



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.
Maestría en Arquitectura. Campo de Conocimiento Tecnología

SUPERFICIES TÉRMICAMENTE ACTIVAS

Aplicación de enfriamiento hidrónico para el trópico húmedo

TESIS que para optar por el grado de Maestra en Arquitectura, presenta:

Nicolle Tames Espinoza

Directora de tesis:

Dra. Dolora Ana Flores Sandoval - Facultad de Arquitectura

Comité Tutor

Mtro. Arturo Valeriano Flores. Facultad de Arquitectura
Dr. José Luis Bermúdez Alcocer. Facultad de Arquitectura
Dr. José Diego Morales Ramírez. Facultad de Arquitectura
Mtro. Leonardo Bernando Zeevaert Alcantara. Facultad de Arquitectura

Ciudad Universitaria, CD. MX, octubre 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, CAMPO DE CONOCIMIENTO DE TECNOLOGÍA

TUTORA: DRA. ANA FLORES SANDOVAL

ARQ. NICOLLE TAMES ESPINOZA

SUPERFICIES TÉRMICAMENTE ACTIVAS

(APLICACIÓN DE ENFRIAMIENTO HÍDRICO PARA EL TRÓPICO HÚMEDO)

MÉXICO MMXVII



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.
Campo de Tecnología

SUPERFICIES TÉRMICAMENTE ACTIVAS

(Aplicación de enfriamiento hidrónico para el trópico húmedo)

Tesis para optar por el Grado de: Maestría en Arquitectura

PRESENTA:
Arq. Nicolle Tames Espinoza

UNAM - 2017 - MÉXICO

Directora de tesis:

Dra. Dolores Ana Flores Sandoval

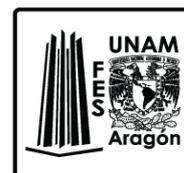
Sinodales:

Mtro. Leonardo B. Zeevaert Alcántara

Mtro. Arturo Valeriano Flores

Dr. José Luis Bermúdez Alcocer

Dr. José Diego Morales



Agradecimiento

A Dios, por darme esta oportunidad.

A la Dra. Ana Flores por su paciencia, dedicación, motivación y aliento. Ha sido un privilegio contar con su guía y ayuda en todo este trayecto. A mis sinodales y maestros con los que he tenido el placer de tomar clases y me han apoyado en mi investigación.

A la UNAM por el apoyo PAEP recibido para la asistencia a la capacitación en la empresa GIACOMINI en Barcelona, España. A la empresa GIACOMINI en especial al Ing. Sergio Espiñeira por su atención y apoyo. Asimismo, al Instituto Meteorológico de Costa Rica, al Posgrado de Arquitectura y a la empresa ALVIMUNDO.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para realizar esta investigación.

Dedicatoria

A mis padres, a mis hermanas y a mi sobrina Jimena, por todo el apoyo incondicional en la investigación.

A mi familia y amigos que han sido parte de este proceso.

A Valentín, por el apoyo y la enseñanza de salir adelante ante cualquier situación.

I

INTRODUCCIÓN

11

A

ANTECEDENTES

21

1

ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA

31

Variables climáticas
Modos de transferencia de calor
Balance térmico
Bienestar térmico
Conclusiones

2

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO HIDRÓNICO

49

Definición
Criterios de diseño
Estudios de Caso
Conclusiones

3

MARCO CONTEXTUAL

73

San José, Costa Rica
Climatología en la Región Central
Estrategias de diseño local
San Jose, Costa Rica – Ciudad de Mexico, Mexico
Conclusiones

4

DISEÑOS EXPERIMENTALES

85

Análisis del comportamiento térmico
Módulos experimentales
Simulación

5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

105

Análisis del comportamiento térmico
Experimento Módulos
Simulación

C

CONCLUSIONES

169

Aplicaciones del sistema
Futuras líneas de investigación

A_P

APORTACIÓN

174

G

GLOSARIO

176

A_N

ANEXOS

179

Caso Giacomini, España: Comportamiento térmico en un espacio multifuncional

R

REFERENCIAS

183

Resumen

La siguiente investigación realizó un análisis del sistema de enfriamiento hidrónico en conjunto con estrategias pasivas de diseño para mejorar las condiciones térmicas y energéticas de edificios de oficina ubicados en climas de carácter trópico húmedo Bwh (San José, Costa Rica) y clima seco Aw (Ciudad de México, México).

La aplicación del sistema enfriamiento radiante en zonas de alta humedad era una realidad poco factible hace tres décadas, sin embargo, las condiciones actuales ha provocado la búsqueda de sistemas mecánicos que permitan obtener condiciones térmicamente óptimas en el interior de los edificios y además, reducir el alto consumo energético que se vive hoy en día.

Costa Rica forma parte de los países que incrementará de manera considerable su demanda energética. La respuesta ante el disconfort térmico ha provocado la utilización de sistema mecánicos de enfriamiento poco convencionales con el fin de intentar controlar el disconfort térmico en los edificios, especialmente edificaciones destinadas al comercio.

En la actualidad países de climatología tropical similar a Costa Rica como India, Tailandia, Corea del Sur y Japón han implementado la aplicación del sistema en edificios como parte de una estrategia para alcanzar el confort térmico y reducir alto consumo energético.

Entendemos como sistema de enfriamiento hidrónico un sistema que controla la temperatura interior de un espacio por medio de la reducción del calor sensible a partir del principio de la radiación. Su aplicación puede ser un sistema primario o complementario y se basa en la instalación de tuberías PEX (polietileno reticulado) donde circula agua a una temperatura menor para generar el intercambio de calor.

El objetivo de la investigación fue obtener información relevante sobre la aplicación del sistema en zonas climatológicas de alta humedad. También, desarrollar un análisis de su comportamiento en dos escenarios climatológicos diferentes para evaluar su efectividad térmica, energética y económica.

Se desarrollaron tres fases experimentales que consistieron en la evaluación térmica y humedad de un edificio de oficinas en San José, Costa Rica con respecto a los parámetros de confort térmico. Después se construyeron dos módulos de prueba para evaluar su comportamiento en un espacio – aire en ambos escenarios climáticos. Los primeros módulos se construyeron el edificio de la Unidad de Posgrados de la UNAM y los otros dos en la ciudad de San José y en ambos casos se realizaron dos tipos de pruebas, primero se enfrió la temperatura del agua por debajo de la temperatura de punto de rocío, lo que provocó una rápida respuesta de enfriamiento

en el interior del módulo con el sistema, logrando bajar hasta 3.5°C con respecto al módulo sin el sistema, pero esta acción generó el aumento del 12% de humedad en su interior. En cambio, respetando la temperatura de punto de rocío, se logró una reducción de 1.34°C y se mantuvo una humedad interna más equilibrada con respecto a los resultados anteriores.

Por último, se desarrolló una simulación en el programa LoopCad para evaluar el consumo energético en ambos escenarios. Se realizaron diversos casos para mejorar las condiciones térmicas y energéticas del edificio analizado al inicio de la fase experimental logrando reducir el calor interno del edificio un 49.56% en San José y un 46.07% en la Ciudad de México. En cuanto a la factura energética, se logró reducir entre un 16 a 30% de gasto, sin embargo, se presentaron mejores resultados bajo las condiciones climatológicas secas de la Ciudad de México con respecto a San José.





INTRODUCCIÓN

Gran parte de nuestras vidas transcurre dentro de los edificios, sea en viviendas, oficinas, supermercados, escuelas, entre otros. A partir de ello, el hombre busca que estos espacios presenten una atmósfera favorable para desarrollar sus actividades cotidianas, es decir “es donde el hombre puede habitar, producir su vida, ser y estar en el mundo”.^[1]

El acelerado crecimiento de la población, los problemas de contaminación, el aumento de la temperatura y la necesidad de construir cada vez más rápido para las demandas sociales y económicas ha impulsado la construcción de envolventes arquitectónicas que ignoran su contexto climático.

En la figura 1 aprecia el comportamiento de la construcción en distintos países

miembros de la Federación Interamericana de la Industria de la Construcción (FIIC), donde la industria de la construcción creció en un promedio 2.8% en el 2015 en la mayoría de los países evaluados.^[2]

La grafica destaca que países como República Dominicana (25.4%), Panamá (19.8%), Nicaragua (6.8%), Bolivia (5.4%) y Argentina (5%) presentó un crecimiento mayor al 5% en el año 2015. Traduciendo estos valores desde el punto de vista energético es preocupante debido a que muchas construcciones son desarrolladas sin considerar su verdadero consumo energético.

Costa Rica, también se encuentra entre los primeros países con crecimiento, lo cual también lo reafirman los valores brindados por el IMAE (Índice Mensual de Actividad Económica) presentados por la Cámara Costarricense de la Construcción en su informe presentado en febrero del 2015.

El informe señala que el país en los pasados años ha tenido variaciones en su crecimiento de construcción, especialmente del sector privado, sin embargo, a partir de noviembre del 2013 el país ha experimento un crecimiento del 5.7%.^[3]

El crecimiento en la construcción trae consigo ventajas y desventajas. El desarrollo de una arquitectura que se construya de manera acelerada, bajo decisiones precipitadas y sin tomar en cuenta

[1] Ramírez, J. D. (2007). Sistemas pasivos de climatización, para la descarga de calor por muros y techos. México

[2] Federación Interamericana de la Industria de la Construcción (FIIC). (2016). Evolución de la Economía de los Países Miembros de la FIIC. Ciudad de México

[3] Construcción, C. C. (2015 de Febrero de 1). Cámara Costarricense de la Construcción. Obtenido de http://www.construccion.co.cr/mailings/direccion_tecnica/inf_eco_feb_2015.pdf

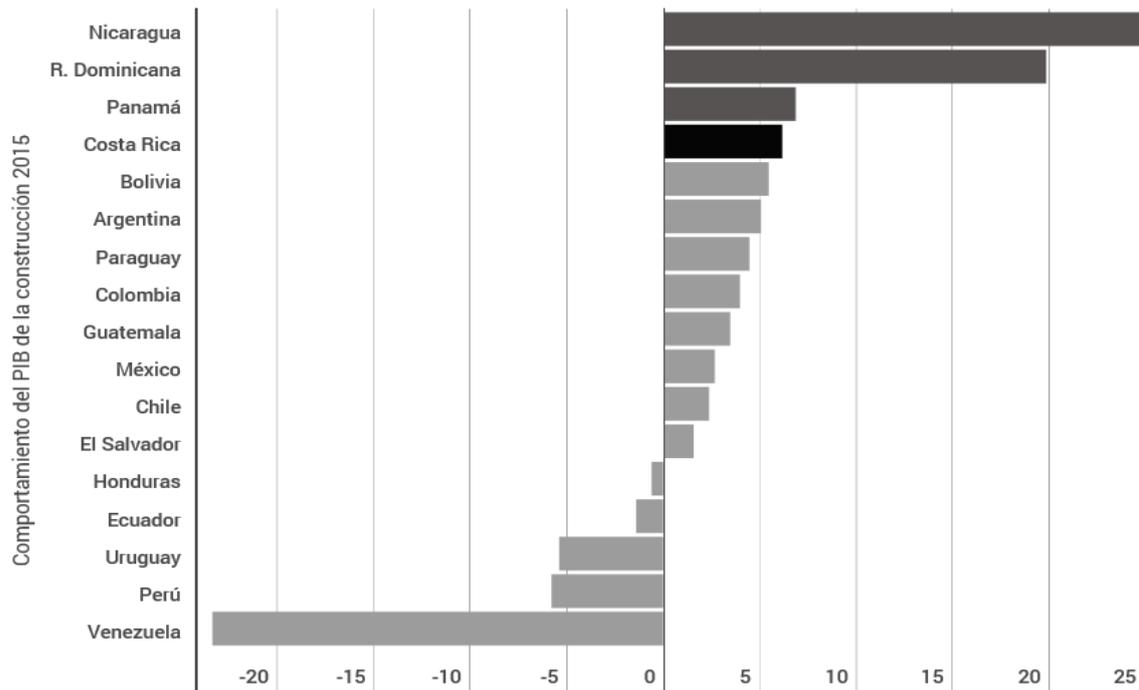


Figura 1 Comportamiento del PIB de la construcción 2015 (Variación % real anual). Fuente: Elaboración propia desarrollada a partir de los datos del CEESCO ^[2]

el contexto climático ha incrementado la ganancia de calor en el interior de los edificios.

Existe otra variable que no ha sido tomada en cuenta por muchos profesionales relacionados en la construcción, el cambio climático. Según la CEPAL ^[4] en su publicación estima que para el 2020 en los países de Centroamérica se incrementará en promedio un 0.7 °C y para el 2100 un 4.2 °C. Ante esta situación muchos edificios no presentan las condiciones de diseño adecuadas para el aumento de temperatura ni radiación solar prevista y por consiguiente, el

usuario será el que más padecerá estos cambios.

También las estadísticas no revelan un futuro muy alentador para el clima en Costa Rica. En el figura 2 se muestra que La temperatura se podrá incrementar 2.4 °C hasta 3.9 °C. Por ejemplo, si la zona de la Región Central del país tiene como promedio una temperatura de 22.0 °C ^[5], esta podrá ser de 25.9 °C en el año 2100.

Como respuesta, los profesionales relacionados con la construcción optan por utilizar mecanismos de enfriamiento

[4] Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2007). Cambio Climático en Centroamérica. Santiago : CEPAL

[5] Instituto Meteorológico Nacional. (Agosto de 2008). Instituto Meteorológico Nacional. San José: Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH). Obtenido de http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf

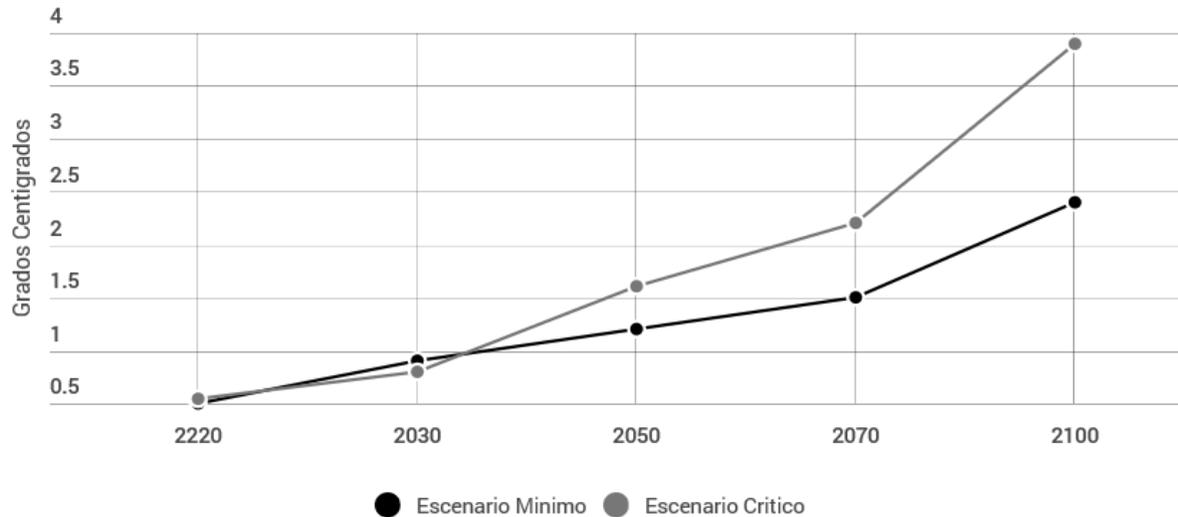


Figura 2. Aumento de temperatura en Costa Rica. Fuente: Elaboración propia ¹⁴

poco eficientes con el fin de generar un confort térmico para contrarrestar las altas temperaturas el interior de los edificios.

El ignorar el entorno donde se construye genera un derroche de energía, donde podemos apreciar en las diferentes estadísticas de consumo energético mundial. Una de ellas, presentada en la publicación de Martínez ^{6]} en su libro de Eficiencia Energética en Edificios nos revela que el sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de energía después del transporte y la industria.

En el año 2010, la Unión Europea además ha declarado, que el 40% del

consumo total de energía corresponde al sector de la construcción y al funcionamiento de los edificios.

Esta tendencia refleja el desarrollo ineficiente de envolventes arquitectónicas, generando grandes aumentos de demanda energética.

Este aumento ha provocado mucha preocupación en diversos sectores, en consecuencia, el agotamiento de recursos no renovables llevará a un desequilibrio ambiental que afectará a la sociedad en distintos niveles. “El reto consiste en buscar el desarrollo sostenible, manteniendo el nivel de actividad, de transformación y de progreso, pero ajustando las necesidades de los recursos existentes

6] Martínez, R. G. (2006). Eficiencia Energética en Edificios. España.

7] Gutiérrez Ortiz, M. (2010). Consideraciones ambientales en la compra de equipo de aire acondicionado. Boletín de Compras Inteligentes, 1-4.

y evitando el derroche energético.”^[7]

A raíz de esta situación, muchas de las construcciones de hoy en día son cómplices de la problemática energética. La necesidad de lograr el confort térmico ha provocado una dependencia cada vez mayor de soluciones de enfriamiento que consumen combustibles fósiles.

En busca de una respuesta a este fenómeno, muchos profesionales de la construcción optarán por alternativas inmediatas para contrarrestar la ganancia térmica de sus edificios. La selección de sistema mecánicos no eficientes u obsoletos con respecto a nuevas tecnologías de enfriamiento provocarán grandes gastos energéticos.

En una publicación realizada por la

CEGESTI (Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial) ^[7] se muestra (figura 3) que el uso del aire acondicionado tradicional en edificios hasta un 62% la factura energética, demostrando que el mantenimiento de los edificios corresponde al punto débil en del diseño arquitectónico de muchos inmuebles.

También el estudio CEPAL demuestra las evoluciones de consumo energético en América Latina. Como lo demuestra la figura 3, sin tomar en cuenta las posibles repercusiones del cambio climático, la demanda energética aumentara cuatro veces, de 32 mil GWh (Giga watts / horas) que se consumieron en el año 2007, para el año 2050 serán 137 GWh y se incrementará 10 veces para el año 2100 donde su consumo será de 324 mil GWh. ^[8]

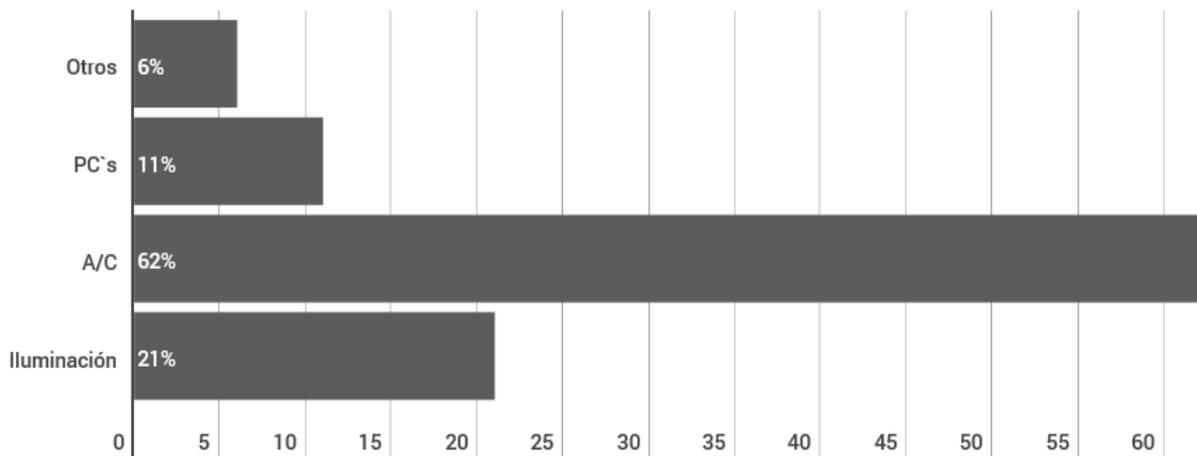


Figura 3. Porcentaje de consumo energético en oficinas. Fuente: Elaboración propia ^[7]

[7] Gutiérrez Ortiz, M. (2010). Consideraciones ambientales en la compra de equipo de aire acondicionado. Boletín de Compras Inteligentes, 1-4.

A pesar de que la tendencia muestra que Guatemala, Honduras y Panamá serían los países con mayor demanda, Costa Rica queda en el cuarto lugar en el incremento de consumo energético, donde uno de los posibles detonantes que contribuirá al pronóstico será la mala inserción del diseño arquitectónico a su entorno climático, el uso de materiales inadecuados que provocan grandes ganancias de calor dentro del edificio y la utilización de equipos mecánicos de enfriamiento ineficientes.

Un primer paso para lograr la reducción del consumo energético en los edificios es la utilización de la masa térmica como

elemento clave para el mejoramiento del confort térmico dentro de los espacios interiores. Evidentemente, para utilizar este recurso es necesario conocer las distintas variables relacionadas a la masa térmica y como estas alteran las ganancias térmicas de un edificio.

Después de comprender lo anterior, se integrará las propiedades de la masa térmica con un sistema de enfriamiento hidrónico. La aplicación de esta estrategia ha empezado a tomar mayor fuerza en diversos países, en especialmente en zonas de clima seco.

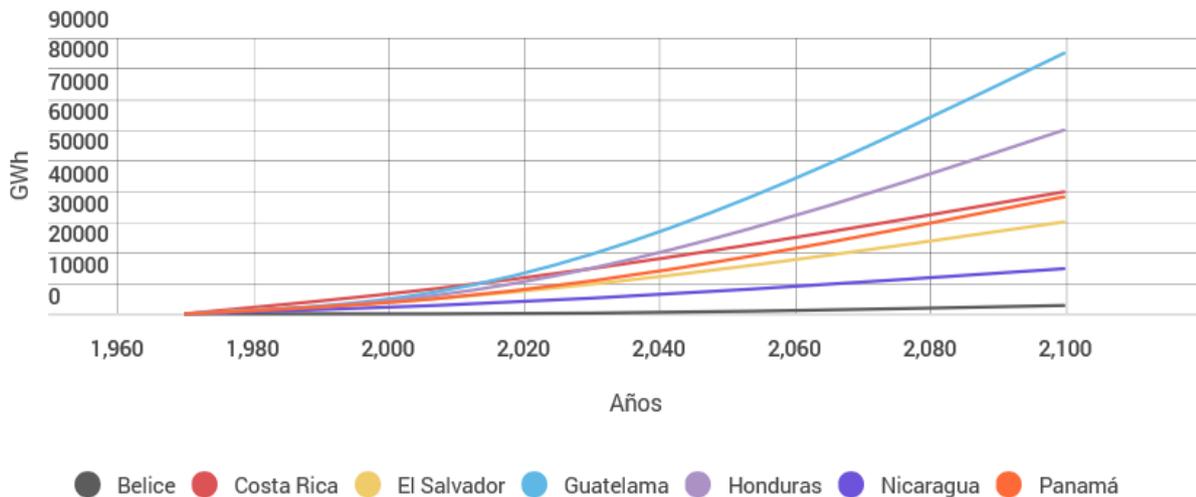


Figura. 4. Evolución de demanda energética. Fuente: Elaboración propia ^[8]

[8] Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2007). Cambio Climático en Centroamérica. Santiago : CEPAL

Sin embargo, los países de que presentan un clima tropical han empezado a implementar esta estrategia para contrarrestar los altos índices de temperatura en sus edificios.

La implementación del sistema enfriamiento hidrónico en edificios comerciales, residenciales, industrias, aeropuertos, edificios gubernamentales, ha sido posible por la integración de diversas estrategias tanto pasivas como mecánicas para generar un rendimiento óptimo; tanto de consumo energético como de equilibrio térmico.

Es importante mencionar que los edificios donde se ignoren los factores que engloban el rendimiento del sistema no obtendrán los resultados esperados. Esto se dará debido a las variables climáticas que caracterizan las zonas de tropical húmedo como sus altos niveles de radiación solar, humedad relativa, grandes periodos de lluvia, entre otros.

En la actualidad países de climatología tropical como India, Tailandia, Corea y Japón han implementado la aplicación del sistema en edificios como parte de una estrategia para alcanzar el confort térmico y reducir alto consumo energético.

La aplicación del sistema en países análogos al clima de Costa Rica permite abrir la posibilidad de implementar esta estrategia en edificaciones de oficina o industriales, por ello se puede determinar que:

La aplicación de un modelo de enfriamiento radiante que trabaje en conjunto con estrategias pasivas mejorará el comportamiento térmico y energético de un edificio ubicado en zonas de clima tropical como San José, Costa Rica.

La comprobación de la hipótesis tiene como objetivo principal: Generar información sobre la aplicación de un sistema mecánico de enfriamiento radiante en espacios de oficinas en zonas tropicales como San José, Costa Rica.

A continuación se plantean, las preguntas:

1. ¿Cuáles son las variables climáticas principales que interactúan con la envolvente arquitectónica y cómo repercute su interacción con el funcionamiento del sistema?
2. ¿La construcción térmicamente eficiente como estrategia pasiva mejora la funcionalidad y rendimiento del sistema de enfriamiento hidrónico?
3. ¿Qué diferencias existe en cuanto al comportamiento del sistema de enfriamiento hidrónico bajo un clima tropical y seco según la característica de Köppen? ¿Qué valores se pueden tomar de referencia para mejorar la efectividad de este?
4. ¿Podrá la aplicación de estrategias pasivas con el sistema de enfriamiento hidrónico en una oficina ubicada en San José, Costa Rica cumplir con los estándares del ISO 7730 ^[9] y el ASHRAE 62-2010 ^[10]?

[9] Norma Española UNE-EN-ISO 7730, de octubre de 2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local

[10] ASHRAE . (2001). ANSI / ASHRAE Standard 62.1 (Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality). Atlanta.

5. ¿El sistema de enfriamiento hidrónico cumple los estándares de energía del ASHRAE / IESNA Standard 90.1 – 2010^[11]?

De las cuales se resolverán por medio de la elaboración de los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el comportamiento de las variables climáticas relacionadas a la ganancia de calor en el interior de un espacio arquitectónico.

2. Identificar los materiales y sus propiedades térmicas que mejoraran el rendimiento y eficiencia del sistema de enfriamiento hidrónico en países de climatología tropical como Costa Rica.

3. Comparar el comportamiento y rendimiento del sistema de enfriamiento hidrónico en clima seco de clasificación AW como la Ciudad de México, México y en un clima tropical BWh como San José, Costa Rica.

4. Examinar bajo un programa de simulación diferentes estrategias de diseño pasivo y mecánico bajo datos climatológicos de San José y la Ciudad de México

5. Interpretar los resultados obtenidos de las simulaciones para determinar si la aplicación del sistema de enfriamiento en conjunto con estrategias pasivas son una opción de ahorro energético para los espacios arquitectónicos como oficinas en zonas Aw y Bwh.

Esta investigación brindará al campo de la tecnología de la arquitectura

información relevante para aplicar el sistema de enfriamiento radiante en zonas de climatología tropical húmedo. La recopilación permitirá abrir camino a la introducción de nuevas tecnologías a la arquitectura desarrollada especialmente en Costa Rica.

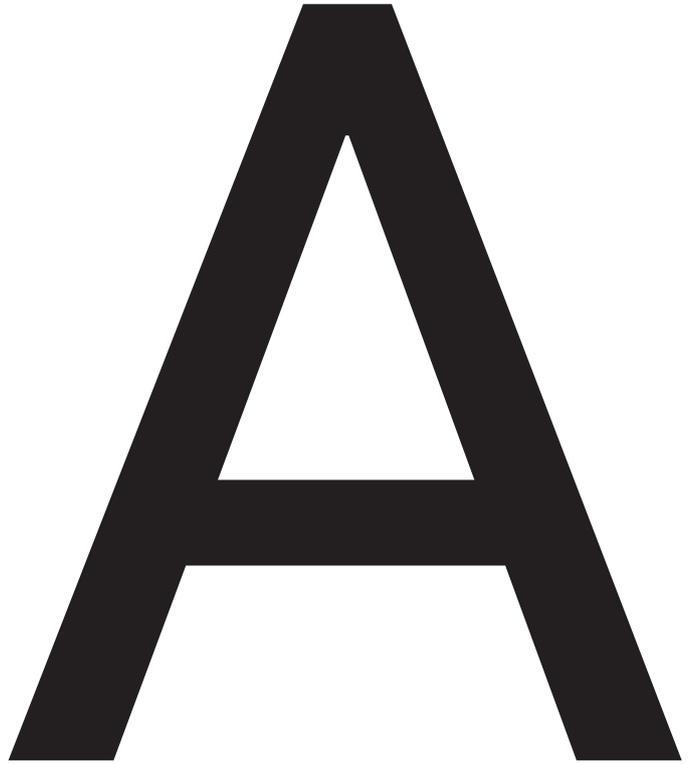
Su intención, es crear conciencia de las distintas posibilidades que se pueden acoplar a los proyectos arquitectónicos. El producto final de esta investigación será una recopilación de información sobre la capacidad del sistema mecánico de enfriamiento radiante bajo el contexto climático trópico húmedo.

Además, los resultados obtenidos podrán brindar otra alternativa para contrarrestar el alto consumo energético en los edificios. Es necesario que profesionales relacionados a la construcción y climatización utilicen esta información como base para desarrollar envolventes arquitectónicas integrales para disminuir el impacto ecológico provocado en las últimas décadas.

Por último, se espera que el desarrollo del producto final de esta investigación permita también desarrollar un nuevo mercado para la distribución del sistema mecánico en climatologías de alta humedad, con el fin de desarrollar una arquitectura más consiente a su contexto.

[11] ASHRAE. (2001). ANSI / ASHRAE Standard 90.1 (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings). Atlanta





ANTECEDENTES

Originalmente el sistema hidrónico o suelo radiante se utilizó como un sistema de calefacción. Su surgimiento es un tema aún incierto, ya que existen registros que dan crédito a los antiguos romanos pero arqueológicamente se ha descubierto que en el continente Asiático se ha hallado antiguas construcciones donde hacen referencia al uso de un sistema similar muchos años antes que los propios romanos.

Algunas de estas construcciones utilizaban sistemas como el kang, el dikang o el ondol (véase la figura 5), donde este último es el sistema tradicional instalado en la mayoría de las viviendas en Corea. Su objetivo principal es aumentar la temperatura interior.

Su funcionamiento consistía utilizar un fogón ubicado en la cocina o en el muro exterior de la sala de la vivienda.

Para facilitar la circulación del humo y el aire caliente bajo las habitaciones, las cocinas que tenían estos fogones se construían a 1 metro más abajo que el nivel de los cuartos, de esta manera permitía generar calor radiante necesario.

Desde la utilización de humo hasta la aplicación del sistema del agua ha demostrado el avance significativo que ha tenido los sistemas climáticos de radiación. También debido a la introducción de las tuberías PEX o cobre el sistema experimentó una flexibilidad de instalación así como de tiempo.

En cuanto a la aplicación como un sistema mecánico de enfriamiento radiante, dio sus primeras manifestaciones en el año 1995, donde el uso de refrigeración de piso y sistemas de edificios térmico activos (TABS) en edificios residenciales y comerciales fue presentado al mercado de la construcción.

Ya para el año 2000 el uso del sistema de enfriamiento hidrónico en la Europa Central es aplicado como una alternativa de enfriamiento de bajo consumo, donde generalmente es aplicado como parte de una estrategia de diseño climatológico que trabaja en conjunto con otros sistemas mecánicos que mejoran las condiciones de calidad de aire y estrategias pasivas como la elección de materiales térmicamente eficientes.

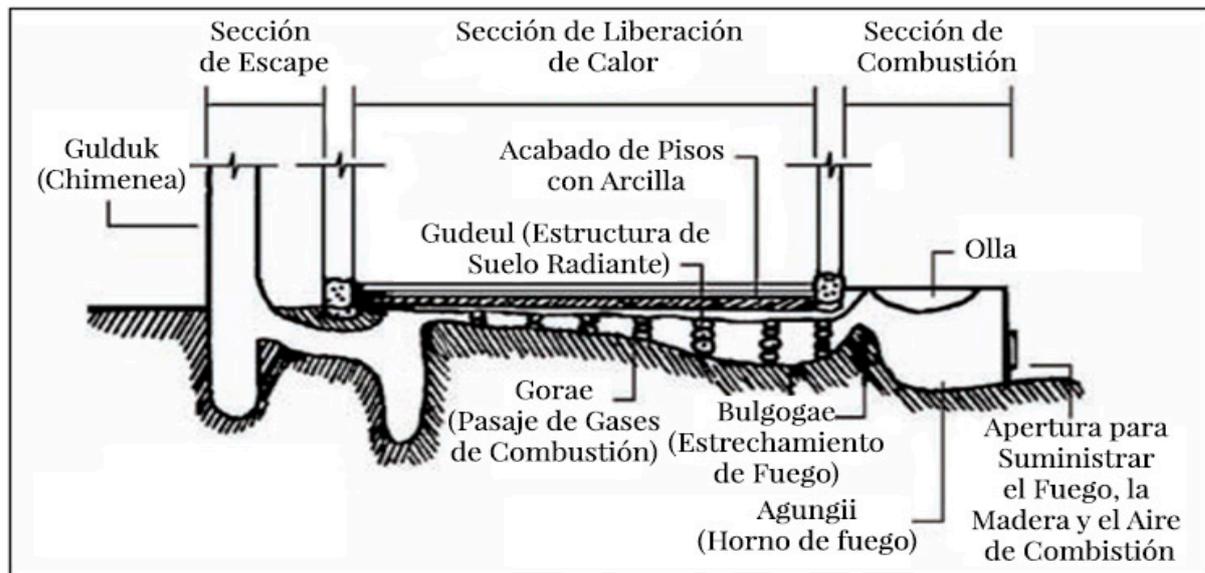


Figura 5. Estructura del sistema ondol. Traducción de Autoría Propia. Fuente: Elaboración propia ^[12]

Debido al rendimiento térmico y energético que ha presentado el sistema en sus aplicaciones tanto residenciales como comerciales en Europa se ha incrementado el interés por investigar el rendimiento del sistema en zonas de alta humedad.

El Dr. Doosam Song y su grupo de colaboradores en el año 2008 realizaron una prueba de rendimiento del sistema en conjunto con otros componentes mecánicos para mejorar las condiciones térmicas de un espacio en el año 2008.

La razón que impulsó el desarrollo de la investigación fue el interés de elaborar una estrategia que integrará sistemas mecanismo que permitiera utilizar como

alternativa de enfriamiento el sistema hidrónico para mejorar el comportamiento térmico y disminuir el consumo energético debido a sistemas activos de climatización.

Según los investigadores, es de suma importancia implementar nuevas estrategias de climatización para hacer frente al derroche de energía provocado por sistema de enfriamiento poco convenciones, por ello, la utilización de sistemas de enfriamiento radiante permitirá reducir hasta un 40% del consumo energético.^[13]

La investigación se basó en el desarrollo de un sistema de refrigeración por suelo radiante integrado con un sistema mecánico de ventilación que deshumedece

[12] Bean, R., Olesen, B., & Woo Kim, K. (2010). History of Radiant Heating & Cooling Systems. ASHRAE Journal , 40 - 47

[13] Song, D., Kim, T., Song, S., Hwang, S., & Leigh, S. -B. (2008). Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation. Applied Thermal Engineering, 1300 - 1311.

el aire entrante a través de un serpentín de refrigeración que disminuyó la temperatura del punto de rocío para evitar la condensación.

Como podemos apreciar en la figura 6, el sistema diseñado por los investigadores consistió en instalar un mecanismo de suelo radiante que trabajó en conjunto con un sistema de ventilación capaz de pre - enfriar y deshumidificar el aire que entra en el interior de la habitación.

El sistema de ventilación se instala en la parte inferior de la sala para atraer aire fresco a la habitación con el fin de satisfacer los requisitos mínimos de calidad de aire interior ASHRAE 55 y mantener una temperatura de punto de rocío bajo,

lo cual permite la prevención de la condensación en la superficie del suelo.

Otra ventaja es el intercambio del calor radiante entre la superficie del cuerpo y el piso, logrando el confort térmico uniforme, donde no se verá afectada por corrientes de aire por los sistemas convencionales de enfriamiento como el aire acondicionado.

Para lograr este equilibrio en la temperatura interior y al mismo tiempo controlar la humedad interna, el sistema de ventilación consta de dos modos de operación. Para prevenir la condensación en el sistema, se previó tener una diferencia de temperatura entre la superficie del suelo y la temperatura de

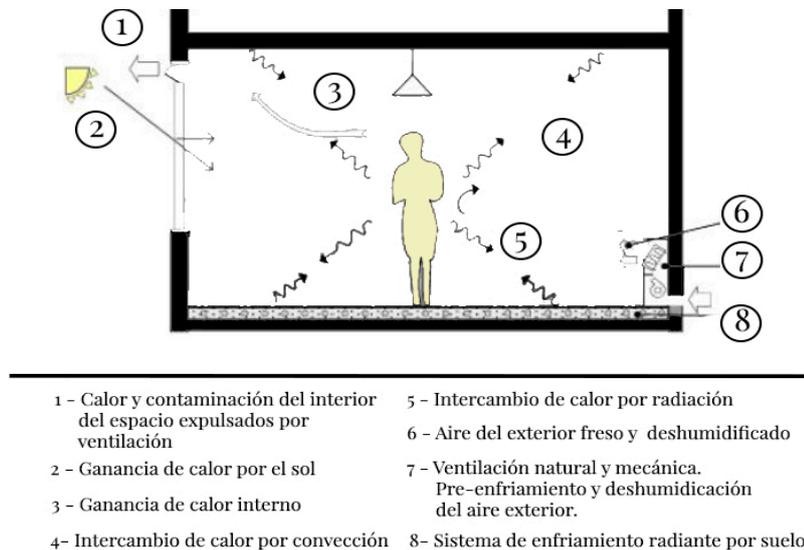


Figura 6. Diagrama de estrategias pasivas - sistemas activos de enfriamiento.

Fuente: Elaboración propia [13]

[13] Song, D., Kim, T., Song, S., Hwang, S., & Leigh, S. -B. (2008). Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation. Applied Thermal Engineering, 1300 - 1311.

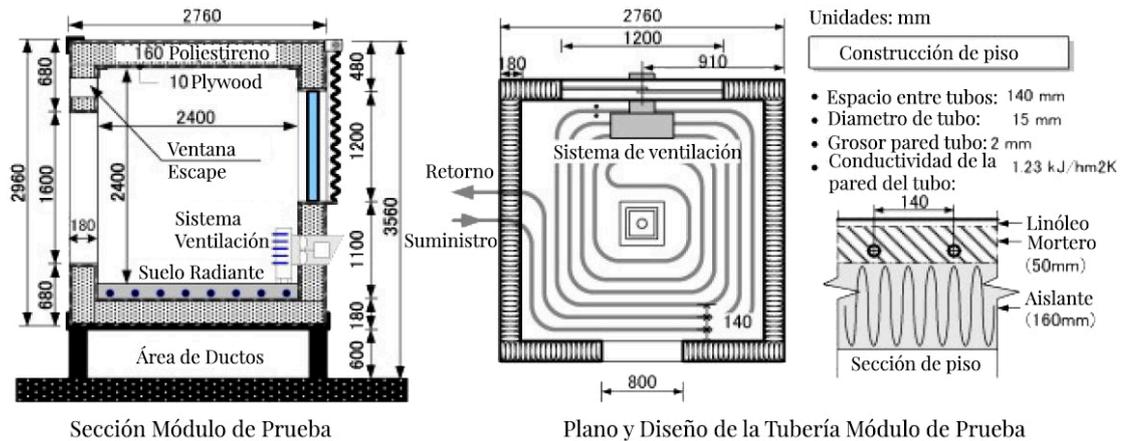


Figura 7. Diagrama de módulos de ensayo. Fuente: Traducción propia [13]

punto de rocío, donde fue controlada para ser mayor o igual a 2°C [14], lo cual ayudara a eliminar la humedad en el aire exterior que entra en la ventilación por medio del serpentín del sistema de ventilación.

Con respecto a los materiales, los investigadores realizaron dos módulos de prueba con alta eficiencia térmica. Se instaló en cada uno de ellos, una ventada con puente térmico. Además, en el suelo, techo y paredes se instaló un aislante de 160 mm, y los serpentines del sistema de enfriamiento fueron incorporados dentro del mortero de cemento en la parte superior del aislamiento.

En el módulo A se instaló un sistema de enfriamiento radiante con una ventilación simple, en cambio en el módulo B se instaló el mismo sistema radiante

pero con ventilación que deshumidifique el aire entrante.

En el caso A, la temperatura interior se controló mediante el uso de sistema de enfriamiento radiante, donde se modulo el flujo de agua que circulaba por los serpentines para lograr una temperatura interna de 26°C .

En el módulo B, se utilizó la ventilación que deshumidificara el aire para evitar la condensación de la superficie del suelo, así como para proporcionar una refrigeración constante del espacio. Las temperaturas de la superficie del piso en ambos casos también se mantuvieron mayor que 19°C para evitar la condensación.

Otra contribución de la investigación fueron los datos obtenidos por el

[13] Song, D., Kim, T., Song, S., Hwang, S., & Leigh, S. -B. (2008). Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 1300 - 1311.

[14] Feustel, H., Stetiu, C., & Nakano, Y. (1992). Ventilation Control Strategies for Buildings with Hydronic Radiant Conditioning In Hot Humid Climates. *Energy and Buildings*, 193 - 205.

energético, donde los resultados obtenidos utilizando un sistema de aire acondicionado de habitación bajo las mismas condiciones que la simulación realizada muestran que el sistema de sistema de enfriamiento radiante obtuvo un 67% de ahorro energético.

Por último, se llevó a puntualizar que la aplicación de los sistemas propuestos se realizó en situaciones reales, incluso para la temporada caliente y húmeda de julio – agosto, cuando existen altas cargas de enfriamiento y alto potencial de condensación en general. Este dato debe ser considerado para evaluar los posibles meses del año en donde se aplicara la simulación de las estrategias.

La investigación elaborada por el grupo de estudiantes Khan Ysin, Khare Rai Khare, Mathur Jyotirmay y Bhandari Mahabir, demuestra el potencial de ahorro energético utilizando el sistema de enfriamiento hidrónico en un edificio de negocios en la India. Para evaluar el rendimiento térmico y su consumo de energía se realizaron simulaciones en los programas FLUENT y EnergyPlus.

La razón de las pruebas se debió al creciente interés en los sistemas de enfriamiento radiante para la climatización de espacios. Se realizó una comparación de estrategias de enfriamiento para determinar cuál solución es la óptima en cuestiones de consumo energético. Los escenarios de sistemas

mecánicos de enfriamiento fueron:

- Uso del sistema de enfriamiento suelo radiante (Running Case).
- Uso del sistema HVAC (Conventional Case).
- Uso del sistema suelo radiante en conjunto con componentes ahorradores de energía (Advanced Case).

Running Case representa el sistema existente de suelo radiante en el edificio, que es acoplado a un FCUs (Fan Coil Unit) para proveer la carga de calor latente. Este modelo calibrado con datos fue simulado para evaluar el rendimiento energético. Para el modelo Conventional Case se le aplicó la misma carga de refrigeración con el fin de evaluar ambos sistemas con cargas similares.

Para el último modelo, Advanced Case, se intercambia el sistema FCUs por un DOAS (Dedicated Outdoor Air System) acoplado con un ERW (Energy Recovery Wheel). La finalidad del último caso es para disminuir las deficiencias del sistema de enfriamiento hidrónico.

Las mediciones en el edificio de los casos fueron ejecutadas desde Abril hasta Junio, donde se reflejó los diferentes rendimientos. Después de obtener estos resultados se continuó con la simulación de las estrategias.

Una vez obtenidos ambos resultados se concluyó que Running Case es 17.5%

más eficiente que el Conventional Case, donde el ahorro de energía varía según las condiciones climatológicas exteriores. Por ejemplo, cuando la humedad relativa era baja (30 a 40%) en comparación con la temperatura del bulbo húmedo (20 a 35 K) el ahorro energético era alrededor de un 25% a un 30%.

También los problemas de condensación se solucionaron al incorporar un sistema DOAS en el Advanced Case, donde se garantizó además una ventilación adecuada y la deshumidificación requerida para el buen funcionamiento del sistema. Asimismo se estableció que al suministrar aire en el interior del edificio permitió reducir más la temperatura. En comparación con el sistema HVAC, el tercer caso tuvo un rendimiento aproximado de un 30%.

En las simulaciones de los tres casos se evaluó la calidad del aire interna y el confort térmico. El sistema de suelo radiante logró establecer una calidad de aire y temperatura uniforme. Demostrando que este sistema cumple los requisitos tanto energéticos como de confort dentro de un edificio.

Además, se concluye que el estudio muestra oportunidades de ahorro energético al utilizar el sistema de enfriamiento radiante si se integra con sistemas que logren aumentar su rendimiento como el sistema DOAS. El tener un control en las variables que puede

incidir en el rendimiento del sistema fue la clave para lograr su eficiencia.

El interés a la aplicación del sistema en lugares de climatología trópico húmedo también ha empezado a aumentar en países Latinoamericanos. La investigación de la Mtra. Diana Calderón hace un acercamiento a la aplicación del sistema y su comportamiento con respecto a la masa térmica del concreto. Su investigación se desarrolló tanto en la ciudad de México como en San Pedro de Sula, Honduras.

Como se mencionó anteriormente, la investigación abordó el fenómeno térmico, específicamente la reducción de ganancia de calor por las condiciones externas de la radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa. A partir de los principios de masa térmica de los materiales y las propiedades térmicas del sistema de enfriamiento hidrónico, la investigadora comprobó la hipótesis que indica que el sistema disminuye la temperatura de la masa térmica del concreto bajo las condiciones exteriores.

Algunos de los resultados obtenidos que presentan un impacto en esta investigación son:^[15]

- El concreto al estar expuesto a la radiación solar puede alcanzar temperaturas arriba de los 40°C provocando un incremento de temperatura en las superficies del material en contacto con el

[15] Calderon, D. (2015). Enfriamiento Hidrónico de la masa térmica del concreto. México: Posgrado Arquitectura UNAM.

espacio interior de los edificios. Al integrarlo con sistema de enfriamiento radiante, este permite amortiguar la transferencia de calor absorbiendo parte del calor recibido por la radiación solar, logrando disminuir hasta los 10°C el concreto.

- Además, al comparar la efectividad térmica del sistema con respecto a un bloque que carecía de esta se obtuvo una diferencia de temperatura interior de 31.28% y de superficie 25.49%.

- Otro aspecto que puntualiza es el porcentaje de enfriamiento, el cual varía según las condiciones de clima.

- A partir de los resultados obtenidos, la investigadora concluyó que el sistema de enfriamiento radiante presenta un mejor funcionamiento para absorber calor al ser generado por la radiación solar.

- Asimismo, también demostró que el sistema de enfriamiento radiante en espacios interior absorbió el calor producido por las personas, equipos electrónicos y la iluminación, logrando así, enfriar las superficies por medio de radiación.

- La distancia entre la superficie y la tubería del sistema influye en su funcionalidad y eficiencia.

- La velocidad del flujo del agua también interviene en el rendimiento del sistema. En sus experimentos muestra que a una

velocidad menor a 1 litro por segundo presenta mejores resultados térmicos.

- Los tiempos de enfriamiento están vinculados con la temperatura de punto roció, debido a que el sistema disminuye la temperatura en un tiempo más corto.

- Con respecto a los materiales, se recomienda que para que el sistema posea un mejor funcionamiento para absorber el calor generado al interior, es necesario que los materiales empleados en la envolvente se encuentren con el adecuado aislamiento para evitar el sobrecalentamiento del concreto.

- A pesar de la limitante de la condensación, la investigadora concluyó que entre más bajo este la temperatura de punto de roció se podrá enfriar más la temperatura del agua para generar un mayor porcentaje de enfriamiento.

- Las variables que afectan directamente al funcionamiento del sistema de enfriamiento hidrónico son la radiación solar y la temperatura ambiente, siendo estos los valores de correlación más alta con respecto a la temperatura interior de ambos bloques de concreto. Por lo tanto si se controlan ambas variables se puede mejorar el enfriamiento del sistema de hidrónico.

Ahora bien, a pesar de obtener información relevante para ser aplicada al momento de integrar el sistema de

enfriamiento hidrónico con la envolvente arquitectónica, la investigadora traza una serie de líneas de investigación para dar continuidad a su investigación.

Entre algunos de los estudios que se citan en el trabajo son:

- Investigar sobre otros tipos de materiales en los que se instale el sistema hidrónico.
- Realizar experimentos con otros tipos de materiales en los que se instale el sistema hidrónico
- Comparar resultados con el concreto y poder comparar los resultados obtenidos con el concreto,
- Realizar pruebas en escala 1:1 para analizar el comportamiento al interior del espacio con y sin hidrónico.

En consecuencia a las líneas de investigación que quedaron pendientes, la siguiente investigación partirá de los resultados obtenidos y los integrará para aplicar el sistema de enfriamiento radiante en un espacio con el fin de evaluar la funcionalidad del sistema en espacio aire.

Asimismo, se analizará a detalle la influencia de las variables climáticas: radiación solar, temperatura y humedad relativa en la funcionalidad del sistema y además, como la elección de materiales pueden influir en su efectividad.

Finalmente, se integrarán los resultados obtenidos por la Mtra. Diana Calderón con los obtenidos por los investigadores anteriormente mencionados, esto para cumplir con el objetivo de la presente investigación.



1

ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA

Variables climáticas	32
Modos de transferencia de calor	36
Balance térmico	39
Bienestar térmico	45
Conclusiones	47

La envolvente arquitectónica debe ser considerada más allá de solamente un parámetro que contiene y protege un espacio interior de las condiciones externas. Su finalidad se ha convertido en un sistema complejo, objeto de exploración y desarrollo, donde al ser enriquecido y afinado es capaz de concentrar funciones pasivas como activas determinantes para el confort, el impacto ambiental y el consumo energético de un edificio.

En otras palabras, el control de las condiciones internas ha sido siempre una de las bases en el diseño arquitectónico. Como menciona Olgay ^[16] las edificaciones modifican el entorno natural con el objetivo de generar condiciones aptas para la habitabilidad.

Dicho de otro modo, la envolvente y sus componentes no son inertes e indiferentes,

a las condiciones de su entorno su diseño debe responder de manera pasiva o mecánicamente, como si se tratase de un cuerpo que reacciona a diferentes escenarios.

Para que sean posibles la reactividad y/o la actividad el cuerpo debemos considerar el desempeño general propio de un sistema (ej.: envolvente) y el desempeño específico de sus componentes (ej.: superficie de revestimiento, soportes, anclajes, recamaras, aislantes, impermeabilizantes, etc.) en términos de coordinación, complementariedad y compatibilidad. ^[17]

Para lograr un desempeño óptimo es importante conocer las variables climáticas que influirán en el comportamiento térmico del edificio, además se debe comprender los modos de transferencia de calor y las propiedades recomendadas que se deben buscar en los materiales para materializar una envolvente térmicamente eficiente.

1.1 Variables climáticas

Existen numerosas definiciones acerca del concepto de clima. Basándose en su origen, el término es de origen griego y significa etimológicamente “pendiente o inclinación”, con ella se alude a la inclinación de los rayos solares al incidir sobre la superficie del planeta. ^[18]

[16] Olgay, V. (1998). *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.

[17] *Ecoenvolventes: nueva frontera para la sostenibilidad energética y ambiental*. Varini, Claudio. 2010. 23, Bogotá: Instituto Colombiano de la Arcilla y Cerámica, 2010.

En otras palabras, el clima se define como la combinación de elementos (radiación, temperatura de aire y de suelo, precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo, viento, etc.) que dan individualidad a una región geográfica.

Con respecto a la climatología o estudio y estadística de los climas existen diversas clasificaciones climáticas, de las cuales se encuentra la clasificación Köppen en el año 1918. La elaboración de las categorías se basó en las medidas de las temperaturas, las precipitaciones mensuales y el tipo de vegetación según las regiones.

Estas características climatológicas desde el punto de vista estrictamente físico el clima afecta el estado de bienestar de los individuos, sus condiciones de trabajo y, por lo tanto su salud, e influye principalmente en la dispersión del estado metabólico y tanto en las sensaciones bio-térmicas como en la respuesta y desgaste de su organismo. ^[19]

También es necesario acotar que los factores ambientales que influyen en un edificio se pueden clasificar en internos y externos, donde los internos son las condiciones ambientales de comodidad que se desean en el interior de las edificaciones, en cambio los externos son la base de partida del diseño, es decir, son las condiciones climáticas previsible según la ubicación del proyecto.

Paralapresenteinvestigación,lasvariables

climáticas que se tomaran en cuenta para analizar la funcionalidad del sistema en un espacio aire son:

- Radiación
- Humedad Relativa
- Temperatura del aire

1.1.1 Radiación

La radiación solar, también conocida como radiación de onda corta, es la que llega al sistema tierra por los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar.

Se puede observar en la figura 8 que al tope de la atmosfera llega un 100% de radiación, pero solo el 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmosfera como radiación difusa hacia la superficie, esto hace que el 51% de radiación llegue a la superficie terrestre. Lo restante se distribuye en un 19% es absorbido por las nubes y gases atmosféricos y el otro 30% se pierde hacia el espacio, de esto la atmosfera dispersa 6%, las nubes reflejan un 20% y el suelo refleja el otro 4%.

Esta cantidad de energía permite cuantificar la radiación recibida en una localidad, una vez filtrada por la atmosfera. La masa atmosférica ejerce los efectos de reflexión, difusión, absorción, emisión.^[20]

Reflexión: Tiene lugar principalmente por la acción de las capas de nubes y consiste en

[18] Lacomba, R. (1991). Manual de Arquitectura. México: Trillas

[19] Monroy, M. (2006). Calidad ambiental en la edificación. Islas Canarias: Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria.

[20] Inzunza, J. (2008). Meteorología Descriptiva . Santiago : Universidad de Chile

ENERGÍA ABORBIDA Y REFLEJADA POR LA TIERRA

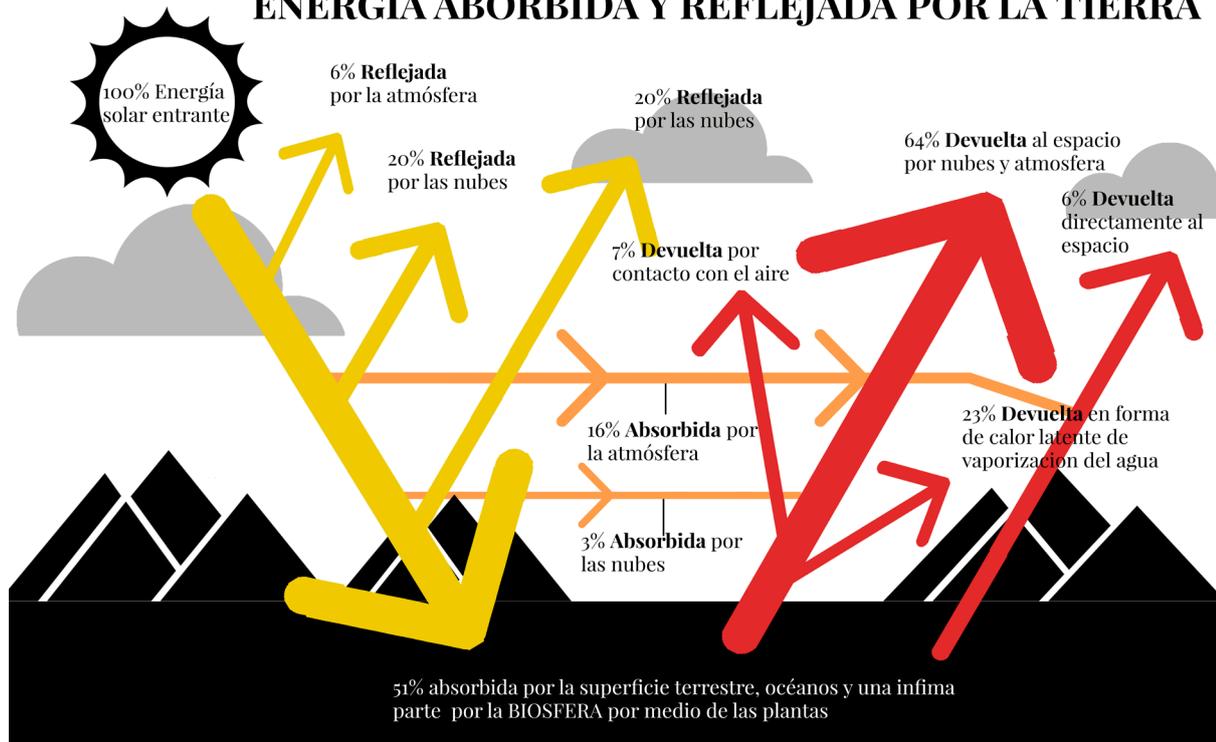


Figura 8. Diagrama tipos de radiación. Fuente: Elaboración propia [21]

retransmitir en otra dirección la energía recibida, sin modificar cualitativamente las longitudes de onda que la constituyen.

