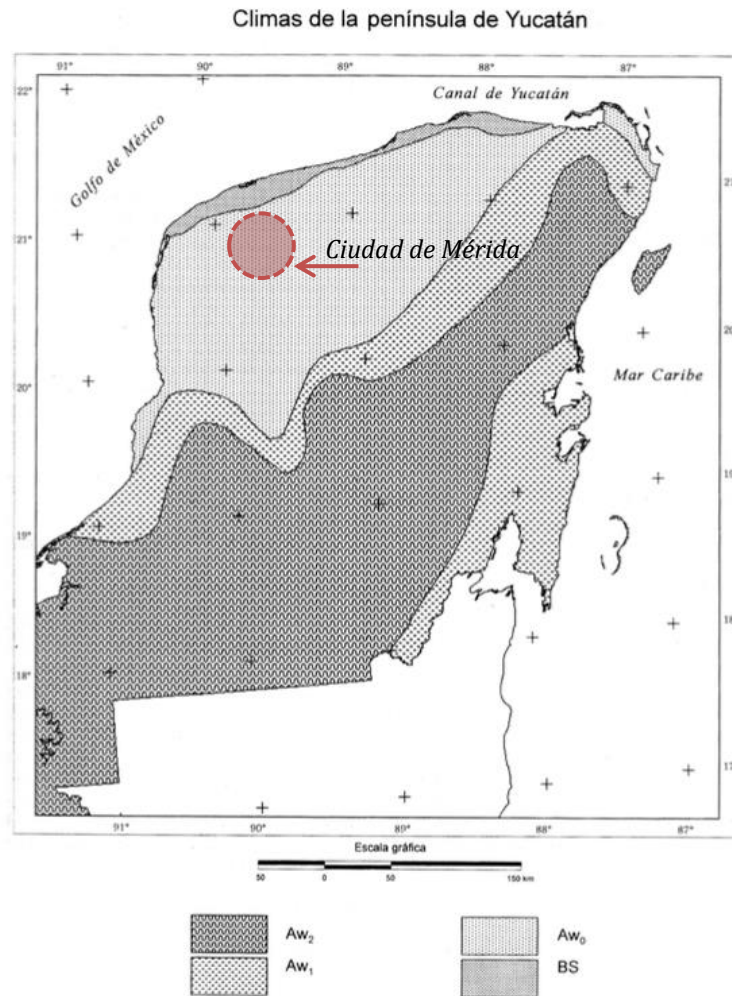


Fig. 3-16 Clasificación climática de la Península de Yucatán. Fuente: García, E. (1998) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, pp. 41.

Mérida presenta una temperatura media anual de 26.7 °C, registrando una mínima histórica de 19.9 °C, y una máxima de 33.5 °C. El periodo más caluroso se desarrolla del mes de Marzo a Agosto y la precipitación media anual es de 1,036.9 mm, en donde el periodo de lluvias se muestra del mes de Junio a Octubre con una humedad relativa promedio anual de 71.48%.

A continuación, se muestran los datos empleados para la elaboración del análisis climático y bioclimático del caso de estudio: (Tabla 3-2 y 3-3):

Tabla 3-2 Data climática de la Ciudad de Mérida. Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de la CONAGUA (1950-2010).

MES	FACTOR CLIMÁTICO											
	Gh	Dh	Ta	Td	RR	Rd	FF	Hr	Tad min	Tad max	Ta min	Ta max
	W/m ²	W/m ²	°C	°C	mm	d	m/s	%	°C	°C	°C	°C
Enero	129	48	24	17.6	38.4	4.2	3.3	71.2	13.8	35.8	17.2	30.8
Febrero	133	51	24.4	18.5	32.2	3.3	3.7	69.1	13.6	35.2	17.3	31.5
Marzo	179	65	26.3	18.7	22.5	2.3	4.4	64.4	13.7	36.5	18.6	34
Abril	196	66	27.9	19.2	24.4	1.9	4.5	64.2	14	38.6	20.2	35.6
Mayo	191	82	29	21.2	69.4	4.6	4.3	64.7	14.4	39.2	21.7	36.6
Junio	176	78	28.5	23.5	138.3	10.8	3.7	72.4	13.9	39.4	21.6	35.3
Julio	194	83	28.2	23.8	158.7	13.4	3.1	74	14.3	37	21.4	35
Agosto	183	84	28.1	24.3	140.7	12.8	2.6	75.3	14.5	37.5	21.3	34.9
Septiembre	158	72	27.9	24.5	183.1	13.9	2.4	76.9	14.4	36.5	21.6	34.2
Octubre	144	65	26.8	23.3	127.9	9.7	2.7	76.6	14.2	35.8	20.8	32.7
Noviembre	125	51	25.4	20.6	56.2	5.4	2.7	75.1	14	36.4	19.3	31.5
Diciembre	113	45	24	19.2	45.1	4.3	2.8	73.9	13.7	36.6	17.5	30.6

En donde:

Tabla 3-3 Nomenclatura de factores climáticos. Fuente: Elaboración propia.

Nomenclatura	Concepto	Unidad
Gh	Radiación global	W/ m ²
Dh	Radiación difusa	W/ m ²
Ta	Temperatura media promedio mensual	°C
Td	Temperatura de punto de rocío	°C
RR	Precipitación	mm
Rd	Días con precipitación	d
FF	Velocidad del viento	m/s
Hr	Humedad relativa	%
Tad min	Promedio de temperatura mínima diaria	°C
Tad max	Promedio de temperatura máxima diaria	°C
Ta min	Temperatura horaria mínima mensual	°C
Ta max	Temperatura horaria máxima mensual	°C

El análisis climático se desarrolló en Meteonorm para obtener el archivo con extensión. epw y posteriormente se ingresaron los valores en el programa Climate Consultant, en donde se seleccionó la opción de análisis por medio del modelo de confort Ashrae 2005. Por último, se ingresaron los valores de temperatura de confort obtenidos a través del cálculo de temperatura neutra (Tn) para la temperatura media anual, el periodo de sobre y bajocalentamiento (Tabla 3-4) con una diferencia de (5K y 7K).

Tabla 3-4 Valores de rangos de confort para análisis bioclimático. Fuente: Elaboración propia.

VALORES DE TEMPERATURA NEUTRA EN TRES DIFERENTES PERIODOS: PROMEDIO ANUAL, SOBRECALENTAMIENTO Y BAJO CALENTAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉRIDA											
Temperatura promedio anual = 26.7 °C				Temperatura media del mes más cálido = 29.0 °C				Temperatura media del mes más frío = 24.0 °C			
Temperatura neutra = 17.6 + (0.31 x Temperatura de diseño)											
Tn media anual = 25.87 °C				Tn periodo sobrecalentamiento = 26.59 °C				Tn periodo bajocalentamiento = 25.04 °C			
5K		7K		5K		7K		5K		7K	
L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.
28.37	23.37	29.37	22.37	29.09	24.09	30.09	23.09	27.54	22.54	28.54	21.54

Temperatura media anual (5K) (Abril / Septiembre)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 26.7^\circ\text{C}) = 25.87^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 28.37 °C / Límite inferior 23.37 °C

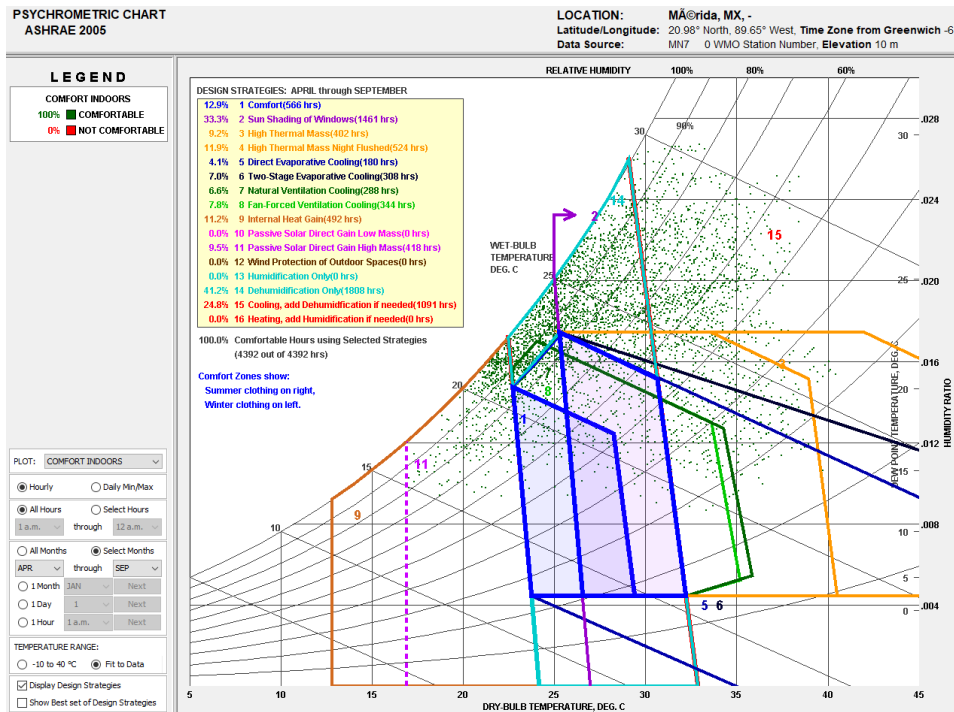


Fig. 3-17 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media anual, considerando el rango de confort en 5K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-17):

1. Se encuentra en confort el 12.9% del rango (566 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 33.3% del tiempo (1461 h)
3. El 9.2% (402 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 11.9% (524 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 4.1% (180 h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 308 h (7%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 288 h (6.6%)
8. Durante 344 h (7.8%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 492 horas (11.2%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 418 horas (9.5%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 1808 hrs (41.2%)
12. Enfriamiento durante 1091 horas (24.8%)

Temperatura media anual (5K) (Octubre / Marzo)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 26.7^\circ\text{C}) = 25.87^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 28.37 °C / Límite inferior 23.37 °C

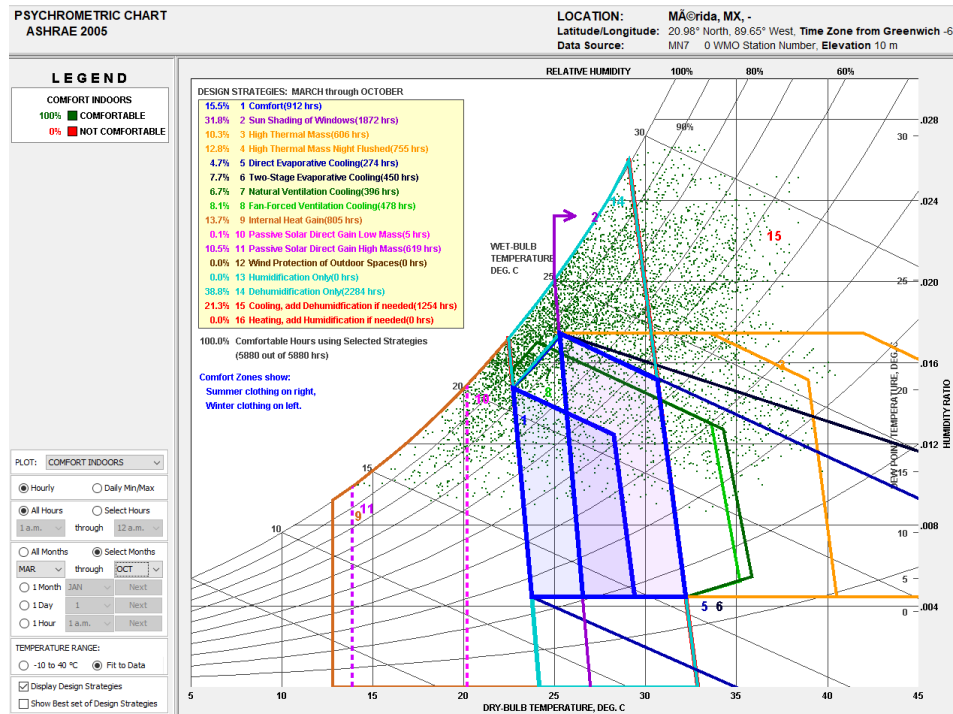


Fig. 3-18 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media anual, considerando el rango de confort en 5K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-18):

1. Se encuentra en confort el 15.5% del rango (912 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 31.8% del tiempo (1872 h)
3. El 10.3% (606 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 12.8% (755 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 4.7% (274 h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 450 h (7.7%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 396 h (6.7%)
8. Durante 478 h (8.1%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 805 horas (13.7%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 619 horas (10.5%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 2284 hrs (38.8%)
12. Enfriamiento durante 1254 horas (21.3%)

Temperatura media anual (7K) (Abril / Septiembre)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 26.7^\circ\text{C}) = 25.87^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 29.37 °C / Límite inferior 22.37 °C

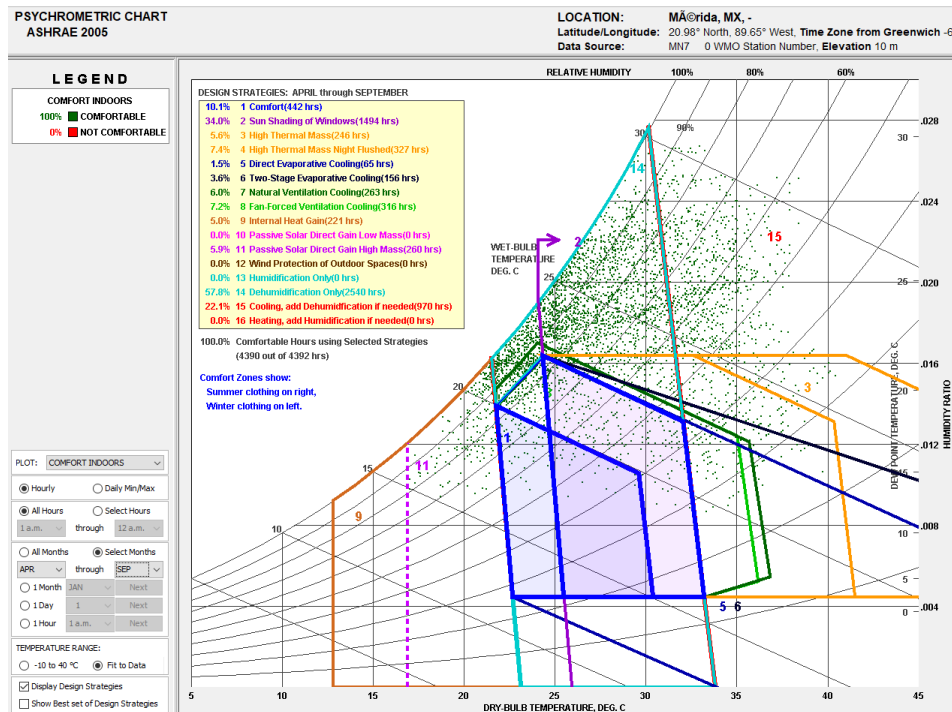


Fig. 3-19 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con Tn media anual, considerando el rango de confort en 7K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-19):

1. Se encuentra en confort el 10.1% del rango (442 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 34% del tiempo (1494 h)
3. El 5.6% (246 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 7.4% (327 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 1.5% (65 h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 156 h (3.6%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 263h (6%)
8. Durante 316 h (7.2%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 221 horas (5%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 260 horas (5.9%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 2540 hrs (57.8%)
12. Enfriamiento durante 970 horas (22.1%)

Temperatura media anual (7K) (Octubre / Marzo)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 26.7^\circ\text{C}) = 25.87^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 29.37 °C / Límite inferior 22.37 °C

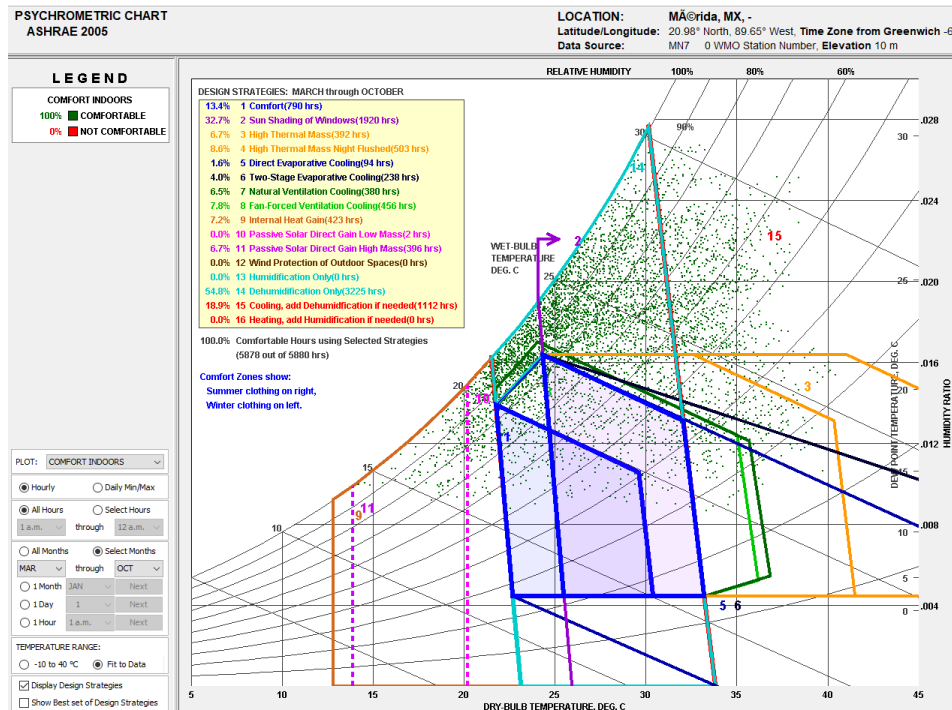


Fig. 3-20 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media anual, considerando el rango de confort en 7K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-20):

1. Se encuentra en confort el 13.4% del rango (790 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 32.7% del tiempo (1920 h)
3. El 6.7% (392 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 8.6% (503 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 1.6% (94 h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 238 h (4%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 380h (6.5%)
8. Durante 456 h (7.8%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 423 horas (7.2%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 396 horas (6.7%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 3225 hrs (54.8%)
12. Enfriamiento durante 1112 horas (18.9%)

Temperatura media de periodo de sobrecalentamiento (5K) (Abril / Septiembre)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 29^\circ\text{C}) = 26.59^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 29.09 °C / Límite inferior 24.09 °C

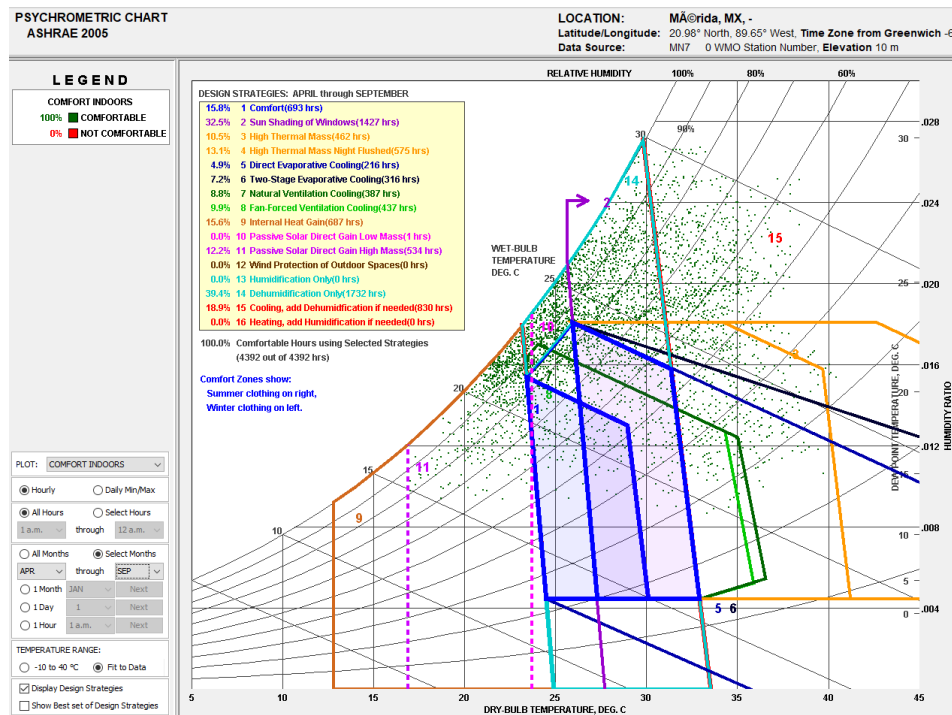


Fig. 3-21 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con T_n media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 5K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-21):

1. Se encuentra en confort el 15.8% del rango (693 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 32.5% del tiempo (1427 h)
3. El 10.5% (462 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 13.1% (575 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 4.9% (216h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 316h (7.2%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 387h (8.8%)
8. Durante 437 h (9.9%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 687 horas (15.6%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 534 horas (12.2%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 1732 hrs (39.4%)
12. Enfriamiento durante 830 horas (18.9%)

Temperatura media de periodo de sobrecalentamiento (5K) (Octubre / Marzo)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 29^\circ\text{C}) = 26.59^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 29.09 °C / Límite inferior 24.09 °C

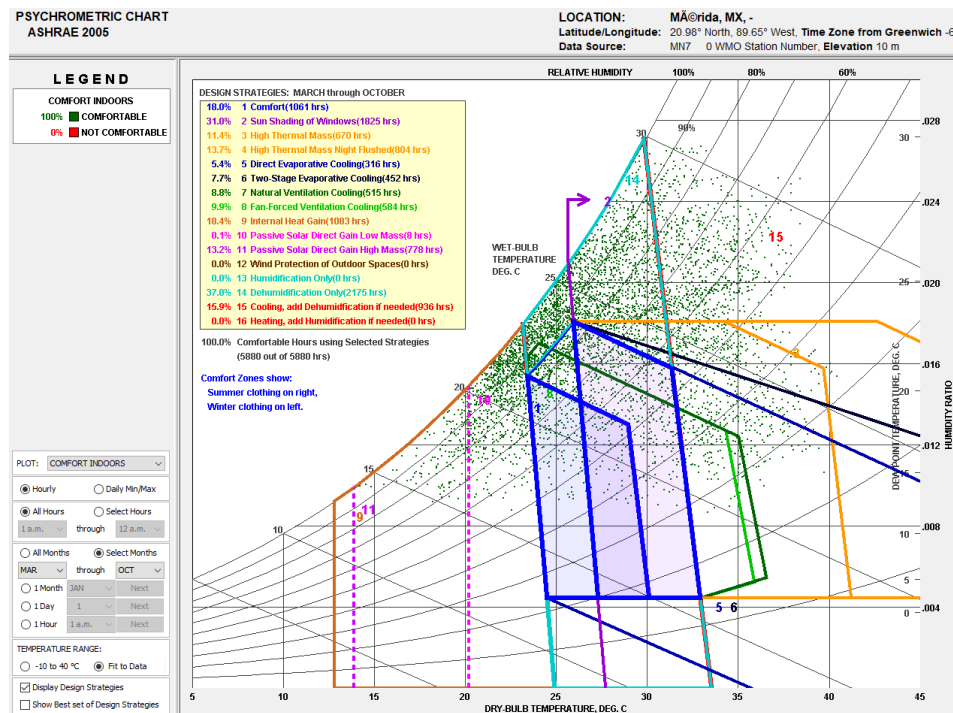


Fig. 3-22 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 5K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-22):

1. Se encuentra en confort el 18.0% del rango (1061 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 31% del tiempo (1825 h)
3. El 11.4% (670 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 13.7% (804 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 5.4% (316h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 452 h (7.7%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 515 h (8.8%)
8. Durante 584 h (9.9%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 1083 horas (18.4%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 778 horas (13.2%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 2175 hrs (37%)
12. Enfriamiento durante 936 horas (15.9%)

Temperatura media de periodo de sobrecalentamiento (7K) (Abril / Septiembre)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 29^\circ\text{C}) = 26.59^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 30.09 °C / Límite inferior 23.09 °C

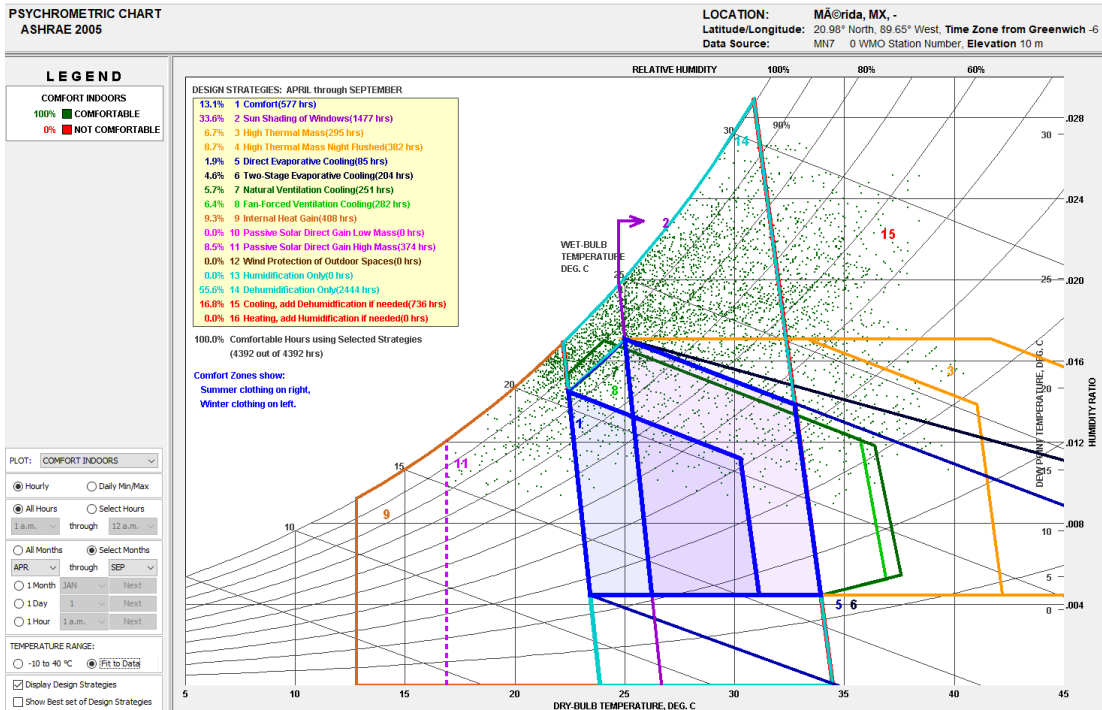


Fig. 3-23 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con T_n media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 7K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-23):

1. Se encuentra en confort el 13.1% del rango (577horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 33.6% del tiempo (1477 h)
3. El 6.7% (295 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 8.7% (382 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 1.9% (85h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 204 h (4.6%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 251 h (5.7%)
8. Durante 282 h (6.4%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 408 horas (9.3%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 374horas (8.5%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 2444 h (55.6%)
12. Enfriamiento durante 736 horas (16.8%)

Temperatura media de periodo de sobrecalentamiento (7K) (Octubre / Marzo)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 29^\circ\text{C}) = 26.59^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 30.09 °C / Límite inferior 23.09 °C

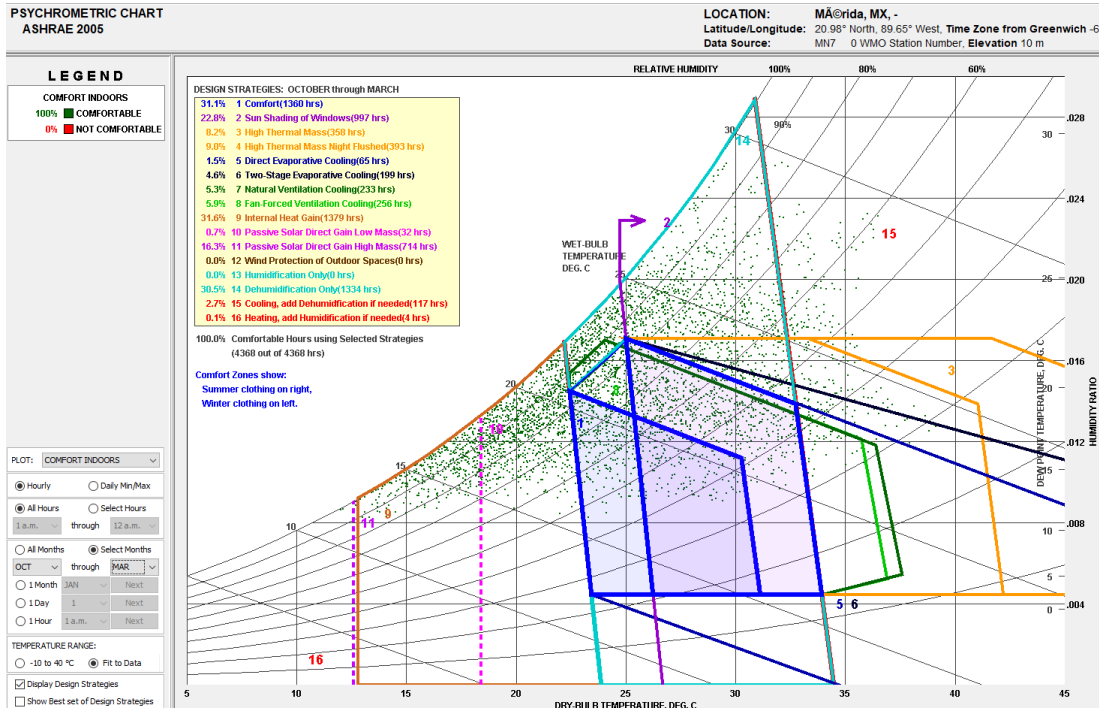


Fig. 3-24 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más cálido, considerando el rango de confort en 7K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-24):

1. Se encuentra en confort el 31.1% del rango (1360 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 22.8% del tiempo (997h)
3. El 8.2% (358 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 9.0% (393 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 1.5% (65h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 199 h (4.6%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 233 h (5.3%)
8. Durante 256 h (5.9%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 1379 horas (31.6%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 714 horas (16.3%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 1334 hrs (30.5%)
12. Enfriamiento durante 117 horas (2.7%)

Temperatura media de periodo de bajocalentamiento (5K) (Abril / Septiembre)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 24^\circ\text{C}) = 25.04^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 27.54 °C / Límite inferior 22.54 °C

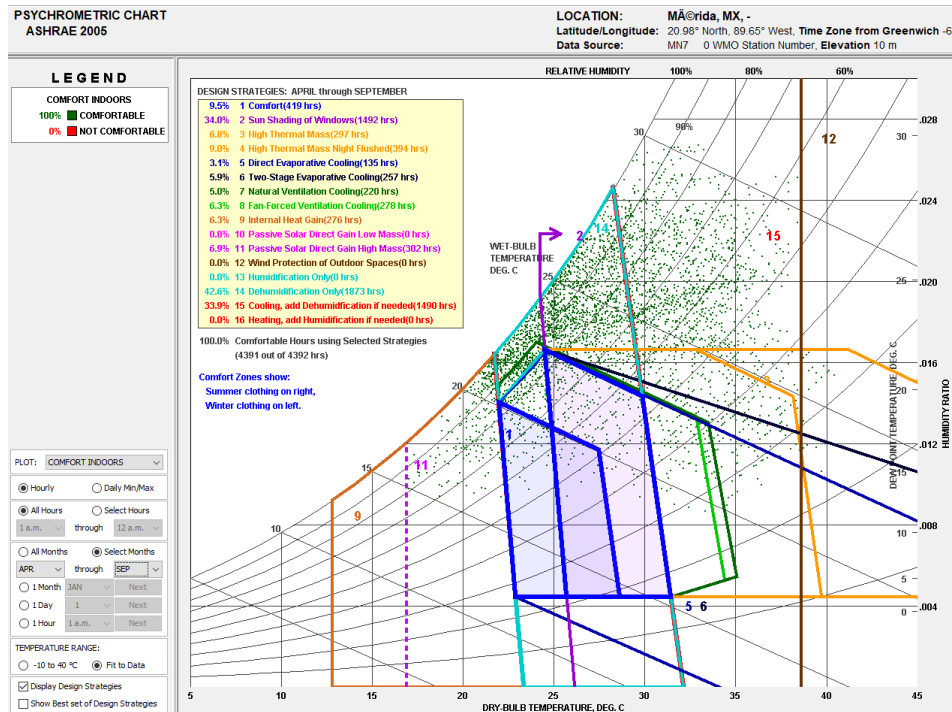


Fig. 3-25 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con T_n media del mes más frío, considerando el rango de confort en 5K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-25):

1. Se encuentra en confort el 9.5% del rango (419 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 34% del tiempo (1492h)
3. El 6.8% (297 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 9% (394 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 3.1% (135h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 257 h (5.9%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 220 h (5%)
8. Durante 278 h (6.3%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 276 horas (6.3%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 302 horas (6.9%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 1873 hrs (42.6%)
12. Enfriamiento durante 1490 horas (33.9%)

Temperatura media de periodo de bajocalentamiento (5K) (Octubre / Marzo)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 24^\circ\text{C}) = 25.04^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 27.54 °C / Límite inferior 22.54 °C

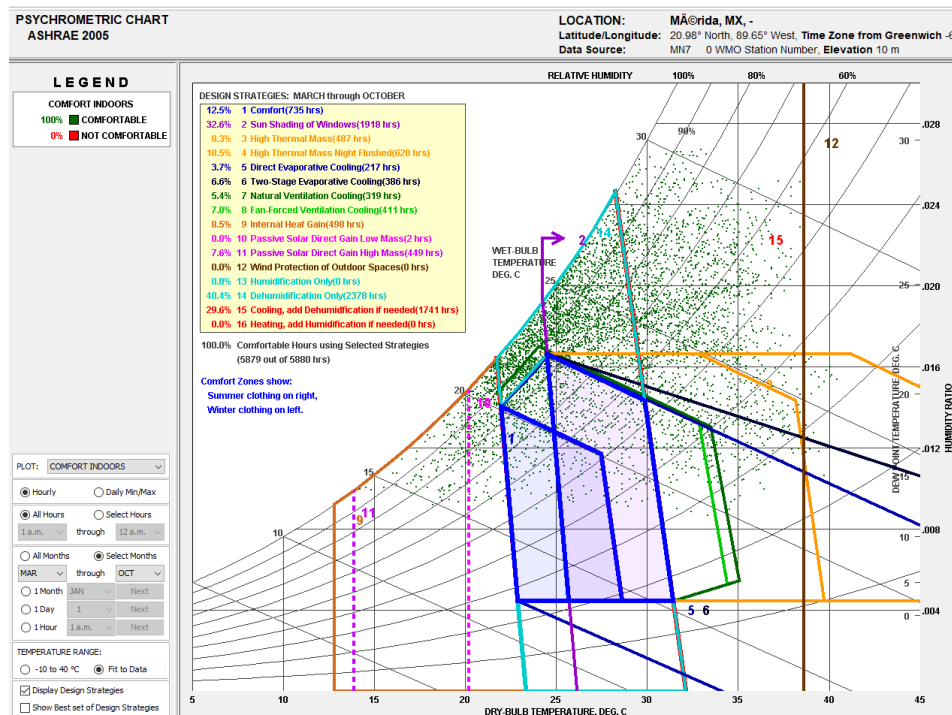


Fig. 3-26 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con T_n media del mes más frío, considerando el rango de confort en 5K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-26):

1. Se encuentra en confort el 13.5% del rango (591 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 33.1% del tiempo (1452h)
3. El 9.7% (425 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 12.2% (537 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 4.4% (194h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 321h (7.3%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 314h (7.1%)
8. Durante 372 h (8.5%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 547 horas (12.5%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 443 horas (10.1%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 1804 hrs (41.1%)
12. Enfriamiento durante 1009 horas (23%)

Temperatura media de periodo de bajocalentamiento (7K) (Abril / Septiembre)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 24^\circ\text{C}) = 25.04^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 28.54 °C / Límite inferior 21.54 °C

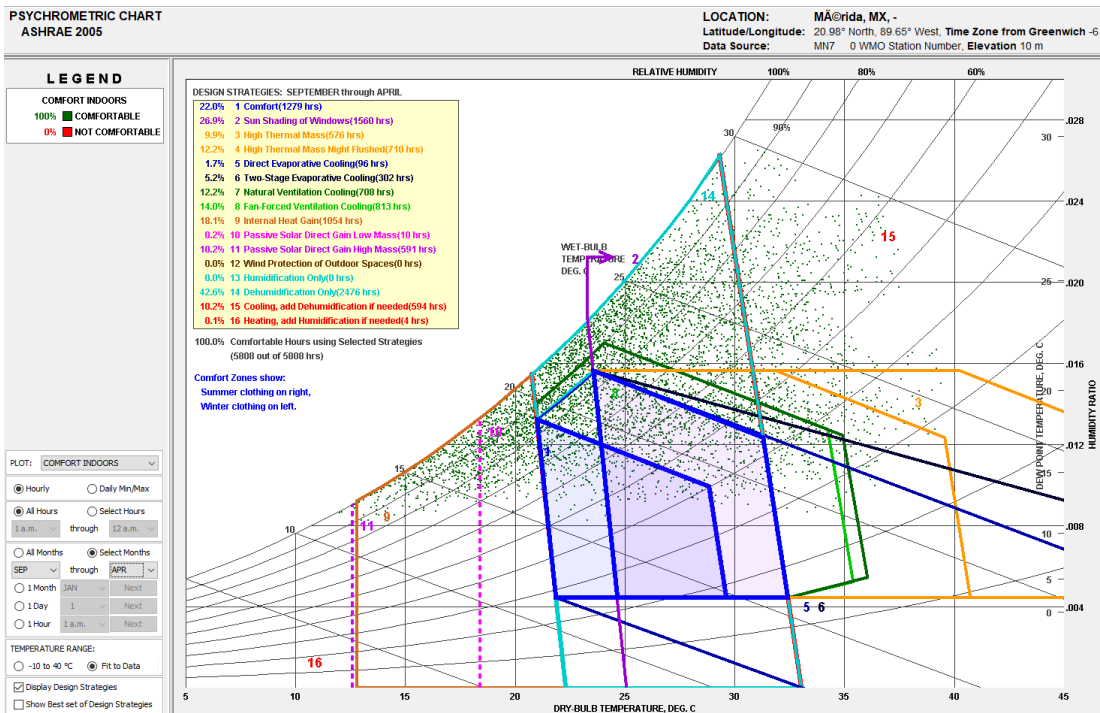


Fig. 3-27 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de abril a septiembre con T_n media del mes más frío, considerando el rango de confort en 7K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-27):

1. Se encuentra en confort el 22% del rango (1279 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 26.9% del tiempo (1560h)
3. El 9.9% (576 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 12.2% (710 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 1.7% (96 h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 302 h (5.2%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 708 h (12.2%)
8. Durante 813 h (14%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 1054 horas (18.1%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 591 horas (10.2%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 2476 hrs (42.6%)
12. Enfriamiento durante 594 horas (10.2%)

Temperatura media de periodo de bajocalentamiento (7K) (Octubre / Marzo)

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times 24^\circ\text{C}) = 25.04^\circ\text{C}$$

Temperatura del rango de confort: Límite superior 28.54 °C / Límite inferior 23.54 °C

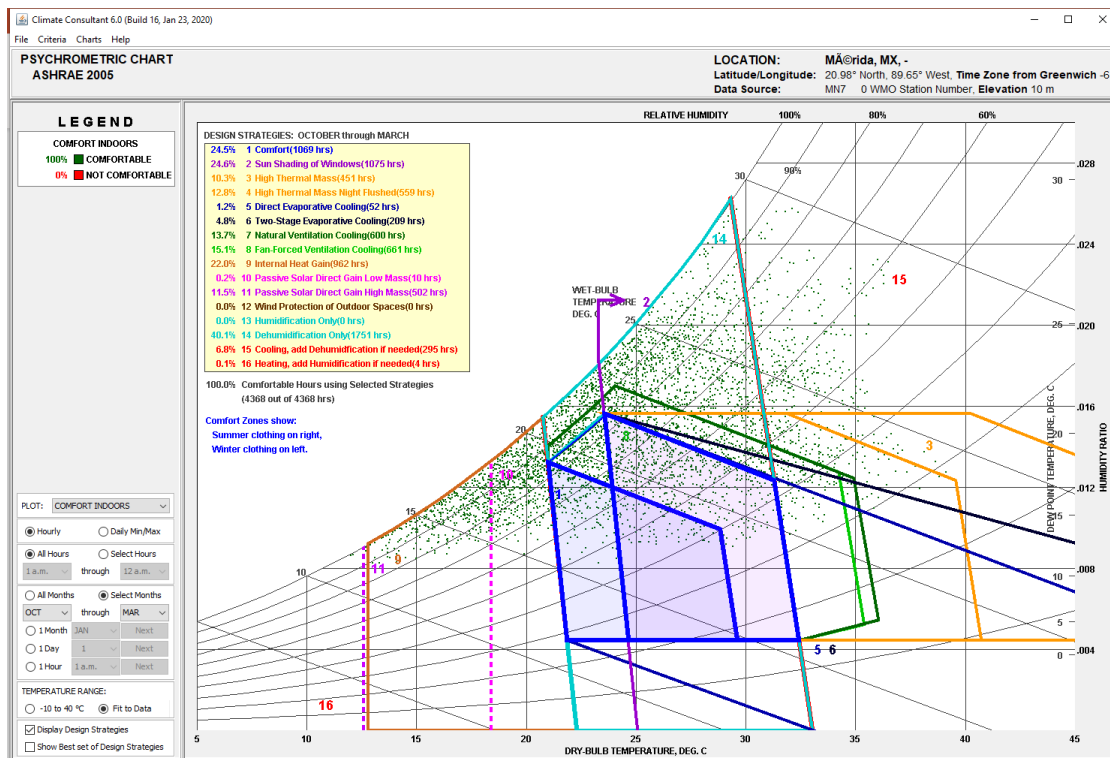


Fig. 3-28 Carta Psicrométrica elaborada en Climate Consultant para la Ciudad de Mérida de octubre a marzo con Tn media del mes más frío, considerando el rango de confort en 7K. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran las siguientes recomendaciones (Fig. 3-28):

1. Se encuentra en confort el 24.5% del rango (1069 horas)
2. Se necesita protección solar en las ventanas el 24.6% del tiempo (1075h)
3. El 10.3% (451 h) es posible utilizar masa térmica
4. El 12.8% (559 h) se puede emplear masa térmica con ventilación nocturna.
5. El 1.2% (52 h) es posible emplear enfriamiento evaporativo directo.
6. El enfriamiento evaporativo (two-stage) se puede utilizar durante 209 h (4.8%)
7. El enfriamiento por ventilación natural se puede emplear durante 600 h (13.7%)
8. Durante 661 h (15.1%) es posible utilizar ventilación forzada.
9. Se recomienda emplear ganancias internas un total de 962 horas (22%)
10. El empleo de ganancia directa solar durante 502 horas (11.5%)
11. Se recomienda la deshumidificación durante 1751 hrs (40.1%)
12. Enfriamiento durante 295 horas (6.8%)

A continuación, se muestra la tabla resumen de requerimientos en los 12 casos analizados (Tabla 3-5):

Aunado a las estrategias de diseño, el programa emite recomendaciones de diseño:

1. Patios sombreados
2. Ventiladores de techo
3. Elementos de protección solar
4. Evitar acristalamientos al sur
5. Materiales livianos
6. Techos altos
7. Acristalamientos eficientes (de reducción de ganancia solar)
8. Aire acondicionado (siempre necesario) que puede ser combinado con sistemas de enfriamiento pasivos.
9. Utilizar vegetación para sombrear
10. Ventilación natural
11. Utilizar colores en envolvente de baja emisividad
12. Barreras radiantes
13. Promover los espacios abiertos

Tabla 3-5 Resumen de requerimientos y valores determinados en análisis bioclimático a través de la carta psicrométrica para la Ciudad de Mérida. Fuente: Elaboración propia.

RESUMEN DE REQUERIMIENTOS Y VALORES DETERMINADOS EN ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO A TRAVÉS DE LA CARTA PSICROMÉTRICA PARA LA CIUDAD DE MÉRIDA													
Estrategia	U	Tn media anual = 25. 87 °C				Tn periodo sobrecalentamiento = 26.59°C (mes más cálido)				Tn periodo bajocalentamiento = 25.04°C (mes más frío)			
		5K		7K		5K		7K		5K		7K	
		SC	BC	SC	BC	SC	BC	SC	BC	SC	BC	SC	BC
Confort	%	12.9	15.5	10.1	13.4	15.8	18	13.1	31.1	9.5	13.5	22	24.5
	hrs	566	912	442	790	693	1061	577	1360	419	591	1279	1069
Protección solar en ventanas	%	33.3	31.8	34	32.7	32.5	31	33.6	22.8	34	33.1	26.9	24.6
	hrs	1461	1872	1494	1920	1427	1825	1477	997	1492	1452	1560	1075
Masa térmica	%	9.2	10.3	5.6	6.7	10.5	11.4	6.7	8.2	6.8	9.7	9.9	10.3
	hrs	402	606	246	392	462	670	295	358	297	425	576	451
Masa térmica con ventilación nocturna	%	11.9	12.8	7.4	8.6	13.1	13.7	8.7	9	9	12.2	12.2	12.8
	hrs	524	755	327	503	575	804	382	393	394	537	710	559
Enfriamiento evaporativo directo	%	4.1	4.7	1.5	1.6	4.9	5.4	1.9	1.5	3.1	4.4	1.7	1.2
	hrs	108	274	65	94	216	316	85	65	135	194	96	52
Enfriamiento evaporativo (two-stage)	%	7	7.7	3.6	4	7.2	7.7	4.6	4.6	5.9	7.3	5.2	4.8
	hrs	308	450	156	238	316	452	204	199	257	321	302	209
Ventilación natural	%	6.6	6.7	6	6.5	8.8	8.8	5.7	5.3	5	7.1	12.2	13.7
	hrs	288	396	263	380	387	515	251	233	220	314	708	600
Ventilación forzada	%	7.8	8.1	7.2	7.8	9.9	9.9	6.4	5.9	6.3	8.5	14	15.1
	hrs	344	478	316	456	437	584	282	256	278	372	813	661
Ganancias internas	%	11.2	13.7	5	7.2	15.6	18.4	9.3	31.6	6.3	12.5	18.1	22
	hrs	492	805	221	423	687	1083	408	1379	276	547	1054	962
Ganancia directa solar	%	9.5	10.5	5.9	6.7	12.2	13.2	8.5	16.3	6.9	10.1	10.2	11.5
	hrs	418	619	260	396	534	778	374	714	302	443	591	502
Deshumidificación	%	41.2	38.8	57.8	54.8	39.4	37	55.6	30.5	42.6	41.1	42.6	40.1
	hrs	1808	2284	2540	3225	1732	2175	2444	1334	1873	1804	2476	1751
Enfriamiento	%	24.8	21.3	22.1	18.9	18.9	15.9	16.8	2.7	33.9	23	10.2	6.8
	hrs	1091	1254	970	1112	830	936	736	117	1490	1009	594	295

Nota: En tabla 3-4, BC (Bajocalentamiento); SC (Sobrecalentamiento).

