



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.

Instituto de Investigaciones Históricas – Facultad de Arquitectura – Facultad de Estudios Superiores Aragón

Maestría en Arquitectura - Tecnología

ENFRIAMIENTO HIDRÓNICO DE LA MASA TÉRMICA DEL CONCRETO

Tesis para optar por el Grado de Maestra en Arquitectura
PRESENTA:

Arq. Diana Cristina Calderón Castillo

DIRECTOR DE TESIS:

Mtro. Leonardo B. Zeevaert Alcántara. Facultad de Arquitectura.

COMITÉ TUTOR:

Mtro. Arturo Valeriano Flores. Facultad de Arquitectura.

Mtro. Ernesto Ocampo Ruíz. Facultad de Arquitectura.

Mtro. Alberto Muciño Vélez. Facultad de Arquitectura.

Dr. Mauro Valdés Barrón. Instituto de Geofísica.

México, D.F., Octubre del 2015.



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.

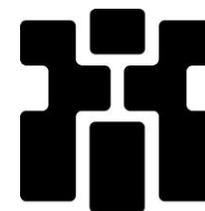




Facultad de Arquitectura



Facultad de Estudios Superiores - Aragón



Instituto de Investigaciones Históricas





Agradecimientos:

Al mtro. Leonardo Zeevaert Alcantára, por la transmisión de su conocimiento y por el apoyo en el desarrollo de la investigación.

Al mtro. Arturo Valeriano, por el apoyo durante el proceso del experimento y en el análisis de los resultados.

A los maestros y sinodales que he tenido el placer de tomar sus clases y me han apoyado en el transcurso de la maestría.

Al ing. Oscar Cruz Gómez por la asesoría en la aplicación del sistema de enfriamiento.

A la UNAM por el apoyo PAEP recibido para la asistencia y participación como ponente en el XI Congreso Iberoamericano ANES en Querétaro, México; en el 1er Foro de Urbanismo y Arquitectura en el espacio público en Playa del Carmen, México; y en el II Congreso de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes en Sevilla, España. Asimismo al Posgrado de Arquitectura, al Laboratorio de Interacción con el Medio y al Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica.

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

A mi familia, amigos y a Jorge por el apoyo incondicional para seguir realizándome académicamente.





CONTENIDO

Introducción.	1
1. Antecedentes.	9
1.1 Cubiertas.....	10
1.2 Muros de agua.....	12
1.3. Suelo Radiante.....	16
2. La envolvente.	27
2.1 Modos de transferencia de calor en edificios.	28
2.2 Masa e Inercia térmica.	29
2.3 Flujo de calor de los materiales (conducción).	30
2.4 Materiales recomendados.....	31
2.5 Concreto.	32
2.5.1 <i>Propiedades del concreto.</i>	33
2.5.2 <i>Dosificación/proporción</i>	33
2.5.3 <i>Temperaturas del concreto.</i>	34
2.5.4 <i>Aplicaciones en la arquitectura.</i>	34
3. Caso de estudio	37
3.1 El clima.....	39



3.2 San Pedro Sula, Honduras.	40
3.3 Comparación del Clima cálido húmedo en México con San Pedro Sula, Honduras.....	44
3.4 Confort.....	46
3.5 Gráfica Psicométrica.....	47
3.6. Estrategias de diseño.....	49
4. Demanda de energía y construcción.....	57
4.1 Demanda de energía en Honduras.....	57
4.2 Construcción en San Pedro Sula, Honduras.	59
4.3 Vivienda estándar.....	62
4.4 Comparación vivienda estándar vs. una vivienda con sistemas pasivos de enfriamiento.....	63
5. Sistema de enfriamiento.....	69
5.1 Sistema de enfriamiento hidrónico.....	69
5.2 Instalación.....	72
5.3 Funcionamiento.....	74
5.4 Componentes	75
5.5 Diseño.....	77
5.6 Distribución del sistema.....	78
5.7 Condensación.....	79



5.8 Sistemas de enfriamiento con energía solar. 80

 5.8.1 Sistema frío Solar para enfriamiento radiante. 81

 5.8.1.1 Funcionamiento. 81

6. Diseño del experimento 85

 6.1 Descripción del método..... 87

 6.2 Ubicación Experimento. 87

 6.3 Instrumentos de medición. 88

 6.3.1 Calibración 90

 6.4 Etapas del proceso experimental. 92

 6.4.1 Proceso experimental etapa 1: Análisis térmica de la vivienda. 93

 6.4.2 Proceso experimental etapa 2: Enfriamiento de la masa térmica. 96

 6.4.2.1 Materiales..... 98

 6.4.2.2 Instalación del experimento: 99

 6.4.2.3 Instalación de los equipos de medición: 100

 6.4.2.4 Variables: 101

 6.5 Condiciones en las que se desarrollaron el experimento. 103

7. Interpretación de los resultados..... 107

 7.1. Etapa 1: Análisis térmica de la vivienda. 107



7.2 Etapa 2: Comparación de enfriamiento del sistema hidráulico en la masa térmica.....	113
7.2.1 Comparación de enfriamiento del sistema hidráulico en la masa térmica en clima cálido templado subhúmedo.	113
7.2.1.1 Laboratorio de Interacción con el Medio (LIM).	113
7.2.1.2 Observatorio LIM (azotea edificio J).	127
7.2.2 Comparación de enfriamiento del sistema hidráulico en la masa térmica en clima cálido húmedo.	156
Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	165
Aplicaciones del sistema.....	171
Recomendaciones del experimento	172
Futuras líneas de investigación	172
Referencias	175
Bibliografía.....	177
Hemeroteca.....	178
Internet.....	180
Anexos	



Lista de Figuras.

Figura 1. Pérdidas y ganancias de calor de las superficies. Fuente: Autoría propia..... 9

Figura 2. Identificación de estrategias de diseño para el control del clima para enfriar. Fuente: Traducido del libro de Watson D. (1979).10

Figura 3. Funcionamiento del Sistema Skytherm durante el día. Fuente: Givoni (1994), p.p 102..... 11

Figura 4. Funcionamiento del Sistema Skytherm durante la noche. Fuente: Givoni (1994), p,p 102..... 11

Figura 5. Transferencia de calor de una masa de almacenamiento de concreto y de agua. Fuente: Redibujado del libro de Mazria, 1979, p.p 152..... 13

Figura 6. Orientación del muro de agua. Fuente: Mazria, 1979..... 14

Figura 7. Orientación del muro de agua. Fuente: Mazria, 1979..... 14

Figura 8. Tamaño de los tubos cilíndricos. Fuente: Hopper, 2014. 15

Figura 9. Enfriamiento conductivo por el contacto con el suelo. Fuente: Zeevaert (1998), p.p 58. 16

Figura 10. Sistema Hypocausto. Fuente: Moe, 2010..... 17

Figura 11. Sistema coreano Ondol. Fuente: Dibujo modificado retomado del artículo de Bean, Olesen, & Woo Kim, 2010, p.p 44. 18

Figura 12. Sistema coreano Ondol. Fuente: Moe, 2010. 18

Figura 13. Propaganda del sistema de calefacción radiante. Fuente: Bean, Olesen & Woo Kim, 2010, p.p 54. 19

Figura 14. Detalle de la construcción del piso del experimento. Fuente: Traducido del artículo de Leigh, Song, Lee, & Hwang, 2005. 20

Figura 15. Concepto del enfriamiento radiante en el piso integrado con el sistema de ventilación controlada. Fuente: Traducido del artículo de Leigh, Song, Lee, & Hwang, 2005. 21

Figura 16. Esquema de distribución de la planta del centro comercial..... 22

Figura 17. Tipos de envolvente. Fuente: Autoría propia. 27

Figura 18. Segunda ley de la termodinámica. Fuente: Odum, 1995. 28

Figura 19. Modos de transferencia de calor desde un objeto de temperatura mayor a uno con temperatura más bajo. Fuente: Addington & Schodek, 2005, pp. 70. 28

Figura 20. Gradiente de temperatura dentro de un muro. 30

Figura 21. Comienzo del análisis de los factores climáticos del lugar (Chermayeff-Alexander/1963). Fuente: (Monroy, 2006, p.p 62). 39

Figura 22. Vectores del entorno que modifican el microclima de un lugar. Fuente: Monroy, 2006, p.p 62. 39

Figura 23. Factores ambientales internos y externos. Fuente: Monroy, 2006, p.p 61. 39

Figura 24. Mapa de Honduras. 40

Figura 25. Mapa clima de México. Fuente: <http://smn.cna.gob.mx> 44

Figura 26. Diferentes temperaturas de las áreas de una vivienda. 49

Figura 27. Ventilación cruzada. Fuente: Dibujos realizados por el Arq. Guillermo Altamirano. 49



Figura 28. Irradiación Solar en BTU/m² en el área de paredes verticales en la ciudad de Dodge, Kansas. Fuente: Traducido del libro de Watson D., 1979. 50

Figura 29. Transformación en la forma de un edificio de carácter horizontal a vertical. Fuente: Zeevaert. L. (1998) 50

Figura 30. Ventilación del techo. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3. 51

Figura 31. Esquemas de la extracción del aire caliente en el techo. Fuente: Dibujos realizados por el Arq. Guillermo Altamirano..... 51

Figura 32. Análisis del tiempo en que incide el sol en la envolvente. Fuente: Traducido del libro de Watson D., 1979..... 52

Figura 33. Utilizar materiales con alta masa térmica en el interior para reducir la temperatura. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3..... 52

Figura 34. El uso de colores claros en los materiales del edificio y en el techo, reducen la conducción de calor. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3. 52

Figura 35. Protección de las ventanas diseñadas para esta latitud que puede reducir o eliminar el uso de aire acondicionado. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3. 53

Figura 36. Utilización de ventiladores para el movimiento del aire del interior. Fuente: Climate Consultant 5.3. 53

Figura 37. Diseño del edificio para minimizar el sobrecalentamiento y disminuir el tamaño de los equipos de aire acondicionado. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3. 53

Figura 38. Demanda de energía en San Pedro Sula. Fuente: Méndez (2014) 59

Figura 39. Esquema vivienda estándar. Fuente: Mabel Méndez, 2010, p.p 47. 63

Figura 40. Sección de la vivienda estándar. Fuente: Méndez 2010, p.p 48. 63

Figura 41. Esquema vivienda bioclimática. Fuente: Mabel Méndez , 2010, p.p 49. 64

Figura 42. Esquema vivienda estándar. Fuente: Mabel Méndez, 2010, p.p 50. 64

Figura 43. Proporción del exceso de la emisión de calor del cuerpo. Fuente: Traducido del libro de Moe, 2010, pp.69 69

Figura 44. Comparación del sistema hidrónico del edificio con el cuerpo humano. Fuente: Moe, 2010, p.p 70..... 70

Figura 45. Comparación del porcentaje de consumo de energía entre el sistema convencional de HVAC y el sistema de enfriamiento radiante con el sistema HVAC. Fuente: Traducido de Energy Design Resources, 2003. 70

Figura 46. Configuración de construcción para la calefacción y el enfriamiento estándar del piso por medio de tubos de polietileno incrustados la losa de concreto. Fuente: Traducido del artículo de Nall, 2013, p.p 34. 72

Figura 47. Diagrama del sistema hidrónico. Fuente: autoría propia. 74

Figura 48. Esquema del funcionamiento del sistema empleando una bomba de calor para enfriar el agua del sistema. Fuente: Autoría propia..... 74

Figura 49. Comparación con la distribución termal asimétrica con la simétrica, según Fiton. Fuente: Traducción del libro de Moe, 2010, p.p 74..... 77

Figura 50. Distribución en serpentín. Fuente: Funcosa, 2014. 78

Figura 51. Distribución en doble serpentín. Fuente: Funcosa, 2014. 78



Figura 52. Distribución en espiral. Fuente: Funcosa, 2014..... 79

Figura 53. Distribución del recorrido de la tubería. Fuente: Viega, 2014, p.p 89. 79

Figura 54. Instalación del sistema hidrónico en el plafón o cielo falso. 79

Figura 55. Concepto del sistema de suelo radiante con el sistema de ventilación. Fuente: Seo, J.M.; Song, D. & Lee, K.H. (2014), p.p 220. 80

Figura 56. Procesos de carga y descarga de máquina de absorción ClimateWell. Fuente: ClimateWell, 2013..... 82

Figura 57. Esquema del funcionamiento del sistema ClimateWell 82

Figura 58. Esquema del funcionamiento del sistema ClimateWell en viviendas unifamiliares. Fuente: ClimateWell, 2013. 83

Figura 59. Distribución del edificio de Unidad de Posgrado UNAM..... 87

Figura 60. Esquema de localización de los sensores en las habitaciones..... 94

Figura 61. Distancia a la que se coloca la tubería en el prototipo. Fuente: Autoría propia. 96

Figura 62. Ubicación de los sensores en el interior de los bloques de concreto..... 101

Figura 63. Vectores del entorno que modifican el microclima de un lugar. Fuente: Monroy, 2006, p.p 62. 101

Figura 64. Esquema de la relación de las variables que influyen en el bloque de referencia..... 102

Figura 65. Esquema de la relación de variables que influyen en el bloque con el sistema de enfriamiento hidrónico. 102

Figura 66. Esquema de localización de los sensores en las habitaciones..... 107

Figura 67. Diagrama Solar equidistante a las 11:00 am. Fuente: software SunSurveyor..... 108

Figura 68. Esquema de la colocación de los sensores en el bloque. 136

Figura 69. Esquema de sistema hidrónico con el sistema del aire acondicionado. Fuente: Autoría propia..... 170

Lista de imágenes.

Imagen 1. Diferentes tipos contenedores de agua. Fuente: Bainbridge, 1981..... 13

Imagen 2. Muro de agua que calienta el local contiguo. Fuente: (Mazria, 1979, p.p 154)..... 15

Imagen 3. Tubos cilíndricos de la empresa Solar Components Corporation. Fuente: Hopper, 2014. 15

Imagen 4. Sistema Hypocausto. Fuente: Moe, 2010..... 17

Imagen 5. Panel de pared radiante en forma antes de que se vierta el hormigón. Fuente: (Holmes & MacPherson, 2011) 22

Imagen 6. Phano Science Center Wolfsburg. Fuente: Kottas, 2011..... 35

Imagen 7. Iglesia sobre el agua. Fuente: Arquine, 2013..... 35

Imagen 8. Casa en Monterrey. Fuente: <http://designaholic.mx>, recuperado el 14 de mayo del 2015. 36

Imagen 9. Panorámica general de San Pedro Sula. Fuente: Obtenido el 20 de agosto del 2014 de en.wikipedia.org..... 40

Imagen 10. Ubicación de la estación meteorológica La Mesa en el aeropuerto de San Pedro Sula. Fuente: Google earth. 42



Imagen 11. Tipología de las viviendas estándar en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia..... 62

Imagen 12. Tipología de las viviendas estándar en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia..... 62

Imagen 13. Panorama de viviendas estándar y bioclimáticas. Fuente: Mabel Méndez (2010). 63

Imagen 14. Fotos de las viviendas con sistemas pasivos del proyecto El Barrial, San Pedro Sula. Fuente: fotos propias. 64

Imagen 15. Fotos de las viviendas con sistemas pasivos del proyecto El Barrial, San Pedro Sula. Fuente: fotos propias. 65

Imagen 16. Colocación de la banda perimetral en el contorno de la superficie. Fuente: Funcosa, 2014. 72

Imagen 17. Colocación del panel aislante en la superficie. Fuente: Funcosa, 2014. 72

Imagen 18. Instalación de la tubería en la forma que se desea. Fuente: Funcosa, 2014..... 73

Imagen 19. Instalación de los colectores, conectando todos los circuitos de forma ordenada. Fuente: Funcosa, 2014. 73

Imagen 20. Realización de la prueba de presión para asegurar que no existan fugas en la instalación. Fuente: Funcosa, 2014. 73

Imagen 21. Colocación del firme final superando 4 cm de la tubería. Fuente: Funcosa, 2014..... 73

Imagen 22. Colector de distribución del piso radiante, mostrando la conexión individual de los tubos de polietileno. Fuente: Autoría propia..... 75

Imagen 23. Panel de la marca Viega para la instalación de la tubería. Fuente: Autoría propia..... 75

Imagen 24. Panel aislante para la instalación de la tubería. Panel de la marca Viega. Fuente: Autoría propia. 76