Aproximadamente el 30% de la energía solar que llega al tope de la atmósfera es reflejada al espacio, con un 20% reflejado por las nubes, 6% desde la atmósfera y un 4% desde la superficie de la tierra. La fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se llama albedo, por lo tanto el albedo planetario es en promedio un 30%.

Difusión: Es la retransmisión de energía recibida por las partículas de capa atmosférica en cualquier otra dirección, sin modificar la longitud de onda de la radiación incidente. Esta tiene lugar por la acción de las moléculas de aire, de vapor de agua y de polvo.

Absorción: Forma parte de la energía recibida por una sustancia, la cual permite que esta eleve su temperatura al incrementar la aportación de su propia energía interna.

[21] Diagrama basado en Lacomba, R. (1991). Manual de Arquitectura. México: Trillas.

Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura. Los gases que son buenos en absorber la radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera.

Para comprender el proceso estadístico de los datos de asoleamiento con el fin de aplicarlos en el diseño arquitectónico, es necesario establecer lo siguiente:

- Promedio horario de cada mes (media horario)
- Promedio horario de cada mes (media diaria)
- Total mensual y anual
- Patrones de comportamiento de insolación en referencia a la nubosidad horaria.

Donde podrá obtener:

- Valores máximos y mínimos de asoleamiento expresados en horas totales, en periodos diarios, mensuales y anuales.
- Duración de la insolación en periodos diarios, mensuales y anuales.
- Determinación de los meses de mayor insolación y de los meses de menos insolación disponible.
- Patrones de asoleamiento diario y mensual.

1.1.2 Humedad Relativa

Se define como humedad la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera, procedente de la evaporación, donde se considera normalmente como una mezcla de dos componentes: aire seco y agua. La capacidad de la atmósfera para recibir vapor de agua se relaciona con los conceptos de humedad absoluta, que corresponde a la cantidad de agua presente en el aire por unidad de masa de aire seco, en cambio la humedad relativa es la razón entre la humedad absoluta y la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen. ^[22]

Si la humedad alcanza un valor del 100% se dice que el aire se encuentra saturado, provocando que el vapor se condense en niebla o nubes.

También se alcanza la saturación cuando usamos agua muy caliente en un recinto cerrado como por ejemplo en un baño, donde el agua muy caliente se evapora fácilmente y el aire de la habitación alcanza con rapidez el 100% de humedad relativa.

Punto de rocío: Si se mantiene la cantidad de agua en el ambiente constante y se disminuye la temperatura llega un momento en que se alcanza la saturación, a esta temperatura es denominada como temperatura del punto de rocío. Cualquier objeto de una habitación que tenga una temperatura menor que la temperatura de rocío presenta condensación en

[22] Meruane, C., & Garreaud, R. (2006). Determinación de Humedad en la Atmósfera. Chile: Universidad de Chile.

sus paredes por este fenómeno.

1.1.3 Temperatura del aire

Se puede definir temperatura como el grado de energía térmica medida en una escala definida. La temperatura de un cuerpo es su intensidad de calor, es decir la cantidad de energía que puede ser transferida a otro cuerpo. En otras palabras, es una medida de la energía cinética de las partículas que componen el sistema.

Cuando dos sistemas están a la misma temperatura, se dice que están en equilibrio térmico y no se producirá transferencia de calor. Cuando existe una diferencia de temperatura, el calor tiene a transferirse del sistema de mayor temperatura al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Multitud de propiedades físicas de los materiales dependen de la temperatura. Las reacciones de los materiales con respecto a los cambios de temperatura puede determinar la resistencia ante los cambios.

Su relación con la radiación solar se da cuanto en la superficie terrestre recibe energía proveniente del Sol, en forma de radiación solar emitida en ondas cortas, como se mencionó anteriormente. A su vez, la Tierra, con su propia atmósfera, refleja alrededor del 55% de la radiación incidente y absorbe el 45% restante, convirtiéndose, ese porcentaje en calor.

1.2 Modos de transferencia de calor

Lozano ^[23] indica que la envolvente arquitectónica es uno de los componentes que tiene mayor incidencia en el uso de energía debido a la ganancia y pérdida de calor que presenta el edificio a través de los materiales, ya que dependiendo de su elección, estos se pueden aumentar a un 40% del consumo total debido al esfuerzo que se necesita para lograr el confort térmico en los espacios internos.

Resulta claro desde el punto de vista físico y energético, la adaptación al contexto climático local se refiere primordialmente a dos parámetros: el proceso físico de la transferencia de calor y el estado de confort del ser humano.

La termodinámica evalúa el proceso de intercambio de calor entre cuerpos a distintas temperaturas mientras se mantenga una diferencia finita de temperaturas entre los mismos. La transmisión de calor comprende tres mecanismos básicos, conducción, convección y radiación. (Véase figura 9).

1.2.1 Conducción

La energía calorífica se transmite durante el contacto directo entre cuerpos (o parte de los mismos) a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema (unas en zonas más calientes, con mayor energía térmica y otras en

[23] Lozada Lozano, Á. (2008). La Piel del Edificio. Acabados Arquitectónicos de Superficie. Cali: Programa Editoria

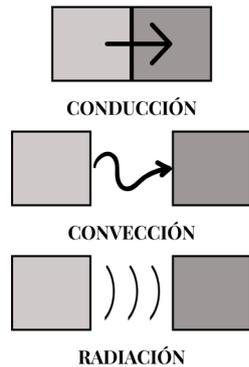


Fig. 9. Modos de transferencia de calor. Fuente: Elaboración propia. [24]

las zonas más frías, con menor energía térmica), aunque no haya un movimiento macroscópico de las moléculas o el material sea transparente a la radiación.

En otras palabras, podemos decir que la conducción de calor solo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un espesor Δx , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con la condición de que $T_2 > T_1$.

Más adelante de este capítulo se hará una explicación sobre los tipos de conducción y como estos impactan en cuanto a la ganancia de calor en el interior de una edificación.

1.2.2 Convección

La energía calorífica se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las

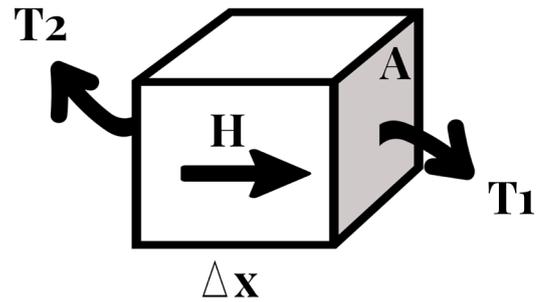


Fig. 10. Conducción de Calor. Fuente: Elaboración propia. [25]

zonas de baja temperatura y viceversa, equilibrándose las temperaturas.

Este tipo de transferencia de calor puede ser generada de manera natural (propiedades del material) o forzada (si la materia es obligada a moverse de un lugar a otros, en el caso de esta investigación se obligara a mover el agua fría por una bomba). Se debe además aclarar que solo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

Además, es este proceso de conducción superficial el que provoca, en un fluido inicialmente en reposo en contacto con una superficie a distinta temperatura, provocando una diferencia de temperaturas en el fluido.

La mayor parte del calor ganado por la atmosfera se da por conducción y radiación cerca de la superficie, donde

[24] Diagrama basado en Calderon, D. (2015). Enfriamiento Hidrónico de la masa térmica del concreto. México: Posgrado Arquitectura UNAM.

[25] Diagrama basado en S. Kahan, «Módulo: Transferencia de Calor,» 2002.

luego, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección. Uno de los modelos de transferencia de calor es la Ley de enfriamiento de Newton:

$$H = hA(T_A - T)$$

Donde

H = Calor

h = coeficiente de convección (W/m²K)

A = superficie que entrega calor

T_A = Temperatura al fluido adyacente

T = Temperatura

El flujo de calor por convección es positivo solo si el calor se transfiere de la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$).

Es importante recalcar que este tipo de transferencia puede venir acompañado de un cambio de fase, como ocurre en la condensación o la ebullición debido a unos intercambios de calor muy intensos. Este fenómeno se puede ver reflejado en la funcionalidad del sistema de enfriamiento radiante si no se tiene las precauciones previstas.

1.2.3 Radiación

La energía calorífica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura T, y que se propaga

a la velocidad de la luz (porque es luz de distintas longitudes de onda) y que puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura.

La radiación es el único medio de transmisión de calor cuando esta tiene lugar a través del vacío, y que puede ser muy importante para altas temperaturas.

Estos mecanismos básicos actuarán de forma combinada, no solo para dar la temperatura final del espacio que se evaluará, sino en combinación con otros elementos como la humedad del aire, permitirá el confort del ser humano en el espacio considerado. Así, mayores o menores grados de humedad darán lugar a una sensación de comodidad mayor o menor para una misma temperatura.

La acción del viento y de la radiación elementos a considerar. Por una parte el viento favorece los procesos de convección y evaporación. Por otra parte, para una misma temperatura en un lugar, el hecho de que éste esté soleado puede hacer más agradable la estancia en el mismo en invierno, no solo por la luz sino por la radiación térmica que incide sobre la persona.

De la misma forma, para una misma temperatura en una habitación la sensación térmica es más baja si paredes y suelo están aún fríos que si los mismos están ya calientes o incluso que el aire de la habitación.

1.3 Balance térmico

Para el desarrollo de un patrón de diseño que incorpore el sistema de enfriamiento hidrónico en edificios se debe de conocer la cantidad de calor que habrá que retirar de los espacios. Se debe de realizar un cálculo térmico que se conoce como balance térmico, el cual consiste en las ganancias internas (calor latente) y sensible que se producen en el interior de los espacios arquitectónicos y para elaborarlo se calculará los siguientes fenómenos [26]:

- Flujo de calor por personas
- Flujo de calor por equipo electrónico
- Flujo de calor por radiación solar
- Flujo de calor por ventilación
- Flujo de calor por masa térmica

1.3.1 Flujo de calor por persona

El cuerpo humano produce transformaciones exotérmicas, cuya intensidad es variable según el individuo y la actividad desarrollada. La temperatura promedio más favorable del cuerpo es de 37°C con una tolerancia muy pequeña a cambios de temperatura.

El calor llega a la epidermis a través de la circulación sanguínea, se disipa al medio ambiente por radiación, y por convección en el aire que se exhala por las vías respiratorias.

Lo producido por las personas está formado por dos componentes que son:

calor sensible + calor latente = calor total.

Calor sensible (CS): Es la cantidad de calor absorbido y cedido por una sustancia y a la cual acompaña un cambio de temperatura de la misma, sin cambio de su estado físico.

Calor latente (CL): Es la cantidad de calor cedido y absorbido por una sustancia y al cual acompaña algún cambio en el estado físico de la misma, sin haber cambio en la temperatura.

En la tabla 1, se puede observar el calor de un hombre adulto de 68 kg. de peso en diferentes actividades, para una permanencia mayor de tres horas. En el caso de una mujer y un niño, sus valores serían el 85% y el 75% respectivamente por un hombre.

Como se muestra en la tabla 1, existen diferentes niveles de disipación de calor, los cuales están relacionados con la temperatura a la cual se están desarrollando ciertas actividades, por lo cual, la temperatura de un espacio se debe de adecuar a las actividades que generen en ella.

Para lograr medir el confort dentro de un edificio, se debe de analizar el bulbo seco y humedad relativa. El valor del bulbo húmedo, se puede obtener cuando el bulbo húmedo es muy bajo la humedad relativa en el medio ambiente es muy baja o es un lugar seco, por el lado

[26] Bautista Kuri, Antonio Javier. 1997. Cálculo de Sistemas de Aire Acondicionado en Sistema Internacional S.I. Ciudad de México: UNAM, Facultad de Arquitectura, 1997.

Grado de Actividad	Tipo de aplicación	Metabolismo Hombre - Adulto (Watts)	Metabolismo Medio (Watts)	Temperatura seca del local (°C)									
				21°C		24°C		26°C		27°C		28°C	
				WATTS									
				CS	CL	CS	CL	CS	CL	CS	CL	CS	CL
Sentado en reposo	Teatro, escuela primaria	114	103	76	27	67	35	62	41	57	45	51	51
Sentado, trabajo ligero	Escuela secundaria	132	117	81	37	70	47	63	54	55	60	53	64
Empleado oficina	apartamento, escuela superior	139	132	84	48	72	60	63	69	58	73	53	79
De pie, marcha	Almacenes, tienda	161	132	84	48	72	60	63	69	58	73	53	79
Sentado, de pie	Farmacia	161	147	85	62	75	72	64	82	50	88	53	34
De pie, marcha lenta	Banco	161	147	85	62	75	72	64	82	50	88	53	34
Sentado en el banco de taller	Restaurante	147	161	94	67	82	79	70	91	64	98	56	106
Trabajo ligero en el banco de taller	Fabrica, trabajo ligero	234	220	107	113	86	133	72	148	64	160	56	164
Baile o danza	Sala de baile	164	149	117	132	95	154	81	169	72	177	64	185
Marcha 5km/hr	Fabrica trabajo fuerte	293	293	135	158	111	182	97	186	88	205	79	214
Trabajo físico fuerte	Boliche, trabajo muy fuerte	440	425	177	248	154	271	142	283	136	288	132	293

Tabla 1. Ganancias de los ocupantes. Fuente: Elaboración propia [27]

contrario cuando el valor del bulbo húmedo es el mismo que el del bulbo seco la humedad relativa es del 100 % y es cuando el aire ya no puede contener más humedad en estado de vapor, aquí es cuando tenemos en las mañanas el rocío.

La temperatura interior se puede conocer utilizando el cálculo de la temperatura interior en función de la temperatura de cálculo de bulbo seco exterior. Este cálculo se debe realizar ya que no siempre podemos tener una temperatura ideal puesto que existen diferentes

condiciones climáticas en un lugar. Se puede utilizar la tabla 2 para conocer los valores de bulbo seco y temperatura interior.

1.3.2 Flujo de calor por equipos electrónicos

Los equipos emiten también calor sensible dentro de los edificios. Estos se dividen en dos partes, el calor emitido por iluminación y el calor emitido por equipos electrónicos (computadoras, televisores, teléfonos, entre otros).

[27] Bautista Kuri, Antonio Javier. 1997. Cálculo de Sistemas de Aire Acondicionado en Sistema Internacional S.I. Ciudad de México: UNAM, Facultad de Arquitectura, 1997.

La iluminación constituye una fuente de calor sensible, este calor se emite por radiación, convección y conducción, un porcentaje del calor emitido por radiación es absorbido por los materiales que rodean el local.

Para conocer la cantidad de watts térmicos que existe en un lugar, solamente deberemos contar el número de lámparas y multiplicarlas por la cantidad de watts de consumo. Cuando no se conozca el número y tipo de lámparas se podrá dar un aproximado con los siguientes métodos:

El primero consiste en asignar un valor en watts/m² de piso, se recomienda para esto tomar los valores que marca el reglamento de construcción, en la sección de valores estimados de carga eléctrica y alumbrado por m², e incrementarle un porcentaje ya que el valor que se marca es el mínimo.

El segundo es realizar un cálculo de iluminación con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{NI \times A}{CU \times FM} = \text{Lúmenes necesarios} \frac{Lm}{Lm \text{ por luminaria}} = \text{No. de luminarias}$$

Donde:

NI=nivel de iluminación

Lm= Lúmenes

A=Área en m²

CU= Coeficiente de utilización

FM=Factor de mantenimiento

Mucho equipos no indican la cantidad del consumo energético que utilizan los aparatos ni su transformación en calor, pero si informan cuáles son sus características de operación eléctrica, dato que nos permite dar una idea de la cantidad de calor que puede disipar cada equipo.

Para conocer el calor aproximado que produce un equipo electrónico, debemos de observar sus “ datos de placa “ y con los datos obtenidos podemos realizar las siguientes ecuaciones:

Watts = Volts x Ampere (Operación monofásica)

Watts = Volts x Ampere x 1.41 (Operación bifásica)

Watts= Volts x Ampere x 1.73 (Operación trifásica)

Estas ecuaciones nos darán un acercamiento de cuanto es el consumo energético y como en el funcionamiento de estas transfiere calor en el espacio. En el caso de la presente investigación, como se visualiza el uso de mecanismo en edificios de oficinas o naves industriales, la obtención de este dato es de suma importancia.

1.3.3 Flujo de calor por radiación solar

Representa a un porcentaje muy alto en un balance térmico, lo ideal sería aislarlo, sin embargo es la entrada de luz más grande y

gratuita que tenemos los arquitectos y se debe aprovechar al máximo para reducir los costos energéticos dentro del edificio.

La ganancia de calor está condicionada a varios factores, entre ellos son la orientación de las fachadas, asentamiento, el color de las superficies, pesadez, materiales, entre otros.

La buena orientación de los inmuebles es vital, ya que de esta manera se conocerán las ganancias térmicas que tendrá el inmueble, aquí es donde se mezclan los materiales y los colores, de manera que sean los más adecuados en todos los aspectos.

Un edificio con grandes superficies de cristal al Oeste nos indica que por las tardes una carga térmica fuerte en esta zona. Si el acristalamiento está al Norte, prácticamente no tendrá sol (dependiendo de la latitud donde se localice), y la pérdida de calor del interior será muy grande (en invierno), Si el acristalamiento está al Sur entonces tendrá sol durante todo el día y la carga térmica en invierno será grande.

El asentamiento es el grado de contacto de las superficies que rodean el volumen de todo el edificio con el terreno. La repercusión climática que genera un aumento de asentamiento está relacionado por el aumento de la inercia térmica y por el otro con la menor captación de radiación y menor ventilación aumentará la humedad en su interior.

El color, este tipo de ganancias se refiere al calor que absorben las superficies, mientras más oscuro sea, mayor será la captación solar, el color está relacionado con varios factores que influyen mucho en la arquitectura y que distingue a algunos tipos de edificios o de ubicación, por ejemplo los bancos su distintivo es el color de sus fachadas el cual denota su razón social, el color de un hotel junto al mar el cual sería de un tono claro.

La pesadez es calidad física que depende de la composición constructiva específica del edificio. Su impacto climático se relaciona con los materiales y su inercia térmica. Esto puede representar una amortiguación en el interior del edificio de los constantes cambios climáticos.

Los materiales para construcción, siempre se recomiendan los que están en la zona y los que ya se hayan usado anteriormente, como buenos aislantes térmicos, estos por lo general son de baja densidad y con cámaras de aire.

Para conocer el flujo de calor por radiación solar directa podemos aplicar la siguiente ecuación:

$$Q_{shg} = A_v \times F_c \times H_t$$

Donde

A_v = Área de Ventana

F_c = Fracción de radiación solar que pasa por la ventana (Porcentaje de sombreado por aleros o partes de los soles por transmutación)

HT= radiación solar global

1.3.4 Flujo de calor por masa térmica

La cantidad de transmisión de calor de los materiales depende de la masa térmica de los materiales, donde estos juegan un rol importante en el desempeño interior de un edificio. Entendemos como masa (o inercia) térmica la capacidad de un material de absorber calor, almacenarlo y posteriormente liberarlo al exterior.

También se determina que a mayor peso específico del material de construcción, mejor será su capacidad para almacenar grandes cantidades de calor y como consecuencia tendrá una masa térmica elevada.

El diseño de una envolvente arquitectónica con materiales que presenten una alta masa térmica es una de las estrategias mayores utilizadas para disminuir la temperatura interior de los espacios con respecto a altas temperaturas exteriores. De esta manera, la temperatura interna promedio puede ser moderada a lo largo del año, obteniendo un mejor nivel de confort y bajos gastos de consumo energético.

Vinculando la masa térmica con respecto al consumo energéticos recomienda seleccionar materiales con gran masa térmica, esta estrategia puede permitir refrescar un espacio arquitectónico hasta un 25% en comparación a un espacio

construido con materiales livianos y con baja masa térmica.^[28]

Otra de las ventajas al utilizar materiales que presenten materiales térmicamente eficientes es su aporte para lograr obtener un confort térmico en los espacios ubicados en regiones con una climatología que presente un verano de altas temperaturas.

Dentro del marco de la masa térmica, los materiales presentan una serie de características que revelan su comportamiento a las condiciones exteriores y de qué manera puede transmitir ganancia de calor en el interior de un espacio. Las características más relevantes son:

- Alta densidad: Cuanto más denso, mayor es su masa térmica
- Baja conductividad térmica: El material debe permitir que el calor fluya a través suyo, pero si la conductividad es demasiado grande, la energía absorbida es liberada tan rápidamente que no permite el efecto de acumulación requerido.
- Baja reflectividad: Las superficies oscuras, de color mate o con textura, absorben mayor cantidad de energía que las luminosas, suaves y reflectantes.

Para evaluar si la composición de la piel de la envoltura arquitectónica presenta las condiciones necesarias para hacer frente a las condiciones externas y mejora las cualidades térmicas en el interior de un espacio es necesario realizar el cálculo de transferencia calor.

[28] Victoria, Sustainable Energy Authority. 2002. Thermal Mass. Sustainable Energy Authority Victoria.

Se define coeficiente total de transferencia de calor “U” como la intensidad de de transferencia de calor a través de un material. El factor “U” es el coeficiente de transferencia de calor resultante después de tener en cuenta la conductividad térmica y la conductancia de la capa superficial, sus unidades son:

- (SI) watts/ hr x m2 de área x diferencia de temperatura en °C ó (Sist. métrico)
- Kcal. / Hr. x m2 de área x diferencia de temperatura en °C ó (sist. inglés)
- BTU/ hr x pie2 de área x diferencia de temperatura en °F.

Usualmente estos valores se aplican a estructuras compuestas, tales como paredes, cubiertas, pisos. Para conocer “U” debemos de saber con qué materiales se va a construir, su espesor, la conductancia de los mismos, la velocidad del viento exterior y el movimiento del aire interior.

Ver tablas elaboradas por el Mtro. Antonio Bautista Kuri en su documento, de los cuales se conocerán sus coeficientes de transmisión “U”, conductividad “K” y convección “f”; por lo tanto para calcular “U” usaremos la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{F_i} + \frac{1}{f_e} + \frac{1}{a} + \frac{E_1}{K_1} + \frac{E_2}{K_2} + \frac{E_3}{K_3} + \dots} = W/m^2$$

Donde

R= Resistencia del elemento

Fi= Coeficiente de convección al interior en watts/m2 °C (película de aire interior)

Fe= Coeficiente de convección al exterior en watts/m2 °C (película de aire exterior)

a = Coeficiente de transmisión de calor del aire por convección, como uso de, cámara de aire en espacios verticales y horizontales

K1...K3= Coeficiente de conductividades térmicas de los materiales en watts m/°Cm2 y un m de espesor

E1...E3= Espesores de los materiales en metros.

Es importante acotar que el calor total transferido por conducción varía directamente con el tiempo, área y diferencia de temperatura de su contexto, e inversamente con el espesor del material.

La ganancia de calor a través de los distintos componentes de una envolvente arquitectónica variará según el tipo de construcción, su área expuesta al exterior y por la diferencia de temperatura entre el espacio acondicionado y la temperatura ambiente.

Resistencia Térmica “R”: La definimos como la resistencia de un material al flujo de calor y por definición, el recíproco del coeficiente de transferencia de calor:

$$R=1/C$$

Las unidades que utilizamos son:

- Sistema internacional (S .I.)
- Diferencia de temperatura en °C x m² de área / watts / hr
- Sistema Métrico diferencia de temperatura en °C x m² de área / Kcal/ hr.
- Sistema Inglés diferencia de temperatura x pie² de área / BTU/ hr.

Encontrar el “R” de los materiales es muy útil puesto que los valores de resistencia pueden sumarse en forma numérica.

$$R_{total}=R_1+R_2+R_3$$

Donde

R₁, R₂, R₃ son resistencias individuales

Conductancia “C”: Se define como la intensidad de transferencia de calor que tiene un material. Este factor es utilizado frecuentemente con materiales de construcción y espacios de aire. Se diferencia de la conductividad térmica porque es un factor para un espesor dado de un material en cambio el otro concepto es un factor de transferencia de calor por metro de espesor.

Para reducir la transferencia de calor a través de un material, el factor de conductividad térmica “K”, deberá ser tan pequeño como sea posible, y el material tan grueso como sea posible.

Por ejemplo, una sustancia que tiene una gran conductividad térmica es un buen conductor de calor, en cambio un material que no, es un mal conductor (también

conocido como aislante).

Es necesario tener conocimiento de la capacidad de térmica de los materiales ya que la piel del edificio funciona como barrera a los impactos caloríficos externos, es decir, antes de estos impactos afecten las condiciones de temperatura interna deben traspasar los muros de la edificación.

1.4 Bienestar térmico

Lo definimos como aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico (ISO 7730), donde esta depende del calor generado espontáneamente por una persona (calor metabólico) y del que se disipa a su entorno. En condiciones de equilibrio se producirá en la persona una sensación de confort térmico, sin embargo si la cantidad de calor disipado es mayor o excesiva puede llegar sentir frío o si el calor no es disipado suficientemente sentirá mucho calor.

Los parámetros para medir el ambiente térmico son aquellos que afectan a la pérdida de energía, por ejemplo, el hombre tiene un sistema regulador de temperatura muy efectivo, que garantiza que su temperatura corporal se mantenga a 37°C aproximadamente, sin embargo cuando el cuerpo empieza a calentarse o enfriarse utiliza el mecanismo de regulación conocido como homeostasis.

El mecanismo homeostasis permite que

el cuerpo regule la producción de calor y su pérdida para mantener el equilibrio. Estos órganos actúan modificando el flujo sanguíneo, el metabolismo, la cantidad de transpiración y el ritmo respiratorio.

De acuerdo con los sistemas de eliminación de energía del cuerpo humano, los parámetros térmicos de un ambiente serán los que influyen sobre los mismos.^[30]

1.4.1 Bienestar termo-higrométrico

El bienestar termo-higrométrico se establece con los intercambios energéticos que se llevan a cabo por el cuerpo humano. Es el balance dinámico de temperatura y humedad que logra el cuerpo en un ambiente dado. Tal ambiente le provoca pérdidas o ganancias de calor que intercambia con su entorno, donde estas alteraciones en la temperatura corporal se dan:

- Temperatura del aire, que envuelve el cuerpo, que regula la cesión de calor por conducción- convección y por respiración.
- Temperatura de radiación, media ponderada de las superficies que envuelven el cuerpo, que influye sobre los intercambios radiantes.
- Humedad relativa del aire, que modifica las pérdidas por evaporación de transpiración y la humedad cedida con la respiración.

- Velocidad del aire respecto al cuerpo, influyente en la disipación por convección y en la velocidad de evaporación de la transpiración.

Basándonos en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los edificios RITE de España, se puede concluir que el ambiente se define por aquellas características que condicionan los intercambios térmicos del cuerpo humano con el ambiente. Estas características son la temperatura radiante media del lugar, la velocidad media del aire en la zona ocupada y, por último, la presión parcial de vapor de agua o la humedad relativa.^[31]

Las condiciones térmicas en el interior de un edificio son determinadas por distintas variables, metabolismo de la persona, tipo de vestimenta, tipo de actividad entre otros. No obstante, para lograr una climatización invisible se recomienda tener parámetros de temperatura de aire de un 24 a 26 °C con una humedad relativa de un 55 a 65%.

Es importante acotar: la sensación de temperatura de las personas no corresponde a la temperatura de aire, sino que equivale a un índice de confort térmico denominado temperatura operativa y se define como la temperatura uniforme en un recinto negro radiante en el que un ocupante tendría que intercambiar la misma cantidad de calor por radiación y por convección.

[30] Serra Florencia, R., & Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: UPC.

[31] Gobierno de España. (2006). *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)*. España.

1.5 Conclusiones

Desde el punto de vista de la termodinámica, el intercambio de calor entre el sistema y los demás componentes que irradian calor (usuarios, equipos electrónicos, materiales, entre otros) permite regular de manera equilibrada la temperatura interna del espacio.

Por ello, para lograr desarrollar un patrón de diseño eficiente es necesario tomar en cuenta las posibles variables que contribuyen a la emisión de calor con el fin de eliminar el calor sensible dentro del espacio y así lograr un confort térmico en su interior.

En relación a la masa térmica, la selección de materiales podrá beneficiar o perjudicar

la aplicación del patrón de diseño.

Se debe utilizar materiales que no transmitan exceso de calor por la radiación solar en el interior en el edificio con el objetivo de no sobre trabajar el sistema para lograr el equilibrio térmico.

Además es esencial conocer las características térmicas de los materiales utilizados en las construcciones para aumentar la capacidad de intercambio de temperatura entre el sistema de enfriamiento hidrónico y la energía erradicada de las distintas variables.

La aplicación de las ecuaciones ayudará al desarrollo del patrón de diseño, ya que se debe de comprender en su totalidad las posibles ganancias de calor que obtendrá el edificio.



2

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO HIDRÓNICO

Definición	50
Criterios de diseño	53
Estudios de Caso	58
Conclusiones	70

En las últimas décadas, el alto consumo de sistemas de enfriamiento mecánico como el aire acondicionado ha provocado un alza en el consumo energético de los edificios. A pesar de que el sistema hidrónico ha sido trabajado por años, son pocas las aplicaciones que se le han dado en relación al uso del aire acondicionado, y América Latina no es su excepción.

2.1 Definición

La refrigeración radiante consiste de un sistema que emite, absorbe, distribuye y controla el calor dentro de un espacio aire según la ISO 11855-1 ^[32]. Es decir, el sistema de enfriamiento radiante como una superficie con control de temperatura, que enfría la temperatura interior mediante la eliminación de calor sensible.

Su aplicación puede ser utilizada como sistema primario o sistema complementario combinado con un sistema de aire, los cuales proporcionan soluciones flexibles y rentables tanto las condiciones térmicas como eficiencia energética de los edificios.

Estas caracterizaciones se dan debido a que su proceso de intercambio radiante que no afecta directamente la temperatura del aire ambiente ya que la radiación de onda larga enfría las superficies circundantes que luego indirectamente enfría el aire ambiente.

Referente a su funcionamiento, los sistemas radiantes de refrigeración utilizan el efecto contrario de los sistemas de calefacción radiante, donde se basa en el proceso de flujo de calor desde una superficie calentada hacia los objetos y ocupantes. Los sistemas radiantes de refrigeración suelen ser hidrónicos, refrigerando con la circulación de agua en las tuberías en contacto térmico con la superficie. Normalmente, el agua que circula tiene que ser 2.4 °C por debajo de la temperatura de aire interior deseada.

Después de haber sido absorbida por la superficie activa enfriada, el calor se puede retirar con el agua que fluye por un circuito hidrónico, reemplazando el agua caliente con agua más fría. La mayoría de los resultados del proceso de enfriamiento eliminan el calor a través del intercambio radiante con personas y

[32] ISO 11855-1:2012, Building environment design - Design, dimensioning,, 2012

objetos y no por el aire, el confort térmico de los ocupantes se puede lograr con las temperaturas más cálidas, mejor que usando el aire interior como sistema de refrigeración.

Como resultado de la alta capacidad de enfriamiento del agua y su sus cualidades de absorción de calor, la activación de un sistema de enfriamiento radiante en edificios permite enfriar la temperatura del aire hasta alcanzar la temperatura deseada

Además, los sistemas de refrigeración potencialmente ofrecen reducciones en el consumo de energía de enfriamiento. La carga latente (humedad) de los ocupantes, la infiltración y los procesos en general, deben ser.

Por otro lado, el sistema puede ser utilizado en todo tipo de edificios. La temperatura del agua puede variar un poco según la temperatura ambiente y el área de superficie que necesita enfriar, sin embargo, estas alteraciones son pequeñas y no afecta su efectividad. También, dependiendo de la posición de la tubería, el sistema puede aprovechar la capacidad de almacenamiento térmico de la estructura del edificio.

Según la forma en que se aplique el sistema (figura 11), las transferencias de calor en el edificio puede variar, donde en la mayoría de los casos es de 0.5 a 5.5 W / m²K^[33]. La figura 12 y 13 ejemplifica las distintas formas de instalación del sistema en una edificación y se eficiencia energética.

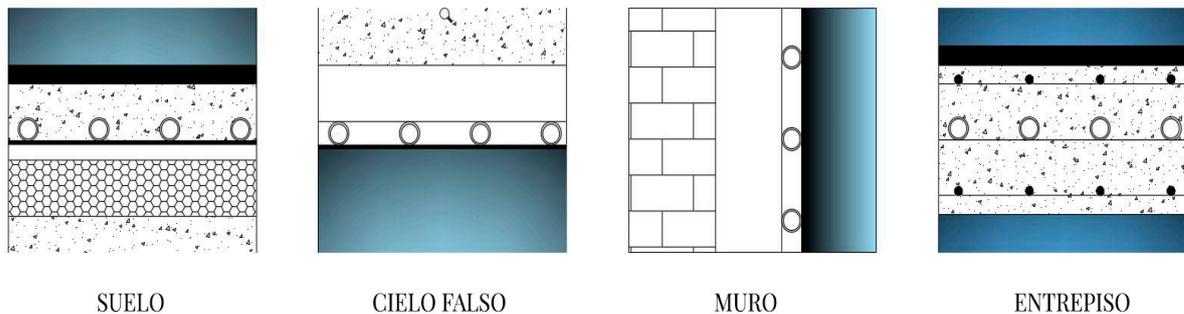


Figura 11. Tipos de aplicación del sistema a la estructura de un edificio. Fuente: Elaboración propia ^[33]

[33] ISO 11855-5:2005, Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort., 2005.

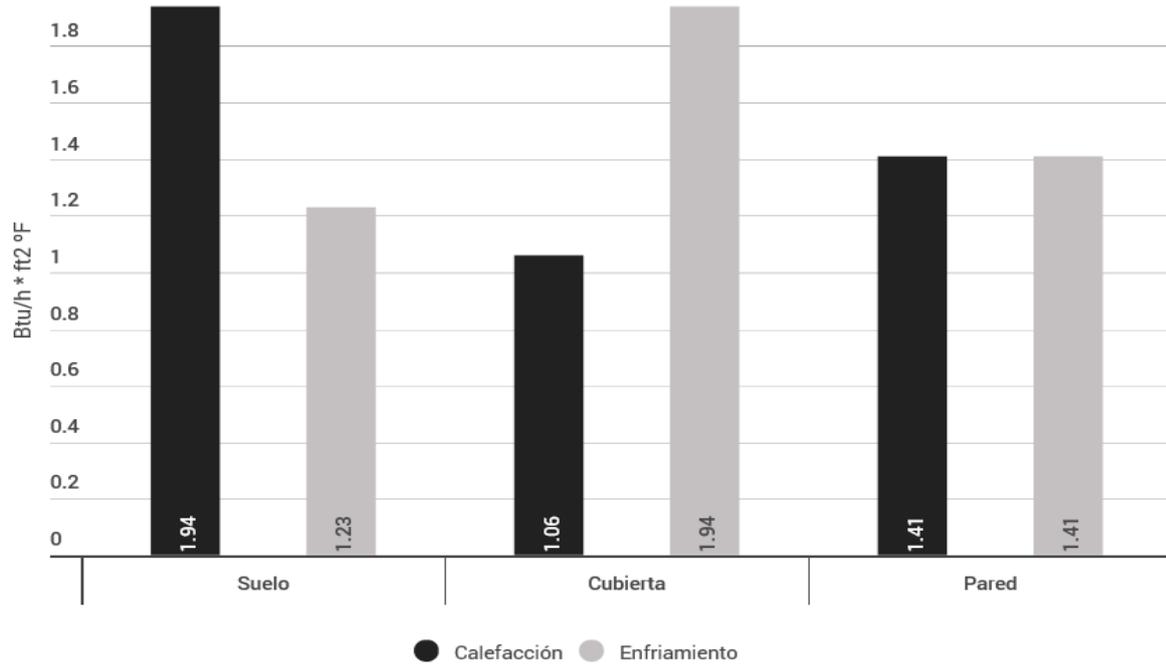


Figura 12. Coeficientes de transferencia de calor entre sistemas de enfriamiento / calefacción radiante en varias superficies de una habitación. Fuente: Elaboración propia [33]

Podemos apreciar que para efectos de enfriamiento, su mejor rendimiento se da cuando se instala en el techo y su diferencia entre un sistema aplicado en el suelo puede ser entre 50% al 90%. Esto se da por la manera en que se comporta el calor dentro de un espacio. (Véase figura 12)

Está claro que es importante mencionar que la aplicación del sistema varía según las condiciones de espacio en donde será integrado. A pesar de presentar mejores resultados en techo, algunos especialistas recomiendan que según la forma del espacio y su configuración de

envolvente es necesario analizar la efectividad de las tres tipos de instalación.

En cuanto al mantenimiento y garantía del sistema. Algunas empresas como Giacomini ofrece hasta 50 años de garantía en tuberías y accesorios instalados con funcionamiento.

Sin embargo, se recomienda realizar una inspección en la presión de las tuberías cada año para asegurar un correcto funcionamiento lo cual convierte el sistema en una alternativa atractiva en cuanto al ahorro económico en su mantenimiento.

[33] ISO 11855-5:2005, Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort., 2005.

2.2 Criterios de diseño

Existen varias organizaciones importantes que desarrollan normativas que presentan criterios de diseño para aplicar sistemas de enfriamiento radiante.

Costa Rica no presenta ninguna normativa oficial que pueda regular su aplicación, sin embargo, existe varias normativas a nivel mundial que pueden ser una herramienta útil que ayudarán en las diversas fases para el diseño, instalación y operación del sistema.

El fin principal de estas normativas es visualizar desde la conceptualización de la envolvente arquitectónica el mejoramiento del comportamiento térmico de sus espacios internos y por ende, reducir el consumo energético a partir de un diseño térmicamente eficiente. Posteriormente, se toma en cuenta los criterios necesarios para incorporar el sistema de enfriamiento hidrónico como mecanismo auxiliar para lograr el bienestar térmico.

Entre las normativas encontramos la:

- UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. (ISO 7730:2005). España
- UNE-ISO 11855:2016. Diseño, dimensionamiento, instalación y control de

sistemas de calefacción radiante y de refrigeración integrados en superficies. (ISO 11855:2006). España

- NOM-008-ENER-2001. Eficiencia Energética en edificaciones. Envolvente de edificios no residenciales. México

2.2.1. UNE-EN ISO 7730:2006.

La metodología de valoración del ambiente térmico se basa en la respuesta humana a las diferentes situaciones provocadas por la combinación de las seis variables que definen el ambiente y dos ligadas al individuo, y que son: temperatura del aire, temperatura radiante media, humedad relativa, velocidad del aire, actividad metabólica y el aislamiento de la vestimenta

La valoración final se expresa a través de dos índices: **PMV** (Voto Medio Previsto o Voto Medio Estimado) y **PPD** (Porcentaje Previsto de Insatisfechos o Porcentaje Estimado de Insatisfechos) y los criterios de bienestar térmico local, tienen en cuenta todos los factores objetivos que influyen en la sensación térmica general del cuerpo. ^[34]

Esta valoración, predice la sensación térmica general que las personas pueden tener en el interior de los edificios y por ello son ampliamente usados en todo el mundo, tanto para el diseño de las condiciones térmicas de confort de lugares de trabajo tipo oficinas que se van a construir o a remodelar, así como

[34] AENOR, «Norma Española UNE-EN-ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local,» España, 2006.

1. Para conseguir un bienestar térmico global con un PPD <10%			
Temperatura operativa	Invierno (época calefacción)	20 °C - 24 °C	(Si se lleva ropa de 1 clo)
	Verano (época refrigeración)	23 °C - 26 °C	(Si se lleva ropa de 0,5 clo)
Velocidad del aire		<0,1 m/s	
2. Para conseguir bienestar local con un PD <5% (apartados a y c) y un PD <10% (apartado b)			
a.	Diferencia entre la temperatura del aire a la altura de la cabeza		<3 °C
b.	Rango de temperatura del suelo		19 °C a 29 °C
c.	Asimetría de temperatura radiante	Debido a un techo caliente	<5 °C
		Debido a una pared / ventana fría	<10 °C
		Debido a un techo frío	<14 °C
		Debido a una pared / ventana caliente	<23 °C
3. Para el bienestar térmico y para evitar la excesiva humedad de la piel y la sequedad de la piel y las mucosas			
Humedad relativa del aire		30% - 70%	

Tabla. 2 Recomendaciones para el bienestar térmico en oficinas. Fuente: Elaboración propia. ^[34]

[34] AENOR , «Norma Española UNE-EN-ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local,» España, 2006.

la evaluación del bienestar térmico general del cuerpo (bienestar térmico global) de trabajadores y otros ocupantes de oficinas y edificios en uso.

Los valores de PMV y PPD de referencia recomendados en estos casos, asegurarían ese nivel de bienestar al **90%** de los trabajadores (de un grupo numeroso de trabajadores), que potencialmente trabajen en idénticas condiciones ambientales, se vistan de forma similar y que realicen la misma actividad física.

En relación a los valores recomendados para el bienestar térmico global, la UNE-EN ISO 7730:2006 recomienda:

$$0,5 < \text{PMV} < + 0,5 \quad \text{ó} \quad \text{PPD} < 10 \%$$

Donde se consideran aceptables para el bienestar térmico global de los trabajadores en unas condiciones ambientales de los espacios cerrados:

- Una sensación térmica neutra (PMV = 0)
- Una sensación térmica de “un poco de frío” (PMV entre 0 y - 0,5) y
- Una sensación térmica de “algo de calor” (PMV entre 0 y + 0,5).

Está claro que es necesario tomar en cuenta las recomendaciones de la normativa (véase tabla 2) para mejorar el comportamiento térmico dentro de los edificios y por ende, reducir el alto

consumo energético de los edificios.

Los valores que se deben apropiarse son el porcentaje que debe estar satisfecho el usuario, así como la temperatura que deben existir entre el suelo y el techo para mejorar las condiciones térmicas del espacio. Por último, también se debe tomar en cuenta la recomendación del porcentaje de humedad que deben presentar espacios cerrados como las oficinas.

2.2.2. UNE-EN ISO 1185:2016

La siguiente norma tiene como objetivo proporcionar criterios para diseñar eficazmente sistema de climatización radiante. Entre los criterios que hace mención la normativa son los estándares de confort térmico para espacios donde se ha instalado sistemas radiantes, cálculo de la salida de calor, dimensionamiento, análisis dinámico, instalación, operación y control posterior del sistema.

Como se había comentado anteriormente, el confort térmico puede definirse como la condición psicológica que expresa la satisfacción con el medio ambiente térmico. Por lo tanto, el confort térmico sería evaluado preguntando a todos los ocupantes del espacio si están satisfechos con su entorno térmico como se menciona en la normativa UNE-EN ISO 7730. Sin embargo, con el fin de diseñar y controlar los sistemas de enfriamiento radiante, es necesario

preceder el confort térmico en un espacio sin recurrir a un resultado de sondeo.

Para proporcionar un entorno térmico aceptable a los usuarios, se tomará en cuenta el promedio de los votos (PMV) previstos (figura 16), la temperatura operativa (OT) y el confort térmico local (temperatura de la superficie, diferencias de temperatura del aire vertical, asimetría de la temperatura radiante, etc.).

También es fundamental tomar en cuenta que los sistemas radiantes ubicados sea el suelo, pared o techo se debe de tener atención al límite de temperatura superficial del suelo y la pared con los que ocupantes pueden tener contacto directo, para evitar el discomfort térmico en los espacios.

Por ejemplo, en la normativa ISO 7730 se recomienda el rango de temperatura del piso de 19 °C a 29 °C en espacios donde los usuarios son sedentarios. Este valor es un factor limitante a la hora de decidir la capacidad de los sistemas de enfriamiento. Por este motivo, se recomienda seguir los estándares ampliamente aceptados de cada país al decidir el rango óptimo de temperatura de la superficie del piso.

Asimismo, la normativa introduce criterios de diseño y dimensionamiento para refrigeración de piso, techo y pared.

Los pasos se aplican a enfriamiento

por suelo, sin embargo, estos procedimientos pueden ser aplicados al mismo procedimiento a paredes como techo excepto para la determinación de curvar limistes debido a la limitaciones de temperatura superficiales del calentamiento del techo.

Los pasos de diseño son los siguientes: ^[35]

- Paso 1: Calcular la carga de refrigeración sensible. Esta carga no incluye las ganancias de calor adyacentes y se recomienda las normas de cálculo EN 15243 basadas en un índice como la temperatura operativa (OT)
- Paso 2: Determinar la cantidad mínima de aire de suministro necesaria para la deshumidificación
- Paso 3: Calcular la refrigeración latente disponible en el aire. También calcular el enfriamiento sensible disponible en el aire de suministro.
- Paso 4: Determinar la carga de enfriamiento sensible restante que debe satisfacer el sistema radiante. También se debe de designar o calcular la humedad relativa y el punto de rocío, ya que el sistema de enfriamiento hidrónico debe de operar dentro de un rango por encima del punto de rocío, que se especificará en función a las condiciones climáticas respectivas del país.
- Paso 5: Determinar el área de la superficie de enfriamiento, excluyendo cualquier área cubierta por objetos inamovibles fijados a la estructura del edificio.

[35] Han Lim, J., & Kwang, W. K. (2016). The international standard on the design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems. *Rehva Journal* , 46-53.

- Paso 6: Establecer una temperatura superficial mínima permitida de acuerdo al ISO 11855 en consideración al punto de rocío.
- Paso 7: Determinar el flujo de calor del diseño.
- Paso 8: Para el diseño de los sistemas de refrigeración del piso se debe determinar el espacio utilizado para el diseño con el máximo flujo de calor.
- Paso 9: Establecer el sistema de enfriamiento del piso, como el espacio de tubería y el tipo de revestimiento. Asimismo el diseño de la temperatura superficial mínima.
- Paso 10: Si el diseño de flujo de calor no se puede obtener se recomienda proporcionar un equipo de enfriamiento adicional.
- Paso 11: Fijar la resistencia térmica de la capa aislante y el caudal del agua del sistema
- Paso 12: Estimar la longitud total del circuito de enfriamiento.

Es evidente que gran parte de estos pasos se elaboran en colaboración con profesionales relacionados a la climatización de espacio, es fundamental que el arquitecto tenga conocimiento sobre los criterios necesarios para diseñar envolventes arquitectónicas térmicamente efectivas que faciliten el funcionamiento del sistema de enfriamiento radiante.

2.2.3. NOM-008-ENER-2001

El objetivo de la norma es limitar la ganancia de calor de las edificaciones a través de su envolvente, con el fin de racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento. En otras palabras, la norma busca optimizar el diseño desde la perspectiva del comportamiento térmico de la envolvente, obteniendo así un ahorro de energía y un mejor confort de los ocupantes de la edificación.

Si bien es cierto que esta normativa está dedicada especialmente al territorio mexicano, en su documento presenta valores que pueden aportar al cálculo térmico de la envolvente. Entre la información podemos encontrar ejemplos de cálculos térmicos basados en las ecuaciones citadas anteriormente en el presente documento. Además, se puede utilizar algunos valores de propiedades térmicas de materiales que no se puedan obtener fácilmente por parte de los proveedores de materiales de construcción.

La normativa no presenta estándares como la ISO 7730, pero se basa en el mismo principio esencial de comprender el comportamiento térmico de las edificaciones, y como los sistemas constructivos influyen en ella.

2.3 Estudios de Caso

En la actualidad se han desarrollado grandes avances para incorporar el sistema en diversas zonas climatológicas, especialmente en zonas de alta humedad como el trópico húmedo. Muchas edificaciones han logrado introducir el sistema como auxiliar para el mejoramiento del comportamiento térmico de sus edificios bajo condiciones climáticas que podrían limitar su eficiencia.

Pero en cambio, basándose en criterios de diseño y consideraciones arquitectónicas, los diseñadores han logrado insertar con éxito el sistema de enfriamiento radiante, mejorando no solo las condiciones térmicas, sino el consumo energético de edificio.

2.4.1 Pearl River Tower, China

Un ejemplo en la actualidad lo podemos apreciar en el edificio Pearl River Tower, es un edificio construido en la ciudad de Guangzhou, la más contaminada de China. Su entorno climático se define por temperaturas entre los 11 a 33 °C con humedad relativa superior al 70%.

El diseño, elaborado por la firma de arquitectos Skidmore Owings y Merrill, presentaba muchas limitaciones, sin embargo el grupo encargado de su diseño determinó utilizar el sistema como techo radiante en conjunto con un sistema eficiente de ventilación.

Este edificio es catalogado uno de los edificios con menor consumo energético. La aplicación de diversas estrategias ha permitido un ahorro del 60% menos de energía que edificios con características arquitectónicas similares.^[36]

Según el equipo de trabajo, para lograr ser un edificio independientemente energético se necesitó lograr cuatro pasos importantes:

1. Reducir: consumo energético
2. Absorber: recursos naturales y recursos de energía pasiva del entorno
3. Recuperación: recursos energéticos creados propiamente del edificio
4. Generación: de energía proveniente de recursos pasivos

Igualmente, el edificio es un ejemplo sobre la integración de estrategias tanto pasivas como mecánicas para crear una edificación equilibrada. Parte de este equilibrio se debió a la envolvente eficientemente térmica y el aprovechamiento de los recursos naturales como fuente de nuevas energías.

En referencia a los materiales que componen la envolvente se encuentran ventanas que presentan doble vidrio insulado con un panel integral que regula la entrada de calor en el interior del edificio. Además, la utilización de parasoles que pueden estar completamente abiertos, cerrados o con un ángulo de 45° permite regular la entrada lumínica al interior del edificio.

[36] Frechette, R. (2008). Case Study: Pearl River Tower, Guangzhou, China . Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

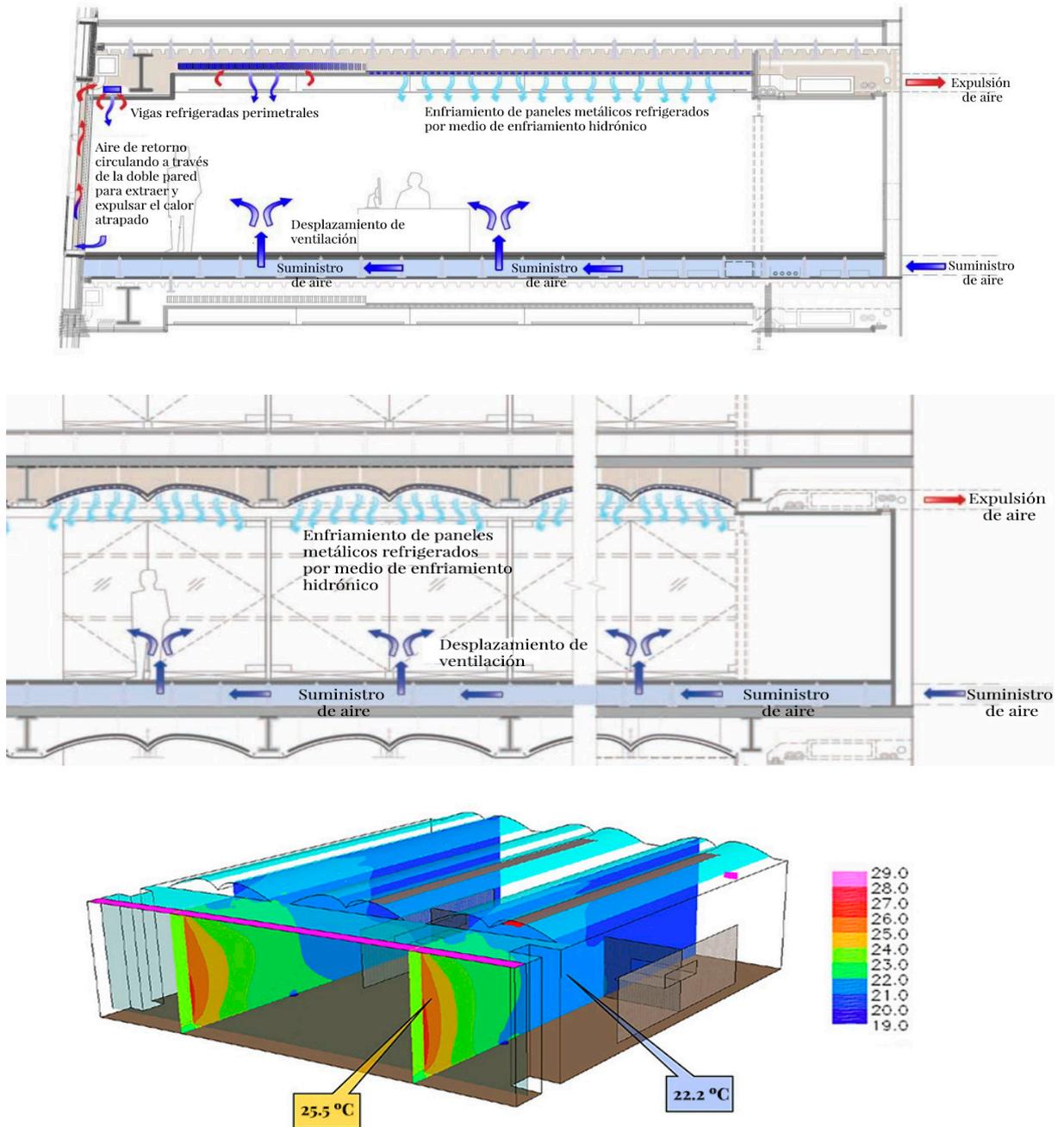


Figura 13, 14 y 15. Diagramas del sistema en el edificio. Fuente: Traducción propia [36] [37]

[36] Frechette, R. (2008). Case Study: Pearl River Tower, Guangzhou, China . Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

[37] Epstein, K. (2008). How Far Can You Go? High Performig Buildings , 22-29.

Por lo que respecta al sistema de enfriamiento por radiación (véase figura 14), la torre está dotada de un sistema de enfriamiento hidrónico que bombardea agua a una temperatura de 14.5°C , que se transporta por tuberías de cobre instaladas en la losa para enfriar las láminas curvas metálicas utilizadas como cielo falso.

El sistema, trabaja paralelamente con un sistema de ventilación de bajo consumo energético, mejorando la eficiencia del sistema y reduciendo su tiempo de respuesta ante una posible alteración en las condiciones térmicas en el interior del edificio. Esta combinación ofrece una solución inteligente ya que provee poca demanda energética como mantenimiento y reduce los costos a largo plazo.

Con este sistema se consigue un ciclo dentro del espacio útil del edificio, que consiste en que el calor producido por equipos electrónicos y las personas en el interior del edificio ascienda a la parte alta de las plantas, logrando entrar en contacto con los conductos de frío donde esta se enfría y vuelve a descender.

Esta integración de varios sistemas se diseñó en conjunto con un sistema de generación energético para ser una red cerrada y no depender de la red eléctrica pública, convirtiendo su funcionamiento un ciclo energético.