Las estrategias más importantes son deshumidificación y enfriamiento. De igual manera se recomienda la ventilación natural, siendo ésta una de las estrategias más recomendadas para enfriamiento en este tipo de climas.

Por otra parte, se propone el empleo del enfriamiento evaporativo directo (aún siendo un clima con humedad), sin embargo, no existen recomendaciones para el indirecto, ya que no se considera como una opción viable.

La presente investigación propone la comprobación de la eficiencia de estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto, las cuales podrían ser integradas como una estrategia de diseño cuando se realiza un análisis climático y bioclimático en climas cálido-húmedos.

4 METODOLOGÍA, DISEÑO EXPERIMENTAL Y ELEMENTOS DE ANÁLISIS

INDICE

4.1 Método de la investigación	88
4.1.1 Nivel de estudio	88
4.1.2 Enfoque y tipo de estudio	89
4.1.3 Objeto de estudio	89
4.1.4 Objetivo del experimento	89
4.1.5 Preguntas de investigación	89
4.1.6 Alcances y limitaciones	90
4.1.7 Variables de estudio	91
4.2 Diseño del experimento	92
4.2.1 Tipo de experimento	92
4.2.2 Universo de estudio	93
4.2.2.1 Área de referencia	93
4.2.2.2 Área específica	93
4.2.2.3 Escenario experimental	93
4.2.3 Diseño y etapas del procedimiento experimental	93
4.2.4 Módulos experimentales	96
4.2.4.1 Módulo de control (MC)	96
4.2.4.2 Módulo 1: EEI y PS	97
4.2.4.3 Módulo 2: MT y AT	98
4.2.4.4 Módulo 3: ERN y MT	99
4.2.4.5 Módulo 4: EEI, MT y PS	100
4.2.4.6 Módulo 5: ERN, EEI, MT y PS	101
4.2.5 Tipos de experimento	102
4.2.6 Periodo de estudio	104
4.2.7 Instrumental de medición	104
4.2.7.1 Descripción del equipo	104
4.2.7.2 Colocación	105
4.3 Elementos del análisis del comportamiento térmico	106
4.3.1 Temperaturas características en ME	106
4.3.2 PEM	106
4.3.3 Confort térmico	107

Capítulo 4: Metodología, diseño experimental y elementos de análisis

El capítulo se divide en dos rubros principales; el primero se enfoca en los aspectos metodológicos del estudio, en donde se describen las características de la investigación, el objeto, enfoque y tipo estudio, los objetivos del experimento, las preguntas que dirigen la investigación, los alcances y limitaciones del estudio y por último las variables que integran la hipótesis y se analizan para el desarrollo de la metodología experimental.

El segundo aspecto se dirige al desarrollo del experimento, en donde se describe el tipo de experimento, el diseño y las etapas del procedimiento experimental, la ubicación del mismo, el periodo de estudio, la descripción de los módulos físicos, así como la descripción del equipo utilizado para su medición y finalmente los elementos de análisis de eficiencia.

4.1 Método de la investigación

El método de la investigación fue de tipo analítico – experimental (Campos y Sosa, 2011), ya que se comprueba la hipótesis por medio de mediciones de variables ambientales en modelos físicos. Se obtienen los resultados y se analiza tanto el resultado conjunto como la relación entre las variables.

El presente estudio es una continuación del trabajo de la Mtra. Sabrina González (2001) quien realizó la investigación que lleva por título “Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo”. La metodología experimental está basada en el trabajo de investigación “Evaluación de Sistemas Pasivos de Enfriamiento y su Aplicación en el Diseño de Viviendas” del Dr. González (1989). El experimento consiste en la fabricación y medición de factores ambientales en módulos físicos (MC) y (ME) con la finalidad de obtener un factor de eficiencia.

4.1.1 Nivel de estudio

El objetivo de la investigación fue obtener los valores de eficiencia de los experimentos para posteriormente caracterizarlos, por lo que el nivel de estudio fue correlacional (posterior a exploratorio y descriptivo), en donde se analizó la relación entre las diversas variables dependientes.

4.1.2 Enfoque y tipo de estudio

El enfoque fue de tipo cuantitativo, ya que se obtuvieron los datos que posteriormente se analizaron a través de los índices desarrollados para la medición de su eficiencia. El tipo de estudio fue experimental, debido a que se midieron las variables de diversos modelos físicos.

4.1.3 Objeto de estudio

El objeto de estudio de la investigación fueron los SEEI representados a través de cinco módulos experimentales.

4.1.4 Objetivo del experimento

El objetivo del experimento fue obtener los datos de temperaturas características y humedad relativa al interior de los ME y el MC para su posterior tratamiento.

4.1.5 Preguntas de investigación

¿Qué cantidad de energía térmica es retirada durante 24 hrs (P.E.M.) al interior de cada sistema propuesto?

Preguntas secundarias

- ¿Cuál es la duración en horas dentro del rango de confort térmico (modelo adaptativo) de la temperatura interior de cada módulo experimental?
- ¿El sistema de enfriamiento más eficiente será aquel que utilice mayor número de estrategias?
- ¿En los sistemas con control de apertura, que utilicen el ERN, la oscilación térmica se reducirá?
- ¿Al decrecer la temperatura interior con respecto a la media exterior, la humedad relativa al interior aumentará?

4.1.6 Alcances y limitaciones

En todo trabajo investigativo existen alcances y limitaciones que son importantes de mencionar con el objetivo de que el experimento pueda ser correctamente replicado y, en caso de comparación, puedan ser utilizadas condiciones semejantes sino idénticas. Para la presente investigación los alcances y limitaciones son los siguientes:

Alcances:

1. Estudio de temperatura de bulbo seco y humedad relativa al interior de los módulos; se descartan otras variables ya que el objetivo es conocer el comportamiento higrotérmico.
2. Fabricación de cinco módulos experimentales y un módulo de control de dimensiones idénticas.
3. Desarrollo investigativo para climas cálido-subhúmedos en México (A_{w0}), ya que el universo de estudio puede ser muy amplio en aspectos de caracterización climática.
4. Análisis de tipo cuantitativo, no se consideran encuestas u otro tipo de instrumentos o herramientas.
5. Desarrollo de los resultados para obtener los valores promedio con los que se calcula el P.E.M. para cada caso.
6. Determinación del dispositivo más eficiente considerando dos tipos de materiales (agua y aceite de coco).
7. Caracterización de los módulos experimentales relacionando únicamente:
 - La duración en horas dentro del rango de confort (valores, gráficas)
 - El incremento o decremento de la humedad con relación a la temperatura dentro de los sistemas
 - La cantidad de energía retirada del sistema en 24 h (P.E.M.)

Limitaciones:

1. Se utilizaron modelos físicos a escala. Un modelo puede ser definido como una representación abstracta de la realidad, por lo que son elementos que se utilizan como referencia de la misma.
2. Tiempo: Las mediciones se realizaron en dos periodos representativos del clima cálido-húmedo. La etapa de sobrecalentamiento (mayo) y la de bajocalentamiento (diciembre). No se consideraron periodos de lluvia o fenómenos especiales. En el caso del

experimento con aceite de coco, se realizó únicamente durante el periodo de sobrecalentamiento.

3. Equipo e instrumentos: Siempre es probable el fallo bajo ciertas condiciones del equipo utilizado. El sistema de recolección periódica de datos no garantiza el monitoreo 100% correcto.

4.1.7 Variables de estudio

Una variable es todo aquello que puede asumir diferentes valores, tanto cualitativa como cuantitativamente (Campos, 2010). Las variables que se analizaron en este estudio fueron de carácter cuantitativo. Se dividen en tres categorías (Fig. 4-1):

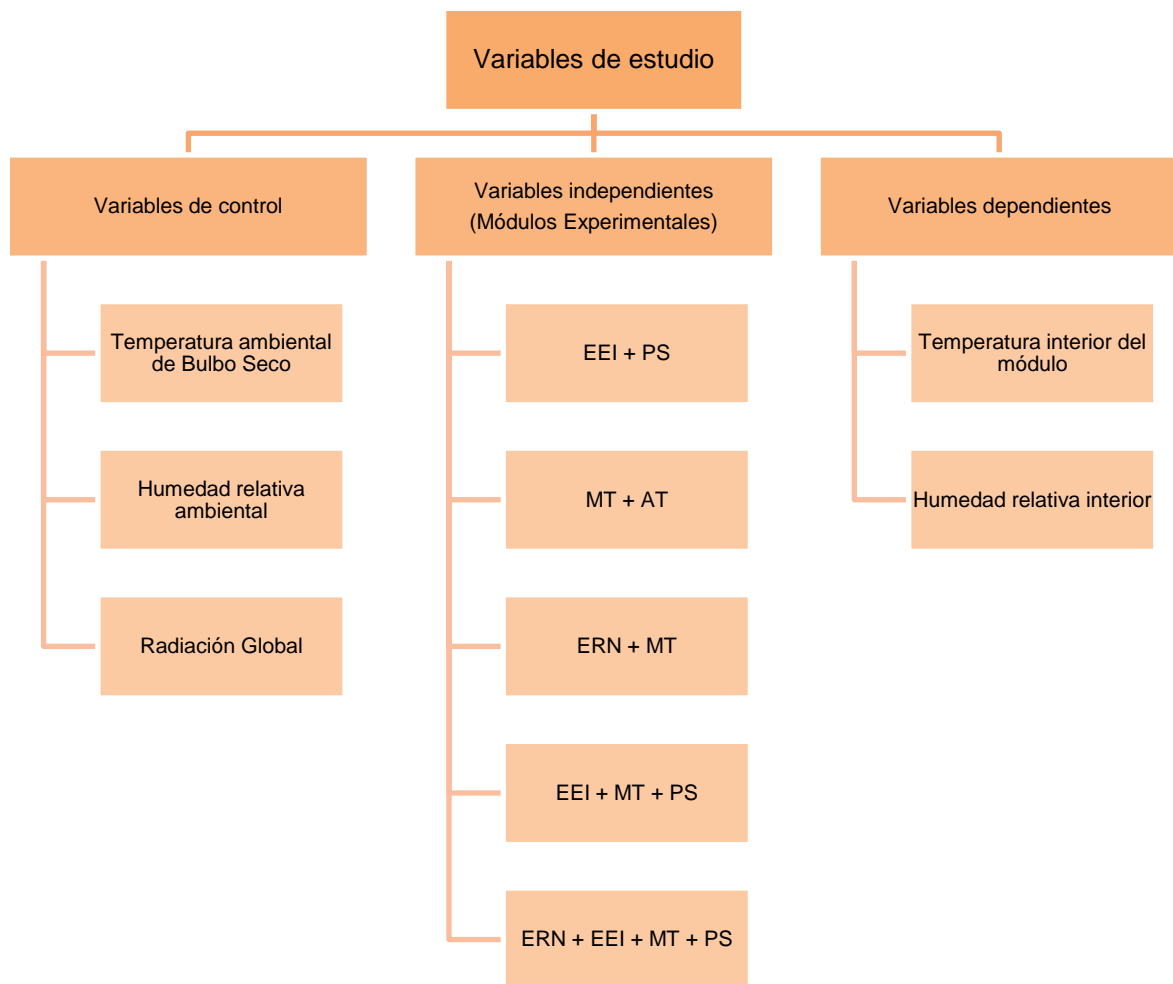


Fig. 4-1 Esquema de variables del experimento. Elaboración propia.

VARIABLES DE CONTROL

Las variables de control o independientes, son aquellas que se utilizan para neutralizar sus efectos en la variable dependiente, no se pueden manipular, sólo medir.

- Temperatura ambiental de bulbo seco. Temperatura del aire al exterior de los módulos.
- Humedad Relativa ambiental. Es la relación de la cantidad de vapor de agua en el ambiente con respecto a su grado de saturación.
- Radiación Global. Resulta de la suma de la radiación solar directa y difusa.

VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes son aquellas que se manipulan por parte del investigador para determinar su relación con el fenómeno.

VARIABLES DEPENDIENTES

Las variables dependientes son aquellas que se miden u observan para determinar el efecto de las variables independientes.

4.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El apartado de diseño de experimento está integrado por la descripción del procedimiento experimental, la ubicación del caso de estudio, el periodo del desarrollo de la prueba, la descripción de los módulos experimentales, la instrumentación requerida y los elementos que integran el análisis de eficiencia.

4.2.1 Tipo de experimento

Se realizó una investigación cuasi-experimental en donde las variables independientes fueron determinadas por el investigador, y de tipo transeccional correlacional-causal (Hernández, 2014), es decir, las mediciones fueron elaboradas en un periodo de tiempo puntual y específico para describir la relación existente entre los diferentes aspectos cuantitativos que integran el fenómeno.

4.2.2 Universo de estudio

La investigación se realizó para los climas cálidos con un porcentaje de 60 a 80% de Hr. El caso de estudio se realizó en la Ciudad de Mérida, misma que posee las características climáticas representativas, previamente descritas.

4.2.2.1 Área de referencia

El estudio se desarrolló en la región noroeste del Estado de Yucatán, el cual colinda con los Estados de Quintana Roo y Campeche; al norte colinda con el Golfo de México (Fig. 4-2 y 4-3).

4.2.2.2 Área específica

La Ciudad de Mérida tiene una extensión de 884 km² y se localiza en la latitud 28 58'04"N y longitud 89 37'18"O (20.9677, -89.6216) (Fig. 4-4).

4.2.2.3 Escenario experimental

El desarrollo del experimento se desarrolló en la cubierta de una casa habitación, sin obstrucciones, en la Colonia Chuburná de Hidalgo, al Norte de la Ciudad de Mérida. (Fig. 4-5).

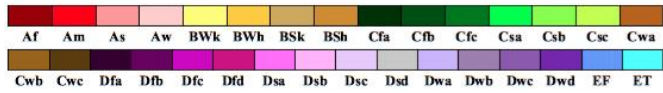
4.2.3 Diseño y etapas del procedimiento experimental

El experimento consistió en la medición de variables climáticas al interior de diferentes tipos de módulos en donde se integraron diversas estrategias de enfriamiento en la cubierta. Se realizaron dos tipos de experimentos:

- a) Se realizó la prueba en módulos experimentales con agua.
- b) Se realizó la prueba en un solo tipo de módulo experimental, aquel que mostró el mejor desempeño en las pruebas con agua y, se sustituyó la masa térmica, con un material de cambio de fase, aceite de coco.
- c) Los módulos se utilizaron como modelos, en este caso como representaciones a escala de la realidad. Se utilizaron dos tipos de módulos, uno de control (MC) y cinco configuraciones de módulos experimentales (ME). Esto se realizó para tener valores de referencia y así calcular la reducción o incremento de los valores en los factores climáticos al interior del sistema.

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASCLimO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



Main climates

A: equatorial
 B: arid
 C: warm temperate
 D: snow
 E: polar

Precipitation

W: desert
 S: steppe
 f: fully humid
 s: summer dry
 w: winter dry
 m: monsoonal

Temperature

h: hot arid
 k: cold arid
 a: hot summer
 b: warm summer
 c: cool summer
 d: extremely continental
 F: polar frost
 T: polar tundra

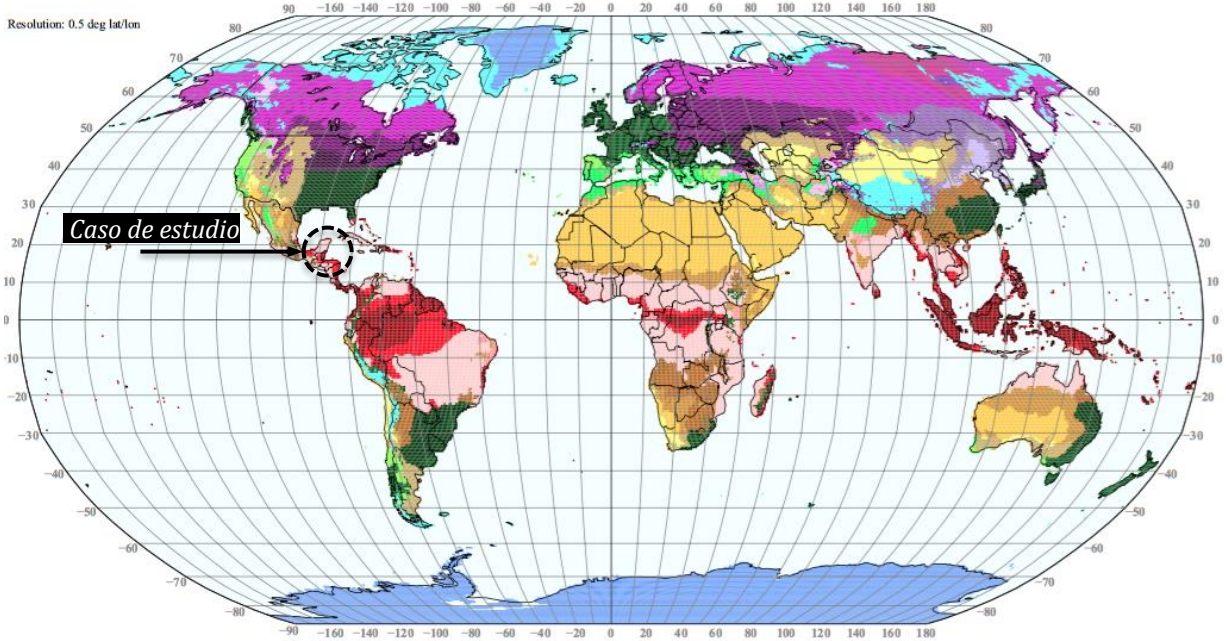


Fig. 4-2 Clasificación climática mundial de Köppen-Geiger actualizada por Kottek, M. et al. Fuente: Kottek, M. et al. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, pp. 261.



Fig. 4-3 Ciudad de Mérida en la Península de Yucatán (2018). Fuente: Google Earth.

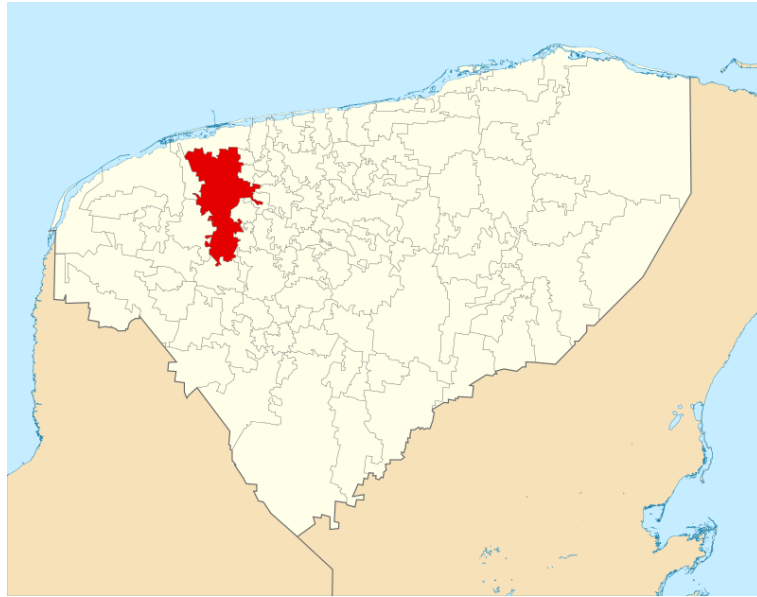


Fig. 4-4 Ubicación de la Ciudad de Mérida dentro del Estado de Yucatán. Fuente: <https://eblancooliva.com/merida-segun-catastro-a-1-1-2015-por-tamano-y-fecha/>



Fig. 4-5 Ubicación del sitio de experimentación dentro de la mancha urbana de la Ciudad de Mérida. Fuente: Google Earth.

El procedimiento para la realización del experimento constó de tres etapas:

1. Construcción del MC y los ME: Los modelos se fabricaron en el sitio de estudio ya que son voluminosos y por lo tanto difíciles de transportar.
2. Colocación en el escenario experimental: Se colocaron en una superficie plana, debido a que los módulos en la superficie contienen una charola con agua. Se ubicaron en un sitio donde no existan obstrucciones de radiación solar.

3. Calibración y colocación del instrumental de medición, así como la fabricación de la pantalla de Stevenson. Fue importante calibrar el equipo antes de comenzar la prueba piloto para obtener mediciones válidas. El equipo se colocó correctamente en cada uno de los módulos para evitar fallas y también para protegerse por medio de la pantalla de Stevenson, ya que el equipo permaneció expuesto a la intemperie un promedio de 15 días en tres periodos diferentes.

4.2.4 Módulos experimentales

Los módulos geoméricamente se describen como estructuras hexaédricas de 80 x 80 cm x 47 cm de alto. El exterior fue fabricado en madera de triplay de 15 mm y el interior fue forrado con foamular de 1" de espesor, esto para permitir la medición de un sistema adiabático, es decir, que no intercambia energía con su entorno, siendo el foamular un material de gran capacidad aislante. El exterior fue provisto de sellador para madera con la finalidad de prevenir el desgaste del material expuesto al Sol y recubierto con pintura esmalte color blanco, para disminuir la absorción de la radiación solar. En la base de los módulos se colocan dos tiras de madera de 0.05 x 0.05 m para separar los módulos del suelo y así prevenir la transmisión de energía al interior por el contacto directo con la superficie. El MC y los ME son idénticos en todos los componentes, excepto en la cubierta, con el objetivo de garantizar la misma carga térmica entre ellos y así elaborar una comparación válida. Los esquemas constructivos y su descripción detallada se mostrarán en el apartado 4.2.5.

4.2.4.1 Módulo de control (MC)

El módulo de control es el que estableció los valores de las condiciones ambientales al interior del sistema. La estructura exterior se construyó de madera de triplay de 15 mm de espesor con medidas exteriores de 80 x 80 x 47 cm. El interior se encuentra revestido por una placa de foamular de 1" de espesor en las paredes interiores y la base, adheridas con pegamento de contacto. Como cubierta se utilizó una placa de foamular de 2" de espesor de 77 x 77 cm en la cual se colocaron dos jaladeras para retirar el elemento y permitir la inserción y extracción del equipo de medición. El exterior de la madera se recubrió con sellador y posteriormente con pintura esmalte color blanco (Fig. 4-6 y 4-7).

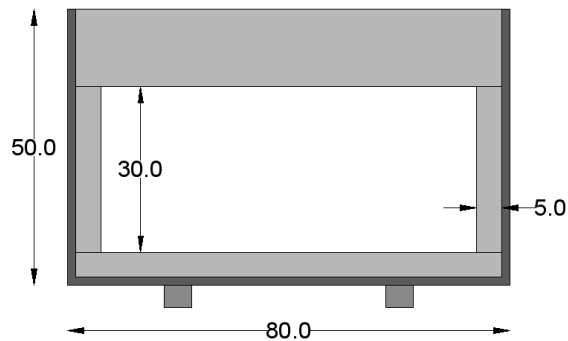


Fig. 4-6 Esquema del MC. Fuente: Elaboración propia.

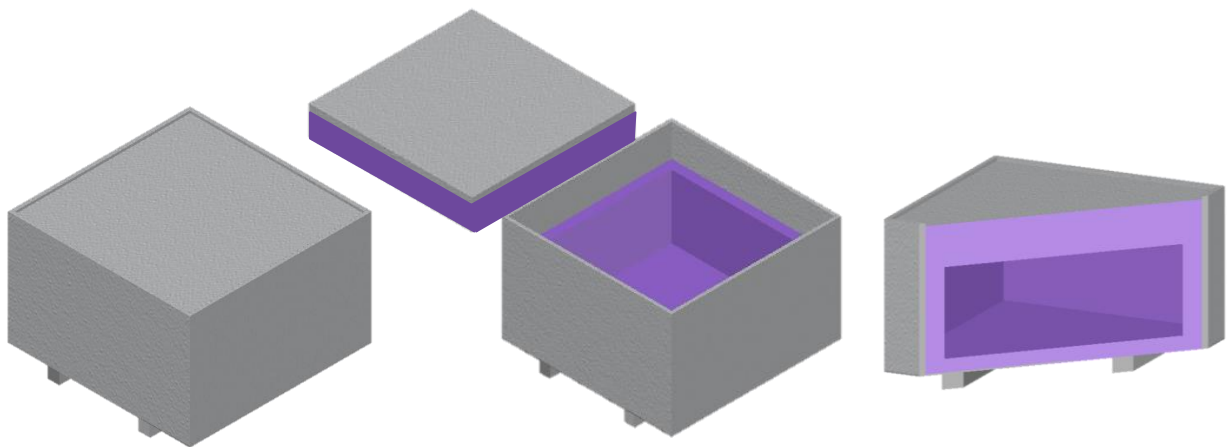


Fig. 4-7 Modelos volumétricos del MC. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.2 Módulo 1: Enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar (EEI y PS)

En el Módulo 1 (Fig. 4-8 y 4-9) se plantean las estrategias de enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar. La estructura posee la misma configuración que el MC y varía en la cubierta, donde se contempla una charola de lámina galvanizada de 1.2 mm de espesor y 8 cms de profundidad. El líquido se colocó a una altura de 8 cms y en la parte superior se colocó un volado de 100 x 100 cm de madera de triplay, misma que es revestida en su parte inferior con una placa de foamular de 1" y el elemento se sostiene al módulo por medio de cuatro apoyos de triplay de 1.5 cms. Los componentes de triplay fueron provistos de sellador para madera y posteriormente pintura esmalte color blanco.

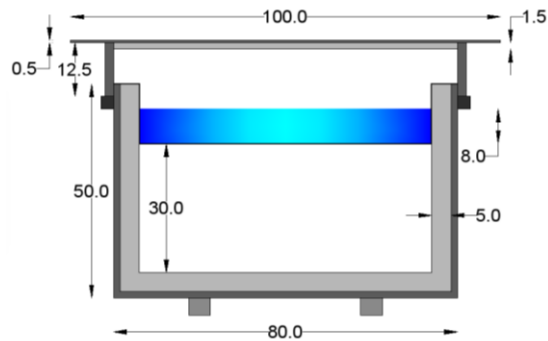


Fig. 4-8 Esquema del M1. Fuente: Elaboración propia.

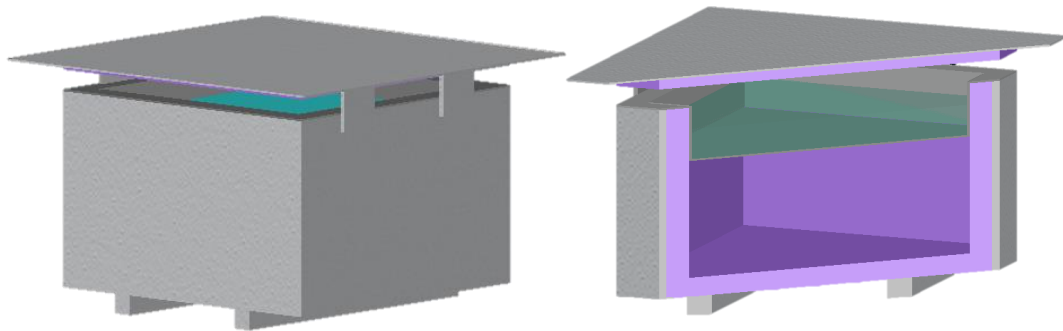


Fig. 4-9 Modelos volumétricos del M1. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.3 Módulo 2: Masa térmica y aislamiento térmico (MT y AT)

El Módulo 2 (Fig. 4-10 y 4-11) posee la misma configuración que el MC y se modificó en la cubierta, donde se colocó una tapa de triplay de 15 mm recubierta con sellador y pintura esmalte color blanco. En la parte inferior de la tapa se adhirió una placa de foamular de 1".

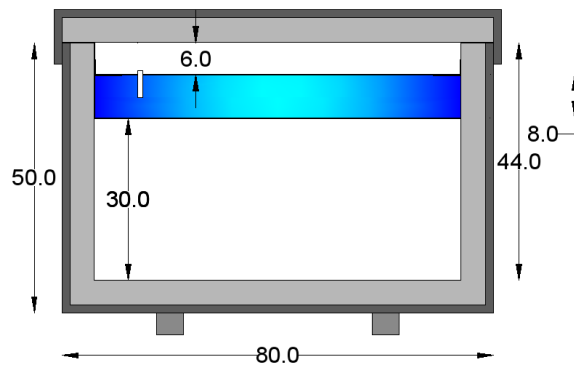


Fig. 4-10 Esquema del M2. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior el módulo contiene una charola de lámina galvanizada (igual que el M1) de 12 mm de espesor y 8 cm de profundidad, en donde el líquido se colocó a una altura de 8 cm.

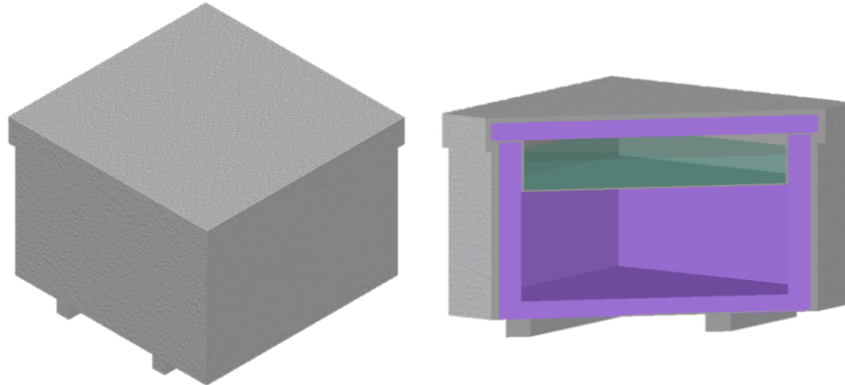


Fig. 4-11 Modelos volumétricos del M2. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.4 Módulo 3: Enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica (ERN y MT)

El Módulo 3 (Fig. 4-12 y 4-13) posee la misma configuración que el M2, la variante se presenta en la operación, ya que para considerar el enfriamiento radiativo nocturno, la tapa se retira a las 18:00 hrs, y se coloca a la 6:00 hrs, esto durante el periodo de medición.

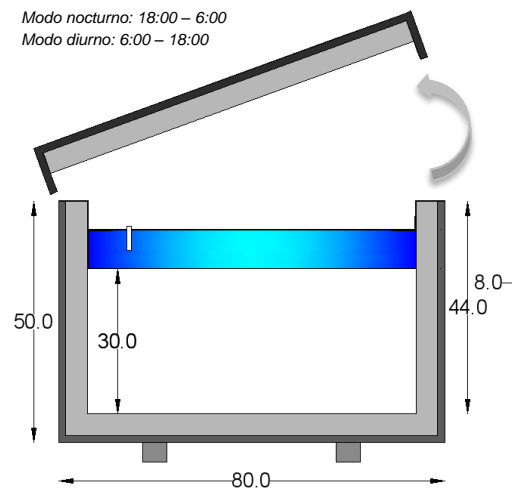


Fig. 4-12 Esquema del M3. Fuente: Elaboración propia.

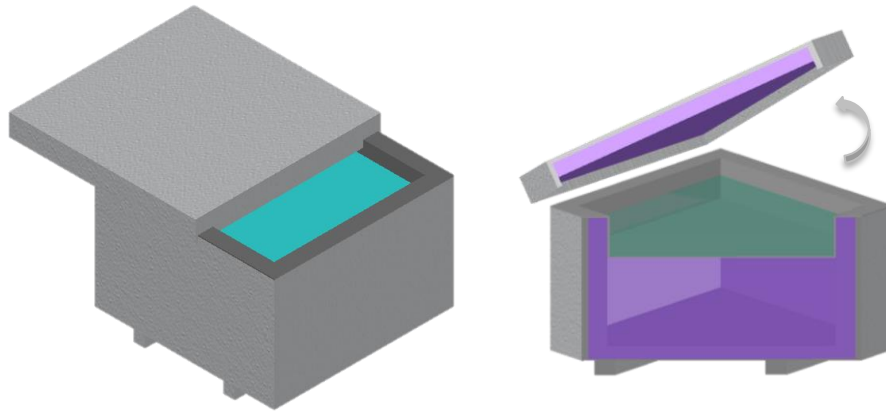


Fig. 4-13 Modelos volumétricos del M3. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.5 Módulo 4: Enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (EEI, MT y PS)

El Módulo 4 (Fig. 4-14 y 4-15) posee la misma configuración de Módulo 1. La variante se localiza en la charola, misma que posee dos niveles. El primero utiliza una capa confinada, es decir, se coloca el líquido a una altura de 8 cm y posee una cubierta de lámina que impide la evaporación. Encima de la capa se coloca un espejo de agua de 6 cm.

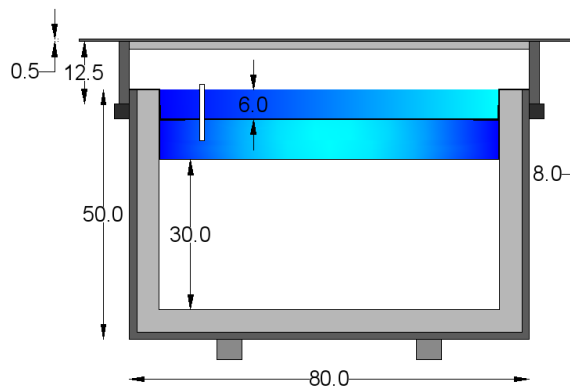


Fig. 4-14 Esquema del M4. Fuente: Elaboración propia.

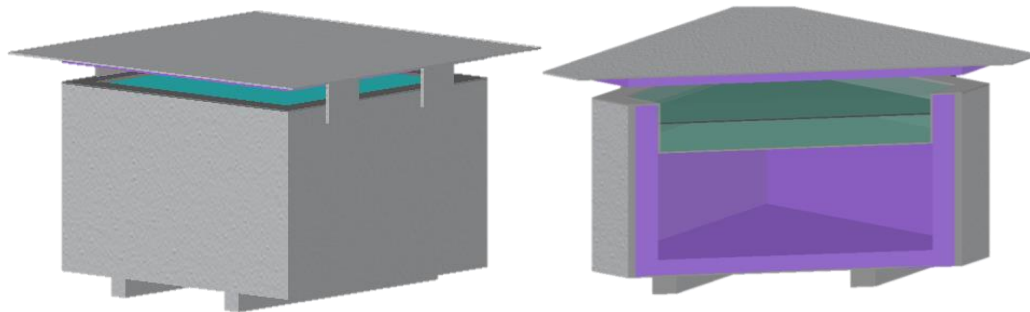


Fig. 4-15 Modelos volumétricos del M4. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.6 Módulo 5: Enfriamiento radiativo nocturno, enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (ERN, EEI, MT y PS)

El Módulo 5 (Fig. 4-16 y 4-17) posee la misma configuración que el M4, la variante se presenta en la operación, ya que para considerar el enfriamiento radiativo nocturno, la tapa se retiró a las 18:00 hrs, y se colocó a la 6:00 hrs, esto durante el periodo de medición.

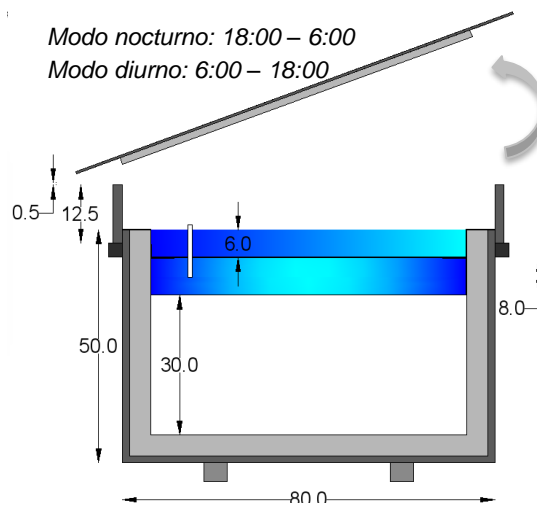


Fig. 4-16 Esquema del M5. Fuente: Elaboración propia.

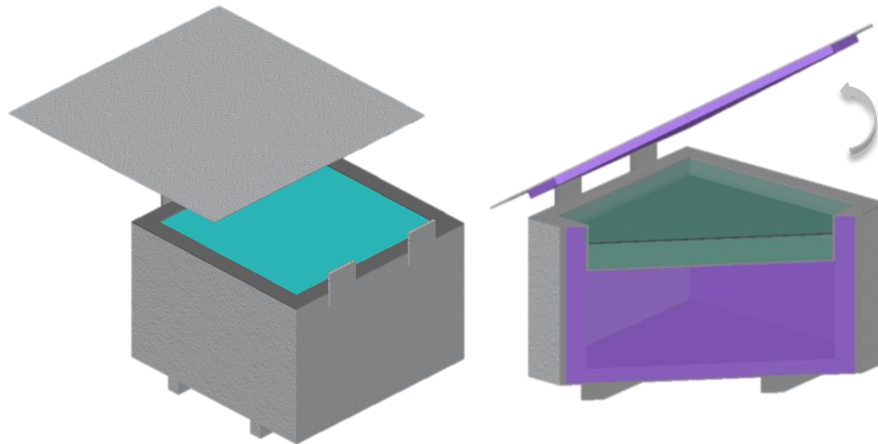


Fig. 4-17 Modelos volumétricos del M5. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Tipos de experimento

A) El primer experimento se realizó en las cinco diferentes configuraciones de módulos experimentales, se realizó con agua en las cubiertas con el objetivo de determinar el tipo de configuración con el mejor desempeño (Fig. 4-19).

B) El segundo experimento se realizó en el mismo tipo de módulo experimental sustituyendo el agua por una cubierta de policarbonato de 6mm que encapsula un material de cambio de fase, aceite de coco (Fig. 4-18 y 4-20). Lo anterior para tener un parámetro comparativo y conocer el potencial de enfriamiento de ambos materiales.

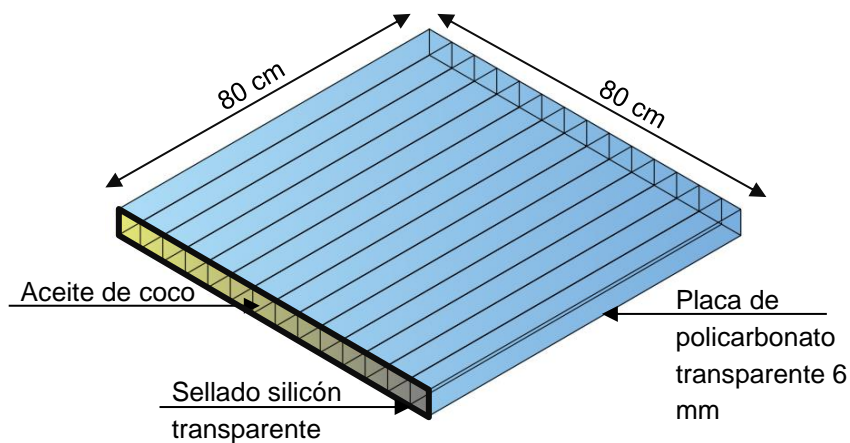


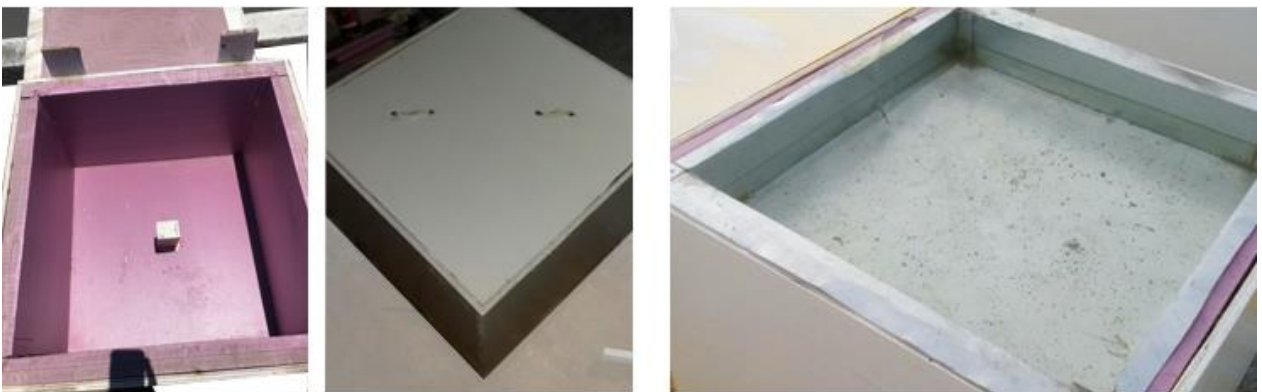
Fig. 4-18 Esquema de placa de policarbonato con aceite de coco. Fuente: Elaboración propia.



1. Fase de construcción de ME.



2. De izq. a der. M1, M5, Pantalla de Stevenson.



3. De izq. a der. M2 (colocación de instrumento de medición); MC; M3.

Fig. 4-19 Registro fotográfico de experimento 1. Elaboración propia.

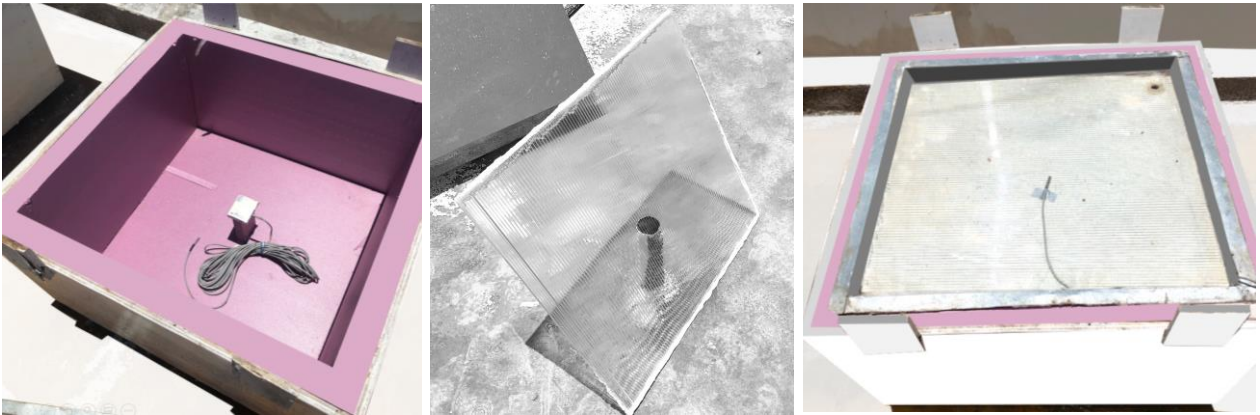


Fig. 4-20 De izq a der. Instrumental de medición en M5 de experimento 2; Placa de policarbonato con MCF; Colocación de sonda de medición en M5. Fuente: Elaboración propia.

4.2.6 Periodo de estudio

El periodo del desarrollo del experimento A fue en verano, durante el mes de mayo, mismo que registra la mayor temperatura media anual con un promedio de 29 °C; y en invierno, durante el mes de diciembre, donde la temperatura mínima promedio es de 24 °C. El monitoreo se realizó durante 15 días. El experimento B se realizó en la época de sobrecalentamiento con la misma duración del experimento A.

4.2.7 Instrumental de medición

4.2.7.1 Descripción del equipo

Se utilizaron Hobos U-12 (Fig. 4-21), mismos que registran temperatura y humedad. Los datos son descargados a través de un cable usb y se registraron lecturas programables cada 30 minutos.



Fig. 4-21 HOB0 U-12.
Fuente: www.onset.com

4.2.7.2 Colocación

Los equipos se colocaron al centro de los módulos experimentales sujetos por medio un rectángulo de foamular (Fig. 4-22). Los módulos se ubicaron en la cubierta de una casa habitación de manera que no se presentaba obstrucción solar entre ellos (Fig. 4-23).



Fig. 4-22 Colocación de HOBO U- 12 en M5. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 4-23 Distribución de los ME y MC en la cubierta. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Elementos del análisis del comportamiento térmico

Se analizaron los resultados por medio de tres parámetros: Las temperaturas características, el P.E.M. y el confort térmico (González, 1997).

4.3.1 Temperaturas características en los módulos experimentales

Para obtener una caracterización inicial, se analizaron los datos por medio de la Temperatura máxima (Tmax), la Temperatura media (Tmid) y la Temperatura mínima (Tmin) así como la Amplitud de la misma (Fd). Se analizaron los valores de los ME con respecto al MC y al ambiente exterior.

Los módulos fueron diseñados para reducir significativamente la ganancia externa de temperatura y humedad y evaluar únicamente el efecto de la cubierta sobre la incidencia del módulo, por lo que la diferencia de valores del MC contra los ME corresponden al efecto del comportamiento térmico.

De acuerdo con González (2010), un sistema pasivo de enfriamiento será eficiente cuando las temperaturas de los ME sean menores a las del MC y entre mayor sea la diferencia, mayor será la eficiencia, por lo que el objetivo principal del experimento fue obtener valores de Tmid menores a los del MC, posteriormente, que la amplitud de los valores fuera mínima, que en una gráfica se interpreta idealmente como una línea recta.

4.3.2 Potencial de enfriamiento medio (P.E.M.)

El potencial de enfriamiento medio, de acuerdo con González (1997) es “la cantidad de energía por unidad de tiempo y de superficie, capaz de ser retirada por el sistema, obtenida como valor medio durante un periodo de 24 horas”.