Imagen 25. Diversos tubos de la marca Viega. Fuente: Autoría propia. 76

Imagen 26. Vista de la azotea del edificio J de la Unidad de Posgrados. Fuente: Autoría propia..... 88

Imagen 27. Laboratorio de Tecnología. Fuente: Autoría propia. 88

Imagen 28. Adquisidor de datos marca Agilent. Fuente: Autoría propia..... 89

Imagen 29. Tarjeta que conecta los dispositivos de medición con el adquisidor de datos. Fuente: Autoría propia..... 89

Imagen 30. Termistores que se utilizarán para medir la temperatura del agua y de la masa térmica. Fuente: Recuperado el 01 de agosto del 2015. Obtenido de es.rs-online.com 90

Imagen 31. Equipos utilizados para el experimento realizado en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Recuperado el 15 de octubre del 2014. Obtenido de www.onsetcomp.com 90

Imagen 32. Calibración de los termistores. Fuente: Autoría propia. 91

Imagen 33. Fotos de la fachada frontal de la vivienda. Fuente: autoría propia..... 93

Imagen 34. Foto de la fachada lateral de la vivienda. Fuente: autoría propia..... 93

Imagen 35. Habitación 2, con orientación suroeste. Fuente: Autoría propia. 94

Imagen 36. Ubicación del HOBO U12-11 en la habitación 2. . Fuente: Autoría propia..... 94

Imagen 37. Habitación 3, orientación sureste. . Fuente: Autoría propia 94

Imagen 38. Ubicación del HOBO U12-011 en la habitación 4. Fuente: Autoría propia..... 95

Imagen 39. Habitación 4, orientación noroeste. Fuente: Autoría propia..... 95

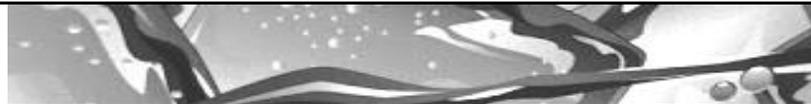
Imagen 40. Ubicación del HOBO U12-011 en la habitación 4. Fuente: Autoría propia..... 95



Imagen 41. Habitación Principal, con orientación noreste. Ubicación del HOBO U12-011. Fuente: Autoría propia.....	95
Imagen 42. Realización del encofrado. Fuente: Autoría propia.....	96
Imagen 43. Colocación de la tubería y de la varilla de refuerzo. Fuente: Autoría propia.....	97
Imagen 44. Prueba para corroborar el flujo del agua en la tubería. Fuente: Autoría propia.....	97
Imagen 45. Mezcla de concreto se vierte en el encofrado. Fuente: Autoría propia.....	97
Imagen 46. Prueba de la circulación del agua con la bomba. Fuente: Autoría propia.....	97
Imagen 47. Colado del bloque de concreto en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia.....	98
Imagen 48. Bomba de fuente sumergible. Fuente: Autoría propia.....	99
Imagen 49. Instalación del experimento en el laboratorio. Fuente: Autoría propia.....	99
Imagen 50. Instalación del experimento en el laboratorio. Fuente: Autoría propia.....	100
Imagen 51. Instalación del experimento en la azotea. Fuente: Autoría propia.....	100
Imagen 52. Experimento en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia.....	100
Imagen 53. Localización de los termistores en el experimento en el laboratorio. Fuente: Autoría propia.....	101
Imagen 54. Localización de los termistores en el experimento. Fuente: Autonomía propia.....	114
Imagen 55. Imágenes térmicas de los bloques de concreto a las 3:56 pm. Fuente: Autoría propia.....	120
Imagen 56. Comportamiento térmico de la masa térmica de ambos bloques el 25 de noviembre del 2014. Fuente: Autonomía propia.....	125
Imagen 57. Imágenes del experimento en la azotea. Fuente: Autonomía propia.....	127
Imagen 58. Imágenes térmicas de los bloques el día 02 de marzo del 2015 a las 2:10 pm. Fuente: Autoría propia.....	132
Imagen 59. Ubicación de los sensores en la superficie inferior de los bloques.....	135
Imagen 60. División de las superficies en todas las caras de los bloques. Fuente: Autoría propia.....	136
Imagen 61. Imagen térmica de ambos bloques a las 12:30 pm el día 06 de marzo del 2015. Fuente: Autoría propia.....	153
Imagen 62. Imágenes térmicas de los bloques a las 4:30 pm el día 06 de marzo del 2015. Fuente: Autoría propia.....	153
Imagen 63. Imagen térmica del bloque de referencia. Fuente: Autoría propia.....	154
Imagen 64. Instalación del experimento en la vivienda en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autonomía propia.....	156
Imagen 65. Imagen térmica de los bloques el día 25 de noviembre del 2014.....	168

Lista de Gráficas.

Gráfica 1. Humedad máxima, relativa y mínima promedio histórica de 1954 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.....	41
Gráfica 2. Temperatura máxima, media y mínima promedio histórica de 1954 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.....	41



Gráfica 3. Precipitación promedio histórica de 1944 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.41

Gráfica 4. Brillo solar histórica de 1990 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.42

Gráfica 5. Radiación solar entre el 2012 y el 2013 en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras. Fuente: Kawas, Mejía Escobar, & Gómez Canales, 2013.....44

Gráfica 6. Comparación de la temperatura entre la ciudad de San Pedro sula, Honduras y Villahermosa, México. Fuente: Autoría propia.45

Gráfica 7. Comparación de la humedad relativa entre la ciudad de San Pedro Sula, Honduras y Villahermosa, México. Fuente: Autoría propia.....45

Gráfica 8. Carta psicométrica de la ciudad de San Pedro Sula por hora. Fuente: Elaboración propia con el software Climate Consultant 5.3.48

Gráfica 9. Energía generada en el sistema ENEE en el año 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).....57

Gráfica 10. Demanda máxima histórica del sistema nacional interconectado de 1992 al 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).....58

Gráfica 11. Energía interna vendida por región, 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).....58

Gráfica 12. Tipos de usos de energía en la zona norte, 2011. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).58

Gráfica 13. Distribución de energía eléctrica por hogar en San Pedro Sula.59

Gráfica 14. Estructura del área total construida, según municipio de enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de honduras, BCH, 2012.60

Gráfica 15. Mercado de las edificaciones, enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).60

Gráfica 16. Principales materiales utilizados para paredes en el 2012.61

Gráfica 17. Principales materiales utilizados para pisos en el 2012. Fuente: Banco Central de Honduras 2012).61

Gráfica 18. Principales materiales utilizados para techos en el 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).....61

Gráfica 19. Comparación del confort térmico según los usuarios.....65

Gráfica 20. Comparación del consumo de energía. Fuente: Méndez, 2010, p.p65

Gráfica 21. Gráfica de dispersión del termistor 1.....92

Gráfica 22. Comparación de la temperatura en los espacios el día 24 de diciembre del 2014.....109

Gráfica 23. Comparación de la humedad en los espacios el día 24 de diciembre del 2014.110

Gráfica 24. Comparación de la temperatura el día 17 de enero del 2015.111

Gráfica 25. Comparación de la humedad relativa el día 17 de enero del 2015.112

Gráfica 26. Comparación de la temperatura de la masa térmica del bloque de referencia con el bloque que posee el sistema de enfriamiento radiante del día 21-11-14.115

Gráfica 27. Temperatura, Humedad Relativa y Temperatura de punto de rocío en el laboratorio el día 21 de noviembre del 2014.....116

Gráfica 28. Radiación vertical dentro del espacio que incide en los bloques de concreto en la ventana.117



Gráfica 29. Comparación temperatura ambiente con la temperatura al interior de los bloques.	118
Gráfica 30. Temperatura del agua de entrada comparada con la temperatura del punto de rocío el 21 de noviembre del 2014.....	119
Gráfica 31. Comparación de la temperatura del agua de entrada al bloque y la de salida el 21 de noviembre del 2014.	119
Gráfica 32. Comparación de la temperatura ambiente de los días 21 y 25 de noviembre del 2014.	121
Gráfica 33. Comparación de la humedad relativa el 21 y 25 de noviembre del 2014.	122
Gráfica 34. Comparación de la temperatura del punto de rocío el 21 y 25 de noviembre del 2014.....	122
Gráfica 35. Comparación de la temperatura de la masa térmica del bloque radiante el 21 y 25 de noviembre.	123
Gráfica 36. Comparación de la temperatura de la masa térmica el 25 de noviembre del 2014.....	124
Gráfica 37. Comparación de la temperatura del agua de entrada con el agua de salida del sistema el 25 de noviembre del 2014.	124
Gráfica 38. Correlación entre la temperatura del interior del bloque hidrónico y la temperatura ambiente del día 25 de noviembre del 2014.	126
Gráfica 39. Correlación entre la temperatura del interior del bloque de referencia y la temperatura ambiente del día 25 de noviembre del 2014.	126
Gráfica 40. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el día 02 de marzo del 2015. Fuente: Estación meteorológica de Geofísica. UNAM	128
Gráfica 41. Radiación solar el día 02 de marzo del 2015. Fuente: Estación meteorológica de Geofísica UNAM	129
Gráfica 42. Comparación de la temperatura del interior de los bloques con la temperatura ambiente y la radiación solar el 02 de marzo del 2015.	130
Gráfica 43. Comparación de temperatura del agua de entrada con el de salida el 02 de marzo del 2015.	131
Gráfica 44. Correlación entre la temperatura al interior del bloque de referencia con la radiación solar entre las 10:25 am y las 12:00 pm (máximo nivel de radiación).	133
Gráfica 45. Correlación entre la temperatura al interior del bloque con el sistema hidrónico con la radiación solar entre las 10:25 am y las 12:00 pm (máximo nivel de radiación).	133
Gráfica 46. Correlación con la Temperatura ambiente y la temperatura al interior del bloque de referencia.	134
Gráfica 47. Correlación con la Temperatura ambiente y la temperatura al interior del bloque con el sistema hidrónico.	134
Gráfica 48. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el día 06 de marzo del 2015.	137
Gráfica 49. Radiación solar el día 06 de marzo del 2015.....	138
Gráfica 50. Comparación de la temperatura al interior de ambos bloques con respecto a la temperatura ambiente y a la radiación solar el día 06 de marzo del 2015.	139
Gráfica 51. Comparación de la temperatura interior y de la superficie inferior del bloque de referencia del 06 de marzo del 2015.....	140
Gráfica 52. Comparación de la Temperatura interior y de la superficie inferior del bloque hidrónico el 06 de marzo del 2015.	141
Gráfica 53. Comparación de la temperatura de la superficie inferior de ambos bloques el día 06 de marzo del 2015.....	142
Gráfica 54. Comparación de la temperatura del agua de entrada y de salida del sistema hidrónico el día 06 de marzo del 2015.	143



Gráfica 55. Comparación de temperatura entre las superficies y el interior del bloque de referencia el 06 de marzo del 2015 entre las 11:30 am y la 1:30 pm. 146

Gráfica 56. Comparación de temperatura entre las superficies y el interior del bloque hidrónico el 06 de marzo del 2015 entre las 11:30 am y la 1:30 pm. 147

Gráfica 57. Comportamiento de la temperatura de la superficie superior, inferior e interior del bloque de referencia..... 148

Gráfica 58. Comportamiento de la temperatura de la superficie superior, inferior e interior del bloque con el sistema de enfriamiento hidrónico..... 148

Gráfica 59. Correlación entre la temperatura al interior del bloque de referencia con la radiación solar entre las 6:45 am y las 1:00 pm (máximo nivel de radiación). 149

Gráfica 60. Correlación entre la temperatura al interior del bloque hidrónico con la radiación global entre las 6:45 am y la 1:00 pm. 150

Gráfica 61. Correlación entre la temperatura al interior del bloque de referencia y la temperatura ambiente el día 06 de marzo del 2015. 151

Gráfica 62. Correlación entre la temperatura al interior del bloque hidrónico y la temperatura ambiente el día 06 de enero del 2015... 152

Gráfica 63. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el 08 de enero del 2015. 157

Gráfica 64. Comparación temperatura ambiente con la temperatura de la masa térmica del concreto con el funcionamiento del sistema hidrónico el día 08-01-15..... 158

Gráfica 65. Comparación temperatura de entrada del agua con la temperatura del punto de rocío el día 08 de enero del 2015. 159

Gráfica 66. Correlación entre la Temperatura interior del bloque hidrónico y la Temperatura ambiente el día 08 de enero del 2015. 160

Gráfica 67. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el día 12 de enero del 2015. 161

Gráfica 68. Comparación de la temperatura ambiente con la temperatura al interior del bloque el día 12 de enero del 2015. 162

Gráfica 69. Correlación entre la temperatura al interior del bloque y la temperatura ambiente el día 12 de enero del 2015. 163

Lista de Tablas.

Tabla 1. Efecto del espesor de pared sobre la amplitud de las oscilaciones diarias de la temperatura del aire del local..... 14

Tabla 2. Especificaciones de tamaño de los tubos cilíndricos. Fuente: Hopper, 2014..... 16

Tabla 3. Resultados del experimento. Fuente: Leigh, Song, Lee, & Hwang, 2005..... 21

Tabla 4. Tabla comparativa del costo de ambos sistemas. Fuente: Sastry, G., 2012. 23

Tabla 5. Propiedades térmicas para diversos materiales según datos de la ASHRAE. 33

Tabla 6. Relación agua/cemento por peso. 34

Tabla 7. Acción de las temperaturas altas sobre el concreto..... 34

Tabla 8. Datos climáticos de la ciudad se San Pedro Sula. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013. 42



Tabla 9. Salidas y puestas del Sol. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.....	43
Tabla 10. Energía generada en el sistema ENEE en el año 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).	57
Tabla 11 Área total construida según destino de enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).....	60
Tabla 12. Área total construida según estrato socioeconómico de enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).....	61
Tabla 13. Aparatos de medición a utilizar.	88
Tabla 14. Calibración termistor 1.	91
Tabla 15. Resultados promedio, mínimo y máximo de las mediciones el día 21 de noviembre del 2014.....	114
Tabla 16. Resultados promedio, mínimo y máximo durante el período de las mediciones el día 25-11-14.	121
Tabla 17. Tabla comparativa del 21 y 25 de noviembre del 2014.	123
Tabla 18. Resultados de las pruebas realizadas el 02 de marzo del 2015.	128
Tabla 19. Resultados de las mediciones realizadas el 06 de marzo del 2015.	137
Tabla 20. Temperatura promedio en las caras de los bloques el 06 de marzo del 2015.	144
Tabla 21. Temperatura promedio en las caras de los bloques el 06 de marzo del 2015.	145
Tabla 22. Comparación del día 02 y 06 de marzo del 2015.....	154
Tabla 23. Mínimo, máximo y promedio del día 08 de enero del 2015.....	157
Tabla 24. Datos del día 12 de enero del 2015.	160





Resumen

En este documento se presentan los resultados de la investigación que consistió en analizar el sistema hidrónico radiante activo como sistema de enfriamiento de la masa térmica del concreto en clima templado subhúmedo (ciudad de México, México) y en clima cálido húmedo (ciudad de San Pedro Sula, Honduras). En Honduras, en los últimos años se ha generado una crisis energética debido al incremento de la demanda de energía eléctrica, llegando a alcanzar la capacidad máxima que poseen las plantas generadoras de energía que abastecen la zona, teniendo como resultado que se den racionamiento de energía constantemente. Una de las principales razones de este incremento de energía es el aumento en el uso de los equipos de aire acondicionado, siendo las causas más trascendentales las altas temperaturas y humedad que presenta la ciudad y por el mal diseño de las edificaciones que no toman en cuenta el clima, siendo estas réplicas de otros países con diferente clima.

En diversos países europeos, asiáticos y en Estados Unidos utilizan el sistema hidrónico como complemento del sistema de aire acondicionado para climatizar los espacios internos, representando aproximadamente entre un 25% a un 40% de ahorro de energía eléctrica en comparación con los espacios que solamente utilizan el aire acondicionado. Siendo este ahorro variante según las condiciones climáticas del lugar. Al mencionar el sistema de enfriamiento hidrónico se refiere a la red de tuberías de PEX (polietileno reticulado) empotradas en una capa de mortero que se encuentra bajo la superficie de una edificación por donde circula agua fría.