Otra solución que diseñaron para hacer frente al alto contenido de humedad del aire fue el diseño de un sistema que controla la humedad interior y recupera el

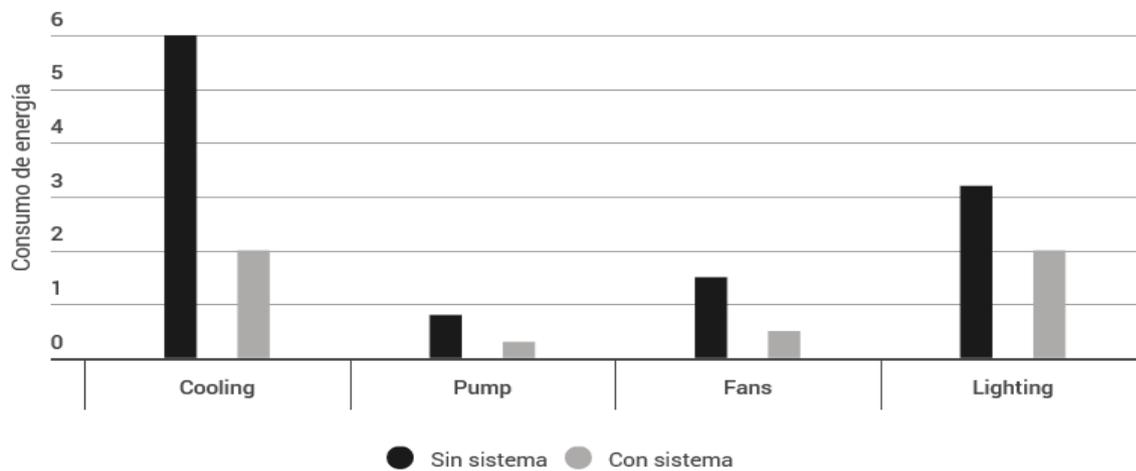


Figura 16. Consumo energético anual del Pearl River Tower. Fuente: Elaboración propia ^[36]

[36] Frechette, R. (2008). Case Study: Pearl River Tower, Guangzhou, China . Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

agua de condensación. Una vez filtrada, se utiliza para el riego de plantas interiores y agua de descarga de los inodoros.

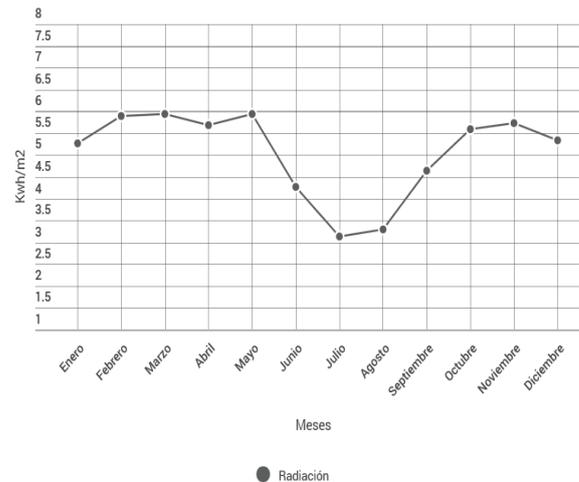
Por otro lado, el diseño del edificio pasó por un proceso de análisis con respecto a edificaciones con la misma geometría pero sin las estrategias sostenibles que presenta el Pearl River Tower, los cuales presento un gran ahorro energético de hasta un 58% como apreciamos en la figura 16.

En resumen, el uso del sistema de enfriamiento radiante ha reducido el costo de mantenimiento en el edificio debido a que no presenta componente como bobinas de ventilación, filtros, aislamientos de baja durabilidad, entre otros. Debido a su aplicación, existe una expectativa de mejora de la productividad humana como consecuencia de la mejora del confort térmico.

2.4.2 Infosys, Pocharam Campus. India

Otra localización donde encontramos la aplicación del sistema bajo las condiciones de alta humedad se dio en el campus Hyderabad en India. Este edificio cuenta con una superficie de 240,00 m² y es considerado uno de los pioneros en la integración de un sistema de enfriamiento hidrónico en una localidad de alto porcentaje de humedad relativa (Véase la grafica 1).

El diseño, desarrollado por los consultores



Gráfica 1. Comportamiento anual de la humedad relativa en Hyderabad, India. Fuente: Elaboración propia [38]

Infosys consiste en dos alas donde cada una tiene un sistema de enfriamiento diferente. La primera ala contiene un sistema eficiente de aire acondicionado diseñado según los criterios de energía según el ASHRAE 90.1. En cambio la otra ala presenta el sistema de suelo de enfriamiento radiante. Ambas alas presentan números similares de usuarios, equipos electrónicos y orientación.

Como parte de su diseño, el edificio presenta una orientación óptima para evitar ganancias de calor excesivas, presentado muros dobles y cubiertas con material de aislamiento. También se escogió utilizar un acristalamiento doble para obtener un mejor aprovechamiento de iluminación y reducción de la ganancia de calor.

[38] Sastry, C. (2012). First Radiant Cooled Comercial Building in India - Critical analysis of energy, comfort and cost . Bangalore.

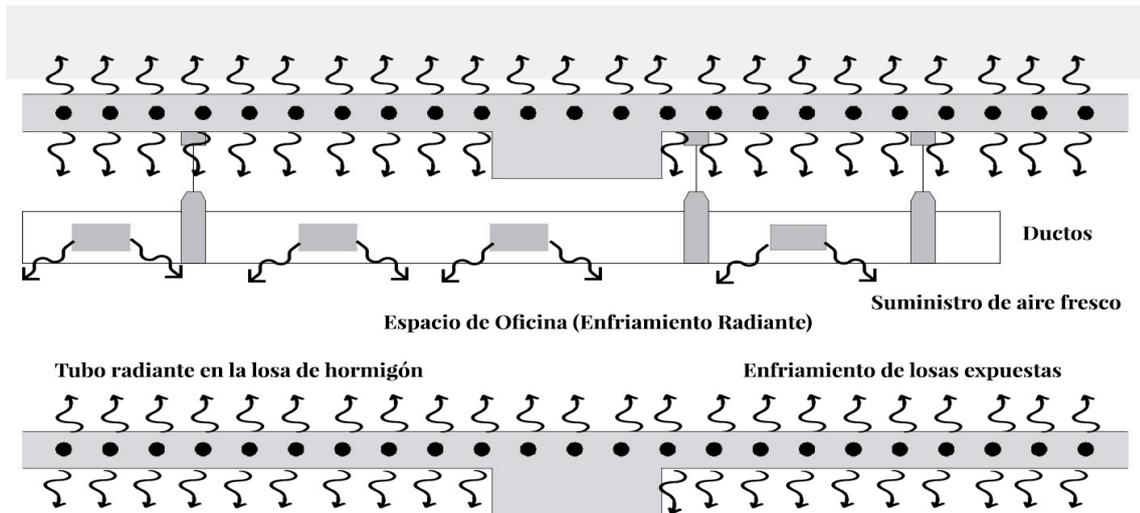


Figura 17. Sección del sistema enfriamiento radiante. Fuente: Elaboración propia ^[38]

Por lo que respecta a las condiciones climáticas de la zona de Hyderabad, sus condiciones meteorológicas muestran que hay diferentes temporadas de seco caliente entre abril y mayo y de cálido húmedo entre julio y agosto. Ya que el clima presenta posibles limitaciones al sistema, se realizó la prueba de dos sistemas de enfriamiento para romper el mito de la efectividad del enfriamiento radiante en climas tropicales.

Para empezar, una de las principales razones por las cuales se instaló el sistema de enfriamiento hidrónico en el edificio fue por su eficiencia en la absorción de energía en comparación del aire, donde el agua puede absorber incluso 3,400 veces más energía. Al bombardear el agua por las losas del edificio,

los diseñadores lograron mantener una temperatura constante de 20°C .^[38]

En cuanto a las estrategias aplicadas en el sistema se decidió diseñar una losa que permitiera una salida en enfriamiento de 75 W/m^2 , sin embargo al aplicar el sistema solo se necesitó una energía de 50 W/m^2 para lograr la temperatura deseada. También se utilizaron chiller de alta eficiencia, bombas y torres de enfriamiento permitiendo un mejor ahorro energético del sistema completo.

Se suministra agua con una temperatura de 14°C y debido al diseño de la envolvente, esta regresa con una temperatura de 17°C , demostrando que en el interior no se traspasado grandes ganancias de calor.

[38] Sastry, C. (2012). First Radiant Cooled Commercial Building in India - Critical analysis of energy, comfort and cost . Bangalore.

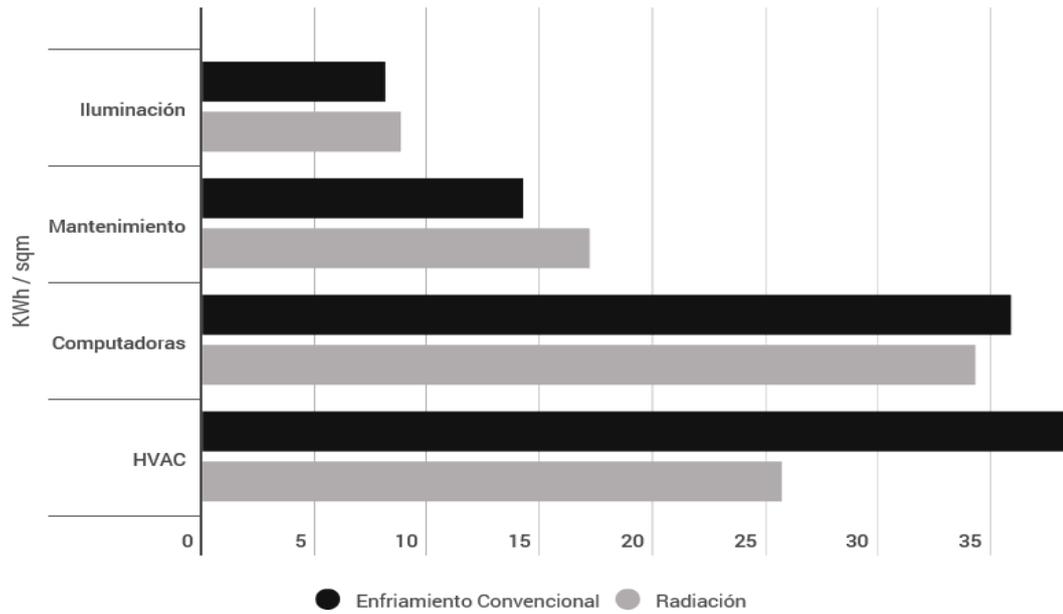


Figura 18. Análisis energético del edificio. Fuente: Elaboración propia^[38]

Equipos	Sistema convencional		Sistema radiante	
	Costo en Pesos MX	%	Costo en Pesos MX	%
Chiller	10484000.00	8.15	943560.00	8.22
Torre de enfriamiento	391920.00	3.39	391920.00	3.41
HVAC	6851700.00	59.18	4593000.00	39.99
AHUS, DOAS, HRW	1535460.00	13.26	863670.00	7.52
Tuberías radiantes, accesorios, instalación,	0.00	0	2717340.00	23.66
Sistema de automatización	1855200.00	16.02	1975200.00	17.2
Costo Total (INR)	21118280.00	100	11484690.00	100
Área (m ²)	11600.00		11600.00	
INR/ m ²	1820.54		990.06	

Tabla. 3 Comparación costos de ambos sistemas. Fuente: Elaboración propia^[38]

Como observamos en la figura 18, el sistema trabaja en conjunto con un sistema de ventilación de bajo consumo energético para satisfacer las necesidades de calidad del aire según el ASHRAE 62.1. También podemos apreciar la decisión de utilizar el sistema sin ningún tipo de aislante para tener el efecto radiante en ambas caras de la losa, esta estrategia permitió reducir los tiempos de enfriamiento y mantener un equilibrio térmico dentro del edificio.

Otro aspecto que se debe de mencionar es que al inicio del proyecto se utilizó un sistema DOAS, sin embargo en el año 2011 se remplazó el sistema por un rollo enfriador de agua para alcanzar la eficiencia más alta en el sistema y obtener un mayor ahorro energético.

Por otro lado el sistema de aire acondicionado presentaba una alta eficiencia de enfriamiento, torres de enfriamiento.

El agua de enfriamiento era de 7.8°C y se regresaba con una temperatura de 15.6°C . También el sistema tiene un sistema de retorno energético para reducir el consumo energético.

En el año 2011 – 2012 se realizó una evaluación del consumo energético de ambos sistemas y se determinó que el sistema de aire acondicionado consumió un promedio de 38.7 kWh/m^2 en cambio el sistema de enfriamiento hidrónico consumo un promedio de 25.7 kWh/m^2 .

A partir de estos datos se puede afirmar que a pesar de necesitar más equipos mecánicos que el aire acondicionado, el consumo energético fue un 40% menos en comparación del aire acondicionado según criterios de consumo energético del ASHRAE 90.1.

Otro variable que se analizó con el sistema de enfriamiento por radiación fue su cualidad de brindar una alta calidad de aire en el interior, esto permitió disminuir las enfermedades que habitualmente se presenta con equipos de enfriamiento convencionales.

En cuanto al costo de adquisición de cada sistema, debido a la magnitud del proyecto se pensó al inicio que el costo inicial del sistema hidrónico iba a ser mayor al costo del equipo de aire convencional, sin embargo, el sistema HVAC es más elevado debido a que el tamaño del equipo es mayor comparado con el sistema radiante.

La tecnología de enfriamiento radiante eficiente emergente en la industria de HVAC. Según los especialistas de climatización, el sistema puede ser la tecnología del futuro y podrá hacer frente a los altos consumos energéticos de los edificios. Los siguientes puntos se pueden concluir del caso del estudio elaborado por Guruprakash Sastry:

- El sistema de enfriamiento radiante es más fácil de construir, ya que requiere

menos equipos y el costo total del sistema es ligeramente inferior al sistema de aire acondicionado convencional.

- El sistema ocupa sólo un tercio del espacio comparado con el sistema de aire acondicionado convencional.
- La eficiencia del sistema radiante es aproximadamente 33% mejor que un sistema de aire acondicionado convencional altamente eficiente.
- El sistema de enfriamiento radiante proporciona una mejor calidad del aire interior y un mejor confort térmico que el aire acondicionado convencional.

Es evidente que el sistema de enfriamiento radiante aplicado en una zona con índices de alta humedad y temperatura puede ser una gran herramienta para disminuir el consumo energético y lograr el bienestar térmico. Es importante recalcar que el sistema debe ser parte de un conjunto de estrategias para lograr obtener un mayor provecho de su eficiencia.

2.4.2 Giacomini, Barcelona*

Para conocer la verdad capacidad de los sistemas de climatización por radiación, se realizó una visita a las instalaciones de la empresa Giacomini ubicada en la localidad de Seva en Barcelona, España. Se realizaron diversos experimentos donde demuestran la funcionalidad del sistema en diferentes escenarios. Entre ellos, se realizó una prueba donde su objetivo fue evaluar el comportamiento

térmico en dos áreas de trabajo dentro de un espacio de oficina para demostrar la eficiencia del sistema y su flexibilidad térmica para el ajuste de temperatura a criterios del usuario.

El área de experimentación de sensaciones radiantes está formado por varios espacios equipados con tecnología de climatización radiante en varias aplicaciones de suelo, pared y techo, y con capacidad para trabajar en modo calefacción o refrigeración indistintamente.

Para ello se dispuso de una sala de equipos de producción de energía térmica de funcionamiento autónomo a cuatro tubos, con varios generadores entre los que se incluye una producción simulada de calor a través de los captadores de energía solar térmica y una previsión para la instalación de una caldera de hidrógeno Hydrogem.

La activación del sistema se realizó en la sala de Castillo de Montjuic. Esta sala está equipada con un suelo, pared y techo radiante, conectados a la red de distribución hidráulica a cuatro tubos, así como unidad de tratamiento de aire a cuatro tubos para la introducción del aire primario.

Se establece que en esta prueba solo se utilizó el sistema de techo radiante para analizar las diferencias de temperatura entre dos áreas de trabajo en un mismo espacio. La activación del sistema radiante

*Nota: El desarrollo completo del ejercicio Giacomini se podrá observar en el Anexo 1 de este documento.

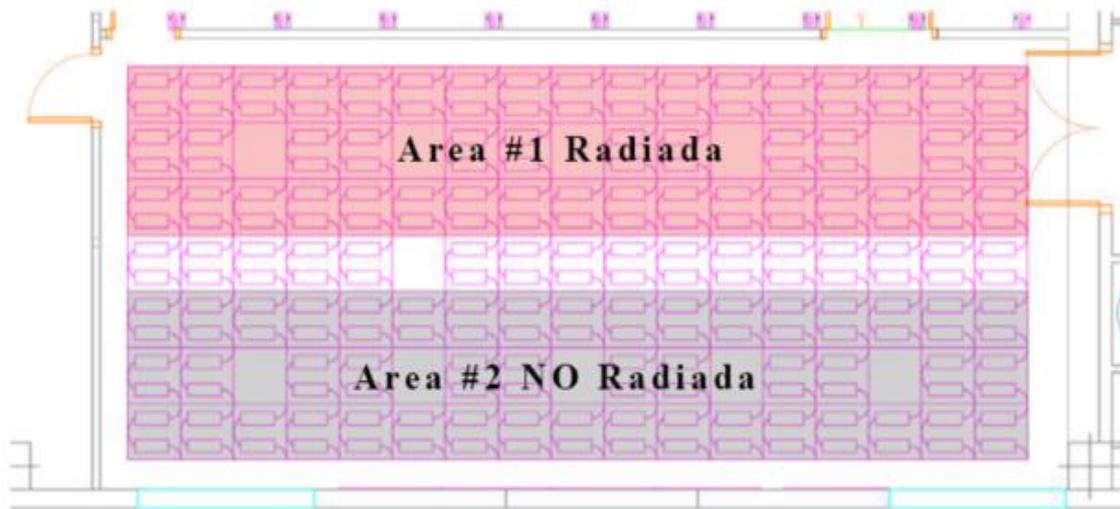


Figura 19. Sala de equipos de producción de energía térmica. Esquema de principio.
Fuente: Elaboración propia ^[39]

se realizó en tres filas (área #1) de las siete de placas radiantes instaladas en el espacio, como podemos apreciar en la figura 19.

Para un mejor análisis de comportamiento térmico se instalaron 2 esferas EPS recubiertas de lámina de aluminio lacado negro mate, sensibles a la temperatura operativa que se ve influenciada tanto por la temperatura del aire como por la temperatura del entorno radiante. Se colocaron dos juegos de

esferas en cada área del experimento como se representa en las fotografías de la figura 20. La primeras dos esferas tienen una separación de 20 cm y las otras dos de 180 cm desde el suelo terminado.

Además, se colocó tres escritorios en cada área para simular el espacio de una oficina multi – ocupacional para detectar también el comportamiento térmico del mobiliario en ambos escenarios por por imágenes térmicas.

[39] Giacomini. (2016). Equipamiento Existente. Barcelona : ExSite.

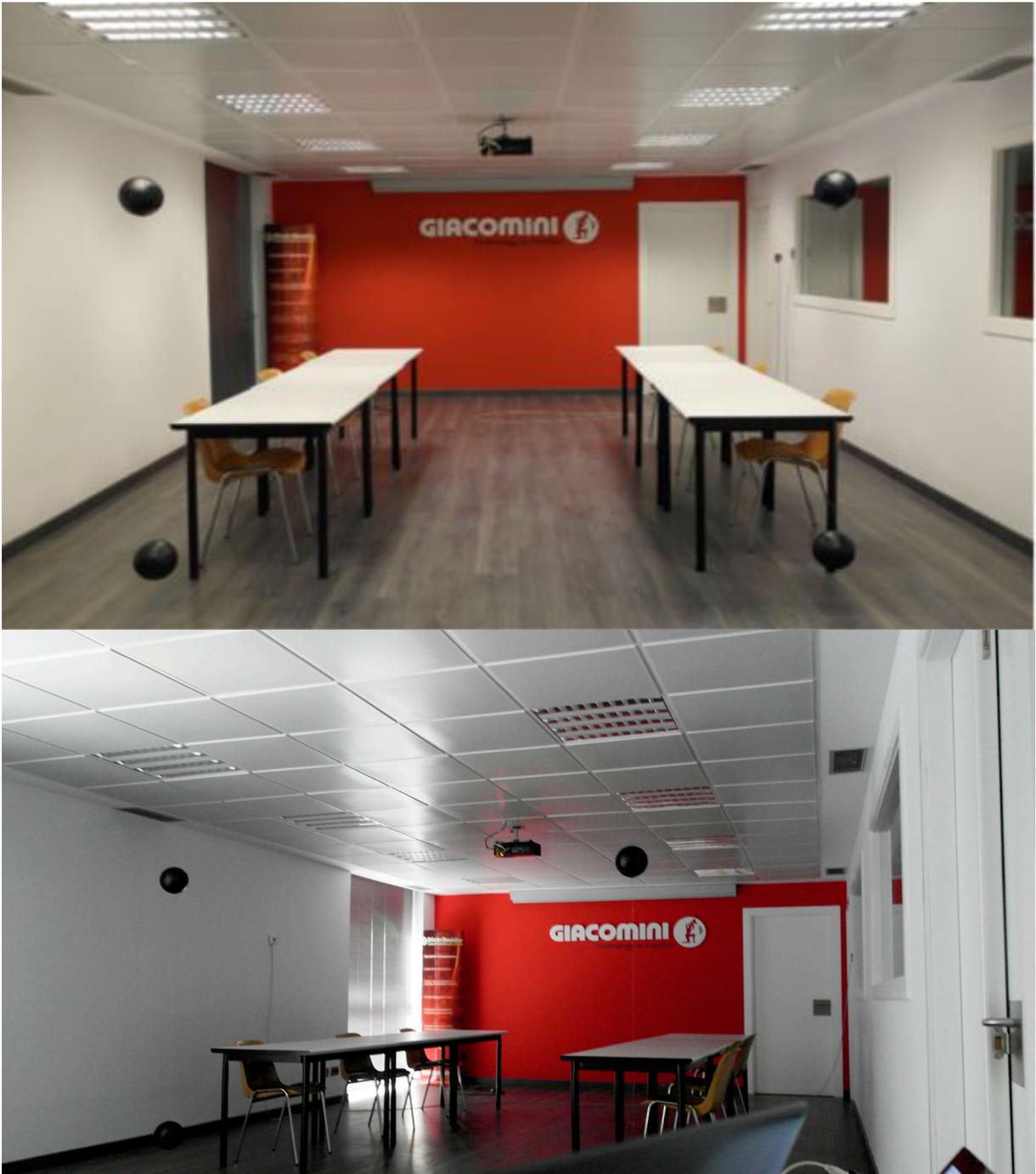


Figura 20. Fotografías de instalación de las esferas en la sala Castillo de Montjuic.
Fuente: Elaboración propia

Resultados

Se realiza una pequeña evaluación del sistema radiante con agua fría para también analizar la flexibilidad del sistema para ser controlado por cada usuario. El espacio se deja de la misma manera en que se acomodó para la primera medición.

El sistema de calefacción funcionó toda la noche para obtener una temperatura uniforme de ambas áreas. De esta manera, al activar el sistema de enfriamiento radiante en solo tres filas como el experimento pasado, de esta manera se podrá partir de una temperatura en común y lograr obtener datos del comportamiento de cada área.

Se da comiendo el experimento a las 9:48 a.m. con la temperatura del área #1 es de 23.6094 °C con humedad de 51.1563% y el área #2 de 23.9375 °C con humedad de 62.4668. Se da inicio al funcionamiento del sistema con una temperatura de

agua caliente a 18 °C. Se mantienen encendidas las luminarias del espacio.

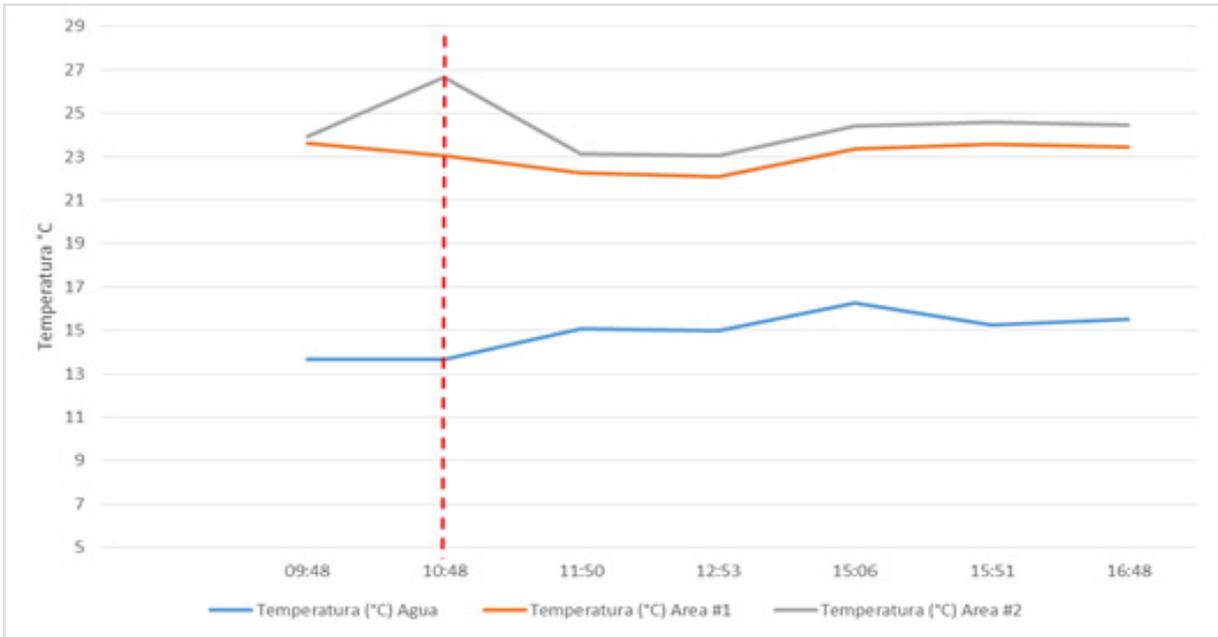
En este caso se recolectaron datos en periodos de cada hora aproximadamente (mediante captura de pantalla del software de control térmico) para obtener datos que revelen el comportamiento térmico de ambas áreas.

A partir de los datos obtenidos en el registro de capturas de pantalla, se trasladan las lecturas (cada hora) a una hoja de Excel. Se recogen los datos obtenidos de temperatura de agua, temperatura ambiente y humedad del espacio.

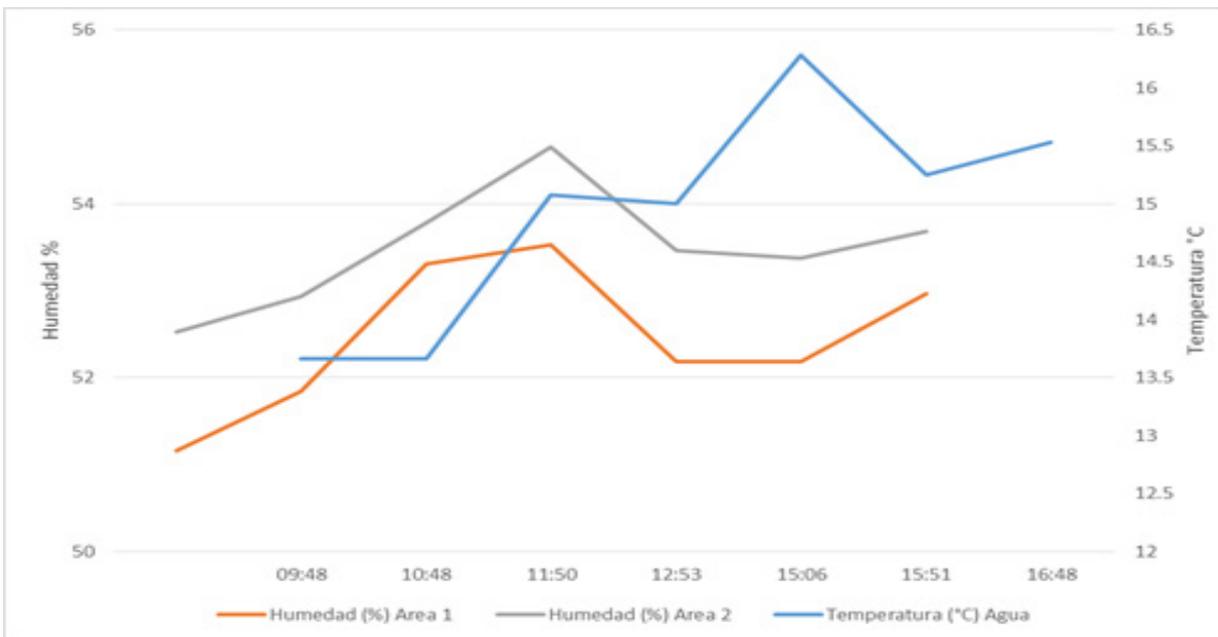
La tabla 4 demuestra que hay un promedio de 1.54 °C de diferencia en ambas áreas. Reafirmando la flexibilidad del sistema para funcionar en puntos específicos dentro de un gran espacio. Las gráficas 2 y 3 señalan el comportamiento de temperatura y humedad durante la prueba realizada.

DATOS MEDICIÓN ENFRIAMIENTO (27/10 / 2016)									
P zona radiada:		18°C							
zona NO radiada:		35°C							
Número	Día	Hora	Temperatura (°C) Agua	Temperatura (°C) Area #1	Temperatura (°C) Area #2	Diferencia de temperatura	Humedad (%) Area 1	Humedad (%) Area 2	Diferencia de humedad
1	27/10/2016	09:48	13.6641	23.6094	23.9375	-0.3281	51.1563	52.5313	-1.375
2	27/10/2016	10:48	13.6641	23.0625	26.6406	-3.5781	51.8438	52.9375	-1.0937
3	27/10/2016	11:50	15.0781	22.25	23.1406	-0.8906	53.3125	53.7813	-0.4688
4	27/10/2016	12:53	15	22.0938	23.0469	-0.9531	53.5313	54.6563	-1.125
5	27/10/2016	15:06	16.2813	23.375	24.3906	-1.0156	52.1875	53.4688	-1.2813
6	27/10/2016	15:51	15.25	23.5938	24.5938	-1	52.1875	53.375	-1.1875
7	27/10/2016	16:48	15.5313	23.4531	24.4688	-1.0157	52.9688	53.6875	-0.7187
				23.06251429	24.31697143	-1.254457143	52.45538571	53.4911	-1.0357143

Tabla 4. Resultados de las mediciones del 27 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2. Comportamiento térmico de las áreas #1 y #2 con enfriamiento. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. Comportamiento de la humedad de las áreas #1 y #2 con enfriamiento Fuente: Elaboración propia

2.5 Conclusiones

En los dos primeros casos podemos apreciar la aplicación del sistema en países con climatología similar a Costa Rica. Estos ejemplos demuestran la efectividad de aplicar este tipo de sistemas en condiciones de alta humedad.

Su aportación es fundamental en el desarrollo del producto de esta investigación y ya que brindan parámetros de diseño que pueden aumentar la efectividad y rendimiento del sistema en situaciones climáticas complejas.

Algunos de estos parámetros se basan principalmente en la escogencia del materiales, en el cómo obtener el aprovechamiento de las propiedades térmicas y utilizarlas como un factores determinantes para el rendimiento del sistema. Otra gran contribución de estas aplicaciones es su solución ante la alta humedad en el interior de sus edificios.

El Pearl River Tower es un claro ejemplo de cómo aprovechar al máximo la condensación de la humedad en el interior del edificio y como está puede utilizarse para otras funciones en el edificio. En cuanto al edificio SDB-1 de la India determina los posibles parámetros que deben tener el sistema para que sea integrado a otras estrategias de diseño.

En cuanto a los resultados obtenidos en el ejercicio desarrollado en la

empresa Giacomini se presentó las ventajas que presenta el sistema de radiación de techo es su instalación modular, la cual permite configurar varias áreas de circuito con el fin de que la función de cada una sea independiente. Esta cualidad permite que la distribución de calor o enfriamiento sea puntual en un espacio multi – ocupacional.

Además, queda demostrado que la aplicación del sistema en una área específica no impacta de manera evidente las condiciones térmicas del área donde no está activo la calefacción o enfriamiento, permitiendo así la oportunidad de crear distintos ambientes térmico es un espacio multi – ocupacional.

Las diversas aplicaciones del sistema en diferentes condiciones refuerzan la teoría de la efectividad del sistema, indiferentemente las condiciones climáticos donde este aplicado. Por ello, el compromiso pragmático de esta investigación es lograr introducir el sistema de enfriamiento hidrónico en edificaciones de Costa Rica para seguir abriendo un camino a aplicaciones tecnológicas que reduzcan el alto consumo energético y brinden un equilibrio térmico a los usuarios.



3

MARCO CONTEXTUAL

San José, Costa Rica	75
Temperatura de San José	76
Humedad Relativa San José	77
Radiación Solar	77
Estrategias de diseño local	78
San Jose, Costa Rica / Ciudad de Mexico, Mexico	79
Conclusiones	83

Geográficamente, la franja planetaria comprendida entre los paralelos Trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio se define como Zona Tropical. Entonces definimos como zona de clima de tropical húmedo, aquella que se caracteriza por tener dos estaciones diferentes. La estación de lluvias y la estación seca, donde la lluviosa se caracteriza por precipitaciones abundantes durante varios meses consecutivos y su nivel de precipitación varía entre 800 a 1500 mm por año, pudiendo alcanzar hasta 5000 mm en ciertas regiones.^[38]

Costa Rica se encuentra localizada dentro de las coordenadas geográficas 8° y $11^{\circ}15'$, de latitud norte 82° y 85° , de longitud oeste. Incluyendo su área insular, tiene una extensión de 51.100 km² (50.660 km² de tierras y 440 km² de agua). Junto a Belice y El Salvador es una de las repúblicas más pequeñas de América Central.

Limita al norte con Nicaragua con la que comparte 309 km de frontera y al sur con Panamá con la que comparte 639 km, al este con el mar Caribe y al oeste con el océano Pacífico.

La orientación noroeste-sureste del sistema montañoso divide a Costa Rica en dos vertientes: Pacífica y Caribe. Cada una de estas vertientes, presenta su propio régimen de precipitación y temperaturas con características particulares de distribución espacial y temporal.^[39]

Régimen Pacífico

Se caracteriza por poseer una época seca y una lluviosa bien definidas. La seca se extiende de diciembre hasta marzo. Abril es un mes de transición. El mes más seco y cálido es marzo, el inicio comienza según la ubicación latitudinal.

Lo contrario sucede con el inicio de la época lluviosa donde este período va de mayo hasta octubre, siendo noviembre un mes de transición. Presenta una disminución relativa de la cantidad de lluvia durante los meses de julio y agosto (veranillo o canícula) cuando se intensifica la fuerza del viento Alisios. Los meses más lluviosos son septiembre y octubre debido principalmente a la influencia de los sistemas ciclónicos, los vientos Monzones provenientes del océano Pacífico ecuatorial y las brisas marinas, que son responsables de las lluvias intensas cuando unen

[38] Ugarte, J. (2005). Guía de la Arquitectura Bioclimática. San José: Instituto de Arquitectura Tropical de Costa Rica.

[39] Instituto Meteorológico de Costa Rica. (02 de Diciembre de 2015). IMN. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/inicio>.

su efecto a las barreras orográficas.

La Zona de Convergencia Intertropical (ZCI) es un cinturón de baja presión ubicado en la región ecuatorial del planeta, formado por la convergencia de aire cálido y húmedo. La ZCI es uno de los factores más influyentes en el régimen de precipitación del Pacífico, sobre todo hacia el sur del país. Puede desplazarse hasta alcanzar parte de nuestro territorio. Las lluvias ocurren predominantemente durante la tarde y primeras horas de la noche.

Régimen Caribe

El régimen de esta vertiente no presenta una estación seca definida pues las lluvias se mantienen entre los 100 y 200 mm en los meses menos lluviosos, lo cual es una cantidad de lluvia considerable. En las zonas costeras se presentan dos períodos relativamente secos.

El primero entre febrero y marzo y el segundo entre setiembre y octubre. El primer período seco está en fase con el período seco de la vertiente pacífica, sin embargo, el segundo período coincide con los meses más lluviosos de dicha vertiente. Se presentan dos períodos lluviosos intercalados entre los secos. El primero va de noviembre a enero y es el período máximo de lluvias.

El segundo se extiende de mayo a agosto y se caracteriza por un máximo en

julio que coincide con el veranillo del Pacífico. El mes más lluvioso es diciembre, el cual se encuentra influenciado por los efectos de frentes fríos provenientes del Hemisferio Norte los cuales se presentan entre noviembre y mayo, pero con mayor posibilidad de afectación entre noviembre y marzo. Las lluvias ocurren con mayor probabilidad en horas de la noche y la mañana.

Los dos regímenes de precipitación (Pacífico y Caribe), la altura y orientación de las montañas, junto con los vientos predominantes y la influencia de los océanos, permiten diferenciar siete grandes regiones climáticas: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Región Central, Zona Norte, Región Caribe Norte y Región Caribe Sur.

El sitio de estudio para esta investigación se encuentra ubicado en la región climática de la Región Central, que se caracteriza por ser una región tectónica y volcánica que se encuentra limitada al norte por la Cordillera Volcánica Central, al sur por los Cerros de Escazú, Tablazo, Cedral y la Fila Candelaria, al oeste de los Montes de Aguacate y al este por las estribaciones de la Cordillera de Talamanca.

3.1 San José, Costa Rica

La provincia de San José se localiza en la parte central de Costa Rica donde está limitada por las provincias de Heredia y Alajuela al norte, por las provincias de

Cartago y Limón al este y con Puntarenas al oeste y sur. La superficie territorial de San José es de 4, 965,90 km² y se encuentra en una posición geográfica entre las coordenadas de 09° 38' 15" de latitud norte y 84° 00' 39" de longitud oeste.

Debido a la ubicación geográfica de San José, este se ve afectado por las condiciones del Pacífico (Zona de Convergencia Intertropical y los vientos ecuatoriales), así como la influencia del Caribe (Vientos Alisios del norte, con alta nubosidad y lluvias débiles debido al paso entre montañas.

El viento predominante durante las mañanas de toda la temporada lluviosa es viento calmo o alisio débil. Por las tardes predominan los oestes. En la temporada seca y durante el veranillo, el alisio domina todo el día.

Posee más días con lluvia y además mayor precipitación durante los meses de diciembre, enero y febrero producto de una mayor influencia del Caribe, que se hace notoria también en la menor magnitud del veranillo.

3.2 Temperatura de San José

En cuanto a su temperatura, esta es variada por su altitud promedio de 1150 msnm, donde se estipula entre los valores de 17 a 25 °C, donde en los meses de los meses de mayor temperatura se ubican

entre noviembre hasta marzo donde su temperatura puede ascender hasta los 35°C.

Como podemos observar en la siguiente tabla, los meses donde se registra por lo general un aumento de temperatura son los de marzo y abril, época en donde la humedad se reduce pero sube la temperatura en valores considerados.

Analizando las temperaturas según la hora del día, estas tienden alcanzar su punto máximo poco después del mediodía y descienden gradualmente las 7:00 p.m., donde por lo general se mantiene relativamente estable toda la noche y alcanza valores generales de unos 18°C hasta las 4:00 a.m. donde empieza subir poco

Historial De Temperatura San José Costa Rica (1995 -2014)			
Mes	TEM MAX.	TEM MIN.	TEM MED.
Enero	22.8	16.3	19.6
Febrero	23.4	16.4	19.9
Marzo	24.5	16.7	20.6
Abril	25.5	17.5	21.5
Mayo	26.1	18.1	22.1
Junio	26.2	18	22.1
Julio	25.4	18	21.7
Agosto	25.8	17.9	21.8
Septiembre	26.4	17.6	22
Octubre	25.4	17.5	21.5
Noviembre	24	17.3	20.6
Diciembre	23.2	16.8	20
Promedio	24.89	17.34	21.12

Tabla. 5 Tabla de temperaturas máximas, medias y mínimas promedio histórica de 1995 al 2014.

Fuente: Elaboración propia [40]

[40] Instituto Meteorológico de Costa Rica. (02 de Diciembre de 2015). IMN. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/inicio>

a poco hasta sobrepasar los 20°C a las 7:00 a.m. y continua el ciclo.

Este patrón de oscilación diaria es constante durante el año, aunque desde luego, durante la época lluviosa las temperaturas tienden a ser más bajas y a descender rápidamente durante la tarde. Los frentes hibernales en diciembre y enero hacen descender considerablemente la temperatura.

En términos de arquitectura las edificaciones tendrán que soportar estos cambios y el que mayor padecerá este fenómeno es su usuario, debido al diseño erróneo de sus envolventes arquitectónicas.

3.3 Humedad Relativa San José

La humedad como se mencionó en capítulos pasados, hace referencia a la cantidad de vapor de agua contenida en la atmosfera. Como se habla del vapor de agua, se debe tener claro que este es un proceso donde se parte de la existencia de una superficie de agua líquida, que por algún mecanismo de calentamiento logra ser evaporado.

Una de las clasificaciones climáticas más utilizadas, la de Köppen, sitúa a Costa Rica como una selva tropical en lo que se refiere a la Vertiente del Pacífico (donde su ubica San José) es considerada como una sábana tropical, porque además de que la lluvia anual sobrepasa la evaporación anual, se presenta una estación

seca durante el invierno del hemisferio norte. Por este motivo es que se considera que se establece una estación lluviosa que va de mayo a octubre, una estación seca de diciembre a abril y una etapa de transición entre las estaciones en los meses de mayo y noviembre.

Podemos apreciar que los meses de mayor humedad son los desde agosto hasta octubre, donde empieza a descender para ingresar a la estación seca. Este dato es de gran relevancia para la investigación debido a que el sistema hidrónico debe de estar protegido cuando la humedad esta incrementado a un valor mayor de 60% hasta un 85%.

3.4 Radiación Solar

Los trópicos reciben más radiación solar anual debido al paso de los rayos solares en dirección perpendicular a través de una atmosfera más delgada, donde dicha atmosfera absorbe menor cantidad de radiación solar dejando pasar a la superficie de la tierra mayor radiación, dejando pasar un cerca del 60% de la radiación solar es captada por el trópico.

Por esta razón al ubicarse Costa Rica en la franja tropical los días son más cortos durante todo el año con respecto a otros países ubicados en zonas templadas.

En San José por ejemplo, el día son de doce horas, hasta un máximo de catorce horas, entre las 6:00 p.m. y 7:00 p.m. se

acorta la iluminación. ^[41]

Si bien es cierto, apreciando el mapa anterior podemos determinar que en Costa Rica existe otros lugares donde su radiación es bastante alta esto se debe a la cantidad de nubosidad presente en las regiones.

En el caso de San José, existe un alto nivel de nubosidad en comparación con la provincia de Guanacaste, sin embargo la decisión de la seleccionar como San José como sitio de estudio se basó en la alta demanda de instalación de equipos mecánicos de enfriamiento para reducir las altas temperaturas en el interior de los edificios.

Donde estos aumentan su temperatura en los meses de febrero, marzo y abril, los cuales la radiación alcanza altos valores provocando un aumento en el uso de sistemas mecánicos de enfriamiento convencionales.

Sin embargo, los valores de radiación al igual que la temperatura y humedad aumentan cada vez más afectando las condiciones térmicas dentro de los edificios y los usuarios.

3.5 Estrategias de diseño local

Algunas de las siguientes estrategias son desarrolladas por el Arq. Jerry Germer ^[42] para las distintas regiones climáticas del

país. Sus estrategias pasivas se basan en el aprovechamiento de las condiciones climáticas exteriores para el confort en el interior de las edificaciones.

Exceso de sol / calor:

- Si hay mucha lluvia, se recomienda que en techo de hierro galvanizado dejar una cámara de entercielo de 20 cm mínimo, con una inclinación mínima del 50% para que el aire caliente suba (termodinámica de los gases)
- El cielo debe absorber poca radiación, una lámina de aluminio puede ser usada para reflejar el calor radiante y evitar la condensación.
- Promover tomas de aire frío de las áreas sombreada
- Proveer salidas de aire en la parte más alta posible de la edificación
- Utilizar elementos naturales o artificiales para evitar la incidencia directa en muros o ventanas expuestos a orientaciones críticas.
- Pueden ser setos, arboles, mallas con enredaderas o parasoles que impidan que los muros se conviertan en acumuladores de calor que luego irradian al interior.
- Proteger los vidrios para que no transformen las ondas luminosas en ondas calóricas dentro de la edificación.

Obstáculos para el viento rasante

- Se pueden colocar entradas de aire en la parte más alta de la obra.

[41] Arias Jiménez, A. C. (2007). Suelos Tropicales. San José: Universidad Estatal a Distancia.

[42] Germer, J. (1987). Estrategias. San José: SUCA

- Dejar salidas de aire ubicadas para permitir la salida descendiente del aire.
- Los ductos y dobles alturas no solo actúan como termo reguladores para el frío / calor, día / noche, sino que también actúan como chimeneas ascendentes y descendentes según momento o uso.

Secador solar tipo invernadero

- En zonas húmedas estos secadores tienen múltiples aplicaciones donde algunas de ellas es pre-secar el aire que entra a las edificaciones.
- Consiste en una habitación estrecha y alta (al menos 5 m), con techo de policarbonato, entradas de aire desde áreas secas pero lo más bajas posibles, siempre controladas.
- Salidas de aire controlables en la parte más alta posible.

Pre-secado de aire en zonas húmedas

- La solución es pre-secar el aire que entra, con terrazas, aleros, secadores, techados con láminas de policarbonato.
- Proveer entradas de aire que alarguen su recorrido y permitir su salida por la parte más alta.

Zonas con “llenar” o nivel freático muy alto

- Para controlar la humedad resultante conviene facilitar las corrientes de aire por debajo del piso.

- Prever techo con aberturas y monitores que desalojen el aire caliente y húmedo.

3.6 San Jose, Costa Rica – Ciudad de Mexico, Mexico

Para obtener mayor información sobre la aplicación de este sistema en zonas de clima tropical se realizaron algunas mediciones de experimento tanto en San Jose, Costa Rica como en la Ciudad de México.

A pesar de que la Ciudad de Mexico presenta algunas características bioclimática diferentes con relación a San Jose, algunos de los experimentos se llevaran en las instalaciones de la Unidad de Posgrado en la UNAM.

Para evaluar las similitudes y diferencias del clima en ambas capitales se recolecto la información climática (temperatura, humedad y radiación) de los meses de marzo, abril y mayo del año 2015. Estos datos fueron brindados por el Instituto Meteorológico de Costa Rica y datos obtenidos por el estudiante de Maestria Ricardo Sanchez.

Se analizó los meses de marzo, abril y mayo del año 2015.

01 de marzo del 2015

En las gráficas 4, 5 y 6 podemos observar los distintos comportamientos de climáticos de ambas zonas. En la gráfica 4 de humedad se aprecia la diferencia del 30% entre la humedad de ambas zonas.

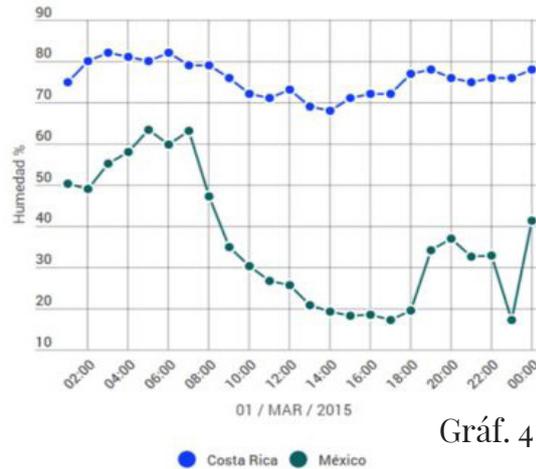
Este valor nos indica que en la implementación del sistema se debe de evitar el incremento de la humedad en el interior del espacio. La condensación de este puede alterar las condiciones de humedad internas en el edificio.

Relacionando este comportamiento con la radiación, se aprecia que se debió a que en San José no presento altos índices de radiación ese día, provocando un aumento considerable en la humedad. La gráfica 5 demuestra que la radiación en la Ciudad de México alcanzo el tripe valor que San José.

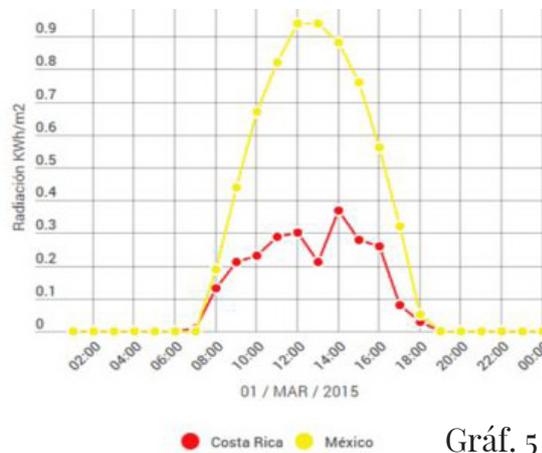
Gráfica 4. Índices de Humedad SJ-CDMX 01/03/2015. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. Índices de Radiación SJ-CD-MX01/03/2015. Fuente: Elaboración propia

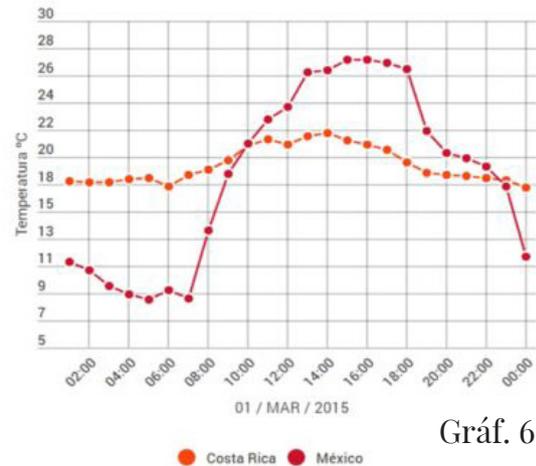
Gráfica 6 Índices de Temperatura SJ-CD-MX01/03/2015. Fuente: Elaboración propia



Gráf. 4



Gráf. 5



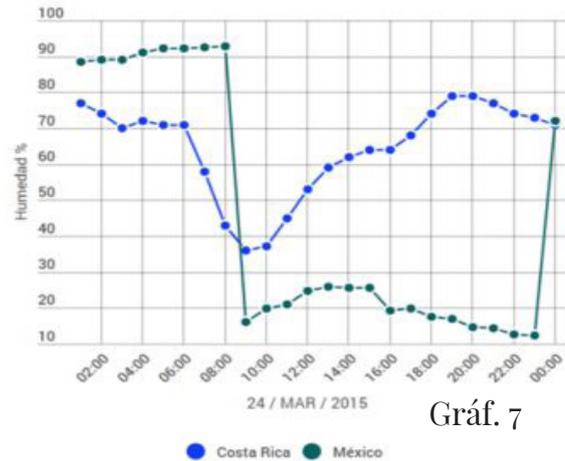
Gráf. 6

24 de marzo del 2015

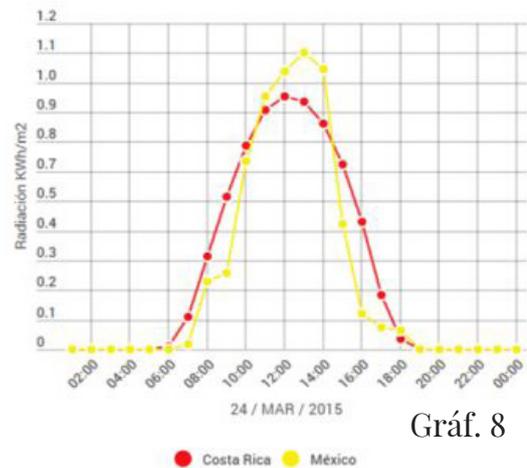
El siguiente día fue seleccionado por su registro promedio de radiación.

En esta grafica 8 podemos apreciar mejor una poca diferencia en los valores de radiación que se encuentran en el San José y en la Ciudad de México. Esta variable ayudará bastante cuando se vayan a realizar los experimentos, ya que, es más sencillo modificar las variables de temperatura y humedad que la radiación recibida.

Las gráficas 7 y 9 nos señalan que al parecer la Ciudad de México tiene cambios drásticos en cuanto a su temperatura y humedad. A partir de ello, se debe de considerar estos cambios bruscos a la hora de realizar la experimentación.



Gráf. 7

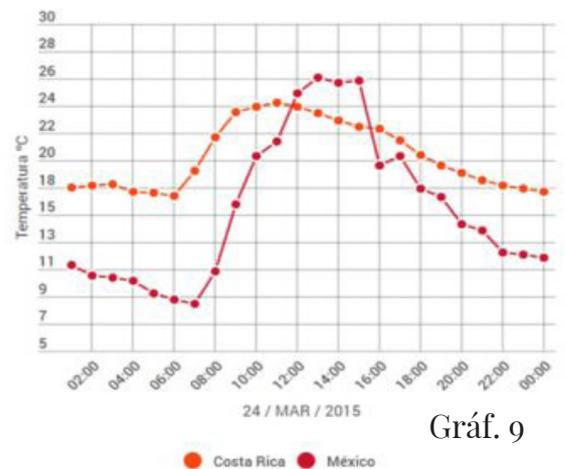


Gráf. 8

Gráfica 7. Índices de Humedad SJ-CDMX 24/03/2015. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8. Índices de Radiación SJ-CDMX 01/24/2015. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9. Índices de Temperatura SJ-CDMX 24/03/2015. Fuente: Elaboración propia



Gráf. 9

27 de marzo del 2015

Por último, este día fue el más caluroso del mes de marzo en San José, por lo cual también se analizó como fue el comportamiento en la Ciudad de México, además de las variables de humedad y radiación.

En la gráfica 12, hubo una diferencia de 5°C entre ambas localidades, sin embargo se puede apreciar que los registros demuestran un ascenso y un descenso paralelo entre los dos. Sin embargo, los registros de la humedad en la Ciudad de México denotan un comportamiento de cambios bruscos.

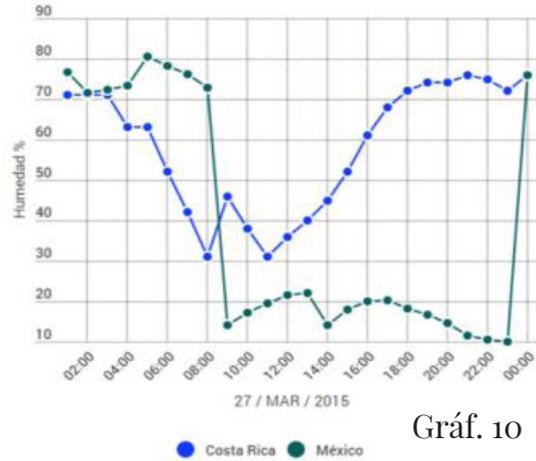
En cuanto a la radiación, apreciamos que las diferencias entre ambas no fueron tanto como en la humedad.

A pesar de existir algunas diferencias en cuanto a la humedad y la temperatura, realizar experimentos en la Ciudad de México este análisis aportó información valiosa que será tropicalizada y utilizada para el desarrollo de las estrategias.

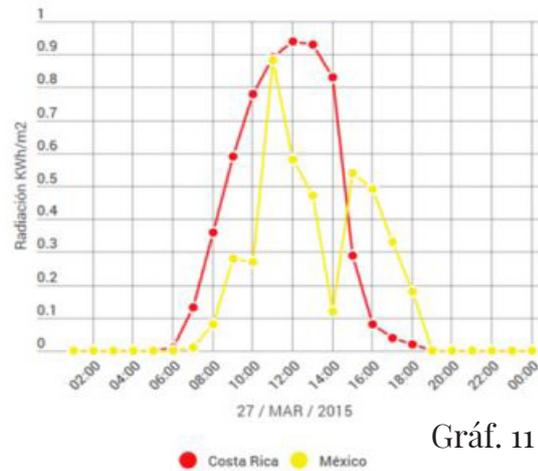
Gráfica 10. Índices de Humedad SJ-CDMX 01/03/2015. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 11. Índices de Radiación SJ-CDMX 01/03/2015. Fuente: Elaboración propia

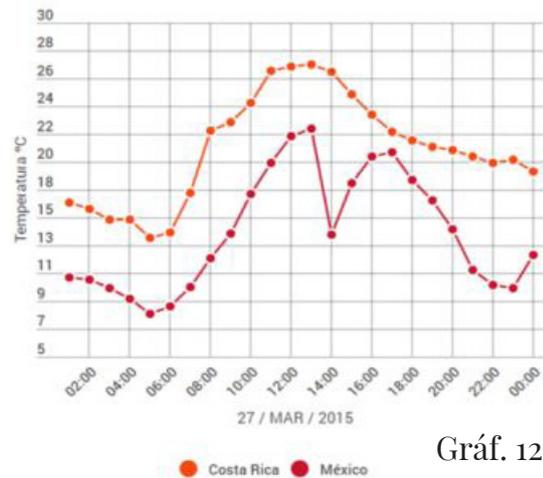
Gráfica 12. Índices de Temperatura SJ-CDMX 01/03/2015. Fuente: Elaboración propia



Gráf. 10



Gráf. 11



Gráf. 12

3.7 Conclusiones

Comprender las calidades climatológicas de Costa Rica y aplicarlas en el desarrollo del patrón de diseño permitirá que la incorporación del sistema se acople a las condiciones tropicales del país.