Se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$PEM = CPC \times (T_m \text{ control} - T_m \text{ experimental}) \times 24h / A \dots\dots\dots 10$$

CPC = Coeficiente de pérdida de calor m² K

Tm control = Temperatura media del módulo de control en 24h

Tm experimental = Temperatura media del módulo experimental en 24h

A = Área de la superficie del techo en m²

$$CPC = Q_c - med / (T_i - med - T_e - med) \dots\dots\dots 11$$

En donde:

Qc - med = Flujo de calor por conducción medio en W. $Q_c = U \times A \times (T_i - T_e)$

U = Transmitancia media de las paredes del módulo en W/m² °C

A = Superficie de las paredes en m²

Ti - med = Temperatura interna media del módulo en °C

Te - med = Temperatura media de ambiente en °C

Para el caso de estudio:

1) Determinar U: Se empleó la calculadora de U ingresando los materiales que conforman los módulos experimentales (Fig. 4-24) **U = 1.32 W/m² °C**

2) Se calcula Qc - med:

$$Q_{c-med\ bc} = 1.32 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \times (0.8 \times 0.47 \times 4) \times (25 \text{ °C} - 26.5 \text{ °C}) = - \mathbf{2.97}$$

$$Q_{c-med\ sc} = 1.32 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \times (0.8 \times 0.47 \times 4) \times (31.3 \text{ °C} - 31.8 \text{ °C}) = - \mathbf{0.99}$$

$$Q_{c-med\ sc\ (MCF)} = 1.32 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \times (0.8 \times 0.47 \times 4) \times (30.2 \text{ °C} - 31.1 \text{ °C}) = - \mathbf{1.78}$$

3) Se calcula CPC=

$$CPC_{bc} = -2.97 / (25 \text{ °C} - 26.5 \text{ °C}) = 1.98 \text{ m}^2 \text{ K}$$

$$CPC_{sc} = -0.99 / (31.3 \text{ °C} - 31.8 \text{ °C}) = 1.98 \text{ m}^2 \text{ K}$$

$$CPC_{sc\ (MCF)} = -1.78 / (30.2 \text{ °C} - 31.1 \text{ °C}) = 1.98 \text{ m}^2 \text{ K}$$

Por lo tanto: CPC en los tres escenarios (bajocalentamiento, sobrecalentamiento y sobrecalentamiento con MCF) se considera de **1.98 m² K**.



U-Value Calculator

Thermal transmittance (U-value) according to BS EN ISO 6946:2017



Fig. 4-24 Cálculo de U para el caso de estudio. Fuente: https://www.changeplan.co.uk/u_value_calculator.php (2020).

Nota: La ficha técnica del Foamular se puede consultar en el anexo no. 10.

4.3.3 Confort térmico

Por último, se realizó un análisis de confort térmico por medio de la fórmula de Temperatura Neutra propuesta por ASHRAE en el Standard 55 (2013), basado en la metodología de Nicol y Humphreys (2002), con un enfoque adaptativo para edificaciones ventiladas naturalmente, misma que se calculó por medio de la siguiente expresión:

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_a - amb) \dots\dots\dots 9$$

Donde:

$T_a - amb$ = Temperatura media anual

Tabla 4-3 Valores empleados para análisis de confort térmico. Fuente: Elaboración propia.

VALORES DE TEMPERATURA NEUTRA EN DOS DIFERENTES PERIODOS: BAJOCALENTAMIENTO Y SOBRECALENTAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉRIDA							
Temperatura media del mes más frío = 24.0 °C				Temperatura media del mes más cálido = 29.0 °C			
Temperatura neutra = $17.6 + (0.31 \times \text{Temperatura de diseño})$							
Tn periodo bajocalentamiento = 25.04 °C				Tn periodo sobrecalentamiento = 26.59°C			
5K		7K		5K		7K	
L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.	L. SUP.	L. INF.
27.54	22.54	28.54	21.54	29.09	24.09	30.09	23.09



5

EXPERIMENTACIÓN CON MODELOS EN LA CIUDAD DE MÉRIDA: PRUEBA PILOTO

INDICE

5.1 Descripción de distribución y colocación de los módulos experimentales	111
5.2 Análisis de resultados	114
5.3 Retroalimentación	118

Capítulo 5: Experimentación con modelos físicos en la Ciudad de Mérida: Prueba Piloto.

Se realizó una prueba piloto para conocer los aspectos que pudieran impactar tanto positiva como negativamente en los resultados de la experimentación y así realizar mejoras para obtener datos fidedignos útiles para la réplica del mismo.

5.1 Descripción de distribución y colocación de los módulos experimentales

Una vez construidos los módulos experimentales y de control se procedió a colocarlos en la azotea de la casa habitación. Fue indispensable analizar las sombras incidentes en la superficie para colocar los modelos físicos de tal manera que no existiera obstrucción solar entre ellos.

Se calibraron los equipos, (tal y como se describe en el Capítulo anterior) se colocaron dentro del Módulo de Control (MC) y permanecieron durante 24 horas realizando lecturas con intervalos de 15 minutos (Fig. 5-1). Se retiraron los mismos y se revisaron los datos de cada uno en el software correspondiente a cada equipo.



Fig. 5-1 Colocación de equipos en el MC para calibración. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se etiquetó cada equipo para que, una vez retirados, se conociera la correspondencia del equipo y del módulo.

Se colocaron los equipos con cinta para evitar desplazamientos (Fig. 5-2 y 5-3) y se procedió al llenado de las charolas con agua; finalmente se atornillaron las cubiertas. Se colocó en la Pantalla de Stevenson, (Fig. 5-4) el equipo que mediría los factores climáticos exteriores, para obtener el parámetro de comparación. Los equipos permanecieron realizando mediciones durante 18 días (del 24 de Abril al 11 de Mayo de 2018).



Fig. 5-2 Colocación de Easy Log en MC. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 5-3 Colocación de Hobo U-12 con sensores de superficie y agua dentro del Módulo 4. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 5-4 Colocación de Hobo U-12 dentro de la pantalla de Stevenson. Fuente: Elaboración propia.

Una vez concluido el periodo de prueba se vaciaron las charolas y se procedió al desmontaje de las cubiertas y los equipos para su posterior análisis (Fig. 5-5).

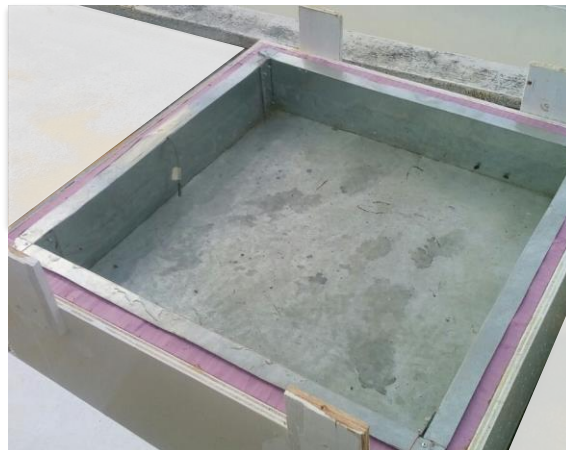


Fig. 5-5 Vaciado de charolas para retiro de equipos de medición. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Análisis de resultados

Una vez registrados los datos durante el periodo de prueba a través de los equipos de medición, fue necesario descargarlos al ordenador para su posterior tratamiento.

Se exportaron a un archivo con extensión .xls y se procedió al análisis de los mismos. Se separaron los datos por día, se eligió (en este caso) un rango de 11 horas y media (como periodo representativo, de 9:00 a 20:30 hrs) y se unificó un formato para cada módulo, así como del equipo que registra los factores climáticos exteriores.

Una vez ordenados los valores diarios horarios, de cada equipo se elaboró una tabla resumen promedio, es decir, por cada media hora (configuración preestablecida de los equipos de medición) se calculó el promedio de cada uno de los días y finalmente se obtuvieron los valores promedio, máximos y mínimos.

Debido a que en los módulos 2 y 3 no se registró la temperatura interior (ya que no se colocó sonda al centro) únicamente se analizaron y compararon los siguientes módulos: MC, M1, M2, M3 y Pantalla S (exterior).

Se realizó un análisis promedio de día-horario para conocer si el comportamiento de los cuatro módulos era similar, esto a través de las gráficas obtenidas (ya que los módulos sólo varían en la configuración de la cubierta es posible predecir que el comportamiento varía en una oscilación pequeña), esto con la finalidad de establecer si existe algún problema con la construcción de alguno de ellos o con el equipo de medición.

A continuación, se presenta la tabla resumen de resultados (Tabla 5-1):

Tabla 5-1 Tabla resumen de resultados – Prueba piloto. Fuente: Elaboración propia.

		EXTERIOR	VALORES AL INTERIOR DE LOS MÓDULOS			
		EXTERIOR	MC	M1	M2	M3
Temp promedio	°C	31.0	31.6	29.5	30.9	31.2
Temp min	°C	26.3	24.5	26.8	28.6	26.5
Temp max	°C	34.8	35.9	31.2	32.2	34.0
Hr promedio	%	54.4	72.7	67.2	64.5	66.3
Hr mínima	%	42.7	68.8	62.0	59.4	60.7
Hr máxima	%	68.9	77.7	75.6	73.9	78.4
Reducción de TBS Prom. (MC vs Valores módulos), K				2.0	0.6	0.4
Reducción de HR (MC vs Módulos), %				5.5	8.2	6.4

Como referencia inicial se consideraron los valores del MC. En el caso del M1, el EEI y PS la temperatura media disminuyó, con respecto a la TBS exterior registrada simultáneamente, un valor de 2.0 K; mientras que en el M2 se redujo 0.6 K por efecto de la MT y AT; finalmente en el M1 se redujo 0.4 K por efecto del ERN y MT.

Por otra parte, con relación a la humedad relativa promedio al interior de cada módulo, el M1 decreció en 5.5%, el M2 en 8.2% y el M3 en 6.4% con respecto a los valores del MC.

A continuación, se muestran las gráficas de comportamiento horario de temperatura y humedad del MC, M1, M2, M3 y exterior (Tablas 5-2 y 5-3, Fig. 5-6 y 5-7).

Tabla 5-2 Valores de TBS promedio horaria P.S, MC, M1, M2, M3 – Prueba piloto. Fuente: Elaboración propia.

TBS PROMEDIO HORARIA - PRUEBA PILOTO					
HORA	EXTERIOR	MC	M1	M2	M3
09:00	28.2	25.1	24.3	25.5	24.7
09:30	29.3	26.4	24.9	26.0	25.6
10:00	30.3	27.7	25.4	26.4	26.5
10:30	31.4	28.9	25.9	26.8	27.4
11:00	32.6	30.2	26.3	27.2	28.3
11:30	33.3	31.4	26.8	27.7	29.2
12:00	33.9	32.6	27.2	28.0	30.0
12:30	34.5	33.8	27.6	28.4	30.7
13:00	34.8	34.7	27.8	28.6	31.3
13:30	34.8	35.5	28.1	28.9	31.7
14:00	34.4	36.1	28.4	29.1	32.1
14:30	33.8	36.4	28.6	29.1	32.2
15:00	32.8	36.5	28.7	29.1	32.1
15:30	32.1	36.3	28.6	29.0	31.9
16:00	31.5	35.5	28.4	28.8	31.4
16:30	30.9	34.8	28.1	28.6	30.9
17:00	30.4	34.1	27.8	28.4	30.5
17:30	29.6	33.4	27.6	28.1	30.1
18:00	28.9	32.6	27.3	27.9	29.6
18:30	28.2	31.8	26.9	27.8	29.1
19:00	27.6	30.9	26.7	27.6	28.5
19:30	27.1	29.9	26.2	27.4	27.8
20:00	26.6	28.9	25.7	27.1	27.2
20:30	26.3	28.0	25.2	26.8	26.6

Tabla 5-3 Valores de HR promedio horaria P.S, MC, M1, M2, M3 – Prueba piloto. Fuente: Elaboración propia.

HR PROMEDIO HORARIA - PRUEBA PILOTO					
HORA	EXTERIOR	MC	M1	M2	M3
09:00	63.9	77.4	75.6	73.9	78.4
09:30	59.9	77.7	74.6	72.6	76.8
10:00	56.8	77.6	73.3	71.2	74.9
10:30	52.8	77.3	72.0	69.7	72.9
11:00	48.8	77.3	70.5	68.1	70.9
11:30	47.1	76.9	68.7	66.4	68.9
12:00	45.2	76.1	67.1	64.6	67.0
12:30	43.6	75.5	65.8	63.0	65.4
13:00	42.7	74.6	64.6	61.5	63.9
13:30	43.0	73.6	63.6	60.5	62.7
14:00	44.8	72.6	62.6	59.6	61.6
14:30	46.8	71.4	62.2	59.4	60.9
15:00	50.5	70.4	62.0	59.7	60.7
15:30	51.6	69.8	62.8	60.9	61.0
16:00	53.3	69.4	63.4	61.1	61.6
16:30	54.3	69.0	64.0	61.5	62.2
17:00	55.6	68.9	64.6	62.1	62.6
17:30	57.6	68.8	65.2	62.6	62.9
18:00	59.2	69.0	65.8	63.2	63.5
18:30	61.9	69.3	66.6	63.8	64.3
19:00	63.7	69.5	67.7	64.6	65.1
19:30	65.6	70.1	69.0	65.1	66.4
20:00	67.4	70.8	70.3	66.0	68.0
20:30	68.9	71.7	71.7	67.1	69.5

Los tres experimentos mostraron una reducción de la temperatura interior, sin embargo, los módulos 1 y 2 son los que mejor desempeño mostraron reduciendo en 2.0 K y 0.6 K.

Debido a la configuración del sistema adiabático la curva higrótérmica se desplaza cuatro horas y la oscilación térmica decrece.

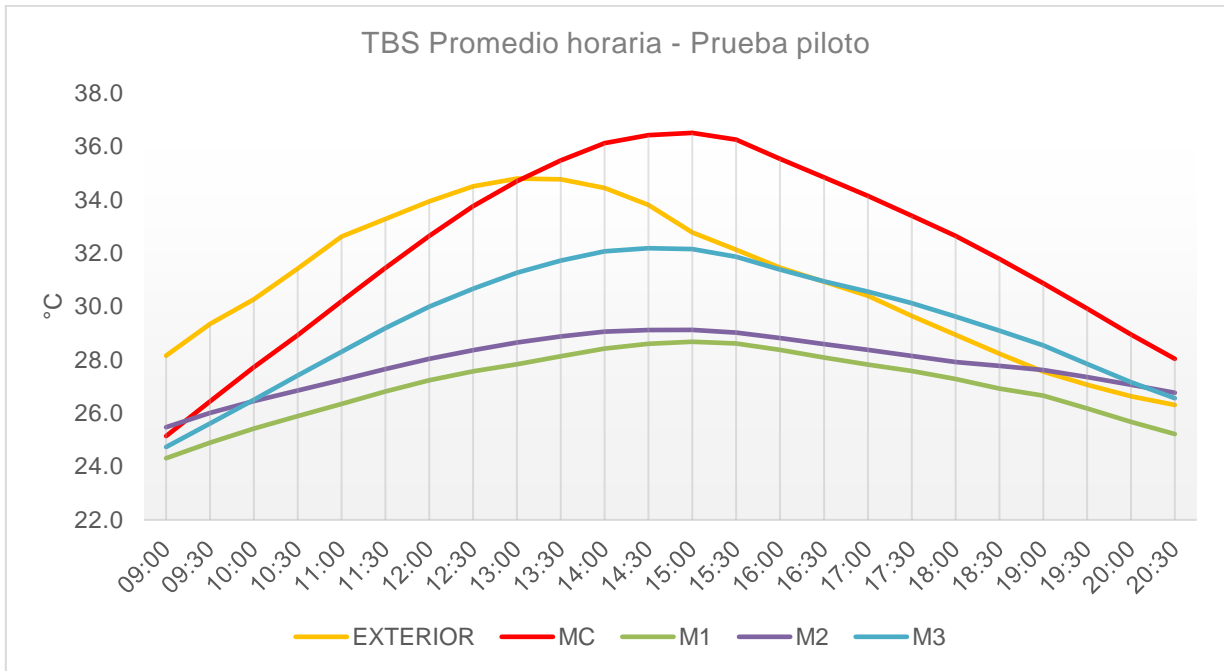


Fig. 5-6 TBS promedio horaria de prueba piloto. Fuente: Elaboración propia.

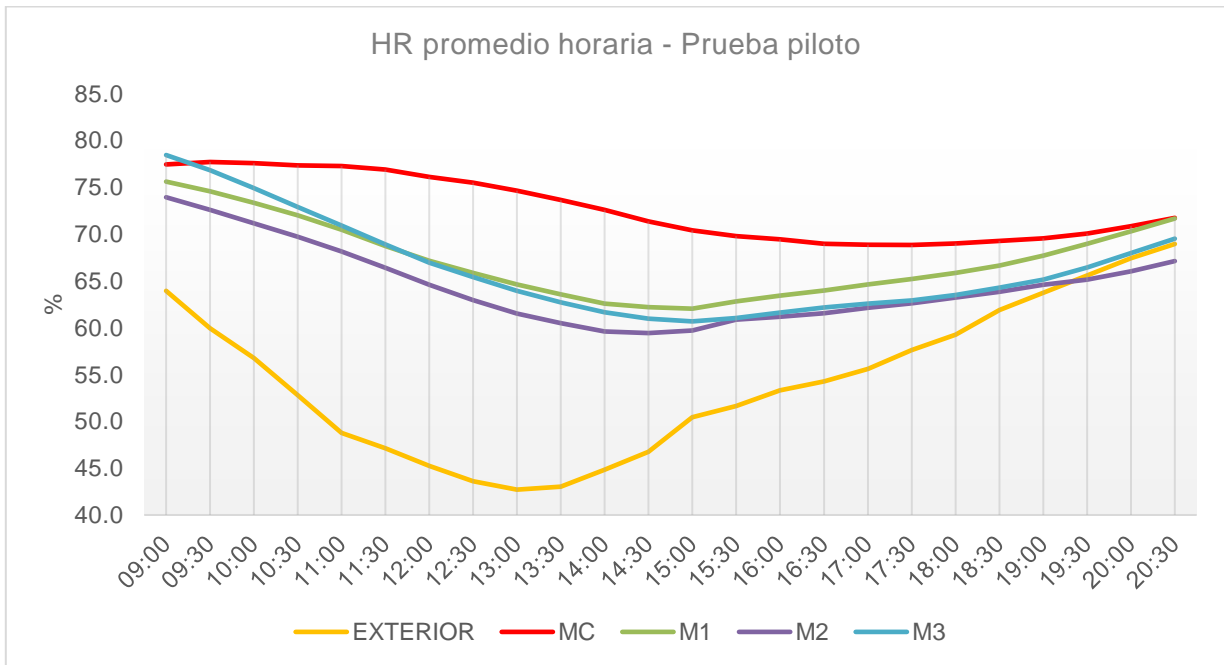


Fig. 5-7 HR promedio horaria de prueba piloto. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Retroalimentación

El análisis de los resultados de la prueba piloto permitió conocer los aspectos técnicos posibles a mejorar para obtener resultados uniformes y de mayor aportación al trabajo, entre ellos destacan los siguientes:

1. Es necesario colocar el equipo de medición que registra datos exteriores al centro de la Pantalla de Stevenson, ya que los valores obtenidos fueron menores tanto en temperatura y humedad comparado con los valores interiores de los módulos, esto debido a que, al recibir mayor ventilación, los factores climáticos decrecen.
2. En la prueba piloto sólo se obtuvieron datos al interior de los módulos 1, 2 y 3, así como el de control, ya que los Hobos de 4 canales (empleados en los módulos 4 y 5), sólo registran valores a través de las sondas, por lo que en la prueba para el periodo de bajocalentamiento y sobrecalentamiento es necesario emplear una sonda al interior.
3. Es necesario registrar, a través de la EMA, los valores diarios para la zona de estudio durante la prueba, ya que es un parámetro importante de comparación.



6

RESULTADOS: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS

INDICE

6.1 Experimento 1	119
6.1.1 Periodo de bajo calentamiento	119
6.1.1.1 Análisis de temperaturas características	119
6.1.1.2 Análisis del PEM	130
6.1.1.3 Análisis de confort térmico	131
6.1.2 Periodo de sobrecalentamiento	137
6.1.2.1 Análisis de temperaturas características	137
6.1.2.2 Análisis de PEM	148
6.1.2.3 Análisis de confort térmico	149
6.2 Experimento 2	155
6.2.1 Análisis de temperaturas características	155
6.2.2 Análisis del PEM	158
6.2.3 Análisis de confort térmico	159

Capítulo 6: Resultados: Descripción y análisis

6.1 Experimento 1

Consiste en el monitoreo de la temperatura y humedad al interior de módulos experimentales con cinco diferentes configuraciones de cubierta. Para conocer su desempeño se validó por medio de la comparación de las mediciones de los ME con respecto a los valores del módulo de control y de las variables ambientales.

El experimento 1 emplea agua en la cubierta. Se realizó la prueba en dos periodos: de bajocalentamiento y sobrecalentamiento, esto para conocer el desempeño en ambos extremos de las condiciones climáticas.

6.1.1 Periodo de bajo calentamiento

La prueba durante el periodo de bajocalentamiento se realizó del 25 de diciembre al 15 de enero. Para su análisis se compararon los resultados promedio de la EMA, MC, M1, M2, M3, M4 y M5.

6.1.1.1 Análisis de temperaturas características

El periodo de prueba presentó condiciones de temperatura promedio mínima de 21.6 °C y máxima de 32.8 °C. La humedad relativa promedio mínima fue de 42% y máxima de 88%. No se registraron lluvias y se presentó una radiación solar promedio de 684.4 W/m² con condiciones de cielo despejado.

a) Módulo de control (MC)

En el módulo de control durante el experimento, se presentó una TBS mínima de 20.1 °C, máxima de 32.5°C y promedio de 25 °C; en comparación con la EMA en donde se registró una temperatura mínima de 21.6 °C, máxima de 32.8 °C y promedio de 26.6°C. Se infiere que la temperatura, por efecto del sistema adiabático y los materiales aislantes empleados, se redujo en 1.6 K.

La temperatura mínima en la curva de oscilación horaria se desplazó una hora con respecto a la de la EMA (Fig. 6-1) y su punto máximo presenta una diferencia de 0.3 K.

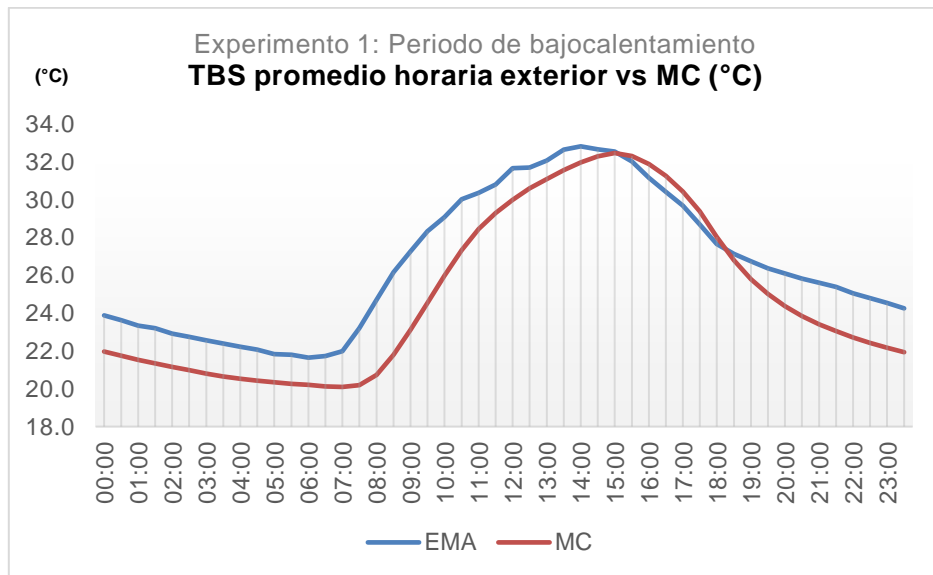


Fig. 6.1 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA y el MC del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

La humedad relativa al interior del MC (Fig. 6-2) se estabiliza en un valor del 90% mientras que, en los valores registrados en la EMA, la curva de comportamiento decrece cuando la temperatura aumenta. El rango en el que se desarrolla la curva de HR en la EMA integra del 42% a 89%.

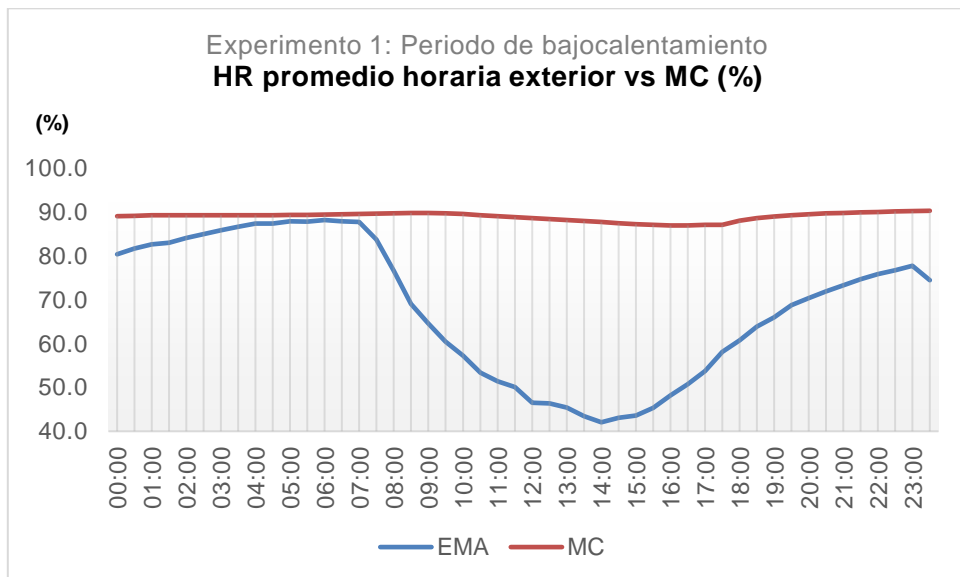


Fig 6-2 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA y el MC del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

b) Módulo 1: Enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar (EEI y PS)

En el M1 se presentó una TBS promedio de 23.4 °C, con una máxima de 26.5 °C y mínima de 21 °C (Fig. 6-3). Contrastando con los valores obtenidos en el módulo de control, la temperatura promedio decreció en 1.6 K y 3.2 K con respecto a la temperatura exterior. La oscilación térmica disminuyó en 7K y la temperatura horaria aumentó dos horas después que la temperatura ambiental.

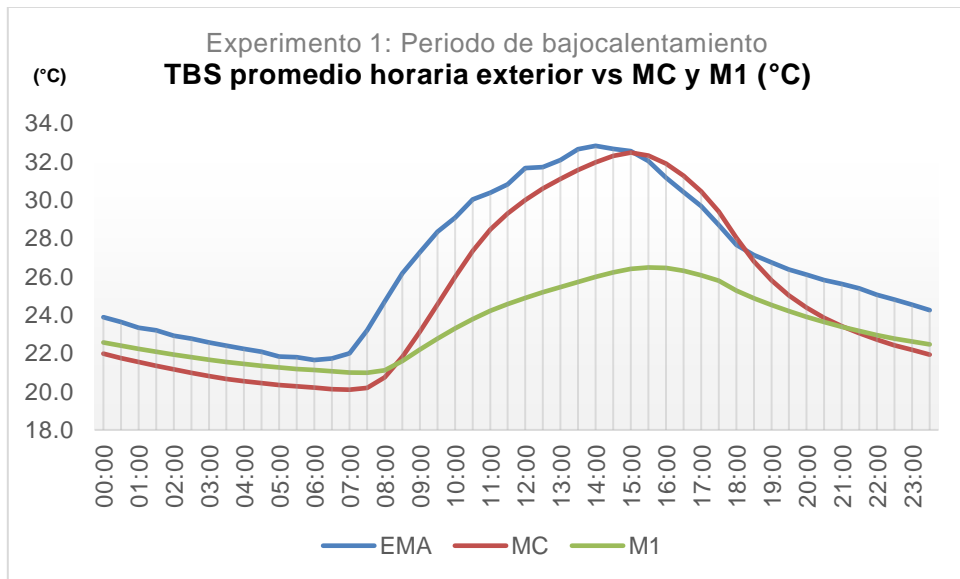


Fig. 6-3 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M1 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

La humedad relativa promedio fue de 77.1% (Fig. 6-4), es decir, 11.8% menor a la HR del MC. La curva de oscilación térmica disminuyó siguiendo el comportamiento del MC.

c) Módulo 2: Masa térmica y aislamiento térmico (MT + AT)

La TBS promedio del M2 se registró de 23.4 °C, lo cual indica una reducción de 1.5 K con respecto al MC y 3.1 K de diferencia del valor promedio de la temperatura exterior. La curva de oscilación térmica (Fig. 6-5) mostró el pico de temperatura a las 16:00 hrs.

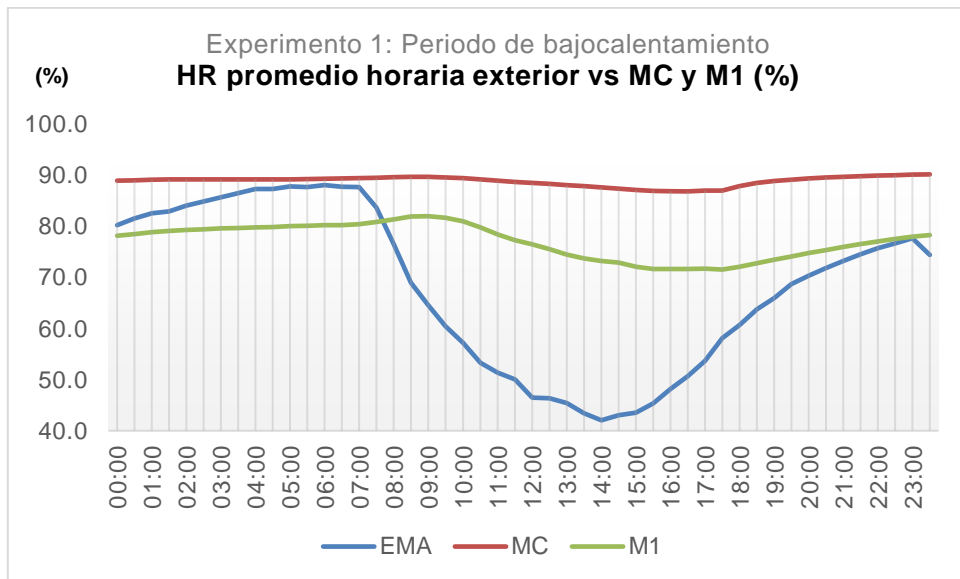


Fig. 6-4 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M1 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

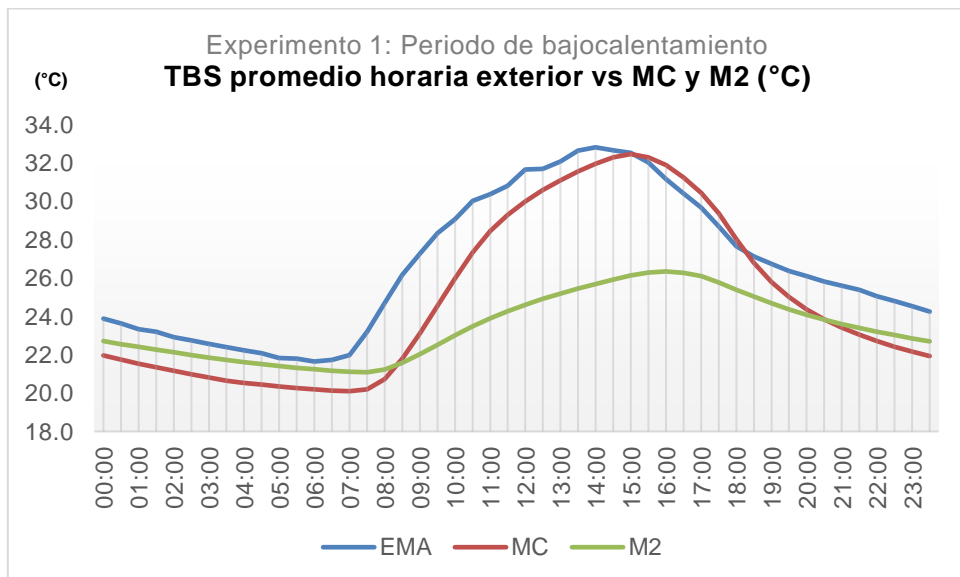


Fig. 6-5 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M2 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

La HR del M2 fue en promedio de 70%, con un máximo de 75.1% y una mínima de 63.8%, lo cual representa una disminución de 18.8% con respecto al MC. La oscilación disminuyó (Fig. 6-6) aproximadamente 5%, presentando un valle de las 9:00 hrs a las 20:00 hrs.

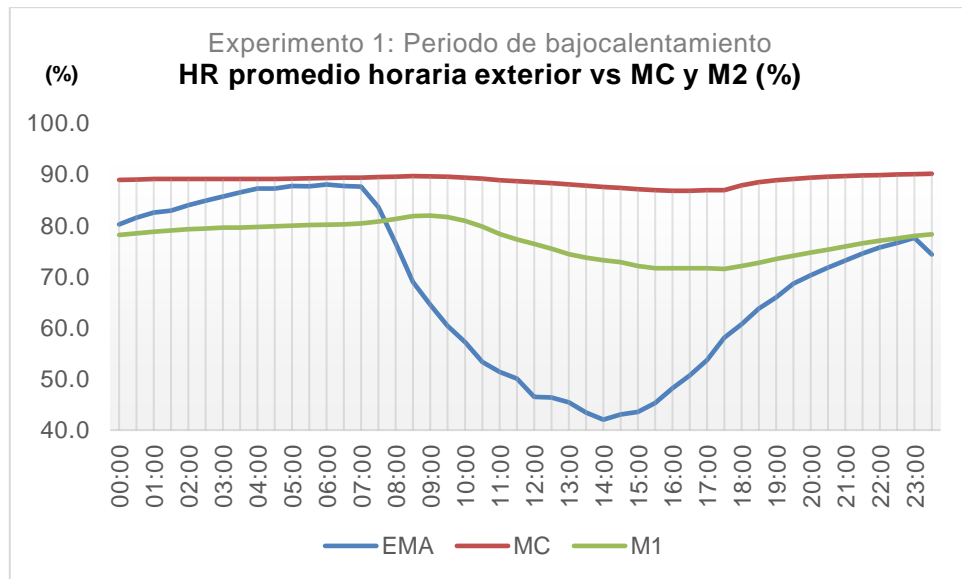


Fig. 6-6 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M2 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

d) Módulo 3: Enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica (ERN y MT)

El M3 presentó una TBS promedio de 24.1 °C, una mínima de 22.6 °C y máxima de 25.8 °C. La temperatura promedio del M3 decreció en 0.9 K con respecto al MC y 2.5 K del exterior.

La oscilación térmica (Fig. 6-7) presentó un retardo en el incremento de temperatura siendo este hasta las 8:00 hrs, dos horas más tarde que la temperatura exterior y una después que la del MC.

La HR promedio del M3 fue de 68.2%, la mínima de 62% y la máxima de 73.3%. Representa una disminución de 20.6%, con respecto al MC, la mayor reducción entre todos los módulos experimentales (Gráfica 6.8). Presentó el menor registro a las 17:00 hrs (62%) y el mayor a las 8:00 am (73.3%)

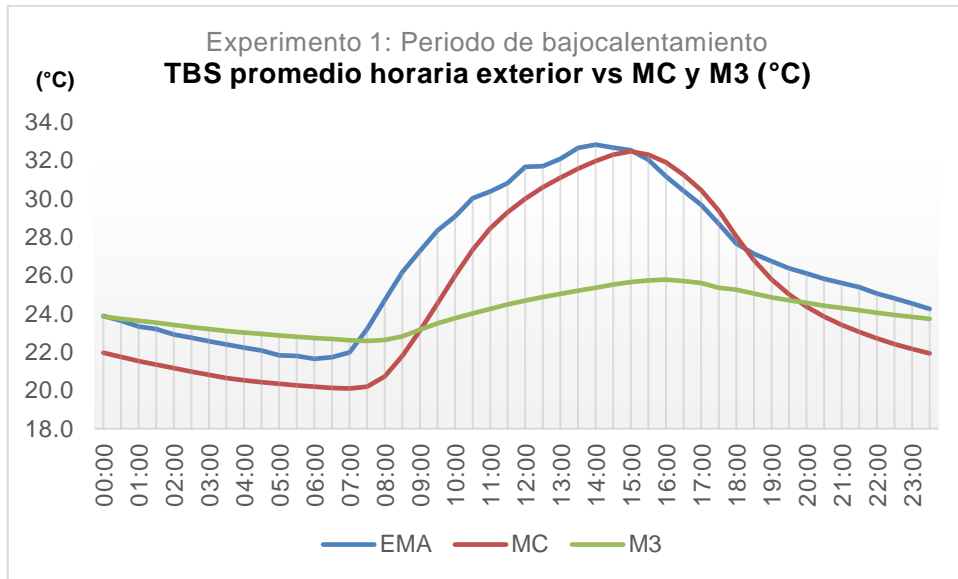


Fig. 6-7 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M3 del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente elaboración propia.

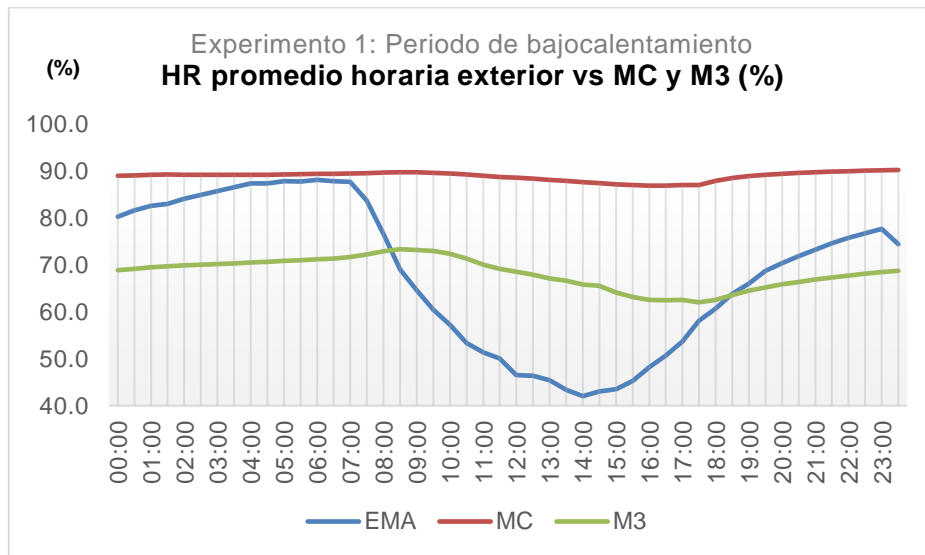


Fig. 6-8 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M3 del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente elaboración propia.

- e) Módulo 4: Enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (EEI, MT y PS)

El M4 presentó una TBS promedio de 23.3 °C, una máxima de 26.2 °C y una mínima de 21.0 °C. El valor promedio representa la disminución de 1.7 K con respecto al MC y 3.3 K al de la temperatura exterior. La oscilación disminuyó siguiendo la curva de tendencia del MC y la EMA (Gráfica 6.9).

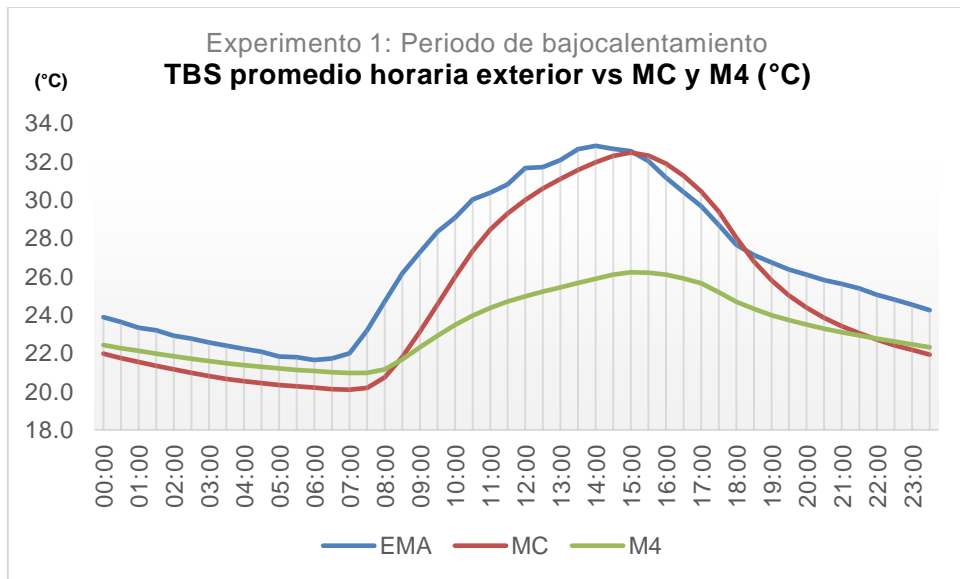


Fig. 6-9 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M4 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

La HR promedio en el M4 fue de 75.7%, valor que indica una reducción del 13.1% con respecto al MC y 0.4% con respecto a la temperatura exterior. La oscilación térmica disminuyó presentando una variabilidad de 11% durante el periodo de mayor ganancia térmica (Fig. 6-10).

- f) Módulo 5: Enfriamiento radiativo nocturno, enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (ERN, EEI, MT y PS)

En el M5 la TBS promedio fue de 22.5 °C, presentando una máxima de 24.8 °C y una mínima de 20.6 °C. De acuerdo con los datos del MC, el M5 redujo su temperatura en 2.5 K, siendo el sistema de mayor eficiencia. La oscilación térmica disminuyó de 10 K a 2 K (Fig. 6-11).

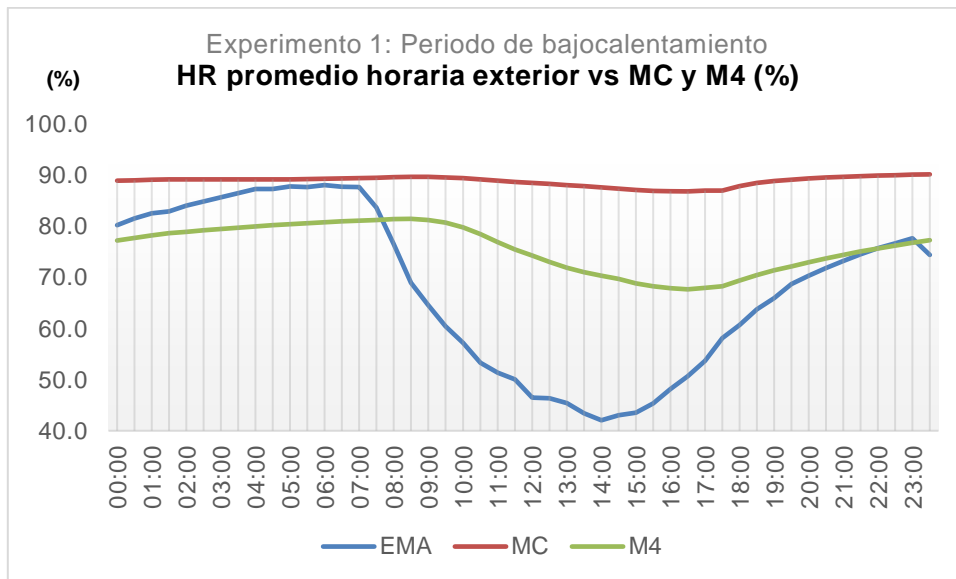


Fig. 6-10 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M4 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

La HR promedio del M5 fue de 75.4%, con una máxima de 78.6% y una mínima de 71%. Respecto a los datos del MC se describe que el M5 presenta un decremento de 13.4%. La oscilación térmica (Fig. 6-12) disminuyó en 7% durante la hora de mayor ganancia térmica.

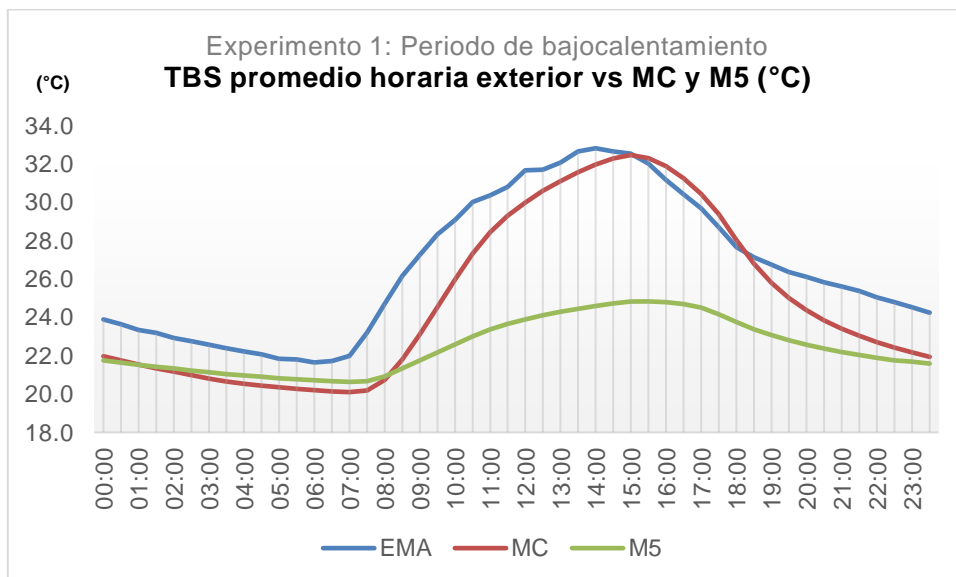


Fig. 6-11 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M5 del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

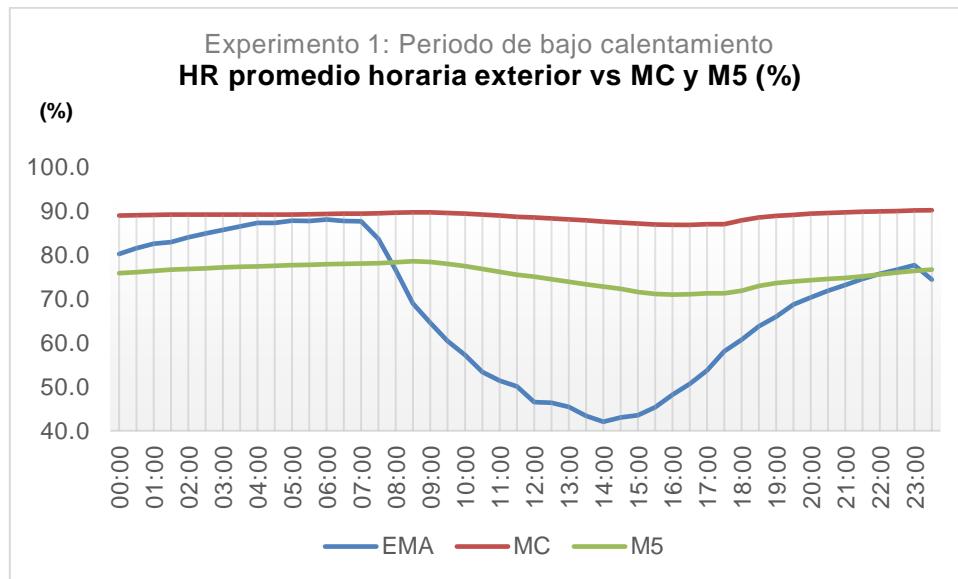


Fig. 6-12 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, MC y M5 del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente elaboración propia.