En la investigación se plantea que con la implementación del sistema de enfriamiento hidrónico se puede disminuir la temperatura de la masa térmica del concreto para minimizar la transferencia de calor de la temperatura exterior hacia el interior. Entre los objetivos de la investigación se encuentra el análisis del porcentaje de enfriamiento de la masa térmica del concreto según las condiciones climáticas del ambiente, el análisis del tiempo requerido para el enfriamiento de la masa térmica y evitar que el sistema genere condensación en el interior de la envolvente.

La parte experimental de la investigación consiste en realizar dos prototipos de concreto. En uno de los prototipos se instala el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría, utilizando el otro prototipo como referencia. El experimento se desarrolló en tres escenarios y en dos localidades con diferente clima (Ciudad de México en México y en San Pedro Sula, Honduras). En la Ciudad de México, se realizó el experimento en el Observatorio del edificio de Posgrados de la UNAM con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema bajo la radiación directa. También se desarrolló el experimento en el Laboratorio de Interacción con el Medio en la UNAM para analizar el comportamiento del sistema de enfriamiento en condiciones de espacios interiores. En la ciudad de San Pedro Sula, Honduras; el experimento se desarrolló al interior del espacio y se comparó con los datos obtenidos en el Laboratorio en la UNAM. En el Laboratorio, la masa térmica del concreto disminuyó 6.73°C con respecto a la temperatura del ambiente y en la ciudad de San Pedro Sula, la masa térmica del concreto disminuyó 5.85°C con respecto a la temperatura del ambiente. Por lo que el sistema posee un mejor funcionamiento en clima templado subhúmedo debido a que la temperatura de rocío es más baja que en clima cálido-húmedo,



ENFRIAMIENTO HIDRÓNICO DE LA MASA TÉRMICA DEL CONCRETO

por lo que la temperatura del agua para la circulación del sistema es menor, incrementando la absorción del calor de la masa térmica del concreto.



INTRODUCCIÓN





Introducción.

El hombre, desde su origen, ha buscado en la construcción de sus refugios poder protegerse ante los elementos del entorno natural que lo rodea y la provisión de un espacio cómodo con una atmósfera favorable para poder desarrollar sus actividades cotidianas, por lo que la arquitectura busca generar condiciones de habitabilidad¹ en las edificaciones. Ramírez & otros (2007) definen el espacio habitable como aquel que es ocupado por el hombre; “es donde el hombre puede habitar y producir su vida, ser y estar en el mundo”. Asimismo indican que las condiciones de habitabilidad no solo permiten que el ser humano se sienta confortable en los espacios interiores, sino que también establece ciertos parámetros que no afecten la salud de las personas que habitan los edificios.

En las grandes ciudades, la contaminación del aire y la ganancia de calor por la radiación solar son muy elevadas, por lo que se generan edificios completamente cerrados, utilizando sistemas mecánicos de enfriamiento para poder tener las condiciones de habitabilidad deseadas. Addington & Schodek (2005) indican que solamente una cápsula espacial posee las condiciones “perfectas” en el espacio interior, debido a que se considera el ambiente exterior como hostil y solamente con la creación de un espacio separado y extremadamente controlado se puede generar las condiciones completamente ideales para el ser humano.

¹ Habitabilidad es el conjunto de condiciones físicas y no físicas que permiten la permanencia humana en un lugar, y es un grado mayor o menor la gratificación de la existencia. “Lo habitable implica la relación entre los espacios arquitectónicos y el hombre habitador” (Ramírez & otros, 2007, p.p 17).

En la arquitectura, al desarrollar edificios que posean las condiciones “perfectas” en el espacio interior, ha generado que estas edificaciones se encuentren completamente cerradas sin tomar en cuenta el clima del lugar ni el entorno, por lo tanto emplean sistemas de aire acondicionado para crear dichas condiciones; lo cual ha causado un incremento en el uso de estos sistemas de hasta un 46%, teniendo un aumento del 7% cada año (Santamouris, 2007). Este incremento es una de las principales causas en el aumento del consumo de la energía eléctrica en los edificios. En el 2010, la Unión Europea determinó que los edificios son los responsables de consumir el 40% de la energía producida, así como ser el foco del 36% de las emisiones de CO₂ (Rosales & otros, 2012); esto se debe a que la gente pasa casi el 90% del tiempo en los edificios y a la energía utilizada para climatizar.

Lozano (2008) señala que las fachadas de los edificios representan un porcentaje significativo del consumo de la demanda de la energía eléctrica hasta de un 40%, debido a la ganancia de calor que se transmite hacia el interior; lo que genera que los equipos de aire acondicionado realicen un mayor esfuerzo para generar confort en los espacios interiores.

El caso de estudio en la investigación es la ciudad de San Pedro Sula, Honduras; la cual se encuentra localizada en la zona norte del país. En la ciudad prevalece un clima cálido húmedo, la humedad relativa promedio histórica registrada entre 1954 y el 2012 oscila entre el 74% y 86% y la temperatura media histórica del mismo período oscila entre 24.3 °C y 29°C. La temperatura máxima absoluta registrada en ese lapso de tiempo es de 44°C y la mínima absoluta es de 10°C. (Servicio Meteorológico de Honduras, 2013).



Uno de los principales problemas que posee la ciudad es el incremento en la demanda de la energía, llegando a alcanzar la capacidad máxima que poseen las plantas generadoras que abastecen la zona; teniendo como resultado que se den racionamiento de energía constantemente. Es decir, que para poder compensar la demanda con la capacidad de producción se suspende la energía en diversos sectores de la ciudad por cierto tiempo para disminuir la demanda. Entre las principales razones de este incremento de energía es el aumento en el uso de los equipos de aire acondicionado; siendo las causas más trascendentales de este incremento las condiciones climáticas de la ciudad y el mal diseño de las edificaciones que no toman en cuenta el clima, debido a que son réplicas de otros países con diferente clima.

En la ciudad, se desarrolló un proyecto de viviendas las cuales utilizan los sistemas de enfriamiento pasivo (evitar el sobrecalentamiento, la circulación del aire y evacuación del aire caliente), presentando una disminución de 4°C al interior de los espacios. El principal problema que se presenta, es que debido al cambio climático, se registran temperaturas mayores a los 40°C; por lo tanto los sistemas de enfriamiento pasivo no son lo suficiente para generar las condiciones de confort deseadas, surgiendo la necesidad de emplear los sistemas de aire acondicionado. En el desarrollo de la investigación se realiza un análisis térmico de una vivienda estándar de clase media. Las mediciones tuvieron duración de un mes, entre los meses de diciembre del 2014 y enero del 2015, siendo estos meses los que presentan la temperatura más baja según los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico de Honduras. En las mediciones se obtuvo temperaturas de 31°C al interior de las habitaciones, por lo tanto la transferencia de calor es elevada por la deficiencia del diseño y por los materiales empleados que

no generan las condiciones de confort deseadas, siendo el rango de confort de temperatura establecido por Olgay de 21°C a 27.8°C.

Como consecuencia a lo mencionado anteriormente, se plantean los siguientes cuestionamientos:

¿Se puede enfriar la masa térmica del concreto para disminuir el consumo energético generado por el uso de los sistemas de aire acondicionado? ¿Es posible realizar este enfriamiento utilizando agua, como elemento que absorba el calor de la masa térmica?

En Europa, Asia y Estados Unidos, se ha implementado el sistema hidrónico como sistema de calefacción y enfriamiento de la masa térmica, utilizando el agua como medio principal para la transferencia de calor. Al mencionar el sistema de enfriamiento hidrónico se refiere a la red de tuberías de PEX (polietileno reticulado) empotradas en una capa de mortero que se encuentra bajo la superficie de una edificación por donde circula agua fría. Se estima que el sistema de enfriamiento hidrónico tiene un ahorro entre el 25% al 40% comparado con el sistema de aire acondicionado tradicional (Energy Design Resources, 2003). El porcentaje de ahorro varía según las condiciones del clima del lugar o del espacio, debido a que la principal limitante del sistema es la condensación y para evitarla la temperatura del agua no debe de ser menor a la temperatura del punto de rocío; por lo tanto entre más elevado es la temperatura del punto de rocío, menor será el porcentaje de ahorro del sistema.

Se plantea como **hipótesis** que con la implementación del sistema de enfriamiento hidrónico se puede disminuir la temperatura de la masa térmica del concreto para minimizar la



transferencia de calor de la temperatura exterior hacia el interior.

Los **objetivos** que se plantean en esta investigación que permitirán guiar los trabajos a realizar y hacer una evaluación final son los siguientes:

General:

- Analizar el funcionamiento del sistema de enfriamiento hidrónico en el clima del Distrito Federal, México y en San Pedro Sula, Honduras.

Específicos:

- Analizar el porcentaje de enfriamiento de la masa térmica del concreto según las condiciones climáticas del ambiente.
- Analizar el tiempo requerido para el enfriamiento de la masa térmica.
- Evitar que el sistema genere condensación en el interior de la envolvente.

Para comprobar la hipótesis se desarrolla una parte experimental en la investigación, la cual se divide en dos etapas: En la primera etapa se realizan mediciones del comportamiento térmico (temperatura y humedad relativa) al interior de una vivienda de clase media en la ciudad de San Pedro Sula durante un mes. El objetivo de esta etapa es analizar la ganancia de calor de los materiales de la envolvente de las condiciones ambientales del exterior hacia el interior.

La segunda etapa consiste en realizar dos prototipos de concreto. En uno de los prototipos se instala el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría, utilizando el

otro prototipo como referencia. Esta etapa tiene como fin poder analizar el funcionamiento del sistema hidrónico para conocer el porcentaje de enfriamiento de la masa térmica del concreto en un clima templado subhúmedo (ciudad del Distrito Federal, México) y en un clima cálido húmedo (ciudad de San Pedro Sula, Honduras). El experimento se realiza en dos localidades: en la ciudad del Distrito Federal se desarrolla en el edificio J de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional de México, por la facilidad de poder realizar el experimento y por la disponibilidad de los equipos de medición; y en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras, debido a que es el caso de estudio.

La relevancia de la investigación es el análisis de tecnologías que se implementan en otros países para disminuir el consumo energético en las edificaciones y poder corroborar su funcionamiento y factibilidad de instalarlo en zonas cálidas, donde el uso de los equipos de aire acondicionado es elevado por las condiciones climáticas ambientales. Enteria y Mizutani (2011), mencionan que la innovación tecnológica es necesaria para los futuros sistemas sustentables de energía; donde las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, se puedan mantener o reducir. Al mismo tiempo indican que los problemas de energía, medio ambiente y tecnología se encuentran relacionados entre sí y deben ser tratados con interconectividad, si se desea alcanzar un ambiente limpio y verde con condiciones para la sobrevivencia de la humanidad.





CAPITULO 1: Antecedentes



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES



1. Antecedentes.

Se considera cómo edificio rentable energéticamente, como aquel que no emplea energía extra para su climatización, es decir que no requiere de sistemas mecánicos para generar espacios confortables. Zeevaert (1981) indica que en la arquitectura, *“el diseño pasivo analiza la respuesta térmica de las estructuras con el objetivo de cubrir parcialmente o totalmente las demandas de energía necesarias para su calentamiento y/o enfriamiento. Por lo tanto el diseño de una buena iluminación natural y con ello la reducción de los equipos de aire acondicionado trae como resultado un ahorro de energía”*.

En climas cálidos, el análisis térmico es esencial en la etapa inicial del desarrollo arquitectónico de un edificio para desarrollar espacios confortables térmicamente; lo cual se logra por medio de elementos arquitectónicos o materiales que eviten las ganancias de calor y promuevan las pérdidas del mismo. Para dicho análisis térmico es vital analizar las condiciones climáticas del lugar, debido a que no todas las soluciones arquitectónicas son viables y en casos extremos se vuelve necesario implementar equipos mecánicos para el acondicionamiento de los espacios, por lo que se busca generar una máxima eficiencia energética. En este tipo de climas el almacenamiento térmico de los materiales cobra mayor importancia debido a que amortigua la temperatura al interior y protege de la radiación solar e infrarroja.

Los materiales de las superficies de las edificaciones poseen pérdidas y ganancias de calor con los sumideros de calor, los cuales se muestra en la figura 1. La superficie superior posee ganancias y pérdidas de calor por el ambiente, las superficies

laterales por el contexto y el ambiente; y la superficie inferior por el sub-suelo.

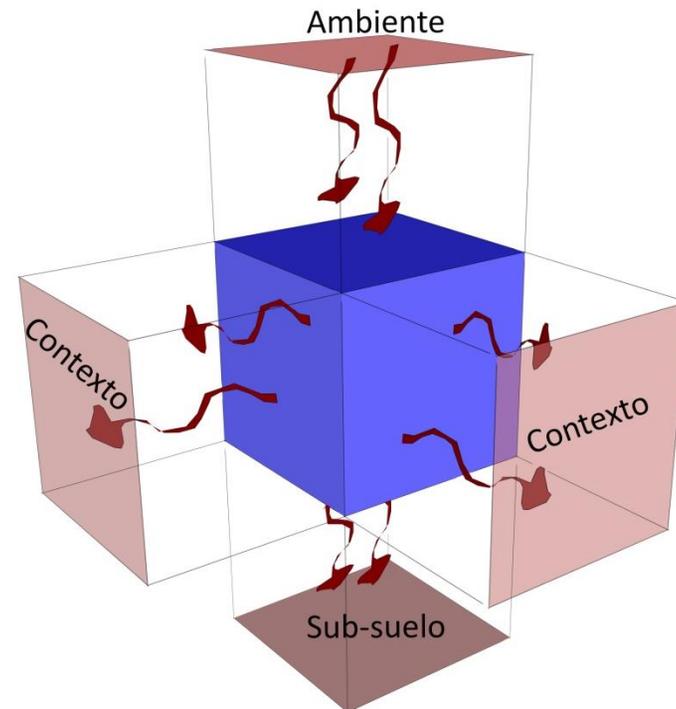


Figura 1. Pérdidas y ganancias de calor de las superficies. Fuente: Autoría propia.

Watson (1979) propone estrategias de diseño para controlar las condiciones del clima en el interior de los espacios, las cuales se muestran en la figura 2, partiendo en dos aspectos principales: evitar la ganancia de calor y promover su pérdida; para lograrlo propone que deben de realizarse utilizando diversos sumideros naturales de calor, los cuales son la atmósfera, el cielo y el subsuelo. Al mismo tiempo indica las estrategias que debe de realizarse según las cuatro formas en la



que se realiza la transferencia de calor: radiación, conducción, convección y evaporación.

	Conducción	Convección	Radiación	Evaporación
Resistir la ganancia	Minimizar el flujo de calor	Minimizar la infiltración	Minimizar la ganancia de calor	
Promover la pérdida	Promover el enfriamiento	Promover la ventilación	Promover el enfriamiento radiante	Promover el enfriamiento evaporativo
Sumidero de calor	Suelo	Atmósfera	Cielo	Atmósfera

Figura 2. Identificación de estrategias de diseño para el control del clima para enfriar. Fuente: Traducido del libro de Watson D. (1979).

En la investigación se plantea como objetivo minimizar del flujo del calor por medio del enfriamiento de la masa térmica del concreto; por lo tanto se estudian los sistemas pasivos (no utilizan ningún tipo de energía eléctrica para su funcionamiento), activos (utilizan energía eléctrica para su funcionamiento) e híbridos (combinan los sistemas pasivos y activos) que se emplean para amortiguar el flujo a través de la masa térmica de los materiales de la envolvente en sus diferentes superficie hacia el espacio habitable; los cuales se dividen en la cubierta, los muros y el suelo.

1.1 Cubiertas.

Uno de los elementos empleados para minimizar la transferencia de calor al interior de los espacios por el flujo de energía generada por la radiación es la cubierta estanque, la cual emplea como eje central el enfriamiento radiante. Se conoce el enfriamiento radiante como la transferencia de

energía fría dentro del edificio durante las horas de la noche, mediante la pérdida de calor desde el techo o usando un radiador especial en el techo, con o sin almacenamiento de frío durante el día. Por lo que cualquier superficie, que se encuentra expuesto al cielo, pierde calor por las emisiones de radiación de onda larga hacia el cielo y puede ser considerada como un radiador de calor. Esta pérdida de calor se puede dar durante el día y la noche (Givoni, 1994, p.p 9).