El uso de los diversos datos meteorológicos del país se utilizó como recurso para el desarrollo de algoritmos y como bases de datos para la simulación del producto final de esta investigación.

Es necesario además correlacionar estas características con los conceptos mencionados anteriormente y comparar estas

condiciones con los países que han tenido un mayor desarrollo en la aplicación del sistema. Además comprender estas variables facilitará la elección de los demás sistemas mecánicos que mejoraran el rendimiento del sistema hidrónico, así como sus estrategias de diseño y selección de materiales.

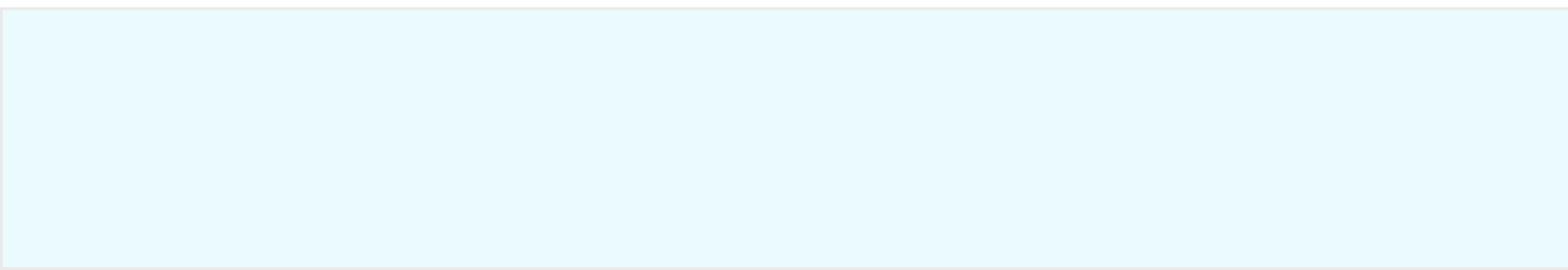
Por último, este capítulo deja en claro la importancia de desarrollar una propuesta que evolucione con respecto a los cambios climáticos que está padeciendo el país, al igual que países con climatología similares, ofreciendo un producto adaptable y flexible con los cambios del contexto climático.



4

DISEÑOS EXPERIMENTALES

Análisis del comportamiento térmico	89
Módulos experimentales	97
Simulación	101



ABREVIATURA	SIGNIFICADO
S.E.H	Sistema de enfriamiento hidrónico
TI	Temperatura interna
TE	Temperatura Externa
TA	Temperatura de agua
TC	Temperatura de concreto
TPR	Temperatura punto de rocío
HI	Humedad interna
HE	Humedad externa
RAD	Radiación
MC	Módulo de control
ME	Módulo experimental

Tabla 6. Abreviaturas del Método Experimental. Fuente: Elaboración propia

Apartir del método experimental la presente investigación comprobará la hipótesis planteada. Se llevará a cabo la realización de tres experimentos para obtener información relevante sobre la aplicación del sistema enfriamiento radiante en Costa Rica y México.

El diseño de los tres experimentos se basó en la información obtenida del análisis bibliográfico de los capítulos anteriormente citados. Las decisiones tomadas para el desarrollo de los experimentos están respaldadas por las conclusiones previas de los capítulos anteriores.

Los resultados de los experimentos están, relacionados con las comparaciones de las condiciones climáticas previamente realizadas de San José, Costa Rica (Bwh) y la Ciudad México, México (Aw).

La relación de la información permitirá comprender la correlación de los datos obtenidos y las condiciones climatológicas de su contexto.

Como se indicó en un principio, se realizará experimentos donde se obtendrá información importante que podrá ser implementada en la aplicación del sistema de enfriamiento hidrónico en ambos contextos climáticos, especialmente en zonas tropicales.

El primer experimento consistirá en la evaluación térmica de un edificio. Se realizarán mediciones de un edificio de oficinas de mediana escala ubicado en barrio Lujan en San José, Costa Rica. Como recomendación para aplicar el sistema, es necesario evaluar el comportamiento térmico y transmisión de calor (sensible y latente) del edificio para conocer el escenario bajo cual el sistema trabajará.

El segundo experimento consistirá en construir dos módulos de prueba. El primero se denominará módulo de control (MC) y el segundo módulo experimental (ME). La construcción de ambos será idéntica en forma, tamaño y acabados, de esta manera la carga térmica será similar con el fin de tener un marco de referencia para evaluar el potencial del S.E.H. bajo las variables climáticas y su comportamiento en un espacio. Esta prueba se realizará en condiciones Aw y Bwh.

A partir de los resultados de los experimentos anteriores se utilizarán los datos y observaciones para ser integrados en un tercer experimento. Se llevará a cabo la simulación del edificio analizado para aplicar estrategias pasivas y el uso del S.E.H. con el fin de mejorar las condiciones térmicas.

4.1 Análisis del comportamiento térmico

Una de las finalidades de esta investigación es la aplicación del S.E.H. en edificaciones comerciales o industriales existentes así como futuros construcciones en zonas tropicales como San José, Costa Rica.

Para lograr implementar algunas estrategias de diseño que integre el S.E.H.

es necesario realizar una evaluación térmica del edificio. Para efectos de esta investigación se realizará la evaluación de un edificio que presenta un discomfort térmico alto para comprender las variables que son provocadoras de este fenómeno.

El análisis del edificio también arrojará las áreas o zonas donde se deberá intervenir para mejorar las condiciones térmicas. Además, es necesario mencionar que la tipología de este inmueble suele ser bastante común en zonas comerciales que presente edificios de mediana escala.

El edificio de oficinas se ubica en el distrito Lujan, en la capital San José, Costa Rica. Su ubicación se ve representada en la figura 21. Este edificio presenta una superficie de aproximadamente de 1500 m².

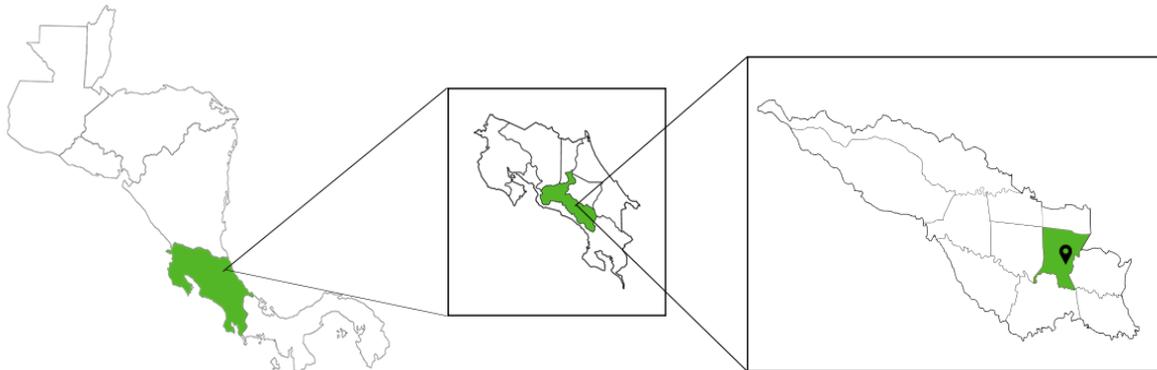


Figura 21. Ubicación del edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia



Figura 22. Fotografía exterior del edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia

El primer nivel del inmueble está destinado principalmente para bodega y estacionamiento. El segundo nivel está conformado principalmente por el área administrativa. El inmueble se encuentra entre dos edificios de alturas similares destinadas al comercio.

En el segundo nivel, la cubierta del edificio es a dos aguas con pendiente del 35%. El material de cubierta principal es de zinc y no presenta ningún aislante térmico entre la cubierta y la superficie del suelo.

El área de comedor presenta un acrílico y malla Saran de 80% para reducir el deslumbramiento provocado por el sol y permitir el paso de la iluminación natural.

En relación a la composición de los muros del inmueble, como apreciamos la figura 21, apreciamos que sus paredes externas son bloques de concreto de 12 cm de ancho con una capa de aproximadamente de 0.05 cm de mortero para repellar y una capa de pintura. Los muros no presentan ningún tipo de aislante.

La superficie del primer nivel es una capa de concreto de aproximadamente 30 cm de espesor, en cuanto al del segundo nivel podemos apreciar en la figura 23 está conformado por una losa de concreto de 14 cm premezclado sobre una laminada acanalada de 0.71 cm de espesor. Como la cubierta y los muros, el piso no presenta ningún aislamiento.

Se realizó el cálculo de la ganancia térmica utilizando las ecuaciones citadas en el capítulo 1 de este documento,

además se utilizaron los valores de coeficiente térmico citados por el Mtro. Bautista Kuri.

La obtención de estos dos valores permitirá obtener valores U que demuestre desde el punto de vista matemático el comportamiento de transmisión de calor de sus superficies. También, a partir de estos valores se buscaran materiales que presenten el mismo valor para la elaboración del edificio base en el tercer experimento de la presente investigación.



Figura 23. Fotografía interior del edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia

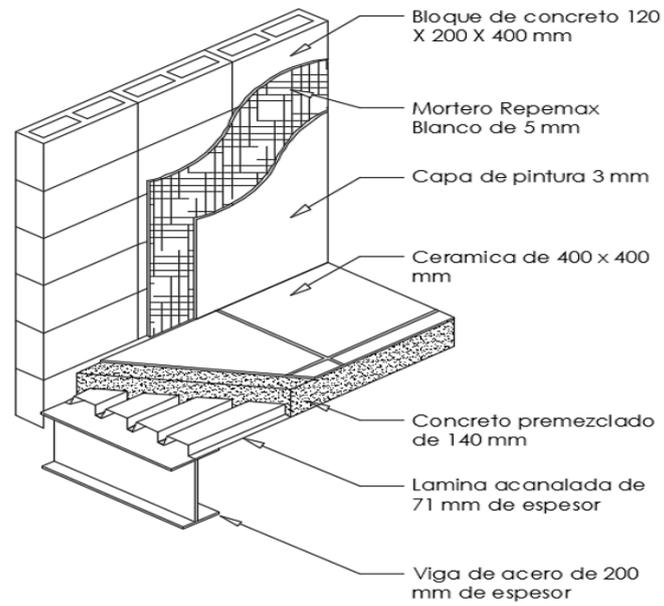


Figura 24. Detalle constructivo pared y piso del edificio. Fuente: Elaboración propia

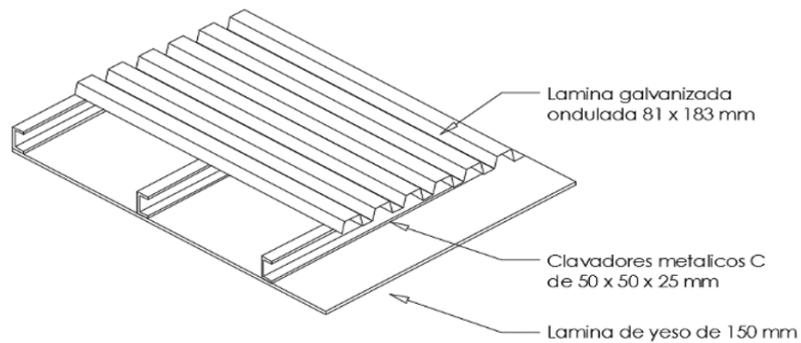


Figura 25. Detalle constructivo cubierta del edificio. Fuente: Elaboración propia

Con relación al valor de ganancia térmica por superficie, se tomaron las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1 de la presente investigación, además se utilizaron los valores de coeficiente térmico de los materiales citados por el Mtro. Bautista Kuri.

Estos valores serán de importancia a la hora de analizar los resultados obtenidos, ya que determinará si los materiales que componen la envolvente influyen bastante por el comportamiento térmico del espacio.

Ecuación (1)

$$U (\text{muro}) = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{en}{kn} + \frac{1}{h_c} + \frac{en}{kn} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{\frac{1}{34,06} + \frac{0,12}{0,7} + \frac{1}{9,36}} = 3.25069914 w/m^2 \cdot K$$

Ecuación (2)

$$U (\text{techo}) = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{en}{kn} + \frac{1}{h_c} + \frac{en}{kn} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{\frac{1}{34,06} + \frac{0,00046}{46,50} + \frac{0,127}{0,045} + \frac{1}{9,36}} = 0.33801716 w/m^2 \cdot K$$

Con respecto al sistema de enfriamiento que presenta el edificio, se ubicaron 3 sistemas de aire acondicionado de la marca Westinghouse modelos WI-WXL - 12KNW1 con un consumo energético de 3.1 kw/h según especificaciones de su etiqueta energética.

El sistema de aire acondicionado es tipo Split (pared) y cuenta con una unidad que contiene el compresor que se ubica en el exterior del edificio que se conecta con la unidad interior por medio de una tubería. Como apreciamos en la figura 26, podemos apreciar la conexión entre las dos unidades del sistema Split.

La función básica de la unidad interior es permitir expulsar el aire refrigerado hacia el espacio, en cambio la unidad exterior, permite por medio

de un termostato interior que detecta el aire caliente, el cual lo transfiere para que circule el gas refrigerante.

En cuanto a la ubicación de estos equipos, podemos apreciar la figura 27 la ubicación de 3 unidades en el segundo nivel del edificio, Podemos apreciar que se encuentran 2 unidades en el área administrativa y una unidad en el área de reuniones.

Es importante acotar que las unidades se encienden en un promedio de 5.5 horas al día (entre las 11:00 a.m. y las 4:00 p.m.) de la tarde para que las personas no se sienten disconformes debido al calor absorbida del inmueble.

En relación a los equipos electrónicos, la zona administrativa cuenta con 28 equipos de computación (300 Watts por equipo)

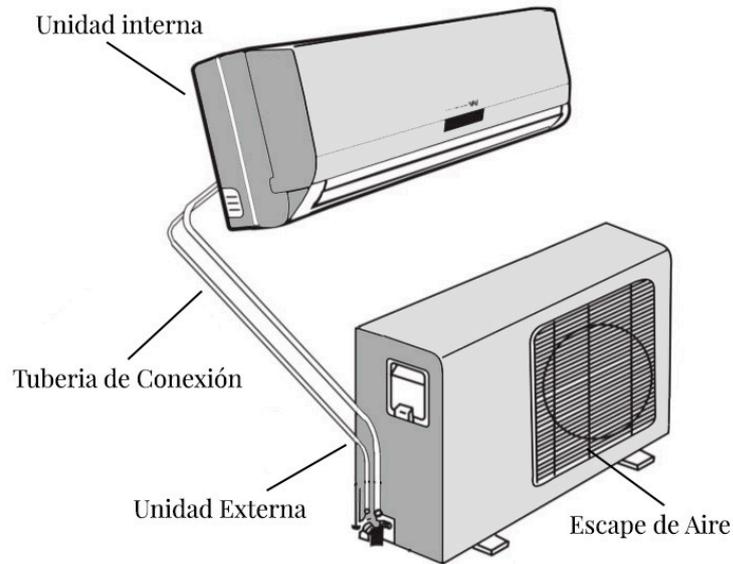


Figura 26. Diagrama de sistema de aire acondicionado Split. Fuente: Elaboración propia

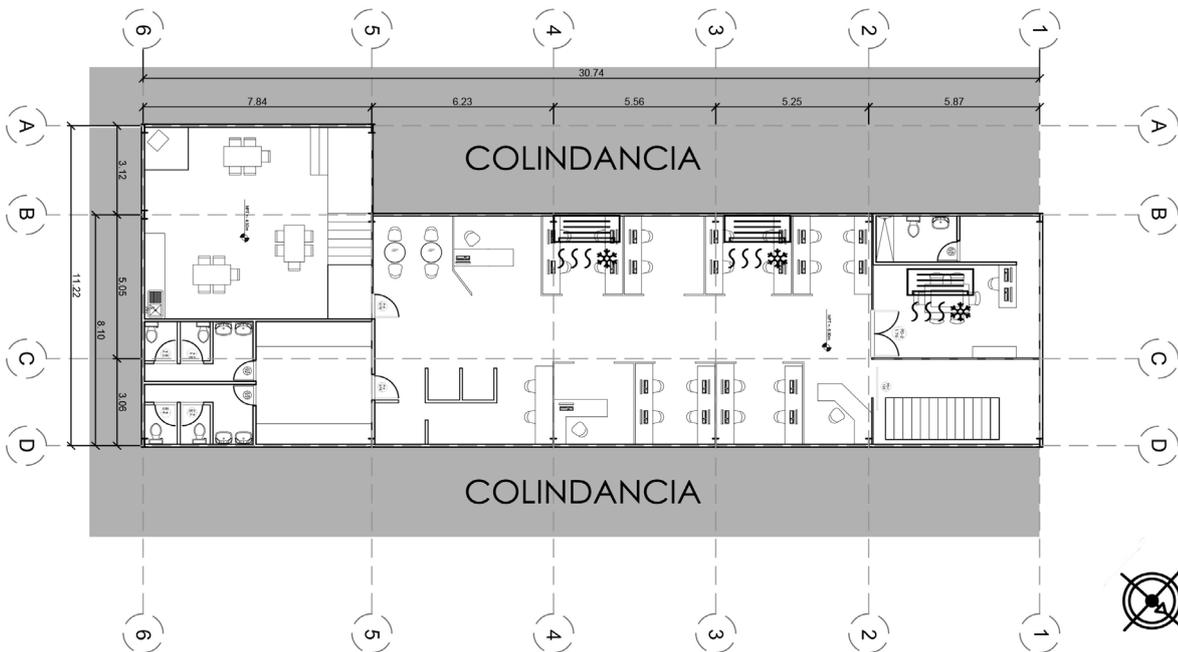


Figura 27. Ubicación de sistema de aire acondicionado en el edificio. Fuente: Elaboración propia

y 10 lámparas (120 Watts por lámpara). La cantidad de usuarios total del segundo nivel es de 41. Estos valores se tomaron en cuenta debido a que presentan una relación con el comportamiento térmico del edificio.

Se realizará solamente el análisis térmico y de humedad del segundo nivel, en especial la zona administrativa de la empresa debido a ser la zona que recibe mayor incidencia solar por la cubierta y el tragaluz. Esta zona es considerada como la más caliente y poco confortable según los usuarios del edificio.

Se realizará el experimento al ubicar 4 HOBO's U12-011 en varias partes de la zona

administrativa y un HOBO U12-013 en el exterior, con el objetivo de efectuar una comparación térmica de distintas zonas de la oficina con las condiciones climáticas exteriores. Estas medidas tendrán una duración de un mes, las cuales medirán la temperatura ambiente, humedad relativa y la temperatura del punto de rocío.

En la figura 28 se demuestra la ubicación de los HOBO'S internos para realizar las mediciones. Su ubicación se estableció según los espacios que presenta mayor discomfort térmico en el edificio según sus usuarios. Se plantea ubicar a una altura no mayor de 1.20 mts. Para capturar la temperatura que percibiría un usuario sentado en hora laboral.

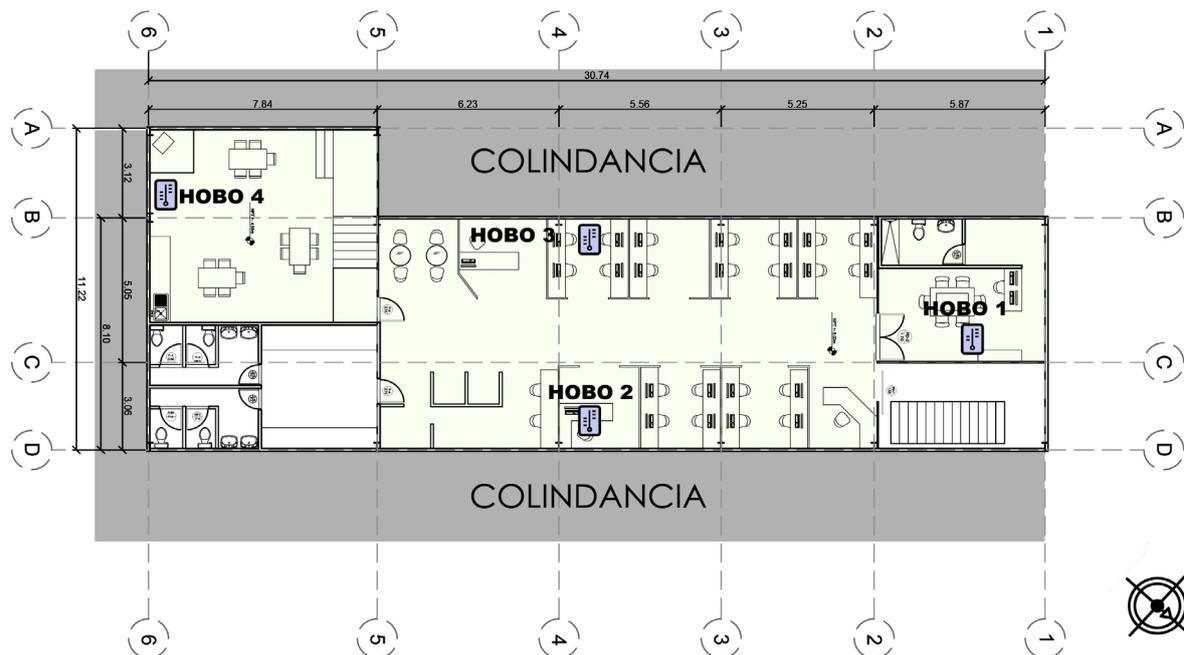


Figura 28. Ubicación de HOBO'S en el edificio. Fuente: Elaboración propia

La tabla 7 enlista las características constructivas, ocupación y equipo electrónico de cada área donde se instaló el equipo de medición.

La zona administrativa (zona de trabajo y sala de reuniones) cuenta con sistemas de aire acondicionado. La ubicación de los HOBÓ S 2 y 3 se verán afectadas por el uso de los sistemas de aire acondicionado debido a que a partir de las 10:00 a.m. o 13:00 p.m. los usuarios suelen encender los sistemas a consecuencia del discomfort térmico que presentan.

Las mediciones se realizarán en un periodo

de un mes con el fin de analizar el comportamiento de la temperatura interior del inmueble, la humedad relativa y punto de rocío. Adicionando, se comparará los datos obtenidos con los datos brindados por el Instituto Meteorológico de Costa Rica.

Por último, se analizará si los resultados obtenidos responden a las condiciones térmicas y de humedad planteados por la Guía del Diseño Bioclimático ^[43] donde se hace mención de los parámetros establecidos por el ISO 7730 y los resultados de la tabla Olgay para países de climatología tropical como Costa Rica.

CARACTERÍSTICAS	HOBÓ 1	HOBÓ 2	HOBÓ 3	HOBÓ 4
Tipo de espacio	Administración	Administración	Administración	Comedor
Cubierta	Zinc	Zinc	Zinc	Acrílico
Tragaluz	No	Si	Si	Si
Muro	Block de concreto de 12 cm	Block de concreto de 12 cm	Block de concreto de 12 cm	Block de concreto de 12 cm
Entrepiso	Losa de concreto	Losa de concreto	Losa de concreto	Losa de concreto
Ventana al exterior	6 mm crudo sin ruptura térmica	NO	NO	NO
Número de ocupantes	6	10	10	15
Número de lámparas	2	6	6	2
Equipos electrónicos	2 computadoras	8 computadoras	17 computadoras	2 microondas
Aire Acondicionado	SI	SI	SI	NO

Tabla 7. Características de las zonas analizadas. Fuente: Elaboración propia

4.2 Módulos experimentales

El segundo proceso experimental tiene diversos objetivos. El principal objetivo tiene como fin recolectar el comportamiento térmico y de humedad del sistema en un espacio. Se analizará principalmente la correlación de las variables radiación, temperatura, bloque de concreto y humedad debido al uso del S.E.H.

También, como objetivo de este experimento es dar continuidad a lo examinado por la Mtra. Diana Calderón. Los resultados obtenidos ampliará la información existente sobre la utilización del S.E.H. en zonas tropicales Bwh.

Se construirá dos módulos de trabajo: el módulo de control (MC) y el módulo de experimento (ME). Como se había comentado anteriormente, la construcción de ambos será idéntica en forma, tamaño, dimensión y acabado exterior, con el fin de obtener una carga térmica similar y posteriormente de los experimentos realizar comparaciones de efectividad entre ambos módulos.

Los materiales requeridos para la construcción de los módulos son:

- 4 Paneles de *Triplay* de 15 mm (1.22 x 2.44)
- 1 Saco de cemento portland gris de 50 kg
- 4 Placas de board foam (poliestireno)
- 2 Sacos de arena 3/16 de 50 kg

- 2 Sacos de grava $\frac{3}{4}$ 50 kg
- 1 Pieza Madera 2 x 3 x 8
- 15.24 metros de tubo Pex de $\frac{1}{2}$ pulgada flexible
- Aislante de tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada de 2 metros
- Un paquete de clavos sin cabeza de 1 $\frac{1}{2}$ pulgada
- 2 Hieleras
- 1 Bomba de fuente sumergible marca Pond Boss
- Llave esfera 16X1/2 FUNCO PEX: válvula para regular el flujo del agua.
- Hielo

Se decidió utilizar materiales que presentan un alto valor de aislamiento para obtener un espacio totalmente hermético, esto con el fin de analizar un posible escenario del funcionamiento del sistema en un espacio completamente cerrado.

Las figuras 29 y 30 representan el esquema de diseño de ambos módulos. Como se muestra ambos modelos presentan características similares para realizar ejercicios experimentales y tener un marco de referencia para realizar las comparaciones.

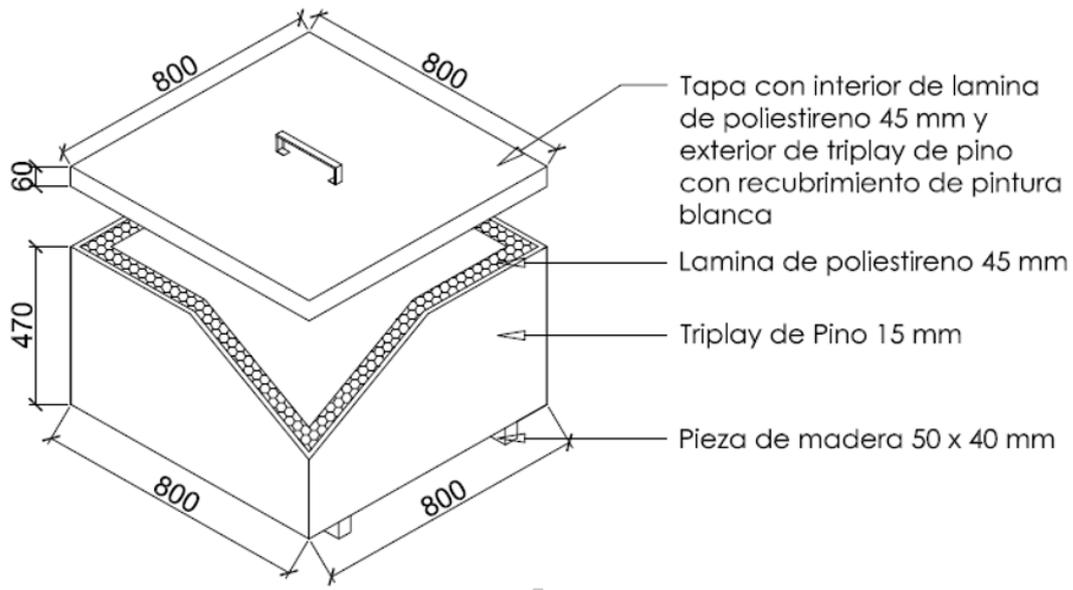


Figura 29. Detalle del módulo de control. Fuente: Elaboración propia

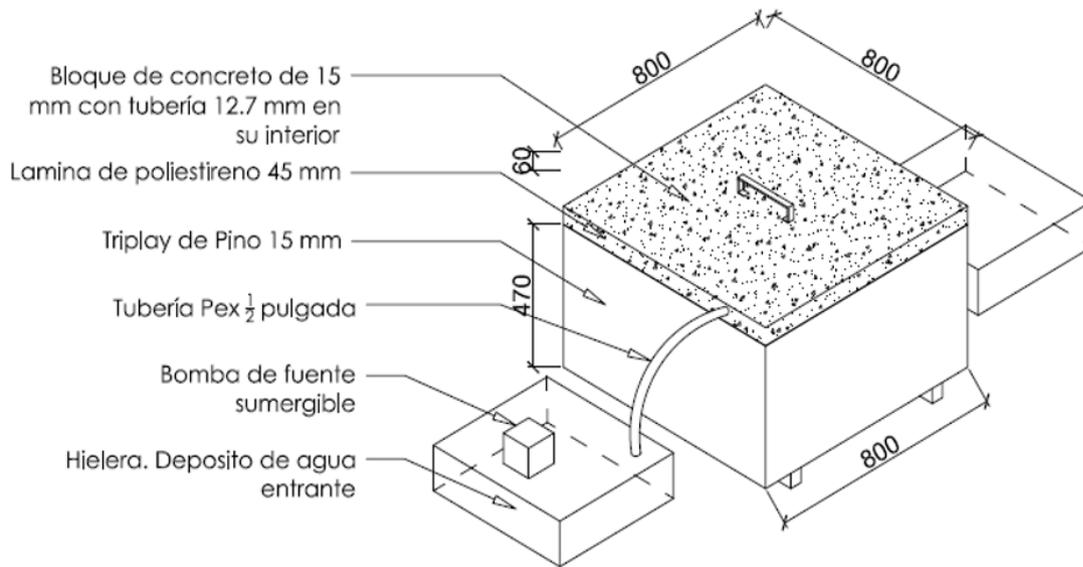


Figura 30. Detalle del módulo experimental. Fuente: Elaboración propia

Módulo de Control

Su preparación consistió en colocar en la parte superior un aislante térmico de poliestireno de 15 mm tanto dentro como fuera del módulo para reducir al máximo la ganancia de calor a través de las superficies de paredes. Se dejó el interior un espacio libre de 30 mm para ubicar el sensor HOBO y termopar de medición de temperatura y humedad relativa.

Módulo de Experimental

La tubería del módulo experimental se conecta con la bomba dentro de una de las hieleras donde se encuentra el agua. Se introduce el hielo en esta para mantener la temperatura del agua entre uno o dos grados arriba de la temperatura del punto de rocío. En la segunda hielera se conecta el otro extremo de la tubería del módulo experimental donde recibe el agua que sale después de enfriar el bloque de concreto. La hielera del agua entrante y la de salida se encuentran conectadas entre sí con el fin de generar una circulación constante del sistema.

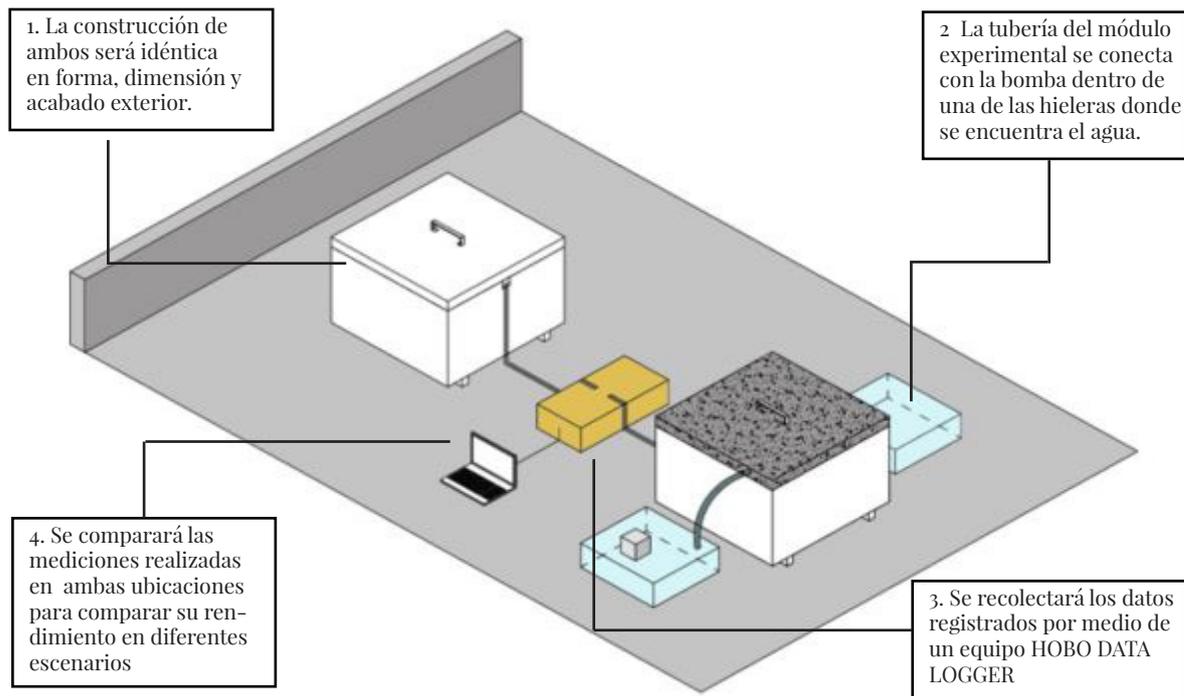


Figura 31. Detalle instalación del módulo experimental y sus hieleras. Fuente: Elaboración propia

Construcción de módulos San José, Costa Rica

Los módulos elaborados en Costa Rica presentan mediciones un poco más pequeñas a las establecidas. Uno de sus cambios fue el tipo de concreto premezclado (ver fig. 31) debido a los recursos disponibles en ese momento. También se utilizó sensores de temperatura y humedad debido a la falta de equipos de medición.



Figura 32. Fotografías del proceso de construcción del módulo experimental en Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

Construcción de módulos CDMX, México

En los módulos construidos en la Ciudad de México se agregó un aislante de aluminio con conductividad térmica $k=204 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ (ver fig. 32) para reducir más la ganancia térmica en el interior de los módulos. Este aislamiento de aluminio consiste en varias capas delgadas unidas por láminas plegadas formando algo parecido a un cartón aligerado.



Figura 33. Fotografías del proceso de construcción de los módulos en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia

Se evaluará el funcionamiento del sistema en diferentes días para analizar más a detalle el comportamiento interior de cada módulo. Además según los resultados previos que se van obteniendo se realizará modificaciones en el procedimiento de experimentación para mejorar la efectividad del sistema.

En las mediciones que se realizaron en la Ciudad de México se configuraron los equipos de U-Series Data Logger & Device (HOBO) con sus respectivos sensores, donde generaran un registro de cada 5 minutos de la temperatura interna / externa y de humedad relativa. También se realizó la configuración de los siguientes equipos:

- Agilent data: Logger Adquisidor de datos
- Tarjeta: Conexión de los equipos al adquisidor.
- Termistores: Medición temperatura
- Termopares
- FLUKE: thermal imager Cámara térmica
- HOBO Data logger U12- 013 Adquisidor de datos y medición la temperatura y humedad ambiente

El registro de distintos equipos de medición es para rectificar los datos obtenidos. En México se instaló además un termistor en el medio de los espacios de los módulos, esto para obtener registros del comportamiento en medio del espacio.

Como se planteó en el capítulo 3, el desarrollar ambos experimentos en zonas climáticas distintas permitirá observar el comportamiento de las variables que se están analizando, especialmente la humedad, es decir, como el funcionamiento del sistema modifica las variables de temperatura y humedad dentro de un espacio.

Los valores obtenidos además presentan detalles que permita realizar las diferentes estrategias para que el sistema funcione de manera eficiente en un espacio de oficina. Los resultados serán comparados con los rangos de temperatura y confort establecidos en la Guía de Diseño Bioclimático^[43], que contempla información de las tablas de Olgay y el ISO 7730.

4.3 Simulación

Para el desarrollo de simulación se evaluó las opciones de realizar en programas como Revit 2017, Energy Plus, TRANSYS y finalmente LoopCad. Evidentemente programas como Energy Plus y TRANSYS presentan características más completas para evaluar de manera detallada el comportamiento del S.E.H bajo diferentes escenarios. Sin embargo, por cuestiones de tiempo y disponibilidad de programas se ha decidido utilizar el programa LoopCad debido a su flexibilidad, facilidad de uso y tiempo.

Todavía cabe considerar que el programa LoopCad 2016 está vinculado con

muchas de las empresas relacionadas con sistemas de enfriamiento y calefacción hidrónico. Gran parte de la información que trae el programa está basado en contenido real de materiales y aplicaciones de los sistemas. Además, presenta la flexibilidad de ajustar el contexto climático en donde se aplicará el sistema.

Prosiguiendo con el tema, el objetivo de realizar una simulación bajo el contexto climático Aw y Bw es para analizar el comportamiento de calor (sensible y latente) del edificio de oficinas anteriormente evaluado. A partir de los resultados obtenidos en los experimentos anteriores, se decidirá algunos parámetros de diseño para mejorar las condiciones térmicas del edificio.

Como ejercicio complementario, se evaluará el comportamiento energético del edificio antes y después de presentar distintas estrategias pasivas como mecánicas para potencializar el rendimiento del S.E.H. La ubicación del edificio será en el mismo lugar del edificio original en San José, Costa Rica y en el caso de la Ciudad de México, se colocará de manera hipotética cerca de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México para aprovechar los datos climatológicos brindados.

Se elaborará el levantamiento 3D del espacio de oficina, donde a partir de los resultados obtenidos se trabajará en las zonas que el comportamiento térmico

presenta mayores variaciones. También se utilizará los valores U calculados para buscar materiales que se asemejen a estos resultados con el fin de realizar la simulaciones con condiciones similares a las actuales.

Podemos observar en la figura 34 los espacios donde se aplicará el sistema de enfriamiento hidrónico. Estos espacios serán los mismos donde se colocaron los HOBÓ S en el experimento anterior. Se ha determinado empezar las simulaciones con un edificio base que presente las condiciones similares al edificio evaluado. Se introducirá valores mínimos y máximos de la región a partir de los datos brindados por el Instituto Meteorológico de Costa Rica y por la Maestría en Arquitectura, Campo de Conocimiento Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Con respecto a los agentes que influyen en la transferencia de calor, se utilizará la información de la tabla 5, la cual determina el número de ocupantes en el segundo nivel, el número de equipo de electrónico y lámparas. Los valores para aparatos lumínicos serán de 100 kcal/h y por equipos electrónicos será de 158 kcal/h. Estos valores son automáticamente brindados por el programa Loop-Cad 2016 bajo los valores indicados por el MJ8 (The Indoor Environment & Energy Efficiency Association), manual de 8va edición que trae consigo el programa.

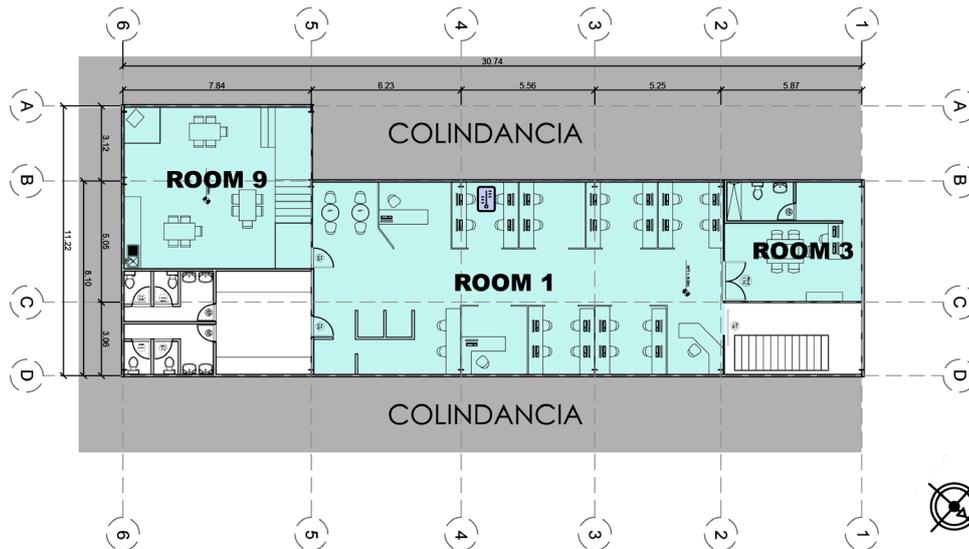


Figura 34. Ubicación de sistema de enfriamiento radiante por suelo en el edificio de San José, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

Para los valores básicos del S.E.H se utilizará los parámetros base brindados por la Mtra. Calderon en su investigación, como distancia de tuberías, temperatura mínima de superficie.

También se determinará un tipo de sistema de enfriamiento radiante ya que el programa presenta varios sistemas.

Apartir de los resultados obtenidos se determinará si efectivamente la utilización de estrategias pasivas como el cambio de materiales en conjunto con el sistema de enfriamiento radiante reduce la transmisión térmica del edificio y a su vez reduce el consumo energético a partir de los valores brindados del edificio base.

Por último, se realizará una comparación costo / función entre el sistema mecánico de enfriamiento que actualmente se utiliza en el edificio (aire acondicionado) y la energía que requiere el edificio para el funcionamiento del S.E.H. Se realizará un cálculo del costo aproximado de ambos equipos para analizar si el S.E.H. presenta un menor costo de funcionamiento que el aire acondicionado.

Esta comparación brindará información relevante para complementar las conclusiones obtenidas en la fase experimental y posteriormente se verificará la hipótesis planteada en esta investigación.



5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis térmico de edificio en San Jose, Costa Rica	106
Experimento Módulos.	118
Simulación	159

Se realizaron tres fases experimentales para analizar la aplicación del sistema de enfriamiento hidrónico en zonas climatológicas principalmente Aw y Bwh.

1. El primer experimento se basó en el análisis térmico de un edificio de oficinas ubicado en el barrio Luján, en San José, Costa Rica. Se obtuvieron datos de temperatura, humedad relativa y punto de rocío.
2. El segundo experimento consistió en la construcción de dos módulos, uno de control (MC) y otro experimental (ME). En el ME se instaló un sistema de tuberías en el interior de la losa de concreto como si fuera la instalación del S.E.H. con el fin de realizar mediciones y compararlas con el MC, ya que este no contó con el sistema. Ambas construcciones se elaboraron tanto en San José, Costa Rica como en la Ciudad de México.

3. En el tercer se desarrolló una simulación a partir de las conclusiones obtenidas por el análisis bibliográfico relacionado y los datos arrojados por los experimentos previos. Los resultados obtenidos brindaron un panorama sobre la efectividad del sistema y, además, permitiendo un primer acercamiento al comportamiento energético del edificio.

5.1 Análisis térmico de Edificio en San José, Costa Rica.

Para la obtención de las mediciones en el primer experimento se utilizaron cuatro HOBO's U12-011 en el segundo nivel de oficinas y un HOBO U12-013 en el exterior. Las mediciones se realizaron en un período de 25 días, empezando el día 5 de julio y finalizando el 11 de julio de 2016.

Para el análisis del comportamiento de las variables (temperatura, humedad y punto de rocío), se seleccionó el día de mayor y menor promedio de temperatura interior de los espacios. El día donde se reportó mayor temperatura fue el 6 de julio y el día de menor temperatura fue el 18 de julio.

En la figura 35 apreciamos la ubicación de los HOBO S dentro del edificio. La imagen del extremo superior izquierdo es el HOBO #1 instalado en la sala de reuniones, el HOBO #2 se ubicó en la zona administrativa. Se cuidó de no instalar la mayoría de los equipos de medición en áreas cercanas a equipos electrónicos



Figura. 35 Ubicación de HOBÓ S en el edificio. Fuente: Elaboración propia

o sistemas mecánicos de enfriamiento para no obtener datos alterados por variables no contempladas en esta investigación.

En la imagen del margen inferior izquierdo el HOBO #4 para obtener las mediciones en el área de comedor. Su ubicación estuvo a una altura de 1.60 mts.

En cuanto al HOBO #3, se colocó, en comparación con los demás HOBO's un poco más cercano a otras fuentes de calor como personal y equipos electrónicos. Además, encima de este HOBO se encuentra el sistema de enfriamiento de aire acondicionado.

6 de julio de 2016

Empezamos analizando el día de cuando se registró la temperatura promedio más alta del mes. La gráfica 13 presenta el comportamiento térmico de los tres espacios que presentaban mayor discomfort térmico según sus usuarios.

Observamos en la gráfica que el edificio inicia el día con temperaturas bajas ya que el edificio presenta una envolvente que facilita la ganancia y pérdida de calor llegando a tener una temperatura de 18.84°C en el área de comedor (HOBO 4). La temperatura en los tres espacios empieza a incrementar de manera considerada después de las 6:20 a.m., cuando también la temperatura externa empieza a incrementar de manera notoria.

Asimismo, apreciamos que las temperaturas registradas por los HOBO's 1, 2 y 3 se mantienen en el rango de confort (23.5°C a 26.5°C) entre las 8:00 a.m. y las 10:40 am. Estos valores son establecidos por la *Guía de Diseño Bioclimático de Holdridge*, el cual está marcado por la franja gris en el gráfico.

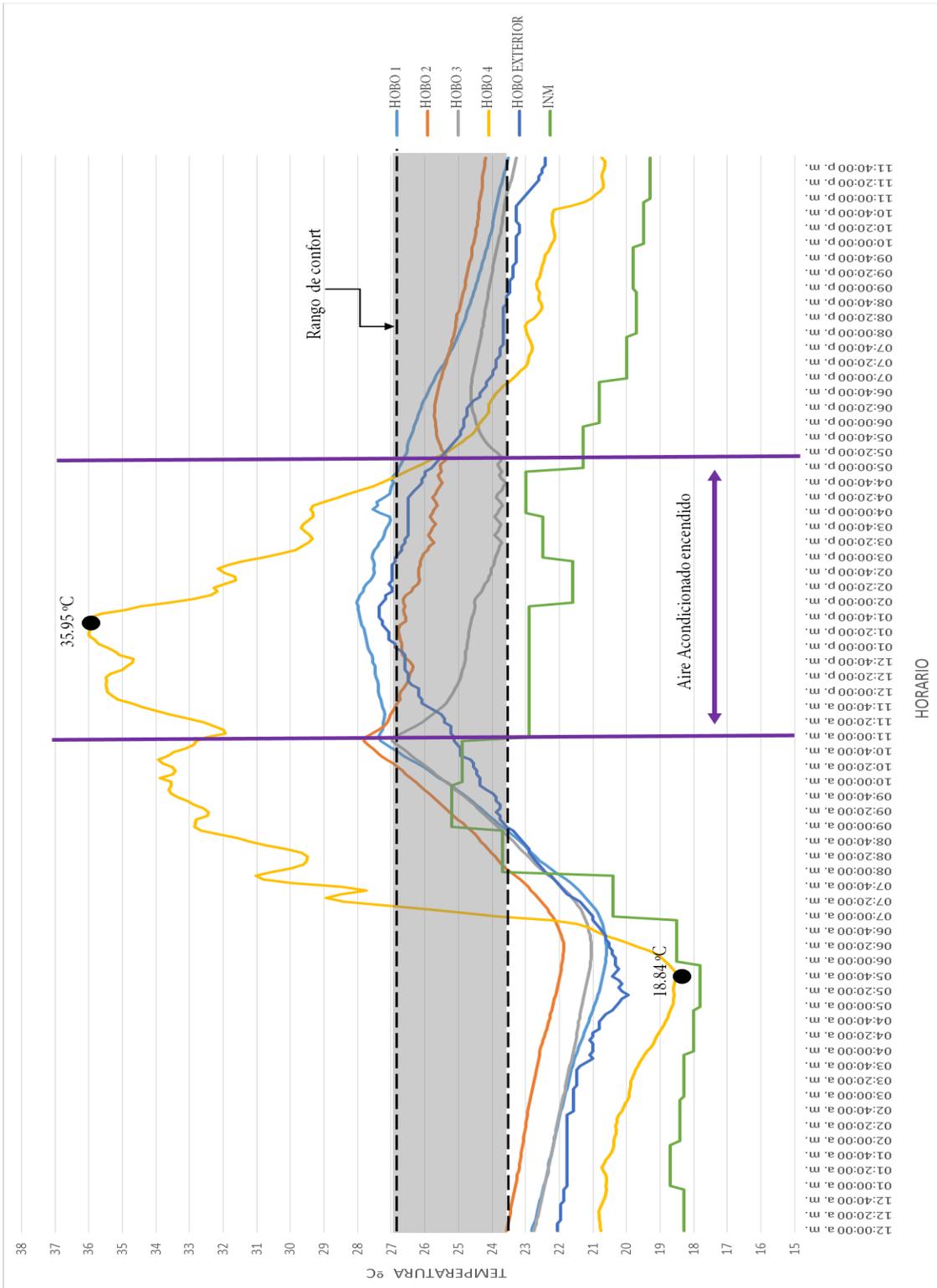
A partir de las 10:40 a.m. todos los HOBO's empiezan a presentar comportamientos distintos. El HOBO 1 registra el aumento de temperatura de 1.5°C mayor a rango estimado. Después de las 4:00 p.m. empieza a descender la temperatura interna (TI)

debido a que este espacio se encuentra con mayor contacto con el exterior y lo cual provoca la pérdida de calor de manera considerada por la baja temperatura exterior (TE).

En el caso de los HOBO's 2 y 3, las mediciones se ven afectadas debido a que los usuarios suelen encender el sistema de aire acondicionado para regular la temperatura interior en la zona de oficinas; apreciamos como la TI registrada por el HOBO 2 y el HOBO 3 disminuye de manera considerada después de las 11:00 a.m., y hasta cuando se apagó el equipo a las 5:20 p.m. El HOBO 3 presenta mayores variaciones debido a que el dispositivo se encuentra cerca de la salida de aire de sistema.

Es importante acotar que este espacio es el único que se mantuvo en el rango de confort térmico aproximadamente 11 horas. Este fenómeno se dio debido a que la envolvente de este espacio no presenta tanto intercambio de calor en comparación de los otros dos espacios analizados.

El espacio donde se presentaron mayores alteraciones de temperatura fue el comedor, medido por el HOBO 4. Sus valores superan aproximadamente 10°C más de los grados establecidos, llegando a alcanzar una TI de 35.95°C en el horario cuando la mayoría de sus usuarios está utilizando la instalación debido a la hora del almuerzo (entre las 12:00 p.m. y las 2:00 p.m.).



Gráfica. 13 Comparación de la temperatura del día 06 de julio de 2016. Elaboración propia

INM: Datos de temperatura brindados por el Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica.

Los resultados arrojados por el HOBO 4 son una clara muestra de la falta de diseño y desconocimiento del contexto climático. El uso de materiales que provocan la absorción de calor no permiten su salida suscita estas situaciones.

Relacionando las TI y los datos obtenidos por el HOBO exterior y datos brindados por el Meteorológico de Costa Rica (INM), se aprecia que existe una correlación entre las temperaturas. La TE medida por el HOBO exterior se relaciona con el aumento y disminución de las TI de los espacios. Esta correlación también está relacionada por la cantidad de radiación del día y la capacidad de los materiales en absorber el calor generada por esta.

En la gráfica 14 se realiza el mismo análisis comparativo de la temperatura. Entre las primeras horas de la madrugada y hasta las 7:00 a.m. apreciamos que los valores se encuentran muy cerca del límite de confort a excepción del espacio del comedor (HOBO 4). Estos valores son el reflejo de la correlación de variables entre temperatura y humedad dentro del edificio y las condiciones climáticas exteriores.

En otras palabras, al no presentar una temperatura alta en su interior, los valores de humedad interior se incrementan de manera considerada. Este fenómeno lo apreciamos en los datos

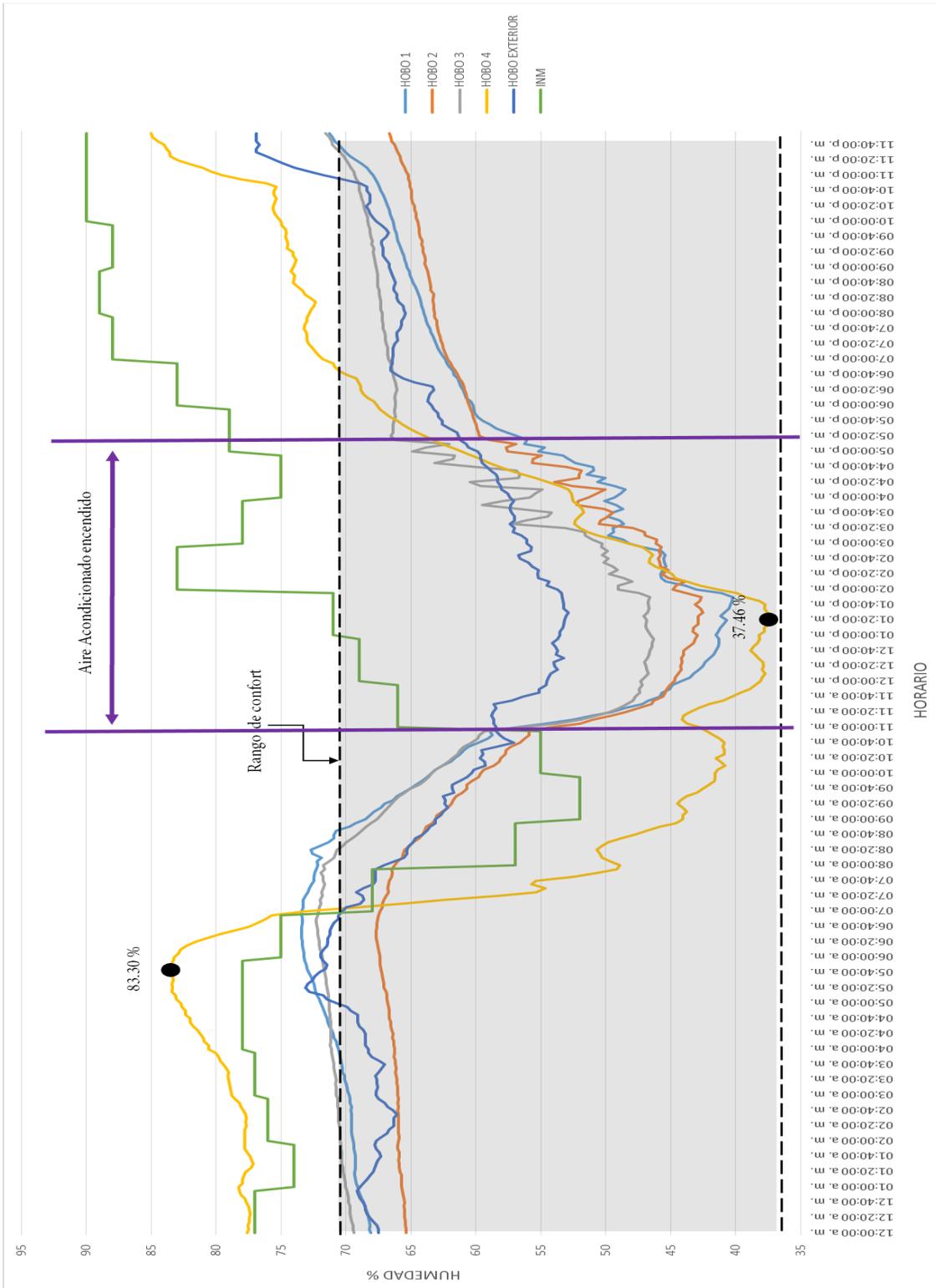
registrados por el HOBO 4, en donde precisamente la humedad interna (HI) empieza a disminuir a la misma hora en que la TI empieza a incrementar.

En general, los datos arrojan que los valores de humedad en el interior del inmueble se mantienen en los parámetros establecidos por la *Guía de Diseño Bioclimático*, donde establece que un espacio de calidad en zonas tropicales como Costa Rica debe de estar en los rangos de 30 al 70%.

El valor HI de mayor registro fue de 83.30 % a las 5:40 a.m. (horario fuera de trabajo y en un espacio sin aire acondicionado) y el menor fue de 37.46%, igual que el análisis pasado, estos datos fueron registrados en el espacio del comedor (HOBO 4).