A continuación, se muestra la tabla resumen de resultados en donde se condensan los valores de TBS y HR promedio de la EMA, el MC y los módulos experimentales (Tabla 6-1).

Tabla 6-1 Tabla resumen de resultados del experimento 1 en el periodo de bajo calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

EXPERIMENTO 1 / PERIODO BAJO CALENTAMIENTO / RESUMEN DE RESULTADOS								
FACTOR	U	VALORES AL INTERIOR DE LOS MÓDULOS						
		EMA	MC	M1	M2	M3	M4	M5
TBS Promedio	°C	26.6	25.0	23.4	23.4	24.1	23.3	22.5
TBS Mínima	°C	21.6	20.1	21.0	21.1	22.6	21.0	20.6
TBS Máxima	°C	32.8	32.5	26.5	26.3	25.8	26.2	24.8
HR Promedio	%	68.1	88.8	77.1	70.0	68.2	75.7	75.4
HR Mínima	%	42.0	86.8	71.5	63.8	62.0	67.7	71.0
HR Máxima	%	88.0	90.1	82.0	75.1	73.3	81.4	78.6
Reducción de TBS promedio K (Temp Exterior Vs Módulos)				3.2	3.1	2.5	3.3	4.1
Reducción de TBS promedio K (MC vs Módulos)				1.6	1.5	0.9	1.7	2.5
Reducción de HR promedio % (MC vs Módulos)				11.8	18.8	20.6	13.1	13.4
Reducción de HR promedio % (Temp Exterior Vs Módulos)				-9.0	-1.9	-0.1	0.4	-2.9

De acuerdo con los resultados del experimento (Fig. 6-13), los cinco módulos registraron una reducción de la TBS al interior de un espacio.

El M3, (ERN y MT) registró una reducción de la TBS hasta en 0.9 K con respecto al MC, lo que representa el sistema. con “menor eficiencia” en un análisis por temperatura. El M2 (MT + AT) redujo en promedio 1.5 K, el M1 (EEI y PS) disminuyó la temperatura en 1.6 K, el M4 (EEI, MT y PS) en 1.7 K y finalmente, el M5 (ERN, EEI, MT y PS) es el sistema más eficiente, en donde la TBS se redujo en 2.5 K. El M5, que posee la mayor cantidad de estrategias de enfriamiento, es aquel que presentó el mejor rendimiento durante el periodo de bajo calentamiento.

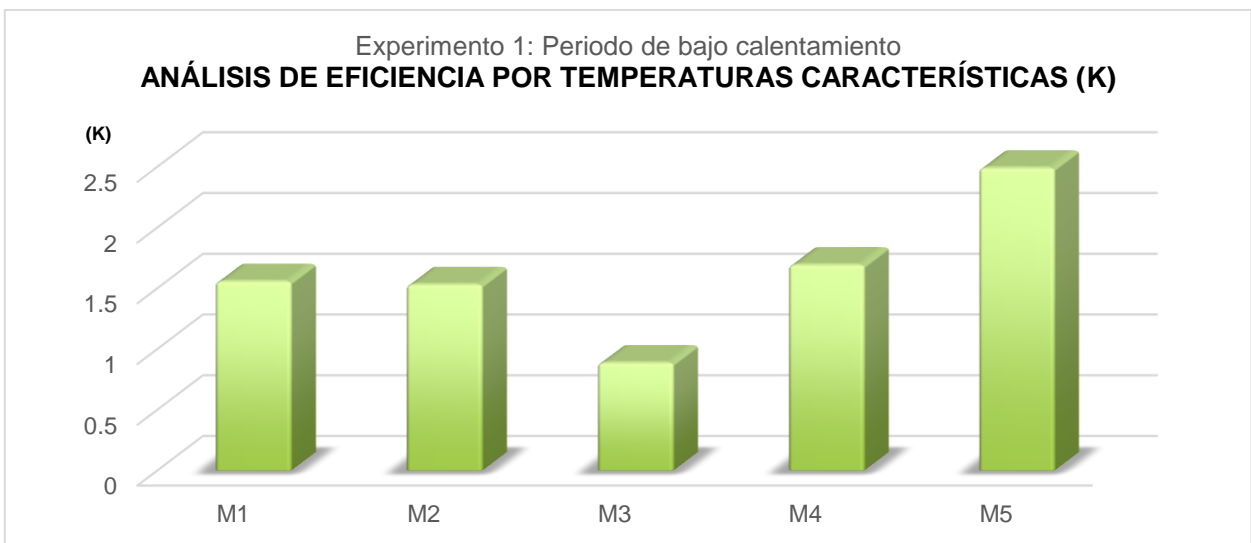


Fig. 6-13 Gráfica de análisis de eficiencia por temperaturas características del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente elaboración propia.

Es posible determinar un retardo térmico de una hora en todos los experimentos desde el MC (Fig. 6-14) hasta el M5. Los ME que poseen estrategias de enfriamiento, presentaron una oscilación menor que el MC y la EMA.

Los valores de HR en todos los módulos (al igual que en la TBS) presentaron una oscilación térmica menor que al de la EMA y al MC (Fig. 6-15), en donde la curva de decremento se localizó de las 8:00 hrs a las 18:00 hrs.

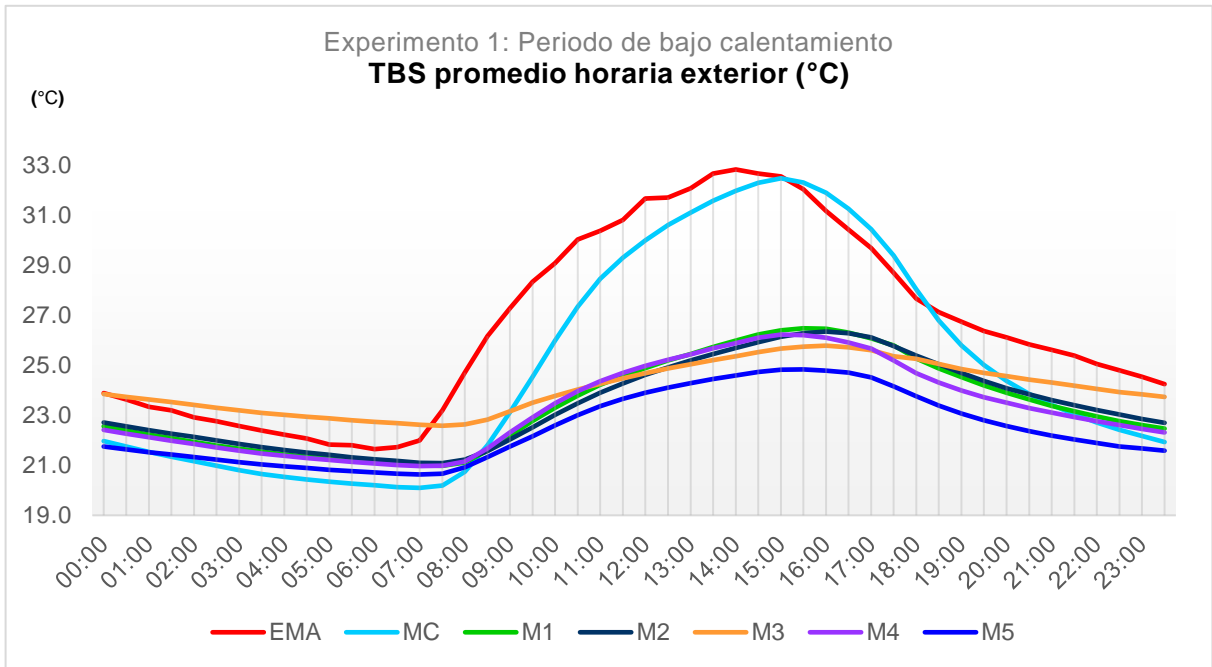


Fig. 6-14 Gráfica de comportamiento de TBS horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente elaboración propia.

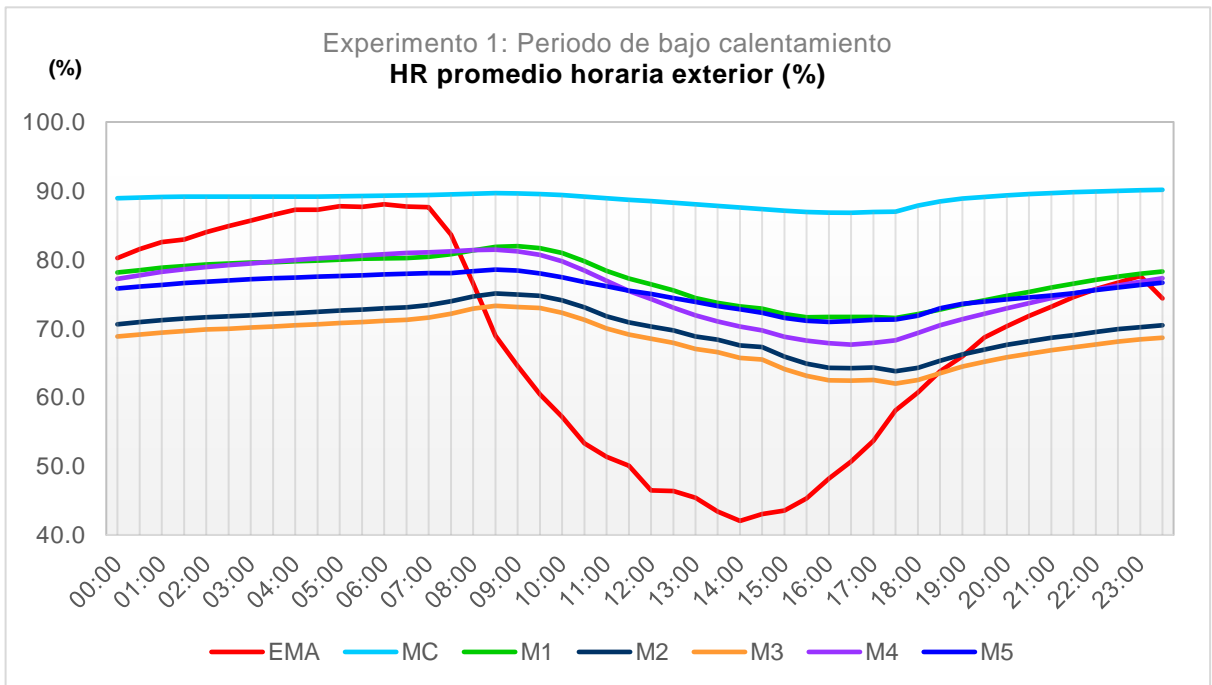


Fig. 6-15 Gráfica de comportamiento de HR horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente elaboración propia.

6.1.1.2 Análisis del PEM

El potencial de enfriamiento medio, de acuerdo con González (1997) es “la cantidad de energía por unidad de tiempo y de superficie, capaz de ser retirada por el sistema, obtenida como valor medio durante un periodo de 24 horas”, lo que representa el “enfriamiento efectivo” y en este caso se comparó con la temperatura media del MC.

Se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$PEM = CPC \times (T_m \text{ control} - T_m \text{ experimental}) \times 24h / A \dots\dots\dots 1$$

A continuación, se muestran los resultados del potencial de enfriamiento medio de cada módulo experimental (Tabla 6-2) (Fig. 6-16).

Tabla 6-2 Resumen de resultados del PEM para cada módulo del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

CÁLCULO PEM		
PEM = U X (Tm control - Tm experimental) x 24 / A		
U=	1.32	W/m . °C
A techo=	0.64	m ²
A paredes =	1.504	m ²
PERIODO DE BAJOCALENTAMIENTO		
Tm control	25 °C	
CPC =	1.98528	
Módulo	Tm exp (°C)	PEM (Wh/m2 dia)
1	23.4	119.1
2	23.4	119.1
3	24.1	67.0
4	23.3	126.6
5	22.5	186.1

El M1 y M2 debido a la pequeña diferencia en sus temperaturas promedio presentan un potencial de enfriamiento medio de 119.1 Wh/m2 dia. El M3 tiene un PEM de 67 Wh/m2 dia, mientras que

en el M4 se observa de 126.6 Wh/m² día. Finalmente, el M5, módulo con el mayor número de estrategias de enfriamiento, presenta un PEM de 186.1 Wh/m² día.

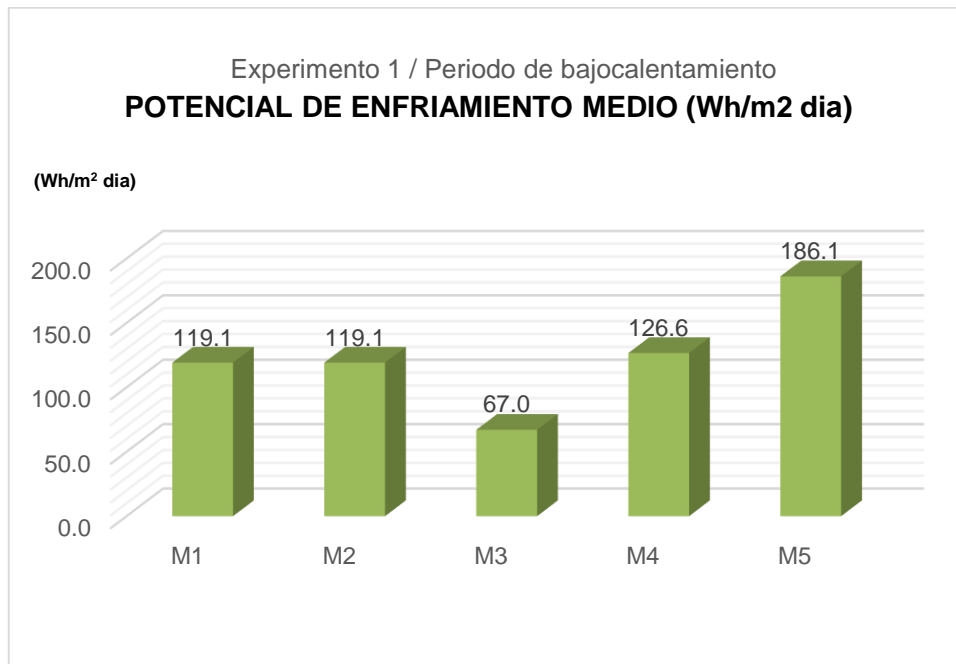


Fig. 6-16 Gráfica de potencial de enfriamiento media del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.3 Análisis de confort térmico

El análisis de confort térmico se realizó con rango de 5 K y 7 K, en este caso (Tabla 6-3):

Tabla 6-3 Valores empleados para análisis de confort térmico en periodo de bajocalentamiento. Fuente:

Elab

VALORES DE TEMPERATURA NEUTRA PARA EL PERIODO DE BAJO CALENTAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉRIDA

Temperatura media del mes más frío = 24.0 °C			
Temperatura neutra = 17.6 + (0.31 x Temperatura de diseño)			
Tn periodo bajocalentamiento = 25.04 °C			
5K		7K	
Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior
27.54	22.54	28.54	21.54

En la siguiente gráfica (Fig. 6-17) se aprecia en color naranja la zona de confort que muestra los límites máximos y mínimos de acuerdo con el cálculo de la temperatura neutra en BC para un rango de 5 K.

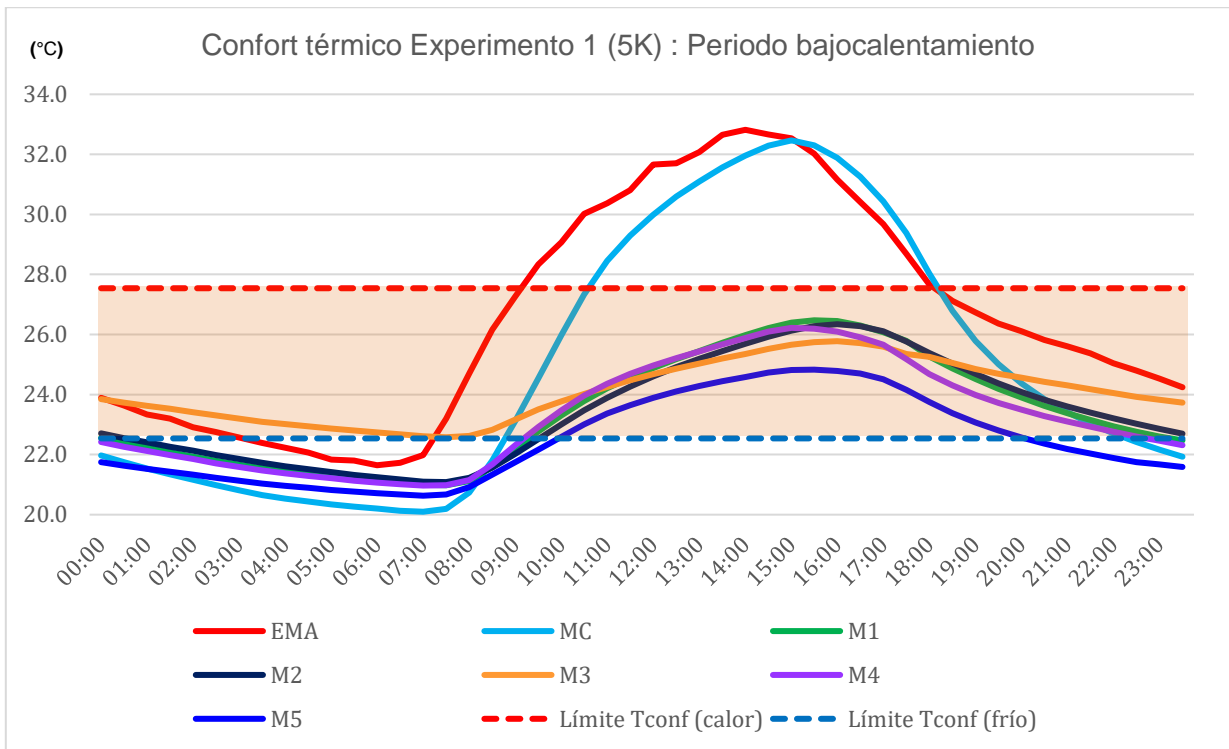


Fig. 6-17 Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (5 K).
Fuente: Elaboración propia.

En el periodo de bajo calentamiento, es posible afirmar que los cinco sistemas de enfriamiento cumplen la función en el lapso crítico horario representado de las 9:00 hrs a las 20:00 hrs. Por otra parte, en los cinco sistemas existe un periodo de temperaturas inferiores a las de confort de las 0.00 hrs a las 8.00 hrs aproximadamente, sin embargo, es posible considerar un nivel de arropamiento mayor debido a que son horas dedicadas a dormir.

A continuación, se muestran los porcentajes de confort específicos para cada ME, así como los horarios en los que se desarrollan (Fig. 6-18 y Tabla 6-4):

El M1 presenta un porcentaje de confort del 63% de 9:30 hrs a las 23:30 hrs. El periodo restante de las 00:00 hrs a las 9:00 hrs se interpreta como sensación térmica fría, es decir, por debajo de los 22.54 °C.

Tabla 6-4 Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de bajocalentamiento (5 K).
Fuente: Elaboración propia.

CONFORT TÉRMICO EXPERIMENTO 1: PERIODO DE BAJOCALENTAMIENTO (5K)																																															
MÓDULO 1																																															
FRÍO (37.0%)												CONFORT (63.0%)																																			
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												CONFORT												CALOR																							
37.0%												63.0%												0%																							
MÓDULO 2																																															
FRÍO (35.0%)												CONFORT (65.0%)												FRÍO																							
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												CONFORT												CALOR																							
35.0%												65.0%												0%																							
MÓDULO 3																																															
CONFORT (100%)																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO																																															
0.0%																																															
CONFORT																																															
100.0%																																															
CALOR																																															
0%																																															
MÓDULO 4																																															
FRÍO (43.0%)												CONFORT (57.0%)												FRÍO																							
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												CONFORT												CALOR																							
43.0%												57.0%												0%																							
MÓDULO 5																																															
FRÍO (50.0%)												CONFORT (50.0%)												FRÍO																							
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												CONFORT												CALOR																							
50.0%												50.0%												0%																							

El M2, es similar al M1, su porcentaje de confort es de 65% abarcando de 8:00 hrs a las 20:30 hrs. Se presenta un porcentaje fuera de la zona de confort “frío” del 35% de las 21:00 hrs a las 8:30 hrs.

En el caso del M3 (ERN y MT), el porcentaje de confort es del 100% durante la jornada promedio.

El M4, presenta condiciones de confort en un 57% de las 9:00 hrs a las 22:00 hrs e indica un periodo frío del 43% durante 10.5 horas.

Por último, el M5 se encuentra en confort durante once y media horas, de las 10:00 hrs a las 21:30 hrs indicando un porcentaje del 50% y el porcentaje fuera de la zona de confort es, de igual manera 50%.

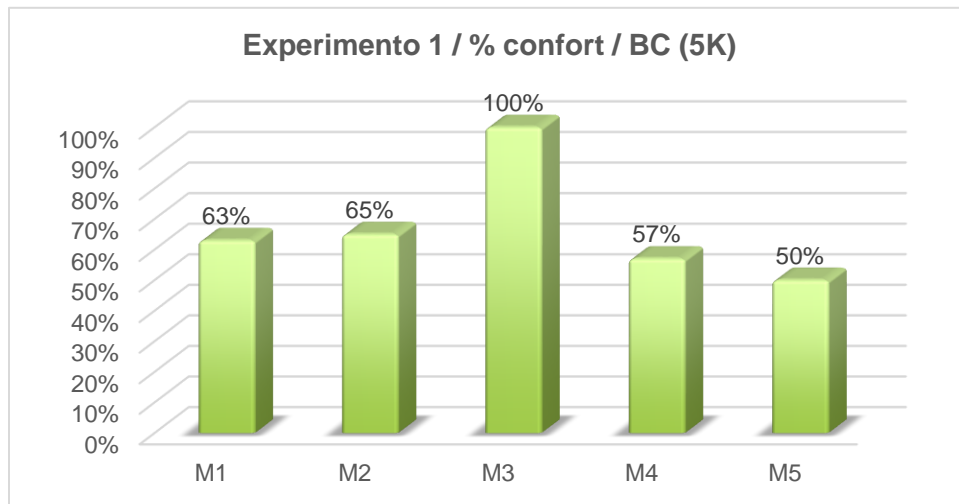


Fig. 6-18 Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (5K). Fuente: Elaboración propia.

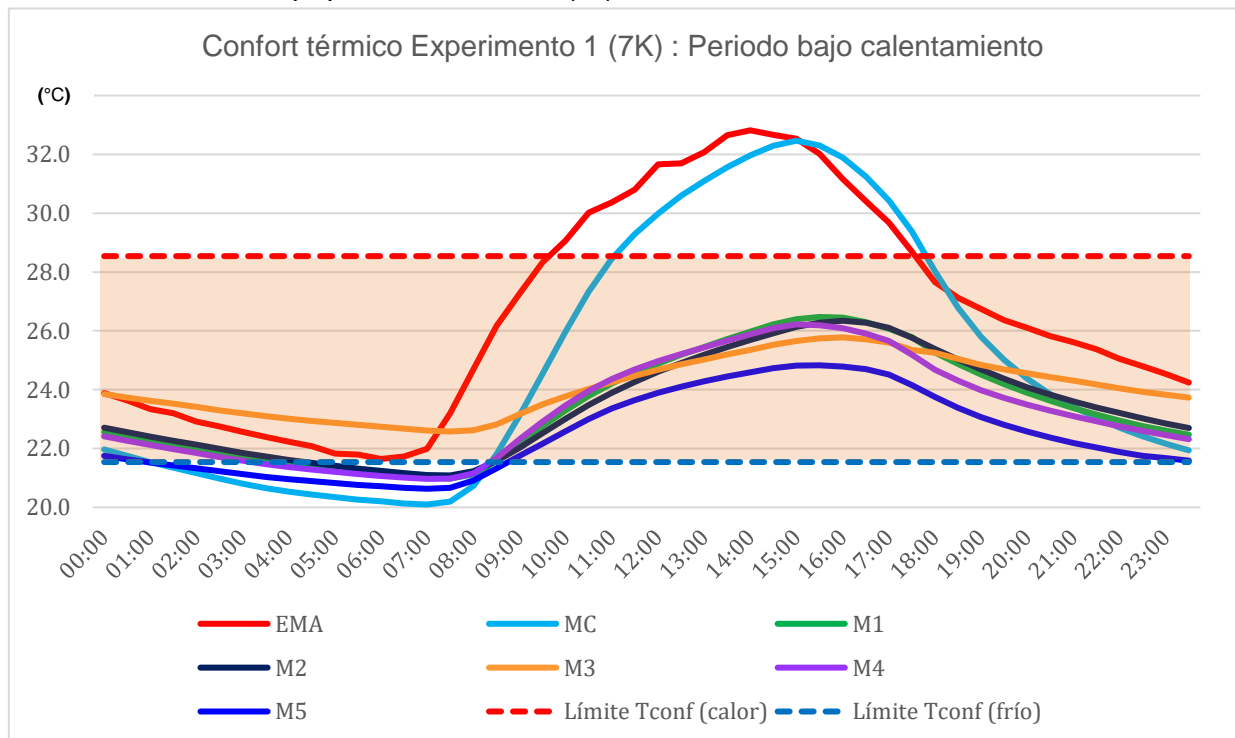


Fig. 6-19 Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (5 K). Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente gráfica (Fig. 6-19) se aprecia en color naranja la zona de confort que muestra los límites máximos y mínimos de acuerdo con el cálculo de la temperatura neutra en BC para un rango de 7 K.

En el periodo de bajo calentamiento, , en los cinco sistemas existe un periodo de temperaturas inferiores a las de confort de la 1.00 hrs a las 8.00 hrs aproximadamente. Por otra parte, es posible afirmar que los cinco sistemas de enfriamiento cumplen la función en el lapso crítico horario representado de las 9:00 hrs a la 23:00 hrs.

A continuación, se muestran los porcentajes de confort específicos a cada ME, así como los horarios en los que se desarrollan (Fig. 6-20 y Tabla 6-5):

El M1 presenta un porcentaje de confort del 82% de 8:30 hrs a las 3:30 hrs. El periodo restante de las 4:00 hrs a las 8:00 hrs se interpreta como sensación térmica fría, es decir, por debajo de los 21.54 °C.

El M2, es similar al M1, su porcentaje de confort es de 84% abarcando de 9:00 hrs a las 4:30 hrs. Se presenta un porcentaje fuera de la zona de confort “frío” del 16% de las 5:00 hrs a las 8:30 hrs.

En el caso del M3 (ERN y MT), el porcentaje de confort es del 100% durante la jornada promedio.

El M4, presenta condiciones de confort en un 82% de las 8:30 hrs a las 3:30 hrs e indica un periodo frío del 18% durante 4.5 horas.

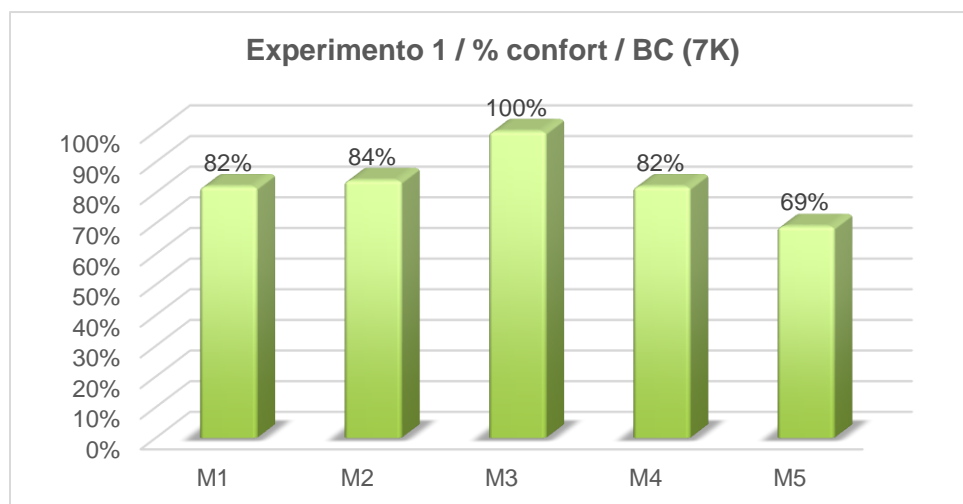


Fig. 6-20 Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de bajo calentamiento (7K). Fuente: Elaboración propia.

Por último, el M5 se encuentra en confort durante dieciséis y media horas, de las 9:00 hrs a las 1:00 hrs, indicando un porcentaje del 69% y el porcentaje fuera de la zona de confort es de 31%.

Tabla 6-5 Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de bajocalentamiento (7 K).
Fuente: Elaboración propia.

CONFORT TÉRMICO EXPERIMENTO 1: PERIODO DE BAJOCALENTAMIENTO (7K)																																															
MÓDULO 1																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO (18.0%)									CONFORT (82.0%)																																						
FRÍO									18.0%																																						
CONFORT									82.0%																																						
CALOR									0%																																						
MÓDULO 2																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO (16.0%)										CONFORT (84.0%)																																					
FRÍO										16.0%																																					
CONFORT										84.0%																																					
CALOR										0%																																					
MÓDULO 3																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
CONFORT (100.0%)																																															
FRÍO																																															
0.0%																																															
CONFORT																																															
100.0%																																															
CALOR																																															
0%																																															
MÓDULO 4																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO (18.0%)									CONFORT (82.0%)																																						
FRÍO									18.0%																																						
CONFORT									82.0%																																						
CALOR									0%																																						
MÓDULO 5																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO (31.0%)														CONFORT (69.0%)																																	
FRÍO														31.0%																																	
CONFORT														69.0%																																	
CALOR														0%																																	

De acuerdo con el PEM y el análisis de temperaturas características, el M5 es el que mejor desempeño mostró, ya que redujo la TBS hasta en 2.5 K, sin embargo, en el análisis de porcentaje de confort para el periodo de bajocalentamiento, se determinó que el M3 es el sistema más eficiente para cubrir las necesidades del usuario.

6.1.2 Periodo de sobrecalentamiento

El periodo de prueba se realizó del 25 de mayo al 9 de junio. Presentó condiciones de temperatura promedio mínima de 26.9 °C y máxima de 37.7 °C. La humedad relativa promedio mínima fue de 43.5% y máxima de 95.4%. No se registraron lluvias y se presentó una radiación solar promedio de 880.4 W/m² con cielo despejado.

6.1.2.1 Análisis de temperaturas características

a) Módulo de control (MC)

El módulo de control durante el experimento presentó una TBS mínima de 25.6 °C, máxima de 38.6°C y promedio de 31.3 °C, en comparación con la EMA en donde se registró una temperatura mínima de 25.4 °C, máxima de 36.2 °C y promedio de 30.3°C. Se infiere que la temperatura, por efecto del sistema adiabático y los materiales aislantes empleados, se redujo en 0.5 K, 1.1 K menor a la diferencia obtenida en el periodo de bajo calentamiento. La temperatura mínima en la curva de oscilación horaria se desplazó una hora con respecto a la de la EMA (Fig. 6-21) sin embargo presenta una diferencia de 2 K en el punto máximo en comparación a la TBS exterior.

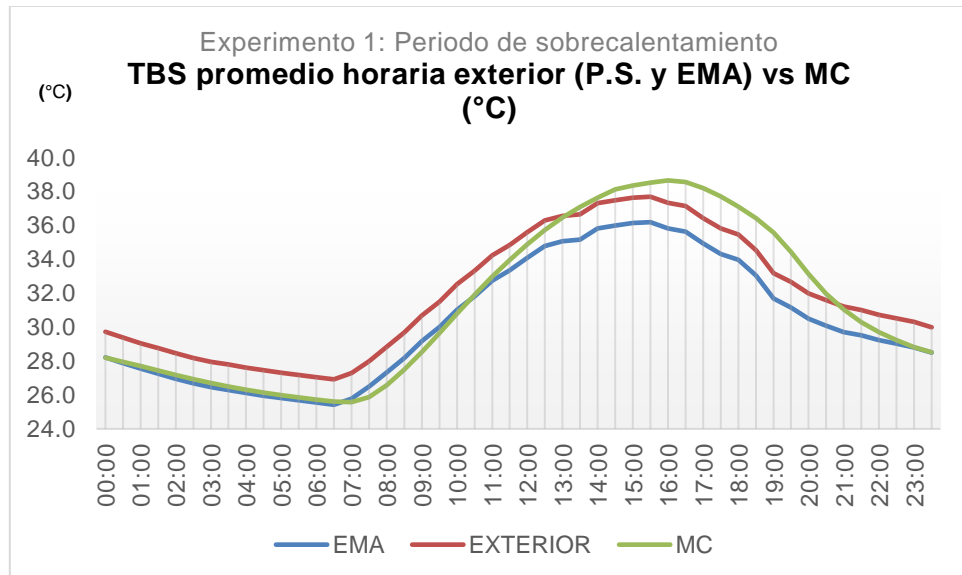


Fig. 6-21 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S. y el MC del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

La humedad relativa al interior del MC (Fig. 6-22) presenta un valor promedio de 57.4%, lo que representa una disminución de 11.4% con respecto a la HR exterior. En la oscilación se observa una reducción de aproximadamente 20% a las 6:00 hrs, mientras que a las 15:00 hrs la curva exterior y la del MC son similares.

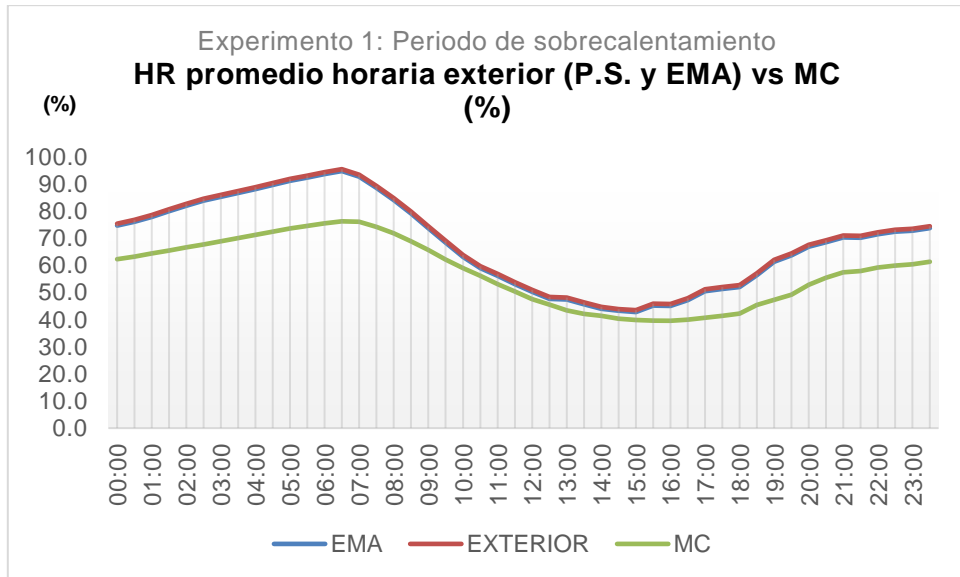


Fig. 6-22 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S y el MC del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

b) Módulo 1: Enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar (EEI y PS)

El M1 presentó una TBS promedio de 29.3 °C, con una máxima de 32.2 °C y mínima de 26.7 °C (Fig. 6-23). Contrastando con los valores obtenidos en el módulo de control, la temperatura promedio decreció 2 K y 2.5 K, con respecto a la temperatura exterior. La oscilación térmica decreció y la temperatura horaria aumentó una hora después que la temperatura ambiental (7:00 hrs).

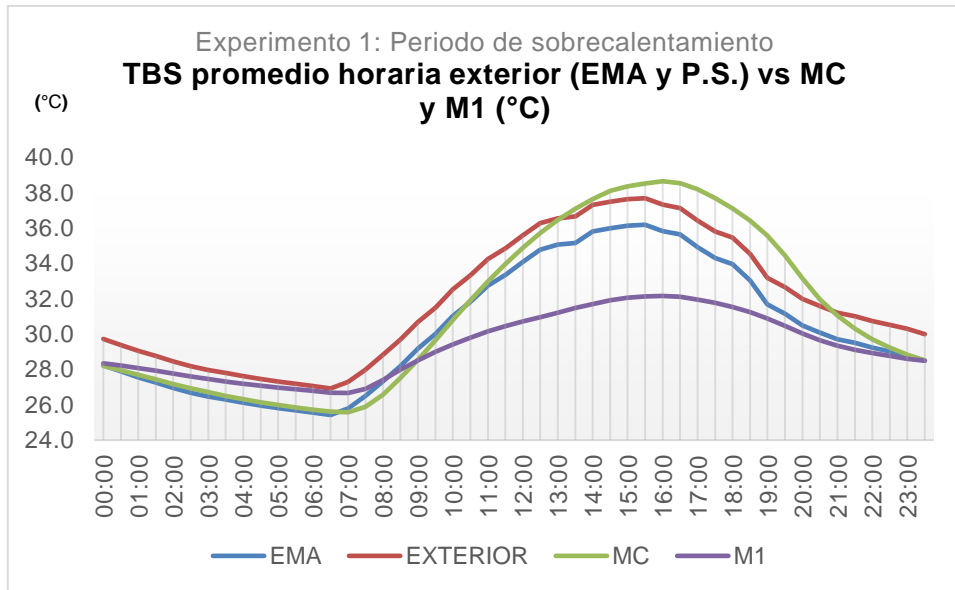


Fig. 6-23 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M1 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

La humedad relativa promedio fue de 53.4% (Fig. 6-24), es decir, 4.1% menor a la HR del MC. La curva de oscilación térmica disminuyó, modificó su amplitud en un rango de 10%.

c) Módulo 2: Masa térmica y aislamiento térmico (MT + AT)

La TBS promedio del M2 se registró de 30.5 °C, lo cual indica una reducción de 0.8 K con respecto al MC y 1.3 K de diferencia del valor promedio de la temperatura exterior. La curva de oscilación térmica (Fig. 6-25) mostró un retardo de una hora al iniciar el incremento de temperatura a las 7:00 hrs.

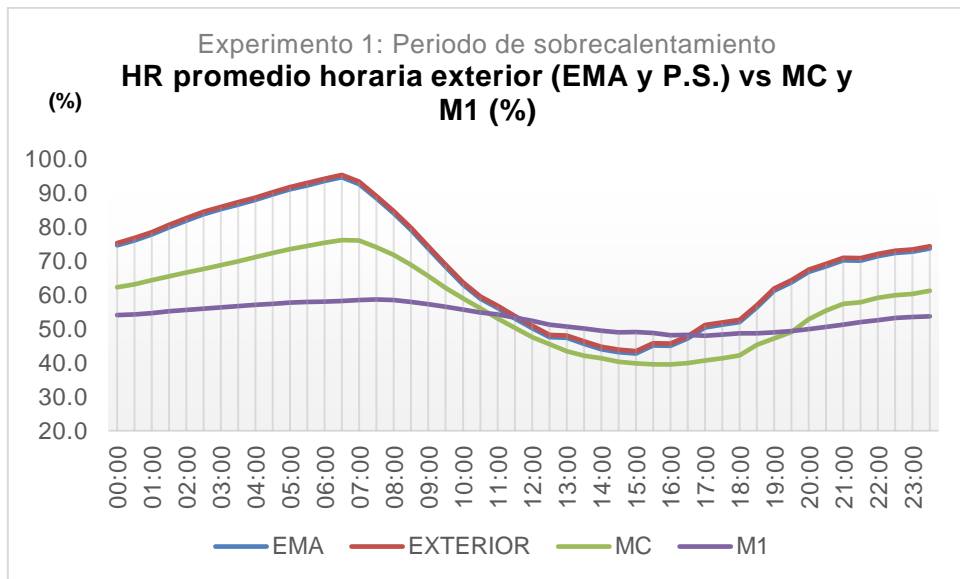


Fig. 6-24 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S, MC y M1 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

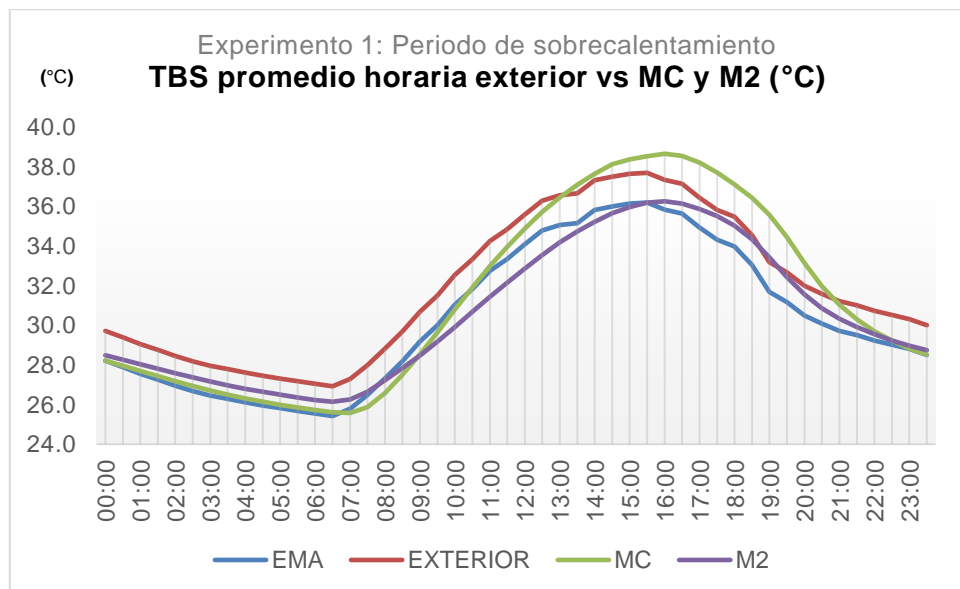


Fig. 6-25 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M2 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

La HR del M2 fue en promedio de 54.4%, con una máxima de 67.5% y una mínima de 40.2%, lo cual representa una disminución de 2.4% con respecto al MC. La oscilación térmica (Fig. 6-26) se redujo en el periodo de inicio de calentamiento en 5%.

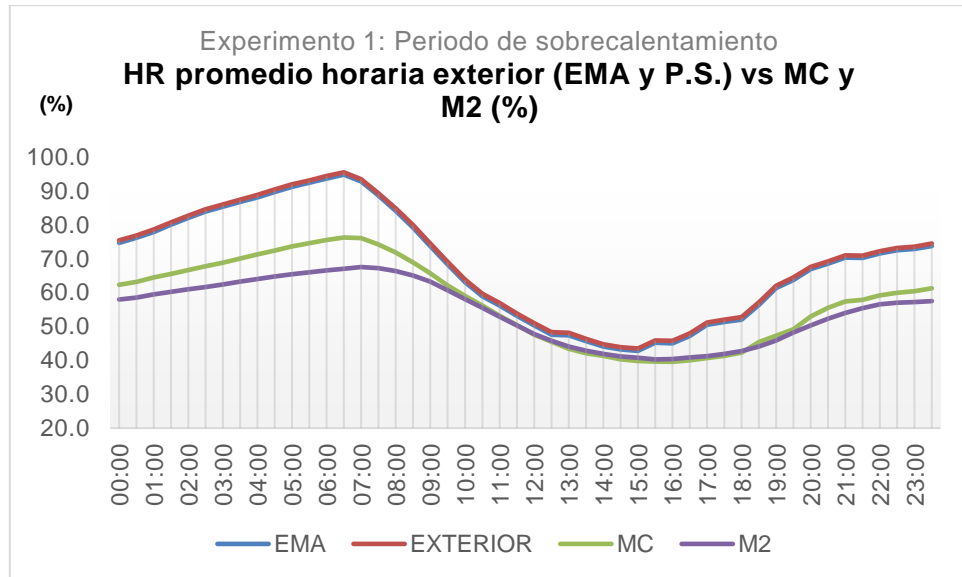


Fig. 6-26 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M2 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

d) Módulo 3: Enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica (ERN y MT)

El M3 presentó una TBS promedio de 30.7 °C, una mínima de 28 °C y máxima de 33.4 °C. La temperatura promedio del M3 decreció en 0.6 K con respecto al MC y 1.1 K a la del exterior.

La oscilación térmica (Fig. 6-27) disminuyó de acuerdo con el comportamiento de la temperatura exterior y del MC. Presentó un retardo en el incremento de temperatura siendo este hasta las 8:00 hrs, dos horas más tarde que la temperatura exterior y una después que la del MC.

La HR promedio del M3 fue de 51.8%, la mínima de 50.8% y la máxima de 52.4%. Representa una disminución de 5.6% con respecto al MC, la mayor reducción entre todos los módulos experimentales (Fig. 6-28).