El sistema de la cubierta estanque consiste en colocar un depósito de agua en el techo con el objetivo de generar una masa térmica que permita enfriar los espacios al interior. El sistema se encuentra diseñado para que la masa térmica del agua amortigüe la transferencia de calor generada por la radiación solar durante el día y liberar dicho calor absorbido durante la noche empleando el cielo como sumidero de calor. Al enfriar el agua por medio del sumidero, se almacena el frío para posteriormente distribuirlo en el espacio habitable durante el día.

A través del tiempo se han realizado diversas propuestas que implementan el sistema de enfriamiento radiante utilizando el agua como elemento principal para controlar la ganancia calorífica y que han tenido resultados positivos disminuyendo considerablemente la temperatura en el interior de los espacios. Entre ellos se encuentra la propuesta de Permiakov (1974), quién presenta edificios con grandes áreas de techos expuestos a una radiación solar intensa en las regiones cálidas del Asia Central; donde realiza experimentos con agua fría en los techos de fábricas textiles en la región Tashkent, los cuales fueron efectivos en controlar el sobrecalentamiento de los edificios. (Ramírez et al., 2007, p.p 24).



Harold Hay, en 1978, desarrollo el sistema Skytherm, este sistema utiliza en el techo un tanque de agua colocado encima. El agua se almacena en recipientes o bolsas plásticas colocadas sobre láminas de metal. Los recipientes con agua se encuentran cubiertos por paneles de aislamiento horizontal y móviles, que pueden ser removidos en un momento determinado. Harold implementa el sistema en una vivienda en Atascadero en California en 1967. En esta vivienda el sistema permite mantener temperaturas internas entre los 19°C y los 23.5°C a lo largo de todo el año. Para el enfriamiento, durante las noches se deja expuesto al cielo las bolsas de agua para que el calor acumulado durante el día se pierda por radiación de onda larga, y durante el día se protegen las bolsas de agua para que logren enfriar los espacios internos y eviten que la radiación solar se introduzca al interior (Mazria, 1979, p.p65). Este proceso se puede observar en las siguientes figuras.

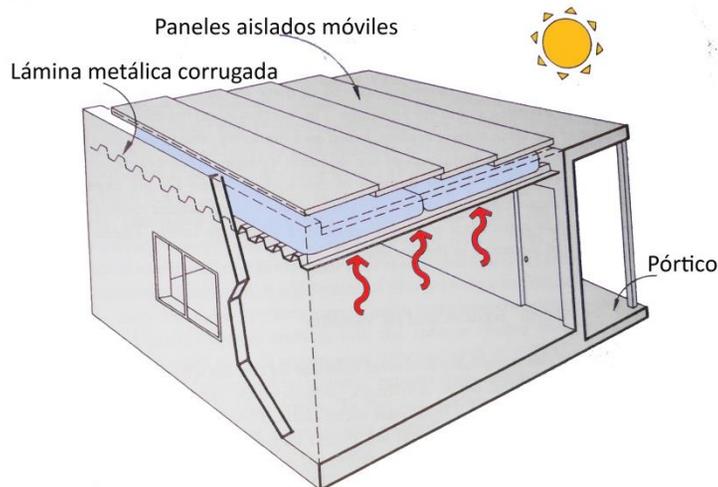


Figura 3. Funcionamiento del Sistema Skytherm durante el día. Fuente: Givoni (1994), p.p 102.

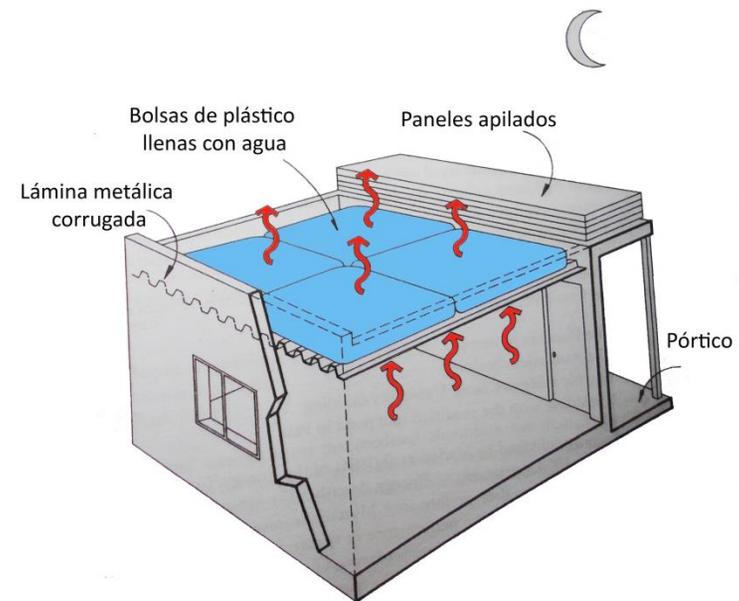


Figura 4. Funcionamiento del Sistema Skytherm durante la noche. Fuente: Givoni (1994), p,p 102.

Se han desarrollado diversas investigaciones sobre el sistema en diferentes universidades. En la UNAM se encuentra la tesis de “Mejoramiento del desempeño térmico de casas en zonas cálido-húmedas y cálido sub-húmedas”, desarrollada por Andreas Schumann en el 2011. La tesis consiste en el estudio de mejorar las condiciones térmicas de las viviendas construidas en zonas tropicales por medio de la modificación de los techos, lo cual disminuirá el uso de los sistemas de climatización artificial. Siendo la zona de estudio en Mérida, Yucatán. En la tesis se experimentó con diferentes tipos de materiales en el techo (impermeabilizante color rojo, aislante térmico, tanques de agua en los techos, techo de palma, techo blanco y lona). Siendo el sistema de tanque de agua en el techo el método que tuvo un



mejor resultado, disminuyendo la temperatura 4°C. Las mediciones realizadas demostró el impacto que tienen las diferentes superficies de los techos sobre el comportamiento térmico de las viviendas.

En la Universidad de Colima se presenta la tesis “Agua encapsulada como amortiguador térmico sobre losas de concreto”, realizada por Gilberto Gameros González en el 2007. En esta tesis se diseñó y analizó un dispositivo pasivo de climatización, el cual consiste en la utilización de botellas de PET con agua en su interior y pintadas de blanco, ubicadas de manera horizontal sobre una losa de concreto. El sistema tiene como objetivo amortiguar la oscilación de la temperatura en el interior de los espacios. El experimento consiste en realizar cuatro módulos de concreto (utilizando uno de referencia y en los otros se varía la cantidad de agua en las botellas localizadas en la azotea), en los cuales se mide la temperatura en el interior. En los resultados se obtiene una variación de temperatura de hasta 3°C con respecto a la temperatura del módulo de referencia. Esta variación depende de la cantidad de agua de las botellas, siendo en el módulo que posee las botellas llenas al 100% de agua, el que mejores resultados presenta.

El sistema de cubierta estanque es una solución viable para reducir la temperatura interna en lugares donde el clima posea temperaturas altas en el día y bajas en la noche, lo que permita enfriar el agua empleando las diferencias de temperatura; por lo tanto es más eficiente especialmente en climas secos. En regiones de clima cálido-húmedo la eficiencia de este sistema se encuentra limitada, debido a la alta presión de vapor en el aire, a la nubosidad y a la poca diferencia de temperaturas diurnas-nocturnas. Otra limitante del uso de los estanques de agua en el techo, es que las edificaciones deben de poseer dos niveles

como máximo y el techo debe ser plano. También se debe de considerar que el estanque de agua requiere de un diseño con una capacidad estructural para poder soportar el peso adicional, una adecuada impermeabilización y un sistema especial de drenaje; igualmente el agua debe tratarse con aditivos antialgas.

1.2 Muros de agua.

Otro sistema similar al Skytherm son las paredes de agua. Edward Mazria (1979), menciona el sistema pasivo utilizando muros de agua como un almacenador de calor. Este sistema consiste en un contenedor de plástico o metálico el cual contiene agua estancada en su interior y se encuentra localizado en la pared exterior para tener una ganancia directa de calor o en las paredes internas para obtener una ganancia indirecta de calor. El calor es absorbido por el agua en los tubos lo cual ayuda a mantener una temperatura fresca durante las horas del día y durante la noche pierde el calor absorbido cuando baja la temperatura externa, manteniendo una temperatura de confort.

El sistema muro de agua se basa en dos principios: el primero, consiste en que el agua es un medio almacenador más eficiente que los materiales utilizados en la construcción, debido a que un metro cúbico de agua puede almacenar 1,000 Kcal por cada grado centígrado de elevación de su temperatura, mientras que el mismo volumen de almacenamiento en una pared de concreto sólo almacena 400 Kcal por °C (Mazria, 1979, p.p 150).

Segundo, es que un muro de agua se calienta con mayor uniformidad que otro material, debido a que un muro de agua transfiere rápidamente el calor desde la superficie colectora al



volumen total del agua. Durante el día, el proceso consiste en que la radiación calienta la superficie del depósito, el agua transfiere el calor generado que sea menos densa y asciende. El movimiento del agua produce una corriente de convección que distribuye el calor a través del depósito; utilizando toda la masa del agua como almacenador de calor, por lo tanto la temperatura superficial del muro de agua asciende con menor velocidad comparada con la pared de concreto. El volumen de agua bajo la radiación directa es la principal determinante de la fluctuación de temperatura en el interior a lo largo del día; por lo tanto entre mayor es la cantidad de agua en el muro, menor será la transferencia de calor hacia el interior. (Mazria, 1979, p.p 150). Posteriormente el agua se enfría en la noche empleando el proceso inverso al mencionado anteriormente, similar al sistema de la cubierta estanque.

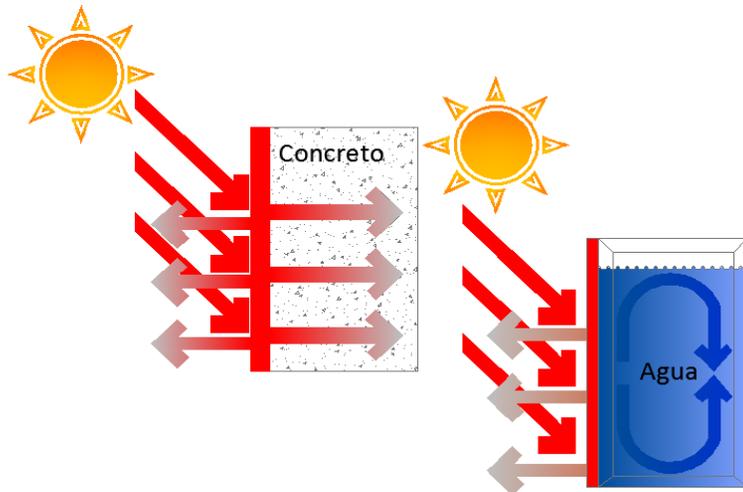


Figura 5. Transferencia de calor de una masa de almacenamiento de concreto y de agua. Fuente: Redibujado del libro de Mazria, 1979, p.p 152.

Este sistema ha ido evolucionado con el tiempo; la primera unidad consistió en una bolsa de plástico soportado entre dos hojas metálicas. Posteriormente, Wayne y Susan Nicols utilizaron concreto para construir los tanques que almacenan el agua. Consecutivamente en el mercado se desarrollaron diversos tipos y materiales de contenedores de agua (Bainbridge, 2005).



Imagen 1. Diferentes tipos contenedores de agua. Fuente: Bainbridge, 1981.

Edward Mazria (1979) menciona diversos ensayos realizados en la Universidad de Oregón, entre ellos se encuentra el desarrollado por Ran Rands y Randi Shafer; el cual consistió sobre el rendimiento de los muros de agua utilizando diversos colores en los contenedores y diversos volúmenes de agua en el interior, con el objetivo poder comparar el rendimiento térmico de cada uno. Según los resultados de estos ensayos, Mazria plantea las siguientes recomendaciones:

- El muro debe de poseer un adecuado dimensionamiento, debido a que el muro puede transmitir el calor deseado. Este dimensionamiento dependerá del clima, la latitud y las necesidades que se deseen.

- Como sistema de enfriamiento, se recomienda que el muro se encuentre localizado en la fachada sur para que pueda absorber calor entre las 10:00 y las 14:00 horas.
- Se recomienda que las edificaciones se encuentren debidamente aisladas.
- La variación diaria de las temperaturas internas decrece cuando crece el espesor del muro, por lo que si se desea calentar el espacio interno, el espesor del muro debe ser menor. Si lo que se desea es enfriar el espacio interior, se debe de aumentar el espesor del muro, como se muestra en la tabla 1.

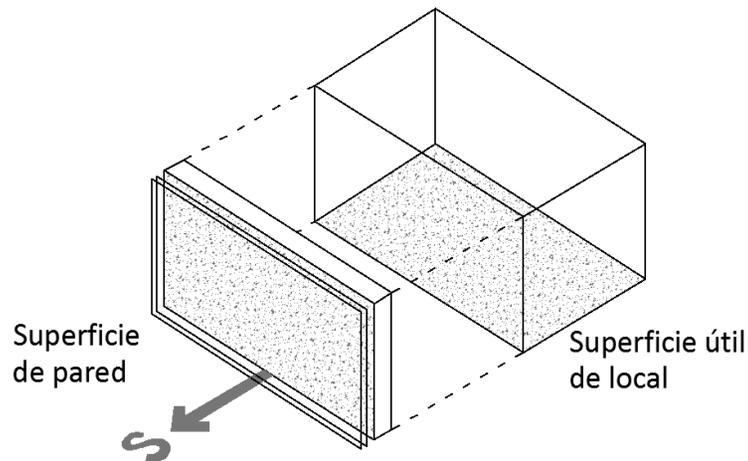


Figura 6. Orientación del muro de agua. Fuente: Mazria, 1979.

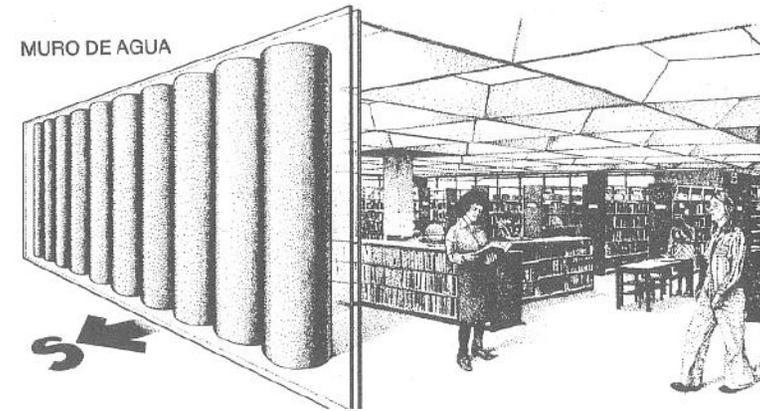


Figura 7. Orientación del muro de agua. Fuente: Mazria, 1979.

Tabla 1. Efecto del espesor de pared sobre la amplitud de las oscilaciones diárias de la temperatura del aire del local.

Material	Conductividad térmica (kcal/h m °C)	Espesor recomendado (cm)	Oscilación aproximada de la temperatura interior (°C) en función del espesor del muro ¹					
			10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
Adobe	0.45	20-30	---	10°	4°	4°	4.5°	---
Ladrillo común	0.63	25-35	---	13°	6°	4°	---	---
Hormigón en masa	1	30-45	---	15.5°	9°	5.5°	3.3°	2.7°
Ladrillo con magnesio ²	3.3	40-60	---	19.5°	13°	9.5°	7°	5°
Agua ³	---	15 ó más	17°	10°	7°	6°	5.5°	5°

Notas: 1. Se supone un muro térmico con doble vidrio. Si se coloca una masa térmica suplementaria, con muros y/o pavimentos de obre, estas oscilaciones de temperaturas serán algo menores. Los valores mostrados son para días despejados de invierno.
 2. El magnesio se utiliza en el ladrillo como aditivo para oscurecerlo. A la vez se incrementa fuertemente con ello la conductividad térmica del material.
 3. Cuando se utiliza el agua es recomendable utilizar recipientes cilíndricos como mínimo de 25 cm de diámetro (ó 150 litros de agua por metro cuadrado de vidrio).

Fuente: Modificado del libro de Mazria (1979).



Mazria (1979) señala que un muro de agua es ligeramente más eficiente térmicamente que otro tipo de muro. El principal problema de este sistema es que estéticamente puede resultar de difícil aceptación por el usuario, siendo esto de importante consideración en el diseño. Actualmente la mayor de las aplicaciones de muros de agua se basa en las utilidades de cilindros verticales de plástico o de metal, lo que representa que sean menos atractivo visualmente, pero con la fabricación de una mayor variedad de depósitos se puede incrementar la aceptación y la utilización de este sistema (Mazria, 1979, p.p 174).