Analizando los HOBO's instalados apreciamos que se presentó un comportamiento similar, donde en el transcurso del día se redujo aproximadamente un 35% de humedad en el interior del inmueble a causa de la absorción de calor por los materiales a causa de la alta radiación que recibió el segundo nivel, lo cual permitió mantener la humedad en los rangos establecidos.

En comparación con el resultado de la temperatura, este ejercicio refleja la importancia de que envolventes arquitectónicas no deben generar un desequilibrio en las variables de temperatura y humedad interna.



Gráfica. 14 Comparación de la humedad de la humedad del día 06 de julio de 2016. Fuente: Elaboración propia

INM: Datos de temperatura brindados por el Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica.

Relacionando los resultados obtenidos por los HOBOS interiores con respecto a datos del HE podemos apreciar que la HI presenta valores menores. Después de las 11:00 a.m. la HE empieza a aumentar considerablemente debido a que el día empezó a nublarse y posteriormente a llover a la 1:20 p.m. Sin embargo, la HI se mantiene constante entre las 12:00 p.m. hasta la 1:40 p.m. cuando llega a incrementarse por la lluvia.

Podemos apreciar que la HI se logró mantener constante debido al calor absorbido en el interior del inmueble, la cual se vio afectada cuando iniciaron las lluvias, alterando su porcentaje.

La única variación se dio en los HOB's 2 y 3 debido a que se encendió el sistema de aire acondicionado para mejorar la sensación térmica en el área de las oficinas entre las 11:00 a.m. y las 5:20 p.m.

18 de julio de 2016

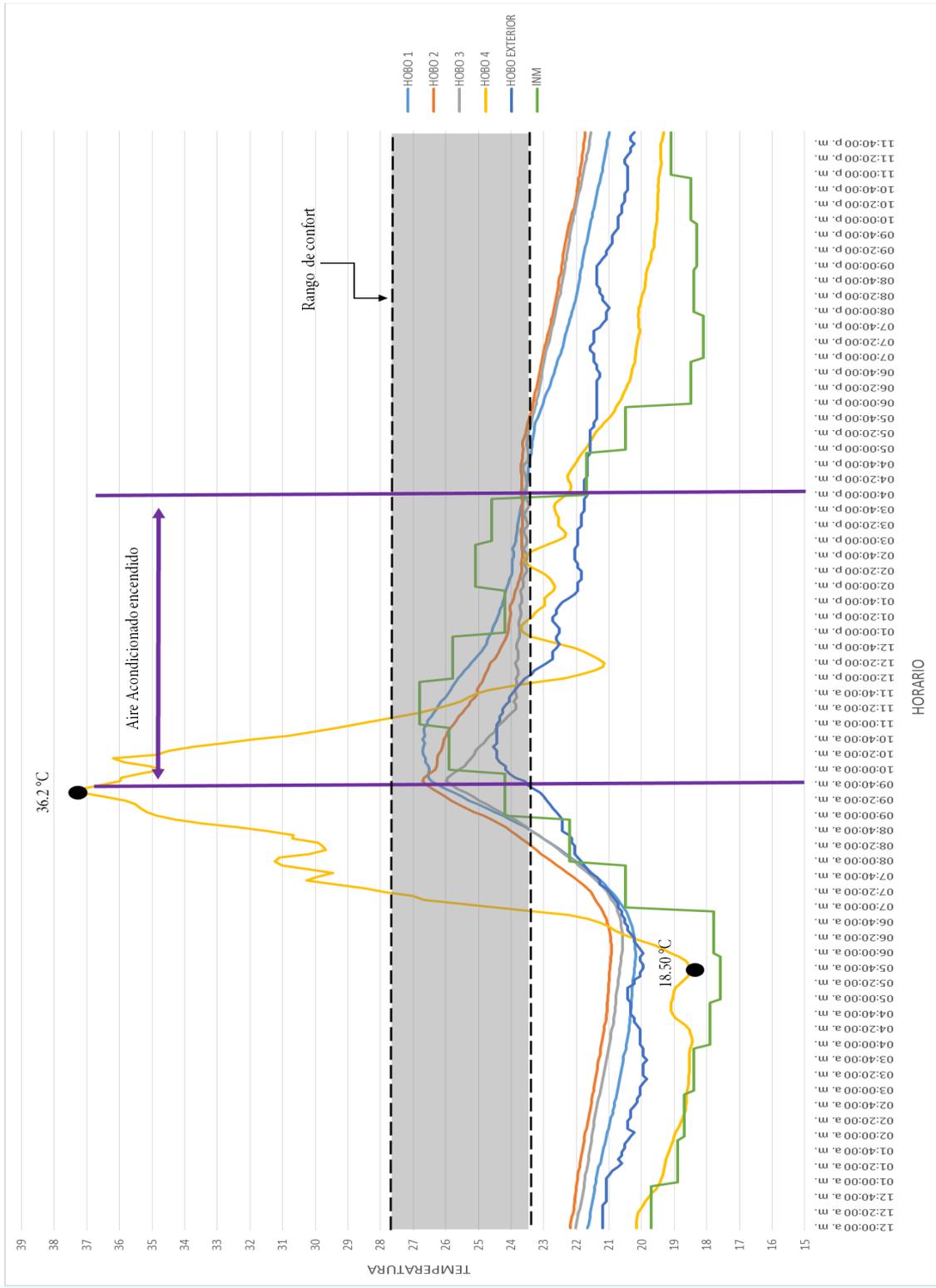
El 18 de julio fue el día cuando se registró la temperatura más baja promedio en el mes en que se llevó a cabo la medición. Como apreciamos en la gráfica 15 la temperatura más alta registrada fue de 36.2°C y la menor fue de 18.50 °C en el área del comedor. En comparación con el día 06 de julio, en general las temperaturas se mantuvieron constantes y bajo los rangos de confort establecidos por la *Guía Bioclimática*, excepto los valores registrados por el HOBOS 4.

Evaluando por separado el comportamiento registrado por cada HOBOS, apreciamos que el HOBOS 1 (sala de reuniones) mantiene una temperatura menor después de las 12:20 p.m. Este fenómeno se provocó debido a que el día empezó a nublarse y posteriormente empezó a llover a partir de las 4:00 p.m.

Las propiedades de los materiales que componen el envolvente de la sala de reuniones (muros de bloque de concreto de 12 cm de espesor y por sus ventanas con vidrio de 6mm sin puente térmico) también se atribuye a la pérdida de calor interno porque generan una "fuga de calor" y bajan la temperatura en el interior del espacio.

En cuanto al HOBOS 2 y 3, se presentó el mismo resultado que el día que se registró la temperatura más alta promedio, sus valores se mantuvieron 8 horas (entre las 8:40 a.m. hasta las 4:00 p.m.) en condiciones térmicamente óptimas. Sin embargo, estando la temperatura en equilibrio, los usuarios encendieron el sistema de aire acondicionado a las 9:40 a.m. y lo apagaron hasta las 4:00 p.m. como lo podemos apreciar en la gráfica 15.

Debido a esta decisión, los valores de TI se mantuvieron en el rango de confort, lo cual refleja que los sistemas de enfriamiento deben ser programados para actuar solamente cuando sean necesarios y no gastar de manera innecesaria energía y afecte el confort térmico.



Gráfica. 15 Comparación de la temperatura del día 18 de julio de 2016. Fuente: Elaboración propia

INM: Datos de temperatura brindados por el Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica.

En comparación con el día 06 de julio, las temperaturas que superan $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la línea de confort se mantienen en un período de 4 horas a reducir drásticamente de $36.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta aproximadamente $20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de dos horas y media, la gráfica 15 también demuestra que la TI se mantiene entre rangos de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y después de las 4:00 p.m. la temperatura empieza a descender de forma constante debido a que esa hora empezó a llover y el cielo estaba nublado.

En relación a los valores exteriores, podemos ver que los registros que obtuvieron los HOBOS 1,2 y 3 son paralelos a los datos brindados por el INM, lo cual determina que los valores de TI y TE estuvieron relacionados. Podemos afirmar entonces que el 18 de julio no hubo gran incidencia de radiación solar, y que al encender los equipos de aire acondicionado a partir de las 9:40 a.m. hasta las 4:00 p.m. logró mantener la temperatura constante.

En la gráfica 16 se refleja el comportamiento de la humedad. Entre la madrugada hasta las 8:00 a.m. los valores de la humedad interna sobrepasan los valores estándares hasta un 15%. Después de esa hora apreciamos que la humedad empieza a reducirse un 40% aproximadamente, registrado por el HOBOS 4.

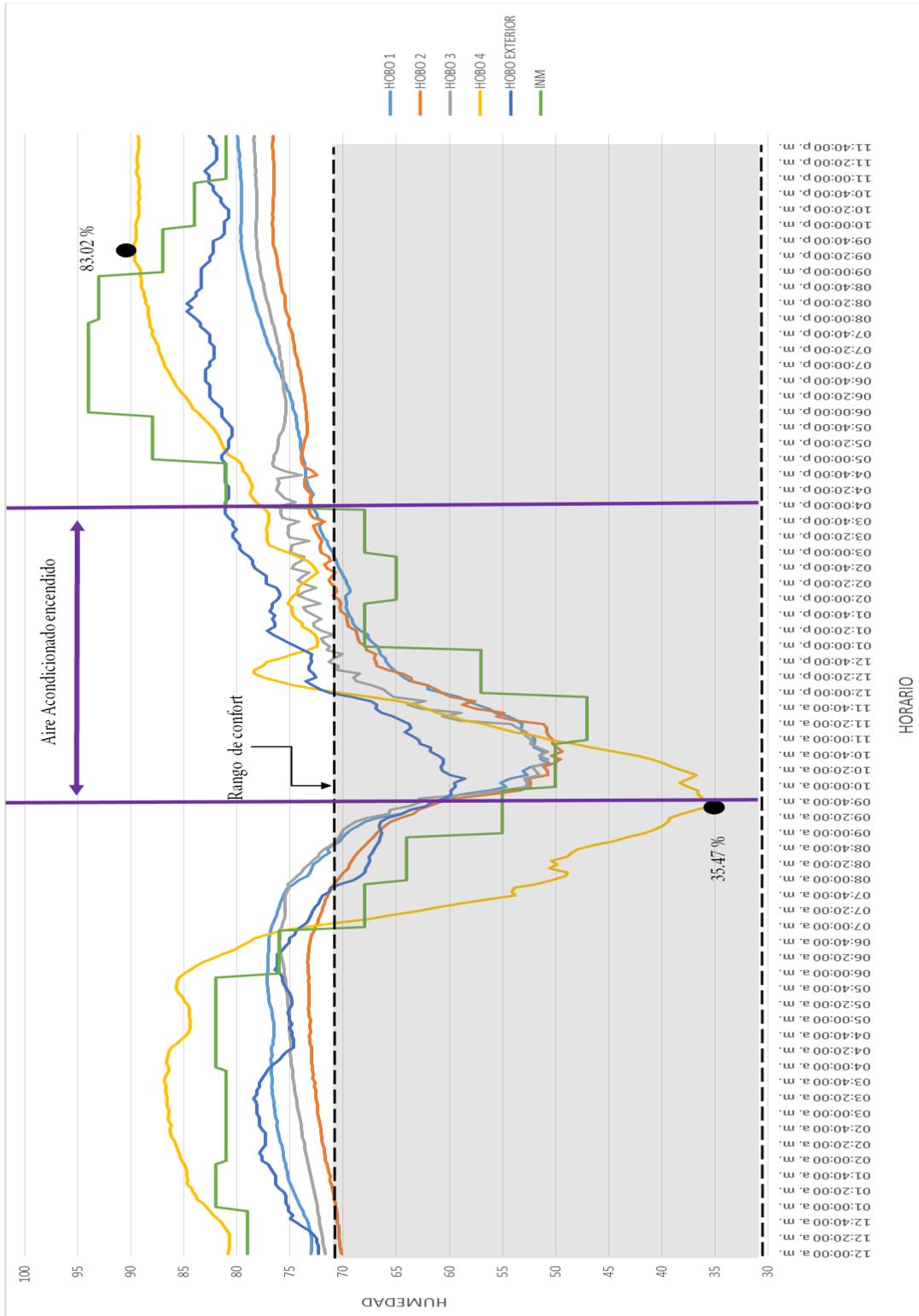
En comparación con el comportamiento térmico, la gráfica de humedad refleja que sus valores

empiezan a reducirse, lo cual es un factor favorecedor debido a que se mantienen en equilibrio en relación a los parámetros de confort.

Sin embargo, después de que se encendieran el sistema de aire acondicionado, se provocó una alteración de los valores ya que estos empezaron a aumentar.

En un período de dos horas y media (igual que el análisis de temperatura) los valores trascienden el rango de confort provocando que se sigan aumentando en el transcurso del día, además, el mismo ambiente húmedo del día aumentó la humedad interior de los espacios.

En relación a los datos exteriores, tanto los datos del HOBOS exterior como los datos del INM reflejan una concordancia con el comportamiento de la HI. Ambos valores se vieron alterados debido a que el día se nubló a partir de las 11:40 a.m. y comenzó la lluvia a las 4:00 p.m.



Gráfica. 16 Comparación de la humedad del día 18 de julio de 2016. Fuente: Elaboración propia

INM: Datos de temperatura brindados por el Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica.

Comparación de resultados

Se desarrolló una tabla resumen para realizar un último análisis de los valores promedio que registró cada equipo de medición. Si bien es cierto que cada día presentó condiciones climáticas distintas, es importante observar el comportamiento en cada espacio analizado del edificio.

Podemos apreciar en la tabla 8 que los valores INM promedio de ambos días son similares, no obstante se observa que el comportamiento dentro los espacios reaccionaron de manera distinta. La diferencia de valores registrados tuvo variación de entre 1° hasta 3°C , lo cual reafirma que en el transcurso del día la transferencia de calor entre en el interior y el exterior fue causada por los materiales que componen la envolvente.

Al igual que la temperatura, la humedad presentó valores muy similares según la INM, y una vez más se vuelve a confirmar que la transferencia de calor ha provocado la diferencia de valores entre los registros de los diferentes días.

Comparando ambos días se puede afirmar que el 06 de julio la temperatura y la humedad mantuvieron valores casi constantes en comparación con el 18 de julio. Si bien cada espacio presentó alteraciones en el transcurso del día, el HOBO 1, 2 y 3 presentaron valores que se mantuvieron en un gran periodo de tiempo dentro de los rangos de confort.

RESUMEN DE RESULTADOS						
	HOBO 1	HOBO 2	HOBO 3	HOBO 4	HOBO EXT.	INM
TEMPERATURA (°c)						
06/07/2017						
Mínimo	20.60	21.86	21.05	18.53	19.94	17.80
Máximo	28.02	27.82	26.96	35.98	27.37	25.20
Promedio	24.40	24.62	23.48	25.77	23.63	20.76
18/07/2017						
Mínimo	20.14	20.91	20.57	18.43	19.85	17.60
Máximo	26.72	26.72	25.98	37.20	24.54	26.80
Promedio	22.62	22.95	22.60	22.62	21.50	20.89
HUMEDAD (%)						
	HOBO 1	HOBO 2	HOBO 3	HOBO 4	HOBO EXT.	INM
06/07/2017						
Mínimo	40.24	42.54	46.31	37.39	52.90	52.00
Máximo	73.42	67.68	72.30	85.03	76.92	30.00
Promedio	62.21	59.97	64.36	63.85	64.28	75.66
18/07/2017						
Mínimo	50.59	49.38	50.73	35.46	58.53	47.00
Máximo	79.99	76.70	78.41	89.74	84.72	94.00
Promedio	72.61	70.48	72.83	76.09	76.02	75.29

Tabla 8. Resultados de las mediciones del día 06 y 18 de julio de 2016.
Fuente: Elaboración propia

5.2 Experimento Módulos

En la segunda etapa de experimentación se construyeron dos módulos MC y ME, como se ha mencionado anteriormente, las dimensiones de los módulos construidos en Costa Rica como en México varían debido a la disponibilidad del material.

Como se explica en el capítulo pasado, la intención de estas mediciones es analizar el comportamiento del sistema desde el punto de vista térmico y de humedad bajo condiciones climatológicas A_w y B_{wh} .

Es importante indicar que la ejecución de este experimento se basó en una primera parte, utilizar una temperatura de agua menor al punto de rocío y luego se respetaron estos parámetros para hacer una comparación de comportamiento y tiempo de reacción en ambas situaciones.

5.2.1 Experimento Módulos

Costa Rica

En la figura 36 se aprecia la instalación de ambos módulos en el mismo terreno en donde se realizaron las mediciones pasadas. Se utilizó un equipo de medición marca Perfect-Prime TH165 con mediciones a cada 10 minutos; debido a la falta de equipos de medición en la primera prueba y en la segunda, se utilizaron dos equipos HOBO DataLogger U12- 013 para obtener mediciones a cada 5 minutos en un total de 5 días de experimentación.

Los primera prueba fue dos días, el 28 y 29 de julio de 2016 con la temperatura del agua menor a la temperatura de punto de rocío. En la segunda prueba se realizó el 13, 14 y 16 de enero del 2017 donde se mantuvo la temperatura del agua a dos grados superior a la temperatura de rocío promedio de 15-16 °C.

Se seleccionó el día 29 de julio de 2016 y el 13 de enero del 2017 para analizar el comportamiento térmico de los módulos debido a que cuentan con mayor información relevante que puede ser de gran utilidad en esta investigación.



Figura 36 Fotografías de los módulos MC y ME en San José, Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia

29 de julio de 2016

Se inició la prueba a las 9:30 a.m. y se finalizó a las 3:20 p.m. El día se encontraba totalmente despejado hasta las 2:00 p.m. cuando se empezó a nublar y empezó a llover después de las 3:25 p.m. La velocidad con la que el agua transcurría por el serpentín era de 1200 litros por hora y consumía aproximadamente 15 watts.

En esta primera prueba se utilizó una temperatura menor de agua con respecto a la temperatura del punto de rocío, con la finalidad de analizar el comportamiento térmico y de humedad en el ME, con la finalidad de evidenciar las consecuencias térmicas en un espacio si no se consideran los parámetros establecidos para la aplicación del S.E.H.

La tabla 9 muestra los resultados obtenidos en el experimento. Podemos observar que a la utilización de una TA menor a la recomendada provocó una disminución de temperatura en el interior del ME de 5.3 °C, sin embargo, la tabla también demuestra que la humedad aumentó 7% aproximadamente debido a la condensación provocada.

29/07/2016											
DATOS	DIA	HORA	Temp(°C) MC	Temp(°C) ME	Temp (°C) HOBO	Humi(%R H) MC	Humi(%R H) ME	HR (%) HOBO	Pt rocío (°C) MC	Pt rocío (°C) ME	Pt rocío (°C) HOBO
1	29/07/2016	09:30:26 a. m.	23.7	24.1	23.388	74.4	NA	61.94	18.9	19.1	15.7
2	29/07/2016	09:40:26 a. m.	24.7	24.5	23.484	68.1	68.2	62.49	18.4	18.3	15.93
3	29/07/2016	09:50:26 a. m.	24.68	24.5	23.581	67.6	67.5	62.39	18.1	18.8	15.99
4	29/07/2016	10:00:26 a. m.	24.6	24.6	23.677	64.8	66.8	62.04	17.5	18	16
5	29/07/2016	10:10:26 a. m.	23.7	23.5	23.773	67.4	70.4	61.46	17.3	17.8	15.94
6	29/07/2016	10:20:26 a. m.	23.3	22.9	23.773	68.8	71.6	61.39	17.2	17.5	15.92
7	29/07/2016	10:30:26 a. m.	23.1	22.5	23.869	69.6	72.9	60.47	17.2	17.4	15.78
8	29/07/2016	10:40:26 a. m.	23	22.2	23.966	70.1	73.5	60.74	17.3	17.2	15.94
9	29/07/2016	10:50:26 a. m.	22.9	22.1	24.158	70.4	74.4	61.07	17.2	17.3	16.2
10	29/07/2016	11:00:26 a. m.	22.9	21.9	24.255	70.6	75	61.05	17.3	17.3	16.29
11	29/07/2016	11:10:26 a. m.	23	21.8	24.351	70.7	75.3	60.08	17.4	17.2	16.13
12	29/07/2016	11:20:26 a. m.	23	21.8	24.545	70.8	75.4	59.75	17.4	17.3	16.22
13	29/07/2016	11:30:26 a. m.	23	21.8	24.738	70.8	76	59.16	17.4	17.4	16.25
14	29/07/2016	11:40:26 a. m.	23.1	21.8	24.738	70.8	76.2	59.57	17.5	17.4	16.36
15	29/07/2016	11:50:26 a. m.	23.2	21.9	24.931	70.8	76	58.78	17.6	17.5	16.33
16	29/07/2016	12:00:26 p. m.	23.3	21.8	24.835	70.8	75.7	58.81	17.7	17.3	16.25
17	29/07/2016	12:10:26 p. m.	23.4	21.9	24.835	70.7	75.7	59.55	17.8	17.4	16.44
18	29/07/2016	12:20:26 p. m.	23.5	21.7	25.028	70.7	76	57.87	17.9	17.3	16.18
19	29/07/2016	12:30:26 p. m.	23.7	21.6	25.028	70.5	76.4	58.25	18	17.3	16.28
20	29/07/2016	12:40:26 p. m.	23.8	21.6	25.125	70.5	76.7	57.54	18.1	17.3	16.18
21	29/07/2016	12:50:26 p. m.	24	21.6	25.416	70.4	76.8	56.15	18.3	17.4	16.06
22	29/07/2016	01:00:26 p. m.	24.1	21.9	25.513	70.4	76	56.63	18.4	17.5	16.29
23	29/07/2016	01:10:26 p. m.	24.3	22.3	25.61	70.4	75.4	56.1	18.6	17.7	16.23
24	29/07/2016	01:20:26 p. m.	24.4	22.3	25.61	70.4	75.3	56.55	18.7	17.7	16.35
25	29/07/2016	01:30:26 p. m.	24.6	22.6	25.708	70.4	75.8	59.21	18.9	18.1	17.17
26	29/07/2016	01:30:26 p. m.	24.7	22.6	25.416	70.5	77.7	59.21	19	18.6	17.17
27	29/07/2016	01:40:26 p. m.	24.8	22.7	25.319	70.6	79.8	64.89	19.1	19	18.35
28	29/07/2016	01:50:26 p. m.	24.8	22.7	25.222	70.7	81	66.94	19.1	19.2	18.76
29	29/07/2016	02:00:26 p. m.	24.9	22.6	25.125	70.8	81	68.64	19.2	19.2	19.07
30	29/07/2016	02:10:26 p. m.	24.9	22.6	25.125	71	80.1	66.38	19.3	18.8	18.44
31	29/07/2016	02:20:26 p. m.	24.9	22.4	25.125	71.1	80.5	66.15	19.3	18.8	18.38
32	29/07/2016	02:30:26 p. m.	24.9	22.3	25.222	71.3	79.9	65.92	19.3	18.6	18.33
33	29/07/2016	02:40:26 p. m.	24.9	22.2	25.125	71.4	78.6	64.02	19.4	18.2	17.95
34	29/07/2016	02:50:26 p. m.	24.9	22.1	24.738	71.5	78.6	61.89	19.4	18.1	17.33
35	29/07/2016	03:00:26 p. m.	24.8	22	24.545	71.6	80.2	65.34	19.3	18.1	17.82
36	29/07/2016	03:10:26 p. m.	24.8	21.7	24.351	71.7	78.4	62.52	19.3	17.5	16.94
37	29/07/2016	03:20:26 p. m.	24.8	21.4	24.062	71.8	78.3	60.8	19.4	17.2	16.32

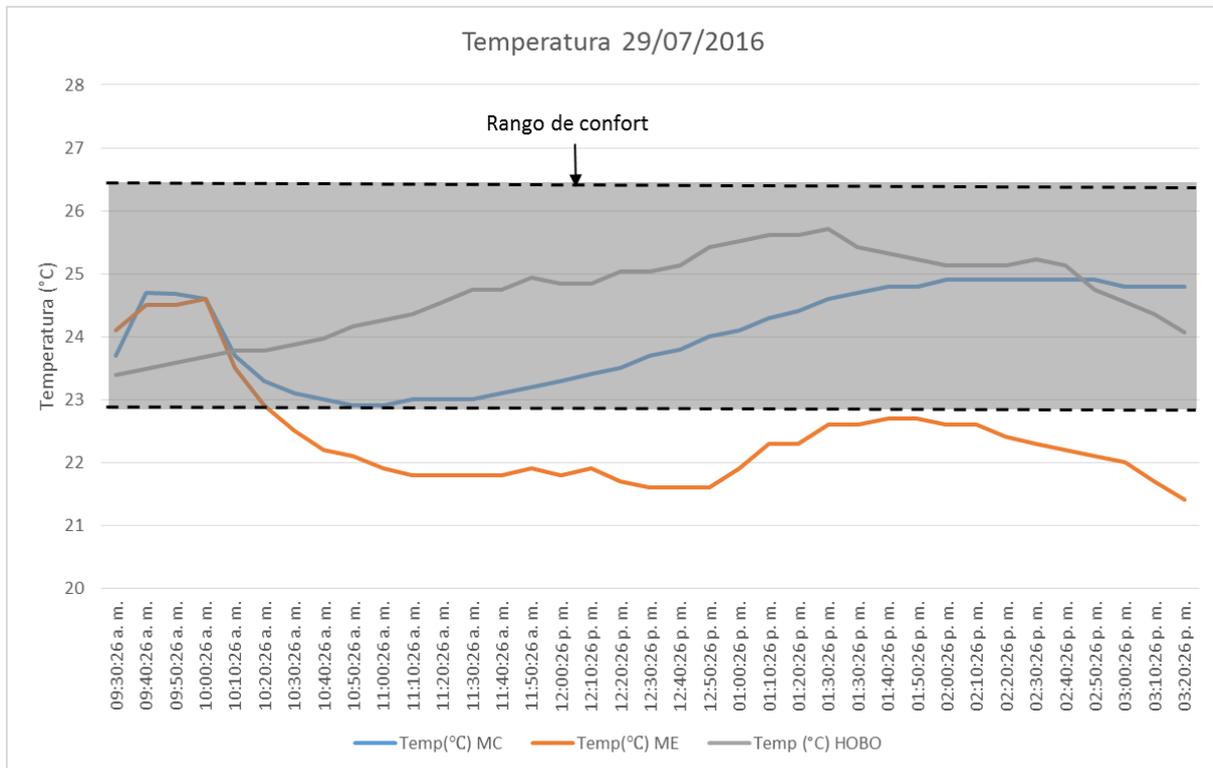
Tabla 9 Resultados de las mediciones del 29 de julio entre la 9:30 a.m. y las 3:20 p.m.
Fuente: Elaboración propia

Podemos apreciar los resultados de temperatura en la grafica 17. Se observa que la TI del ME se reduce de manera drástica con respecto al MC como consecuencia del rápido enfriamiento del bloque de concreto.

En comparación con su comportamiento con el MC, se logró mantener una diferencia de temperatura de aproximadamente 3.5 °C; sin embargo, los valores obtenidos del ME están por debajo del rango de confort establecido por la *Guía Bioclimática*.

También podemos afirmar que a partir de este resultado los valores de la temperatura MC se mantiene casi constantes y presentan un ligero aumento debido la relación de variables entre la TI y TE.

Se puede apreciar con claridad que el incremento de temperatura se da de manera paralela a las condiciones climáticas externas, en cambio el ME rompe la vinculación de estas variables debido a la activación del sistema.



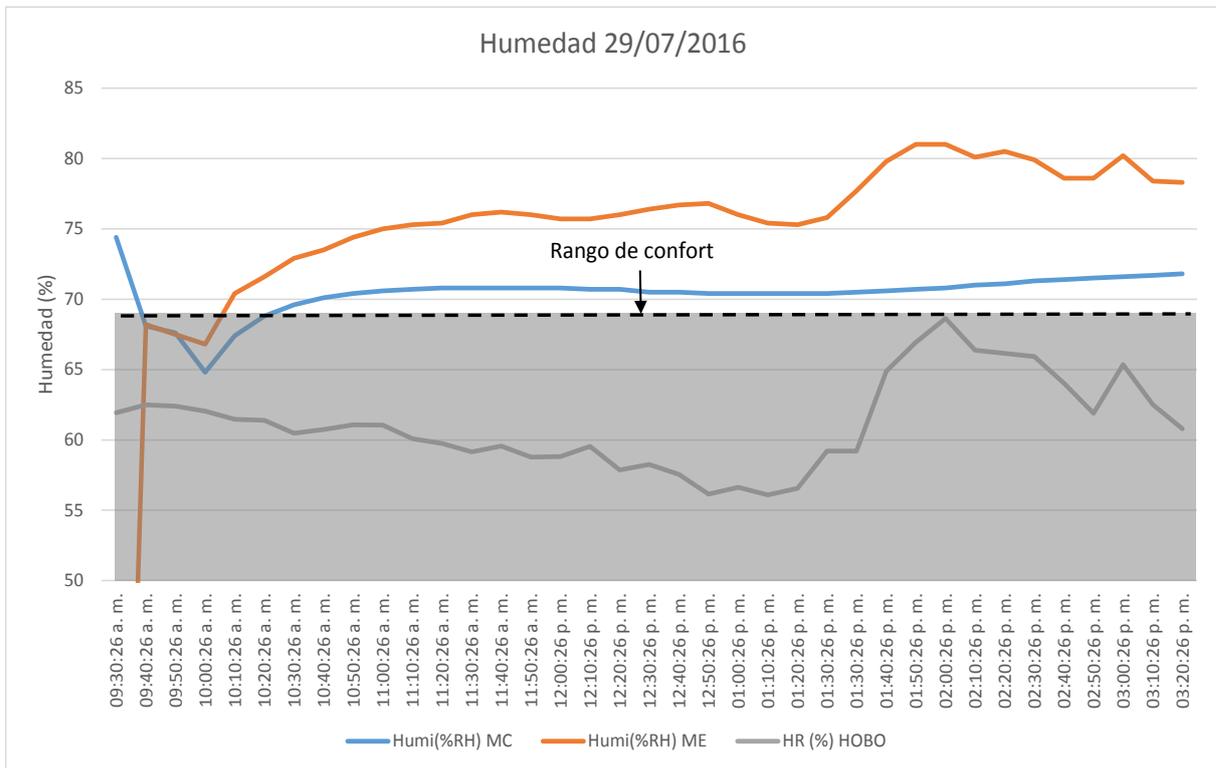
Gráfica. 17 Comparación de la temperatura MC y ME del 29 de julio entre las 9:30 a.m. - 3:20 p.m.
Fuente: Elaboración propia

En relación al tiempo de respuesta, el ME duró aproximadamente dos horas para alcanzar la mayor diferencia de temperatura con respecto al MC. Esto debido a que se aceleró su proceso de enfriamiento al no tomar en cuenta los parámetros de diseño.

En el caso de la humedad, podemos apreciar que en la gráfica 18, el aumento es debido a la condensación provocada de manera intencional en este primer experimento. Los valores MC tampoco se mantienen en el rango de confort, no

obstante, en comparación con los valores del ME, estos presentan aproximadamente 10% más de humedad en relación a la línea de confort.

También el gráfico demuestra que se debe de tener cuidado con la manipulación del sistema dentro de las losas de concreto. El logro de mejorar las condiciones térmicas debe ser trabajado con detalle para evitar una mala práctica que provoque consecuencias que puedan alterar su verdadera capacidad y los materiales que envuelven el S.E.H.

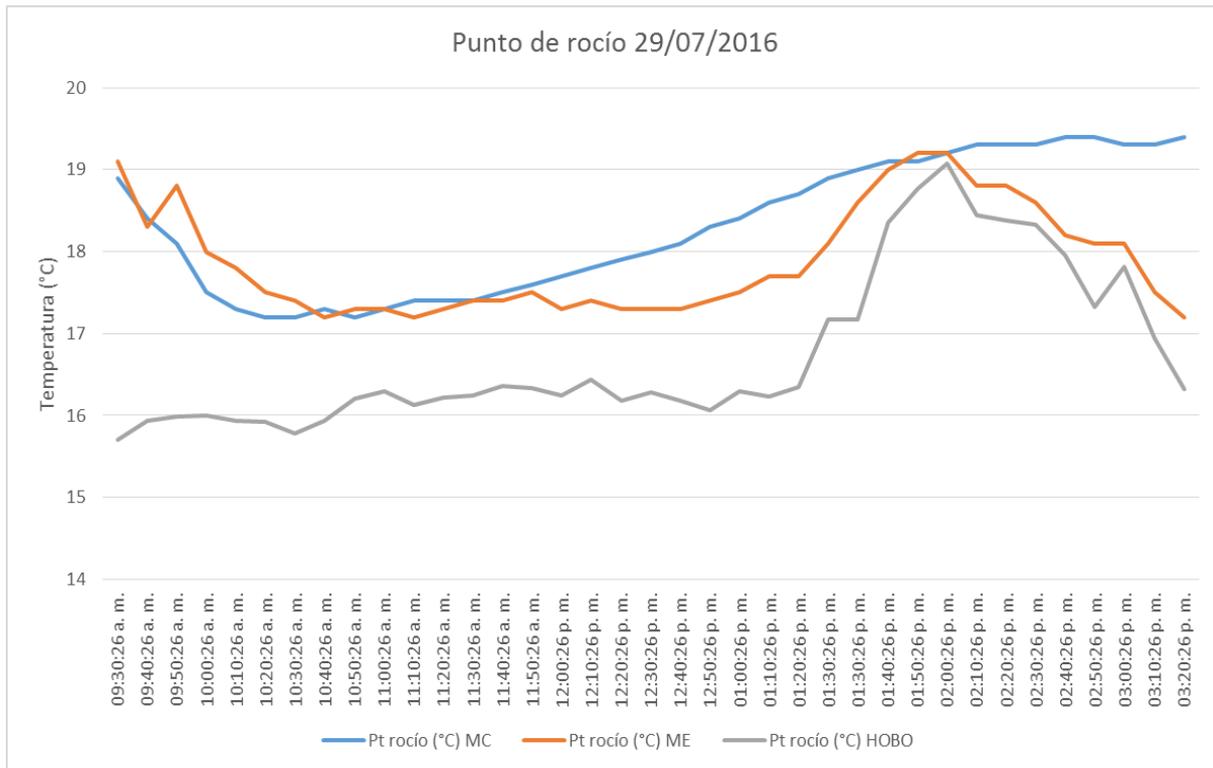


Gráfica. 18 Comparación de la humedad MC y ME del 29 de julio entre las 9:30 a.m. - 3:20 p.m.

Fuente: Elaboración propia

Por último, el comportamiento de la temperatura de rocío (gráfica 19) tanto en el MC como en el ME reaccionan de forma paralela a las condiciones de TPR del exterior, incluso la caída de los datos se da al mismo tiempo a la 1:50 p.m., momento en que el cielo se empieza a nublar.

La temperatura del agua se mantuvo aproximadamente 10°C menos que la temperatura de punto del rocío del ambiente para lograr ver la reacción de las demás variables cuando se altera de manera agresiva las condiciones del funcionamiento del S.E.H.



Gráfica. 19 Comparación de temperatura de punto de rocío del MC y ME del 29 de julio entre las 9:30 a.m. - 3:20 p.m. Fuente: Elaboración propia

13 de enero de 2017

Se inició el experimento a las 8:30 a.m. y se concluyó a las 4:10 p.m. En este experimento se respetó la condición de mantener la temperatura del agua arriba de la temperatura de punto de rocío para evitar la condensación y que no afectara de manera agresiva como en el caso anterior.

Se utilizaron los equipos de medición HOBO para medir las variables y además, se cuenta con los datos brindados por el INM. Por ello, se podrá analizar con mayor profundidad el comportamiento del sistema en una zona climatológica Bwh.

Al igual que el experimento pasado, se utilizó hielo para enfriar la temperatura del agua para reducirla a una temperatura aproximada de 17°C. Se tomó la precaución de mantener una temperatura constante en el agua para simular de una forma más real el sistema en el ME. En cuanto a la velocidad del agua, se mantuvo a 1200 litros por hora y su consumo eléctrico era de 15 watts.

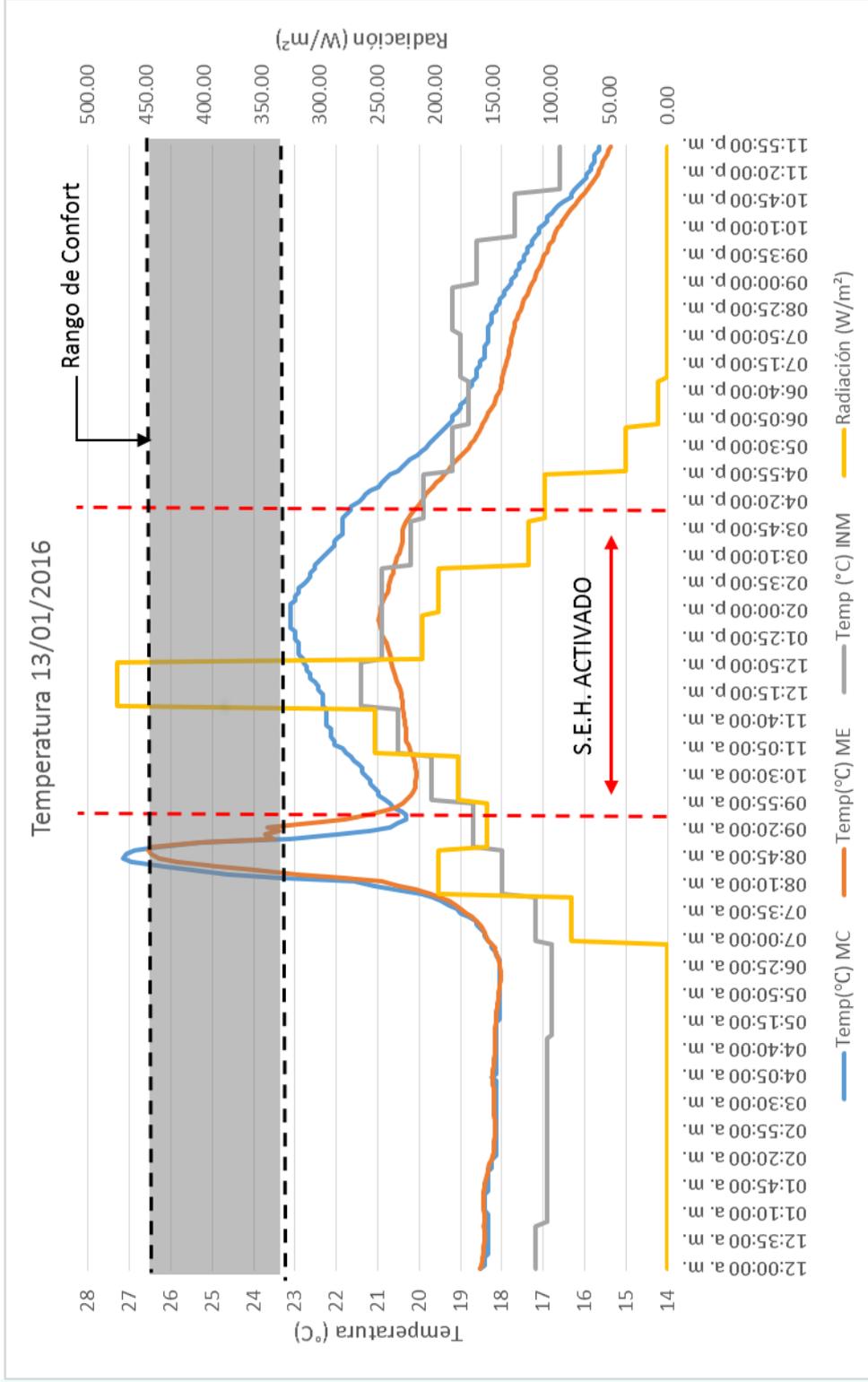
En la gráfica 20 se observa que el ME mantuvo una diferencia de temperatura de 1°C y en su mejor rendimiento la diferencia fue de 2°C aproximadamente con respecto al MC. El tiempo que necesitó el ME para obtener esta diferencia fue de 5 horas (entre las 9:20 a.m. hasta las 2:00 p.m) tres horas más en

comparación con el experimento anterior. También la gráfica 20 nos demuestra que después de la activación del sistema, el ME logra mantenerse en el rango de confort térmico. Pero después de apagarlo su temperatura decae al igual que el MC. Este resultado permite visualizar la capacidad del sistema por mantenerse en los rangos de confort térmico si llega a aplicarse según las recomendaciones de los expertos.

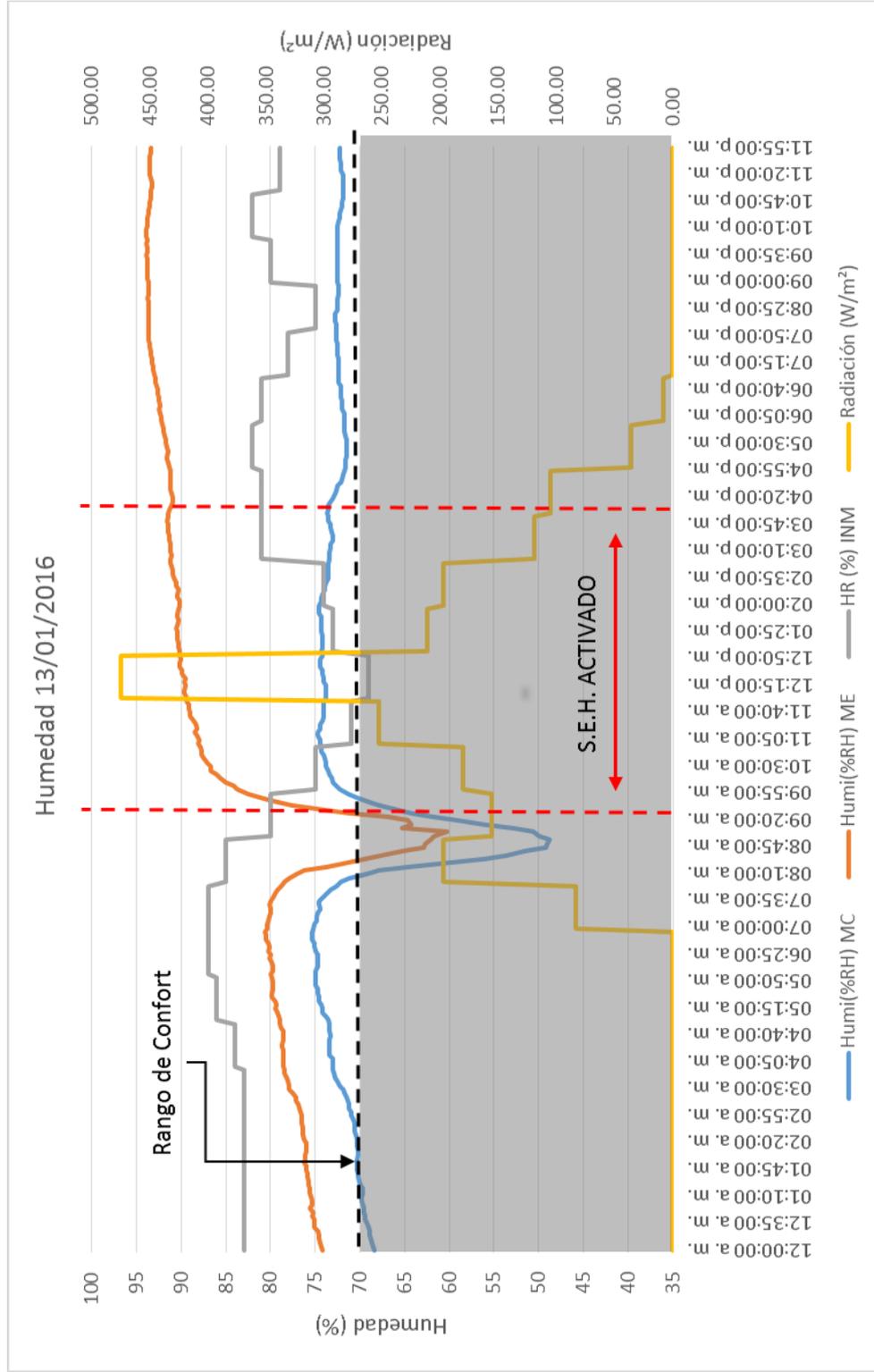
En cuanto al comportamiento de la humedad, la gráfica 21 señala que en ningún momento se logró entrar al rango de confort debido a que la humedad exterior estaba por encima de los valores establecidos provocando una reacción de alta humedad en el interior del MC y ME.

En el ME podemos apreciar que sus valores están a un 20% más de la línea superior de confort, valor incluso mayor que en el experimento pasado. Esto se debió por dos factores, el primero, debido a la poca transmisión de calor por parte de la radiación solar ya que el día fue un poco nublado y el segundo, por la hermeticidad ambos módulos presentaron, concentrando la HI en el interior.

Se aprecia un ligero cambio en la humedad cuando la radiación empieza a incrementar después de las 8:00 a.m., debido a este fenómeno, la humedad tanto en el MC como en el SE ME redujo casi 10%. Esto nos indica que es necesario aplicar una estrategia que permita el



Gráfica.20 Comparación de la temperatura del día 13 de enero de 2017. Fuente: Elaboración propia



Gráfica. 21 Comparación de la temperatura del día 13 de enero de 2017. Fuente: Elaboración propia

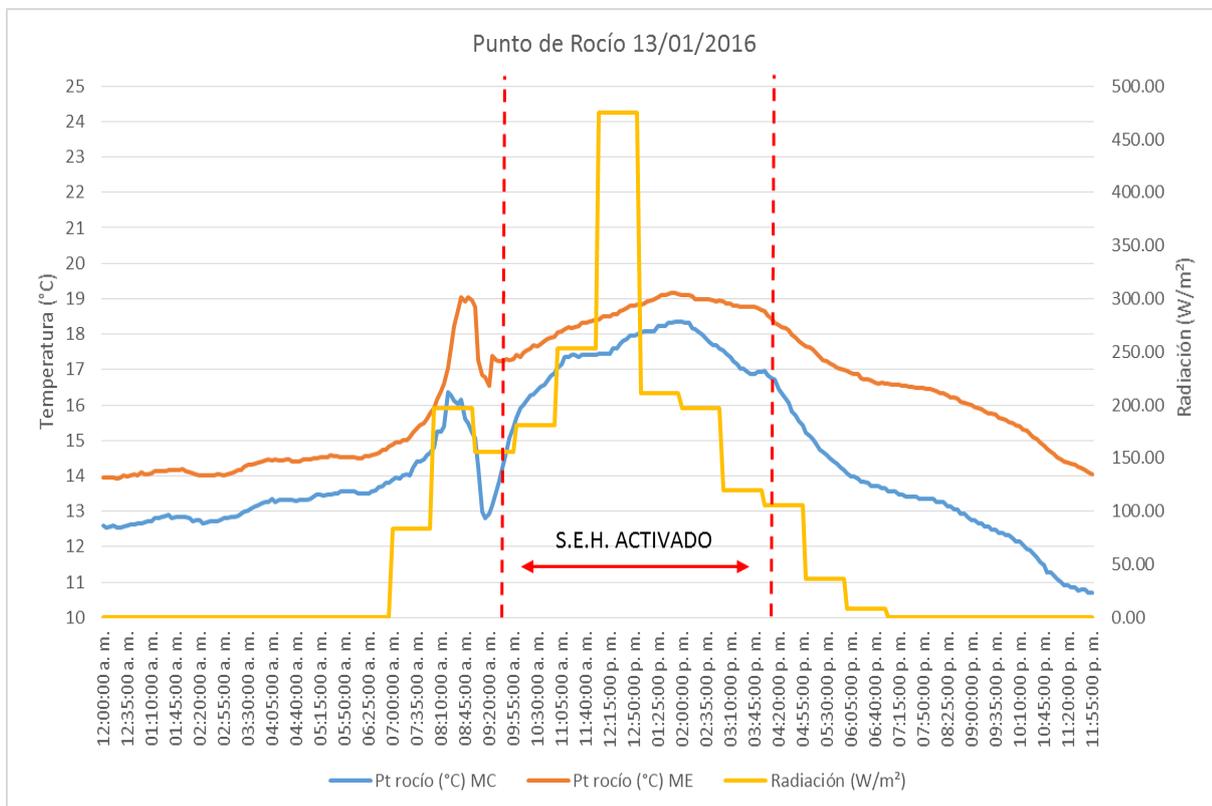
intercambio de calor a través de la radiación para bajar los altos porcentajes de humedad dentro de los edificios.

Y en cuanto al comportamiento de la temperatura de punto de rocío, la gráfica 22 muestra un comportamiento de manera paralela a las variaciones de la radiación solar.

El ME presenta una mayor temperatura

con respecto al MC desde la madrugada hasta las 7:00 a.m. Luego de la activación del sistema se ve un incremento de hasta de 1.5°C . Mantener la temperatura de rocío es fundamental para evitar la condensación en el sistema.

A partir de los resultados obtenidos, se realizó la correlación de variables (en el programa EXCEL) entre la temperatura TI y la radiación de los módulos MC y ME.



Gráfica 22 Comparación de temperatura de punto de rocío del MC y ME del 13 de enero de 2017.

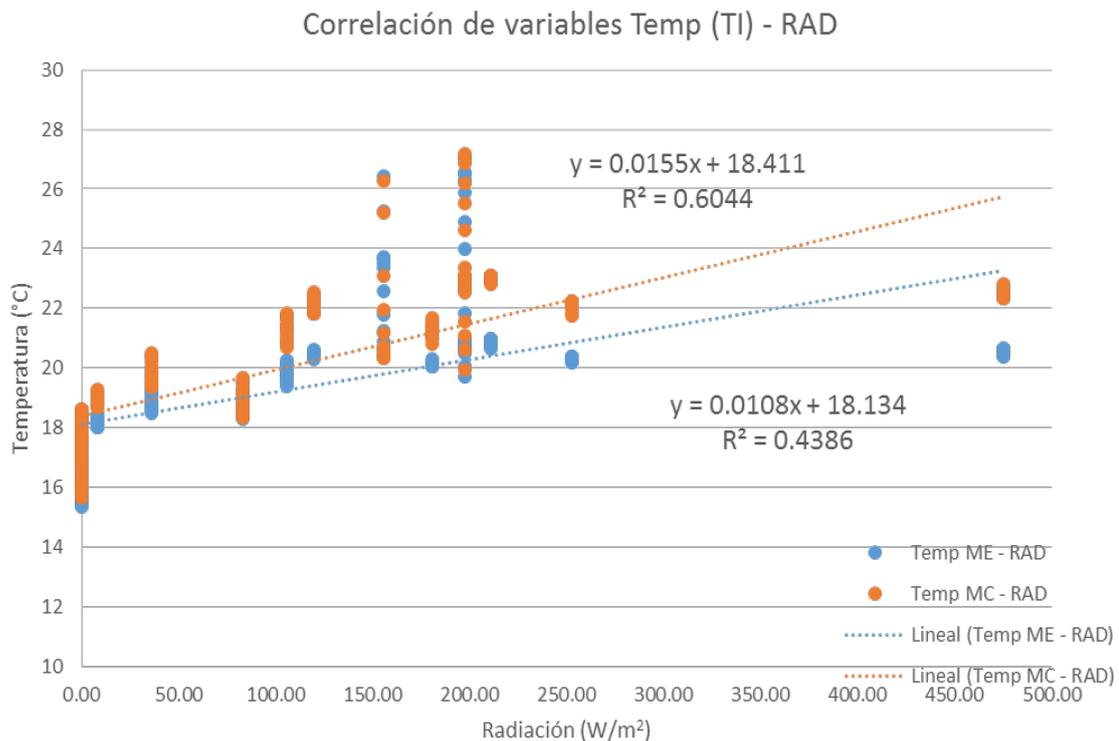
Fuente: Elaboración propia

El gráfico 23 presenta la correlación entre la temperatura TI del MC con respecto a la radiación, la cual es de $R^2=0.6044$ si lo comparamos con el valor $R^2=0.4386$ de ME podemos ver que se logró una desvinculación de estas variables.

Al existir una variable diferente, en este caso un bloque de concreto con el sistema, se permitió romper la relación de estas variables, logrando manipular las condiciones térmicas en el interior del ME .

Al analizar este resultado se afirma que la modificación de una envolvente puede permitir romper la relación entre variables y crear condiciones térmicas deseadas en el interior del edificio.

Este fenómeno se apreciará más en el desarrollo del tercer experimento, en donde se alteran las condiciones de la envolvente del edificio para romper esta relación y potenciar el rendimiento del sistema, tanto en la transferencia de calor como en el consumo de energía.



Gráfica 23 Correlación de variables de TI y RAD del MC y ME del 13 de enero de 2017.
Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Experimento Módulos

México

Igual que en el experimento realizado en Costa Rica, se realizó el análisis del comportamiento del S.E.H. en un espacio, las pruebas fueron realizadas en la azotea del edificio de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

En este ejercicio se realizaron módulos similares a los construidos en Costa Rica, a excepción de la última capa de aislamiento de aluminio que se agregó para reducir más las ganancias térmicas en el interior del módulo.

Las figura 37 y 38 muestran los acabados finales de la construcción y la colocación de ambos módulos en la azotea



Figura 37 Fotografía de los módulos MC y ME en la azotea de la Unidad de Posgrado UNAM, México.

Fuente: Elaboración propia

del posgrado. Podemos apreciar que estos módulos fueron recubiertos por un material aislante para reducir la transferencia de calor para un mejor análisis de comportamiento

Como punto de referencia, se analizó el comportamiento del MC y ME un día antes de los experimentos. Este análisis podrá indicarnos las alteraciones de la

humedad y de la temperatura dentro de los módulos su relación con la radiación.

16 de octubre de 2017

El día se encontró completamente despejado, por lo que las mediciones de temperatura y radiación no tuvieron ninguna variación por nubes o proximidad de lluvia.

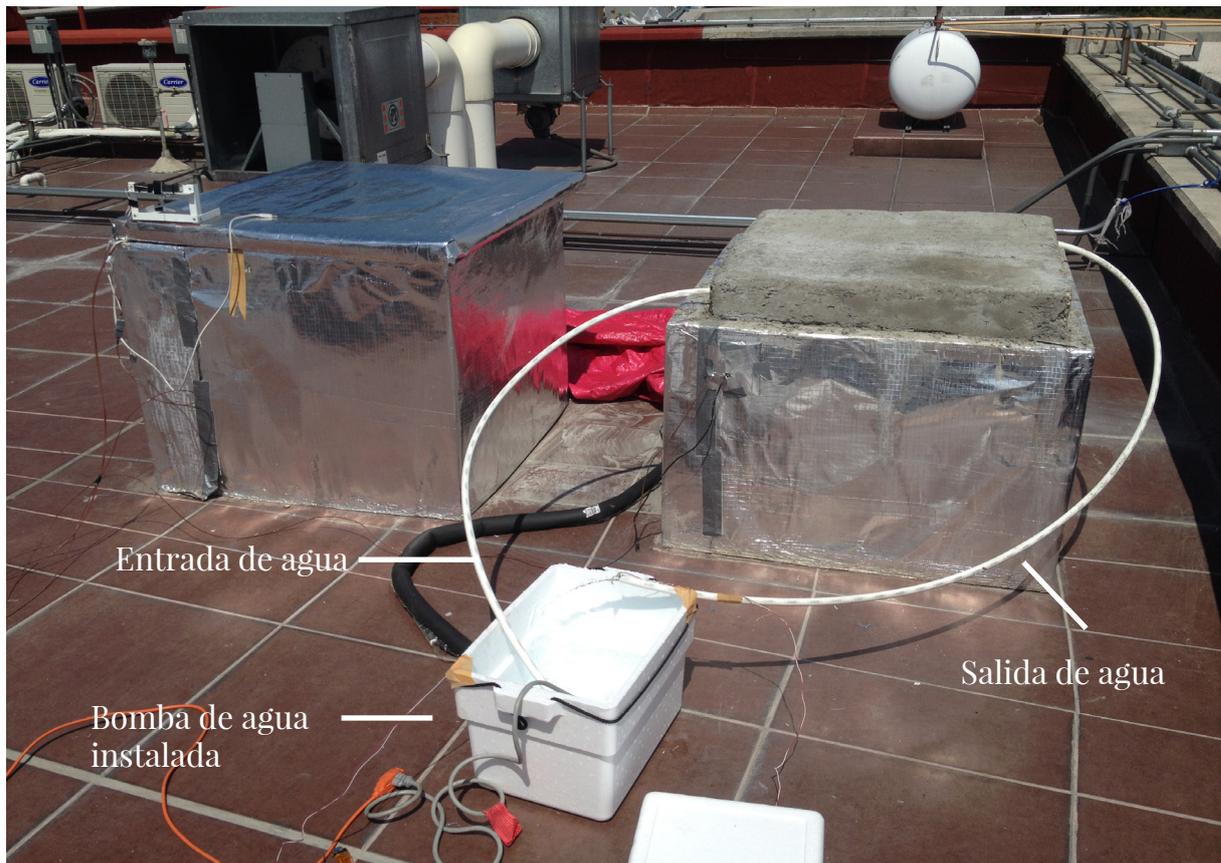


Figura 38 Fotografía de los módulos MC y ME en la azotea de la Unidad de Posgrado UNAM, México.
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 24 se muestra el comportamiento de la temperatura tanto en los módulos como en la temperatura exterior (ambiente). También se vincula estos resultados con los datos brindados de radiación para comprobar si el comportamiento de la variable de temperatura coincide con las variaciones de la radiación.