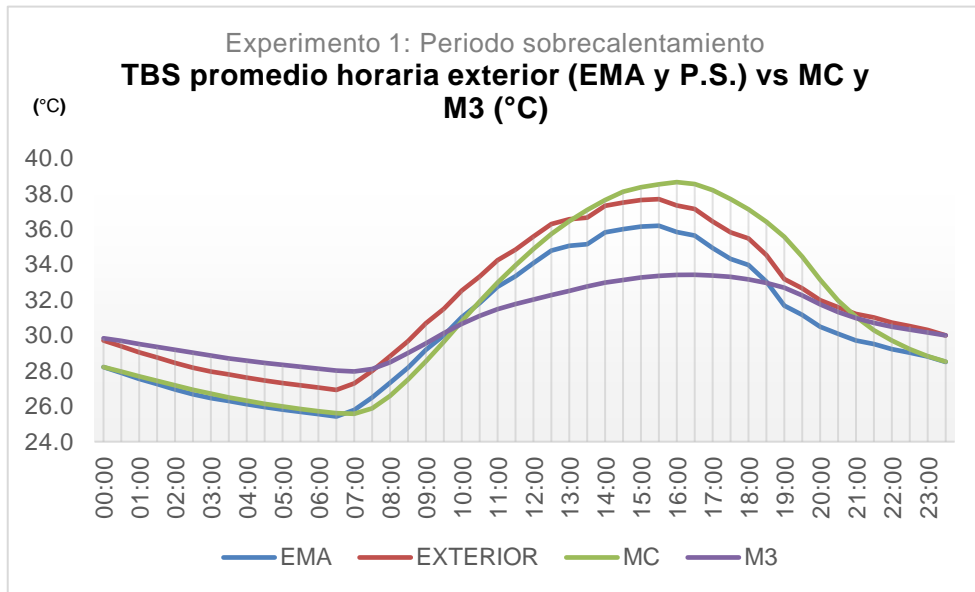


Fig. 6-27 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M3 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

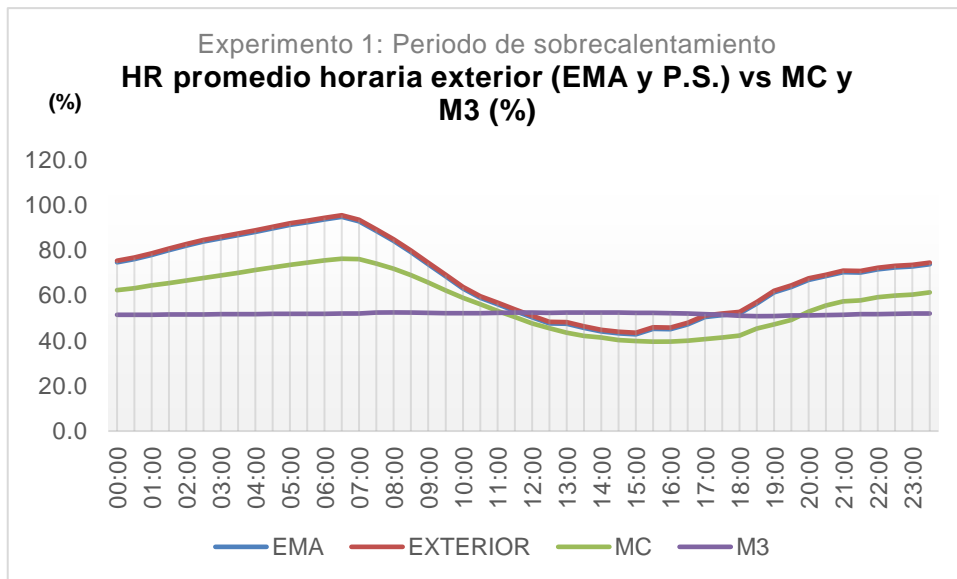


Fig. 6-28 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M3 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

- e) Módulo 4: Enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (EEI, MT y PS)

El M4 presentó una TBS promedio de 28.7°C, una máxima de 31.7 °C y una mínima de 26.1 °C. El valor promedio representa la disminución de 2.6 K con respecto al MC y 3.1 K al de la temperatura exterior. La oscilación disminuyó presentando un pico máximo de temperatura las 17:00 hrs (Fig. 6-29).

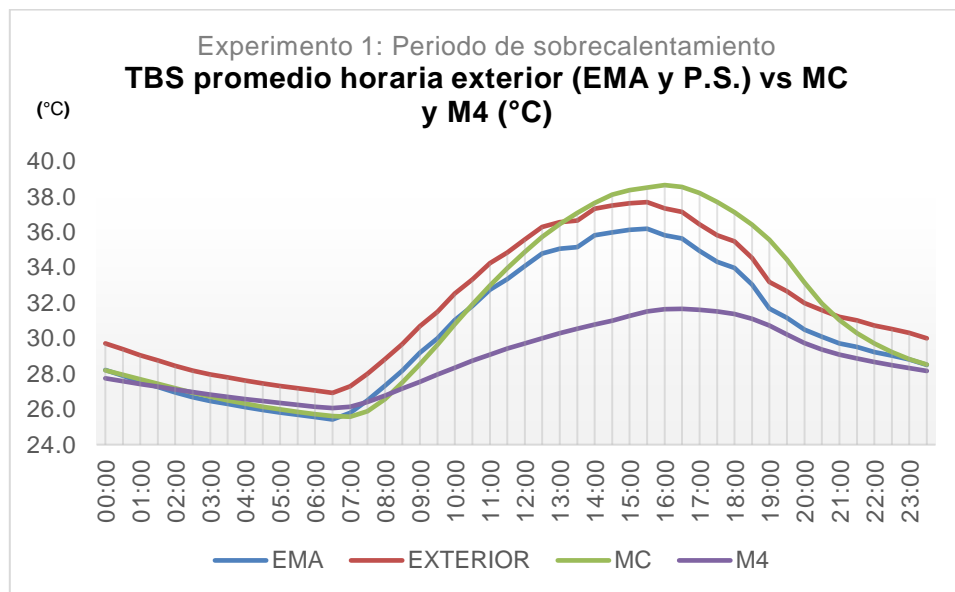


Fig. 6-29 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M4 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

La HR promedio en el M4 fue de 54.1%, valor que indica una reducción del 3.4% con respecto al MC y 18.5% con respecto a la HR exterior. La oscilación térmica disminuyó presentando casi una línea recta (Fig. 6-30).

- f) Módulo 5: Enfriamiento radiativo nocturno, enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar (ERN, EEI, MT y PS)

En el M5 la temperatura promedio fue de 27.6 °C, presentando una máxima de 29.4 °C y una mínima de 26.1 °C. De acuerdo con los datos del MC, el M5 redujo su temperatura en 3.7 K, siendo el sistema de mayor eficiencia. La oscilación térmica disminuyó en 11 K en el punto de mayor calentamiento (Fig. 6-31).

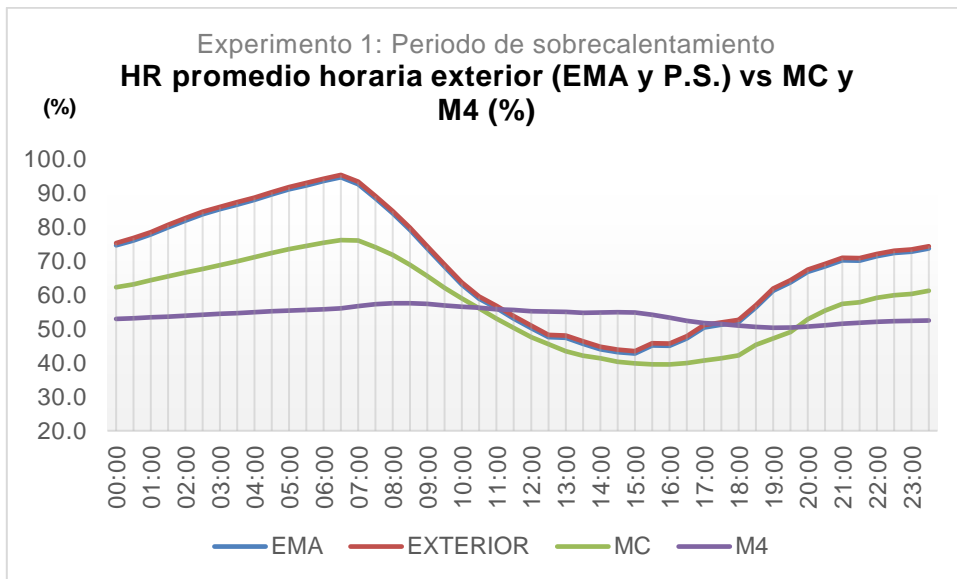


Fig. 6-30 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M4 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

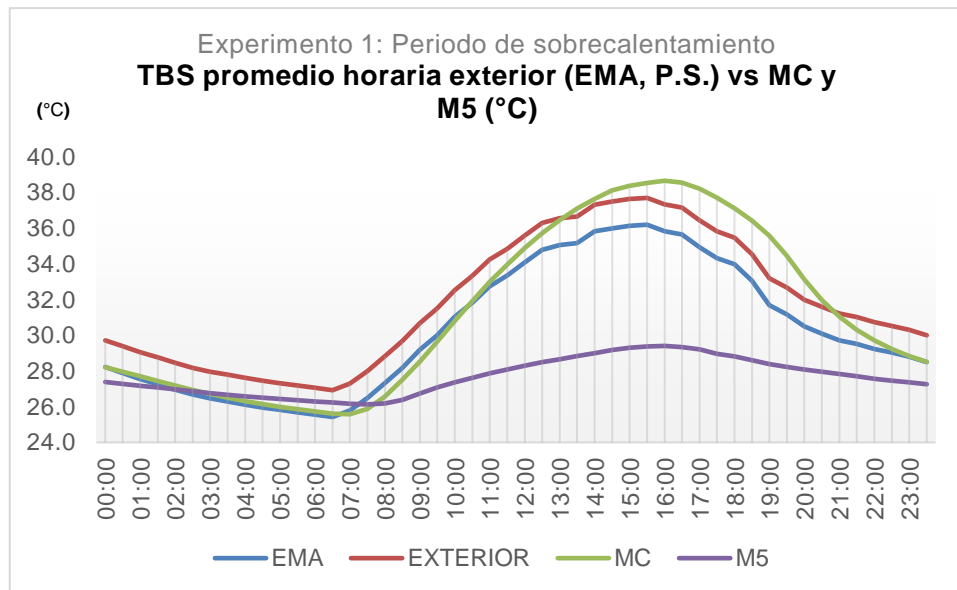


Fig. 6-31 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M5 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

La HR promedio del M5 fue de 57.2%, con una máxima de 83.7% y una mínima de 31.8%. Respecto a los datos del MC se describe que el M5 presenta una reducción de 0.3%. La oscilación térmica (Fig. 6.32) siguió la curva de tendencia del MC.

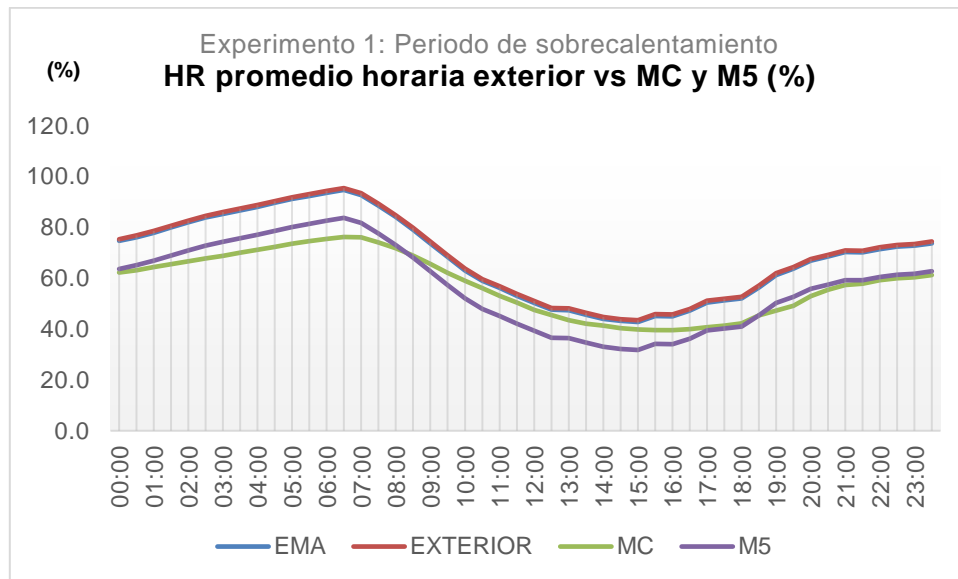


Fig. 6-32 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria de los valores registrados en la EMA, P.S., MC y M5 del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

A continuación, se muestra la tabla resumen de resultados en donde se condensan los valores de TBS y HR promedio de la EMA, el MC y los módulos experimentales (Tabla 6-6).

Tabla 6-6 Tabla resumen de resultados del experimento 1 en el periodo de sobrecalentamiento. Fuente: Elaboración propia.

EXPERIMENTO 1 / PERIODO DE SOBRECALENTAMIENTO / RESUMEN DE RESULTADOS									
PARÁMETRO	Unidades	Valores exteriores			Valores al interior de los módulos				
		EMA	P.S.	MC	M1	M2	M3	M4	M5
TBS Promedio	°C	30.3	31.8	31.3	29.3	30.5	30.7	28.7	27.6
TBS Mínima	°C	25.4	26.9	25.6	26.7	26.1	28.0	26.1	26.1
TBS Máxima	°C	36.2	37.7	38.6	32.2	36.2	33.4	31.7	29.4
HR Promedio	%	68.2	68.9	57.4	53.4	54.4	51.8	54.1	57.2
HR Mínima	%	42.8	43.5	39.5	48.0	40.2	50.8	50.3	31.8
HR Máxima	%	94.7	95.4	76.2	58.7	67.5	52.4	57.6	83.7
Reducción de TBS Promedio (Valores exterior vs Valores módulos), K					2.5	1.3	1.1	3.1	5.5
Reducción de TBS Promedio (MC vs Valores al interior de los módulos), K					2.0	0.8	0.6	2.6	3.7
Reducción de HR (MC vs Módulos), %					4.1	2.4	5.6	3.4	0.3
Reducción de HR (Exterior vs Módulos), %					15.5	14.4	18.1	18.5	37.1

De acuerdo con los resultados del experimento (Fig. 6-33), los cinco módulos permiten reducir la TBS al interior de un espacio.

El M3, (ERN y MT) permite reducir la TBS hasta en 0.6 K con respecto al MC, lo que representa el sistema con “menor eficiencia” en un análisis por temperatura. El M2 (MT + AT) reduce en promedio 0.8 K, el M1 (EEI y PS) decreció la temperatura en 2.0 K, el M4 (EEI, MT y PS) en 2.6 K y finalmente el M5 (ERN, EEI, MT y PS), es el sistema más eficiente, en donde la temperatura se reduce en 3.7 K. El M5, que posee la mayor cantidad de estrategias de enfriamiento, es aquel que presenta el mejor rendimiento durante el periodo de sobrecalentamiento.

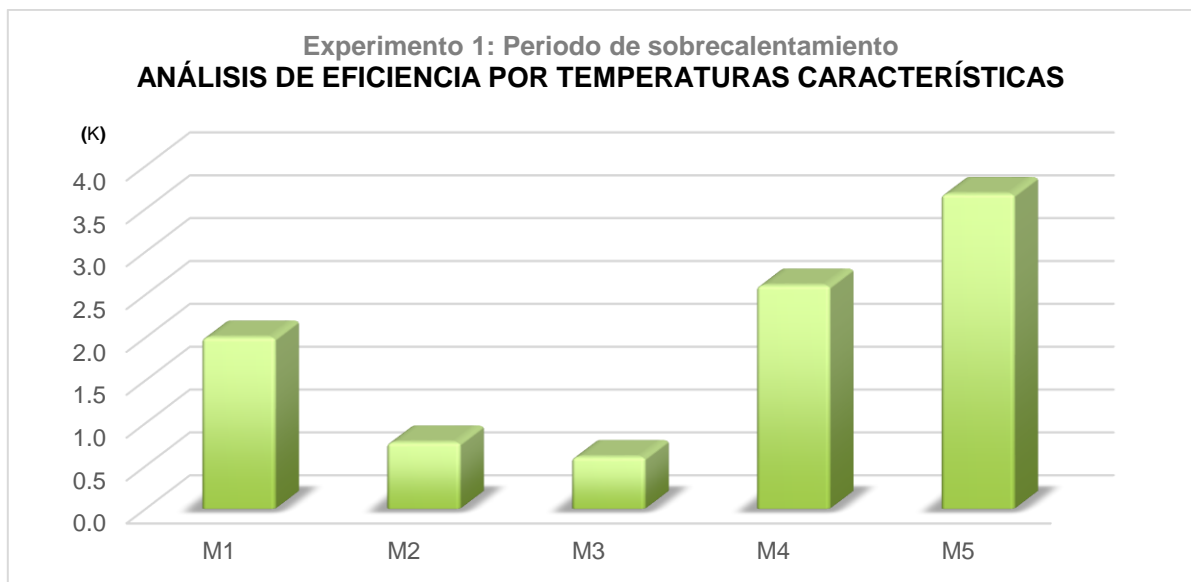


Fig. 6-33 Gráfica de análisis de eficiencia por temperaturas características del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

Los cinco módulos experimentales permiten decrecer la TBS al interior de un espacio, sin embargo, el módulo 5 es el que mejor desempeño presentó, ya que decreció la temperatura promedio en 3.7 K y además disminuyó la oscilación térmica hasta en 11 K durante el mayor periodo de calentamiento (Fig. 6-34).

Los valores de HR en todos los módulos (al igual que en la TBS) presentan una oscilación térmica menor que al de la EMA y al MC (Fig. 6-35). El M1, M3 y M4 tienen un mejor desempeño ya que la curva de oscilación se transforma casi es una línea recta.

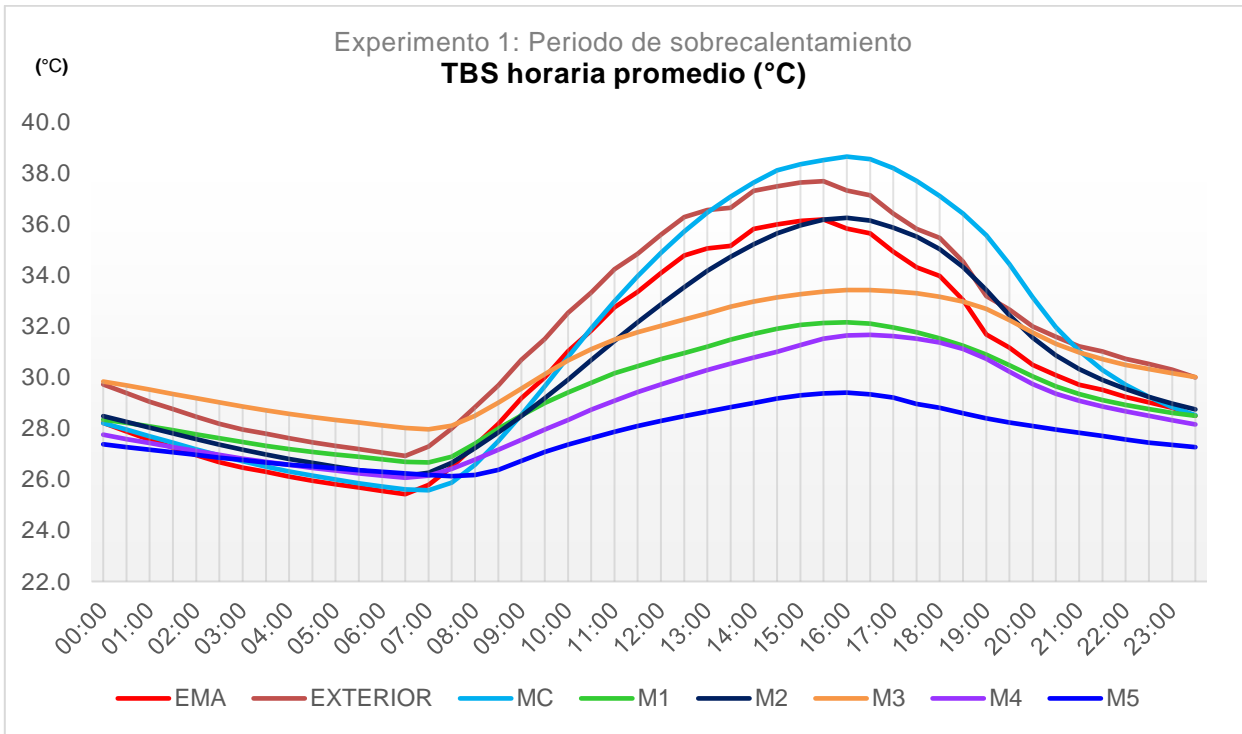


Fig. 6-34 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

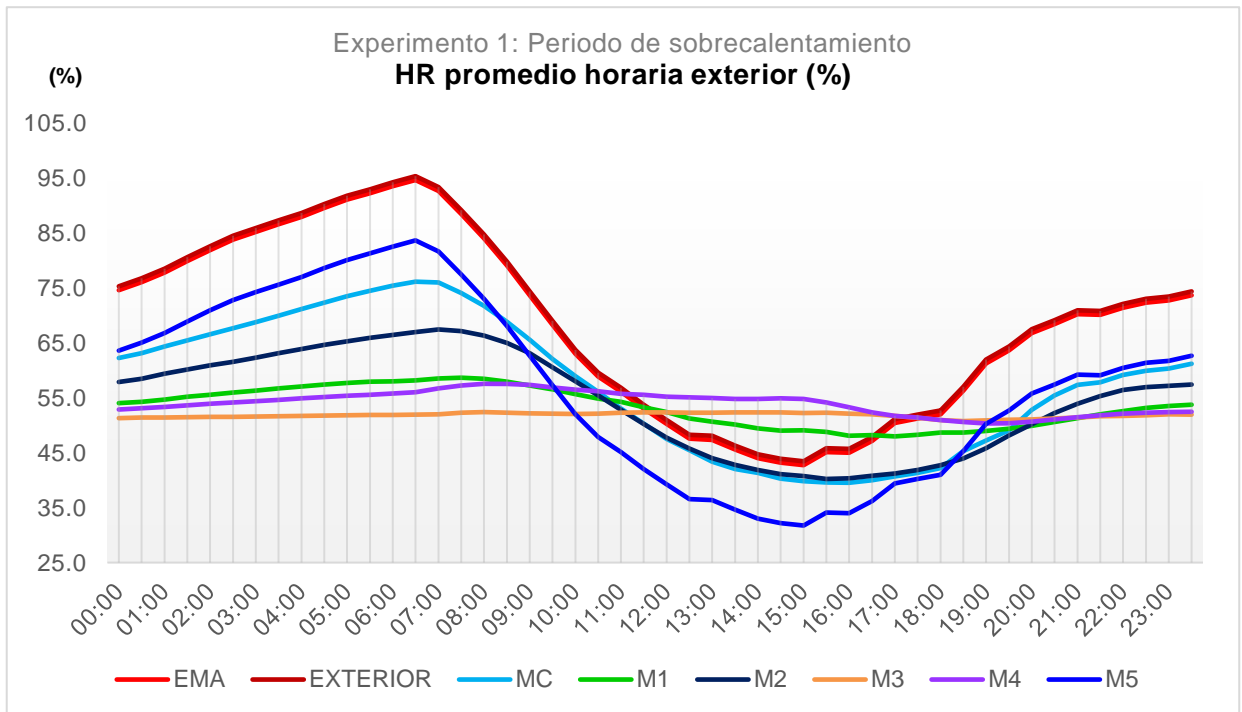


Fig. 6-35 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

6.1.2.2 Análisis del PEM

Debido a que el PEM representa el “enfriamiento efectivo” se realiza el siguiente análisis para conocer el sistema que retira la mayor cantidad de energía por m² (Tabla 6-7).

Tabla 6-7 Resumen de resultados del PEM para cada módulo del experimento 1 en periodo de sobre calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

CÁLCULO PEM		
PEM = U X (Tm control - Tm experimental) x 24 / A		
U=	1.32	W/m . °C
A techo=	0.64	m ²
A paredes =	1.504	m ²
PERIODO DE SOBRECALENTAMIENTO		
Tm control	31.3	°C
CPC =	1.98528	
Módulo	Tm exp (°C)	PEM (Wh/m2 dia)
1	29.3	147.1
2	30.5	55.9
3	30.7	43.3
4	28.7	192.2
5	27.6	275.5

El M3 presentó el menor PEM con 43.3 Wh/m2 dia, en el M2 se observa una cantidad de 55.9 Wh/m2 dia, posteriormente el M1 retiró 147.1 Wh/m2 dia. El M4 presentó una mejor eficiencia con 192.2 Wh/m2 dia y finalmente el M5, al igual que en la prueba anterior, es el que mejor desempeño mostró al ser capaz de retirar hasta 275.5 Wh/m2 dia (Fig. 6-36).

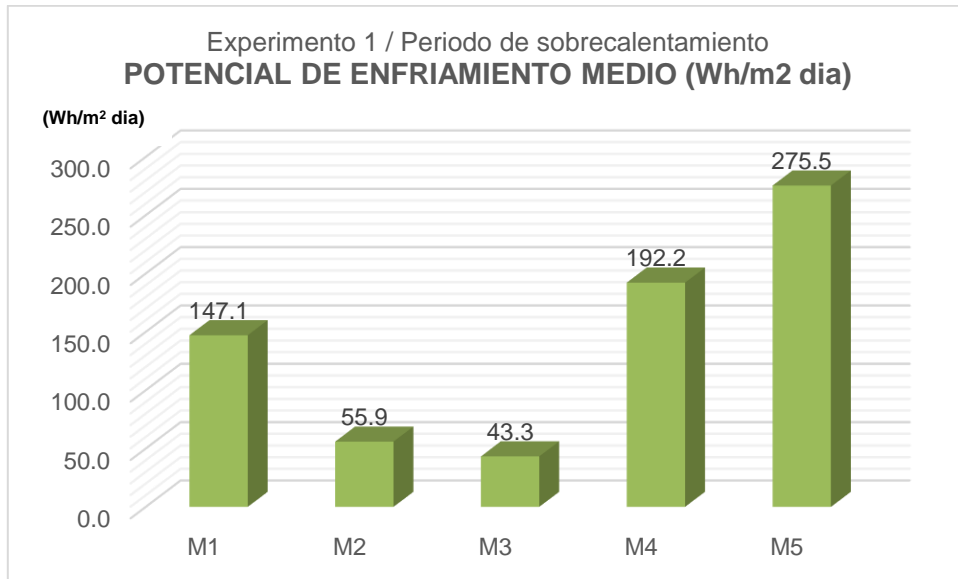


Fig. 6-36 Gráfica de potencial de enfriamiento media del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.3 Análisis de confort térmico

El análisis de confort térmico se realizó con un rango de 5 K y 7 K, en este caso (Tabla 6-8):

Tabla 6-8 Valores empleados para análisis de confort térmico en periodo de sobrecalentamiento. Fuente: Elaboración propia.

VALORES DE TEMPERATURA NEUTRA PARA EL PERIODO DE SOBRECALENTAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉRIDA			
Temperatura media del mes más cálido = 29.0 °C			
Temperatura neutra = 17.6 + (0.31 x Temperatura de diseño)			
<u>T_n</u> periodo sobrecalentamiento = 26.59 °C			
5K		7K	
Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior
29.09	24.09	30.09	23.09

En la siguiente gráfica (Fig. 6-37) se aprecia en color naranja la zona de confort que muestra los límites máximos y mínimos, de acuerdo con el cálculo de la temperatura neutra en periodo de sobrecalentamiento para un rango de 5 K.

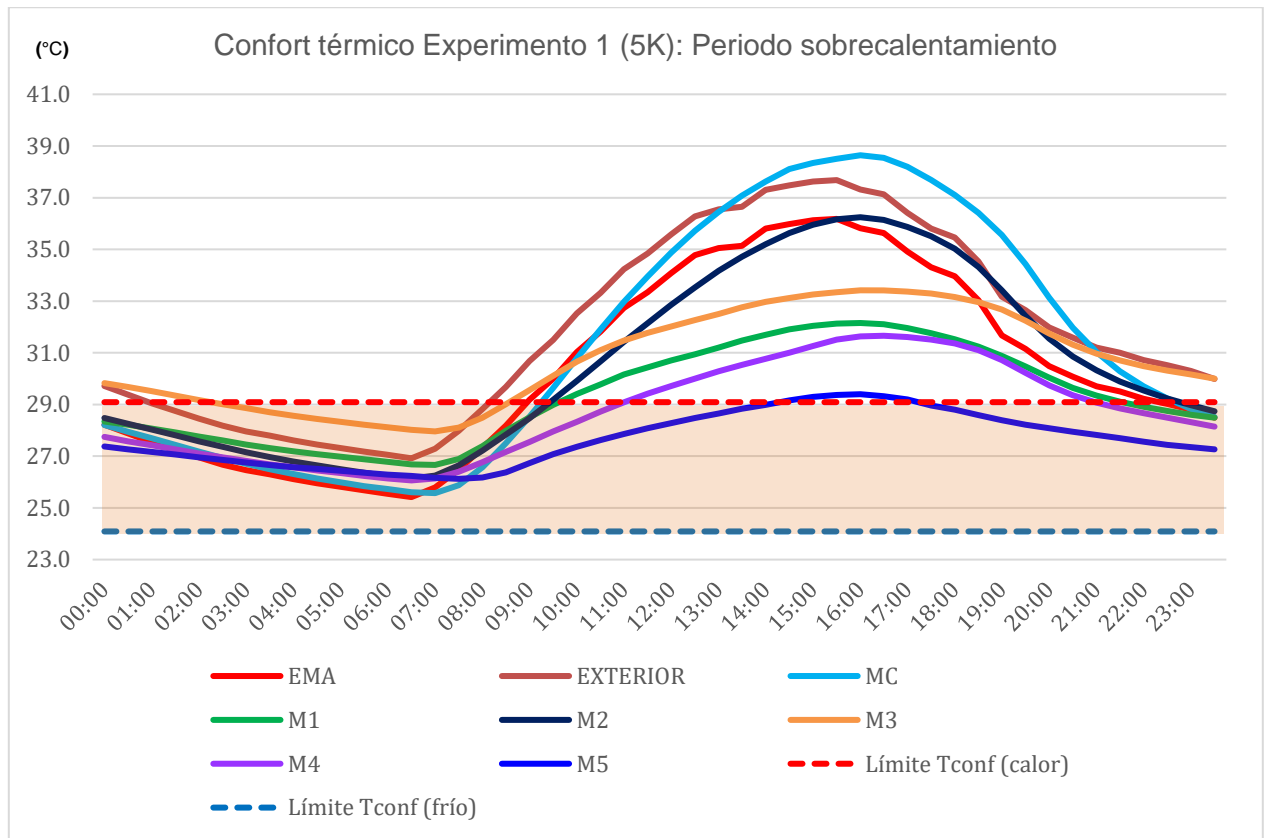


Fig. 6-37 Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (5 K).

Fuente: Elaboración propia.

En el periodo de sobrecalentamiento, en los cinco sistemas existe un periodo de temperaturas superiores a las de confort de las 9:00 hrs a las 22:00 hrs aproximadamente. Por otra parte, es posible afirmar que los cinco sistemas de enfriamiento oscilan debajo de la TBS del MC.

A continuación, se muestran los porcentajes de confort específicos a cada ME, así como los horarios en los que se desarrollan (Fig. 6-38 y Tabla 6-9):

El M1 presenta un porcentaje de confort del 50% de las 22:00 hrs a las 09:30 hrs. El periodo restante de las 10:00 hrs a las 21:30 hrs se interpreta como sensación térmica de calor, es decir, por encima de los 29.09 °C.

Tabla 6-9 Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de sobrecalentamiento (5 K).
Fuente: Elaboración propia.

CONFORT TÉRMICO EXPERIMENTO 1: PERIODO DE SOBRECALENTAMIENTO (5K)																																															
MÓDULO 1																																															
CONFORT (50.0%)												CALOR (50.0%)																																			
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												0.0%																																			
CONFORT												50.0%																																			
CALOR												50.0%																																			
MÓDULO 2																																															
CONFORT (48.0%)												CALOR (52.0%)																																			
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												0.0%																																			
CONFORT												48.0%																																			
CALOR												52.0%																																			
MÓDULO 3																																															
CONFORT (27.0%)						CALOR (73.0%)																																									
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												0.0%																																			
CONFORT						27.0%																																									
CALOR																		73.0%																													
MÓDULO 4																																															
CONFORT (62.0%)												CALOR (38.0%)																																			
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												0.0%																																			
CONFORT												62.0%																																			
CALOR												38.0%																																			
MÓDULO 5																																															
CONFORT (90.0%)																		CALOR (10.0%)																													
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO												0.0%																																			
CONFORT																		90.0%																													
CALOR						10.0%																																									

El M2, es similar al M1, su porcentaje de confort es de 48% abarcando de las 10:00 hrs a las 21:30 hrs. Se presenta un porcentaje fuera de la zona de confort "calor" del 52% de las 23:00 hrs a las 10:00 hrs.

En el caso del M3 (ERN y MT), el porcentaje de confort es del 27% , mientras que la sensación térmica de calor representa el 73%.

El M4, presenta condiciones de confort en un 62% de las 20:00 hrs a las 10:30 hrs e indica un periodo de calor del 38% durante nueve horas.

Por último, el M5 se encuentra en confort durante un 90% del tiempo.

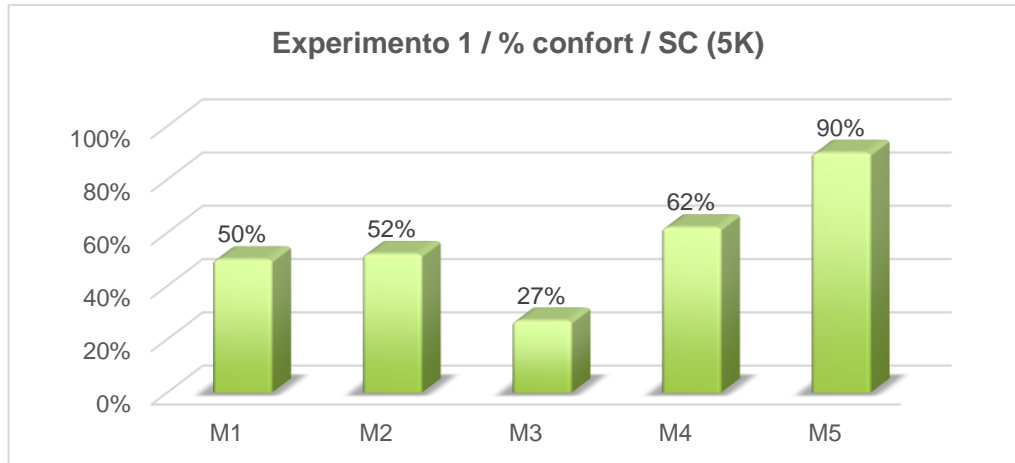


Fig. 6-38 Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (5K). Fuente: Elaboración propia.

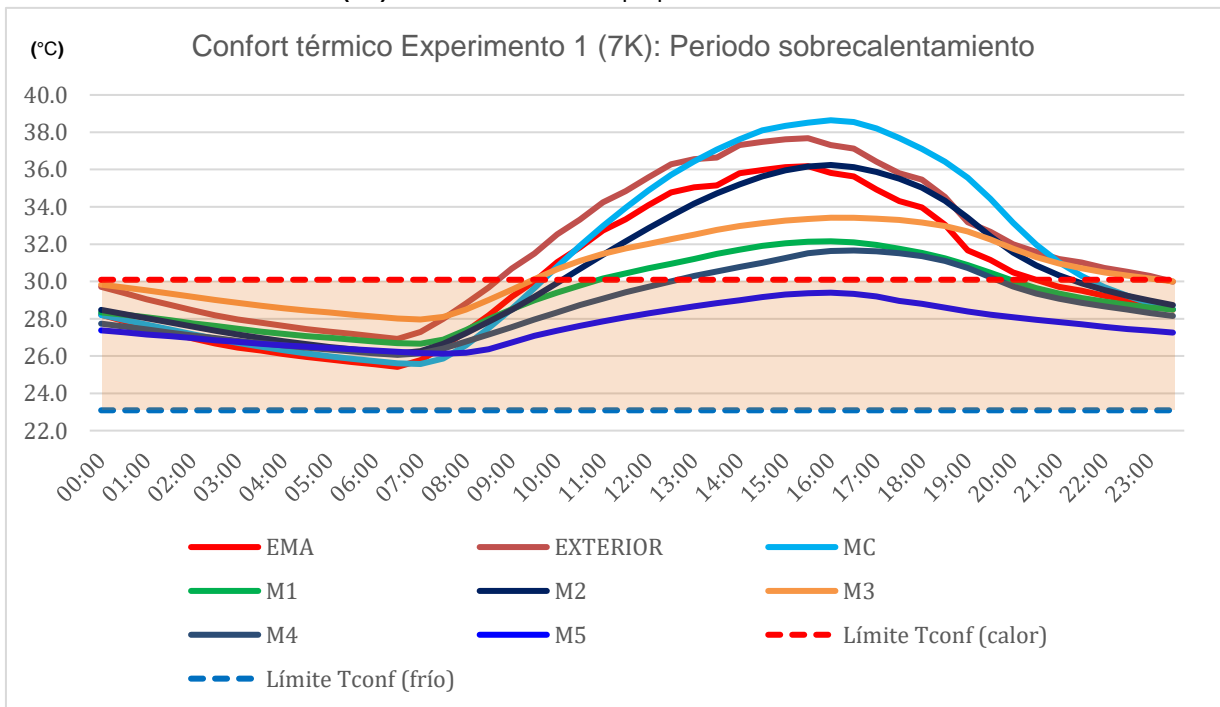


Fig. 6-39 Gráfica de confort térmico horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (7 K). Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente gráfica (Fig. 6-39) se aprecia en color naranja la zona de confort que muestra los límites máximos y mínimos de acuerdo con el cálculo de la temperatura neutra en el periodo de sobrecalentamiento para un rango de 7 K.

En los cinco sistemas existe un periodo de temperaturas superiores a las de confort de las 9:00 hrs a las 22:00 hrs aproximadamente. Por otra parte, es posible afirmar que los cinco sistemas de enfriamiento oscilan debajo de la TBS del MC.

A continuación, se muestran los porcentajes de confort específicos de cada ME, así como los horarios en los que se desarrollan (Fig. 6-40 y Tabla 6-10):

El M1 presenta un porcentaje de confort del 55% de las 22:00 hrs a las 10:30 hrs. El periodo restante de las 11:30 hrs a las 21:30 hrs se interpreta como sensación térmica de calor, es decir, por encima de los 30.09 °C.

El M2, es similar al M1, su porcentaje de confort es de 57% abarcando de las 23:00 hrs a las 10:30 hrs. Se presenta un porcentaje fuera de la zona de confort "calor" del 43% de las 11:00 hrs a las 22:30 hrs.

En el caso del M3 (ERN y MT), el porcentaje de confort es del 39% , mientras que la sensación térmica de calor representa el 61%.

El M4, presenta condiciones de confort en un 70% de las 20:00 hrs a las 13:00 hrs e indica un periodo de calor del 30% durante nueve horas.

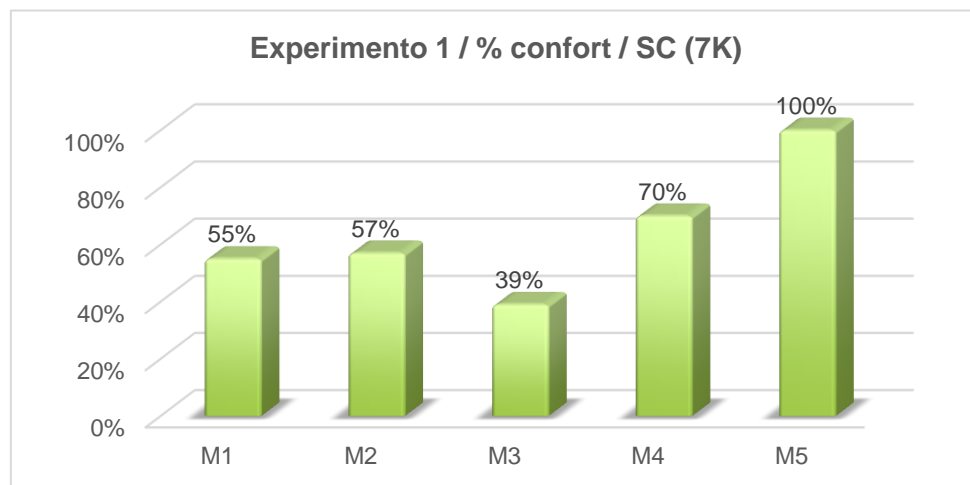


Fig. 6-40 Gráfica de porcentaje de confort del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento (7K). Fuente: Elaboración propia.

Por último, el M5 se encuentra en confort durante un 100% del tiempo.

Tabla 6-10 Porcentajes de confort térmico en el experimento 1 durante el periodo de sobrecalentamiento (7 K).
Fuente: Elaboración propia.

CONFORT TÉRMICO EXPERIMENTO 1: PERIODO DE SOBRECALENTAMIENTO (7K)																																															
MÓDULO 1																																															
CONFORT (55.0%)													CALOR (45.0%)																																		
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO 0.0%																																															
CONFORT 55.0%																																															
CALOR 45.0%																																															
MÓDULO 2																																															
CONFORT (57.0%)													CALOR (43.0%)																																		
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO 0.0%																																															
CONFORT 57.0%																																															
CALOR 43.0%																																															
MÓDULO 3																																															
CONFORT (39.0%)													CALOR (61.0%)																																		
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO 0.0%																																															
CONFORT 39.0%																																															
CALOR 61.0%																																															
MÓDULO 4																																															
CONFORT (70.0%)													CALOR (30.0%)																																		
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO 0.0%																																															
CONFORT 70.0%																																															
CALOR 30.0%																																															
MÓDULO 5																																															
CONFORT (100.0%)																																															
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
FRÍO 0.0%																																															
CONFORT 100.0%																																															
CALOR 0.0%																																															

De acuerdo con el análisis de temperaturas características, el M5 es el que mejor desempeño mostró, ya que redujo la TBS hasta en 3.7 K. En el análisis del PEM mostró una capacidad para retirar hasta hasta 275.5 Wh/m² día y en el análisis de porcentaje de confort se mostró un 100%, objetivo difícil de lograr en climas cálido-húmedos.

6.2 Experimento 2

El experimento 2 consiste en el empleo de aceite de coco (MCF) encapsulado en una placa de policarbonato de 6mm. Se desarrolló en el Módulo 5, debido a que en el experimento 1 se determinó que representó el mejor desempeño por la utilización de diversas estrategias de enfriamiento (ERN + EEI + MT + PS).

Para su análisis se compararon los valores obtenidos en el MC, la EMA, la P.S. y el M5. La prueba se realizó en un periodo representativo (11 al 26 de mayo), periodo de sobrecalentamiento considerado para climas cálido-húmedos, el periodo más desfavorable para las condiciones de confort térmico.

6.2.1 Análisis de temperaturas características

El periodo de prueba presentó condiciones de temperatura máximas de 38.0 °C y mínimas de 26.6 °C, de acuerdo con la medición realizada en sitio por medio de la pantalla de Stevenson (P.S.). Las condiciones presentaron similitud con los valores registrados a través de la Estación Meteorológica Automática (EMA) (Tabla 6-11).

La humedad relativa (HR) máxima fue de 96.6% y mínima de 42.5%, la radiación promedio fue de 968.3 W/m², cielo despejado y no se registraron de lluvias.

En el caso del experimento 2 se evaluó el desempeño del aceite de coco en el Módulo 5, con respecto al Módulo de Control y las condiciones exteriores (EMA y P.S.).

El MC presentó una TBS promedio de 30.2 °C, con respecto los 31.6 °C registrados a través de la P.S. y los 31.1 °C indicados por la EMA, por lo que se infiere una reducción de 1.6 K como consecuencia del sistema aislado adiabático. El M5 presenta una temperatura promedio de 25.3 °C lo que representa una reducción de 4.9 K al interior.

Por otro lado, el valor promedio de HR en el MC fue de 59.9%, disminuyendo en un 13.6% la HR al interior con respecto al valor registrado por la EMA. El M5 presentó una disminución de 2.8% con respecto al MC (Tabla 6-12).

Tabla 6-11 Valores promedio, mínimos y máximos de TBS y HR del experimento 2. Fuente: Elaboración propia.