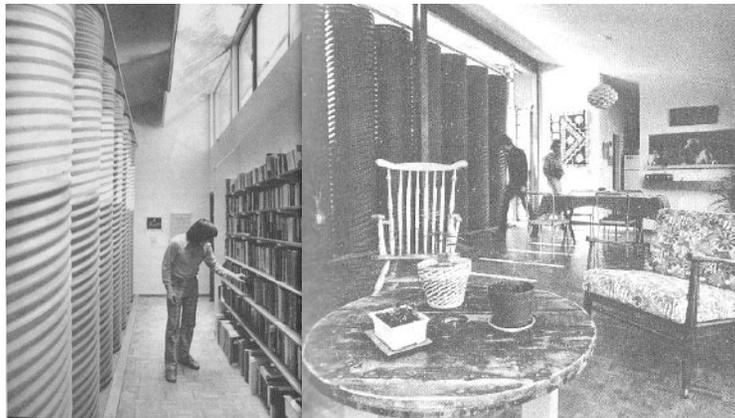


Imagen 2. Muro de agua que calienta el local contiguo. Fuente: (Mazria, 1979, p.p 154)

En el mercado, la empresa Solar Components Corporation en Manchester, New Hampshire; ofrece el producto de Sun-Lite Thermal Storage Tubes. Este producto consiste en tubos cilíndricos en los cuales se contienen agua. Estos cilindros se encuentran construido con un material translúcido de fibra de vidrio que permite pasar la luz natural al interior. Con estos tubos se puede regular la temperatura interna durante el día y

la noche, debido a que emplea los principios mencionado anteriormente. El calor es absorbido por el agua en los tubos lo cual ayuda a mantener una temperatura fresca durante las horas del día y durante la noche pierde el calor absorbido cuando baja la temperatura externa, manteniendo una temperatura de confort. Una de las opciones que ofrecen, es que para aumentar la estética la empresa también vende diversos tipos de tintes para darle color al agua (Hopper, 2014).



Imagen 3. Tubos cilíndricos de la empresa Solar Components Corporation. Fuente: Hopper, 2014.



Figura 8. Tamaño de los tubos cilíndricos. Fuente: Hopper, 2014.

Tabla 2. Especificaciones de tamaño de los tubos cilíndricos. Fuente: Hopper, 2014.

Especificaciones				
Diámetro (pulgadas)	Altura (pies)	Volumen (galones)	Peso (lleno)	Capacidad de calentar (Arriba de 20°(BTU))
12	4	23.5	204	3,900
12	8	47	404	7,800
18	5	66	567	11,000
18	10	132	1122	22,000

Otro método para enfriar la masa térmica de los muros es empleando la tierra como sumidero de calor, por lo tanto el espacio habitable se debe de encontrar protegido y aislado por el suelo. Zeevaert (1981) señala que las bajas temperaturas del subsuelo permiten que la estructura se enfríe por conducción, manteniendo durante el día la temperatura al interior por debajo de la temperatura al exterior.

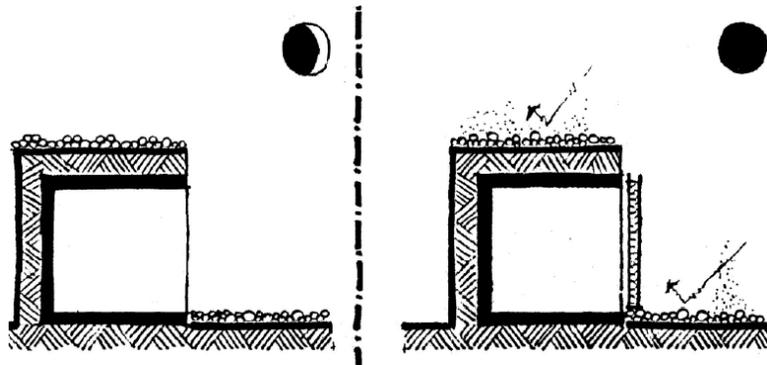


Figura 9. Enfriamiento conductivo por el contacto con el suelo. Fuente: Zeevaert (1981), p.p 58.

1.3. Suelo Radiante.

Otros sistemas que utilizan la radiación como sistema para enfriar los espacios es el suelo radiante. Inicialmente este sistema se utilizó como un sistema de calefacción pero con el paso del tiempo el sistema evolucionó a ser un sistema en el cual se genera enfriamiento y calefacción. Actualmente, diversos países utilizan este sistema pero pocos son los que lo utilizan como un sistema de enfriamiento. Se considera como un sistema activo ya que requiere de equipos mecánicos que necesitan energía para el enfriamiento o la calefacción del agua, al mismo tiempo se necesita de una bomba para el recorrido del agua en los espacios.

El suelo radiante como sistema de calefacción se ha utilizado en Europa, especialmente en los Países nórdicos y Alemania, desde hace más de 20 años. El desarrollo de este sistema surge de las bajas temperaturas que se han registrado y a las exigencias de calefacción de gran calidad y bajo consumo energético. Otro factor que ha influido en el uso de este sistema es la tendencia de la arquitectura a buscar ambientes claros, despejados y acogedores (Sánchez Quintana, 1992, p.p 11).

El sistema de enfriamiento radiante proporciona frío de una manera eficiente; funciona de manera que no refrigera el aire sino que modifican la temperatura de la masa térmica de los materiales de la envolvente (techo, pared y/o suelo) de un espacio. Este sistema funciona debido a que la temperatura del cuerpo humano es más o menos equivalente a la media de la temperatura radiante y la temperatura del aire. Siendo la temperatura radiante la temperatura media de todos los objetos que rodean el cuerpo (Hernández, 2014, p.p 122).



Se define el enfriamiento por suelo radiante como el sistema de red de tuberías empotradas en la capa de mortero que se encuentra bajo el suelo de una edificación. Por dicha red de tuberías circula agua refrigerada. El frío del agua se transmite al suelo a través de las tuberías, y el suelo a su vez cede el frío al ambiente de la edificación.

El uso de este sistema no es algo reciente, unos 500 años antes de Cristo, los romanos redescubrieron y desarrollaron la calefacción por suelo, llamado calefacción de “Hypocausto”. En este sistema empleaba conductos dispuestos en el pavimento por los que circulaban los gases calientes de hogueras preparadas para tal fin (Sánchez Quintana, 1992, p.p 12). En la figura 10 y en la imagen 4 se muestra los esquemas y fotografía de la construcción del sistema por los romanos, en las cuales se puede observar los conductos por los cuales circulaba el aire caliente.



Imagen 4. Sistema Hypocausto. Fuente: Moe, 2010.

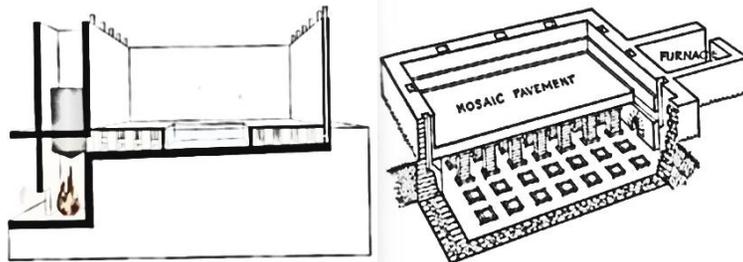


Figura 10. Sistema Hypocausto. Fuente: Moe, 2010.

Ondol es un sistema de calefacción Coreano, similar al Hypocausto. Ondol significa “piedra caliente. Este sistema permite calentar el suelo por medio de la circulación de aire caliente debajo del mismo. Sus componentes principales son el fuego, el cual es generado en la estufa (que también se usa para cocinar) ubicado un nivel debajo de las otras áreas de la vivienda. Al encontrarse elevada la vivienda permite la distribución del humo por medio de pasajes horizontales, arriba de estos pasajes se encontraban una capa de piedras, las cuales se calentaban con el humo y por radiación transmitían el calor hacia el piso de las viviendas. En el extremo opuesto de la vivienda se localiza una chimenea vertical para la evacuación del humo (Moe, 2010), ver figura 11 y 12.

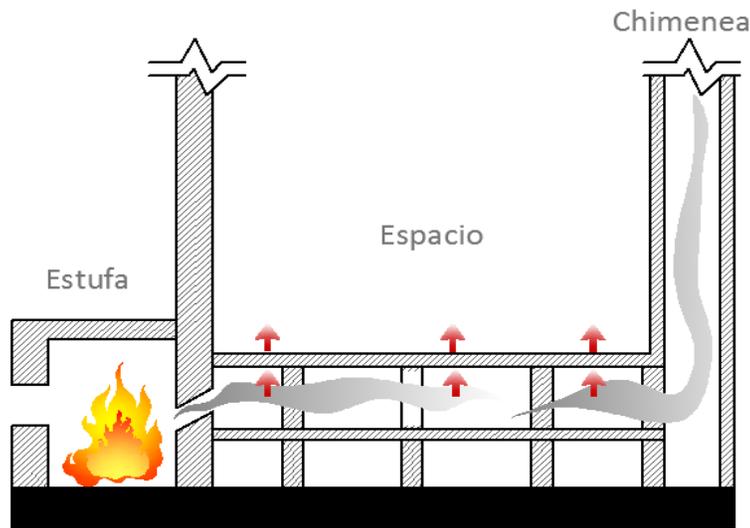


Figura 11. Sistema coreano Ondol. Fuente: Dibujo modificado retomado del artículo de Bean, Olesen, & Woo Kim, 2010, p.p 44.

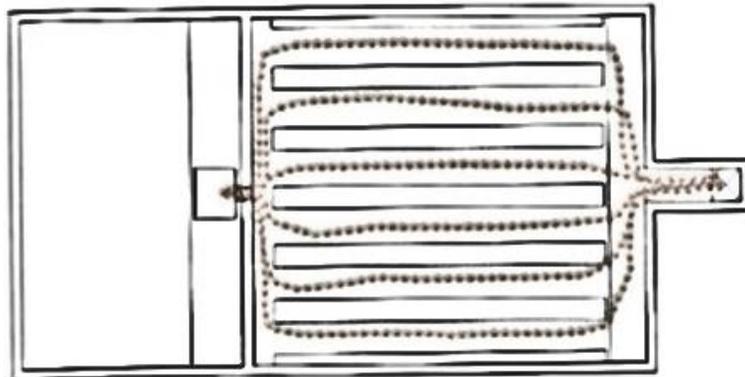


Figura 12. Sistema coreano Ondol. Fuente: Moe, 2010.

En el siglo XVIII, reaparece la calefacción del suelo radiante en Europa, con el descubrimiento de la caldera para calentar agua, el cual fue introducido con un sistema de grandes tuberías donde circulaba el agua caliente. En 1790, se realizó la primera instalación de este sistema en el Banco de Inglaterra por Sir John Stone.

En 1800 Neil Snodgrass construye en Escocia los edificios Dornoch, en los que implementa un sistema de calefacción utilizando tuberías metálicas verticales localizadas en las paredes donde circula vapor.

En 1908, el profesor británico Arthur H. Barker desarrolla un sistema moderno de calefacción radiante, este sistema consiste en utilizar pequeñas tuberías para el paso del agua caliente embebidas en yeso o concreto para tener un sistema más eficiente de calefacción; comercializando el sistema hidrónico de superficies térmicamente activas. En Estados Unidos, el arquitecto Frank Lloyd Right fue el pionero en utilizar el sistema de calefacción radiante. En 1905, viaja a Japón y visita casas con el sistema Ondol, por lo que implementa el sistema en el Hotel Palacio Imperial y posteriormente lo utiliza en diversos proyectos realizados en Estados Unidos (Moe, 2010).

En la década posterior a la guerra, el sistema tuvo diversos problemas técnicos, debido a los materiales y a las deficiencias de la mano de obra (limitada calidad de control y debilidad en las uniones). En los años 50's, la compañía suiza Wirsbo, desarrolla el tubo de polietileno para el uso del sistema radiante. En 1968, Thomas Engel, un ingeniero alemán, desarrollo el tubo PEX, impulsando el sistema de calefacción radiante en Europa y Estados Unidos.

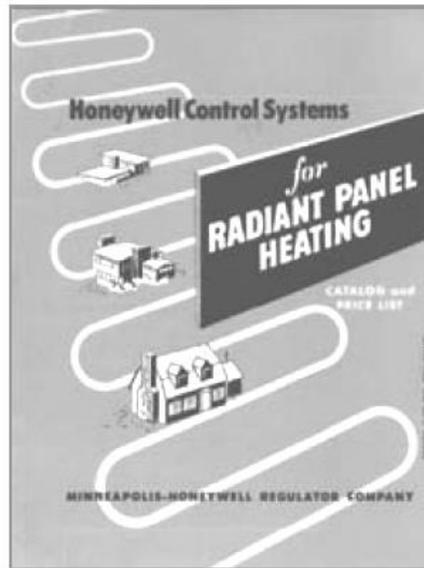


Figura 13. Propaganda del sistema de calefacción radiante. Fuente: Bean, Olesen & Woo Kim, 2010, p.p 54.

Desde el 2000, el sistema de calefacción por medio del suelo radiante se ha difundido en la China moderna, esto se debe al incremento relacionado con el costo de la energía y con la contaminación del aire. En diferentes regiones del país, muchas residencias y edificios comerciales se encuentran equipados con el sistema de calefacción del suelo radiante utilizando agua caliente. Beijín posee el mercado más grande en China en el uso de este sistema y desde el 2006 los inversionistas y desarrolladores han considerado el uso de calefacción por medio del suelo radiante en la construcción de edificios. En la provincia de Hubei, se ha reportado que entre el 70% al 80% las nuevas construcciones poseen dicho sistema (Bean, W. Olesen, & Woo Kim, 2010, p.p 46).

En Japón, al sistema de calefacción por medio del suelo radiante por agua caliente se le conoce como “yukadanbou”. Desde los años 80’s ha incrementado la implementación de estos sistemas, teniendo un crecimiento aproximado anual del 10%.

En los últimos años el sistema se ha utilizado no solamente como forma de calefacción sino también como sistema de enfriamiento, por lo que se han realizado diversos experimentos para evaluar su funcionamiento.

En el 2004, Seong-Ryong Ryu, Jae-Han Lim, Myoung-Souk Yeo and Kwang-Woo Kim de la Universidad Nacional de Seúl en Corea, estudiaron el sistema Ondol y realizaron un experimento el cual consistió en el desarrollo de un módulo en el que se implementó un sistema de tuberías en el suelo para la circulación de agua fría y caliente. El experimento consistió en controlar el flujo de agua que circula en el sistema y la temperatura del agua, buscando un método de control que minimizara la condensación durante el período de enfriamiento sin la utilización de un sistema de deshumidificación (Seong-Ryong, Myoung-Souk, Jae-Han, & Kwang-Woo, 2004).

Varios de los sistemas desarrollados de enfriamiento radiante fallaron debido a la condensación. Después de varios estudios se resolvió dicho problema utilizando en conjunto un sistema de ventilación, diseñado para bajar la temperatura del punto de rocío² en el aire interno de los espacios.

² Es la temperatura a la cual empieza la condensación de humedad cuando el aire se enfría (Carrier air conditioning company, 2009, p.p 1-110).



En el 2005, Leigh, Hwang, Song & Lee, desarrollan un estudio sobre el sistema de enfriamiento radiante utilizando el sistema existente de calefacción Ondol, integrándolo con un sistema de ventilación controlado. El ventilador brinda aire fresco del exterior para satisfacer los requerimientos mínimos para tener una buena calidad de aire en el interior, también este sistema de ventilación previene la condensación en la superficie del piso. En el estudio se realizó simulaciones en el sistema de computación TRNSYS, en el cuál se cuantificó el uso de energía comparando el sistema de enfriamiento radiante en el suelo contra el sistema de acondicionamiento de aire. El resultado mostró que con el sistema de enfriamiento radiante se consume un tercio de la energía en comparación con el uso del aire acondicionado (Leigh et al., 2005). El experimento tiene como objetivo proveer enfriamiento a través de una combinación del sistema de radiación y de convección en el interior del edificio. El sistema de aire acondicionado permite introducir la ventilación con los requerimientos de calidad de aire en el interior y el sistema de enfriamiento radiante provee las condiciones térmicas en el edificio. En el experimento el sistema de enfriamiento radiante en el suelo se realiza a base de un chiller de agua, con el cual se distribuirá el agua fría en los tubos existentes para la calefacción. Este sistema cuenta con un ventilador separado que opera solamente para renovar el aire y para controlar la humedad.