En primera instancia apreciamos que a partir de las 7:30 los datos de temperatura empiezan a aumentar, igual que la radiación. En respuesta a este fenómeno el MC llega a alcanzar una temperatura de 26.97°C a las 6:10 p.m., como consecuencia de la absorción de calor por medio de los materiales que envuelven el espacio. En cuanto al ME, este llegó a una temperatura de 27.17°C a las 6:20 p.m. A partir de estas horas la temperatura de ambos módulos empieza a descender.

Con relación a la temperatura ambiente, apreciamos que el MC y el ME mantienen una diferencia promedio de 3°C , esto demuestra que los materiales utilizados para la elaboración de la envolvente no permiten grandes ganancias o pérdidas de calor.

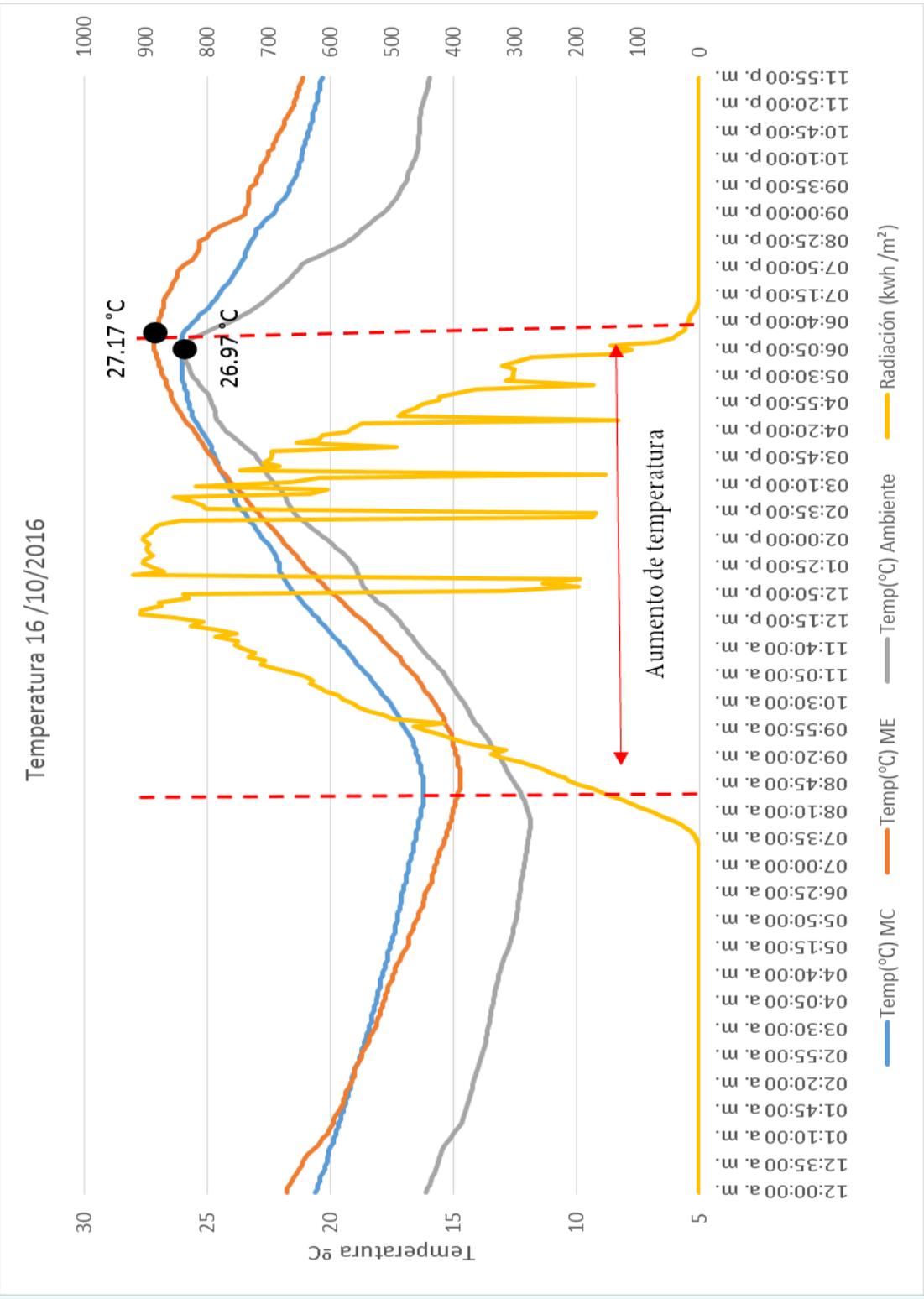
Entonces podemos afirmar que los módulos presentaron un crecimiento de temperatura en un período de 11 horas aproximadamente hasta alcanzar la temperatura máxima. En otras palabras, los módulos llegaron a presentar este

lento aumento de temperatura debido a que ambos presentan una pequeña ruptura en su correlación de variables. Sin embargo, como apreciamos en la gráfica 25 y 26, el MC presenta una mayor relación que el ME.

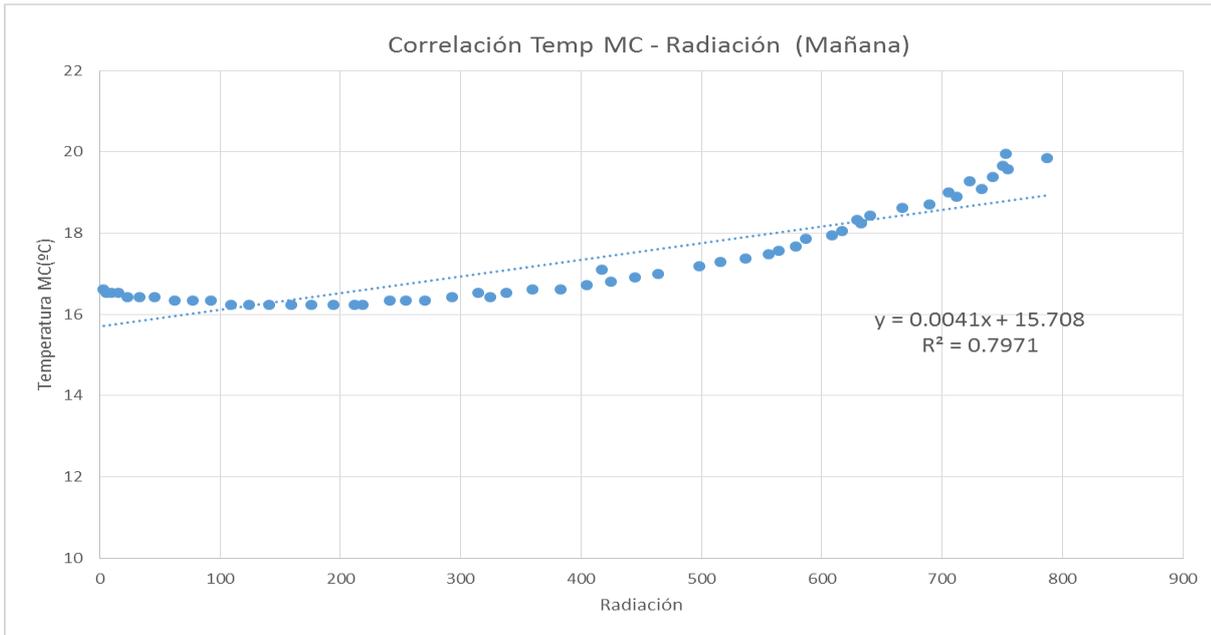
Si comparamos los resultados, apreciamos que el valor de la relación temperatura y la radiación en la mañana del MC es de $R_2=0.7971$ en cambio el valor del ME es $R_2=0.6664$. En la tarde (gráfica 26 y 28) el MC presentó un $R_2=0.4255$ con respecto al ME de $R_2=0.4843$.

Al analizar estos valores apreciamos que la envolvente de ambas perjudica la correlación de la variable TI con respecto a la radiación solar. No obstante, se logró una mejor ruptura del ME en la mañana que el MC.

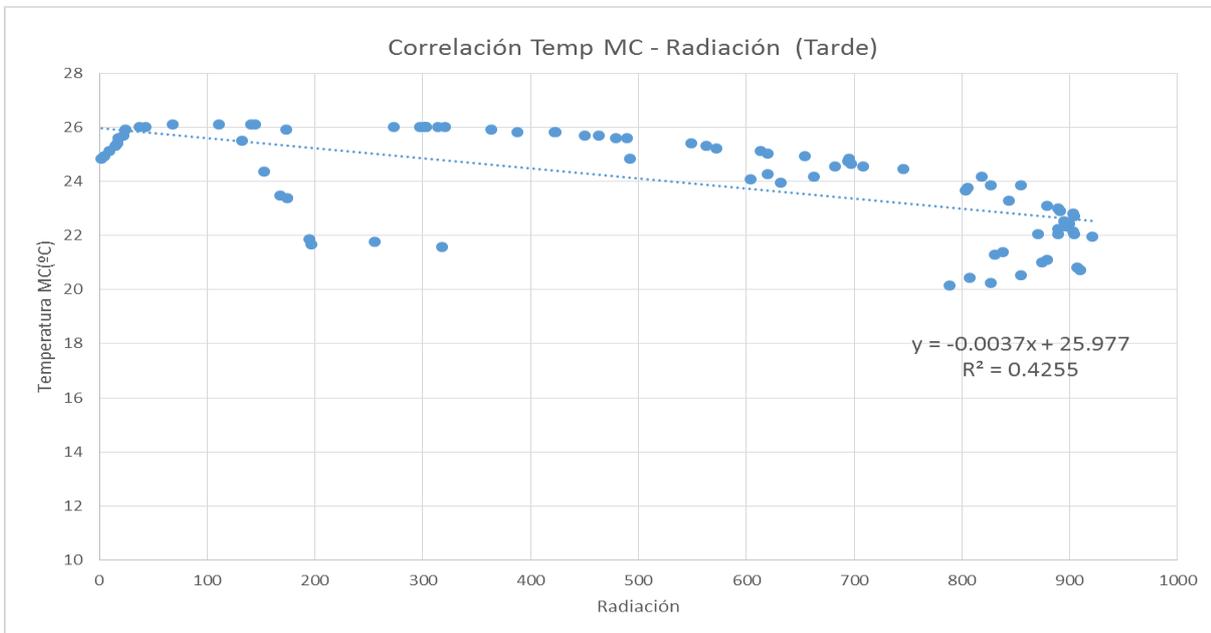
En cambio en la tarde, ambos presentaron valores similares. Este fenómeno se debió a que el bloque de concreto almacenó calor de la mañana y en la tarde terminó de transmitirlo en el interior del espacio del ME.



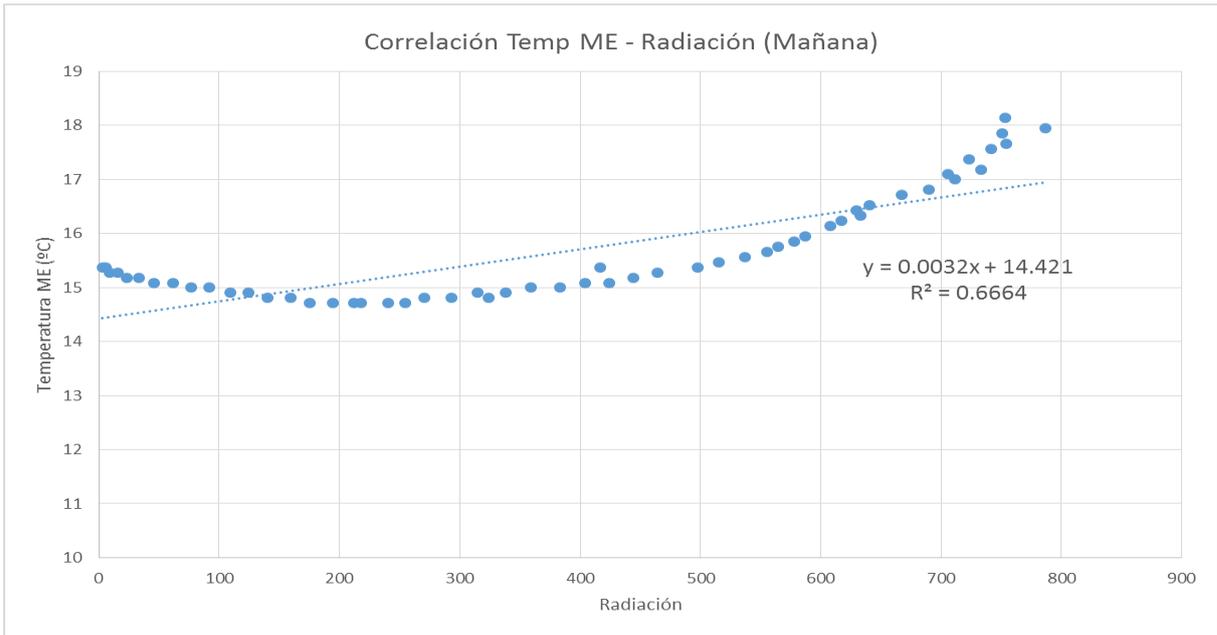
Gráfica 24 Comparación de la temperatura MC y ME del 16 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia



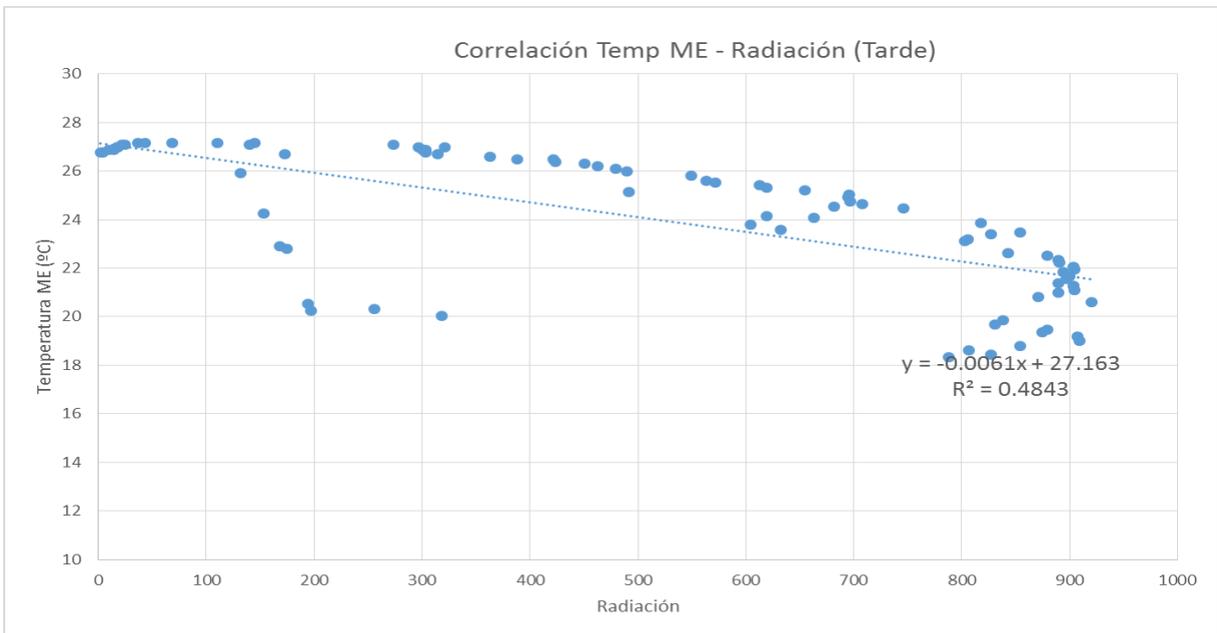
Gráfica 25 Correlación de Variables Temp. - Rad. del MC (Mañana).
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 26 Correlación de Variables Temp. - Rad. del MC (Tarde).
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 27 Correlación de Variables Tem. - Rad. del ME (Mañana).
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 28 Correlación de Variables Tem. - Rad. del ME (Tarde).
Fuente: Elaboración propia

Avanzando con el análisis, se evaluó el comportamiento de la humedad interna en el interior de los módulos. En el módulo MC la humedad interna llegó a alcanzar un valor de 62.33% a las 12:15 p.m, como lo demuestra la gráfica 29, después de alcanzar este nivel de humedad a las 11:50 a.m., empieza a descender de manera notoria hasta llegar a alcanzar un valor de 44% a las 7:15 p.m.

Este fenómeno es el resultado del comportamiento de calor y temperatura en el interior del módulo MC. Comparando los resultados de HI y temperatura se puede afirmar que el aumento de TI influye en el comportamiento de la HI, ya que las variaciones de calor en el interior del MC son una respuesta a la capacidad de los materiales que la componen (*triplay* de pino de 15 mm, lámina de poliestireno de 45 mm y un recubrimiento de aislante de aluminio).

En la gráfica 29 también podemos observar que el módulo ME llegó a alcanzar una humedad interna de 63.98% y desciende a una velocidad similar al MC. Es importante acotar que a pesar de que el ME presentó un valor de humedad mayor al MC, a la hora de su descenso este logra bajar su porcentaje hasta el 39%.

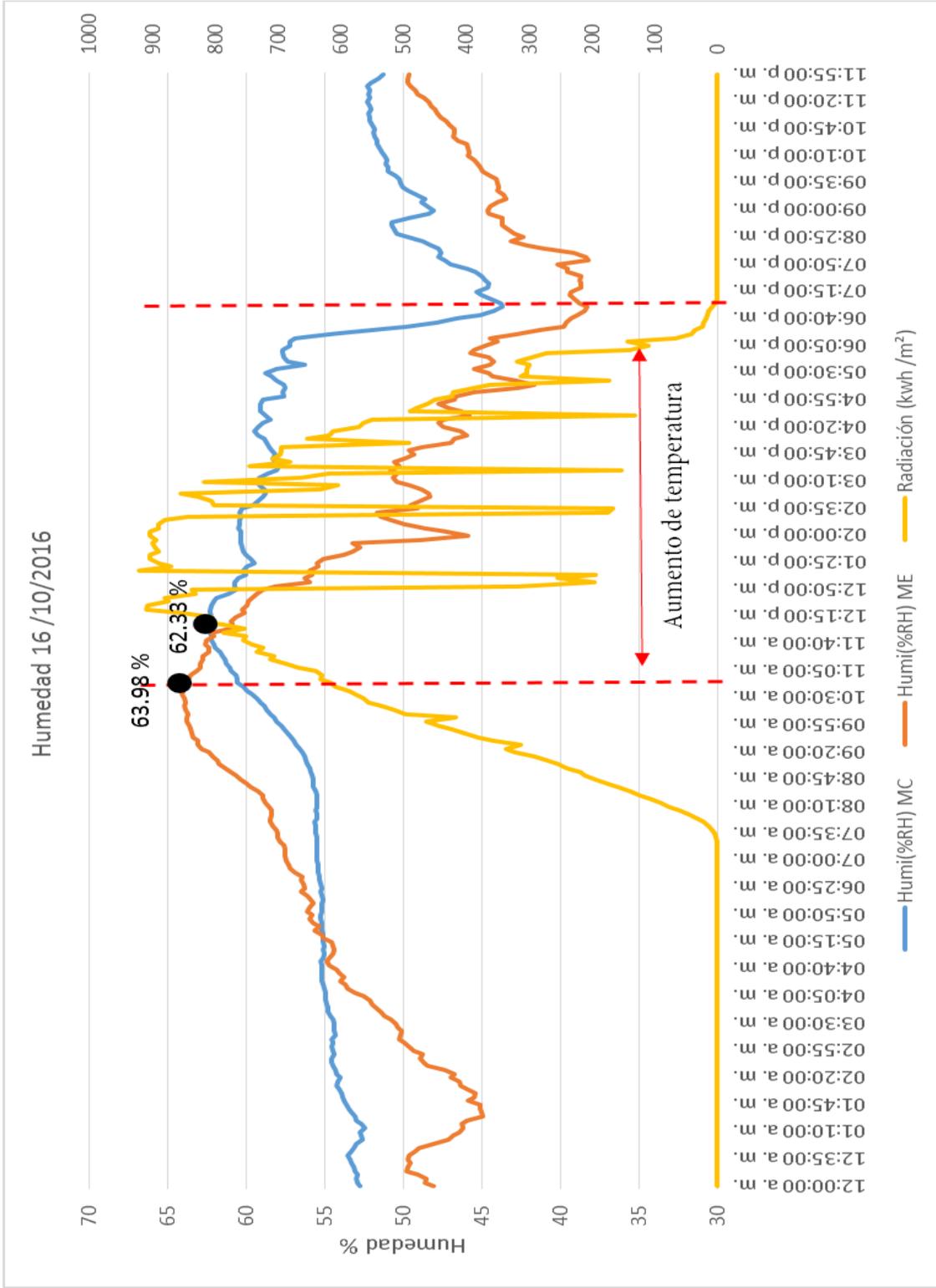
Esta diferencia del 6% es una respuesta a la variación de la envolvente del ME. El bloque de concreto al almacenar por más tiempo el calor interno del módulo este provocó que la

humedad descendiera un porcentaje del 24%.

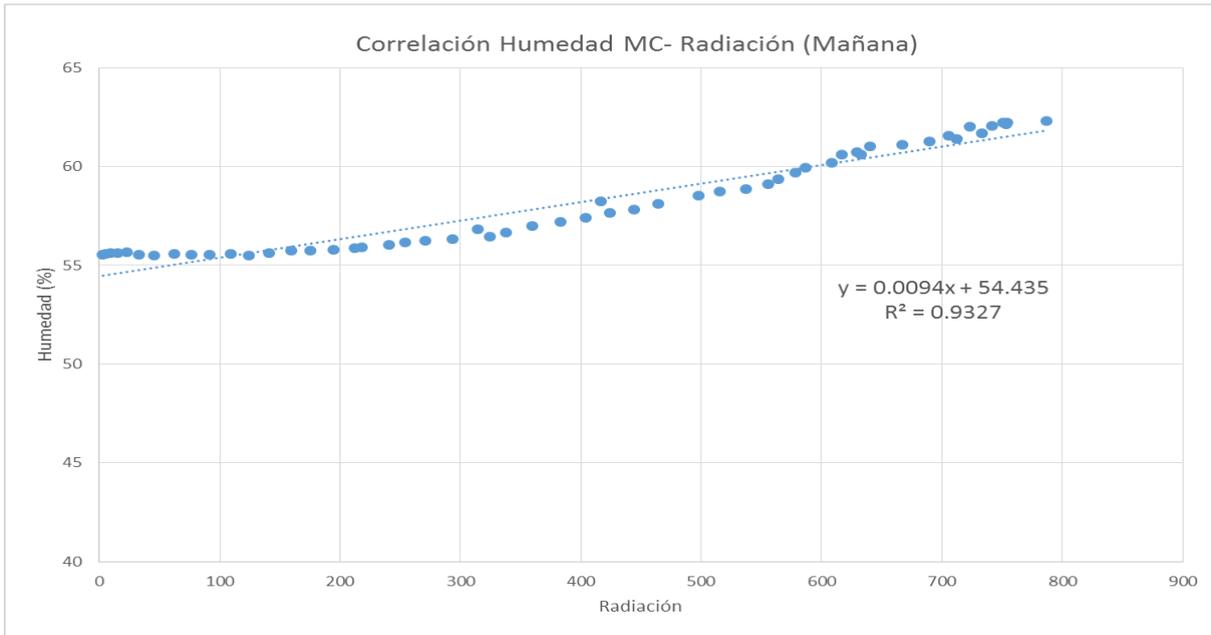
Asimismo al estar presente una tercera variable (masa térmica del concreto), la correlación de variables entre la humedad y la radiación entre ambos módulos se ve modificada.

El MC (gráficas 30 y 31) obtuvo un valor de $R_2 = 0.9327$ en la mañana pero en la tarde se obtuvo un valor de $R_2 = 0.4681$, logrando crear una desvinculación de la variable humedad y radiación solar conforme avanzaba el día.

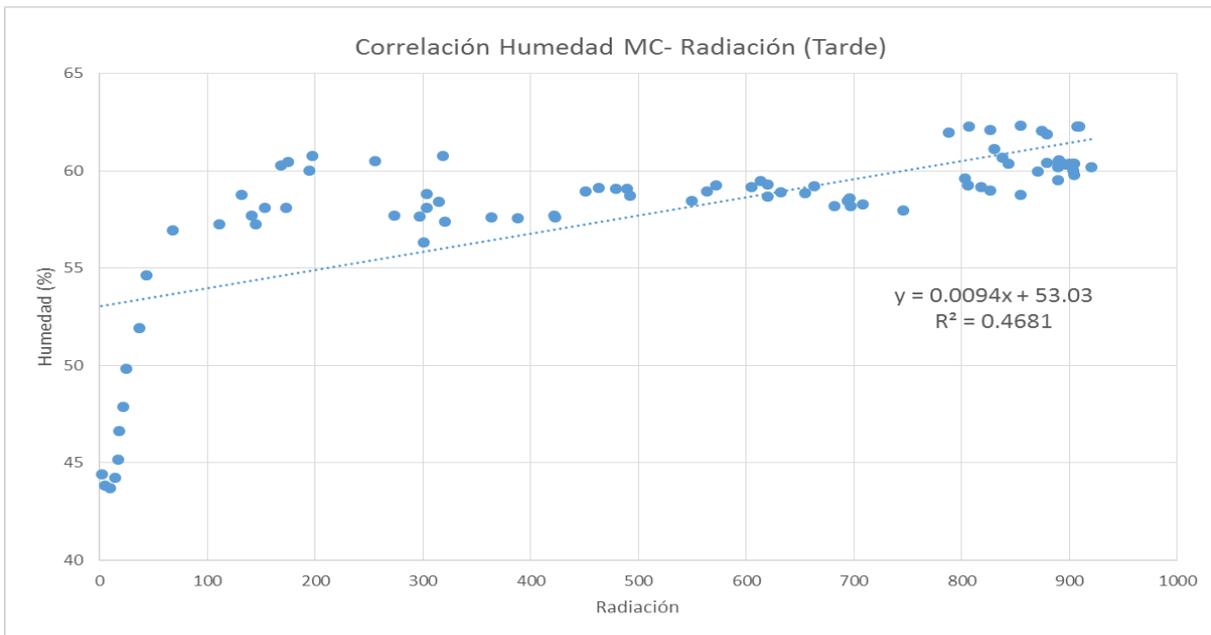
En relación a los valores del ME (gráficas 32 y 33), se obtuvo un resultado de $R_2 = 0.6393$ y en la tarde se obtuvo un valor $R_2 = 0.4656$, resultado muy similar al MC. Sin embargo debido a que su envolvente presenta otro elemento diferente al MC (bloque de concreto) se logró reducir la correlación de ambas variables.



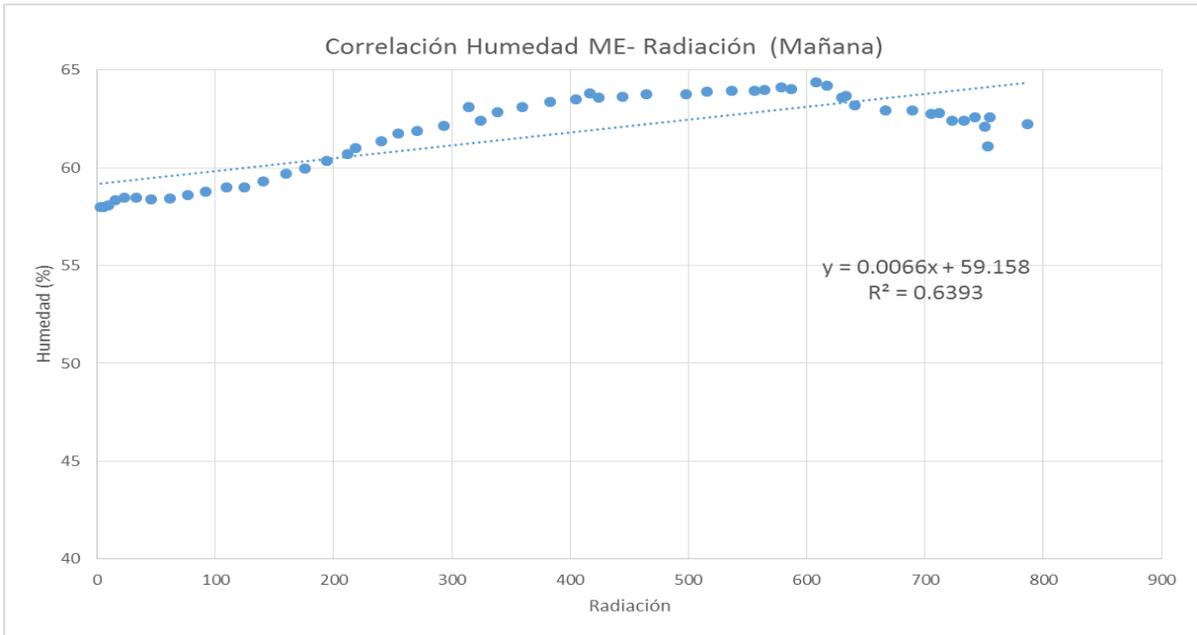
Gráfica 29 Comparación de la humedad del día 16 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia



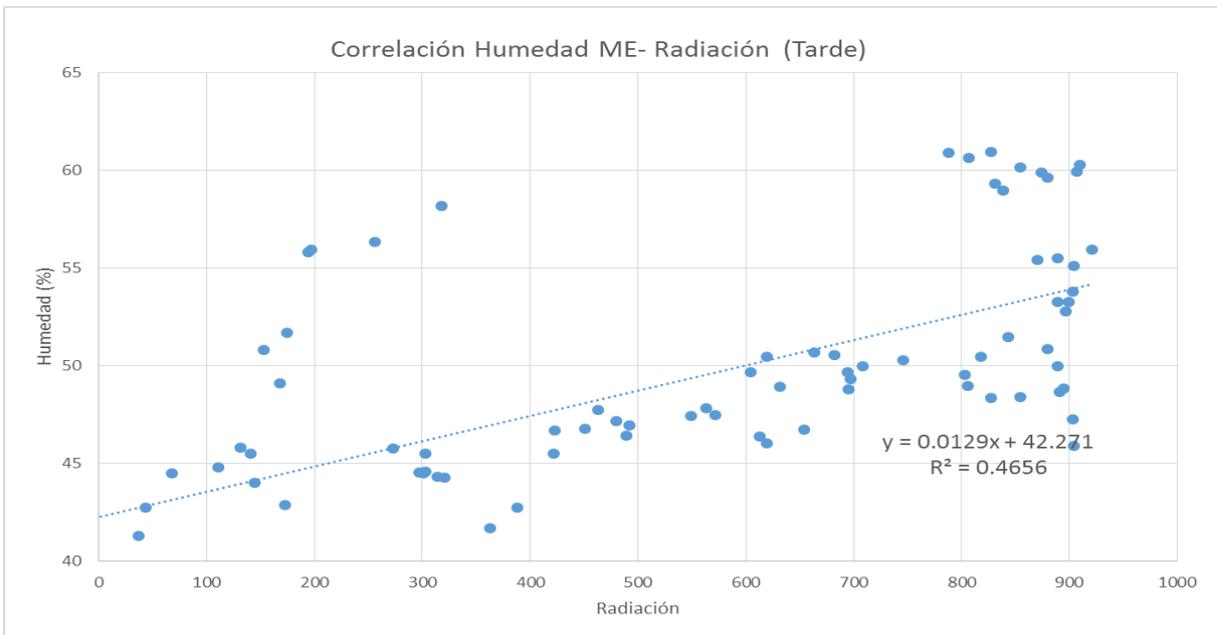
Gráfica 30 Correlación de Variables Hum. - Rad. del MC (Mañana).
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 31 Correlación de Variables Hum. - Rad. del MC (Tarde).
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 32 Correlación de Variables Hum. - Rad. del ME (Mañana).
Fuente: Elaboración propia



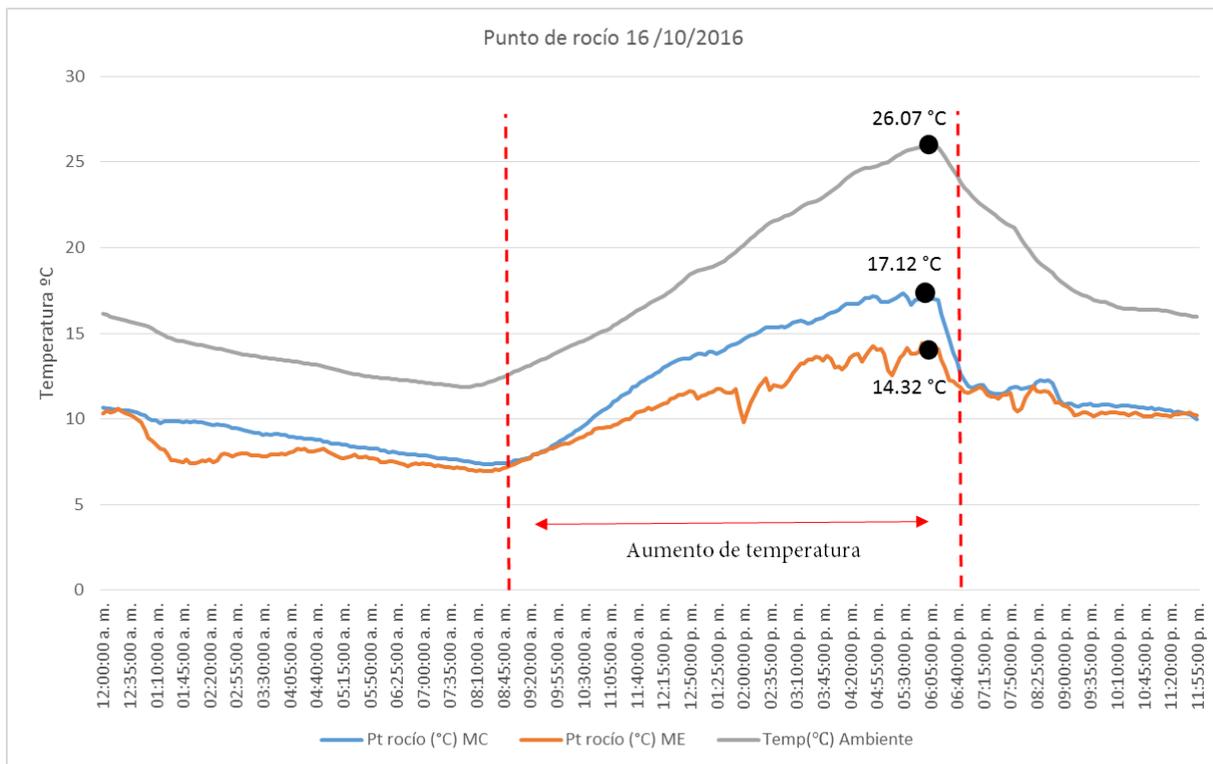
Gráfica 33 Correlación de Variables Hum. - Rad. del ME (Tarde).
Fuente: Elaboración propia

Por último, se realizó el análisis de la temperatura de punto de rocío con los módulos en la Ciudad de México.

En la gráfica 34 se presenta cuando la temperatura ambiente llega a su valor más alto (26.07 °C a las 5:30 p.m.), la TPR del modelo MC presenta un valor de 17.12 °C, en cambio la TPR del modelo ME llega a valores de 14.32 °C. La gráfica también demuestra que conforme aumentaba la temperatura exterior, los valores de TPR de ambos módulos descienden debido a la respuesta de la envolvente que los conforma.

Después de desarrollar el análisis del comportamiento térmico y de humedad de un día en que el sistema no se encontraba activo, se realizaron 5 días de prueba (entre los meses de octubre y noviembre del año 2016) donde la temperatura de agua se mantuvo entre 4 °C a 7 °C.

Esta temperatura se encontraba aproximadamente 7 °C grados debajo de la temperatura de punto de rocío. Se seleccionó el día 19 de octubre de 2016 debido a que presentaba resultados más completos y que podrán dar una mejor aportación a esta investigación.



Gráfica 34 Comparación de temperatura de punto de rocío del MC y ME del 16 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

19 de octubre de 2016

Se activó el sistema a la 1:50 p.m. y se finalizó a las 6:15 p.m. La duración de la prueba fue de aproximadamente cuatro horas. En comparación con las demás 4 pruebas, esta fue la que se logró experimentar en mayor tiempo ya que se mantuvo la temperatura del agua en bajos valores.

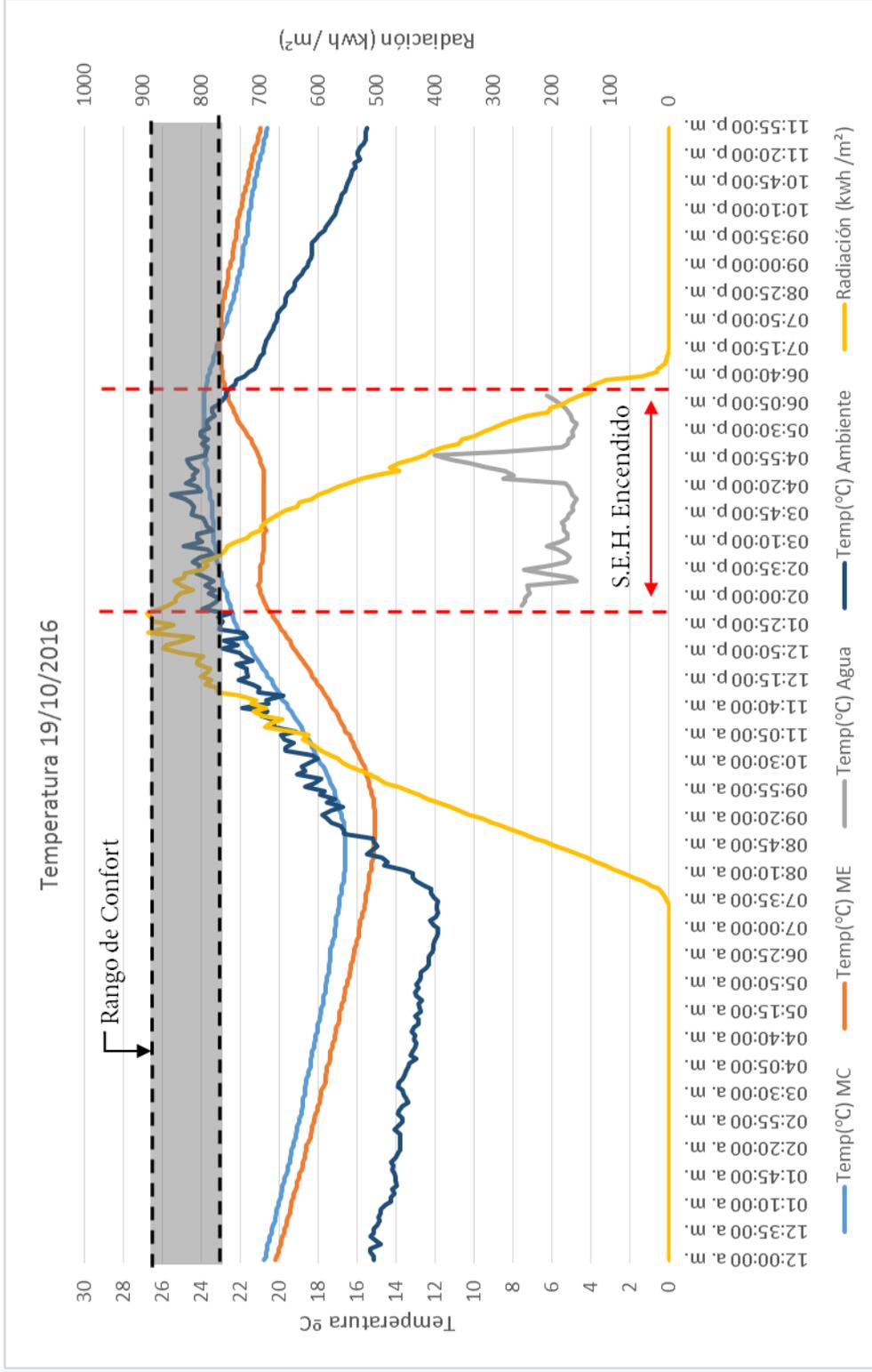
Esta prueba consumió el doble de hielo que las pruebas de temperatura donde se respetó el TPR, lo que permitió generar una mayor influencia en el comportamiento térmico y de humedad dentro del módulo ME.

En el grafico 35 se muestra el comportamiento de la temperatura del modelo MC y ME. Cuando se enciende el sistema a la 1:50 p.m. apreciamos que el ME empieza a reducir un poco la temperatura, la cual se mantiene casi constante, aproximadamente durante dos horas, sin embargo cuando la temperatura de agua llega a alcanzar una temperatura de 12°C la TI se incrementa aproximadamente 3°C .

Esta variación de temperatura se debe a la modificación de las condiciones de temperatura del agua y este afecto a la masa térmica del concreto, provocando una reacción en cadena a la TI del módulo ME.

También la gráfica muestra que el módulo MC logra estar en los rangos de confort sin la necesidad del sistema, en cambio el ME se encuentra 2.5°C por debajo de la línea de confort. No obstante, se observa que a las 6:40 p.m. sus valores empiezan a acercarse a los valores establecidos debido a que el bloque de concreto.

En cuanto al comportamiento de ambos módulos y la radiación, después de alcanzar su valor máximo, los módulos mantienen el calor en su interior, especialmente el MC, donde la transferencia de calor se mantuvo en los rangos de 23.5°C y 26.5°C . En cambio el ME, tuvo una interrupción debido al funcionamiento del S.E.H.

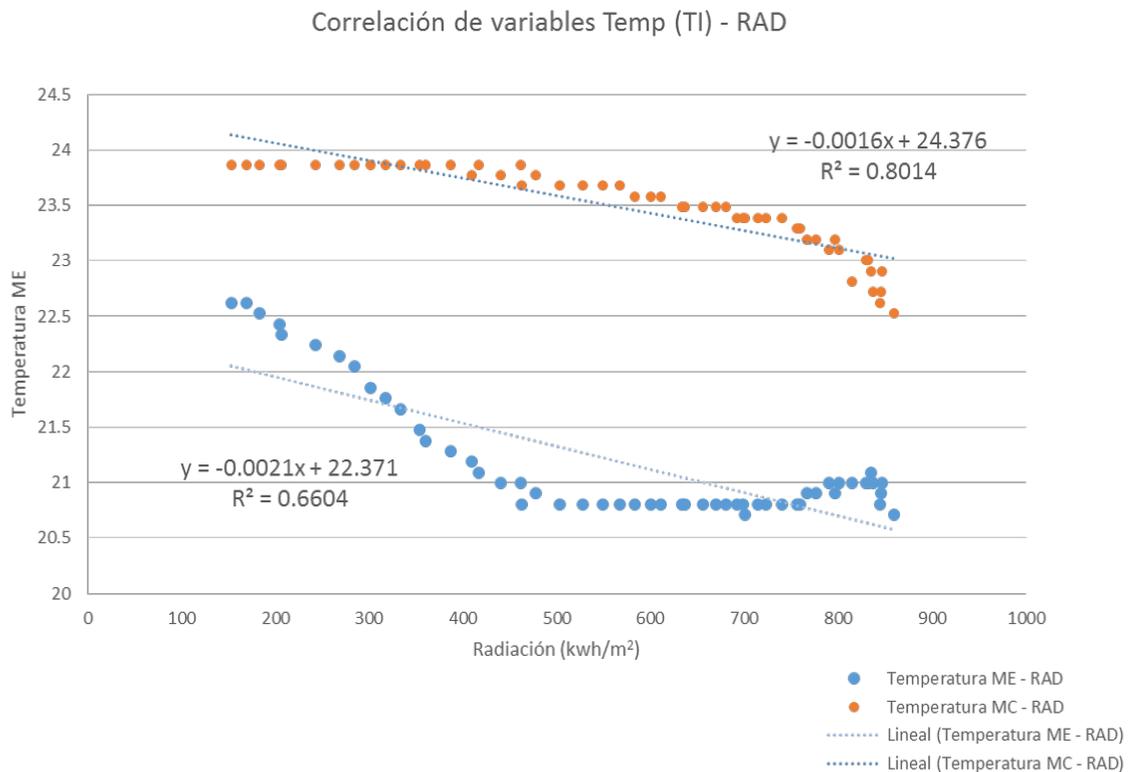


Gráfica 35 Comparación de la temperatura del día 19 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Esta afirmación se puede comprobar por las gráficas de correlación de variables. En la gráfica 36, se muestra que el comportamiento del MC en el tiempo de prueba y se aprecia su respuesta ante el comportamiento de la radiación. Su valor $R^2 = 0.8014$ fue un valor mucho mayor que el análisis desarrollado el 16 de octubre de 2016.

Si comparamos este valor con los resultados de la correlación de temperatura

del ME que muestra el gráfico, podemos ver que su resultado es menor al MC, donde se obtuvo un valor $R^2 = 0.6604$. Esto se debe a que las condiciones del espacio ME están modificadas por dos variables que no cuenta el MC. La primera es que presenta un bloque de concreto, donde su masa térmica reacciona de manera distinta a la cubierta del MC. Segundo, la temperatura del agua ayuda a romper la vinculación de estas variables, logrando comprobar que el



Gráfica 36 Comparación de correlación de variables TI del MC y ME y radiación del 19 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

sistema de enfriamiento sí interfiere en el comportamiento térmico del espacio.

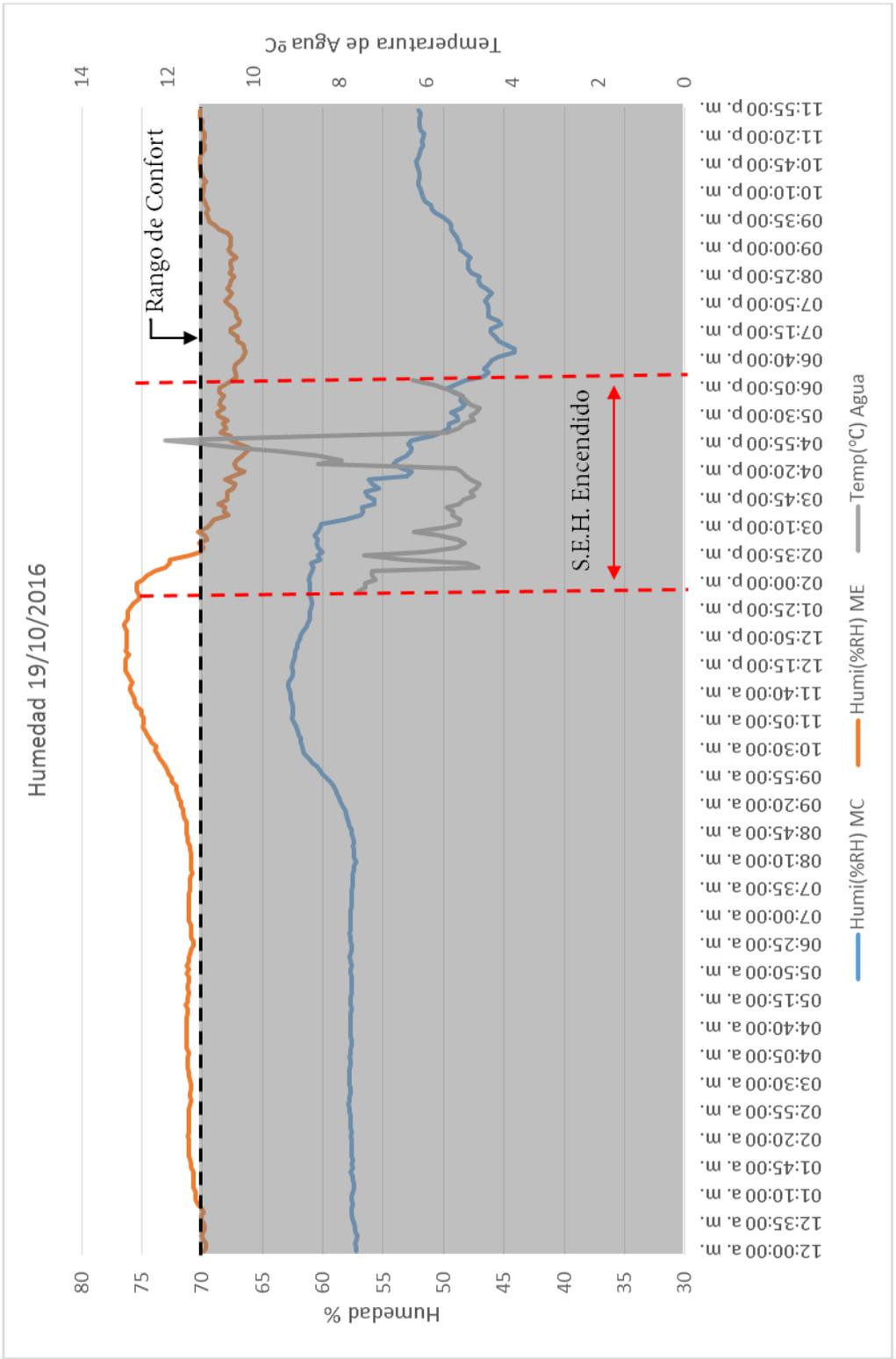
Con respecto a la humedad interna, en la gráfica 37 se muestra que antes de iniciar el experimento, el módulo MC presentaba valores mucho menores al módulo ME, ambos módulos presentan una diferencia de aproximadamente de 13 a 15%, donde esta diferencia se aprecia más a las 6:40 p.m. Después de que el módulo ME absorbió gran porcentaje de HI debido a la condensación del sistema. Se puede observar que la diferencia entre ambos módulos llegó a superar el 20%.

Este resultado reafirma lo sucedido en las pruebas de San José, Costa Rica. Si no se respetan los parámetros de funcionalidad del sistema, este podrá provocar consecuencias en la HI del espacio y puede reducir la efectividad del sistema y además puede provocar daños al edificio.

Comparando los resultados de la humedad y de la temperatura, el S.E.H. después de su activación se logra entrar al rango de confort; sin embargo, estos valores se encuentran al límite y donde se debe tener cuidado de manejar valores medios como el 50% para no alterar las condiciones de humedad en el interior de un edificio.

Si relacionamos la tendencia de la HI tanto en ambos módulos, se puede apreciar que la reducción de esta también es una respuesta a la transferencia de calor que se produjo.

Después de la absorción de calor de ambos modelos la humedad interna de cada uno empezó a reducirse entre 10 a un 15%. Lo cual nos deja claro que es fundamental manipular esta influencia de calor para mantener los valores de confort estable y fortalecer la funcionalidad del S.E.H.

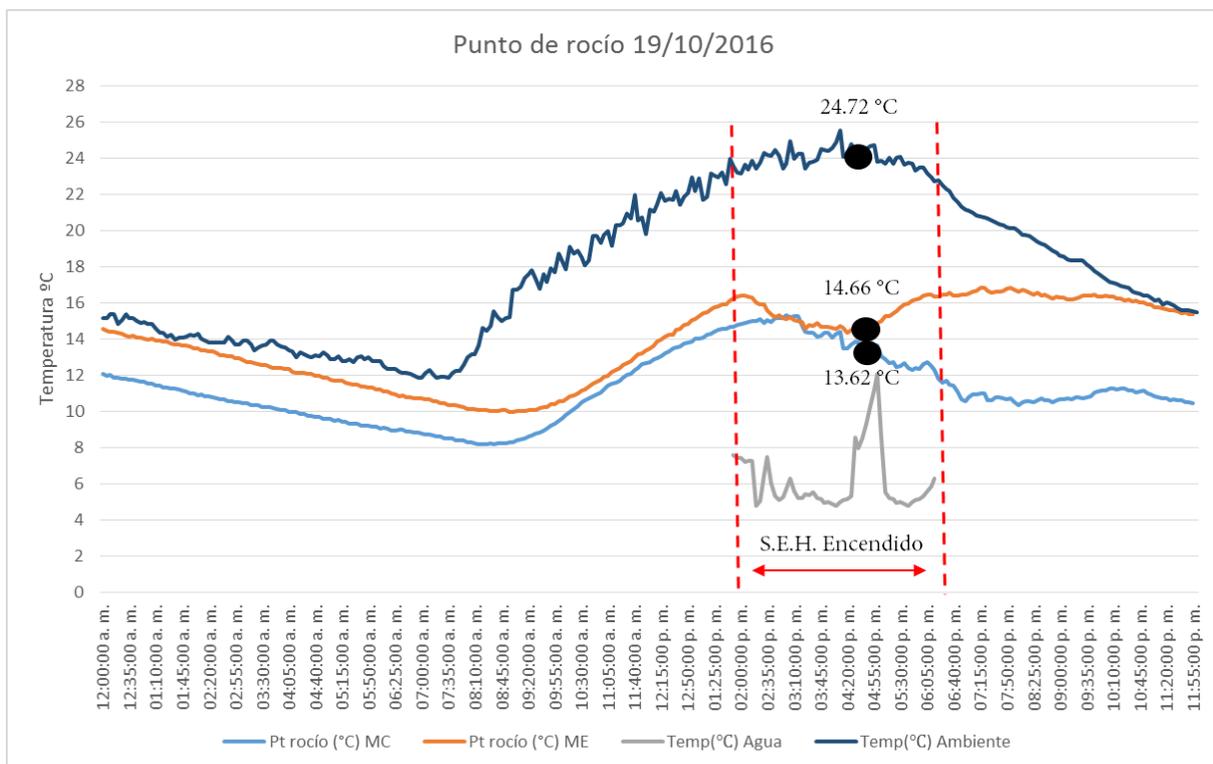


Gráfica 37 Comparación de la humedad MC y ME del 19 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en relación al comportamiento de la temperatura de punto de rocío, en la gráfica 38 se muestra que cuando la temperatura ambiente alcanza su valor máximo 24.72°C a las 4:20 p.m., ambos módulos presentan temperaturas constantes debido al aislamiento de sus espacios. El MC presenta un valor de 13.62°C y el ME presenta 14.66°C a la misma hora.

Sin embargo se observa que después de la alteración de la temperatura de agua, el comportamiento de la TPR del ME se ve modificada provocando un aumento de aproximadamente 2°C .