EXPERIMENTO 2: VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS y PROMEDIO TBS y HR												
Hora	MC		M5		EXTERIOR		EMA					
	Temp 1	HR	Temp 1	HR	Temp 1	HR	DIRECCIÓN DE RÁFAGA	DIRECCIÓN DEL VIENTO	HUMEDAD RELATIVA	RADIACIÓN	TEMPERATURA DEL AIRE	PRESIÓN ATMOSFÉRICA
00:00	27.3	64.7	25.1	63.6	28.2	84.5	146.3	91.1	86.4	-0.8	28.7	1014.4
00:30	27.1	65.6	24.9	65.1	28.0	86.3	145.9	97.4	88.3	-0.8	28.5	1014.0
01:00	27.0	66.9	24.8	66.8	27.7	88.0	151.5	99.8	89.9	-0.9	28.3	1013.6
01:30	26.8	68.0	24.7	68.9	27.5	89.7	150.4	98.7	91.6	-0.9	28.0	1013.5
02:00	26.6	69.1	24.6	70.9	27.4	90.7	155.9	106.0	92.6	-1.0	27.9	1013.4
02:30	26.5	70.2	24.5	72.8	27.2	91.8	135.8	106.5	93.7	-1.0	27.7	1013.3
03:00	26.3	71.3	24.4	74.3	27.0	92.8	145.2	91.4	94.7	-1.0	27.6	1013.2
03:30	26.2	72.5	24.3	75.6	26.9	94.3	141.8	93.1	96.2	-1.0	27.4	1013.2
04:00	26.0	73.7	24.3	77.0	26.8	95.5	138.0	87.9	97.4	-0.9	27.3	1013.2
04:30	25.9	74.8	24.2	78.6	26.8	96.0	148.2	91.3	97.9	-1.0	27.3	1013.4
05:00	25.7	76.0	24.1	80.1	26.6	96.6	139.3	90.4	98.5	-1.0	27.1	1013.6
05:30	25.5	77.0	24.0	81.3	26.6	96.3	131.5	84.3	98.3	3.9	27.2	1013.8
06:00	25.4	77.9	24.0	82.6	26.9	93.9	134.8	90.5	95.8	52.6	27.5	1014.1
06:30	25.2	78.7	23.9	83.7	28.1	89.3	133.8	88.6	91.2	147.0	28.6	1014.4
07:00	25.2	78.5	23.8	81.7	29.3	83.4	156.2	96.4	85.3	252.2	29.8	1014.6
07:30	25.7	76.6	23.8	77.5	30.3	79.7	173.8	104.6	81.6	371.9	30.8	1014.8
08:00	26.6	74.3	23.9	73.1	31.4	75.3	185.9	106.0	77.3	491.3	31.9	1014.9
08:30	27.7	71.4	24.1	68.1	32.1	72.2	203.5	109.5	74.1	560.2	32.6	1015.1
09:00	28.9	68.1	24.4	62.7	32.9	68.4	208.7	112.3	70.3	676.4	33.4	1015.1
09:30	30.1	64.6	24.8	57.3	33.5	65.2	222.1	119.1	67.1	613.4	34.0	1015.2
10:00	31.1	61.4	25.0	52.0	34.2	61.7	205.6	110.8	63.6	767.1	34.7	1015.1
10:30	32.1	58.6	25.3	47.9	34.7	59.0	215.1	115.1	60.9	902.6	35.3	1014.9
11:00	33.1	55.6	25.5	45.1	35.5	55.1	200.1	111.7	57.0	947.9	36.0	1014.8
11:30	34.1	52.8	25.8	42.1	36.1	52.1	218.0	113.6	54.0	935.9	36.6	1014.6
12:00	34.9	50.0	26.0	39.3	36.5	50.0	212.8	111.5	51.9	612.6	37.0	1014.2
12:30	35.6	48.0	26.2	36.6	36.9	48.6	213.8	109.2	50.5	968.3	37.4	1013.9
13:00	36.1	45.9	26.3	36.4	37.2	47.3	202.2	130.6	49.2	916.7	37.7	1013.5
13:30	36.6	44.6	26.5	34.6	37.8	44.3	229.8	117.1	46.2	794.8	38.3	1013.0
14:00	37.1	43.8	26.7	33.0	38.0	42.8	192.8	123.9	44.8	811.6	38.6	1012.6
14:30	37.5	42.8	26.8	32.2	37.6	42.5	181.0	112.3	44.4	689.8	38.1	1012.4
15:00	37.7	42.3	27.0	31.8	37.0	45.2	142.8	139.0	47.1	473.4	37.5	1012.2
15:30	37.6	42.1	27.0	34.1	36.0	52.0	115.8	115.3	53.9	402.8	36.5	1012.1
16:00	37.3	42.0	27.1	34.0	34.3	58.2	95.9	166.3	60.1	304.0	34.8	1012.1
16:30	36.8	42.5	27.0	36.2	33.1	63.7	88.4	160.3	65.6	192.0	33.7	1012.4
17:00	35.7	43.2	26.9	39.4	32.5	64.8	92.9	125.8	66.8	125.8	33.1	1012.6
17:30	34.2	43.8	26.6	40.3	31.5	69.2	92.6	97.2	71.1	72.6	32.0	1012.9
18:00	33.0	44.7	26.5	41.0	30.7	69.4	134.4	101.2	71.3	47.6	31.2	1013.0
18:30	31.9	47.8	26.3	45.3	30.3	73.0	104.8	71.7	74.9	11.0	30.8	1013.2
19:00	30.9	49.7	26.1	50.3	30.2	74.7	98.5	94.0	76.6	-0.7	30.7	1013.4
19:30	30.0	51.6	25.9	52.7	30.0	77.4	119.5	105.1	79.3	-0.8	30.5	1013.7
20:00	29.3	55.4	25.8	55.8	29.8	79.0	114.1	91.8	80.9	-0.9	30.3	1013.8
20:30	28.8	57.9	25.6	57.4	29.6	78.8	137.8	124.9	80.7	-0.8	30.1	1013.9
21:00	28.4	59.8	25.5	59.3	29.3	79.5	147.9	85.0	81.4	-0.8	29.8	1014.1
21:30	28.1	60.3	25.4	59.1	29.1	80.3	117.9	108.6	82.3	-0.8	29.6	1014.3
22:00	27.9	61.7	25.2	60.4	29.0	81.5	136.4	92.0	83.4	-0.9	29.5	1014.4
22:30	27.7	62.4	25.1	61.4	28.8	82.8	126.4	101.8	84.8	-0.6	29.4	1014.6
23:00	27.5	62.8	25.0	61.8	28.6	82.8	135.8	101.9	84.8	-0.7	29.1	1014.6
23:30	27.3	63.7	24.9	62.7	28.4	83.8	132.4	84.4	85.8	-0.7	28.9	1014.5
Mínima	25.2	42.0	23.8	31.8	26.6	42.5	88.4	71.7	44.4	-1.0	27.1	1012.1
Máxima	37.7	78.7	27.1	83.7	38.0	96.6	229.8	166.3	98.5	968.3	38.6	1015.2
Promedio	30.2	59.9	25.3	57.2	31.1	73.5	153.2	106.0	75.4	273.5	31.6	1013.8

La prueba se realizó en un periodo de 15 días, los valores fueron representados por medio de gráficas horarias en donde se observa la comparación de TBS promedio y HR promedio entre la P.S., la EMA el MC y el M5.

Tabla 6-12 Resumen de resultados del experimento 2. Fuente: Elaboración propia.

EXPERIMENTO 2 / PERIODO DE SOBRECALENTAMIENTO / RESUMEN DE RESULTADOS					
PARÁMETRO	Unidad	Valores exteriores		Módulos	
		EMA	EXTERIOR	MC	M5
TBS Promedio	°C	31.6	31.1	30.2	25.3
TBS Mínima	°C	27.1	26.6	25.2	23.8
TBS Máxima	°C	38.6	38.0	37.7	27.1
HR Promedio	%	75.4	73.5	59.9	57.2
HR Mínima	%	44.4	42.5	42.0	31.8
HR Máxima	%	98.5	96.6	78.7	83.7
Reducción de TBS Promedio (Valores exterior vs Valores al interior de los módulos), K				0.9	5.8
Reducción de TBS Promedio (MC vs M1), K					4.9
Reducción de HR (Valores exterior vs Valores al interior de los módulos), K				13.6	16.4
Disminución de HR (MC vs M1), K					2.8

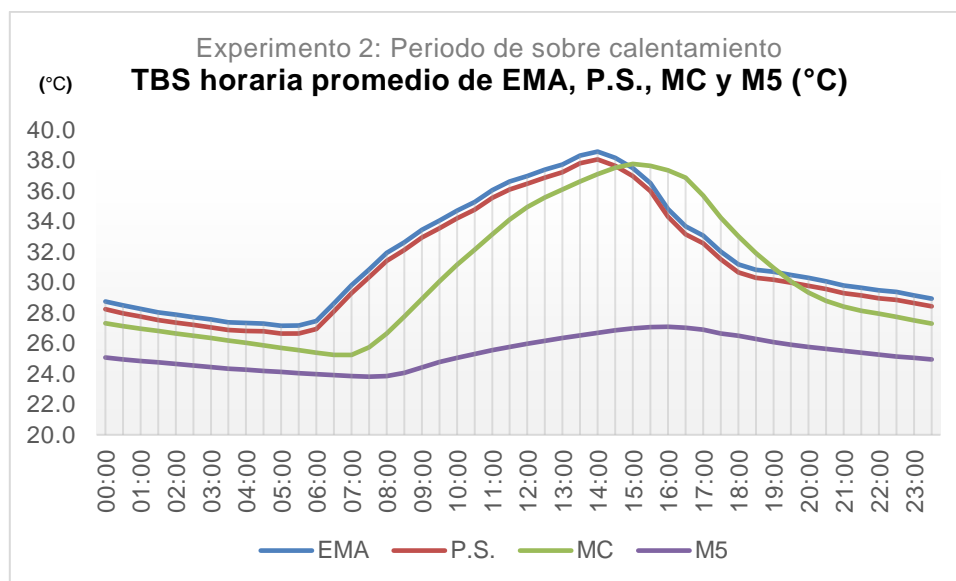


Fig. 6-41 Gráfica de TBS promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2. Fuente: Elaboración propia.

En la fig. 6-41 se pueden observar los valores horarios de TBS promedio del experimento. Los valores de la EMA y la P.S. muestran similitud en la curva de comportamiento en donde a partir

de las 6:00 hrs presenta un incremento de temperatura comenzando en 27 °C hasta 37 °C a las 15:00 hrs. El M5 comenzó el incremento de temperatura de igual manera a las 7:00 hrs y disminuyó a partir de las 16:00 hrs. En el MC se extiende el incremento de temperatura a las 7:30 hrs y decreció a las 15:00 hrs. La temperatura registrada del MC y el M5 fue menor a la exterior en ambos casos.

Por otra parte, en la gráfica de HR promedio, (Fig. 6-42) la HR decreció desde las 7:00 hrs y aumentó a partir de las 15:00 hrs., mientras que para el M5 el descenso comenzó a las 6:30 hrs.

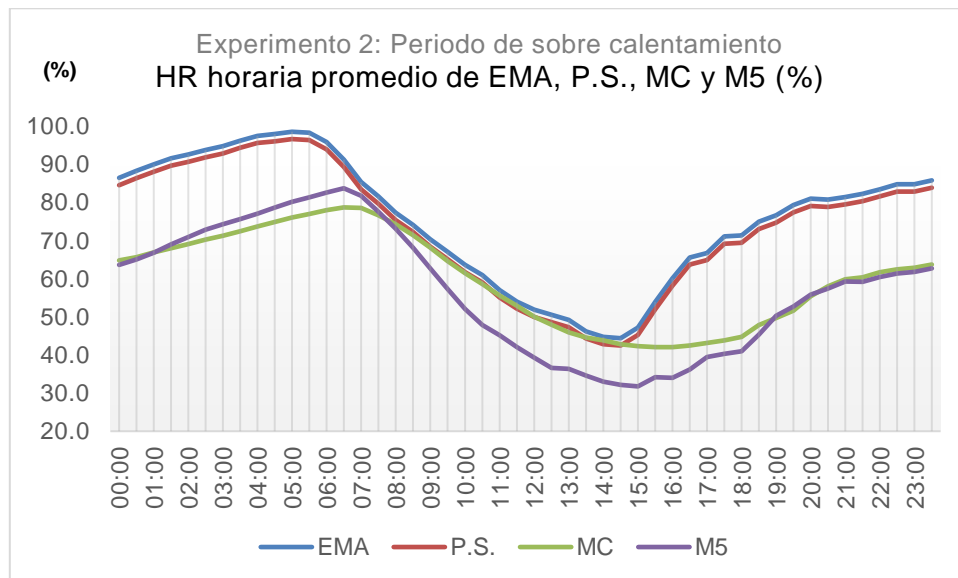


Fig. 6-42 Gráfica de HR promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de temperaturas características mostró que es posible reducir la TBS en un clima cálido-húmedo hasta en 4.9 K con un sistema adiabático.

6.2.2 Análisis de PEM

El potencial de enfriamiento medio es el “enfriamiento efectivo” (González, 2010) en un sistema en comparación con otro. En este caso se comparan los valores ambientales con relación al MC.

Se calcula de la siguiente manera:

$$PEM = 1.98 \times (30.2 \text{ °C} - 25.3 \text{ °C}) \times 24 \text{ hrs} / 0.64 \text{ m}^2$$

PEM = 364.8 Wh/m² día

Debido a la reducción de la temperatura de 4.9 K en comparación al MC, el potencial de enfriamiento del sistema se representa con un promedio de 364.8 Wh/m² día, presentando el mejor desempeño entre los dos experimentos realizados. En el capítulo siguiente se realiza una comparativa de todos los sistemas.

6.2.3 Análisis de confort térmico

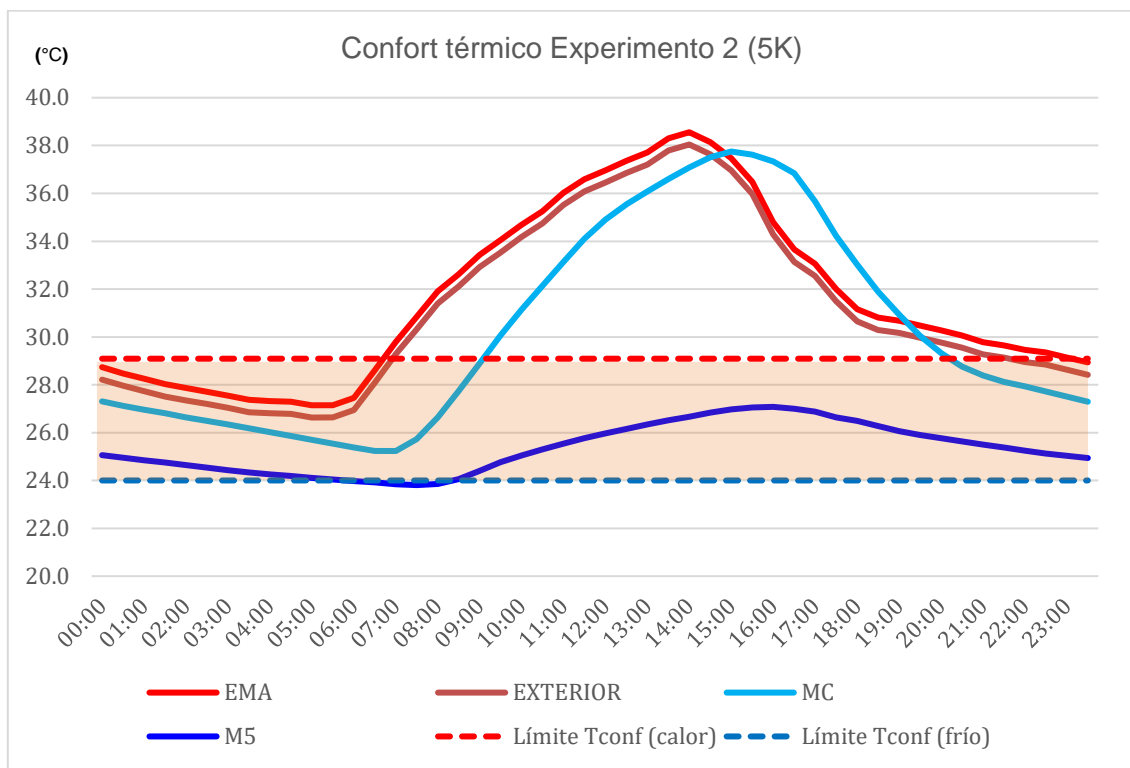


FIG. 6-43 Gráfica de confort térmico horaria del experimento 2 (5K). Fuente: Elaboración propia.

En el experimento 2 para el rango de confort de 5 K, se muestra en la fig. 6-43.

Se observa que, durante el periodo de sobrecalentamiento, presentó dos horas ligeramente por debajo de las condiciones de confort térmico durante la jornada completa promedio, lo cual indica un porcentaje del 8% (Tabla 6-13).

Tabla 6-13 Confort térmico horario del experimento 2 (5 K). Fuente: Elaboración propia.

CONFORT TÉRMICO EXPERIMENTO 2 (5K)																																															
FRÍO (8.0%)						CONFORT (92.00%)																																									
00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30

FRÍO	8.0%
CONFORT	92.0%
CALOR	0%

Para el caso de la evaluación de confort con 7 K, se muestra la Fig. 6.44

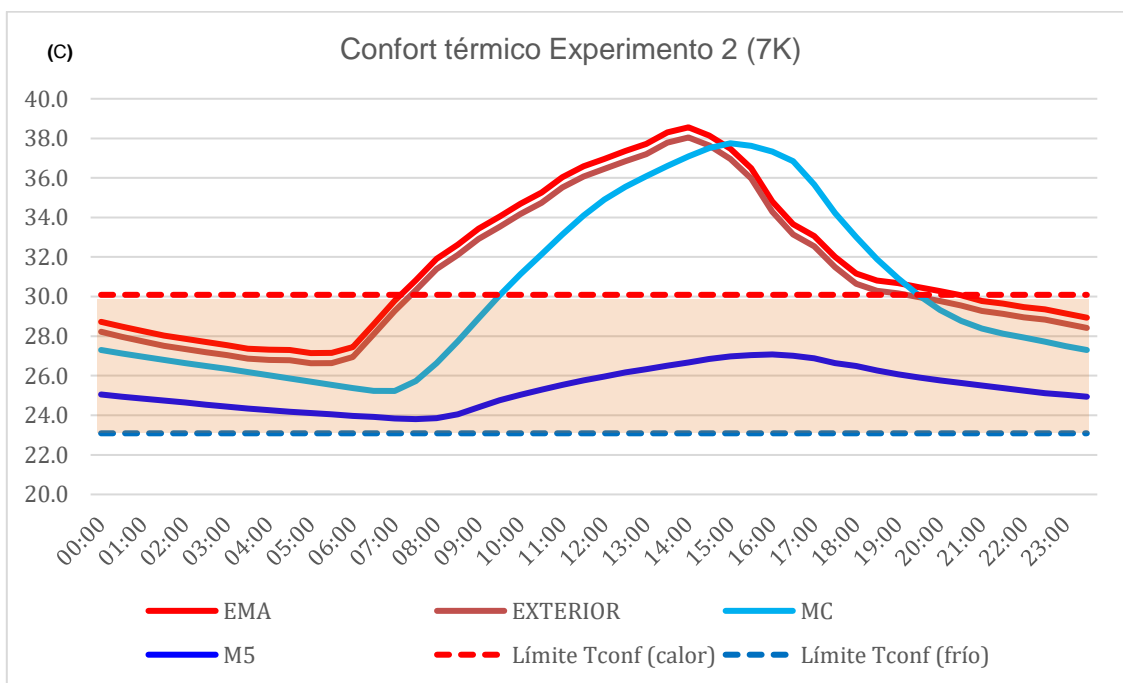


Fig. 6-44 Gráfica de confort térmico horaria del experimento 2 (7K). Fuente: Elaboración propia.

Se observa que para una evaluación con un rango de 7 K, el experimento mostró el 100% de confort térmico. (Tabla 6-14).

Tabla 6-14 Confort térmico horario del experimento 2 (7 K). Fuente: Elaboración propia.

CONFORT TÉRMICO EXPERIMENTO 2 (7K)	
CONFORT (100.0%)	
00:00	
00:30	
01:00	
01:30	
02:00	
02:30	
03:00	
03:30	
04:00	
04:30	
05:00	
05:30	
06:00	
06:30	
07:00	
07:30	
08:00	
08:30	
09:00	
09:30	
10:00	
10:30	
11:00	
11:30	
12:00	
12:30	
13:00	
13:30	
14:00	
14:30	
15:00	
15:30	
16:00	
16:30	
17:00	
17:30	
18:00	
18:30	
19:00	
19:30	
20:00	
20:30	
21:00	
21:30	
22:00	
22:30	
23:00	
23:30	
CONFORT	100.0%
FRÍO	0.0%

En el experimento 2, es importante enfatizar que la pérdida de 4.9 K, a través de un material de cambio de fase con respecto al módulo de control en un clima cálido-húmedo por medios pasivos. Esto podría resultar en una excelente recomendación para el control térmico dentro de edificaciones de hasta dos niveles.



7 CONCLUSIONES

INDICE

7.1 Descripción del trabajo realizado	162
7.2 Conclusiones del estudio	163
7.2.1 Experimento 1 (Periodo de bajocalentamiento)	163
7.2.2 Experimento 1 (Periodo de sobrecalentamiento)	165
7.2.3 Experimento 2	167
7.2.4 Conclusiones generales	169
7.3 Aportación al diseño	177
7.4 Recomendación para futuras investigaciones	178

Capítulo 7: Conclusiones

7.1 Descripción del trabajo realizado

Se realizó el estudio de cinco diferentes sistemas de enfriamiento en climas cálido-húmedos para caracterizar el comportamiento térmico. El trabajo se desarrolló en la Ciudad de Mérida en dos diferentes periodos climáticos: en bajocalentamiento, durante el mes de diciembre y en sobrecalentamiento en el mes de mayo.

La investigación se realizó en modelos físicos a escala. Se construyeron cinco diferentes módulos experimentales de 80 x 80 cm de madera de triplay recubiertos en el interior con foamular de 1" (material aislante) para generar un sistema adiabático. Los módulos se construyeron iguales modificando únicamente la configuración de la cubierta, construida a base de una placa de metal galvanizado en donde se contenían los materiales investigados.

Los sistemas de enfriamiento propuestos fueron diseñados a partir de diferentes combinaciones de estrategias pasivas: 1) Enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar, 2) Masa y aislamiento térmico, 3) Enfriamiento radiativo nocturno y masa térmica, 4) Enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar, 5) Enfriamiento radiativo nocturno, enfriamiento evaporativo indirecto, masa térmica y protección solar. Para validar las mediciones se construyó un módulo de control, mismo que permitió conocer el comportamiento térmico sin la utilización de los sistemas de enfriamiento propuestos.

Se realizaron mediciones simultáneas: los cinco módulos, el módulo de control y las condiciones climáticas exteriores, por medio de la colocación del instrumental de registro dentro de una pantalla de Stevenson, lo anterior para comparar eficazmente los cinco sistemas.

Se realizaron dos experimentos. El primero utilizó agua en las cubiertas de los ME para conocer el desempeño de los cinco módulos y seleccionar el de mayor eficiencia para, en el segundo experimento, reemplazar el material de la masa térmica por un material de cambio de fase: El aceite de coco. Para el segundo experimento se empleó el material encapsulado en una placa de policarbonato de 6 mm transparente con el fin de evitar pérdidas por el cambio de fase.

Las mediciones del primer experimento se realizaron en el periodo de bajocalentamiento y sobrecalentamiento. Para el segundo experimento, únicamente se consideró el periodo más desfavorable en el lugar analizado, es decir, el periodo de sobrecalentamiento.

7.2 Conclusiones del estudio

Se realizaron tres tipos de análisis, por temperaturas características, de P.E.M. y de porcentaje de confort térmico. A continuación, se exponen las conclusiones de cada experimento, así como la conclusión general.

7.2.1 Experimento 1 (Periodo de bajo calentamiento)

El periodo de prueba presentó condiciones de temperatura promedio mínima de 21.6 °C y máxima de 32.8 °C. La humedad relativa promedio mínima fue de 42% y máxima de 88%. No se registraron lluvias y se presentó una radiación solar promedio de 684.4 W/m² con cielo despejado.

De acuerdo con el análisis realizado para el experimento que emplea agua como masa térmica durante el periodo de bajo calentamiento, se puede determinar que el módulo que presentó el mejor desempeño fue el M5.

Como resultado del análisis de temperaturas características, el M1 presentó un decremento con respecto al módulo de control de 1.6 K, el M2 redujo su temperatura en 1.5 K, el M3 decreció la TBS en 0.9 K, el M4 en 1.7 K y el M5 en 2.5 K (Fig. 7-1).

Respecto a la HR, se presentó un decremento debido a la configuración del sistema adiabático (Fig. 7-2). El M1 redujo la HR en 11.8%, el M2 en 18.8%, el M3 en 20.6%, el M4 en 13.1% y el M5 en 13.4%. La oscilación higrótérmica se redujo en ocasiones presentando líneas de tendencia menores al 50%.

El segundo tipo de análisis desarrollado fue el del Potencial de enfriamiento medio, que representa el enfriamiento efectivo.

En este caso, el M1 obtuvo un P.E.M. de 119.1 Wh/m² día y debido a la mínima diferencia en la temperatura, el M2 de igual manera presentó 119.1 Wh/m² día. El M3 presentó un valor de 67.0 Wh/m² día, ubicándolo como el sistema menos eficiente. Posteriormente el M4 obtuvo un potencial de 126.6 Wh/m² día, ubicándolo como el segundo sistema más eficiente, y finalmente, el M5 presenta el valor más alto siendo este de 186.1 Wh/m² día.

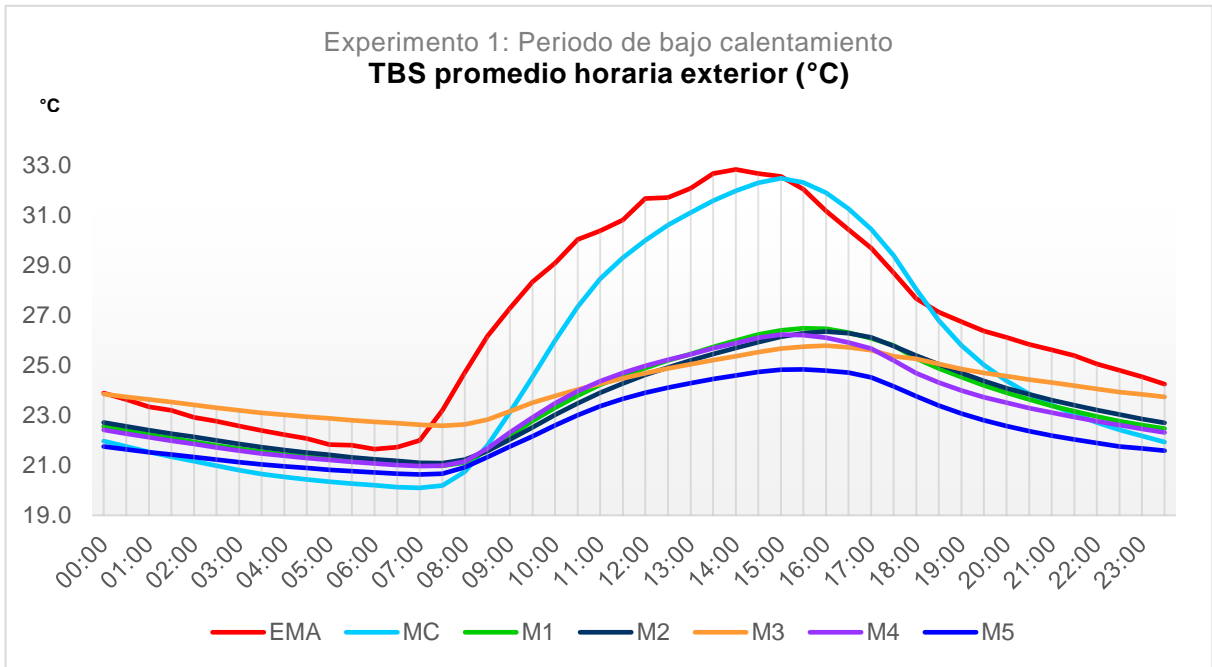


Fig. 7-1 Gráfica de comportamiento de TBS horaria del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

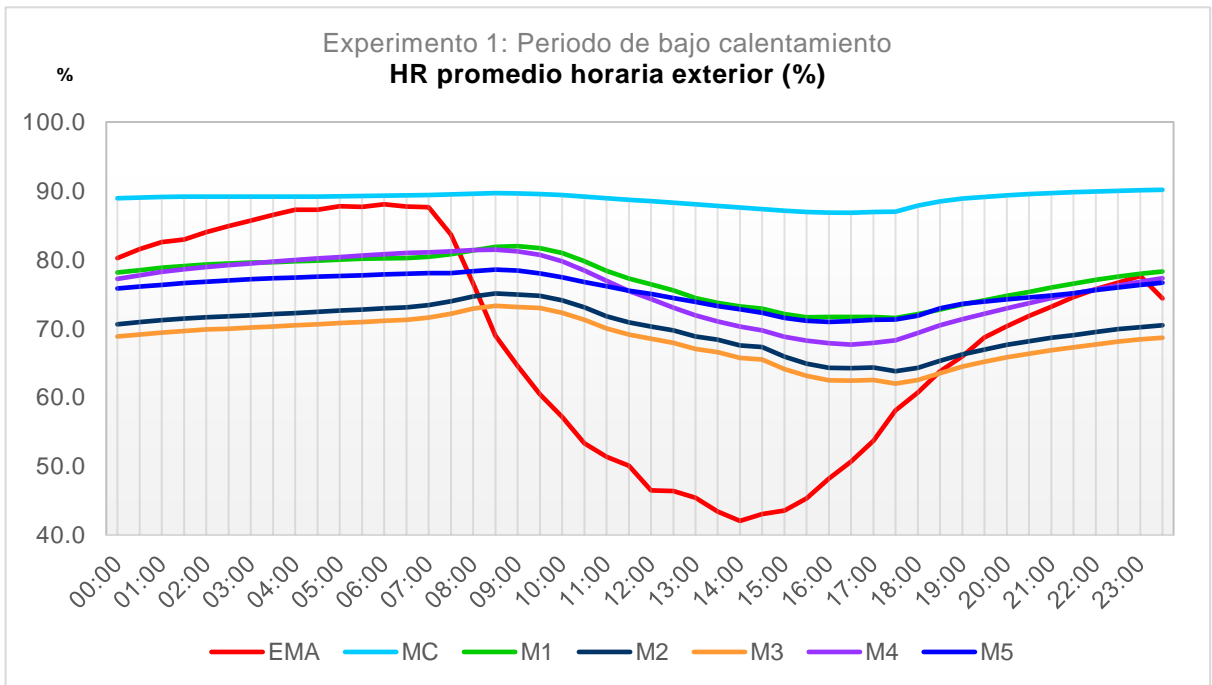


Fig. 7-2 Gráfica de comportamiento de HR horaria del experimento 1 en periodo de bajocalentamiento. Fuente elaboración propia.

En el análisis de confort térmico para 5 K, el módulo de menor desempeño fue el M4 con 57% y el más eficiente fue el M3 con 100% en una jornada promedio en bajocalentamiento. Para 7 K, el de menor eficiencia fue el M4 con 82% y el de mejor desempeño fue el M3 con 100%.

Es importante recalcar que los límites inferiores de los cinco módulos no rebasan los 3.0 °C en las horas de la madrugada, por lo que podría inferirse que, mientras exista mayor arropamiento durante la actividad de dormir, los cinco sistemas podrían presentar 100% de confort.

7.2.2 Experimento 1 (Periodo de sobrecalentamiento)

El periodo de prueba presentó condiciones de temperatura promedio mínima de 26.9 °C y máxima de 37.7 °C. La humedad relativa promedio mínima fue de 43.5% y máxima de 95.4%. No se registraron lluvias y se presentó una radiación solar promedio de 880.4 W/m² con cielo despejado.

Al igual que la prueba realizada durante el periodo de bajo calentamiento, el M5 fue el que mejor desempeño presentó.

En el análisis de temperaturas características se aprecia que el M1, con respecto a las mediciones de MC, redujo su temperatura en 2.0 K, el M2 en 0.8 K y el M3 en 0.6 K, siendo éste el que menor temperatura logró reducir al interior. El M4 decreció su TBS en 2.6 K y el M5, el sistema más eficiente, redujo la temperatura en 3.7 K.

La HR decreció poco en comparación con el periodo bajocalentamiento. El M1 decreció la HR en 4.1 %, el M2 en 2.4% y el M3 en 5.6%, sistema que mayor HR retiró del sistema. El M4 redujo la HR en 3.4% y el M5 en 0.3%

El M5, que presentó el mejor desempeño en TBS, fue el que menor porcentaje de HR redujo al interior del mismo.

La oscilación térmica (Fig. 7-3 y 7-4) se muestra con mayor amplitud que en el periodo de bajo calentamiento. En el análisis de confort térmico de 5K, el módulo de menor desempeño fue el M3 con 27% y el M5 fue el de mayor eficiencia con 90%. Para 7 K, el menos eficiente fue el M3 con 39% y el de mayor desempeño fue el M5 con un 100% dentro del periodo de monitoreo.

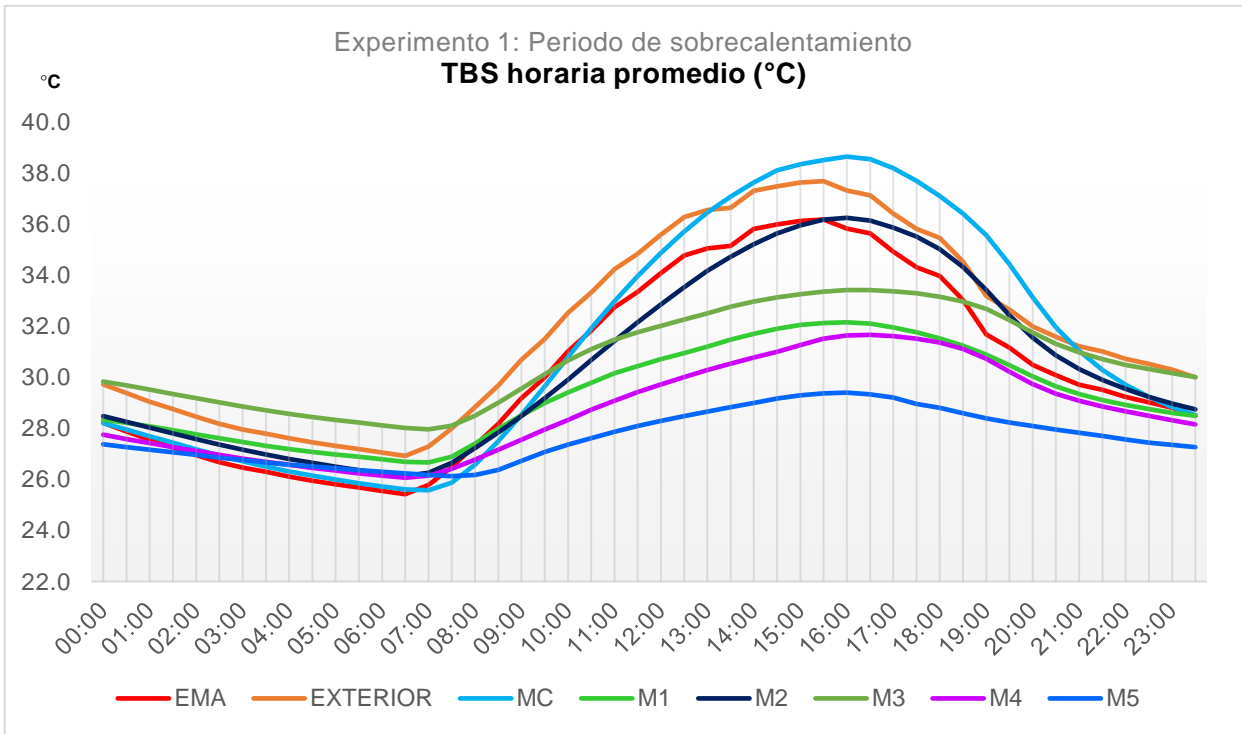


Fig. 7-3 Gráfica de comportamiento de temperatura horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

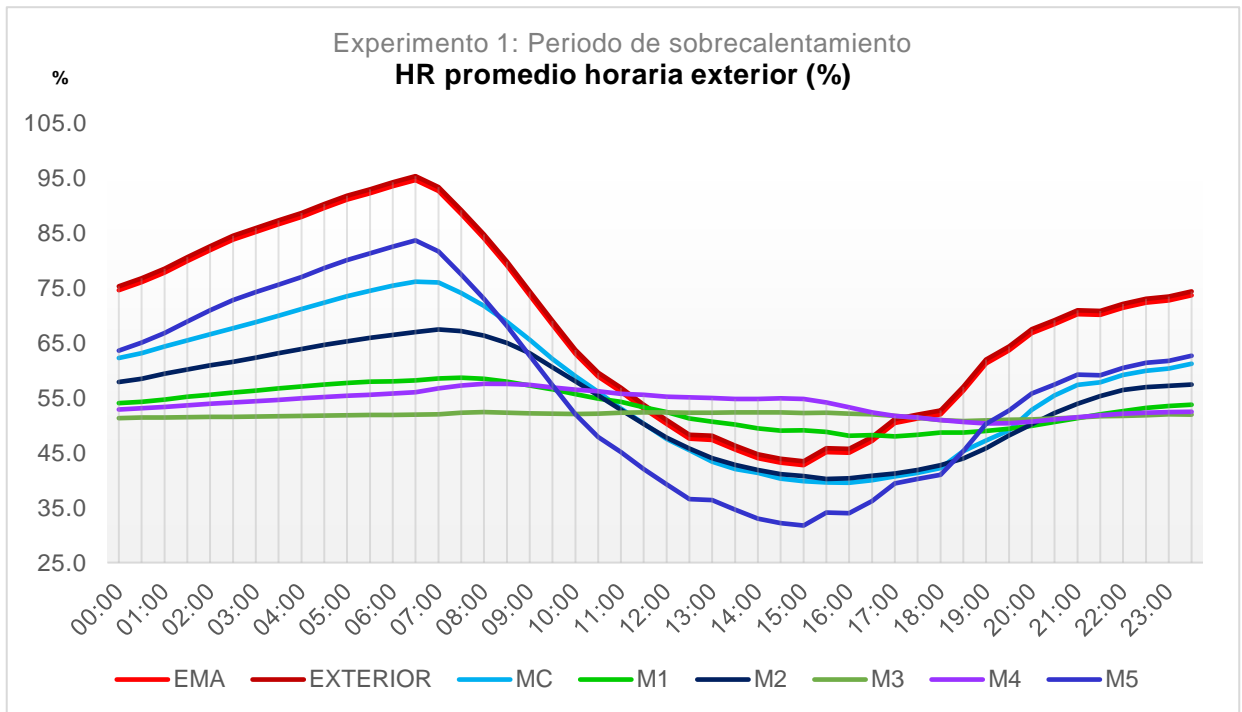


Fig. 7-4 Gráfica de comportamiento de humedad relativa horaria del experimento 1 en periodo de sobrecalentamiento. Fuente elaboración propia.

En el análisis del Potencial de enfriamiento medio, en el periodo de sobrecalentamiento, el M2, M3 y M1 obtuvieron un 55.9, 43.3 y 147.1 Wh/m² día, respectivamente. El M4 incrementó su eficiencia con un 192.2 Wh/m² día y el M5 obtuvo 275.5 Wh/m² día.

Como conclusión, el M5, que integra la mayor cantidad de estrategias de enfriamiento (EEI, ERN, MT y PS), permite inferir que, a mayor número de estrategias, mejor desempeño térmico para climas cálido-húmedos.

7.2.3 Experimento 2

El periodo de prueba durante el sobrecalentamiento, presentó condiciones de temperatura máximas de 38.0 °C y mínimas de 26.6 °C. La humedad relativa (HR) máxima fue de 96.6% y mínima de 42.5%, la radiación promedio fue de 968.3 W/m², cielo despejado y no se registraron de lluvias.

En el caso del experimento 2 se evaluó el desempeño de un material de cambio de fase (aceite de coco) encapsulado en una placa de policarbonato de 6mm para evitar pérdidas por el cambio físico.

La evaluación se realizó en el M5 debido a que las pruebas realizadas con agua como masa térmica determinaron que obtuvo el mejor desempeño. El módulo de control y el módulo de prueba tuvieron exactamente la misma configuración.

El MC presentó una TBS promedio de 30.2 °C, con respecto los 31.6 °C registrados a través de la P.S. y los 31.1 °C de la EMA, por lo que se infiere una reducción de 1.6 K como consecuencia del sistema adiabático. El M5 presenta una temperatura promedio de 25.3 °C lo que representa un decremento de 4.9 K al interior (Fig. 7-5).

El valor promedio de HR en el MC fue de 59.9%, disminuyendo en un 13.6% la temperatura al interior con respecto al valor registrado por la EMA. El M5 presentó una disminución de 2.8% con respecto al MC (Fig. 7-6).

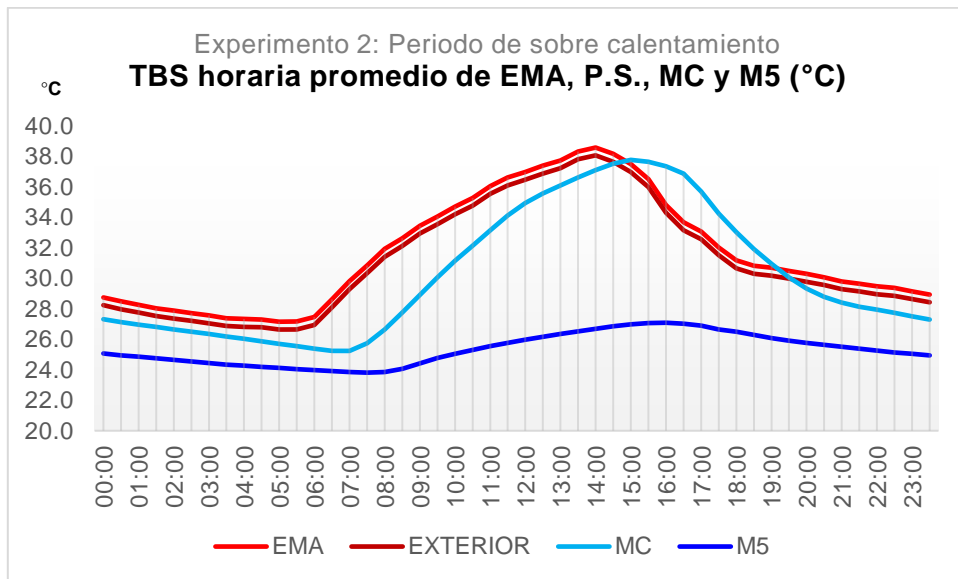


Fig. 7-5 Gráfica de TBS promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2. Fuente: Elaboración propia.

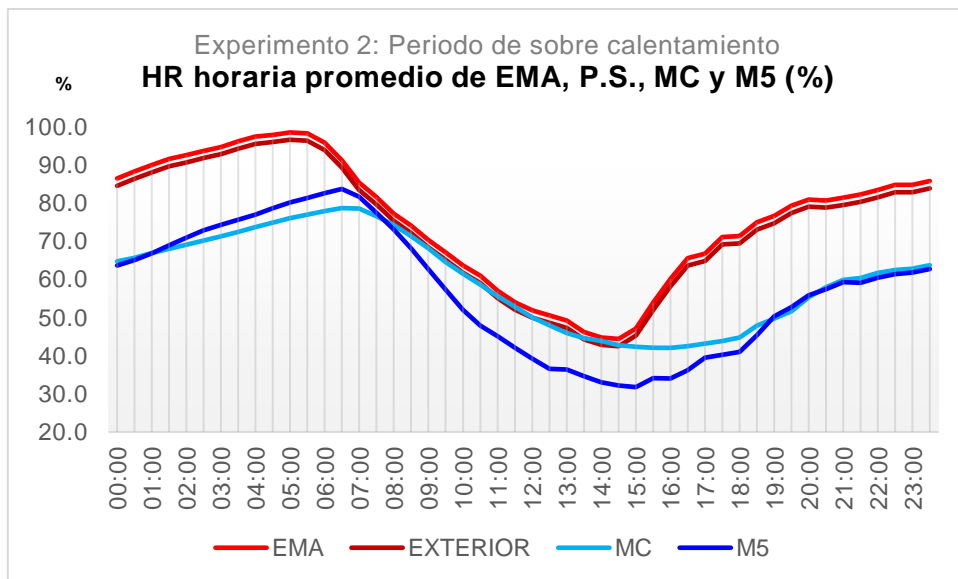


Fig. 7-6 Gráfica de HR promedio comparativa horaria de los valores obtenidos de la P.S., EMA, MC y M5 del experimento 2. Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de confort térmico para 5 K, el M5 permanece en confort durante el 92% del periodo investigado, mientras que, para un rango de 7 K, el porcentaje confort es del 100%. Es importante recalcar que el M5 cae por debajo de la zona de confort por 1 K durante 2 horas de 6:00 hrs a 8:00 hrs por lo que, si se considera mayor arropamiento, es posible obtener un 100% de confort.

En el análisis del P.E.M. el M5 del experimento 2 obtuvo 364.8 Wh/m² día y fue posible determinar que el sistema permanece el 100% en confort térmico, lo que en climas cálido-húmedos es un resultado favorable.

7.2.4 Conclusiones generales

Las pruebas realizadas permiten determinar la eficiencia de cada uno de los sistemas. Un último análisis es propuesto para conocer la correlación entre la temperatura del MC y los ME (Fig.7-7). Para ello se promediaron los valores horarios de los experimentos efectuados tanto en bajo como en sobrecalentamiento y se obtuvieron valores de temperatura media característicos en una jornada promedio. El factor de correlación (Tabla 7-1) permite verificar la coherencia de los resultados y gráficamente es posible apreciar el sistema que mejor desempeño demostró.

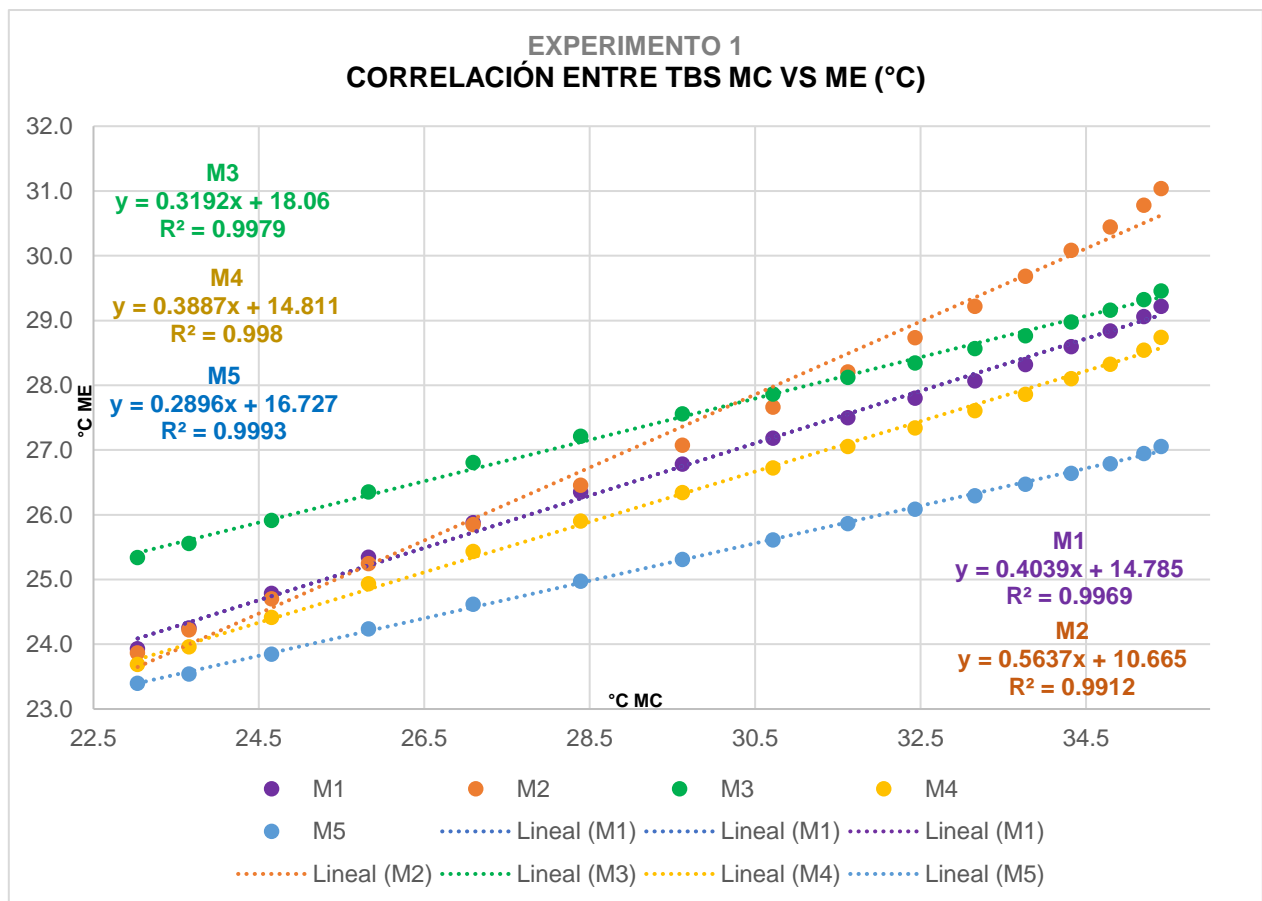


Fig. 7-7 Gráfica de correlación de TBS entre MC y ME del experimento 1. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los valores del coeficiente de correlación para cada módulo:

Tabla 7-1 Coeficientes de correlación de los ME VS MC. Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN PONDERADA	
MÓDULO	COEF. CORRELACIÓN
M1	0.99
M2	0.99
M3	0.97
M4	0.99
M5 (a)	0.99
M5 (b)	0.92

Los valores demuestran que existe una correlación alta entre las temperaturas, es decir, si el valor de la TBS del MC aumenta o disminuye, también los harán los ME.