Para el experimento se construyeron 4 celdas idénticas pero con diferentes sistemas de enfriamiento y sistemas de control para comparar los análisis. Las dimensiones de las celdas son de 2.4 m (7.9 pies) de ancho X 2.4 m (largo) X 2.4 m (altura). Las celdas poseen una ventana en esta fachada de las siguientes dimensiones 1.8m de ancho x 1.2 de alto. También poseen una

puerta de 0.8 m de ancho X 1.6m de alto en la fachada sur. Se encuentran orientadas hacia el sur.

En la celda A se instala el sistema de ventilación con deshumidificación y en la celda B se instala el mismo sistema sin deshumidificación. Se calcula que el sistema de enfriamiento radiante en el suelo no sea más bajo a 19°C por razones de confort, pero la temperatura debe de ser más alto que el punto de rocío para prevenir la condensación; por lo que la temperatura del agua se propone a 15°C para este propósito.

Durante el experimento, la temperatura del exterior varió entre los 20°C hasta los 34°C y el promedio de temperatura en el interior en la celda A fue de 25.36°C y en la celda B fue de 26.16°C (Leigh et al., 2005).

Unidad: mm

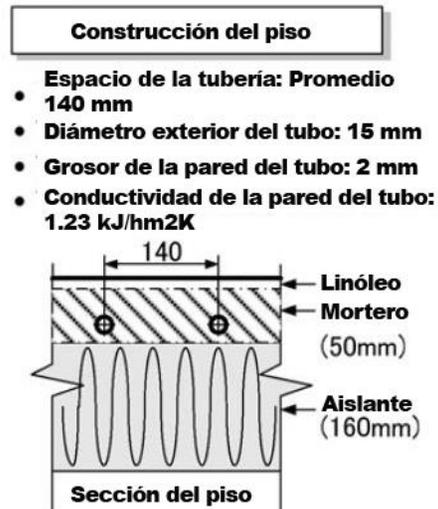


Figura 14. Detalle de la construcción del piso del experimento. Fuente: Traducido del artículo de Leigh, Song, Lee, & Hwang, 2005.

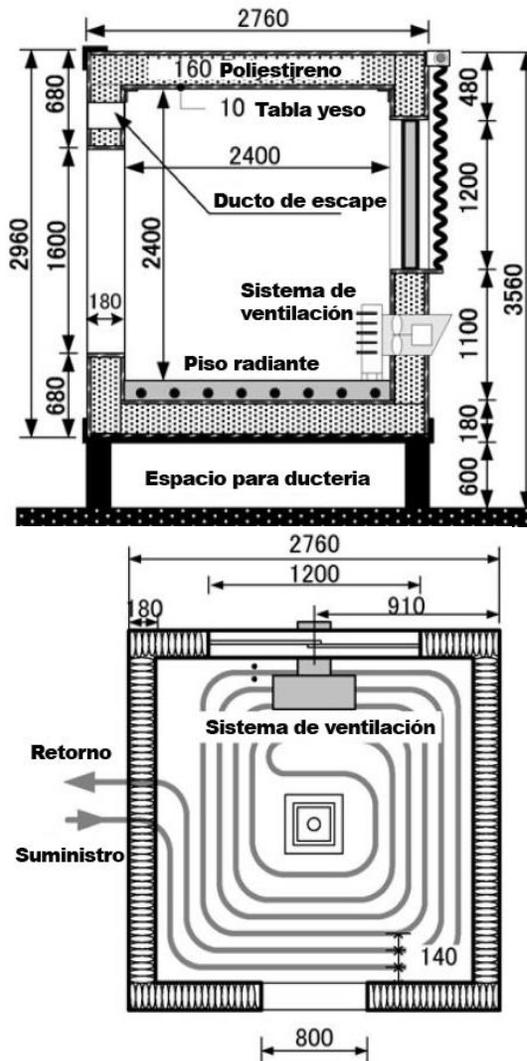


Figura 15. Concepto del enfriamiento radiante en el piso integrado con el sistema de ventilación controlada. Fuente: Traducido del artículo de Leigh, Song, Lee, & Hwang, 2005.

En la tabla 3 se puede observar que la celda A tuvo mejores resultados que la celda B. También se puede observar que la combinación del efecto del enfriamiento radiante y convectivo tuvo una respuesta más rápida para alcanzar una temperatura más baja. Ambos sistemas empezaron con una temperatura interna de 30°C, a la celda A le tomo cinco horas y para la celda B siete horas para alcanzar la temperatura más baja. En la celda B, se presentó condensación en la superficie del suelo.

El experimento demostró que el enfriamiento radiante del suelo integrado con un sistema de deshumidificación no solamente ayuda a prevenir la condensación sino que también mejora el confort térmico y logra superar las limitantes de capacidad que tiene el sistema radiante (Leigh et al., 2005).

Tabla 3. Resultados del experimento. Fuente: Leigh, Song, Lee, & Hwang, 2005.

Caso	(A) Ventilación integrada con deshumidificación			(B) Ventilación solamente		
	Temperatura de la Superficie del suelo	Temperatura del aire del interior	RH del aire del interior	Temperatura de la Superficie del suelo	Temperatura del aire del interior	RH del aire del interior
Promedio	21.8°C (71.24°F)	25.36°C (77.65°F)	68.84%	22.51°C (72.52°F)	26.16°C (79.09°F)	65.21%
Desviación estándar	1.12 °C	0.77°C	2.53%	1.71°C	1.02°C	2.56%
Máximo	24.72°C (76.50°F)	26.67°C (80.01°F)	74.15%	25.63°C (78.13°F)	27.96°C (82.33°F)	71.28%
Mínimo	20.01°C (68.02°F)	23.81°C (74.86°F)	60.99%	20.36°C (68.65°F)	24.27°C (75.67°F)	60.59%

Existen diversos artículos que mencionan sobre la utilización del sistema híbrido en diversos tipos de edificios, entre ellos se encuentra el artículo presentado en el ASHRAE Journal en el 2011, donde se presenta la instalación del sistema en las paredes y en el entrepiso. El artículo es sobre el diseño, construcción y remodelación del centro correccional de la provincia de Regina, ubicado en la ciudad de Regina en



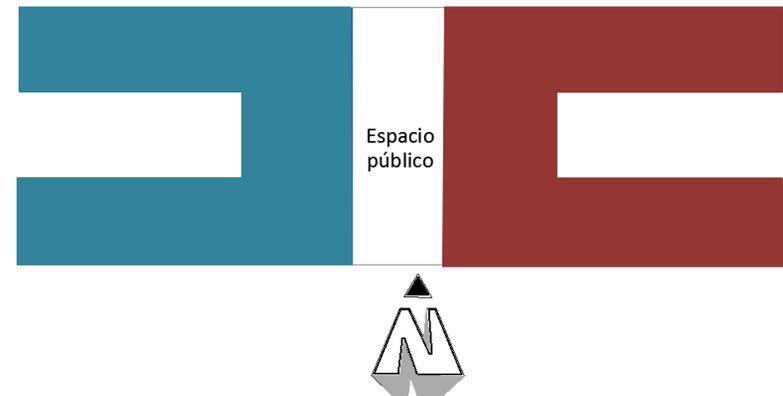
Saskatchewan a diez millas al norte del borde Montana en Estados Unidos. Lo interesante del proyecto es la utilización del sistema de paredes radiante para enfriar y calentar los espacios internos, lo cual les ha permitido un ahorro de energía de un 38% sobre el ASHRAE/IESNA standard 90.1-2004. El sistema se encuentra localizado en el perímetro interno de las paredes de cada celda; el cual consiste en un sistema separado de tuberías para la calefacción y enfriamiento, instalados en el centro de las paredes de concreto. El beneficio del sistema es que permite la reducción de aire en el perímetro de las celdas y tiene un gran rango de temperatura de confort en los ocupantes (Holmes & MacPherson, 2011).



Imagen 5. Panel de pared radiante en forma antes de que se vierta el hormigón. Fuente: (Holmes & MacPherson, 2011)

En la Bangalore, India, se instaló el sistema hidrónico radiante por primera vez en el centro comercial construido por

Infosys. El proyecto consistió en implementar el sistema hidrónico como sistema de enfriamiento en la mitad del edificio y en la otra mitad se instaló el sistema convencional de aire acondicionado, con el objetivo de poder comprobar el porcentaje de ahorro en un año. Se consideraron las dos partes del edificio con las mismas características, al mismo tiempo el edificio posee una envolvente altamente eficiente con una perfecta orientación, doble paredes con aislamiento, aislamiento en el techo y con la protección de las ventanas de la radiación solar para minimizar el ingreso de calor hacia el interior.



- Parte del edificio con el sistema convencional de aire acondicionado.
- Parte del edificio con el sistema hidrónico radiante y el sistema convencional de aire acondicionado.

Figura 16. Esquema de distribución de la planta del centro comercial.
Fuente: Dibujo propio retomado de Sastry, G., 2012.

En el estudio se registró una eficiencia de un 40% de ahorro en el consumo de energía; entre los resultados se presenta que en el 2011-12 la energía del sistema convencional de aire



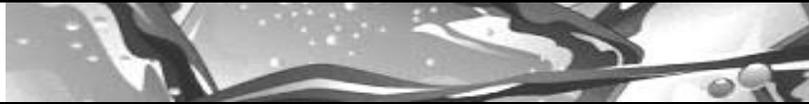
acondicionado fue de 38.7 kWh/m² y en el sistema de enfriamiento radiante fue de 25.7 kWh/m², por lo que el sistema radiante obtuvo un 33% de consumo de energía menor comparado con el sistema de aire acondicionado (Sastry, G., 2012).

Tabla 4. Tabla comparativa del costo de ambos sistemas. Fuente: Sastry, G., 2012.

Equipos	Sistema convencional		Sistema radiante	
	Costo en Rupias	%	Costo en Rupias	%
Chiller	3145200	8.15	3145200	8.22
Torre de enfriamiento	1306400	3.39	1306400	3.41
HVAC	22839000	59.18	15310000	39.99
AHUs, DOAS, HRW	5118200	13.26	2878900	7.52
Tuberías radiantes, accesorios instalación, etc.	0	0.00	9057800	23.66
Sistema de automatización	6184000	16.02	6584000	17.20
Costo total (INR)	38592800	100.00	38282300	100.00
Área (m ²)	11600		11600	
INR/m ²	3327		1102	

En la tabla 4 se realiza un análisis comparativo del costo de instalación de ambos sistemas. El costo se presenta en rupias, siendo esta la moneda del país. Se puede observar que el costo del sistema radiante es menor al sistema convencional, esto se debe a que el precio del equipo de HVAC es más elevado debido a que el tamaño del equipo es mayor comparado con el sistema radiante. En el sistema radiante el costo de la tubería, accesorios e instalación se eleva en comparación con el sistema convencional.





CAPITULO 2: La envolvente





2. La envolvente.

La envolvente se considera todo aquello que envuelve un espacio, que lo limita y separa del espacio exterior. Olgyay (1998) menciona que las edificaciones modifican el entorno natural, con el fin de generar condiciones óptimas de habitabilidad. Por lo tanto la envolvente es la piel del edificio que actúa como filtro entre las condiciones externas e internas para controlar la entrada de aire, calor, frío, luz, ruidos y olores; razón por la cual los materiales juegan un papel decisivo en la cantidad de calor que se introduce al interior de los espacios.

Existen tres tipos de envolvente del ser humano, la primera es la capa de ozono que protege a la Tierra de radiaciones nocivas provenientes del Sol. La segunda capa es el edificio y la tercera capa es la ropa. Para la investigación la capa que se estudia es la del edificio.

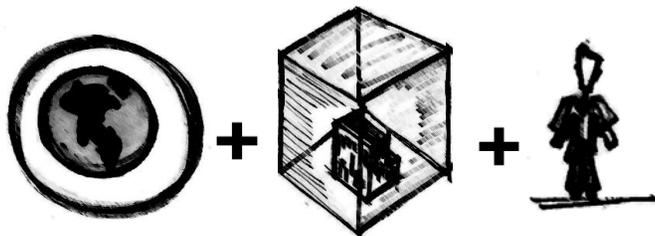


Figura 17. Tipos de envolvente. Fuente: Autoría propia.

Zeevaert (1981) señala que la envoltura del edificio es el elemento divisorio entre el medio ambiente interno del externo y el que genera modificaciones en el impacto climático. Al mismo tiempo considera que los muros que forman la envolvente de un edificio se comportan como un filtro entre el medio ambiente exterior y el espacio interior. Divide la envoltura en dos tipos: opacos (masa) y transparentes o

translúcidos (vidrio, policarbonato, etc.). También indica que una de las propiedades más importantes de los materiales transparentes o translúcidos como el vidrio, el cristal y/o ciertos plásticos, es su habilidad para transmitir un máximo de radiación solar (onda corta). Por lo que en climas cálido-húmedo no se recomienda diseñar fachadas que en su mayoría posean materiales translúcido, como ser el vidrio, sin la debida protección de la radiación solar y sin la adecuada orientación.

Lozano (2008) menciona que la fachada es uno de los componentes más importantes que afecta el uso de la energía, por la ganancia y pérdida de calor a través de los materiales de la envolvente. Por lo tanto, dichos materiales pueden representar un porcentaje significativo en el consumo de la energía eléctrica de hasta un 40% del consumo total. Esto se debe al esfuerzo que necesitan los equipos para generar confort en los espacios internos.

La ganancia y pérdida de calor a través de los materiales de la envolvente parten de las leyes de la termodinámica, debido a que el flujo energético unidireccional es el resultado de la acción de estas leyes, las cuales son dos. La primera ley de la termodinámica o ley de la conservación de la energía menciona que la energía no se puede crear ni se puede destruir, solamente se puede transformar. La segunda ley establece que una concentración de energía es un sistema inestable que tiende a alcanzar una estabilidad cada vez mayor mediante la disipación de energía. A esta ley también se le conoce como ley de entropía, donde entropía significa transformación. Esta ley se refiere a que parte de la energía se disipa en forma de energía calorífica que no es recuperable, por lo que ninguna transformación espontánea (como ser la transformación de



energía solar en alimento) puede ser 100% eficiente (Odum, 1995).



Figura 18. Segunda ley de la termodinámica. Fuente: Odum, 1995.

La segunda ley se observa con la energía del sol que llega a la Tierra, la cual tiende a convertirse en energía calorífica al degradarse; y solamente una fracción de la energía lumínica absorbida por las plantas verdes se transforma en energía potencial en forma de alimento; la mayor parte se convierte en calor, que luego sale de la planta, el ecosistema y la biosfera. Este mismo proceso ocurre en los materiales, donde una fracción de la energía recibida por la radiación solar es absorbida por el material, el cual se convierte en calor y se trasfiere a los espacios interiores. La transferencia de calor de energía térmica de un cuerpo a otro (del espacio exterior al interior o viceversa) se genera desde el cuerpo de mayor temperatura al otro de menor temperatura hasta alcanzar un equilibrio térmico, es decir hasta que ambos cuerpos tengan la misma temperatura.

2.1 Modos de transferencia de calor en edificios.

Givoni (1998) menciona que existen tres factores que predominan en la relación de los materiales con el exterior: la conducción del calor a través de la envolvente, los cambios de temperatura de la masa del edificio debido a la absorción y la capacidad de liberación de energía calorífica, y la absorción de la energía solar en la envolvente. Por lo tanto el calor entre los edificios y el ambiente se realiza por medio de diversos modos físicos los cuales son conducción, convección, radiación y evaporación. Cada modo de transferencia de calor se encuentra determinada por las propiedades de los materiales ya que establecen que tan rápido será la transferencia. Estos modos de se realizan a través de las diferentes partes y elementos de la envolvente: el techo, los elementos opacos de las paredes, las ventanas y en la infiltración del aire.