Adicional al análisis de las mediciones se tomaron fotografías térmicas de los módulos de control y experimentación. (véase figura 39)



Gráfica 38 Comparación de temperatura de punto de rocío del MC y ME del 19 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

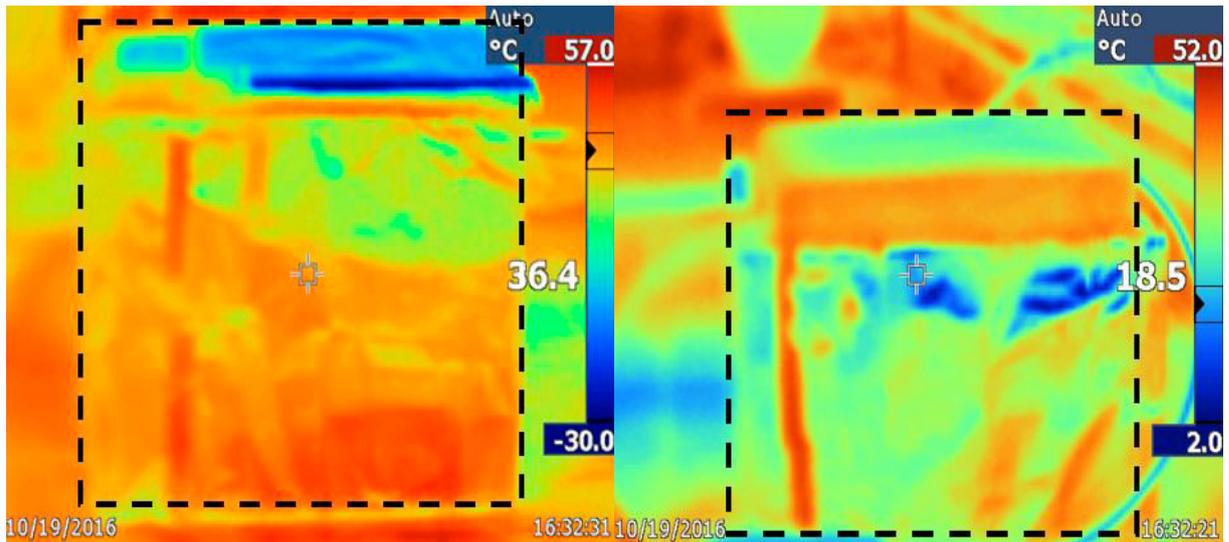


Figura 39 Fotografías térmicas exteriores del MC (izquierda) y ME (derecha) del día 19 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

En el primer módulo apreciamos cómo se conserva el calor interior debido a la envolvente. La temperatura de superficie que se presenta en algunos puntos de este módulo pueden alcanzar los 36.4 °C, y entonces relacionando este valor con la temperatura que registraron los HOBO's de un promedio de 20.39 °C.

Por lo tanto, se comprueba la importancia de los materiales que presenten una alta masa térmica para permitir que sistemas de enfriamiento como el hidrónico puedan ser mecanismos auxiliares para el confort térmico.

Al mismo tiempo, el ME presenta un registro de temperatura inferior al MC. En la imagen se muestra que algunas r

partes de su superficie pueden alcanzar temperaturas de 18.5 °C. También se puede observar el flujo del agua fría que va dirigida en el bloque de concreto, donde se aprecia una disminución de temperatura en medio del bloque.

Asimismo las fotografías térmicas nos demuestran que a las 4:32 p.m. ambos bloques de concreto presentan una diferencia de temperatura en sus superficies externas de 4°C, por lo cual el sistema de enfriamiento hidrónico influye en el comportamiento interior del ME y presenta una relación con el comportamiento térmico de la envolvente.

13 de diciembre de 2016

Después de desarrollar experimentos con temperatura de agua menor a la temperatura de punto de rocío, se realizaron cuatro días de prueba manteniendo la temperatura de agua mayor a 1° o 2°C respetando los estándares establecidos con el fin de obtener un buen funcionamiento del sistema de enfriamiento hidrónico.

Se seleccionó la prueba del día 13 de diciembre de 2016 debido a que los resultados en comparación con otras fechas fueron más completos. Es necesario mencionar que esta prueba presentó las mismas alteraciones en la temperatura del agua debido a que se enfrió con hielo, lo cual dificultó mantener una temperatura constante. A pesar de presentar esta dificultad en las pruebas se logró obtener resultados relevantes que aportan a la presente investigación.

También en esta medición se obtuvieron los valores térmicos del bloque de concreto. Los resultados obtenidos permitieron analizar el comportamiento total del sistema, ya que se analizó el comportamiento del espacio y de la superficie que contiene el S.E.H.

Se activó el sistema a la 1:20 p.m. y se finalizó a las 3:05 p.m. con una temperatura de punto de rocío inicial de $13,55^{\circ}\text{C}$ y una temperatura inicial de agua a $18,24^{\circ}\text{C}$.

La gráfica 39 muestra el comportamiento de temperatura de ambos módulos, la temperatura del concreto (TC), la del agua (TA), la exterior (TE) y la radiación.

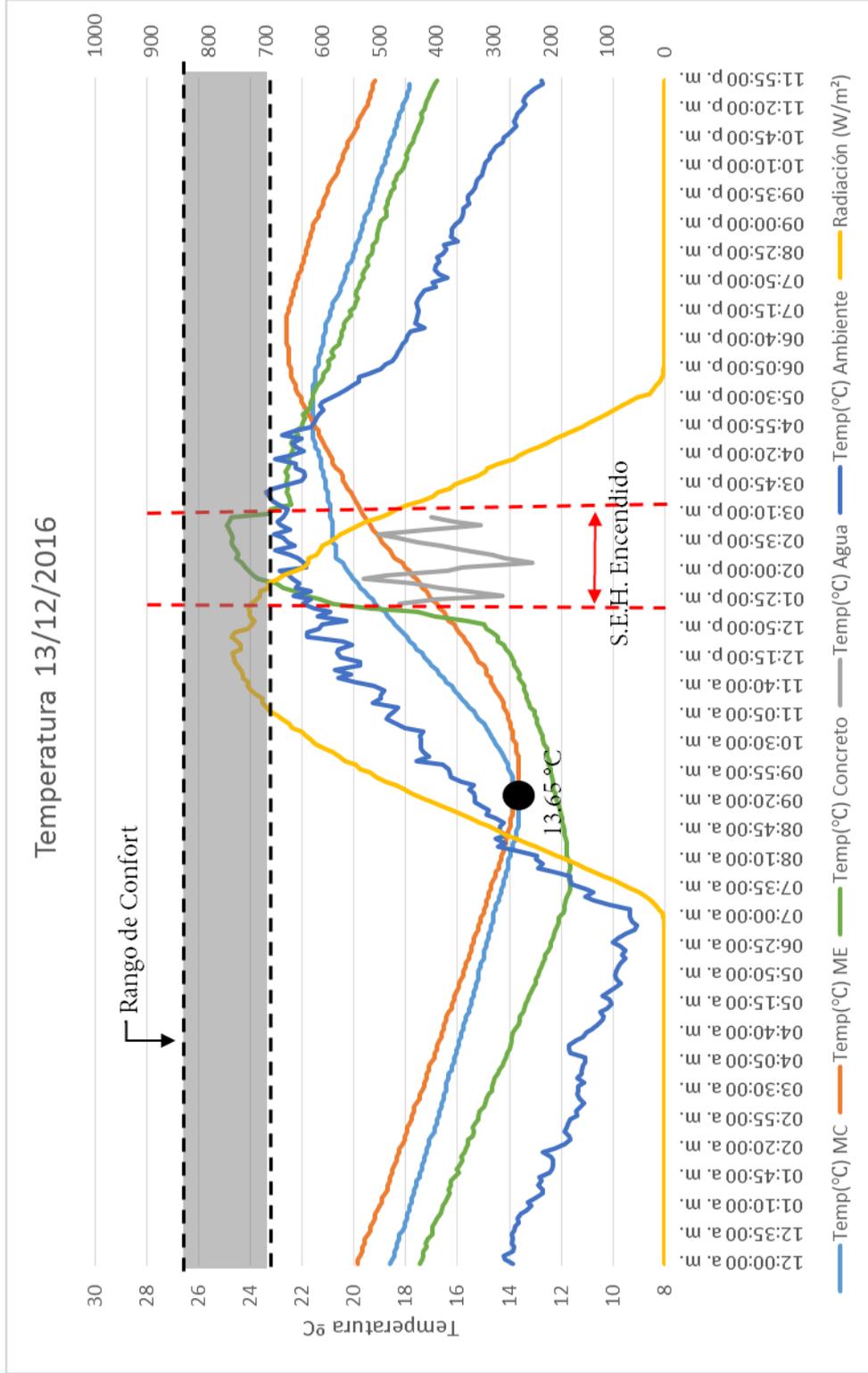
Antes de la activación del S.E.H. la temperatura de ambos módulos se mantuvo bastante baja hasta llegar a temperaturas de $13,65^{\circ}\text{C}$ (1:20 p.m). Después de obtener una ganancia de calor producto de la radiación, apreciamos que los módulos empiezan a incrementar su TI.

En el momento que se activa el sistema, el ME tarda en reaccionar para empezar a disminuir la TI de su módulo. Pasaron alrededor de cinco horas (hasta las 7:15 p.m.) para que se diera un cambio de temperatura considerable.

Esta reacción fue lenta debido a que la temperatura del agua no provocaba un intercambio de calor rápido en comparación con el experimento del día 19 de octubre.

Incluso se puede apreciar que el bloque de concreto en su superficie absorbió una gran ganancia de calor debido a la radiación. Esto provocó una reacción lenta del S.E.H y alteró el intercambio de calor en el interior del módulo.

Con relación a la temperatura exterior, ambos módulos se mantuvieron entre 2°C y 4°C de diferencia. Esta diferencia se aprecia mejor entre el comportamiento de la temperatura interna del ME y la



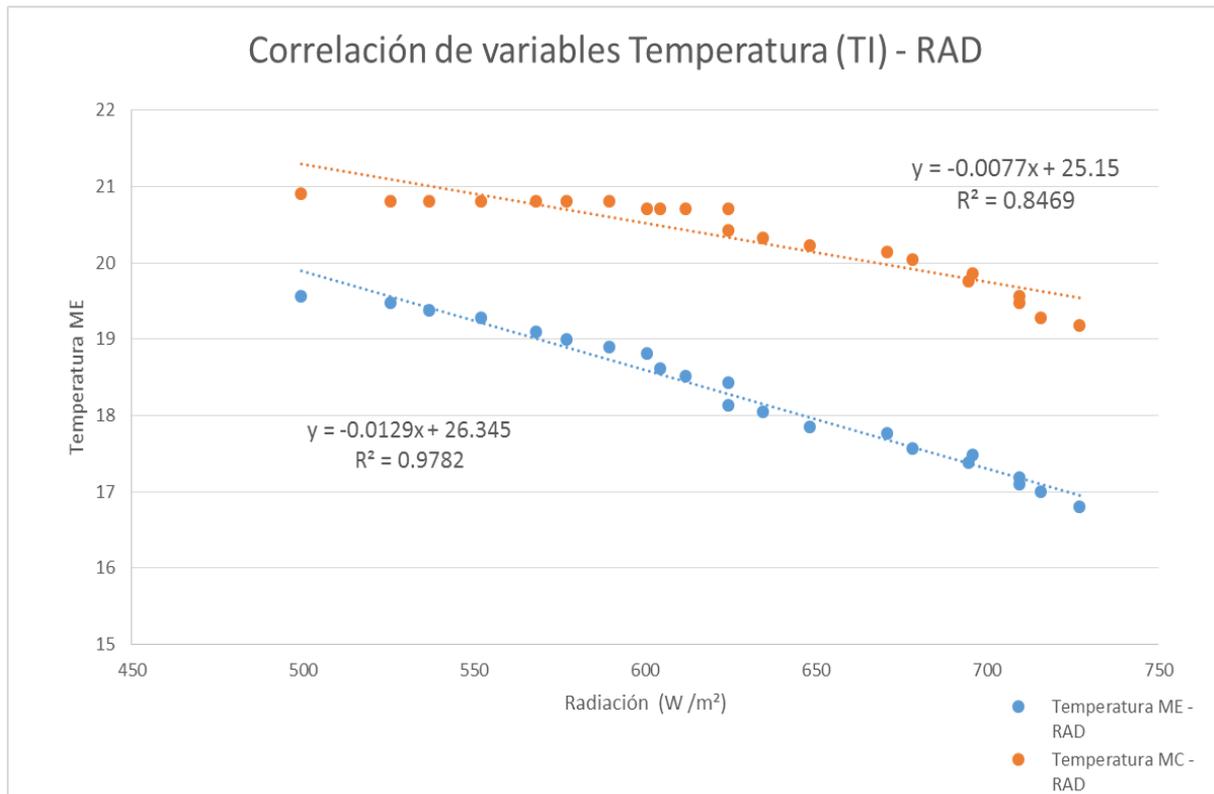
Gráfica 39 Comparación de la temperatura MC y ME del 13 de diciembre de 2016. Fuente: Elaboración propia

TE después de la activación del sistema.

Esto lo podemos comprobar en la gráfica 40 donde se aprecia una notoria correlación entre ambas variables, lo cual provocó un lento intercambio de calor en el interior del módulo ME y el S.E.H.

Al presentarse esta dependencia, la temperatura del agua no genera ningún efecto de absorción hasta después de que el bloque de concreto logre disminuir su temperatura interna. Debido a esta interferencia, la correlación

entre la temperatura del concreto TC y la de TI del modelo ME es mayor. La gráfica 40 muestra que el agua no influye precisamente en su comportamiento por lo cual crea una dependencia entre estas dos temperaturas ya que su valor es de $R^2 = 0.9782$, un valor alto de dependencia entre las dos variables.

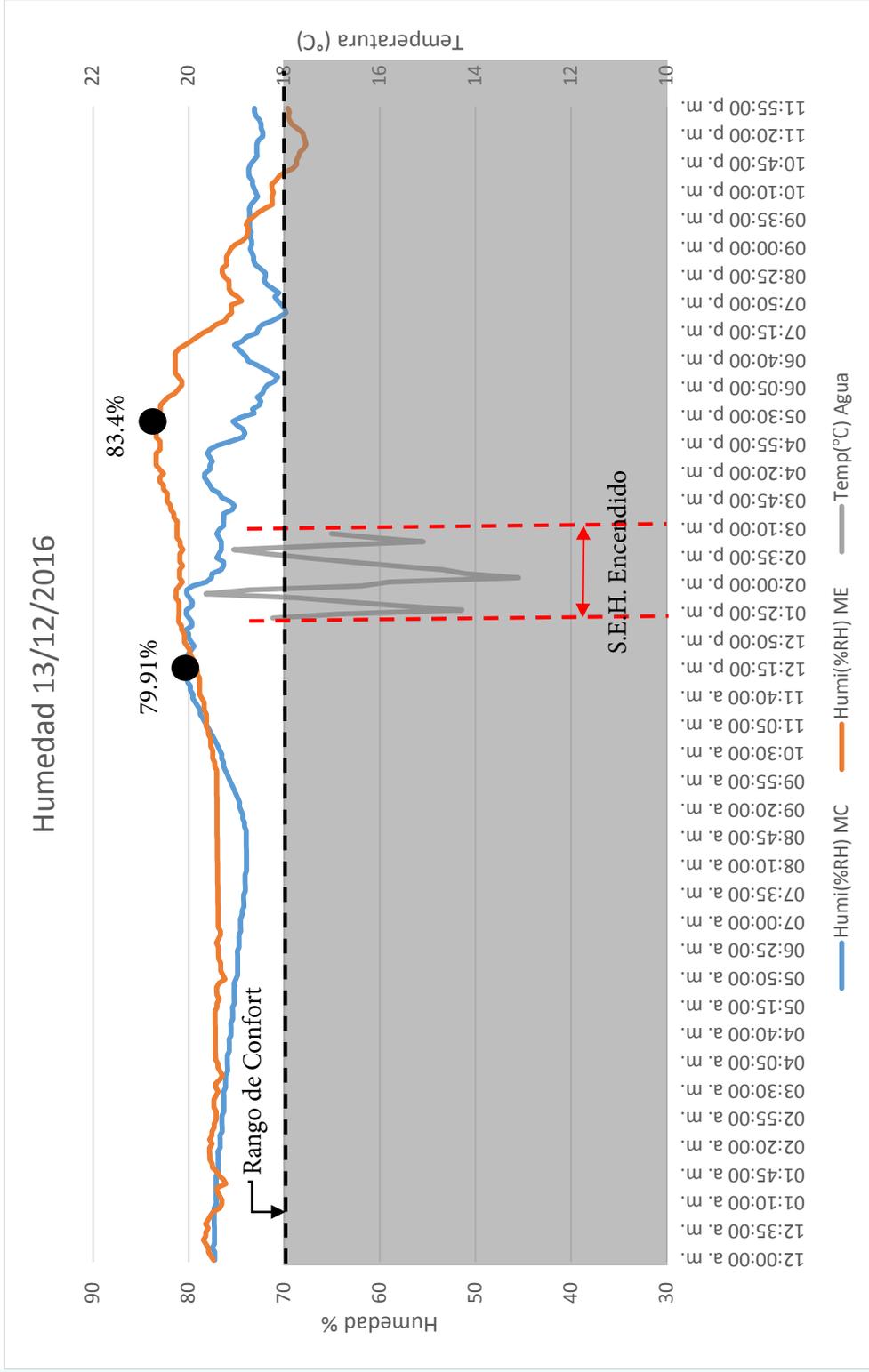


Gráfica 40 Comparación de correlación de variables TI del MC y ME y radiación del 13 de diciembre de 2016. Fuente: Elaboración propia

En relación a la humedad interna, tanto el MC y el ME alcanzaron valores altos. La humedad en el MC llegó hasta el 79.91 % (12:15 p.m.), una hora antes de iniciar el experimento, en cambio el ME llegó hasta el 83.4% a las 5:30 p.m., una hora y media después de finalizar el experimento.

Cuando el sistema se enciende a la 1:25 p.m., luego la HI presenta ligeras alteraciones en el ME (gráfica 41). Debido a la humedad almacenada que presentaba el módulo, el enfriamiento del concreto provocó el aumento de un 4% en un período de dos horas de funcionamiento (entre 1:20 p.m. hasta las 3:05 p.m.).

Los resultados reflejan la importancia de considerar un sistema de deshumidificación como mecanismo auxiliar al S.E.H. para lograr obtener conclusiones que responda a los estándares de confort en un espacio.



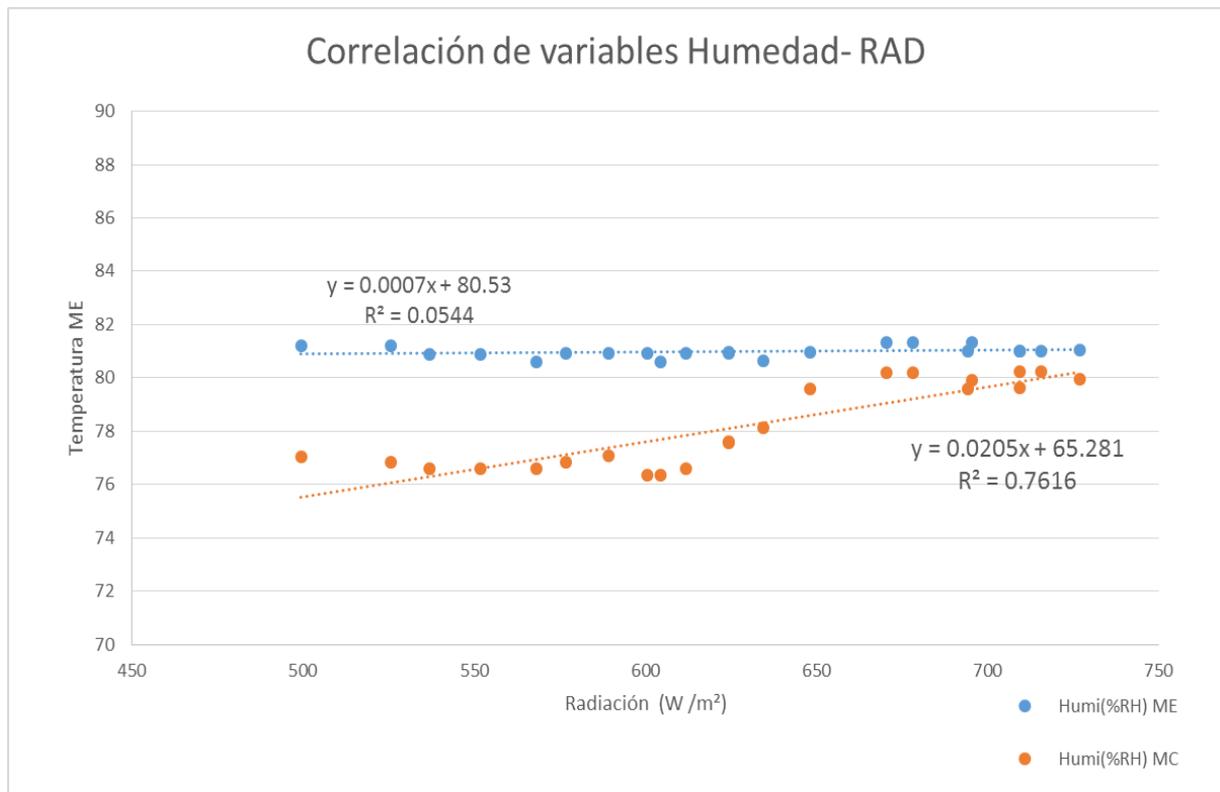
Gráfica 41 Comparación de humedad del día 13 de diciembre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Se analizó la correlación de variables entre la HI y la radiación entre ambos módulos. El ME presenta una relación bastante baja con un valor de $R^2=0.0544$, donde prácticamente no existe ninguna relación entre ambas variables.

En cambio el MC, sí presentó una mayor relación de aproximadamente $R^2=0.7616$, lo cual fue el reflejo de la

interacción entre la envolvente y la radiación, lo cual generó esta dependencia entre las variables.

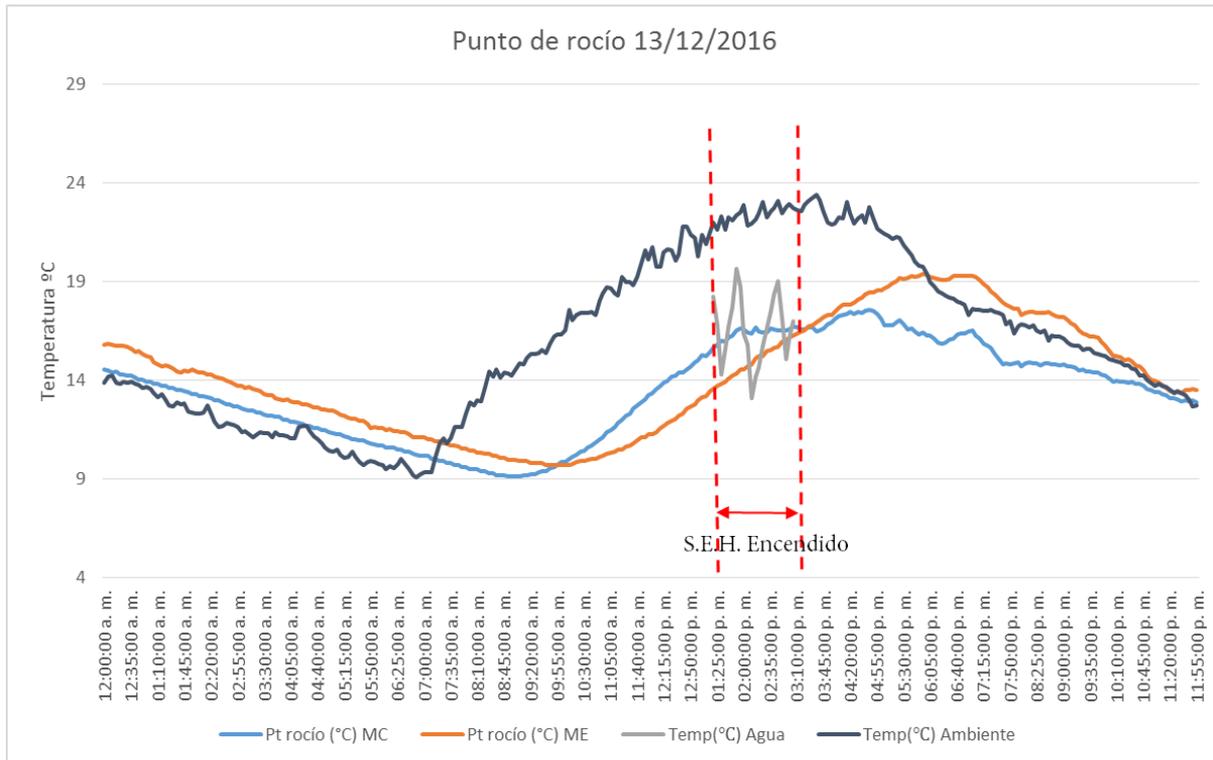
En la gráfica 42 se observa que tanto el modelo MC como ME presentan distintas correlaciones ante estas dos variables.



Gráfica 42 Comparación de correlación de variables Hum. del MC y ME y radiación del 13 de diciembre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Por último, el comportamiento de la temperatura de punto de rocío se refleja en la gráfica 43. En comparación de los otros experimentos desarrollados se puede apreciar que en el momento donde se encendió el S.E.H. la TPR del modelo ME se logró mantener casi constante.

Su TPR fue de aproximadamente de 13.74°C con ligeras variaciones. Esto quiere decir que si se mantiene la temperatura del agua por encima de la TPR del espacio se puede poner en funcionamiento el sistema sin provocar condensación.



Gráfica 43 Comparación de temperatura de punto de rocío del MC y ME del 13 de diciembre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el experimento del 19 de octubre, se realizó una sesión fotográfica térmica entre los módulos y adicionalmente. Se tomó la fotografía de un bloque de concreto que no presenta ningún sistema de enfriamiento en su interior para una mejor comparación. En la figura 38 se aprecia el distinto comportamiento térmico de cada objeto fotografiado.

El modelo MC presenta temperaturas mayores a los 30°C en su superficie, comparando estos valores con la temperatura interna de este, queda claro la eficacia de la envolvente para no transferir el calor externo al interior del espacio.

En cuanto al modelo ME, se presenta temperatura de mayor variedad. Podemos apreciar que en la parte inferior del módulo encontramos temperaturas de aproximadamente 16°C y también una temperatura muy baja en la parte inferior del bloque de concreto.

Si comparamos esta fotografía con el bloque de concreto que no presenta el S.E.H. podemos apreciar que efectivamente el agua provocó una pequeña alteración en la temperatura del bloque de concreto del ME.

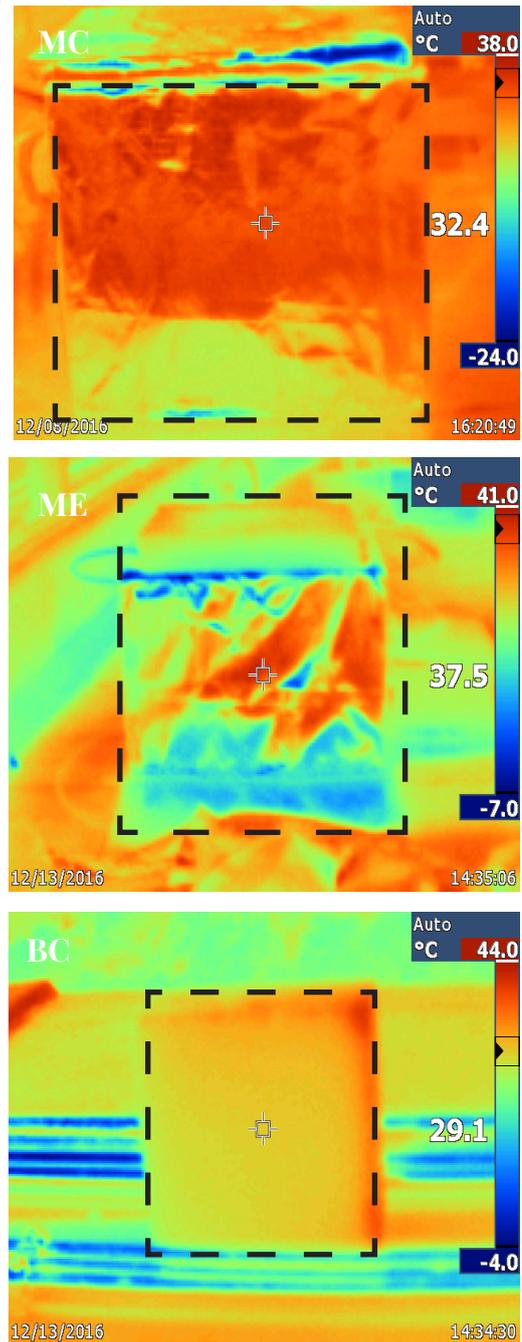


Figura 40 Fotografías térmicas del módulo MC, ME y de bloque de concreto sin S.E.H. del día 13 de diciembre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Comparación de resultados

En la tabla 10 se presenta una comparación entre las mediciones realizadas el día 29 de julio, 16 y 19 de octubre y 13 de diciembre de 2016 y la medición realizada el día 13 de enero del 2017, con el fin de analizar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios tanto en condiciones climáticas Aw como Bwh.

Se realiza un resumen en porcentaje sobre la efectividad de cada módulo en las diferentes fases del experimento. Es importante aclarar que si los valores presentan un valor positivo en la celda de efectividad indica que el módulo MC presentó un mejor comportamiento con respecto al ME. Si los valores son negativos, entonces quiere los resultados del ME fueron mejores en comparación con el MC.

Empezamos comparando la efectividad del S.E.H. en los dos escenarios de prueba bajo las condiciones climáticas Bwh (San José, Costa Rica). Desde el aspecto térmico, mantener la temperatura por debajo de la temperatura de punto de rocío provocó un mejor rendimiento en el módulo ME con una efectividad del 0.33%; sin embargo, en cuestiones de humedad, el MC presentó una efectividad del 286.88%, es decir debido a que el sistema provocó condensación en el interior del bloque, esta afectó de manera considerable los valores de humedad en

el interior del módulo ME.

En cambio, si se mantiene la temperatura del agua por arriba de la temperatura de rocío, el módulo MC presentó una efectividad del 101.33% con respecto al módulo ME. Como podemos observar en la tabla, el MC no presentó un gran aumento de temperatura con respecto al módulo ME.

Sin embargo, en el comportamiento de humedad, el modelo ME presentó un mejor rendimiento que el MC, la humedad se redujo un 21.75% con respecto a la humedad registrada en el módulo MC. A pesar de presentar valores bastante altos, desde el punto de vista de reducción de humedad, el módulo experimental presentó un mejor comportamiento.

En cuanto al comportamiento del sistema en un zona climatológico Aw (Ciudad de México, México), si analizamos el comportamiento de la envolvente de ambos módulos podemos apreciar que tanto el comportamiento térmico como de humedad favorecen al módulo ME.

Su efectividad se debió a que en comparación con la envolvente de MC, el ME tiene un bloque de concreto que provocó el equilibrio térmico en su interior y al mismo tiempo evitó el aumento de la humedad en el interior del ME.

	COSTA RICA						MÉXICO					
	29/07/2016		14/01/2017.		16/10/2016.		19/10/2016.		13/12/2016.			
	ME	MC	ME	MC	ME	MC	ME	MC	ME	MC	ME	MC
TEMPERATURA (°C)												
Mínimo	22.9	21.4	14.61	14.31	14.61	14.31	16.61	15.09	13.65	13.65		
Máximo	24.9	24.6	24.15	22.53	24.15	22.53	23.86	23.1	21.56	22.62		
Promedio	24.029	24.1	18.18	17.64	18.18	17.64	20.39	19.23	17.82	18.13		
Inicial	23.7	21.4	20.04	18.24	NA	NA	22.52	20.71	19.18	20.9		
Final	24.8	22.39	21.95	21.74	NA	NA	23.86	22.62	16.8	19.56		
Diferencia	1.1	0.99	1.91	3.5	NA	NA	1.34	1.91	-2.38	-1.34		
Porcentaje de comportamiento	4.64%	4.63%	9.53%	19.19%	-24.72%	-21.70%	5.95%	9.22%	-12.41%	-6.41%		
Efectividad (- ME , +MC)	-0.33%		101.33%		-12.20%		54.99%		-48.33%			
HUMEDAD (%)												
Mínimo	64.8	66.8	67.74	85.19	43.71	38.26	44.1	66.04	69.81	67.71		
Máximo	74.4	81	77.74	96.28	62.33	64.37	62.86	46.47	80.39	83.81		
Promedio	70.4	75.85	71.89	91.08	55.26	51.36	55.83	70.79	75.54	77.62		
Inicial	74.4	73.5	77.64	95.77	NA	NA	61.06	75.45	79.95	81.03		
Final	71.8	78.3	72.04	87.36	NA	NA	48	67.53	77.06	81.22		
Diferencia	-2.6	4.8	-5.6	-8.41			-13.06	-7.92	-2.89	0.19		
Porcentaje de comportamiento	-3.49%	6.53%	-7.21%	-8.78%	-11.34%	-20.21%	-21.39%	-10.50%	-3.61%	0.23%		
Efectividad (- ME , +MC)	286.88%		-21.75%		-78.19%		50.92%		106.49%			
TIEMPO	6.1 horas	6.1 horas	5.5 horas	5.5 horas	24 horas	24 horas	4.4 horas	4.4 horas	1.7 horas	1.7 horas		
VALOR R2 TEMP - RAD	NA	NA	0.68	0.55	0.0536	0.0006	0.814	0.6604	0.8469	0.9782		
VALOR R2 HUMD - RAD	NA	NA	0.35	0.0026	0.5848	0.1555	0.0196	0.1393	0.4542	0.1588		

Tabla 10. Comparación de resultados de la segunda fase de experimentación. Fuente: Elaboración propia

Al igual que en Costa Rica, se realizaron pruebas bajo los dos escenarios de temperatura de agua. Cuando la temperatura de agua estuvo por debajo de la temperatura de punto de rocío, el módulo MC presentó una mejor eficiencia que el ME. La temperatura en su interior incrementó solamente un 5.95% con respecto al incremento del 9.22% del ME. Entonces su efectividad fue de un 54.99% en comparación con el ME.

El mismo caso sucede en el comportamiento de la humedad, el modelo MC logró reducir un 21.39% su porcentaje de humedad con respecto al 10.50% del ME. En otras palabras, el módulo MC logró tener una efectividad del 50.92% con respecto al otro módulo. La condensación y la poca transferencia de calor en el ME generó este comportamiento.

En el escenario donde la temperatura de agua es mayor a la temperatura de punto de rocío, el módulo ME presenta una mejor efectividad con respecto al módulo MC ya que presenta un valor del 48.33%, lo cual afirma que el sistema de enfriamiento hidrónico debe respetar este parámetro para potencializar su comportamiento térmico.

No obstante, en relación a la humedad, el módulo MC presenta un mejor rendimiento ya que logró reducir un 3.61% la humedad en su interior, en comparación con el 0.23% que logró el módulo ME.

Es importante mencionar que estos valores podrían variar si en todos los escenarios de prueba se hubieran desarrollado en el mismo lapso de tiempo, sin embargo, debido a la dificultad de material y equipo no se logró realizar las mismas horas en todos los escenarios.

Comparando los resultados de los experimentos San José – Ciudad de México se puede apreciar que desde el punto visto térmico, el sistema de enfriamiento hidrónico presentó un mejor comportamiento en la Ciudad de México.

En relación a la humedad, el sistema presenta una mayor efectividad en la ciudad de San José. Este resultado lo podemos vincular al hecho de que San José presenta una mayor radiación que provoca que la humedad se mantenga controlada. Es fundamental mencionar que el sistema en conjunto con la envolvente haya provocado una influencia en el comportamiento de la humedad en el interior del espacio, lo cual es acotar que los mayores valores de humedad se presentaron en este escenario.

5.3 Simulación

La última etapa de experimentos consistió en el desarrollo de diversas simulaciones. Como se mencionó anteriormente, por cuestiones de tiempo y accesibilidad se escogió el programa LoopCad 2016 para el desarrollo de esta etapa experimental.

Se levantó el edificio analizado en el programa, y posteriormente se introdujeron los datos climáticos de la ciudad de San José y la Ciudad de México. Como se explicó en el capítulo pasado, se realizó el análisis en ambas zonas climáticas para tener una comparación en cuestiones de funcionamiento y consumo energético.

También es necesario mencionar que estos resultados fueron analizados a partir de los estándares del Manual MJO. Este manual viene incluido en el programa, y aunque su análisis se basa principalmente en edificaciones de vivienda, sus resultados brindan datos que pueden aportar información relevante a esta investigación

A partir de los resultados obtenidos en la primera etapa de experimentación, se determinó que el área del comedor es a mayor escala el que presenta grandes problemas térmicos y de humedad con respecto a los otros espacios analizados. Después de esta área, le continúa la sala de reuniones y

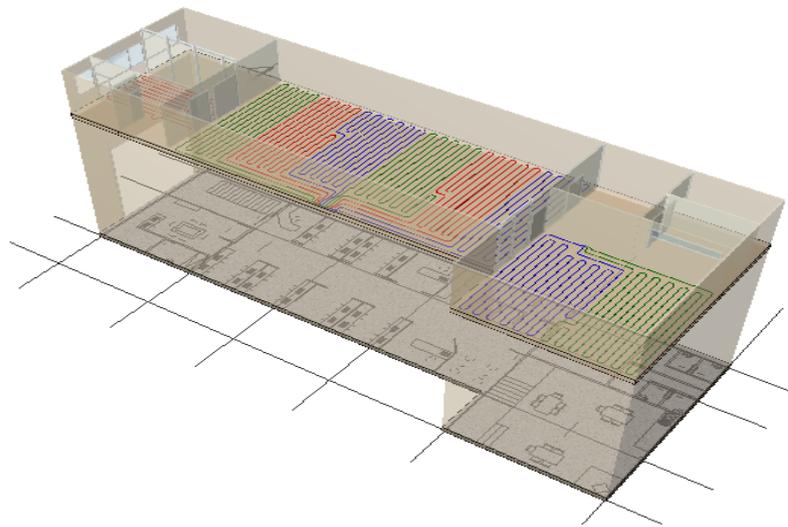


Figura 41 Distribución de circuitos de radiación con el programa LoopCad 2016.
Fuente: Elaboración propia

posteriormente el área administrativa. La tabla 11 muestra los datos incorporados al programa. Estos datos presentan las características climáticas de la ciudad de San José, Costa Rica.

En la tabla podemos observar los valores de latitud y altitud de la ciudad, así como la temperatura exterior mínima y máxima en las que el sistema accionarse para mantener el equilibrio térmico. También se hace mención de los valores de calefacción y enfriamiento que enmarcan el rango de temperatura que debe mantenerse en el edificio, así como el rango de la humedad. Como se había comentado anteriormente, estos valores están basados en la Guía Bioclimática para alcanzar el equilibrio térmico en edificios destinados en oficinas.

La tabla 11 también muestra las características de los espacios y el proceso de simulación que consistió en desarrollar distintos escenarios para mejorar las condiciones de calor en el interior del edificio. Cada uno de los casos parte del edificio base hasta desarrollar la combinación de distintas estrategias para mejorar la efectividad del sistema y disminuir el consumo energético requerido para mantener el equilibrio térmico en el edificio.

Analizando los resultados de la tabla, vemos que la energía requerida para lograr

el equilibrio térmico en el edificio base es de 63,13 kW/h y el calor total en su interior es de 113,217 W. Estos valores son el reflejo de una mala elección de materiales y de un edificio que no tomó en cuenta las características climáticas de su contexto.

Para contrarrestar este efecto invernal, se desarrollaron diversas estrategias pasivas y mecánicas. El primer caso que presentó mayor modificación se dio en el CASO 1, que consistió en la modificación de los muros del edificio. En comparación con el edificio base, se puede apreciar que el calor total en su interior se reduce a 59,607 kW/h; es decir, se logró reducir un 47.73% del calor en el interior del inmueble y su consumo energético se redujo a 9,51 kW/h.

En los CASOS 2,3 y 4, las variaciones por su modificación son menores. En cambio en el CASO 5, se logró una reducción de calor y consumo energético. En este caso se modificó el tipo de ventanas por Vidrio Low E con valor U de 2.328. Además, se activó el sistema de enfriamiento hidrónico para que absorbiera gran parte de calor almacenado en el interior del edificio y se incorporó un sistema de aire forzado. Esta estrategia permitió reducir el total de calor a 58,135 kW/h, un 48.65% de calor almacenado en comparación del edificio base. En cuanto a su consumo energético, esta estrategia logró reducir el consumo hasta 8.32 kW/h.

DATOS								TABLA SIMULACIÓN SAN JOSÉ, COSTA RICA	
Temperatura Calefacción	15	Latitud	09°56'11 N	Calefacción	23	Enfriamiento			
Temperatura Enfriamiento	32	Altitud	1172	Temperatura Por Espacio	23	26			
Temperatura Bulbo Húmedo	17,6	Daily Range	High	Diferencia Temperatura Ext / Int	8	6			
Área Total	558.16			Humedad Interior	30	70			
TABLA DE ESCENARIOS									
Concepto	Características	Edificio Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	
Construcción	Pared	Material	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con Aislante Térmico R10	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con Aislante Térmico R10
		Valor U	3.316	0.397	3.316	3.316	3.316	3.316	0.397
		Ancho de pared	10	10	10	10	10	10	10
	Piso	Material	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica
		Valor U	2.958	2.958	2.958	2.958	2.958	2.958	2.958
	Cubierta	Material	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado con Aislante R-24	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado
		Valor U	0.358	0.358	0.358	0.182	0.358	0.358	0.358
	Ventana	Material	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Low E Coating 0.20 con puente térmico	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Low E Coating 0.20 con puente térmico	Vidrio Low E Coating 0.20 con puente térmico
		Valor U	6.133	6.133	2.328	6.133	6.133	2.328	2.328
	Puerta	Material	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Metal Galvanizado
	Valor U	3.407	3.407	3.407	3.407	3.407	3.407	3.407	
Tragaluz	Material	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	
	Valor U	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	
Sistemas mecánicos	Aire Forzado		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	SI
	Radiación		N/A	N/A	N/A	N/A	SI	SI	SI
		Tipo de aplicación	N/A	N/A	N/A	N/A	Thin Slab over Concrete	Thin Slab over Concrete	Thin Slab over Concrete
		Separación tubería	N/A	N/A	N/A	N/A	150	150	150
		Temperatura Agua	N/A	N/A	N/A	N/A	16	16	16
		Tipo de Fluido	N/A	N/A	N/A	N/A	Agua	Agua	Agua
		Temperatura Superficie Max.	N/A	N/A	N/A	N/A	23	23	23
	Aire Acondicionado		SI	SI	SI	SI	N/A	N/A	
Otras	Horario de Trabajo		7:30 a.m. - 5:30 p.m.	7:30 a.m. - 5:30 p.m.	7:30 a.m. - 5:30 p.m.	7:30 a.m. - 5:30 p.m.	7:30 a.m. - 5:30 p.m.	7:30 a.m. - 5:30 p.m.	7:30 a.m. - 5:30 p.m.
	Tipo de Iluminación	Calor Sensible	100	100	100	100	100	100	100
	Ventilación (AirChances/hour)		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Equipos Electronicos	Computadoras	158	158	158	158	158	158	158
Resultados	Edificio	Calor Latente (kw/h)	14.10	14.10	14.10	14.10	14.10	14.10	14.10
		Calor Sensible (kw/h)	99.11	45.50	97.35	96.68	99.11	44.03	43.00
		Energía Requerida (kw/h)	63.13	9.51	61.64	63.13	63.13	8.32	7.29
	Room 1	Ocupantes	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
		M2	140.90	140.90	140.90	140.90	140.90	140.90	140.90
		Calor Latente (kw/h)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
	Room 3	Calor Sensible (kw/h)	4.01	2.29	4.01	3.65	4.01	4.01	2.30
		Ocupantes	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
		M2	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30
	Room 9	Calor Latente (kw/h)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
		Calor Sensible (kw/h)	0.86	1.53	1.31	1.58	1.63	1.31	1.21
		Ocupantes	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
	Room 9	M2	55.20	55.20	55.20	55.20	55.20	55.20	55.20
		Calor Latente (kw/h)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
		Calor Sensible (kw/h)	1.65	1.95	2.86	2.72	2.86	2.86	1.96

Tabla 11. Escenarios y resultado de simulación en edificio de oficinas en San José, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia *

*Se enmarca con color amarillo los cambios significativos en cada prueba

Entonces, al comprobar que las estrategias pasivas en combinación del S.E.H. y de un sistema de aire forzado se realizó un CASO 6 que combinara las diversas estrategias. Sus resultados presentaron una baja de calor almacenado de hasta 57,103 W con un consumo de energía de 7.29 kW/h.

Estos valores demuestran que se logró reducir un 88.48% el consumo energético dentro del edificio y además se logró reducir de manera muy considerable el calor total (sensible y latente) en su interior.

La combinación de ambos logró reducir un 86.84% el consumo energético según los valores del edificio base. Esta reducción de energía se dio debido a que el tipo de ventanas que presentaba el edificio genera ganancias y pérdidas de calor en su interior.

También se muestra la relación del calor interno del edificio y su consumo energético en su interior. Apreciamos que los valores se han logrado reducir de manera considerada cuando observamos los valores del edificio base y luego los valores finales.

Como segunda fase se colocó de manera hipotética el edificio en la Ciudad de México para comparar el rendimiento de las mismas estrategias desarrolladas en la ciudad de San José. La tabla 11 muestra los datos principales que se

introdujeron al sistema.

Se observa que el rango de temperatura del edificio debe ser el mismo que en Costa Rica. Esto para observar las diferencias de comportamiento en ambas latitudes y condiciones climáticas diferentes.

El único cambio se realizó en cuanto a las condiciones internas, es que la humedad permaneciera entre un 30 a 45%.

La tabla 12, además muestra los resultados obtenidos, el calor total en el interior del edificio fue de 84,510 kW/h. En comparación con el edificio ubicado en San José hubo una diferencia aproximada del 25.35% y en relación a su consumo energético fue de 43.70 kW/h, es decir un 30.81% menos que en el ejercicio anterior.

La tabla también demuestra que el efectivamente la aplicación de los mismos casos provocó una reducción de calor en el interior del edificio, así como su consumo energético, donde el CASO 6 vuelve a presentar las mejores condiciones para potencializar el rendimiento del sistema.

DATOS							TABLA SIMULACIÓN CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO		
Temperatura Calefacción	7.5	Latitud	19°25'42 N		Calefacción	23		Enfriamiento	26
Temperatura Enfriamiento	27.8	Altitud	2240	Temperatura Por Espacio					
Temperatura Bulbo Húmedo	17.8	Daily Range	Medium	Diferencia Temperatura Ext/ Int	15.5				1.8
Área Total	558.16			Humedad Interior	30				45

TABLA DE ESCENARIOS									
Concepto	Características	Edificio Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	
Construcción	Pared	Material	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con Aislante Térmico R10	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con acabado interior	Bloque de Concreto con Aislante Térmico R10
		Valor U	3.316	0.397	3.316	3.316	3.316	3.316	0.397
		Ancho de pared	10	10	10	10	10	10	10
	Piso	Material	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica	Ceramica
		Valor U	2.958	2.958	2.958	2.958	2.958	2.958	2.958
	Cubierta	Material	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado con Aislante R-24	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado	Metal Galvanizado
		Valor U	0.358	0.358	0.358	0.182	0.358	0.358	0.358
	Ventana	Material	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Low E Coating 0.20 con puente térmico	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Sencillo con marcos metálicos sin puente térmico	Vidrio Low E Coating 0.20 con puente térmico	Vidrio Low E Coating 0.20 con puente térmico
		Valor U	6.133	6.133	2.328	6.133	6.133	2.328	2.328
		Valor U	6.133	6.133	6.133	6.133	6.133	6.133	6.133
Puerta	Material	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Puerta Metálica con Fibra de Vidrio	Metal Galvanizado	
	Valor U	3.407	3.407	3.407	3.407	3.407	3.407	3.407	
Tragaluz	Material	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	
	Valor U	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	
Sistemas mecánicos	Aire Forzado		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Radiación		N/A	N/A	N/A	N/A	SI	SI	SI
	Tipo de aplicación		N/A	N/A	N/A	N/A	Thin Slab over Concrete	Thin Slab over Concrete	Thin Slab over Concrete
	Separación tubería		N/A	N/A	N/A	N/A	150	150	150
	Temperatura Agua		N/A	N/A	N/A	N/A	16	16	16
	Tipo de Fluido		N/A	N/A	N/A	N/A	Agua	Agua	Agua
	Temperatura Superficie Max.		N/A	N/A	N/A	N/A	23	23	23
	Aire Acondicionado		SI	SI	SI	SI	N/A	N/A	N/A
	Horario de Trabajo		8: 00 h - 20:00 h	8: 00 h - 20:00 h	8: 00 h - 20:00 h	8: 00 h - 20:00 h	8: 00 h - 20:00 h	8: 00 h - 20:00 h	8: 00 h - 20:00 h
	Otras	Tipo de Iluminación	Calor Sensible (kW/h)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ventilación (AirChances/hour)			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Equipos Electronicos		Computadoras (kW/h)	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158
Tipo de Infiltración			Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple
Resultados		Edificio	Calor Latente (kW/h)	14.10	14.10	14.10	14.10	14.10	14.10
	Calor Sensible (kW/h)		70.41	32.32	69.59	66.02	70.96	32.14	31.47
	Energía Requerida (kW/h)		43.70	5.62	42.98	43.70	43.70	8.32	4.30
	Room 1	Ocupantes	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
		M2	140.90	140.90	140.90	140.90	140.90	140.90	140.90
		Calor Latente (kW/h)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
		Calor Sensible (kW/h)	2.87	1.65	2.87	2.55	2.98	1.07	1.06
	Room 3	Ocupantes	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
		M2	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30
		Calor Latente (kW/h)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
		Calor Sensible (kW/h)	1.266	1.198	1.31	1.22	1.28	1.76	1.74
	Room 9	Ocupantes	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
		M2	55.20	55.20	55.20	55.20	55.20	55.20	55.20
		Calor Latente (kW/h)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
		Calor Sensible (kW/h)	2.32	1.68	2.32	2.20	2.37	1.72	1.71

Tabla 12. Escenarios y resultado de simulación en edificio de oficinas en Ciudad de México, México.
Fuente: Elaboración propia *

*Se enmarco con color amarillo los cambios significativos en cada prueba

Comparación de resultados

Si comparamos los resultados desde el punto de vista térmico en ambos escenarios y la efectividad de cada estrategia en cada zona climática, podemos decir que en general, la aplicación de estrategias pasivas y la activación del sistema presentaron un mejor rendimiento en las condiciones climáticas de la ciudad de San José.

Los resultados que muestra la gráfica 44 refleja que en Costa Rica se presentan un mejor rendimiento la aplicación de las estrategias y el S.E.H. para reducir el calor en el interior del edificio. Si bien, en la Ciudad de México el edificio presentó una carga térmica menor que el de San José, la aplicación de las estrategias estuvo por debajo de la capacidad en el clima tropical.

La gráfica también señala que en condiciones térmicas, el edificio ubicado hipotéticamente en la Ciudad de México no absorbe tanto calor como el edificio ubicado en San José y este se mantiene muy por debajo en el transcurso de la simulación.

En cuanto al rendimiento energético, el gráfico 45 muestra el comportamiento en ambos escenarios. El edificio ubicado en San José inicia con un consumo energético del 63.13 kW/h en cambio en la Ciudad de México iniciaría con un consumo energético de 43.70 kW/h.

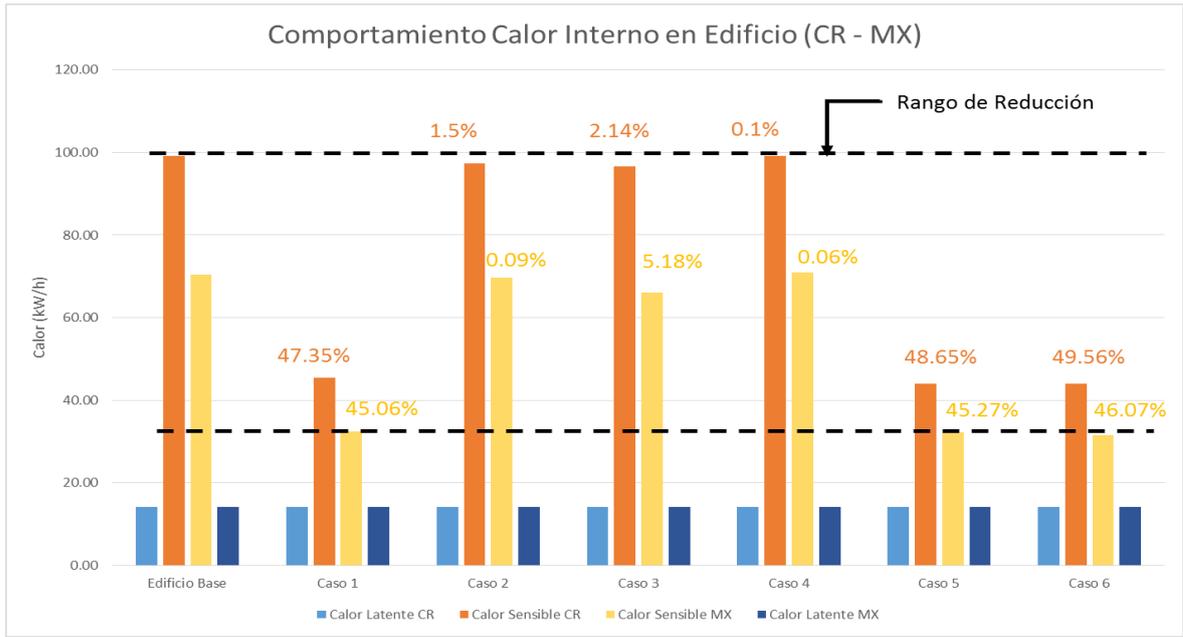
Ambos escenarios empiezan con una diferencia de aproximadamente 30%, pero cuando se aplica el CASO 5 en ambos escenarios se puede apreciar que esta estrategia provocó que los edificios consumieran casi la misma cantidad de energía.

Sin embargo, al aplicar el CASO 6 en ambos escenarios se genera una diferencia de consumo del 40.84%. Lo cual deja claro que la aplicación del sistema presenta mejores condiciones energéticas en la Ciudad de México con un valor de 4.30 kW/h en comparación con 7.29 kW/h en San José.

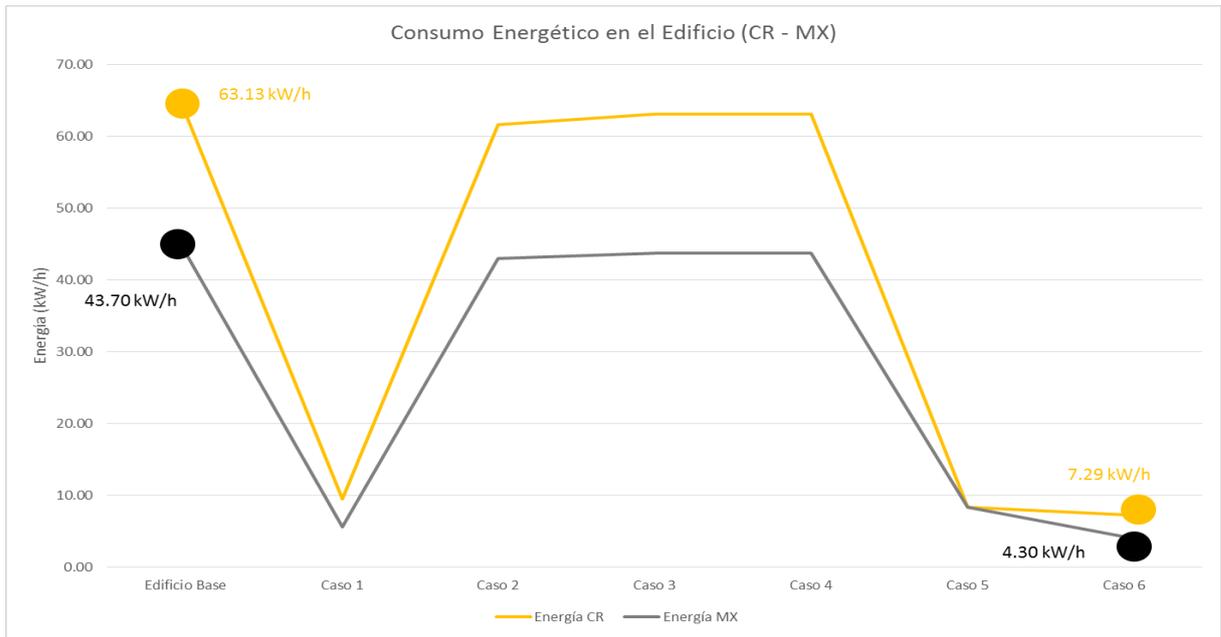
Estas diferencias reflejan también la forma en que un edificio se puede comportar de manera muy diferente según su contexto.