Se realizó el análisis de 6:00 hrs a 15:00 hrs para que se mostrara únicamente el ciclo de incremento de temperatura. Se trazaron líneas de tendencia y es posible inferir que el M5 es el que mayor eficiencia o comportamiento obtuvo, debido a que presentó los menores registros de TBS. Posteriormente el M4, que posee la misma configuración que el M5, únicamente modificando la exposición nocturna. El M1, que es muy similar al M4 y M5 es el que presentó menor eficiencia, siguiendo con el M2 y el M3, que son idénticos en configuración, pero en el caso del M3 se integra el ERN.

Las ecuaciones para cada módulo permiten calcular matemáticamente la TBS en función del incremento o decremento de la TBS del MC. Como ejemplo, si se requiriera conocer la TBS al interior del M5 cuando la TBS del MC es de 25° C, entonces se realiza la siguiente operación: $y = 0.2896 (25^{\circ}\text{C}) + 16.727$ en donde la TBS del M5 sería de 23.96 °C. Gráficamente es posible de igual manera determinar la TBS en función del MC.

En el caso del experimento con material de cambio de fase, se analiza como elemento individual.

El coeficiente de correlación del experimento 2 es de 0.92 (Tabla 7-1, M5b). A continuación, se muestra la Fig.7-8 que contiene la ecuación de predicción para la TBS en función de la temperatura del MC.

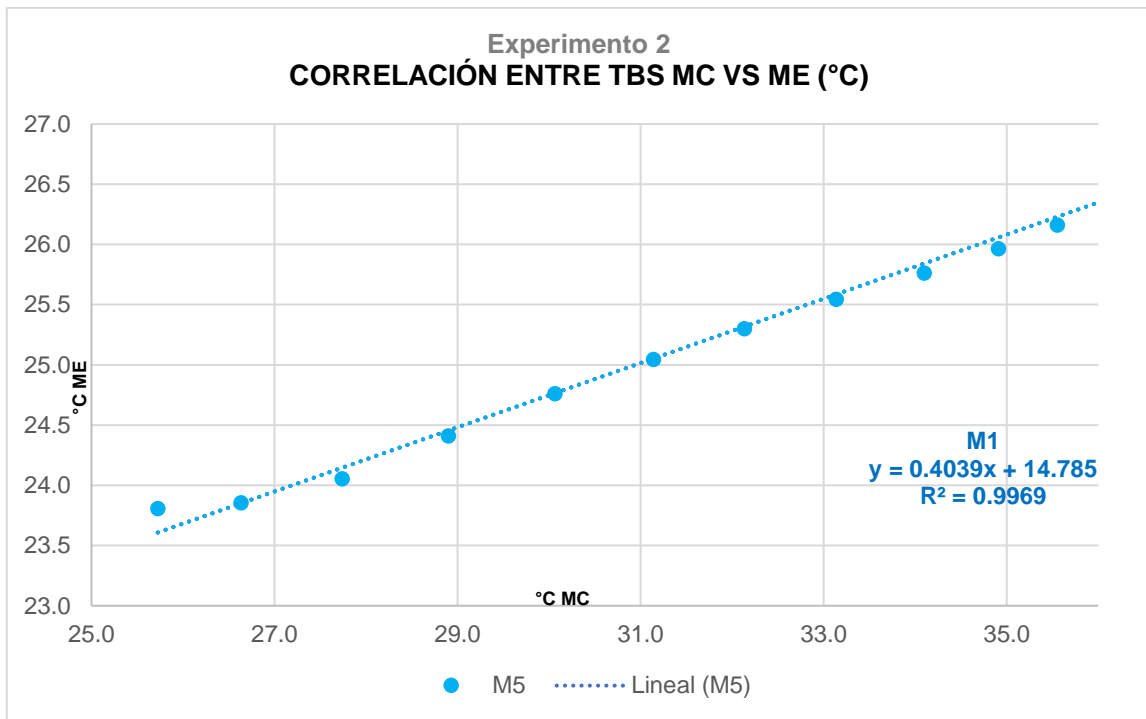


Fig. 7-8 Gráfica de correlación de TBS entre MC y ME del experimento 1. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación se presenta de la siguiente manera: $y=0.2667x + 16.747$. Si fuera necesario determinar cuál es la temperatura del M5 cuando la TBS del MC es de 25° C, entonces se realiza la siguiente operación: $y= 0.2667 (25° C) + 16.747$, en donde la TBS del M5 sería de 23.41°C.

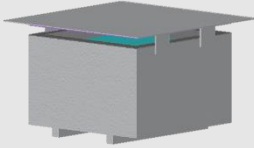
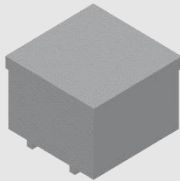
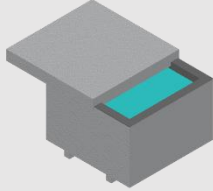
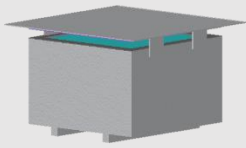
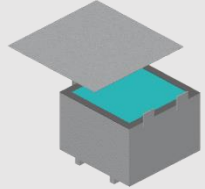
A continuación, se muestra la tabla resumen de ecuaciones para cada módulo (Tabla 7-2):

Tabla 7-2 Ecuaciones de tendencia para los experimentos 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.

ECUACIÓN DE TENDENCIA	
MÓDULO	ECUACIÓN
M1	$y= 0.4039x + 14.785$
M2	$y= 0.5637x + 10.665$
M3	$y= 0.3192x + 18.06$
M4	$y= 0.3887x + 14.811$
M5 (a)	$y= 0.2896x + 16.727$
M5 (b)	$y= 0.2667x + 16.747$

En la tabla 7.2 se muestra el resumen de los valores de temperaturas características, potencial de enfriamiento medio y porcentaje de confort.

Tabla 7-3 Resumen de valores de análisis de temperaturas características, P.E.M. y Confort térmico del experimento 1 durante el periodo de bajo y sobrecalentamiento. Fuente: Elaboración propia.

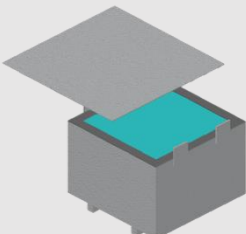
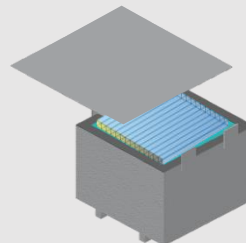
Módulo experimental (Masa térmica agua)	Bajocalentamiento				Sobrecalentamiento			
	DEC. TEMP.	P.E.M.	CONFORT TÉRMICO		DEC. TEMP.	P.E.M.	CONFORT TÉRMICO	
			5 K	7 K			5 K	7 K
M1 (EEI y PS) 	1.6 K	119.1 Wh/m ² día)	63.0 %	82.0 %	2.0 K	147.1 Wh/m ² día)	50.0 %	55.0 %
M2 (MT y AT) 	1.5 K	119.1 Wh/m ² día)	65.0 %	84.0 %	0.8 K	55.9 Wh/m ² día)	52.0 %	57.0 %
M3 (ERN y MT) 	0.9 K	67.0 Wh/m ² día)	100.0 %	100.0 %	0.6 K	43.3 Wh/m ² día)	27.0 %	39.0 %
M4 (EEI, MT y PS) 	1.7 K	126.6 Wh/m ² día)	57.0 %	82 %	2.6 K	192.2 Wh/m ² día)	62.0 %	70.0 %
M5 (ERN, EEI, MT y PS) 	2.5 K	186.1 Wh/m ² día)	50.0 %	69.0 %	3.7 K	275.5 Wh/m ² día)	90.0 %	100.0 %

Durante el periodo de bajo calentamiento el ME de menor desempeño fue el M3 (ERN y MT), sin embargo, mostró el mayor porcentaje de confort. Los sistemas que incluyen enfriamiento radiativo nocturno permiten reducir la oscilación y por lo tanto puede permanecer en la zona de confort durante un periodo mayor en periodo investigado. El M5 obtuvo el mejor desempeño ya que redujo la TBS interior en 2.5 K y obtener el P.E.M. más elevado, 213.8 Wh/m² día (Tabla 7-3).

En el caso de la prueba durante el periodo de sobrecalentamiento el ME de menor desempeño fue también el M3, en donde la temperatura decreció en 0.6 K, mientras que el M5, sistema más eficiente, redujo la TBS en 3.7 K. Obtuvo un P.E.M. de 316.4 Wh/m² día y valor de confort del 96%.

En la tabla 7-4 se aprecia la comparativa de valores de temperaturas características, potencial de enfriamiento medio y porcentaje de confort de los experimentos 1 y 2 durante el periodo de sobrecalentamiento.

Tabla 7-4 Resumen de valores de análisis de temperaturas características, P.E.M. y Confort térmico del experimento 1 y 2 durante el periodo de sobrecalentamiento. Fuente: Elaboración propia.

MATERIAL DE MASA TÉRMICA	Sobrecalentamiento			
	DEC. TEMP.	P.E.M.	CONFORT TÉRMICO	
			5 K	7 K
AGUA 	3.7 K	275.5 Wh/m ² día)	90.0 %	100.0 %
ACEITE DE COCO ENCAPSULADO EN POLICARBONATO 	4.9 K	364.8 Wh/m ² día)	92.0 %	100.0 %

La misma configuración de módulo que incluye ERN, EEI, MT y PS con dos tipos de materiales modifica de forma importante los resultados. En el caso del experimento 1 la reducción de la TBS con respecto al experimento 2 fue de 1.2 K, siendo el experimento 2 el de mejor desempeño. Por otra parte, el P.E.M. se diferencia por 102.6 Wh/m² día.

Tabla 7-5 P.E.M. en casos de estudio similares. Fuente: Adaptado de González, 2011 pp. 90

P.E.M. EN CASOS DE ESTUDIO SIMILARES		
INVESTIGADOR	TIPO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	P.E.M. Wh/m² día)
Givoni, B. (1981)	Estanque de agua sobre techo de concreto expuesto en periodo nocturno y aislamiento diurno (MT+EEI+ERN+AT)	320.0
Givoni, B. (1981)	Estanque de agua sobre techo de concreto, ventilado y sombreado (MT+EEI+PS)	274.0
González, E. (1989)	Estanque metálico con agua confinada en techo expuesto en periodo nocturno y aislamiento diurno (MT+ERN+AT)	275.5
González, E. (1989)	Techo de concreto expuesto al cielo durante la noche y aislado durante el día (MT+ERN+AT)	130.0
González, E. (1989)	Techo de concreto con tierra y capa de vegetación, riego dos veces por día (MT+EEI)	186.0
González, S. (2010)	Techo-estanque metálico con agua, ventilado y sombreado (EEI+PS)	319.2
González, S. (2010)	Techo estanque metálico con agua confinada expuesto en la noche, aislamiento durante el día (MT+ERN+AT)	198.1
González, S. (2010)	Techo estanque metálico con agua confinada, agua ventilada y sombreada (EEI+MT+PS)	257.1
González, S. (2010)	Techo estanque metálico con agua confinada, agua ventilada y sombreada expuesto durante la noche (EEI+ERN+MT+PS)	284.8
Carrillo, E. (2020)	Techo estanque metálico con agua ventilada y sombreada. Sistema expuesto durante periodo nocturno y aislamiento diurno (EEI+ERN+MT+PS)	275.5
Carrillo, E. (2020)	Techo estanque metálico con material de cambio de fase (aceite de coco) encapsulado en policarbonato de 6mm, placa ventilada y sombreada. Sistema expuesto durante periodo nocturno y aislamiento diurno (EEI+ERN+MT+PS)	364.8

En el experimento 2 se redujo la temperatura en 24% más con respecto al experimento 1 y presenta 100% de estado de confort, permitiendo corroborar que el aceite de coco es un material

viable como material de cambio de fase, sin embargo, la combinación de estrategias de enfriamiento que emplean techo-estanque, ha demostrado de igual manera ser eficiente para obtener confort térmico en climas cálido-húmedos, objetivo principal del presente trabajo.

Relativo a la eficiencia de los sistemas desarrollados, se muestra la Tabla 7-5 y Fig. 7-9 en donde se resumen diversas investigaciones realizadas que han evaluado SEEI por medio del P.E.M.

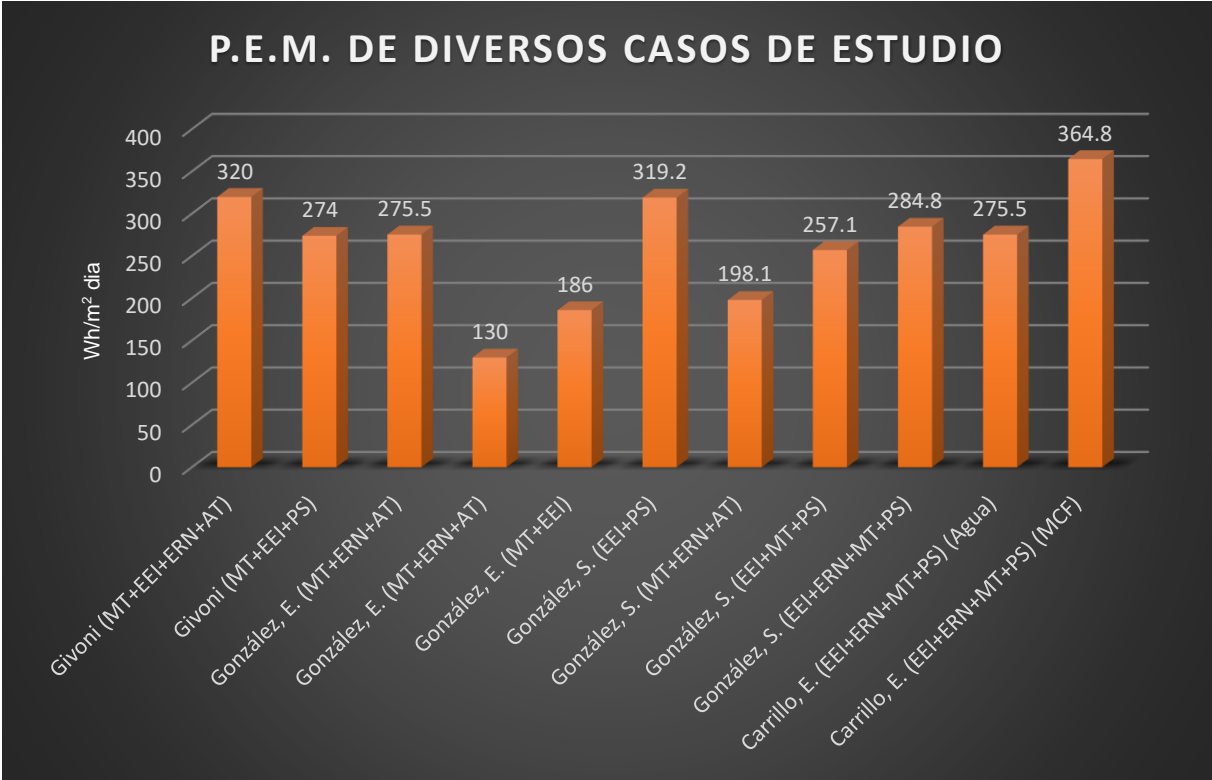


Fig. 7-9 P.E.M. de diversos casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Las investigaciones se realizaron en diferentes ubicaciones. Givoni desarrolló la prueba en Israel, mientras que González, E. y González, S. eligieron Venezuela. En el primer caso el clima es cálido-seco y el segundo es cálido-húmedo. Comparando con el estudio, Venezuela presenta 3 °C mayor de temperatura media anual y 7% de mayor HR. El mayor P.E.M. en el caso de González, S., fue en el caso del presente estudio el M1, mientras que en el presente trabajo fue el M5 (EEI + ERN + MT + PS). El P.E.M. más alto obtenido en Venezuela fue de 319.2 Wh/m2 día, mientras que el experimento con el material de cambio de fase obtuvo 364.8 Wh/m2 día, lo que demuestra el potencial del material para su empleo en sistemas pasivos para climas cálido-húmedos.

Los estudios de Isryad et. al. en el año 2016 fueron desarrollados en Indonesia, país que presenta una temperatura media anual de 26 °C y HR promedio de 80%, condiciones similares a la Ciudad de Mérida. Se evaluaron dos tipos de sistemas. El primero fue realizado empleando una película de aceite de coco de 8 cm sobre una lámina metálica de 2mm de espesor. Se obtuvo un decremento de temperatura de 2 K y en el segundo se empleó el MCF encapsulado dentro de tabiques, el sistema fue de pared. Al igual que en el primer experimento la reducción fue de 2 K. Realizando una comparación (Tabla 7-6) se puede concluir que la reducción de 4.9 K se debe a la combinación de diversas estrategias de enfriamiento y al material de cambio de fase que incluyen enfriamiento evaporativo indirecto y protección solar (Fig. 7-10).

Tabla 7-6 Decremento de temperatura en casos de estudio similares. Fuente: Elaboración propia.

CASOS DE ESTUDIO SIMILARES EMPLEANDO ACEITE DE COCO COMO SISTEMA PASIVO		
INVESTIGADOR	TIPO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	Dec. Temp.
Isryad, M. et. al. (2016)	Estanque con MCF (8cm) sobre techo estanque metálico expuesto con ventilación (MT+EEI)	2.0 K
Isryad, M. et. al. (2016)	MCF encapsulado (4 x 6cm) al interior de tabiques en muros. (MT)	2.0 K
Carrillo, E. (2020)	Techo estanque metálico con material de cambio de fase (aceite de coco) encapsulado en policarbonato de 6mm, placa ventilada y sombreada. Sistema expuesto durante periodo nocturno y aislamiento diurno (EEI+ERN+MT+PS)	4.9 K

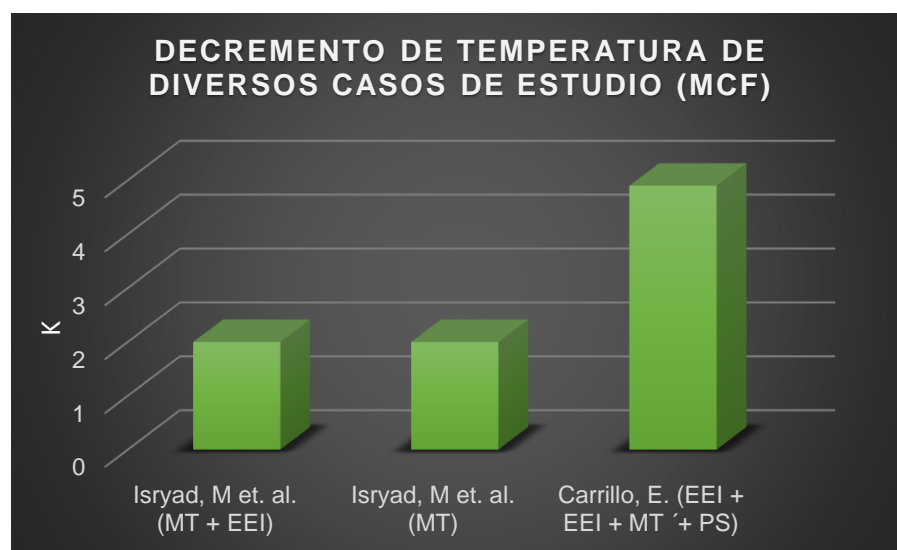


Fig. 7-10 Decremento de temperatura de diversos casos de estudio (MCF). Fuente:

7.3 Aportación al diseño

En climas cálido-húmedos las recomendaciones para mantener en confort térmico un espacio son: proveer sombreado, utilizar envolventes térmicas (livianas) y permitir la ventilación cruzada.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto no forman parte de las recomendaciones para el enfriamiento en este tipo de climas, sin embargo, se han realizado diversas investigaciones que permiten vislumbrar el potencial que estos sistemas representan.

La inspiración detrás de los trabajos ha sido el sistema de enfriamiento evaporativo indirecto, siendo el Skytherm, desarrollado y patentado en 1971 por Harold Hay, uno de los más conocidos. El sistema emplea como disipador de energía la cubierta de las edificaciones, misma que contiene un depósito con agua en la superficie completa "roof pond". Durante el día, la azotea se cubre con un material aislante y por la noche se retira para permitir la disipación del calor.

Las investigaciones se han desarrollado en climas cálido-secos, cálido-subhúmedos y cálido-húmedos demostrando su efectividad, siendo este el objetivo principal del trabajo.

La presente investigación realiza tres aportaciones principales:

- Comprueba la efectividad de los sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo indirecto que emplean agua como masa térmica en climas cálido-húmedos.
- Demuestra que el aceite de coco, empleado en la misma configuración, aumenta el potencial de enfriamiento para climas cálido-húmedos.
- Presenta las ecuaciones de tendencia para la predicción del comportamiento de cada uno de los módulos experimentales con respecto a la TBS del MC.

Las aportaciones otorgan herramientas a diseñadores para evitar el empleo de sistemas activos en las edificaciones, las cuales deben ser consideradas desde el proceso inicial de diseño.

Por otra parte, el conocimiento desarrollado de las estrategias de enfriamiento estudiadas contribuye a la enseñanza de recomendaciones bioclimáticas en climas cálido-húmedos para futuros diseñadores.

7.4 Recomendación para futuras investigaciones

- ❖ El estudio del comportamiento higrotérmico durante todo el año. Permite conocer el desempeño de los sistemas en escenarios importantes a considerar incluyendo lluvias y fenómenos especiales.
- ❖ El desarrollo de ecuaciones predictivas para cada sistema. Es importante para conocer el comportamiento evitando la realización de experimentos físicos.
- ❖ El estudio de diversos tipos de materiales de cambio de fase para la reducción de temperatura al interior de edificaciones. Los materiales de cambio de fase han sido ampliamente estudiados en la fabricación de sistemas activos y recientemente se han realizado investigaciones que consideran el aceite de coco como posible material para la configuración de sistemas pasivos de enfriamiento, mismo que podría contribuir a la disminución del empleo de sistemas activos.
- ❖ La variación en los espesores de los materiales de cambio de fase, así como la diversificación en el tipo de encapsulado, podría contribuir a la reducción de la temperatura interior en los espacios.
- ❖ La creatividad en la configuración de sistemas de cubiertas integrando diferentes estrategias pasivas de enfriamiento para garantizar la reducción de la temperatura al interior de edificaciones en climas cálido-húmedos
- ❖ El desarrollo de estudios de sistemas de enfriamiento pasivo en climas cálido-húmedos para contribuir al conocimiento práctico y por ende al ahorro y eficiencia energética.

Fuentes de consulta:

1. **Adqus, M.** (2013) Enhancing the Cooling Capacity of Roof Ponds Using Polyethylene Band Filter (Tesis de Maestría en Ciencias) Arizona State University, Arizona.
2. **Agrawal, P.** (1989) A review of passive systems for natural heating and cooling of buildings. Solar and Wind technology Vol. 6 No. 5 (557-567).
3. **Ahmad, I.** (1984) Improving the thermal performance of a roof pond system. Energy Convers. Vol. 25 (207-209).
4. **Ahmed, A.** (2006) Passive cooling of water at night in uninsulated open tank in hot arid areas. Energy conversion and Management No. 8 (93-100).
5. **Al-Hemiddi N.** (1999) The thermal performance of a Roof-Pond integrated to a building for heating during Cold-Winter Desert climate conditions in Saudi Arabia. Recuperado de:[<http://cyber.sci-hub.tw/MTAuMTA4MC8wMTQzMdc1MC4xOTk5Ljk2NzUzMTY=/alhemiddi1999.pdf>]
6. **Al-Jamal, K.** (1987) Passive cooling evaluation of roof pond systems. Solar and Wind Technology Vol. 5 (55-65).
7. **Al-Obaidi K. et al.** (2014) Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. Ed. Frontiers of Architectural Research 283-297. E.U.
8. **Alonso, E.** (2016) Sistemas pasivos. Apuntes de Arquitectura Bioclimática. Recuperado de: [https://www.academia.edu/15060862/SISTEMAS_PASIVOS.....1_SISTEMAS_PASIVOS]
9. **Anand, Y. et al.** (2014) Comparative thermal analysis of different cool roof materials for minimizing building energy consumption. Journal of Engineering. Hindawi Publishing Corporation.
10. **Ángeles, M.** (2016) Crisis energética mundial. Colegio Universitario Patagónico. Recuperado de: [<http://www2.ib.edu.ar/becaib/bib2006/trabajos/isgro.pdf>]
11. **Ashrae 55** (2013) Thermal Environmental Conditions for human occupancy. American National Standard.
12. **Ayoob, A. y Attalage, R.** (1991) Theoretical and experimental analysis of a simply designed solar retrofitting heating and cooling system. Renewable Energy Vol. 1 (513-518).
13. **Baer, S. y Mingenbach, W.** (2002) Patente No. 6,357,512 Passive heating and cooling system. New Mexico, E.U. United States Patent.
14. **Balcomb, D.** (1992) Passive solar buildings. MIT, E.U.
15. **Baruti, M., et. al.** (2019) Review of studies on outdoor thermal comfort in warm humid climates: challenges of informal urban fabric. International Journal of Biometeorology. 63:1449-1462.

16. **Belarbi, R. y Allard, F.** (2000) Development of feasibility approaches for studying the behavior of passive cooling systems in buildings. *Renewable energy* No. 22 (507-524).
17. **Banco Mundial** (2016) Consumo eléctrico mundial 1970 – 2016. Recuperado de: [<https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2014&locations=MX&start=1960&view=chart>].
18. **Bencheikh, H. y Bouchair, A.** (2003) Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. *Renewable Energy* No. 29 (1877-1886)
19. **Bencheikh, H.** (2007) Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chauds et arides. (Tesis de doctorado en Ciencias) Université Mentouri de Constantine. Département d'architecture et d'urbanisme, Argelia.
20. **Bencheikh, H.** (junio de 2013) Full scale experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*. Vol. 2, (6) 170-180.
21. **Blender, M.** (2015) El confort térmico. Recuperado de: [<http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>]
22. **Bourne R. y Springer, D.** (1992) Patente no. 5,174,128 Energy-saving protected roof systems. California, E.U. United States Patent.
23. **Bravo, G. et al.** (2008) Condiciones de confort térmico en la vivienda bioclimática prototipo VBP-1. *Revista Portafolio* Vol. 2 No. 18 (53-62).
24. **Campos, G.** (2010) *Introducción al arte de la Investigación Científica*. México, Porrúa.
25. **Campos, G. y Sosa V.** (2011). *Estrategias metodológicas para la elaboración de tesis de posgrado*. México. Porrúa.
26. **Chandra, S.** (1982) Solar Thermal Modelling of a building with Roof Pond and Ventilation Control. *Building and Environment* Vol. 17 (273-284).
27. **Chandra, S. et al.** (1985) Thermal performance of a Non-air-conditioned building for passive solar air-conditioning. Evaluation of roof cooling systems. *Energy and Buildings* No. 8 (51-69).
28. **Chu, S. y Boon-Long, P.** (1992) Design optimization of passively cooled room. *Energy Engineering* (18-37).
29. **Chungloo, S. y Limmeechokchai, B.** (2006) Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of a solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building and Environment* No. 47 (3341-3351).

30. **Cruz, E. y Krüger E.** (septiembre 2013) Enfriamiento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas. Recuperado de: [<http://www.infohab.org.br/encac/files/2013/topico8artigo7.pdf>]

31. **Dhiman, N. et al.** (1982) Cooling by evaporation of flowing water over a hollow roof. *Applied Energy* No. 10 (197-120).

32. **Djongyang, R. et. al.** (2010) "Thermal comfort: A review paper". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, no. 9 pp 2626-2640.

33. **EasyLog USB Software** (2018). Software para EasyLog. Recuperado de: [<https://www.lascarelectronics.com/software/easylog-usb/>]

34. **Elías, P.** (2008) Potential for the implementation of evaporative cooling in a subhumid warm climate through the use of the humidex index. PLEA Conference on Passive and Low Energy Architecture.

35. **Esparza, C.** (2015) Estudio experimental de dispositivos de enfriamiento evaporativo indirecto para un clima cálido sub-húmedo. (Tesis de Doctorado en Arquitectura). Universidad de Colima, México.

36. **Fergus, N.** (2004) Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings* No. 36 (628-637).

37. **Fernández, A.** (2014) Characterization of a Thermal Comfort in a passively cooled building located in hot-arid climate. Proceedings of 8th Windson Conference. Counting the Cost of Comfort in a changing world. Londres.

38. **Ganesh, S. y Arumugam, S.** (2015) Performance study of a laboratory model shallow solar pond with and without single transparent glass cover for solar thermal energy conversion applications. *Ecotoxicology and Environmental Safety* Vol. 134 Part 2 (462-466).

39. **García, E.** (1998) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM. Recuperado de: [http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf]

40. **García, J. et al.** (2009) Potential of Indirect Evaporative Passive Cooling with Embedded Tubes in a Humid Tropical Climate. Applications in a typical hot humid climate. PLEA 2009 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture (22-24).

41. **Ghosal, M. et al.** (2002) Modeling and experimental validation of a greenhouse with evaporative cooling by moving water film over external shade cloth. *Energy and Buildings* No. 35 (843-850).

42. **Givoni, B.** (1977) Solar heating and night radiation cooling by a roof radiation trap. *Energy and Buildings* No. 1 (141-145).
43. **Givoni, B.** (1984) Options and Applications of Passive Cooling. *Energy and Buildings* No. 7 (297-300).
44. **Givoni, B.** (1991) Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings* No. 18 (11-23).
45. **Givoni, B.** (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. New York: Wiley.
46. **Givoni, B.** (1997) *Climate considerations in building and urban design*. New York: ITP.
47. **Givoni, B.** (2009) Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy* No. 85 (1692-1726).
48. **Givoni, B.** (2014) Performance and applicability of a passive and low-energy cooling systems. *Energy and buildings* No. 17 (177-199).
49. **González, E.** (1997) Etude de materiaux et de techniques de refroidissement passif pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide. Tesis de Doctorado, Ecole de mines de Paris.
50. **González, E.** (2002) Enfriamiento radiativo en edificaciones. Universidad de Guadalajara. México.
51. **González, E. y Givoni, B.** (2004) Radiative and radiative/evaporative passive cooling systems for a hot humid climate - Maracaibo. *Memorias de Plea 2004 (1-6) Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Amsterdam.
52. **González, E. y Givoni, B.** (2005) Testing and modelling an evaporative passive cooling system in a hot humid climate - Maracaibo. *Proceedings of ISES 2005 Solar World*.
53. **González, E. y González, S.** (diciembre de 2013) Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. *Revista Ambiente Construido (versión electrónica)* Vol. 13, (4) Recuperado de: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167886212013000400011&lang=pt]
54. **González, E. y Krüger, E.** (2014) Evaluating the potential of an indirect evaporative passive cooling system for Brazilian dwellings. *Building and Environment* No. 87 (265-273).
55. **González, I.** (2011) Estudio experimental de comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo. Tesis de maestría. Universidad de Andalucía, España.

56. **Guarneros, L. y Velasco, A.** (2012) Eficiencia, accesibilidad y componentes de los sistemas de enfriamiento natural en regiones cálido-húmedas. *Revista Arquitectura, construcción y urbanismo sostenibles* No. 2 (40-46).
57. **Hernández, R.** (2014) *Metodología de la investigación*. Recuperado de: [<https://josedominguezblog.files.wordpress.com/2015/06/metodologia-de-la-investigacion-hernandez-sampieri.pdf>]
58. **Hay, H.** (1971) New roofs for hot dry regions. *Ekistics*. E.U.
59. **Hay, H.** (1971) Patente no. 3,299,589 Process and apparatus for modulating temperatures with in enclosures. California, E.U. United States Patent.
60. **Hay, H.** (2004) Patente No. 4,237,965 Process and apparatus for modulating temperatures in thermal storage. California, E.U. United States Patent.
61. **Herrera, L.** (Octubre de 2014a) Eficiencia de estrategias de enfriamiento pasivo en clima cálido seco. *Revista de Arquitectura*. Universidad Católica de Colombia. Vol. 16 (1), 86-95.
62. **Herrera, L.** (2014b) Porcentaje de horas de confort térmico con técnicas de enfriamiento evaporativo indirecto en techos estanque en clima árido. *Revista Hábitat Sustentable* V. 4 (46-55).
63. **HOBOWare** (2018) Software para HOBO U-12. Recuperado de: [<http://www.onsetcomp.com/hoboware-free-download>]
64. **Irsyad, M.** (2016) Heat transfer characteristics of coconut oil as phase change material to room cooling application 1st International Symposium on Green Technology for Value Chains 2016, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 60 (2017) 012027.
65. **Irsyad, M.** et. al. (2016) Heat transfer characteristics of building walls using phase change material. 1st International Symposium on Green Technology for Value Chains 2016, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 60 (2017) 012028.
66. **Jacobo, J.** (2004) Regulación climática pasiva para la edificación arquitectónica en el NEA. Recuperado de: [<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-089.pdf>]
67. **Jain, D.** (2006) Modeling of solar passive techniques for roof cooling in arid regions. *Building and environment* No. 41 (277-287).
68. **Juanicó, L.** (2007) A new design of roof-integrated water solar collector for domestic heating and cooling. *Solar energy* No. 82 (481-492).
69. **Juanicó, L.** (2009) New design of solar roof for household heating and cooling. *International journal of Hydrogen Energy* No. 35 (5823-5826).

70. **Kaushik, N. y Rao, S.** (1982) Non-convective roof pond for passive space heating. *Applied Energy* No. 12 (21-36).
71. **Kaushik, N. y Rao S.** (1983) Non-convective roof pond with movable insulation for passive solar space heating in cold climates. Recuperado de: [<https://dacemirror.sci-hub.tw/journal-article/f1a7db10d7d02d0c5da2f00e6d41ff4a/kaushika1983.pdf>]
72. **Khalifa, A.** (Julio de 2017) Effect of roof pond on the energy and exergy performance of a single space building. *Journal of Thermal Engineering*. Vol. 3 (1274-1293).
73. **Kharrufa, S. y Adil, Y.** (noviembre de 2006) Roof pond cooling of buildings in hot arid climates. *Building and Environment Journal*. Vol. 4, (3) 82-89.
74. **Koenigsberger, O. et al.** (1974). *Manual of Tropical Housing and Building*. Recuperado de: [<https://es.slideshare.net/yashu2211/manual-of-tropical-housingkoenigsberger-52000850>]
75. **Krüger, E. et al.** (2003) Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions. *Building and Environment* 107 (90-98).
76. **Krüger, E. y Givoni, B.** (2004) Predicting thermal performance in occupied dwellings. *Energy and Buildings* No. 36 (301-307).
77. **Krüger, E. et al.** (2009) Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate. *Building and Environment* 45 (1422-1433)
78. **Krüger, E. et al.** (septiembre de 2016) Evaluation of the cooling potential of a roof-pond system under subtropical conditions. *Revista Ambiente Construido (versión electrónica)* Vol.16, (3) Recuperado de [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212016000300107&lang=pt]
79. **Krüger, E. et al.** (2017) Proposition of a simplified method for predicting hourly indoor temperatures in test cells. Recuperado de: [<http://www.scielo.br/pdf/ac/v17n3/1678-8621-ac-17-03-0057.pdf>]
80. **Köppen, W.** (1936) Mapa mundial de clasificación climática. Recuperado de: [https://www.academia.edu/18354162/CLASIFICACIÓN_CLIMÁTICA_DE_KOEPPEIN]
81. **Kottke, M. et al.** (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification update. Recuperado de: [http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Paper_2006.pdf]
82. **Lapisa, R. et al.** (2014) Etude de l'impact des «cool roofs», de la ventilation naturelle et de l'inertie thermique du sol sur les performances énergétiques de bâtiments commerciaux. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Emmanuel_Bozonnet/publication/263850143_Etude_de_l'impact_des_cool_roofs_de_la_ventilation_naturelle_et_de_l'inertie_thermique_du_sol_sur_les_performances_energetiques_de_batiments_commerciaux/links/54538a240cf2cf51647c189f.pdf]

83. **Lomas, J. y Giridharan, R.** (2012) Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case study of hospital wards". *Building and Environment*, Vol 55 pp 57-72.
84. **Manzan, M. y Onorio, S.** (2001) Numerical analysis of heat and mass transfer in a passive building component cooled by water evaporation. *Energy and Buildings* No. 34 (369-375).
85. **Matzakaris, A. et. al.** (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperatura. *Int J. Biometeorology*. 43:76-84.
86. **Mihalakakou, J. O. y Santamouris, M.** (1996). On the heating potential of buried pipes techniques-application in Ireland. *Energy and Buildings*, 19-25.
87. **Morán, M.** (2011) Evaluación de un sistema pasivo de enfriamiento evaporativo y su relación costo-beneficio en viviendas para un clima cálido-húmedo. Trabajo de especialización en construcción de obras civiles. Universidad Rafael Urdaneta. Venezuela.
88. **Morillón, D.** (2002) Introducción a los sistemas pasivos de enfriamiento. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
89. **Mukram, T y Joseph, D.** (2015) Thermal análisis of PCM integrated building blocks for passive coolong application. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 376 (2018) 012015.
90. **Nayak, J. et al.** (1982) *The Relative Performance of Different Approaches to the Passive Cooling of Roofs.* Pergamon Press Ltd, Inglaterra.
91. **Nguyen, A. y Reiter S.** (2012) A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets. *Energy and Buildings* Vol. 68 (765-763).
92. **Oliver A. et. al.** (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de construcción* Vol. 62, 131-140.
93. **Oropeza, I. et al.** (2017) Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buidings* 145 (251-258).
94. **Pearlmutter, D. y Rosenfeld, S.** (2007) Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives. *Energy and Buildings* No. 40 (855-864).
95. **Pearlmutter, D. y Berliner, P.** (2017) Experiments with a 'psychrometric' roof pond system for passive cooling in hot-arid regions. *Energy and Buildings*. Recuperado de: [<https://sci-hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817311015>]
96. **Pisello, A.** (2014) Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. Recuperado de: [<http://www.mdpi.com/2071-1050/6/8/4706/htm>]

97. **Pittinger, L.** (1976) Patente No. 3,994,278 Energy Roof. Arizona, E.U. United States Patent.
98. **Raeissi, S. y Taheri, M.** (1995) Cooling load reduction of buildings using passive roof options. *Renewable Energy* Vo. 7 No. 3 (301-313).
99. **Raessi, S. y Taheri, M.** (1999) Skytherm: an approach to year-round thermal energy sufficient houses. *Renewable Energy* No. 19 (527-543).
100. **Rao, S. y Kaushika, N.** (1983) Winter temperature control in a non-airconditioned building with non-convective roof pond. *Energy Convers* Vol. 24 no. 1 (5-14).
101. **Rincón, J.** (2000) Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions. *Solar energy* Vol. 71 (71-80).
102. **Roslana, Q. et al.** (2016) 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. *Frontiers of Architectural Research* No. 5 (126-133).
103. **Runsheng T. et al.** (2002) Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings. *Renewable Energy* 28 (1513-1522).
104. **Sabzi, D. et al.** (2015) Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof. *Energy and Buildings* Vol. 109 (135-142).
105. **Sánchez, H.** (1993) Evaluación de un Techo Estanque como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo (Tesis de Maestría en Diseño Bioclimático). Universidad de Colima, Colima.
106. **Santamouris, M. et al.** (2004) *Cooling the cities*. Ed. École des mines de Paris. Les presses. Francia.
107. **Santamouris, M.** (2012) Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings* No. 57 (74-94).
108. **Sharifi, A. y Yamagata, Y.** (2015) Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied Energy* 160, 336-357.
109. **Shonerd, D.** (1981) Patente no. 4,247,399 Hydro-solar system for heating and cooling. California, E.U. United States Patent.

110. **SENER** (2016) Prospectiva del Sector Eléctrico 2016 - 2030. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177626/Prospectiva_del_Sector_El_ctrico_2016-2030.pdf]
111. **Sigworth, H.** (1982) Patente no. 4,338,991 Combined Solar heating and passive cooling apparatus. California, E.U. United States Patent.
112. **Sodha, M. et al.** (1980) Periodic Theory of an open roof pond. Applied Energy No. 7 (305-319).
113. **Sodha, M. et al.** (1981a) Experimental validation of Thermal Model of Open Roof Pond. Recuperado de: [https://dacemirror.sci-hub.tw/journal-article/4886c04dd96508f22c3c2aa1e9d666aa/sodha1981.pdf]
114. **Sodha, M. et al.** (1981b) Performance of trombe walls and roof pond systems. Applied Energy No. 8 (175-191).
115. **Spanaki, A.** (septiembre de 2007) Comparative studies on different type of roof ponds for cooling purposes: literature review. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century. Memorias de conferencias PALENC. Vol. 2, 1009-1015.
116. **Spanaki, A. et al.** (2010a) On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15 No. 8 (3523-3533).
117. **Spanaki, A. et al.** (2010b) Review of the Parameters affecting the selection of a roof pond variant for cooling purposes. Recuperado de [https://www.academia.edu/17999112/Review_of_the_Parameters_affecting_the_selection_of_a_roof_pond_variant_for_cooling_purposes]
118. **Spanaki, A. et al.** (2012) Theoretical and experimental analysis of a novel low emissivity water pond in summer. Solar Energy 86 (3331-3344).
119. **Spanaki, A.** (2014) Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer. Applied Energy No. 123 (273-280).
120. **Stevanovic, S.** (2013) Optimization of passive solar design strategies: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews No. 25 (177-196).
121. **Szokolay, S.** (1987) *Thermal design of buildings*. Royal Australian Institute of Architects. Australia.
122. **Tang, R. y Etzion, Y.** (2003a) On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings. Building and Environment 39 (201-209).

123. **Tang, R. y Etzion, Y.** (2003b) Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface. *Building and Environment* 39 (77-86).
124. **Tang, R. y Etzion, Y.** (2004) Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared. *Renewable Energy* No. 30 (1373-1385).
125. **Tejero, A. et al.** (2016) Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* No. 65 (727-742).
126. **Tiwari, G. et al.** (1981) A review - Cooling by water evaporation over roof. *Energy Convers Mgmt* Vol. 22 (143-153).
127. **Vázquez, J. et al.** (octubre de 2008) Cubiertas y estanques para optimizar el sistema pasivo de techo estanque metálico en clima cálido seco extremo: estudio experimental exploratorio. *Revista PALAPA*. Vol. 3, 43-54.
128. **Velmurugan, V. y Srithar, K.** (2007) Prospects and scopes of solar pond: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* No. 12 (2253-2263).
129. **Venkiteswaran, V. et al.** (2017) Comparative Study of Passive Methods for Reducing Cooling Load. *Energy Procedia* No. 142 (2689-2697).
130. **Vorster, J. y Dobson, R.** (noviembre de 2011) Sustainable cooling alternatives for buildings. *Journal of Energy in Southern Africa*. Vol. 22, (4) 48-66.
131. **Wonorahardj, S. et. al** (2018) Potencial of termal energy storage using coconut oil for air temperatura control. Recuperado de: [file:///C:/Users/eanas/Downloads/buildings-08-00095.pdf]
132. **Yadav, R. y Rao, D.** (1982) Digital simulation of indoor temperatures of buildings with roof ponds. *Solar Energy*, Vol. 31 No. 2 (205-215).
133. **Yannas, S. et al.** (2006) *Roof cooling techniques, a design handbook*. Ed. Earthscan, E.U.

Anexos

Anexo 1. Prueba piloto / Valores promedio de TBS horarios

TBS PROMEDIO HORARIA - PRUEBA PILOTO					
HORA	EXTERIOR	MC	M1	M2	M3
09:00	28.2	25.1	24.3	25.5	24.7
09:30	29.3	26.4	24.9	26.0	25.6
10:00	30.3	27.7	25.4	26.4	26.5
10:30	31.4	28.9	25.9	26.8	27.4
11:00	32.6	30.2	26.3	27.2	28.3
11:30	33.3	31.4	26.8	27.7	29.2
12:00	33.9	32.6	27.2	28.0	30.0
12:30	34.5	33.8	27.6	28.4	30.7
13:00	34.8	34.7	27.8	28.6	31.3
13:30	34.8	35.5	28.1	28.9	31.7
14:00	34.4	36.1	28.4	29.1	32.1
14:30	33.8	36.4	28.6	29.1	32.2
15:00	32.8	36.5	28.7	29.1	32.1
15:30	32.1	36.3	28.6	29.0	31.9
16:00	31.5	35.5	28.4	28.8	31.4
16:30	30.9	34.8	28.1	28.6	30.9
17:00	30.4	34.1	27.8	28.4	30.5
17:30	29.6	33.4	27.6	28.1	30.1
18:00	28.9	32.6	27.3	27.9	29.6
18:30	28.2	31.8	26.9	27.8	29.1
19:00	27.6	30.9	26.7	27.6	28.5
19:30	27.1	29.9	26.2	27.4	27.8
20:00	26.6	28.9	25.7	27.1	27.2
20:30	26.3	28.0	25.2	26.8	26.6

Anexo 2. Prueba piloto / Valores promedio de HR horarios

HR PROMEDIO HORARIA - PRUEBA PILOTO					
HORA	EXTERIOR	MC	M1	M2	M3
09:00	63.9	77.4	75.6	73.9	78.4
09:30	59.9	77.7	74.6	72.6	76.8
10:00	56.8	77.6	73.3	71.2	74.9
10:30	52.8	77.3	72.0	69.7	72.9
11:00	48.8	77.3	70.5	68.1	70.9
11:30	47.1	76.9	68.7	66.4	68.9
12:00	45.2	76.1	67.1	64.6	67.0
12:30	43.6	75.5	65.8	63.0	65.4
13:00	42.7	74.6	64.6	61.5	63.9
13:30	43.0	73.6	63.6	60.5	62.7
14:00	44.8	72.6	62.6	59.6	61.6
14:30	46.8	71.4	62.2	59.4	60.9
15:00	50.5	70.4	62.0	59.7	60.7
15:30	51.6	69.8	62.8	60.9	61.0
16:00	53.3	69.4	63.4	61.1	61.6
16:30	54.3	69.0	64.0	61.5	62.2
17:00	55.6	68.9	64.6	62.1	62.6
17:30	57.6	68.8	65.2	62.6	62.9
18:00	59.2	69.0	65.8	63.2	63.5
18:30	61.9	69.3	66.6	63.8	64.3
19:00	63.7	69.5	67.7	64.6	65.1
19:30	65.6	70.1	69.0	65.1	66.4
20:00	67.4	70.8	70.3	66.0	68.0
20:30	68.9	71.7	71.7	67.1	69.5

Anexo 3. Experimento 1 / Bajocalentamiento / Valores promedio horarios del MC, M1, M2, M3 y M4.