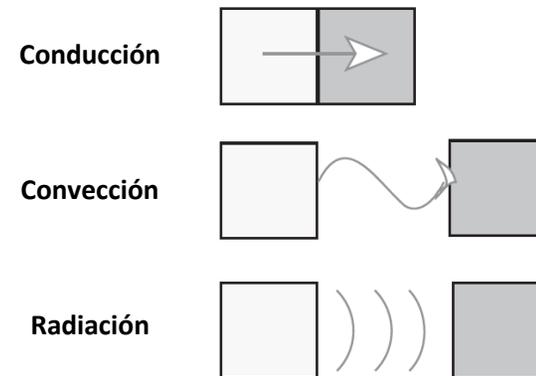


Figura 19. Modos de transferencia de calor desde un objeto de temperatura mayor a uno con temperatura más bajo. Fuente: Addington & Schodek, 2005, pp. 70.

La conducción es el proceso de transferencia de calor de un cuerpo caliente a uno frío. Las moléculas de cualquier sustancia



vibran, y esta vibración se vuelve más vigorosa según la temperatura aumenta. El flujo de calor por conducción es causado por la transferencia de energía de las moléculas calientes (que tienen una rápida vibración) hacia las moléculas frías. Este fenómeno en los edificios se da cuando se realiza el proceso de transferencia de calor a través de un material sólido (el techo o las paredes) desde el lado más caliente al lugar más frío de los elementos del edificio. Este flujo de calor depende de las características de conductividad de los materiales y del grosor de la envolvente.

La transferencia de calor por radiación en los edificios es el intercambio de energía entre superficies por las ondas electromagnéticas a través de un espacio. Y la evaporación ocurre cuando se realiza un cambio de estado de un líquido a vapor. Se necesita energía para realizar este proceso, la cual, si no existen fuentes externas de calor (sol o cuerpos adyacentes), provienen del fluido mismo. Debido a esto, la evaporación produce un enfriamiento del fluido y de las superficies sobre la cual se encuentra.

El intercambio de calor por medio de la convección ocurre cuando se transfiere el calor de un cuerpo sólido al aire y viceversa; o cuando se transfiere calor entre dos superficies a diferentes temperaturas a través del flujo del aire. Este proceso puede realizarse por la diferencia de temperatura o por el movimiento del aire forzado.

2.2 Masa e Inercia térmica.

La masa térmica es la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Los materiales empleados para la construcción de las envolventes de las edificaciones, pueden clasificarse según la masa térmica. Los edificios que poseen baja masa térmica son

los que proporcionan una rápida respuesta térmica a los cambios climáticos del exterior, generando cambios de temperatura en el interior; entre estos se encuentran los que tienen estructura de madera o metal revestida con paneles ligeros. Los edificios con alta masa térmica son los que disminuyen cambios de la temperatura exterior y evitan alteraciones bruscas de la temperatura al interior; entre estos materiales se encuentra los ladrillos cerámicos, los bloques de concreto y el adobe (Hernández, 2014). Wassouf (2014) señala que todo elemento constructivo en contacto directo con el aire puede absorber y almacenar una cantidad de energía que depende principalmente de la capacidad calorífica y de la densidad del elemento constructivo (masa térmica).

La inercia térmica, Wassouf (2014) la describe como la energía necesaria para aumentar un kelvin la temperatura de un metro cúbico del elemento constructivo. *“Esta masa térmica es capaz de almacenar una cantidad determinada de energía hasta alcanzar un punto de saturación; cuando la temperatura del elemento constructivo es más alta que la del aire circundante, el flujo energético se invierte y la energía empieza a fluir de nuevo desde el elemento constructivo al aire”*. Wassouf (2014) indica que la inercia térmica presenta la ventaja de que amortigua el exceso de energía generados por la radiación solar y la actividad humana en el interior de los espacios. Esto se debe a que la radiación solar y las cargas interiores de calor se almacenan durante el día en un material con inercia térmica, por lo tanto es imprescindible que se produzca una descarga de energía por la noche, para perder la energía almacena y poder realizar nuevamente el ciclo de amortiguamiento.

La inercia se mide a través de la amortiguación de la onda térmica y del desfase entre las ondas térmicas en el interior en



relación con el exterior durante las 24 horas del día. La amortiguación de la onda térmica describe el grado de oscilación de las temperaturas interiores comparado con las del exterior. El desfase de las ondas, a su vez, es el tiempo que necesita para entrar desde el exterior, el pico de temperatura de un día de mucho calor hacia el interior. Wassouf (2014) aconseja que la amortiguación de la onda térmica llegue a un 95% (mínimo 85%); es decir, que solo el 5% del calor del exterior entre al interior. Por lo tanto el desfase de la onda térmica debería ser como mínimo de 10 horas (aconsejable de 14 horas), de modo que la temperatura máxima exterior llegue al interior cuando las temperaturas exteriores hayan bajado lo suficiente como para poder enfriar el edificio con ventilación natural (Wassouf, 2014, p.p 34-37).

2.3 Flujo de calor de los materiales (conducción).

Cuando la superficie de un edificio recibe radiación solar, parte de la energía es absorbida, el resto se refleja o se transmite. La energía absorbida se convierte en energía interna y la energía que se transmite, por conducción, pasa de una superficie a otra (de la superficie de mayor temperatura a la de menor temperatura); lo que genera un incremento o descenso en la temperatura al interior del edificio.

El flujo de calor transmitido por unidad de superficie “Q” (W/m²) de los materiales, depende del diferencial de temperatura entre las superficies “ΔT” (°C), del flujo de calor entre las dos superficies por metro cuadrado de muro “A” (m²) con espesor de la capa del material “e” (m) y del coeficiente de conductividad térmica del material “k” (W/m°C), que es una propiedad característica de cada material. La conductividad térmica es una forma de propagación del calor dentro de un

material, este valor depende de la densidad del material y se altera por el contenido de humedad (Zeevaert, 1981, p.p 83).

$$Q = A \ k/e \ (\Delta T) \quad (1)$$

Q - varía directamente con la diferencia en temperatura (ΔT)

Q - varía directamente con el área “A” (m²)

Q - varía inversamente con el espesor “e” (m)

Q - varía directamente con la conductividad térmica “k” (W/m°C)

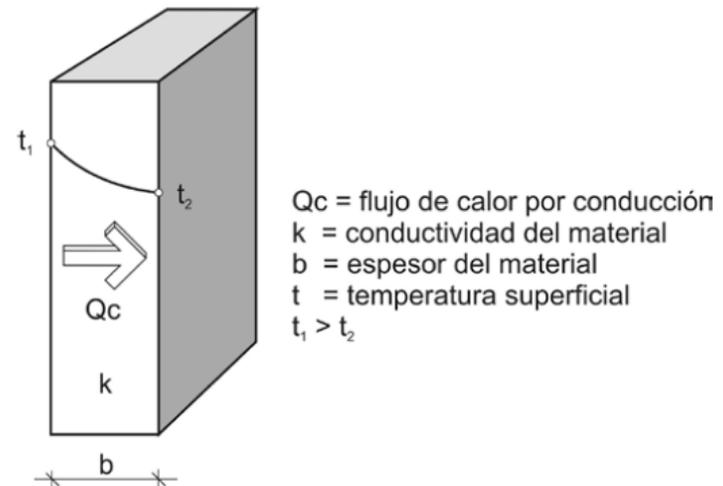


Figura 20. Gradiente de temperatura dentro de un muro.

De la ecuación 1, el diferencial de temperatura se encuentra compuesto por la temperatura sol-aire (T_{s/a}) y la temperatura interior (T_{int}):

$$\Delta T = T_{s/a} - T_{int} \quad (2)$$



En la ecuación 2, el “ $T_{\text{sol-aire}}$ ” se conoce como la temperatura sol-aire y es el incremento o descenso de la temperatura exterior, el cual se obtiene cuando la radiación solar y la temperatura ambiente actúan en conjunto. Por lo tanto el flujo de calor debido a la temperatura sol-aire es igual al flujo de calor por la temperatura del aire exterior (T_{ae}) más el efecto de radiación solar (I_G) (Zeevaert, 1981, p.p 116). Asimismo, la temperatura sol-aire permite conocer la cantidad de calor que entra por conducción desde el exterior, en un instante dado.

$$T_{\text{sol-aire}} = T_{\text{ae}} + I_G \quad (3)$$

T_{ae} = Temperatura del aire exterior

I_G = Radiación solar

Con la fórmula del flujo de calor (1), se observa que los materiales que conforman la envolvente de una edificación, son los que determinan la relación entre la temperatura exterior con la interior. Por lo tanto la masa térmica de los materiales influye en la conductividad térmica y en el flujo de calor del exterior al interior. Al mismo tiempo, con la fórmula 3 se observa que el flujo de calor de los materiales se encuentran relacionados directamente con las condiciones de clima del lugar (T_{ae}) y con la radiación del sol (I_G); por lo tanto entre más expuestos se encuentren los materiales a la radiación solar, mayor es la ganancia de calor del material, incrementando la temperatura al interior de un edificio.

Los factores mencionados anteriormente determinan el consumo de energía de los sistemas mecánicos de enfriamiento para mantener las condiciones de confort deseados. Por esta razón es esencial conocer las características térmicas de los materiales e implementar los más adecuados según las

condiciones del lugar; asimismo de proteger los materiales de la radiación solar.

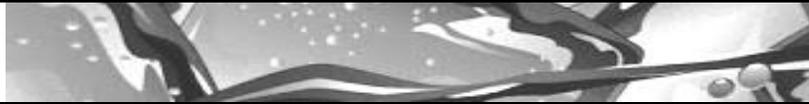
2.4 Materiales recomendados.

Otto Koenigsberger, Carl Mahoney y Martín Evans, del Departamento de Estudios Tropicales y de Desarrollo de la Asociación de Arquitectura de Londres realizan las siguientes recomendaciones al comportamiento térmico para climas cálidos-húmedos (González & otros, 1986, p.p 89):

Para climas cálidos húmedos, con una humedad mayor al 70% de promedio anual, requieren cubiertas ligeras con un valor de coeficiencia global de transferencia de calor máximo 1.1 W/m²°C, con un factor de calor solar máximo 4% y con un tiempo de transmisión térmica o retardo máximo 3 horas.

Otras recomendaciones de diseño que se deben de considerar son las especificaciones que deben de tener los materiales utilizados en las cubiertas, debido a que estos elementos son los que se encuentran expuestos a la bóveda celeste las 24 horas. Entre las cualidades que deben de tener estos materiales son los siguientes:

- La superficie exterior debe poseer una alta reflectancia a la radiación solar (el color debe de ser claro o brillante) y una alta resistencia al flujo de calor a través del material para disminuir la transferencia de calor hacia el interior de los espacios y evitar el aumento en el consumo de los equipos de aire acondicionado.
- Si el material de la envolvente no posee las cualidades del punto anterior se recomienda utilizar algún material aislante para evitar el calentamiento de los espacios interiores.



- El material también debe tener impermeabilidad a la lluvia para evitar la generación de hongos.
- Poseer una larga vida útil para disminuir el mantenimiento.
- Facilidad de montaje para disminuir el costo.
- Resistente a las tormentas tropicales.
- La materia prima preferiblemente debe ser local, para evitar la generación de CO² por el transporte del material.

Para las paredes en climas cálido-húmedos, siendo el caso de la ciudad de San Pedro Sula, se recomienda que se encuentren protegidas del sol sin importar la orientación. Sin embargo se debe de priorizar las paredes este, oeste y la sur; y por último la norte. Para las paredes este y oeste, se recomienda utilizar doble pared, que permita la circulación del aire y que evite la radiación solar directa y difusa sobre el muro que se encuentra en contacto con el espacio interno. Para las paredes que no se encuentran protegidos del sol se deben de implementar superficies reflectoras y utilizar colores claros.

Se puede concluir que dada la forma en que el calor se comporta, se propaga y se conduce y teniendo en cuenta la manera en que la temperatura afecta todos los materiales de la construcción; un estudio climático-arquitectónico bien enfocado no solamente debe de incluir una acertada localización y orientación, un consecuente diseño formal de la envolvente y una apropiada relación de las aberturas con respecto a los espacios; sino también del análisis de las características térmicas de los materiales y productos con los que se van a utilizar en la envolvente arquitectónica (Lozano, 2008).

2.5 Concreto.

El concreto es un conglomerado pétreo artificial, que se prepara mezclando una pasta de cemento y agua, con agregados finos y

gruesos. La sustancia químicamente activa de la mezcla es el cemento, el cual se une física y químicamente con el agua y, al endurecerse, liga los agregados para formar una masa sólida semejante a una piedra. (Parker, 1982).

El concreto posee diversas propiedades que lo ha hecho uno de los materiales más utilizados en la construcción, en el Manual Técnico de Construcción de Holcim (2008) se mencionan los siguientes:

- **Trabajabilidad:** es la facilidad para mezclar los ingredientes, su manejo, transporte y colocarse con poca pérdida de homogeneidad.
- **Consistencia:** se refiere al carácter de la mezcla respecto a su fluidez en su estado seco como fluido.
- **Durabilidad:** es un material que posee resistencia a la intemperie, a la congelación y descongelación a la acción de agentes químicos y al desgaste.
- **Impermeabilidad:** esta propiedad se logra cuando se posee un contenido bajo de agua en la mezcla, la inclusión del aire y el proceso de curado es óptimo.
- **Cambio de volumen:** el concreto posee una expansión debido a las reacciones químicas ocasiona contracción del concreto durante el secado.
- **Resistencia:** el material aumenta su resistencia conforme pasa el tiempo.
- **Resistencia a la compresión,** al fuego y una alta capacidad térmica.

El concreto que se utiliza para estructuras y en pavimento se espera que posea una vida larga y que sea de bajo mantenimiento. Por lo tanto debe de poseer buena durabilidad y resistencia ante las condiciones climáticas. El factor climático



más destructivo para el concreto es el congelamiento y el viento, mientras el concreto se encuentra húmedo.

2.5.1 Propiedades del concreto.

El calor específico es la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un grado Celsius o acumular calor en su propia masa. Cuando un material es expuesto al sol, tiende a calentarse como el caso del concreto comparado con el pasto, donde la cantidad de calor que se incrementa en su masa es mayor. El concreto posee un calor específico que varía según el tipo de concreto, en la tabla 5 se presentan algunos de estos tipos.

Tabla 5. Propiedades térmicas para diversos materiales según datos de la ASHRAE.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m°C)	Calor específico (J/kg°C)
Ladrillo recocido	2400	1.21-1.47	790
	2240	1.07-1.30	
	2080	0.92-1.12	
	1920	0.81-0.98	
	1760	0.71-0.85	
	1600	0.61-0.74	
	1440	0.52-0.62	
	1280	0.43-0.53	
1120	0.36-0.45		
Concreto (con arena y grava o piedra)	2400	1.4-2.9	800-1000
	2240	1.3-2.6	
	2080	1.0-1.9	
Concreto (con caliza)	2240	1.6	
	1920	1.14	
	1600	0.79	

Fuente: ASHRAE, 2001.

Otra propiedad de los materiales es la conductividad térmica, en el concreto, la madera, los suelos y los materiales aislantes presentan valores de conductividad relativamente bajos, lo que significa que estos transfieren el calor muy lentamente; lo cual se observa en la tabla 5, mostrando que dependiendo la densidad del concreto es la variación de la conductividad, entre menor es la densidad menor es el valor de la conductividad.

2.5.2 Dosificación/proporción

Como el concreto es una mezcla en la cual una pasta de cemento portland y agua sirve para ligar partículas finas y gruesas de materiales inertes, conocidos como agregados. Se pueden generar innumerables combinaciones al variar las proporciones de los componentes. Estas combinaciones tienen como resultado que el concreto posea diversas calidades.

Cuando el cemento se ha hidratado, la masa plástica se endurece convirtiéndose en un material similar a una piedra. A este período de endurecimiento se le conoce como curado y requiere de tres condiciones esenciales: tiempo, temperaturas favorables y la presencia continua de agua (Parker, 1982, p.p 25). Para obtener los requisitos del concreto, es esencial que el concreto endurecido tenga resistencia y durabilidad. Otra propiedad importante es la trabajabilidad en estado plástico.

Para la dosificación del concreto, como primer paso es determinar las proporciones de los distintos componentes y establecer la relación agua-cemento; el cual dependerá del grado de exposición a que estará sometido y de la resistencia deseada (Parker, 1982, p.p. 34).

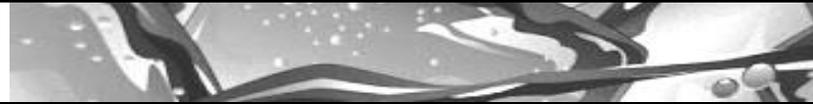


Tabla 6. Relación agua/cemento por peso.