Por lo tanto, es importante reafirmar que los profesionales involucrados en la construcción y diseño deben de desarrollar envolventes arquitectónicas acorde a su condición climática para obtener un mejor rendimiento de los sistemas mecánicos auxiliares para lograr un confort térmico deseado.

Para la comparación energética y económica, se utilizaron los valores arrojados por el programa LoopCad para las computadoras (0.158 kW/h) y las lámparas (0.1 kW/h), para el valor de los microondas (1.7 kW/h) se utilizó el valor energético que indica la página del ICE.



Gràfica 44 Comparación de calor interno del edificio en SJ - CDMX. Fuente: Elaboración propia



Gràfica 45 Comparación de consumo energético del edificio en SJ - CDMX. Fuente: Elaboración propia

SAN JOSÉ, CR						
COMPARACIÓN CONSUMO ENERGÉTICO						
AIRE ACONDICIONADO						
Elemento	Cantidad	KW/h	Horas al día	Días al mes	kW /mes	
Computadora	27	0.158	10	5	213.3	
Lamparas	16	0.1	10	5	80	
Microondas	2	1.7	4	5	68	
Aire Acondicionado	3	3.51	5.5	5	290.14	
Sub-total					651.44	
* Aire Acondicionado de 12000 Btu/h según especificaciones de fabrica					Costo Dólar x kw/h	\$0.23
Total					\$147.29	
SISTEMA ENFRIAMIENTO RADIANTE						
Elemento	Cantidad	KW/h	Horas al día	Días al mes	kW /m	
Computadora	27	0.158	10	5	213.3	
Lamparas	16	0.1	10	5	80	
Microondas	2	1.7	4	5	68	
S.E.H.	1	7.29	5.5	5	200.475	
Sub-total					561.775	
Costo Dólar x kw/h					\$0.23	
Total					\$127.02	
AHORRO DE UN 13.76%						

Tabla 13 Comparación de consumo energético entre aire acondicionado - S.E.H. en edificio San José, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al aire acondicionado se utilizó el valor indicado en la etiqueta energética del sistema (3.51 kW/h) por cada equipo.

La tabla 13 señala la comparación entre el equipo mecánico del aire acondicionado y del S.E.H. (según resultados de la simulación). Como se puede apreciar, con el primer equipo mecánico se llega a consumir aproximadamente 651.44 kW/h, en cambio con el S.E.H se llega a consumir 561.775 kW/h, es decir se logró reducir 89.66 kW/h.

Desde el aspecto económico, se utilizó el costo por kW/h que da el ICE al día de hoy. Según lo estipulado por el Instituto, un kW/h tiene un costo de 0.23 dólares (¢133 colones en moneda costarricense 4.24 pesos mexicanos). A partir de ese valor, se calculó el costo aproximado por mes del consumo energético del edificio en ambos escenarios.

Utilizando el total de consumo energético del primer escenario apreciamos que se debe pagar un aproximado de 147.29 dólares, en cambio utilizando el

CIUDAD DE MÉXICO, MX						
COMPARACIÓN CONSUMO ENERGÉTICO						
AIRE ACONDICIONADO						
Elemento	Cantidad	KW/h	Horas al día	Días al mes	kW /mes	
Computadora	27	0.158	10	5	213.3	
Lamparas	16	0.1	10	5	80	
Microondas	2	1.7	4	5	68	
Aire Acondicionado	3	3.51	5.5	5	290.14	
Sub-total					651.44	
* Aire Acondicionado de 12000 Btu/h según especificaciones de fabrica					Costo Dólar x kw/h	\$0.23
Total					\$147.29	
SISTEMA ENFRIAMIENTO RADIANTE						
Elemento	Cantidad	KW/h	Horas al día	Días al mes	kW /m	
Computadora	27	0.158	10	5	213.3	
Lamparas	16	0.1	10	5	80	
Microondas	2	1.7	4	5	68	
S.E.H.	1	4.3	5.5	5	118.25	
Sub-total					479.55	
					Costo Dólar x kw/h	\$0.23
Total					\$108.43	
AHORRO DE UN 26.39%						

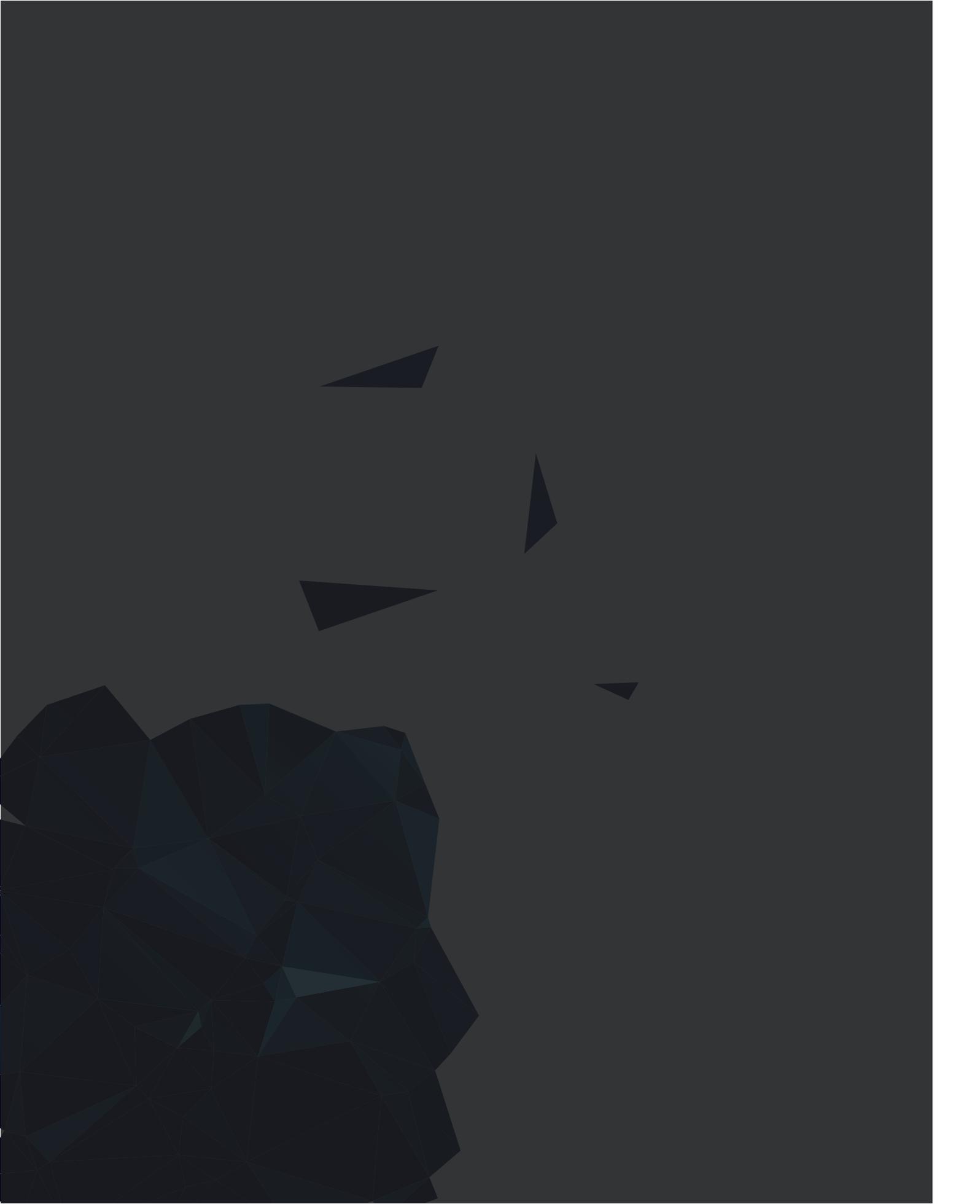
Tabla 14 Comparación de consumo energético entre aire acondicionado - S.E.H. en edificio Ciudad de México, México. Fuente: Elaboración propia

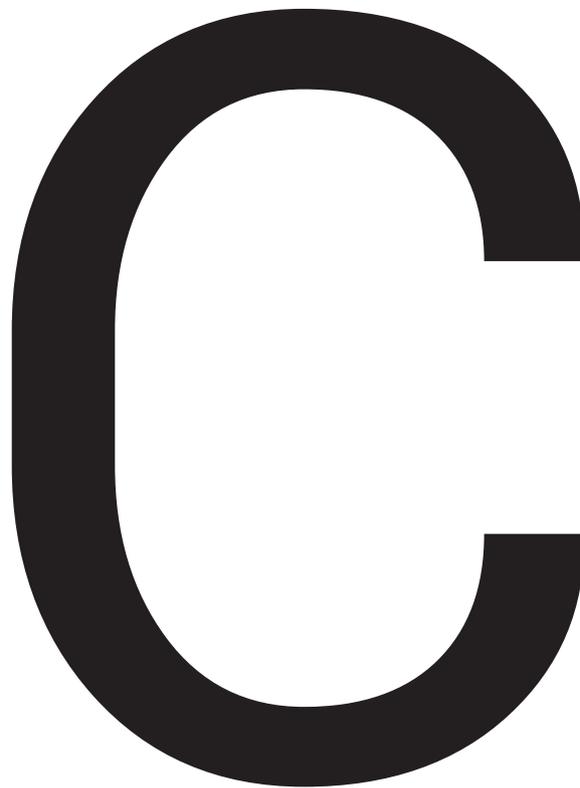
sistema S.E.H. se debe pagar un aproximado de 127.02 dólares, es decir, un 13.76% menos en la factura.

Al comparar estos valores con los resultados con la tabla 14 podemos apreciar que el consumo energético del S.E.H. presenta un mayor ahorro.

Si el sistema se aplica en un contexto como el de la Ciudad de México el ahorro sería de un 26.39%; es decir se logra reducir la factura energética un 12.62%.

Es importante resaltar que este último ejercicio se realizó con fines investigativos y con el objetivo de obtener un marco de referencia económico entre dos sistemas de enfriamiento mecánico. Los resultados obtenidos podrán variar según el modelo de aire acondicionado y la ubicación del S.E.H. en el edificio





CONCLUSIONES

Aplicaciones del sistema	172
Futuras líneas de investigación	173

El sistema de enfriamiento hidrónico permite modificar la capacidad de transferencia de calor en una envolvente arquitectónica. La integración del sistema a la envolvente de un edificio permite desde el punto de vista térmico, responder a las condiciones climáticas del exterior al crear una tercera piel similar a la epidermis humana.

La aplicación del sistema de enfriamiento radiante en zonas de alta humedad era una realidad poco factible hace tres décadas, sin embargo, las condiciones actuales han provocado la búsqueda de sistemas mecánicos que logren obtener condiciones térmicamente óptimas en el interior y además, reducir el alto consumo energético que se vive hoy en día.

La búsqueda de nuevas alternativas ha provocado derribar barreras técnicas

en el sector de la construcción. El sistema de enfriamiento hidrónico es uno de estos casos y que con el paso del tiempo presenta mayor auge.

Costa Rica al igual que muchos otros países con climatología tropical no deben estar exentos a la hora de aplicar sistemas como el sistema de enfriamiento hidrónico, ya que tarde o temprano, también pasará la factura ambiental y energética si no se cambian las costumbres en el diseño arquitectónico.

La presente investigación aborda el fenómeno del comportamiento espacio - aire del sistema de enfriamiento radiante. Se analizó específicamente la efectividad del sistema en la reducción de temperaturas internas, en su potencial para alterar la dependencia de las variables externas de temperatura ambiente, radiación y humedad relativa en el comportamiento térmico y de humedad de un espacio y en su papel para la reducción del consumo energético en edificios de oficinas.

Luego del desarrollo de la etapa experimental se logró comprobar la hipótesis de esta investigación, la cual indica que la aplicación de un modelo de enfriamiento radiante en conjunto de estrategias pasivas mejoró el comportamiento térmico y energético de un espacio, específicamente un espacio de oficinas.

A partir de los resultados obtenidos en las tres fases experimentales se concluye que:

1. La utilización de materiales que no presentan ningún tipo de aislante, en especial en lugares de alta radiación, puede provocar un aumento de un 8 a 10°C por arriba del rango de confort, como lo sucedido en el área de comedor en el análisis térmico en el edificio de San José, Costa Rica.

2. Es fundamental tener conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales. Se deben seleccionar aquellos que respondan de manera adecuada al contexto climático para reducir la correlación de variables entre la radiación solar y la temperatura interna del inmueble. Por ejemplo, en el análisis del edificio se observó que la temperatura del comedor paso de 18.84 a 35.95 °C, en un período de 5 horas, es decir la temperatura subió aproximadamente 17.11°C.

3. El aislamiento o hermeticidad total del edificio puede perjudicar el comportamiento de la humedad, sin embargo se comprobó que si se mantiene un equilibrio de temperatura y humedad interna se podrá llegar al confort térmico deseado. Por ejemplo, en el edificio analizado en San José, Costa Rica los valores que presentan un mejor equilibrio fue una temperatura interna de 23.5 a 26.5 °C y una humedad del 40 al 55%.

4. El análisis térmico de los edificios se debe desarrollar antes de aplicar el sistema de enfriamiento hidrónico en un edificio ya que se debe conocer el grado de dependencia entre las variables externas e internas. Por ejemplo, cuando el valor de la humedad se encuentra en su punto mayor, 83.30% la temperatura interior se encuentra a 18.84°C, este fenómeno refleja la dependencia de las variables internas (temperatura, humedad y temperatura de punto de rocío) hacia las variables exteriores como la radiación solar.

5. La utilización de materiales que regulen la ganancia y pérdida de calor en el edificio en conjunto con el sistema de enfriamiento hidrónico logró generar una temperatura casi constante en el interior de un espacio. Este fenómeno se aprecia en los resultados obtenidos en el día 13 de enero de 2016, donde al activar el sistema, después de hora y cuarto la temperatura tiene ligeras variaciones.

6. La alteración de las condiciones de temperatura de agua que circula en el interior del bloque de concreto provocó desde el punto de vista térmico una rápida absorción del calor en el interior, logrando reducir desde la temperatura inicial (TI) del módulo ME 3.5°C, sin embargo, debido a la condensación de manera intencional provocó que los índices de humedad aumentarían aproximadamente 12%.

7. Activando el sistema de enfriamiento hidrónico con una temperatura de agua a 1 ó 2 °C mayor a la temperatura de punto de rocío genera una lenta absorción de calor interno del espacio, por ejemplo se llegó a necesitar la activación del sistema por 5.5 horas para iniciar el descenso de la temperatura interna

8. Si el sistema solamente se activa aproximadamente una hora y media no logrará generar alguna alteración considerable en las condiciones internas del espacio. Se recomienda realizar la activación del sistema en un periodo de adaptación para lograr alcanzar el equilibrio térmico y de humedad. En el caso de estudio realizado en las instalaciones de Giacomini, el sistema tuvo que ser activado dos horas antes para lograr disminuir el exceso de calor en interior del espacio y lograr mantenerlo en equilibrio. Esto afirma que el sistema de enfriamiento hidrónico no produce resultados de inmediato.

9. El sistema de enfriamiento radiante presenta un mejor rendimiento en condiciones climáticas secas Aw que en el trópico Bwh. Esto lo podemos comprobar luego de observar la prueba del 13 de diciembre, cuando la activación del sistema ME logra mantener casi constante las variables internas del módulo.

9. Después de la instalación del sistema en un inmueble, se debe respetar los parámetros de temperatura de

agua con respecto a la temperatura de punto de rocío. Se recomienda mantener aproximadamente una temperatura de agua entre 1 o 2 °C mayor al punto de rocío para evitar la condensación que afecta el sistema y además, al material que envuelve al sistema.

11. En relación al consumo energético, la aplicación en conjunto de estrategias pasivas y el sistema de enfriamiento radiante permitió la reducción de calor en un 49.56% en Costa Rica y 46.07% en México, afirmando la comprobación de la hipótesis.

12. Si se utiliza de manera adecuada las estrategias pasivas y sistemas mecánicos de bajo consumo energético como el sistema de enfriamiento hidrónico se puede reducirse la factura energética entre un 15 a 30%, logrando tener un ahorro económico considerable.

Aplicaciones del sistema

Se plantean de forma puntual las diversas aplicaciones del S.E.H. en las edificaciones:

- El S.E.H. puede utilizarse en cualquier contexto climatológico. No obstante, el riesgo de la condensación en el sistema es muy elevado en zonas de alta humedad por ello el diseño de una envolvente apropiada e instalación son elementos claves para su efectividad.

- El equipo puede ser utilizado como aliado para el control de temperaturas en un espacio multifuncional, permitiendo así una flexibilidad térmica dentro de un espacio abierto.
- Se utiliza el S.E.H. como mecanismo principal para amortiguar el calor transferido por la radiación solar a los materiales de construcción, por ejemplo ventanas, losas de concreto, etcétera.
 - El S.E.H. puede utilizar las mismas tuberías que el sistema de calefacción radiante, permitiendo aprovechar las instalaciones para una doble función y recursos económicos.
 - El sistema en conjunto con sistemas de aire forzado se ajusta a un amplio rango de aplicaciones comerciales, industriales y residenciales.
 - Los resultados del S.E.H. pueden ser potencializados cuando se combina el sistema con otras soluciones eficientes de energía en estructuras de edificaciones herméticas.
- Desarrollar experimentos con otras envolventes para analizar su comportamiento espacio - aire otras condiciones de envolvente.
 - Desarrollar experimentos en zonas con climatología similar a Costa Rica, para verificar la efectividad del sistema en zonas de trópico húmedo.
 - Utilizar otros tipos de fluido que mejoren la capacidad de enfriamiento con el agua para lograr un enfriamiento con mayor rapidez.
 - Desarrollar simulaciones en distintos tipos de edificación el sistema para evaluar su efectividad según los diámetros del espacio y sus condiciones arquitectónicas.
 - Evaluar el comportamiento energético del sistema de enfriamiento hidrónico al trabajar en conjunto con algún sistema de energía renovable.
 - Evaluar la capacidad del sistema en absorber el calor interno de un espacio cuando no se encuentre expuesto a las condiciones climáticas externas.

Futuras investigaciones

- Elaborar distintas estrategias o condiciones de diseño para evaluar una mejora en el sistema
 - Elaborar experimentos con distintos grosores de concreto para ver su comportamiento térmico.
 - Realizar comparaciones entre el S.E.H. en otras ubicaciones del edificio y otros modelos mecánicos de enfriamiento para valorar su rentabilidad

A P

APORTACIÓN

El desarrollo de esta investigación tiene como objetivo principal generar información relevante para introducir la aplicación de nuevas alternativas de enfriamiento como el sistema de enfriamiento radiante en países de climatología cálido – húmedo como San José, Costa Rica.

La mayor aportación que brinda este documento es la ruptura existente entre el desconocimiento de aplicación del sistema y su potencial para mejorar el equilibrio térmico y energético en edificios de oficina en zonas tropicales Bwh.

Los resultados que se generaron en esta investigación lograron ampliar el panorama investigativo en relación al tema de aplicación del sistema en condiciones climáticas no óptimas para su incorporación.

Se pretende dejar también una puerta abierta para que los profesionales tengan interés en el tema y puedan desarrollar mejoras en el sistema de enfriamiento radiante a partir del diseño arquitectónico. Se espera que en futuras investigaciones se logre aumentar la eficiencia del sistema y se amplíe el conocimiento de estas tecnologías.

Parte de la razón de la cual se elaboró esta investigación es para introducir una nueva alternativa o mercado para la distribución y la aplicación del sistema

de enfriamiento radiante. Se espera que a partir de los resultados obtenidos se pueda entender su efectividad y ventajas de su aplicación.

Otra aportación importante del sistema es abrir camino al diseño de una arquitectura capaz de responder o reaccionar ante las condiciones climáticas exteriores. La investigación busca apoyar la creación de envolventes arquitectónicas térmicamente activas como la epidermis humana y de esta manera crear espacios preparados a los cambios climáticos que enfrentaremos día a día.

Por último, evaluar la capacidad del sistema para reducir el consumo energético en los edificios permitirá comprender la importancia de hacer frente al derroche energético que está viviendo el mundo y enfrentando a partir de prácticas arquitectónicas térmicamente más eficientes.

Es necesario empezar a implementar nuevas alternativas que vinculen las modernas tecnologías y el diseño pasivo. Los arquitectos deben de acoplar soluciones novedosas para contrarrestar la problemática térmica y energética que enfrentamos hoy en día y dejar a un lado la satisfacción de respuestas arquitectónicas no adecuadas a su contexto climático.



G



GLOSARIO

Balance Térmico: conocido también como equilibrio térmico, es un estado donde se igualan las temperaturas de dos cuerpos los cuales antes presentaban distintas temperaturas. Se deja de fluir calor entre ambos cuerpos cuando llegan al equilibrio.

Calor sensible: cantidad de calor absorbido y cedido por una sustancia y a la cual acompaña un cambio de temperatura de la misma, sin cambio de su estado físico.

Calor latente: cantidad de calor cedido y absorbido por una sustancia y al cual acompaña algún cambio en el estado físico de la misma, sin haber cambio en la temperatura.

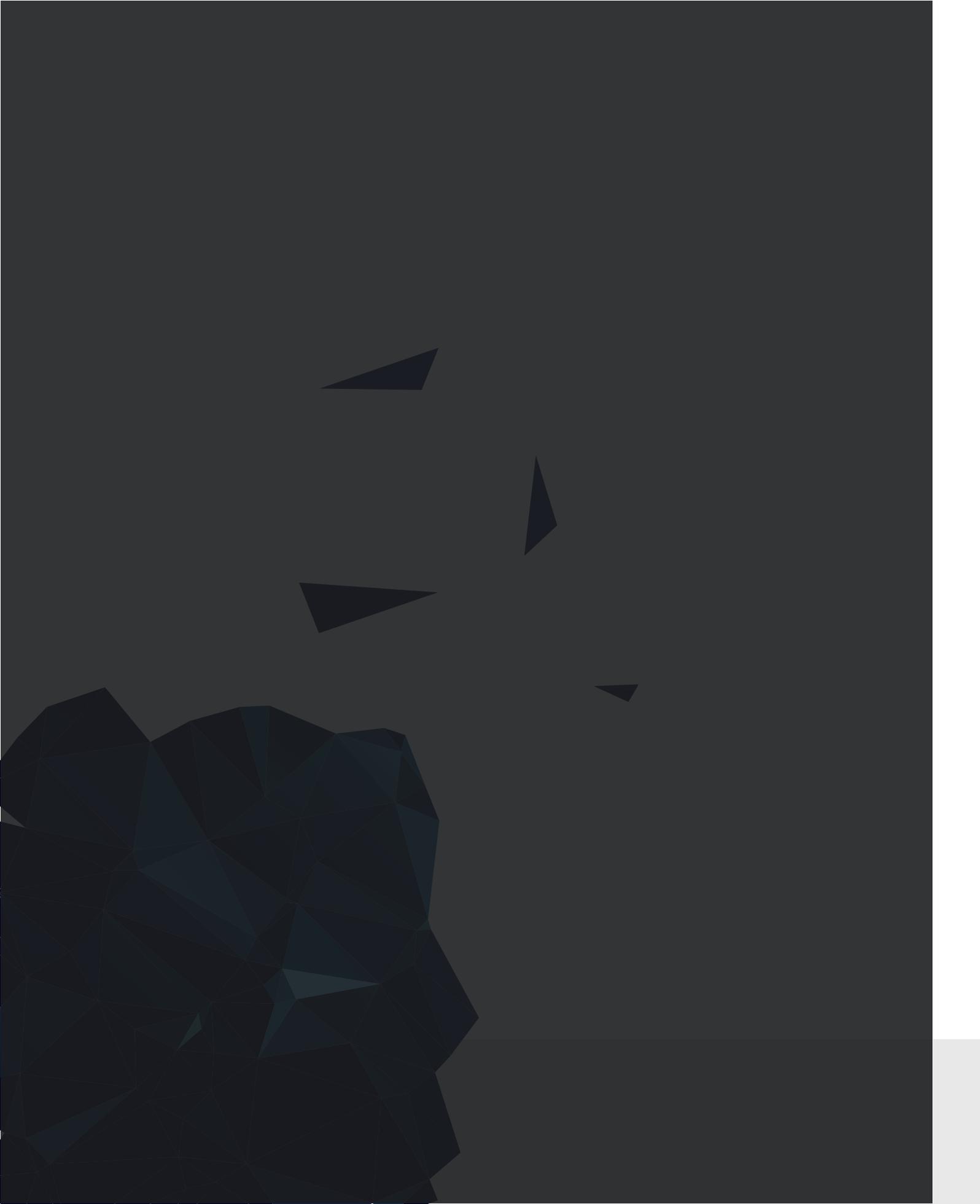
Clima: combinación de elementos (radiación, temperatura de aire y de suelo, precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo, viento, etc) que dan individualidad a una región geográfica.

Humedad Relativa: cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera, procedente de la evaporación, donde se considera normalmente como una mezcla de dos componentes: aire seco y agua.

Radiación Solar: también conocida como radiación de onda corta, es la que llega al sistema tierra por los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar.

Sistema de aire forzado: sistema que presenta generalmente un regulador de aire exterior controlado automáticamente para mantener los estándares de calidad del aire en el interior de un edificio.

Temperatura del aire: grado de energía térmica medida en una escala definida. Es una medida de la energía cinética de las partículas que componen el sistema.



AN

ANEXOS

2.4.2 Giacomini, Barcelona

Para conocer la verdadera capacidad de los sistemas de climatización por radiación, se realizó una visita a las instalaciones de la empresa Giacomini ubicada en la localidad de Seva en Barcelona, España. Se realizaron diversos experimentos donde demuestran la funcionalidad del sistema en diferentes escenarios. Entre ellos, se realizó una prueba donde su objetivo fue evaluar el comportamiento térmico en dos áreas de trabajo dentro de un espacio de oficina para demostrar la eficiencia del sistema y su flexibilidad térmica para el ajuste de temperatura a criterios del usuario.

El área de experimentación de sensaciones radiantes está formado por varios espacios equipados con tecnología de climatización radiante en varias aplicaciones de suelo, pared y techo, y con capacidad para trabajar en modo

calefacción o refrigeración indistintamente.

Para ello se dispuso de una sala de equipos de producción (figura 39) de energía térmica de funcionamiento autónomo a cuatro tubos, con varios generadores entre los que se incluye una producción simulada de calor a través de los captadores de energía solar térmica y una previsión para la instalación de una caldera de hidrógeno Hydrogem.

Características técnicas:

- Colector solar plano PSV
- Grupo hidráulico para instalaciones solares R586S
- Acumulador de alto rendimiento BS1
- Bomba de calor reversible de 9kW térmicos
- Grupo universal R586R
- Separador hidráulico R146I
- Sistemas de control GiacoklimaBus

Los equipos de medición que fueron utilizados son:

- Termómetro de infrarrojos para medición de temperatura superficial Testo 830-T2
- Cámara termográfica SDS Hot-Find-D Versión 11.30SDS
- Software de análisis de imágenes termográficas: SATReport 2003
- Sondas de temperatura NTC integradas en sistema de control central.

5.2 Comportamiento térmico en un espacio multifuncional

Calefacción: En este experimento se activó el sistema para calefacción y para enfriamiento con

el fin de analizar que el sistema puede modificar el comportamiento térmico en ambas situaciones térmicas. Para la calefacción se inició la prueba a las 11:41 del día miércoles 26 de octubre del 2016.

La prueba comienza con la temperatura del área #1 de 20.5313 °C con humedad de 60.46% y el área #2 de 20.64 °C con humedad de 62.4668. Se da inicio al funcionamiento del sistema con una temperatura de agua caliente a 35 °C. Se apagan las luminarias dentro del espacio para obtener solamente datos térmicos provocados por la circulación de agua caliente.

The screenshot shows a web-based control interface titled "User Page. This is a page composed by an user". It displays a table of sensor data with columns for Device type, Device address, Item address, Item description, and a numerical value. The data is as follows:

Device type	Device address	Item address	Item description	Value
0003H	K483-0	001H	SensarTemper:	20,5313
0003H	K483-0	015H	Rel. Umidity	60,4600
0003H	K483-0	007H	WaterSPConf:	5,0
0003H	K481-6	001H	SensarTemper:	20,6406
0003H	K481-6	015H	Relative Humidity	62,4600
0003H	K481-6	007H	WaterSPConf:	5,0
0004H	KP1120	0H	WaterTemperature	35,5625
0004H	KP1120	2CH	WaterSuperSP:	35,0

Figura 39. Fotografía de pantalla del programa de control con los valores iniciales de la prueba. Fuente: Elaboración propia

Se establece que el registro de datos será a cada 10 minutos aproximados (mediante captura de pantalla) para observar el comportamiento térmico de ambas áreas. En el transcurso del experimento se aumentó la temperatura del agua a 40°C para analizar algún posible cambio mayor entre las temperaturas y humedad de ambas áreas.

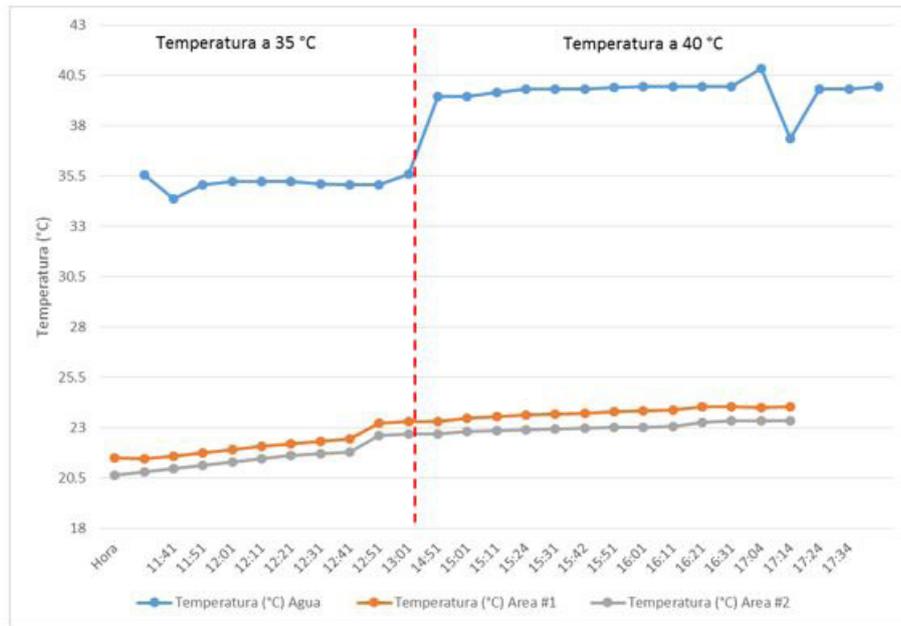
Los datos de temperatura obtenidos del área #1 se les agrego 1°C debido a una diferencia de calibración entre ambos termostatos, ver justificación en el anexo I. Teniendo en cuenta dicha calibración, puede obtenerse los siguientes gráficos (49 y 50) y en la tabla 15:

DATOS MEDICIÓN CALEFACCIÓN (26/10 / 2016)											
Zona radiada:		23 °C									
Zona NO radiada:		5°C									
Número	Día	Hora	Temperatura (°C) Agua	Temperatura (°C) Área #1	Temperatura (°C) Área#1 (+1°C)	Temperatura (°C) Área#2	Diferencia de temperatura	Humedad (%) Área 1	Humedad (%) Área 2	Diferencia de humedad	
1	26/10/2016	11:41	35.5625	20.5313	21.5313	20.6406	0.8907	60.4688	62.4688	-2	
2	26/10/2016	11:51	34.375	20.4688	21.4688	20.8281	0.6407	60.2813	62.75	-2.4687	
3	26/10/2016	12:01	35.0938	20.6094	21.6094	20.9688	0.6406	60.0938	62.6563	-2.5625	
4	26/10/2016	12:11	35.25	20.7656	21.7656	21.1563	0.6093	59.9063	62.4063	-2.5	
5	26/10/2016	12:21	35.25	20.9375	21.9375	21.3281	0.6094	59.7813	62.125	-2.3437	
6	26/10/2016	12:31	35.25	21.0781	22.0781	21.4844	0.5937	59.6563	61.875	-2.2187	
7	26/10/2016	12:41	35.125	21.2188	22.2188	21.625	0.5938	59.5	61.65	-2.15	
8	26/10/2016	12:51	35.0938	21.3438	22.3438	21.7188	0.625	59.4063	61.4688	-2.0625	
9	26/10/2016	13:01	35.0938	21.4531	22.4531	21.8113	0.6418	59.25	61.2813	-2.0313	
10	26/10/2016	14:51	35.625	22.25	23.25	22.6094	0.6406	57.2813	59.4375	-2.1562	
11	26/10/2016	15:01	39.4688	22.3201	23.3201	22.6875	0.6326	57	59.375	-2.375	
12	26/10/2016	15:11	39.4688	22.3281	23.3281	22.6875	0.6406	57	59.375	-2.375	
13	26/10/2016	15:24	39.6563	22.5	23.5	22.8125	0.6875	56.6563	59.0625	-2.4062	
14	26/10/2016	15:31	39.8125	22.5625	23.5625	22.8594	0.7031	56.5313	59.0313	-2.5	
15	26/10/2016	15:42	39.8125	22.6563	23.6563	22.9063	0.75	56.4688	58.875	-2.4062	
16	26/10/2016	15:51	39.8125	22.6719	23.6719	22.9531	0.7188	56.3125	58.8438	-2.5313	
17	26/10/2016	16:01	39.9063	22.7344	23.7344	22.9844	0.75	56.3125	58.75	-2.4375	
18	26/10/2016	16:11	39.9688	22.7969	23.7969	23.0156	0.7813	56.2188	58.7188	-2.5	
19	26/10/2016	16:21	39.9688	22.8594	23.8594	23.0469	0.8125	56.125	58.6563	-2.5313	
20	26/10/2016	16:31	39.9688	22.8906	23.8906	23.0781	0.8125	56.0625	58.5938	-2.5313	
21	26/10/2016	17:04	39.9688	23.0781	24.0781	23.2969	0.7812	55.938	58.9063	-3.3125	
22	26/10/2016	17:14	40.8438	23.0625	24.0625	23.3438	0.7187	55.4688	58.8438	-3.375	
23	26/10/2016	17:24	37.375	23.0156	24.0156	23.3594	0.6562	55.4063	58.7188	-3.3125	
24	26/10/2016	17:34	39.8125	23.0469	24.0469	23.3594	0.6875	55.3125	58.5313	-3.2188	
PROMEDIO					23.04915417	22.35673333	0.692420833	57.5872708	60.1000292	-2.5127583	

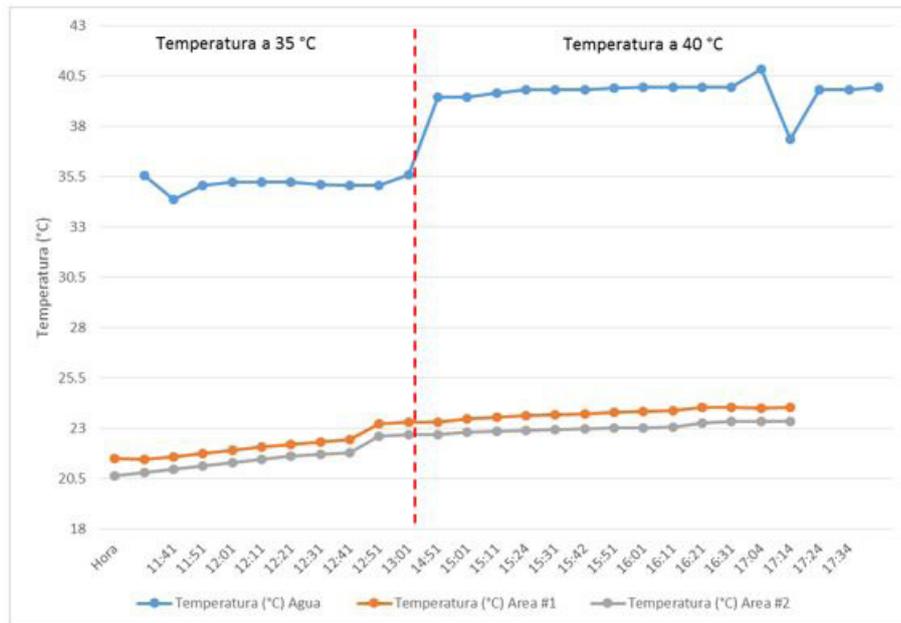
Tabla 15. Resultados de las mediciones del 26 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

Podemos apreciar que ambas áreas presentan una diferencia promedio de temperatura de 0.69 °C en el periodo de la prueba. Además, se observa que después de las 15:01, cuando se incrementa la temperatura del agua a 40°C la diferencia aumenta alrededor de 0.20°C más del promedio.

Con respecto a la humedad, apreciamos que ambas áreas tienen una diferencia de promedio de 2.31%, la cual se mantiene constante hasta cuando se incrementa la temperatura del agua que circula en el sistema.



Gráfica 49. Comportamiento térmico de las áreas #1 y #2 con calefacción. Fuente: Elaboración propia-



Gráfica 50. Comportamiento de la humedad de las áreas #1 y #2 con calefacción. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizó una fotografía térmica para analizar el comportamiento térmico en el mobiliario y en las esferas del espacio, para corroborar los datos obtenidos en la captura de pantalla. Las imágenes termo gráficas son tratadas de modo que se ajusta la escala de color para poner en evidencia las variaciones de temperatura.

En la imagen de la izquierda se observa que el mobiliario presenta una menor

temperatura con respecto al mobiliario de la derecha, debido a la ausencia del sistema de calefacción radiante. Sin embargo, se puede observar que la esfera que se encuentra a una altura de 20 cm del suelo, recibe ligeramente una influencia por el comportamiento térmico del área #1.

En la imagen derecha, se aprecia una mayor temperatura tanto en el mobiliario como en la esfera debido a que

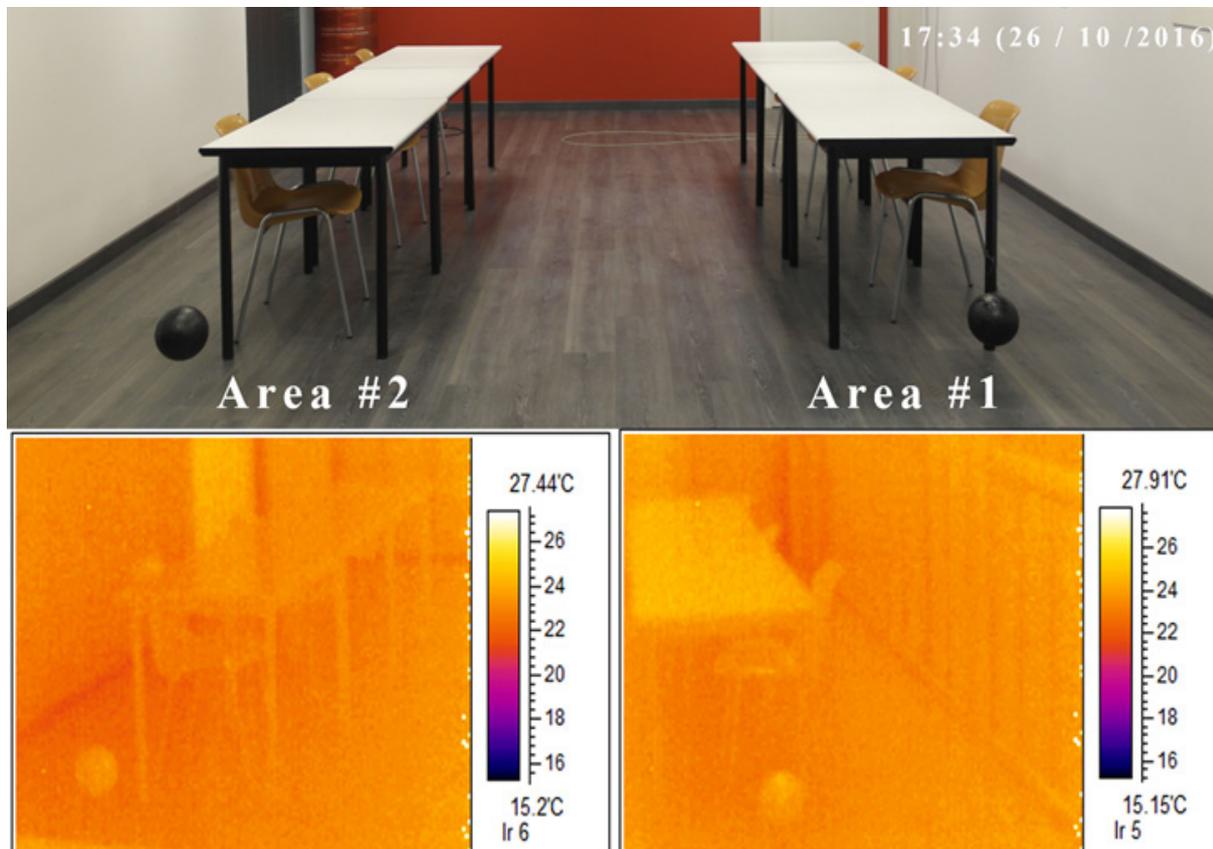


Figura 40. Comportamiento de la humedad de las áreas #1 y #2 con calefacción.
Fuente: Elaboración propia

ambas están expuestas a la radiación directa del techo, dando como resultado una mayor temperatura superficial.

Enfriamiento

Se realiza una pequeña evaluación del sistema radiante con agua fría para también analizar la flexibilidad del sistema para ser controlado por cada usuario. El espacio se deja de la misma manera en que se acomodó para la primera medición.

El sistema de calefacción funcionó toda la noche para obtener una temperatura uniforme de ambas áreas. De esta manera, al activar el sistema de enfriamiento radiante en solo tres filas como el experimento pasado, de esta manera se podrá partir de una temperatura en común y lograr obtener datos del comportamiento de cada área.

Se da comiendo el experimento a las 9:48 a.m. con la temperatura del área #1 es de 23.6094 °C con humedad de 51.1563% y el área #2 de 23.9375 °C con humedad de 62.4668. Se da inicio al funcionamiento del sistema con una temperatura de agua caliente a 18 °C. Se mantienen encendidas las luminarias del espacio.

En este caso se recolectaron datos en periodos de cada hora aproximadamente (mediante captura de pantalla del software de control térmico) para obtener datos que revelen el comportamiento térmico

de ambas áreas.

A partir de los datos obtenidos en el registro de capturas de pantalla, se trasladan las lecturas (cada hora) a una hoja de Excel. Se recogen los datos obtenidos de temperatura de agua, temperatura ambiente y humedad del espacio.

La tabla 16 demuestra que hay un promedio de 1.54 °C de diferencia en ambas áreas. Reafirmando la flexibilidad del sistema para funcionar en puntos específicos dentro de un gran espacio. Además, el agua se calentó un poco después de las 10:48 a.m. para lograr mantener sin altas variaciones la temperatura del espacio.

DATOS MEDICIÓN ENFRIAMIENTO (27/10 / 2016)									
P zona radiada:		18°C							
zona NO radiada:		35°C							
Número	Día	Hora	Temperatura (°C) Agua	Temperatura (°C) Area #1	Temperatura (°C) Area #2	Diferencia de temperatura	Humedad (%) Area 1	Humedad (%) Area 2	Diferencia de humedad
1	27/10/2016	09:48	13.6641	23.6094	23.9375	-0.3281	51.1563	52.5313	-1.375
2	27/10/2016	10:48	13.6641	23.0625	26.6406	-3.5781	51.8438	52.9375	-1.0937
3	27/10/2016	11:50	15.0781	22.25	23.1406	-0.8906	53.3125	53.7813	-0.4688
4	27/10/2016	12:53	15	22.0938	23.0469	-0.9531	53.5313	54.6563	-1.125
5	27/10/2016	15:06	16.2813	23.375	24.3906	-1.0156	52.1875	53.4688	-1.2813
6	27/10/2016	15:51	15.25	23.5938	24.5938	-1	52.1875	53.375	-1.1875
7	27/10/2016	16:48	15.5313	23.4531	24.4688	-1.0157	52.9688	53.6875	-0.7187
				23.06251429	24.31697143	-1.254457143	52.45538571	53.4911	-1.0357143

Tabla 16. Resultados de las mediciones del 27 de octubre de 2016. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la humedad, se puede observar en la gráfica que hubo grandes variaciones en el periodo de la prueba. Sin embargo, la zona radiada con el sistema de techo mantuvo una humedad promedio de -1.03% con respecto a la humedad detectada en el área #2.

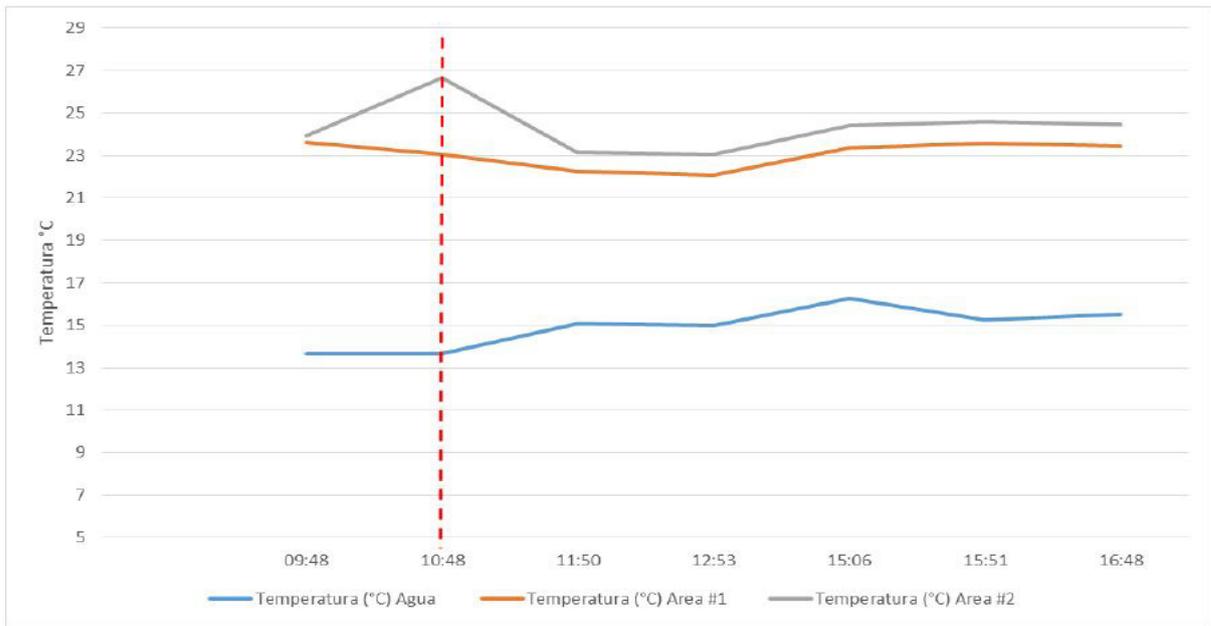
Conclusiones preliminares

Una de las ventajas que presenta el sistema de radiación de techo es su instalación modular, la cual permite configurar varias áreas de circuito con el fin de que la función de cada una sea independiente. Esta cualidad permite que la distribución de calor o enfriamiento sea puntual en un espacio multi – ocupacional.

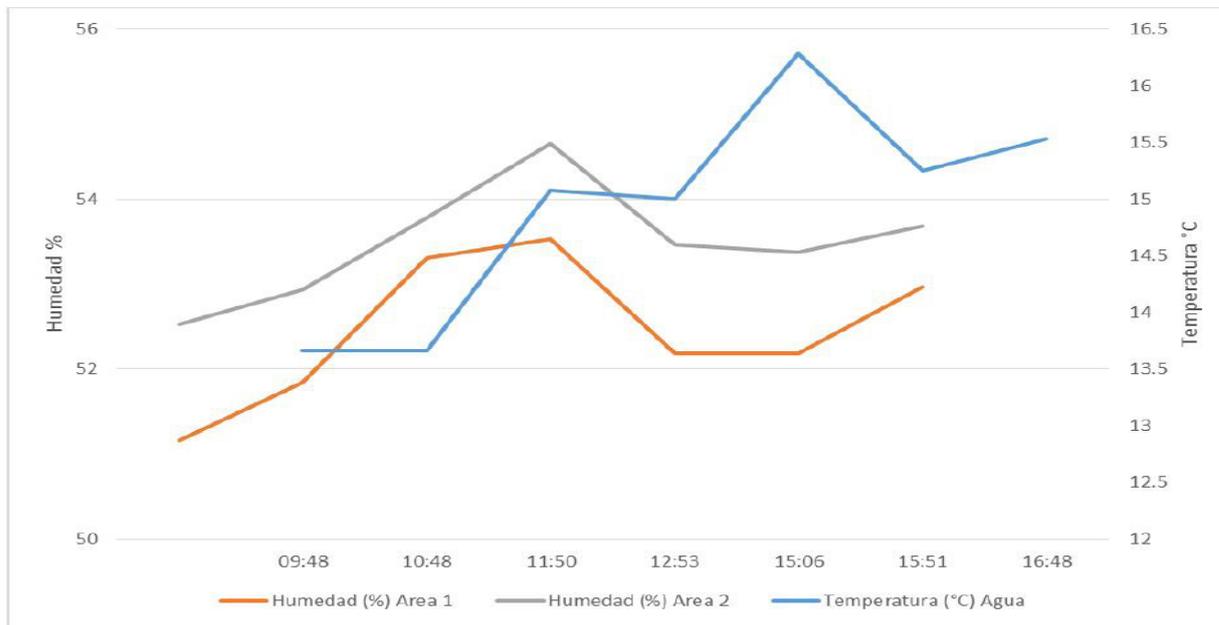
Además, queda demostrado que la aplicación del sistema en una área específica no impacta de manera evidente las condiciones térmicas del área donde no está activo la calefacción o enfriamiento,

permitiendo así la oportunidad de crear distintos ambientes térmico es un espacio multi – ocupacional.

También se aprecia en los resultados como otras variables, como los materiales, se involucran en el comportamiento del sistema. En el Área #1 mejoró su rendimiento térmico ya que no se encontraba cerca de elementos que provocaran pérdidas de calor como en el Área #2.



Gráfica 51. Comportamiento térmico de las áreas #1 y #2 con enfriamiento. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 52. Comportamiento de la humedad de las áreas #1 y #2 con enfriamiento. Fuente: Elaboración propia



R

REFERENCIAS

- [1] Ramírez, J. D. (2007). Sistemas pasivos de climatización, para la descarga de calor por muros y techos. México
- [2] Federación Interamericana de la Industria de la Construcción (FIIC). (2016). Evolución de la Economía de los Países Miembros de la FIIC. Ciudad de México
- [3] Construcción, C. C. (2015 de Febrero de 1). Cámara Costarricense de la Construcción. Obtenido de http://www.construccion.co.cr/mailings/direccion_tecnica/inf_eco_feb_2015.pdf
- [4] Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2007). Cambio Climático en Centroamérica. Santiago : CEPAL
- [5] Instituto Meteorológico Nacional. (Agosto de 2008). Instituto Meteorológico Nacional. San José: Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH). Obtenido de http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf
- [6] Martínez, R. G. (2006). Eficiencia Energética en Edificios. España.
- [7] Gutiérrez Ortiz, M. (2010). Consideraciones ambientales en la compra de equipo de aire acondicionado. Boletín de Compras Inteligentes, 1-4.
- [8] Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2007). Cambio Climático en Centroamérica. Santiago : CEPAL
- [9] Norma Española UNE-EN-ISO 7730, de octubre de 2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local
- [10] ASHRAE . (2001). ANSI / ASHRAE Standard 62.1 (Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality). Atlanta.
- [11] ASHRAE. (2001). ANSI / ASHRAE Standard 90.1 (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings). Atlanta
- [12] Bean, R., Olesen, B., & Woo Kim, K. (2010). History of Radiant Heating & Cooling Systems. ASHRAE Journal , 40 - 47
- [13] Song, D., Kim, T., Song, S., Hwang, S., & Leigh, S. -B. (2008). Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation. Applied Thermal Engineering, 1300 - 1311.
- [14] Feustel, H., Stetiu, C., & Nakano, Y. (1992). Ventilation Control Strategies for Buildings with Hydronic Radiant Conditioning In Hot Humid Climates. Energy and Buildings, 193 - 205.
- [15 y 24] Calderon, D. (2015). Enfriamiento Hidrónico de la masa térmica del concreto. México: Posgrado Arquitectura UNAM.
- [16] Olgyay, V. (1998). Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili.

- [17] Ecoenvolventes: nueva frontera para la sostenibilidad energética y ambiental. Varini, Claudio. 2010. 23, Bogotá: Instituto Colombiano de la Arcila y Cerámica, 2010.
- [18] Lacomba, R. (1991). Manual de Arquitectura. México: Trillas
- [19] Monroy, M. (2006). Calidad ambiental en la edificación. Islas Canarias: Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria.
- [20] Inzunza, J. (2008). Meteorología Descriptiva . Santiago : Universidad de Chile
- [21] Lacomba, R. (1991). Manual de Arquitectura. México: Trillas.
- [22] Meruane, C., & Garreaud, R. (2006). Determinación de Humedad en la Atmósfera. Chile: Universidad de Chile.
- [23] Lozada Lozano, Á. (2008). La Piel del Edificio. Acabados Arquitectónicos de Superficie. Cali: Programa Editoria
- [25] S. Kahan, «Módulo: Tranferencia de Calor,» 2002.
- [26 , 27 y 29] Bautista Kuri, Antonio Javier. 1997. Cálculo de Sistemas de Aire Acondicionado en Sistema Internacional S.I. Ciudad de México: UNAM, Facultad de Arquitectura, 1997.
- [28] Victoria, Sustainable Energy Authority. 2002. Thermal Mass. Sustainable Energy Authority Victoria.
- [30] Serra Florencia, R., & Coch Roura, H. (1995). Arquitectura y energía natural. Barcelona: UPC.
- [31] Gobierno de España. (2006). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). España.
- [32] ISO 11855-1:2012, Building environment design - Design, dimensioning,, 2012
- [33] ISO 11855-5:2005, Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort., 2005.
- [34] AENOR , «Norma Española UNE-EN-ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local,» España, 2006.
- [35] Han Lim, J., & Kwang, W. K. (2016). The international standard on the design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems. *Rehva Journal* , 46-53.
- [36] Frechette, R. (2008). Case Study: Pearl River Tower, Guangzhou, China . Council on Tall Buldings and Urban Habitat.
- [37] Epstein, K. (2008). How Far Can You Go? High Performig Buildings , 22-29.
- [38] Sastry, C. (2012). First Radiant Cooled Comercial Building in India - Critical analysis of energy, comfort and cost . Bangalore.

[38] Ugarte, J. (2005). Guía de la Arquitectura Bioclimática. San José: Instituto de Arquitectura Tropical de Costa Rica.

[39] Instituto Meteorológico de Costa Rica. (02 de Diciembre de 2015). IMN. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/inicio>.

[40] Instituto Meteorológico de Costa Rica. (02 de Diciembre de 2015). IMN. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/inicio>

[41] Arias Jiménez, A. C. (2007). Suelos Tropicales. San José: Universidad Estatal a Distancia.

[42] Germer, J. (1987). Estrategias. San José: SUCA

[43] Guía de Diseño Bioclimático según clasificación de zonas de Vida de Holdridge. (2013). San José: UCR.

[44] Instituto Costarricense de Electricidad . (24 de Septiembre de 2017). Grupo ICE. Obtenido de http://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/electricidad/eficiencia-energetica/!ut/p/z1/jZBBC4JAEIV_jVdnTNOt2xKimEKRo-eo1NGwV1BXdsp-f1Ekqc24zfG8e7wG-DGFid3AueyELUSTnsJ2aerT2hmuugT-4KDjlrB-U5IDM3ZWhCNAcyNoiDoK-SaZS8Cbwlsjh5_DMV5-gmATb-PgIotx-glsQ58GXhH_mXjAeCnSd5-o

[45] Giacomini. (2016). Equipamiento Existente. Barcelona : ExSite.

[46] ASHRAE . (2001). ANSI / ASHRAE Standard 62.1 (Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality). Atlanta.