Hora	MC		M1		M2		M3		M4	
	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR
00:00	22.0	88.9	22.6	78.1	22.7	70.6	23.8	68.8	22.4	77.2
00:30	21.7	89.0	22.4	78.5	22.6	70.9	23.7	69.1	22.3	77.7
01:00	21.5	89.1	22.2	78.8	22.4	71.2	23.6	69.4	22.1	78.2
01:30	21.3	89.2	22.1	79.1	22.3	71.5	23.5	69.7	22.0	78.6
02:00	21.2	89.2	21.9	79.3	22.1	71.6	23.4	69.8	21.9	78.9
02:30	21.0	89.2	21.8	79.4	22.0	71.8	23.3	70.0	21.7	79.2
03:00	20.8	89.2	21.7	79.6	21.9	71.9	23.2	70.1	21.6	79.5
03:30	20.7	89.2	21.5	79.6	21.7	72.1	23.1	70.3	21.5	79.7
04:00	20.5	89.1	21.4	79.8	21.6	72.2	23.0	70.4	21.4	80.0
04:30	20.4	89.2	21.3	79.8	21.5	72.4	22.9	70.6	21.3	80.2
05:00	20.3	89.2	21.3	80.0	21.4	72.6	22.9	70.8	21.2	80.4
05:30	20.3	89.2	21.2	80.1	21.3	72.8	22.8	71.0	21.1	80.6
06:00	20.2	89.3	21.1	80.2	21.2	72.9	22.7	71.1	21.1	80.8
06:30	20.1	89.4	21.1	80.2	21.2	73.1	22.7	71.3	21.0	81.0
07:00	20.1	89.4	21.0	80.4	21.1	73.4	22.6	71.6	21.0	81.1
07:30	20.2	89.5	21.0	80.8	21.1	73.9	22.6	72.1	21.0	81.2
08:00	20.7	89.6	21.1	81.3	21.2	74.7	22.6	72.9	21.2	81.4
08:30	21.8	89.7	21.6	81.9	21.6	75.1	22.8	73.3	21.7	81.4
09:00	23.1	89.6	22.2	82.0	22.0	74.9	23.2	73.1	22.3	81.2
09:30	24.5	89.6	22.8	81.7	22.5	74.8	23.5	73.0	22.9	80.7
10:00	26.0	89.4	23.3	81.0	23.0	74.1	23.8	72.3	23.5	79.8
10:30	27.3	89.2	23.8	79.8	23.5	73.1	24.0	71.3	24.0	78.4
11:00	28.5	88.9	24.2	78.4	23.9	71.8	24.3	70.0	24.4	76.9
11:30	29.3	88.7	24.6	77.3	24.3	70.9	24.5	69.1	24.7	75.4
12:00	30.0	88.5	24.9	76.4	24.6	70.3	24.7	68.5	25.0	74.3
12:30	30.6	88.3	25.2	75.5	24.9	69.7	24.9	67.9	25.2	73.0
13:00	31.1	88.0	25.4	74.4	25.2	68.8	25.0	67.0	25.4	71.9
13:30	31.6	87.8	25.7	73.7	25.4	68.4	25.2	66.6	25.7	71.0
14:00	32.0	87.6	26.0	73.2	25.7	67.5	25.3	65.7	25.9	70.3
14:30	32.3	87.3	26.2	72.9	25.9	67.3	25.5	65.5	26.1	69.7
15:00	32.5	87.1	26.4	72.1	26.1	65.9	25.7	64.1	26.2	68.8
15:30	32.3	86.9	26.5	71.7	26.3	64.9	25.7	63.1	26.2	68.2
16:00	31.9	86.8	26.5	71.7	26.3	64.3	25.8	62.5	26.1	67.9
16:30	31.3	86.8	26.3	71.7	26.3	64.2	25.7	62.4	25.9	67.7
17:00	30.4	86.9	26.1	71.7	26.1	64.3	25.6	62.5	25.7	67.9
17:30	29.4	87.0	25.8	71.5	25.8	63.8	25.4	62.0	25.2	68.3
18:00	28.0	87.9	25.3	72.1	25.4	64.3	25.3	62.5	24.7	69.4
18:30	26.8	88.5	24.9	72.8	25.0	65.3	25.1	63.5	24.3	70.5
19:00	25.8	88.9	24.5	73.5	24.7	66.3	24.8	64.5	24.0	71.4
19:30	25.0	89.1	24.2	74.1	24.4	67.0	24.7	65.2	23.7	72.1
20:00	24.4	89.4	23.9	74.7	24.1	67.6	24.6	65.8	23.5	72.9
20:30	23.8	89.5	23.6	75.3	23.8	68.1	24.4	66.3	23.3	73.7
21:00	23.4	89.7	23.4	75.9	23.6	68.7	24.3	66.9	23.1	74.4
21:30	23.0	89.8	23.2	76.5	23.4	69.0	24.2	67.2	22.9	75.1
22:00	22.7	89.9	22.9	77.0	23.2	69.5	24.0	67.7	22.8	75.7
22:30	22.4	90.0	22.8	77.5	23.0	69.9	23.9	68.1	22.6	76.2
23:00	22.2	90.1	22.6	78.0	22.9	70.2	23.8	68.4	22.5	76.8
23:30	21.9	90.1	22.5	78.3	22.7	70.5	23.7	68.7	22.3	77.3
Mínimo	20.1	86.8	21.0	71.5	21.1	63.8	22.6	62.0	21.0	67.7
Máximo	32.5	90.1	26.5	82.0	26.3	75.1	25.8	73.3	26.2	81.4
Promedio	25.0	88.8	23.4	77.1	23.4	70.0	24.1	68.2	23.3	75.7

Anexo 4. Experimento 1 / Bajocalentamiento / Valores promedio horarios del M5 y la EMA.

Hora	M5		EMA					
	TBS	HR	Dirección de ráfaga (grados)	Dirección del Viento (grados)	Humedad relativa (%)	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura del Aire (°C)	Presión Atmosférica
00:00	21.7	75.8	106.9	80.6	80.2	-1.0	23.9	1018.0
00:30	21.6	76.1	102.5	119.2	81.5	-0.9	23.6	1017.9
01:00	21.5	76.3	120.6	112.0	82.5	-1.0	23.3	1017.9
01:30	21.4	76.6	133.3	113.8	82.9	-0.9	23.2	1017.7
02:00	21.3	76.8	118.9	132.2	84.0	-1.0	22.9	1017.6
02:30	21.2	77.0	112.0	107.6	84.9	-1.0	22.8	1017.4
03:00	21.1	77.2	111.4	93.0	85.7	-0.9	22.6	1017.2
03:30	21.0	77.3	139.1	119.7	86.5	-0.9	22.4	1017.2
04:00	21.0	77.4	122.8	103.7	87.3	-0.9	22.2	1017.2
04:30	20.9	77.5	114.1	83.4	87.3	-0.9	22.1	1017.3
05:00	20.8	77.6	90.2	78.2	87.8	-0.8	21.8	1017.4
05:30	20.8	77.7	101.4	81.5	87.7	-0.8	21.8	1017.7
06:00	20.7	77.9	101.3	102.6	88.0	-0.9	21.6	1018.0
06:30	20.7	78.0	134.2	113.4	87.7	0.0	21.7	1018.3
07:00	20.6	78.0	110.2	126.2	87.6	29.3	22.0	1018.6
07:30	20.7	78.1	105.3	157.4	83.6	100.6	23.2	1018.9
08:00	20.9	78.3	130.4	112.1	76.5	209.9	24.7	1019.2
08:30	21.3	78.6	120.5	108.8	69.0	349.8	26.2	1019.6
09:00	21.8	78.4	139.3	89.9	64.5	376.0	27.3	1019.8
09:30	22.2	78.0	143.8	99.4	60.4	472.4	28.3	1019.9
10:00	22.6	77.4	130.2	87.1	57.2	549.6	29.1	1019.9
10:30	23.0	76.7	128.5	79.1	53.3	620.0	30.0	1019.7
11:00	23.4	76.2	141.4	65.5	51.4	598.8	30.4	1019.4
11:30	23.6	75.5	126.1	58.8	50.0	634.5	30.8	1019.0
12:00	23.9	75.0	123.4	131.5	46.5	684.4	31.7	1018.3
12:30	24.1	74.4	141.7	79.0	46.4	671.4	31.7	1017.7
13:00	24.3	73.9	127.8	72.5	45.4	662.1	32.1	1017.2
13:30	24.4	73.3	130.5	110.7	43.4	647.3	32.7	1016.7
14:00	24.6	72.8	114.8	99.1	42.0	596.5	32.8	1016.3
14:30	24.7	72.3	125.6	136.5	43.0	465.3	32.7	1016.1
15:00	24.8	71.5	117.5	101.4	43.5	392.2	32.5	1016.0
15:30	24.8	71.1	110.5	118.0	45.3	290.0	32.0	1016.0
16:00	24.8	71.0	87.0	104.7	48.2	217.9	31.2	1016.1
16:30	24.7	71.1	77.0	114.7	50.7	143.9	30.4	1016.2
17:00	24.5	71.3	85.5	115.5	53.7	72.1	29.7	1016.4
17:30	24.2	71.3	81.2	115.7	58.1	12.9	28.7	1016.6
18:00	23.8	71.9	82.8	73.5	60.7	-1.0	27.7	1016.7
18:30	23.4	73.0	79.2	72.2	63.8	-0.9	27.1	1016.9
19:00	23.1	73.6	85.1	76.6	66.0	-0.9	26.7	1017.2
19:30	22.8	73.9	97.0	85.2	68.7	-0.9	26.4	1017.5
20:00	22.6	74.3	81.8	104.4	70.3	-0.9	26.1	1017.8
20:30	22.4	74.5	83.5	108.7	71.8	-1.0	25.8	1017.9
21:00	22.2	74.8	81.0	109.5	73.2	-1.0	25.6	1018.1
21:30	22.0	75.1	80.3	109.3	74.5	-0.9	25.4	1018.3
22:00	21.9	75.6	88.2	97.8	75.7	-1.0	25.0	1018.4
22:30	21.8	76.0	88.8	114.7	76.6	-1.0	24.8	1018.3
23:00	21.7	76.3	104.5	95.8	77.6	-1.0	24.5	1018.2
23:30	21.6	76.7	117.2	112.0	74.4	-1.0	24.2	1018.1
Mínimo	20.6	71.0	77.0	58.8	42.0	-1.0	21.6	1016.0
Máximo	24.8	78.6	143.8	157.4	88.0	684.4	32.8	1019.9
Promedio	22.5	75.4	109.9	101.8	68.1	182.8	26.6	1017.8

Anexo 5. Experimento 1 / Sobrecalentamiento / Valores promedio horarios del MC, M1, M2, M3 y M4.

Hora	MC		M1		M2		M3		M4	
	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR
00:00	28.2	62.2	28.3	54.0	28.5	57.9	29.8	51.3	27.7	52.9
00:30	27.9	63.1	28.2	54.3	28.3	58.5	29.7	51.4	27.6	53.1
01:00	27.7	64.4	28.1	54.7	28.0	59.4	29.5	51.4	27.4	53.4
01:30	27.4	65.5	27.9	55.2	27.8	60.2	29.3	51.5	27.3	53.7
02:00	27.2	66.6	27.8	55.6	27.6	61.0	29.2	51.5	27.1	53.9
02:30	26.9	67.7	27.6	56.0	27.4	61.6	29.0	51.6	27.0	54.2
03:00	26.7	68.8	27.5	56.4	27.2	62.3	28.9	51.6	26.8	54.4
03:30	26.5	70.0	27.3	56.7	27.0	63.1	28.7	51.6	26.7	54.6
04:00	26.3	71.2	27.2	57.1	26.8	63.9	28.6	51.7	26.6	54.9
04:30	26.1	72.3	27.1	57.4	26.6	64.6	28.4	51.8	26.5	55.2
05:00	26.0	73.5	27.0	57.7	26.5	65.3	28.3	51.9	26.3	55.4
05:30	25.8	74.5	26.9	58.0	26.4	65.9	28.2	51.9	26.2	55.6
06:00	25.7	75.4	26.8	58.0	26.2	66.4	28.1	51.9	26.1	55.8
06:30	25.6	76.2	26.7	58.2	26.1	67.0	28.0	51.9	26.1	56.1
07:00	25.6	76.0	26.7	58.5	26.3	67.5	28.0	52.0	26.1	56.7
07:30	25.9	74.1	26.9	58.7	26.6	67.1	28.1	52.3	26.4	57.3
08:00	26.6	71.8	27.4	58.5	27.2	66.3	28.5	52.4	26.8	57.6
08:30	27.5	68.9	28.0	57.9	27.8	65.0	29.0	52.3	27.2	57.6
09:00	28.5	65.6	28.5	57.3	28.5	63.2	29.5	52.2	27.5	57.4
09:30	29.6	62.1	29.0	56.6	29.2	60.6	30.1	52.1	28.0	56.9
10:00	30.8	58.9	29.4	55.7	29.9	58.0	30.7	52.1	28.3	56.5
10:30	31.9	56.1	29.8	54.9	30.7	55.4	31.1	52.1	28.7	56.2
11:00	33.0	53.1	30.2	54.3	31.4	52.8	31.5	52.3	29.1	55.8
11:30	34.0	50.3	30.4	53.3	32.1	50.3	31.8	52.4	29.4	55.5
12:00	34.9	47.5	30.7	52.4	32.9	47.7	32.0	52.3	29.7	55.2
12:30	35.7	45.5	30.9	51.3	33.5	45.7	32.3	52.3	30.0	55.1
13:00	36.4	43.4	31.2	50.7	34.2	44.0	32.5	52.3	30.3	55.0
13:30	37.1	42.1	31.5	50.2	34.7	42.8	32.8	52.3	30.5	54.8
14:00	37.6	41.3	31.7	49.5	35.2	41.9	33.0	52.3	30.8	54.8
14:30	38.1	40.3	31.9	49.0	35.6	41.1	33.1	52.3	31.0	54.9
15:00	38.3	39.8	32.0	49.1	36.0	40.7	33.3	52.2	31.3	54.8
15:30	38.5	39.6	32.1	48.8	36.2	40.2	33.3	52.3	31.5	54.2
16:00	38.6	39.5	32.2	48.1	36.2	40.4	33.4	52.1	31.6	53.3
16:30	38.5	40.0	32.1	48.2	36.1	40.8	33.4	52.0	31.7	52.4
17:00	38.2	40.7	32.0	48.0	35.9	41.2	33.4	51.7	31.6	51.7
17:30	37.7	41.3	31.8	48.3	35.5	41.9	33.3	51.4	31.5	51.4
18:00	37.1	42.2	31.5	48.7	35.0	42.7	33.2	51.0	31.4	51.0
18:30	36.4	45.3	31.2	48.7	34.3	44.0	33.0	50.8	31.1	50.6
19:00	35.6	47.2	30.9	49.0	33.4	45.9	32.7	50.9	30.7	50.3
19:30	34.4	49.1	30.5	49.4	32.4	48.1	32.2	51.0	30.2	50.4
20:00	33.1	52.9	30.0	49.9	31.5	50.2	31.7	51.1	29.7	50.7
20:30	32.0	55.4	29.6	50.6	30.9	52.2	31.3	51.2	29.4	51.1
21:00	31.0	57.3	29.3	51.3	30.3	53.9	31.0	51.4	29.1	51.5
21:30	30.3	57.8	29.1	52.0	29.9	55.3	30.7	51.6	28.9	51.8
22:00	29.7	59.2	28.9	52.6	29.5	56.4	30.5	51.7	28.7	52.1
22:30	29.2	59.9	28.8	53.2	29.2	57.0	30.3	51.8	28.5	52.3
23:00	28.8	60.3	28.6	53.5	29.0	57.2	30.2	52.0	28.3	52.4
23:30	28.5	61.2	28.5	53.7	28.7	57.5	30.0	52.0	28.1	52.5
Mínima	25.6	39.5	26.7	48.0	26.1	40.2	28.0	50.8	26.1	50.3
Máxima	38.6	76.2	32.2	58.7	36.2	67.5	33.4	52.4	31.7	57.6
Promedio	31.3	57.4	29.3	53.4	30.5	54.4	30.7	51.8	28.7	54.1

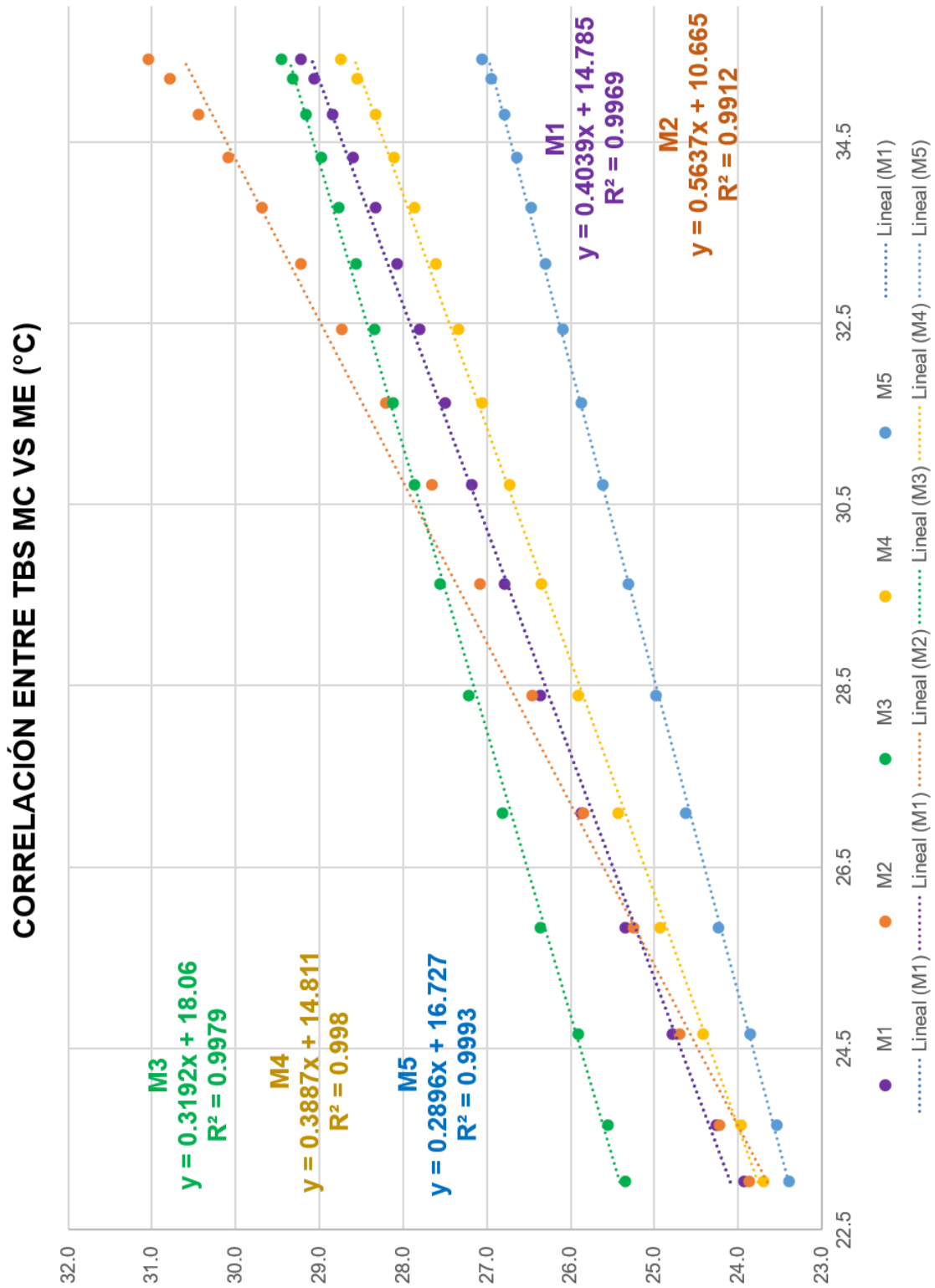
Anexo 6. Experimento 1 / Sobrecalentamiento / Valores promedio horarios del M5, P.S. y EMA.

Hora	M5		EXTERIOR		EMA					
	TBS	HR	TBS	HR	DIRECCIÓN DE RÁFAGA	DIRECCIÓN DEL VIENTO	HUMEDAD RELATIVA	RADIACIÓN	TEMPERATURA DEL AIRE	PRESIÓN ATMOSFÉRICA
00:00	27.4	63.6	29.7	75.3	151.1	85.8	74.6	-1.0	28.2	1011.0
00:30	27.3	65.1	29.4	76.8	153.4	89.6	76.1	-1.0	27.9	1010.9
01:00	27.2	66.8	29.0	78.5	160.1	93.7	77.8	-0.9	27.5	1010.8
01:30	27.1	68.9	28.8	80.6	152.1	96.5	79.9	-0.9	27.3	1010.7
02:00	27.0	70.9	28.5	82.6	181.4	99.5	81.9	-1.0	27.0	1010.5
02:30	26.9	72.8	28.2	84.5	158.9	97.5	83.8	-0.9	26.7	1010.3
03:00	26.8	74.3	28.0	86.0	155.3	96.0	85.3	-0.9	26.5	1010.2
03:30	26.7	75.6	27.8	87.3	154.2	95.8	86.6	-1.0	26.3	1010.0
04:00	26.6	77.0	27.6	88.7	153.2	91.7	88.0	-0.9	26.1	1010.0
04:30	26.5	78.6	27.5	90.3	145.9	91.1	89.6	-0.9	26.0	1010.0
05:00	26.4	80.1	27.3	91.8	135.1	87.6	91.1	-1.0	25.8	1010.0
05:30	26.4	81.3	27.2	93.0	139.2	86.6	92.3	-1.0	25.7	1010.2
06:00	26.3	82.6	27.1	94.3	148.1	87.1	93.6	-0.9	25.6	1010.4
06:30	26.2	83.7	26.9	95.4	146.8	88.1	94.7	10.8	25.4	1010.5
07:00	26.2	81.7	27.3	93.4	147.6	88.2	92.7	64.6	25.8	1010.9
07:30	26.1	77.5	28.0	89.2	157.7	95.0	88.5	164.3	26.5	1011.1
08:00	26.2	73.1	28.8	84.8	160.4	95.4	84.1	255.3	27.3	1011.3
08:30	26.4	68.1	29.7	79.8	177.4	100.3	79.1	320.9	28.2	1011.6
09:00	26.7	62.7	30.7	74.4	183.8	99.6	73.7	442.8	29.2	1011.6
09:30	27.1	57.3	31.5	69.0	198.3	104.2	68.3	520.8	30.0	1011.6
10:00	27.4	52.0	32.5	63.7	196.1	105.8	63.0	677.5	31.0	1011.5
10:30	27.6	47.9	33.3	59.6	204.7	112.2	58.9	703.6	31.8	1011.4
11:00	27.9	45.1	34.2	56.8	211.8	112.6	56.1	846.8	32.7	1011.3
11:30	28.1	42.1	34.8	53.8	213.4	103.5	53.1	875.7	33.3	1011.0
12:00	28.3	39.3	35.6	51.0	204.1	104.1	50.3	823.6	34.1	1010.7
12:30	28.5	36.6	36.3	48.3	203.6	100.4	47.6	880.4	34.8	1010.4
13:00	28.7	36.4	36.6	48.1	210.5	107.6	47.4	835.2	35.1	1010.0
13:30	28.8	34.6	36.6	46.3	240.6	106.8	45.6	791.7	35.1	1009.6
14:00	29.0	33.0	37.3	44.7	206.4	121.1	44.0	844.5	35.8	1009.3
14:30	29.2	32.2	37.5	43.9	179.4	92.2	43.2	651.4	36.0	1008.9
15:00	29.3	31.8	37.6	43.5	181.5	79.9	42.8	649.8	36.1	1008.5
15:30	29.4	34.1	37.7	45.8	181.1	101.8	45.1	651.8	36.2	1008.1
16:00	29.4	34.0	37.3	45.7	149.8	86.6	45.0	543.6	35.8	1007.8
16:30	29.3	36.2	37.1	47.9	140.8	117.5	47.2	511.7	35.6	1007.7
17:00	29.2	39.4	36.4	51.1	161.2	98.1	50.4	364.3	34.9	1007.6
17:30	29.0	40.3	35.8	52.0	134.6	100.2	51.3	256.6	34.3	1007.5
18:00	28.8	41.0	35.5	52.7	111.4	93.3	52.0	189.3	34.0	1007.6
18:30	28.6	45.3	34.5	57.0	114.9	113.3	56.3	115.6	33.0	1007.8
19:00	28.4	50.3	33.2	62.0	113.0	80.4	61.3	27.3	31.7	1008.4
19:30	28.2	52.7	32.7	64.4	107.1	76.8	63.7	8.8	31.2	1008.5
20:00	28.1	55.8	32.0	67.5	103.5	78.5	66.8	-0.8	30.5	1008.9
20:30	27.9	57.4	31.6	69.1	93.1	48.9	68.4	-0.9	30.1	1009.3
21:00	27.8	59.3	31.2	71.0	103.2	55.3	70.3	-0.9	29.7	1009.5
21:30	27.7	59.1	31.0	70.8	110.6	62.3	70.1	-0.8	29.5	1009.9
22:00	27.6	60.4	30.7	72.1	119.6	70.8	71.4	-0.9	29.2	1010.2
22:30	27.4	61.4	30.5	73.1	117.2	71.8	72.4	-0.9	29.0	1010.5
23:00	27.4	61.8	30.3	73.5	130.5	80.5	72.8	-0.9	28.8	1010.7
23:30	27.3	62.7	30.0	74.4	141.2	83.8	73.7	-1.0	28.5	1010.9
Mínima	26.1	31.8	26.9	43.5	93.1	48.9	42.8	-1.0	25.4	1007.5
Máxima	29.4	83.7	37.7	95.4	240.6	121.1	94.7	880.4	36.2	1011.6
Promedio	27.6	57.2	31.8	68.9	157.2	92.4	68.2	271.0	30.3	1009.9

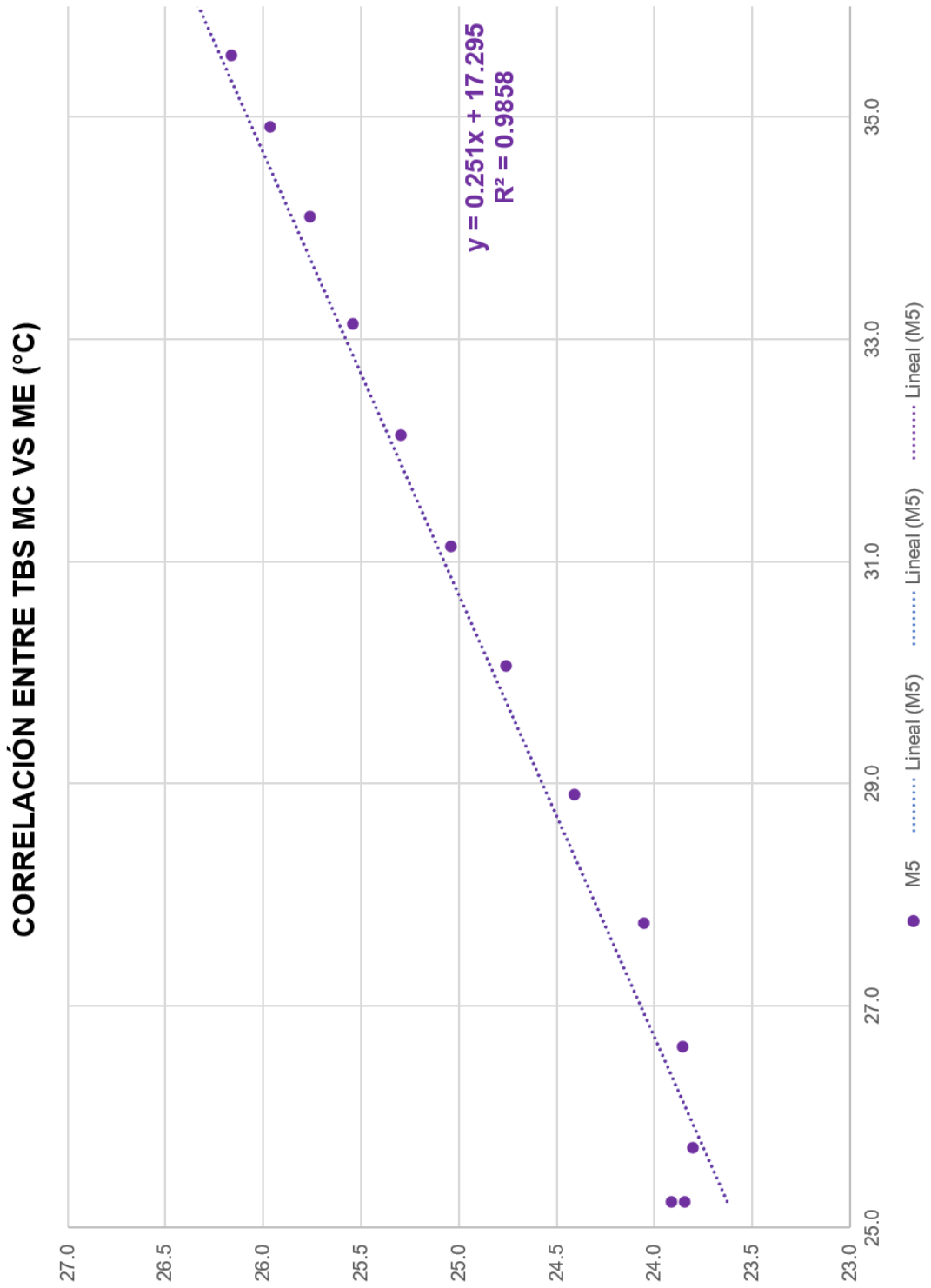
Anexo 7. Experimento 2 / Sobrecaentamiento / Valores promedio horarios del M5, P.S. y EMA.

Hora	MC		M5		EXTERIOR		EMA					
	TBS	HR	TBS	HR	TBS	HR	DIECR. RÁF.	DIREC. VIENTO	HR	RAD	TBS	P.A.
00:00	27.3	64.7	25.1	63.6	28.2	84.5	146.3	91.1	86.4	-0.8	28.7	1014.4
00:30	27.1	65.6	24.9	65.1	28.0	86.3	145.9	97.4	88.3	-0.8	28.5	1014.0
01:00	27.0	66.9	24.8	66.8	27.7	88.0	151.5	99.8	89.9	-0.9	28.3	1013.6
01:30	26.8	68.0	24.7	68.9	27.5	89.7	150.4	98.7	91.6	-0.9	28.0	1013.5
02:00	26.6	69.1	24.6	70.9	27.4	90.7	155.9	106.0	92.6	-1.0	27.9	1013.4
02:30	26.5	70.2	24.5	72.8	27.2	91.8	135.8	106.5	93.7	-1.0	27.7	1013.3
03:00	26.3	71.3	24.4	74.3	27.0	92.8	145.2	91.4	94.7	-1.0	27.6	1013.2
03:30	26.2	72.5	24.3	75.6	26.9	94.3	141.8	93.1	96.2	-1.0	27.4	1013.2
04:00	26.0	73.7	24.3	77.0	26.8	95.5	138.0	87.9	97.4	-0.9	27.3	1013.2
04:30	25.9	74.8	24.2	78.6	26.8	96.0	148.2	91.3	97.9	-1.0	27.3	1013.4
05:00	25.7	76.0	24.1	80.1	26.6	96.6	139.3	90.4	98.5	-1.0	27.1	1013.6
05:30	25.5	77.0	24.0	81.3	26.6	96.3	131.5	84.3	98.3	3.9	27.2	1013.8
06:00	25.4	77.9	24.0	82.6	26.9	93.9	134.8	90.5	95.8	52.6	27.5	1014.1
06:30	25.2	78.7	23.9	83.7	28.1	89.3	133.8	88.6	91.2	147.0	28.6	1014.4
07:00	25.2	78.5	23.8	81.7	29.3	83.4	156.2	96.4	85.3	252.2	29.8	1014.6
07:30	25.7	76.6	23.8	77.5	30.3	79.7	173.8	104.6	81.6	371.9	30.8	1014.8
08:00	26.6	74.3	23.9	73.1	31.4	75.3	185.9	106.0	77.3	491.3	31.9	1014.9
08:30	27.7	71.4	24.1	68.1	32.1	72.2	203.5	109.5	74.1	560.2	32.6	1015.1
09:00	28.9	68.1	24.4	62.7	32.9	68.4	208.7	112.3	70.3	676.4	33.4	1015.1
09:30	30.1	64.6	24.8	57.3	33.5	65.2	222.1	119.1	67.1	613.4	34.0	1015.2
10:00	31.1	61.4	25.0	52.0	34.2	61.7	205.6	110.8	63.6	767.1	34.7	1015.1
10:30	32.1	58.6	25.3	47.9	34.7	59.0	215.1	115.1	60.9	902.6	35.3	1014.9
11:00	33.1	55.6	25.5	45.1	35.5	55.1	200.1	111.7	57.0	947.9	36.0	1014.8
11:30	34.1	52.8	25.8	42.1	36.1	52.1	218.0	113.6	54.0	935.9	36.6	1014.6
12:00	34.9	50.0	26.0	39.3	36.5	50.0	212.8	111.5	51.9	612.6	37.0	1014.2
12:30	35.6	48.0	26.2	36.6	36.9	48.6	213.8	109.2	50.5	968.3	37.4	1013.9
13:00	36.1	45.9	26.3	36.4	37.2	47.3	202.2	130.6	49.2	916.7	37.7	1013.5
13:30	36.6	44.6	26.5	34.6	37.8	44.3	229.8	117.1	46.2	794.8	38.3	1013.0
14:00	37.1	43.8	26.7	33.0	38.0	42.8	192.8	123.9	44.8	811.6	38.6	1012.6
14:30	37.5	42.8	26.8	32.2	37.6	42.5	181.0	112.3	44.4	689.8	38.1	1012.4
15:00	37.7	42.3	27.0	31.8	37.0	45.2	142.8	139.0	47.1	473.4	37.5	1012.2
15:30	37.6	42.1	27.0	34.1	36.0	52.0	115.8	115.3	53.9	402.8	36.5	1012.1
16:00	37.3	42.0	27.1	34.0	34.3	58.2	95.9	166.3	60.1	304.0	34.8	1012.1
16:30	36.8	42.5	27.0	36.2	33.1	63.7	88.4	160.3	65.6	192.0	33.7	1012.4
17:00	35.7	43.2	26.9	39.4	32.5	64.8	92.9	125.8	66.8	125.8	33.1	1012.6
17:30	34.2	43.8	26.6	40.3	31.5	69.2	92.6	97.2	71.1	72.6	32.0	1012.9
18:00	33.0	44.7	26.5	41.0	30.7	69.4	134.4	101.2	71.3	47.6	31.2	1013.0
18:30	31.9	47.8	26.3	45.3	30.3	73.0	104.8	71.7	74.9	11.0	30.8	1013.2
19:00	30.9	49.7	26.1	50.3	30.2	74.7	98.5	94.0	76.6	-0.7	30.7	1013.4
19:30	30.0	51.6	25.9	52.7	30.0	77.4	119.5	105.1	79.3	-0.8	30.5	1013.7
20:00	29.3	55.4	25.8	55.8	29.8	79.0	114.1	91.8	80.9	-0.9	30.3	1013.8
20:30	28.8	57.9	25.6	57.4	29.6	78.8	137.8	124.9	80.7	-0.8	30.1	1013.9
21:00	28.4	59.8	25.5	59.3	29.3	79.5	147.9	85.0	81.4	-0.8	29.8	1014.1
21:30	28.1	60.3	25.4	59.1	29.1	80.3	117.9	108.6	82.3	-0.8	29.6	1014.3
22:00	27.9	61.7	25.2	60.4	29.0	81.5	136.4	92.0	83.4	-0.9	29.5	1014.4
22:30	27.7	62.4	25.1	61.4	28.8	82.8	126.4	101.8	84.8	-0.6	29.4	1014.6
23:00	27.5	62.8	25.0	61.8	28.6	82.8	135.8	101.9	84.8	-0.7	29.1	1014.6
23:30	27.3	63.7	24.9	62.7	28.4	83.8	132.4	84.4	85.8	-0.7	28.9	1014.5
Mínima	25.2	42.0	23.8	31.8	26.6	42.5	88.4	71.7	44.4	-1.0	27.1	1012.1
Máxima	37.7	78.7	27.1	83.7	38.0	96.6	229.8	166.3	98.5	968.3	38.6	1015.2
Promedio	30.2	59.9	25.3	57.2	31.1	73.5	153.2	106.0	75.4	273.5	31.6	1013.8

Anexo 8. Gráfica de correlación de experimento 1



Anexo 9. Gráfica de correlación de experimento 2



Anexo 10. Ficha técnica de Foamular



FOAMULAR®

Ahorro de Energía, Resistente a la Humedad Aislante de Poliestireno Extruido



DESCRIPCIÓN

FOAMULAR® es un aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido en paneles manufacturados por el proceso H3, exclusivo de Owens Corning. Tiene una superficie lisa y una estructura de celdas cerradas con paredes que se interadhieren unas con otras sin dejar huecos. El producto se fabrica en diferentes resistencias a la compresión para satisfacer todas las necesidades del constructor: 1.76 Kg/cm² (25 lb/in²), 2.81 Kg/cm² (40 lb/in²), 4.22 Kg/cm² (60 lb/in²) y 7.03 Kg/cm² (100 lb/in²).

VENTAJAS

Alta resistencia a la humedad y vapor: • Por su exclusiva estructura de celdas cerradas no permite espacios por donde se filtre el agua.
• No favorece la condensación. • Es lavable y puede pintarse.

Valor R estable a largo plazo: • Valor R de 5 por pulgada de espesor a una temperatura de 24°C (75°F). • Resiste temperaturas hasta 74°C (165°F). • Garantiza su uniformidad térmica por 20 años.

Versátil: • Muy ligero, fácil de cortar, manejar, instalar y almacenar. • Alta resistencia a la compresión. • Excelente estabilidad dimensional. • Aspecto agradable.

Comportamiento al fuego: FOAMULAR® contiene un aditivo retardador de flama que inhibe la ignición del producto y no propaga el fuego.

USOS Y APLICACIONES

Debido a sus excelentes propiedades, FOAMULAR® es utilizado en una gran diversidad de aplicaciones; se adapta a todos los sistemas constructivos de muros, techos y pisos.

Es compatible: • Con sistemas de construcción tradicional de muros de block o ladrillo, muros de concreto y muros de bastidores metálicos o de madera. • Su uso en pisos y bajo losas de concreto es excelente. • En sistemas de techos de concreto y metálicos, con sistemas de impermeabilización o debajo de acabados, por ejemplo tejas de barro. • También con sistemas de cubiertas metálicas compuestas o sencillas. • Por lo tanto debe ser considerado para aislar térmicamente: viviendas, bodegas y naves industriales, centros comerciales, restaurantes y hoteles, hospitales y laboratorios, frigoríficos y transportes refrigerados, así como también para naves de confinamiento de animales, principalmente aves y cerdos, en el sector agropecuario.

LIMITACIONES

• FOAMULAR® se adapta a casi todas las aplicaciones donde la temperatura no supera los 74°C (165°F). Por lo que no se recomienda colocarlo en contacto con chimeneas, calefactores, tuberías de vapor y otras superficies que puedan alcanzar una temperatura mayor a los 74°C (165°F). • No debe quedar expuesto (sin acabado) en instalaciones exteriores. • Para asegurar la calidad óptima de FOAMULAR®, durante el embarque, el almacenaje, la instalación y su uso, debe seguir todas las recomendaciones del fabricante.

PROPIEDADES ^{1*}

PROPIEDADES	PRODUCTO / VALORES			
	Método ASTM ^{2*}	Foamular 250/AGTEK	Foamular 400	Foamular 600
Conductividad térmica K W/m·K (Btu in ² ·F ft·h) máxima	C318 @ 24°C (75°F)	0.0288 (0.20)	0.0288 (0.20)	0.0288 (0.20)
@ Temperatura media de 24 °C (75°F)	C318 @ 4.4°C (40°F)	0.0259 (0.18)	0.0259 (0.18)	0.0259 (0.18)
Resistencia térmica R (Valor R) m ² ·K/W (F ft ² ·h/Btu) mínima	C318 @ 24°C (75°F)	0.88 (5.0)	0.88 (5.0)	0.88 (5.0)
@ Temperatura media de 24 °C (75°F)	C318 @ 4.4°C (40°F)	0.95 (5.4)	0.95 (5.4)	0.95 (5.4)
Valor de resistencia a la compresión especificado mínima kg/cm ² (lb/in ²) ³	D1621	1.76 (25)	2.81 (40)	4.22 (60)
Valor de resistencia a la flexión mínima kg/cm ² (lb/in ²) ⁴	C203	5.27 (75)	8.08 (115)	80.15 (140)
Absorción de agua máximo % por volumen ⁵	C272	0.10	0.05	0.05
Permeabilidad al vapor de agua máxima perm ⁶	E96	1.10	1.10	1.10
Afinidad al agua	Hidrofóbico			
Capilaridad	Ninguna			
Estabilidad dimensional máxima % de variación	D2126	2.0	2.0	2.0
Coefficiente lineal de expansión térmica máxima in/in °F ⁷	E228	3.5x10 ⁻⁴	3.5x10 ⁻⁴	3.5x10 ⁻⁴
Propagación de la flama ^{8,9}	EB4/UL 723	5	5	5
Desarrollo de humo ^{10,11}	EB4/UL 723	45-175	45-175	45-175
Índice de oxígeno mínimo % vol ¹²	D2863	24	24	24

¹Las propiedades que aquí señalamos se comprobaron en recientes pruebas de calidad del producto y representan valores del material con 2.54 cm (1 in) de espesor. ²De acuerdo a lo referenciado en la especificación estándar ASTM C578. ³Valor de rendimiento a 10%. ⁴Valor de rendimiento a 5%. ⁵El valor real de permeabilidad al vapor de agua baja al aumentar el espesor. ⁶El uso de decimales en el valor que se indica es por el nivel de precisión del examen que se practica. ⁷Estos experimentos de laboratorio no intentan demostrar el peligro que podría representar este material en caso de incendio. ⁸Información certificada por: Underwriters Laboratories Inc, U-197. ⁹La clasificación ASTM E 84 depende del espesor del producto, por eso demuestra un rango de valores. ¹⁰NOTA: Otros aislantes térmicos publican valores R iniciales, con los cuales no se recomienda trabajar, pues se degradan al paso del tiempo, además de que su poca resistencia a la humedad abata, también, su valor R.

PRESENTACIÓN

Presentación	Ancho		Largo		Espesor		Valor R
	cm	(in)	cm	(in)	cm	(in)	
*Borde Recto					1.905	(0.75)	3.75
					2.54	(1)	5
					3.81	(1.5)	7.5
					5.08	(2)	10
Traslape					6.35	(2.5)	12.5
					7.62	(3)	15
					10.16	(4)	20

*Espesor de 1.905 (0.75in) solo se fabrica con Borde Recto. ¹³Disponible en largos especiales. (Pregunta a tu asesor de ventas).

NORMATIVIDAD

ASTM C-578

	Tipo IV ¹	Tipo VI ²	Tipo VII ³
FOAMULAR 250	X		
FOAMULAR 400	X	X	
FOAMULAR 600	X	X	X

El Poliestireno extruido FOAMULAR® cumple con las siguientes normas y estándares:

- ASTM C-578
- Underwriters Laboratories, INC.: Certificado de clasificación U-197.
- Reporte de códigos: BOCA 9071; ICBO 3628; SBCCI 8965.
- Cumple con los requisitos del boletín de uso de materiales HUD No.17 para revestimientos.
- Foamular 250 cuenta con certificación ONNOCCE NOM-018-ENER-2011 y Sello FIDE.
- Aprobado por los laboratorios de investigación de "Home Innovation" en el programa "NGBS Green Certified".



20 años de garantía contra defectos de fabricación

ERÉNDIRA ANAIS CARRILLO SALAS

ARQUITECTO

ESTUDIOS

- 2010 Carrera: Arquitectura**
Universidad Anáhuac
Especialidad en Construcción
- 2014 Especialidad en diseño de arquitectura bioclimática**
UAM – Azcapotzalco
- 2015 Diplomado – Taller Internacional Métodos y procedimientos de certificación y normatividad para la edificación sustentable**
UNAM - Ciudad Universitaria
- 2016 Maestría en diseño de arquitectura bioclimática**
UAM- Azcapotzalco

PUBLICACIONES

- **“Arqueoacústica: una disciplina en desarrollo”** Revista de diseño y tecnología UAM-A (2014)
- **“Metodología experimental para el análisis de condiciones acústicas de confort en sitios prehispánicos, caso de estudio: La Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Xochicalco, Morelos”**
Revista de Seminario de Investigación (2014)
- **“Evaluación de sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto en clima cálido-húmedo durante el periodo de sobrecalentamiento”**
ANES (2019)
- **“Characterization of Passive Cooling Systems for an Extreme Hot Humid Climate”**. CATE, Comfort at the extremes. (2019)

CV