Resistencia a la compresión a los 28 días (Kg/cm ²)	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41
350	0.48	0.4
280	0.47	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.

2.5.3 Temperaturas del concreto.

El concreto se comporta frente a las bajas temperaturas como si fuera una piedra natural, siendo su porosidad, así como su grado de saturación en agua, las características que determinan su comportamiento frente a las bajas temperaturas. Al helarse el agua introducida en los capilares, está aumenta y ejerce un efecto de cuña que fisura el concreto. Para mitigar este problema se utilizan aditivos aireantes que mejoran la resistencia del concreto frente a las bajas temperaturas, ya que las pequeñas burbujas de aire actúan como cámaras de expansión y anulan el efecto destructor de la presión interna ejercida por el agua al congelarse (García, Jiménez & Morán, 2009, p.p 83).

Un caso excepcional de muy bajas temperaturas (-273°C) lo constituye el almacenamiento de gas licuado en depósitos del concreto, que en muchos casos pueden sustituir con ventaja a los tradicionales depósitos metálicos (Jiménez & otros, 2009, p.p 83). En cuanto a las temperaturas altas, el concreto se comporta

frente a ellas experimentando una serie de fenómenos físico-químicos que en general se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 7. Acción de las temperaturas altas sobre el concreto.

Temperatura	Efectos sobre el concreto
< 100°C	Ninguna influencia
100 °C a 150°C	El concreto cede el agua capilar y de absorción
150°C durante un tiempo bastante largo	Ligera disminución de la resistencia a compresión y fuerte caída de la resistencia a tracción
Hasta 250°C en períodos cortos	Disminución de la resistencia a tracción sin afectar a la compresión
300°C a 500°C	Pérdida de un 20% de la resistencia a compresión; la de tracción puede haber desaparecido.
A 500°C y más	La cal hidratada se destruye por pérdida del agua de cristalización (agua combinada químicamente).
Hacia 900°C a 1,000°C	La deshidratación es total y provoca la destrucción completa del concreto.

Fuente: García, Jiménez & Morán, 2009.

2.5.4 Aplicaciones en la arquitectura.

En los últimos años, el concreto ha sido uno de los principales materiales para la construcción a nivel mundial por su versatilidad y durabilidad. Es considerado el segundo material con mayor consumo mundial después del agua, esto se debe a que es la base de construcción del ambiente urbano. Se considera que se consume el doble de concreto en la construcción que otros materiales como la madera, el acero el



plástico y el aluminio. Se estima que 25 billones de toneladas de concreto se manufacturan globalmente cada año, esto significa que cerca de 1.7 billones de camiones cargan cada año, 6.4 millones de camiones cargan por día y más de 3.8 toneladas se consume por persona cada año. Para el 2006 se estimó que la producción global de concreto fue entre 21 a 31 billones de toneladas de concreto, de los cuales el 2.54 billones de toneladas fue del cemento (World Business Council for Sustainable Development, 2009).

El empleo del concreto como material principal en las construcciones, se observa en las edificaciones de diversos despachos de arquitectura a nivel mundial. Entre estos despachos se encuentra *Zaha Hadid Architects*. De los proyectos desarrollados que emplean concreto se presenta el edificio Phano Science Center Wolfsburg en Alemania. Este edificio es un museo científico didáctico dedicado al mundo de la física, la biología y la química. El volumen es de concreto reforzado y la estructura de la cubierta es de acero.



Imagen 6. Phano Science Center Wolfsburg. Fuente: Kottas, 2011.

Otro arquitecto que en la mayoría de las obras arquitectónicas emplea el concreto como material principal es *Tadao Ando*. Entre estas obras se encuentra el Centro Roberto Garza Sada de Arte, Arquitectura y Diseño de la Universidad de Monterrey (UDEM). Este proyecto consiste de un prisma de concreto perfecto, que desde la parte superior se torsiona hacia la inferior, entrecruzando sus aristas y formando un gran arco.



Imagen 7. Iglesia sobre el agua. Fuente: Arquine, 2013.

Adicional al proyecto anterior, Tadao Ando también desarrolla una casa en Monterrey, siendo el primer proyecto en México. El cual se encuentra localizado al pie de una de las montañas de Monterrey, sumergida en la naturaleza y con una vista privilegiada de la ciudad. El proyecto se encuentra realizado de concreto, cristal y metal.



Imagen 8. Casa en Monterrey. Fuente: designaholic.mx, recuperado el 14 de mayo del 2015.



CAPITULO 3: Caso de estudio





3.1 El clima.

Para poder proyectar calidad ambiental en el interior de los edificios es importante conocer los factores ambientales del lugar, lo que permitirá realizar un análisis entre los factores climáticos³ previsible y las condiciones interiores de comodidad deseable para poder aplicar criterios de diseño respecto al clima y disminuir el consumo energético de los sistemas mecánicos de aire acondicionado.

El estudio de los datos climáticos depende de diversas variables geográficas específicas de cada lugar. Para realizar un estudio integral del clima se tiene que considerar los vectores del entorno que lo modifican, las cuales se ejemplifican en la figura 22.

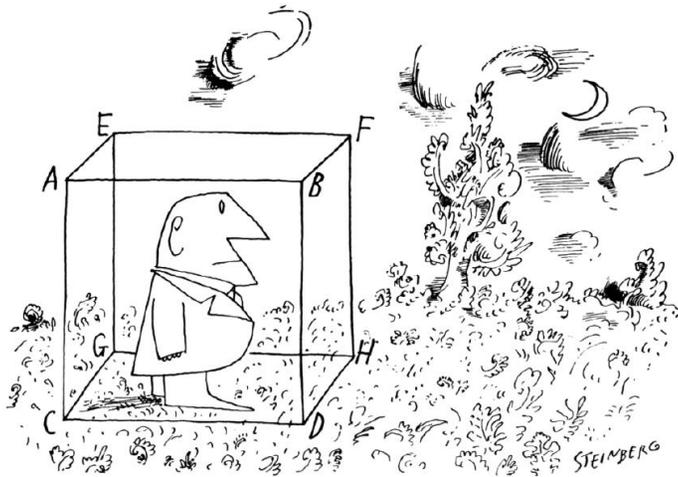


Figura 21. Comienzo del análisis de los factores climáticos del lugar (Chermayeff-Alexander/1963). Fuente: (Monroy, 2006, p.p 62).

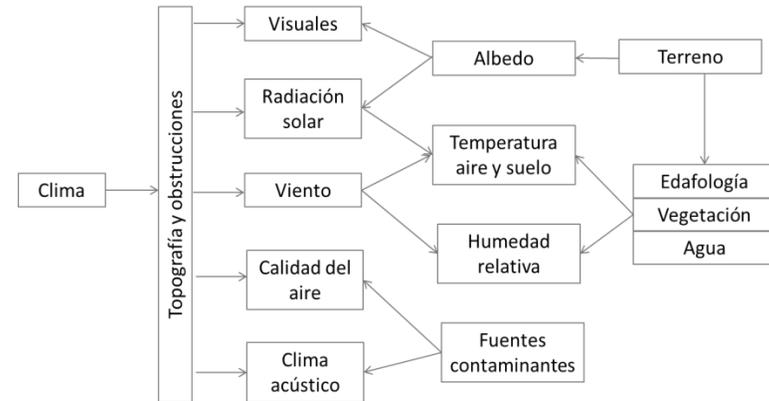


Figura 22. Vectores del entorno que modifican el microclima de un lugar. Fuente: Monroy, 2006, p.p 62.

Los factores ambientales que influyen en un edificio se pueden clasificar en internos y externos. Los factores internos son las condiciones ambientales de comodidad que se desean en el interior. Los factores externos son la base de partida del diseño, son las condiciones climáticas previsible según la ubicación del edificio.

Factores ambientales internos	Factores ambientales externos
Iluminación natural	Configuración del entorno
Temperatura media radiante	Nubosidad
Temperatura del aire	Soleamiento e irradiación
Humedad relativa	Temperatura del aire
Velocidad del aire	Humedad y pluviometría
Calidad del aire	Viento
Aislamiento acústico	Contaminación atmosférica
	Contaminación acústica

Figura 23. Factores ambientales internos y externos. Fuente: Monroy, 2006, p.p 61.

³ Los factores son los que determinan la presencia y la intensidad del clima. Los elementos son los que componen el clima.

3.2 San Pedro Sula, Honduras.

La ciudad de San Pedro Sula se encuentra ubicada en el municipio de Cortés, en la zona norte y es la segunda ciudad más importante del país. Es considerada la ciudad industrial del país, debido a que alberga en sus alrededores el mayor porcentaje de maquilas.

Posee un clima de Sabana Tropical y se caracteriza por tener dos estaciones; una seca que se presenta de enero hasta abril, siendo los meses de marzo y abril los meses más secos. La temporada lluviosa comienza en junio y termina entre noviembre y diciembre (Servicio Meteorológico de Honduras, 2013).



Figura 24. Mapa de Honduras.

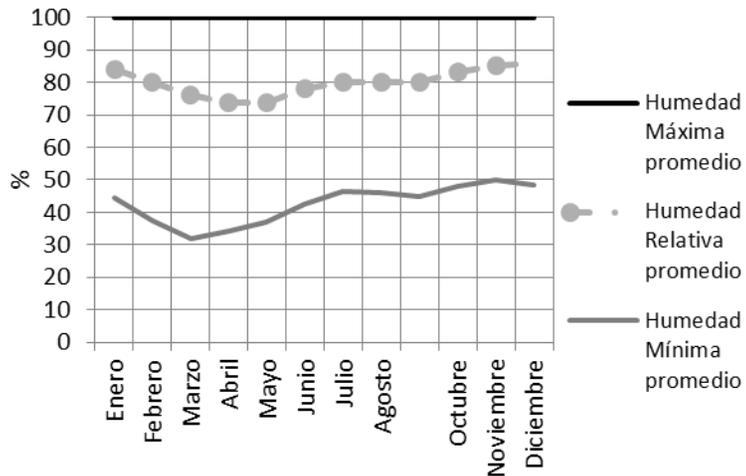
Fuente: Obtenida el 15 de junio del 2014 de es.justmaps.org/mapas/latinoamerica/honduras/sanpedrosula.asp



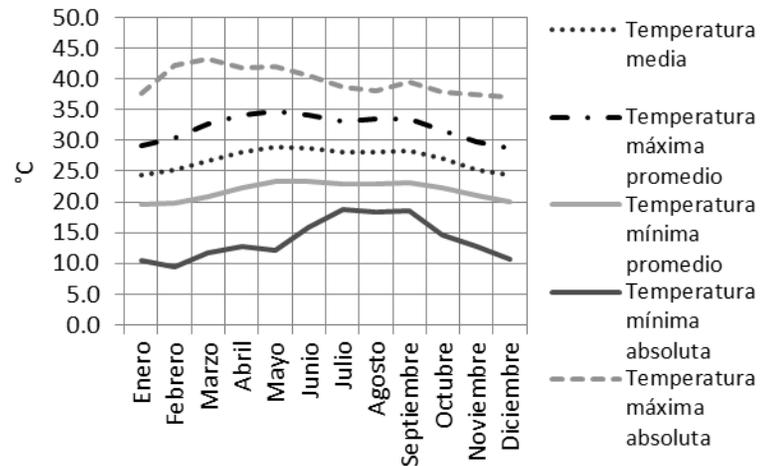
Imagen 9. Panorámica general de San Pedro Sula. Fuente: Obtenido el 20 de agosto del 2014 de en.wikipedia.org

Las coordenadas de la ciudad de San Pedro Sula son 15°27 Norte, con una longitud de 87°56 Oeste y con una altitud de 31 msnm. El área total del municipio es de 837.5928 km², de los cuales 550.0552 km² corresponde al área urbana y 287.5376 km² al área rural. La ciudad se encuentra localizada en el valle de Sula y está rodeada por la cordillera del Merendón, como se muestra en la imagen 9.

En San Pedro Sula prevalece un clima cálido-húmedo. La humedad relativa promedio histórica registrada entre 1954 y el 2012 oscila entre el 74% y 86% y la temperatura media histórica del mismo período oscila entre 24.3 °C y 29°C. La temperatura máxima promedio registrada en ese lapso de tiempo es de 34.7°C y la mínima promedio es de 19.5°C. (Servicio Meteorológico de Honduras, 2013). En la gráfica también se presenta registros de temperatura máxima absoluta de 44°C y mínima de 10°C. La temperatura mínima absoluta se registra cuando se presentan tormentas tropicales o huracanes.

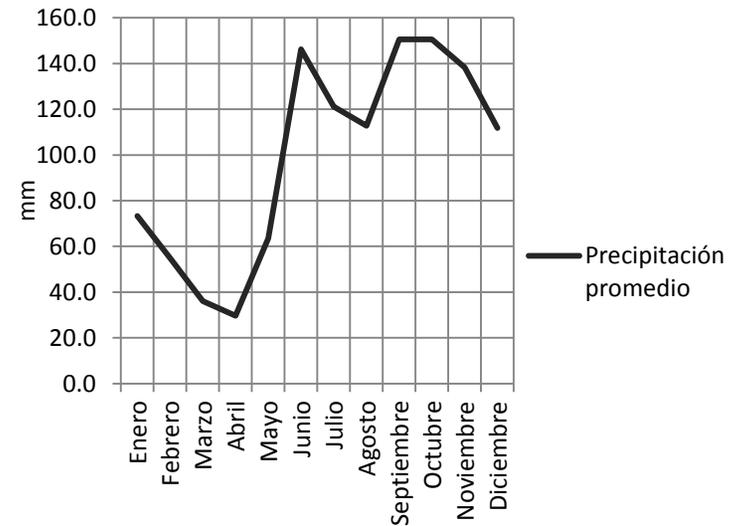


Gráfica 1. Humedad máxima, relativa y mínima promedio histórica de 1954 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.

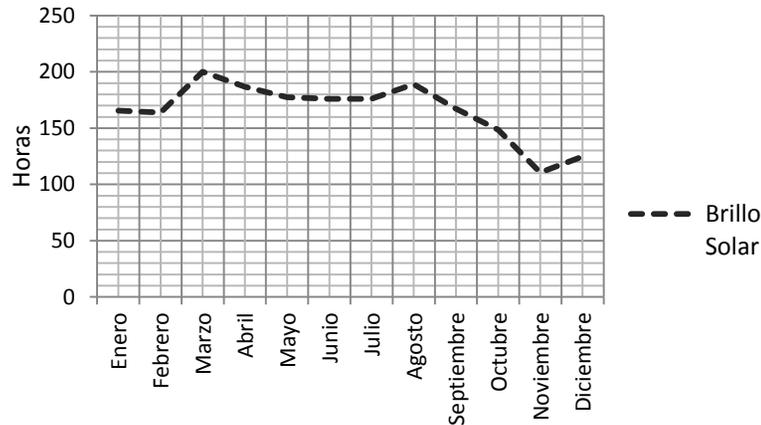


Gráfica 2. Temperatura máxima, media y mínima promedio histórica de 1954 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.

Como se puede observar en la gráfica 1, en el mes de Mayo la humedad relativa promedio va ascendiendo de 74% a 86% en el mes de diciembre, donde se registra el porcentaje más elevado. Este aumento de humedad se genera por ser los meses del año donde se registra un incremento de la precipitación, siendo en junio, septiembre y octubre los meses en los que se registra una mayor precipitación, ver gráfica 3. En la gráfica 2, se puede observar que en el mes de enero la temperatura asciende, siendo en marzo donde se registran las temperaturas más altas y en mayo la temperatura decae debido a que empiezan las lluvias, como se muestra en la gráfica 3.



Gráfica 3. Precipitación promedio histórica de 1944 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.



Gráfica 4. Brillo solar histórica de 1990 al 2012. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.

En la gráfica 4 se presenta las horas de sol por cada mes, se observa que en el mes de noviembre es el que posee menos horas de sol y en marzo el que más horas posee. Al mismo tiempo concuerda en que en estos meses presentan las temperaturas más bajas y la más alta, respectivamente.



Imagen 10. Ubicación de la estación meteorológica La Mesa en el aeropuerto de San Pedro Sula. Fuente: Google earth.

Las mediciones de clima en la ciudad de San Pedro Sula se realizaron en la estación meteorológica La Mesa (787080 MHLM), la cual se encuentra localizada en el aeropuerto de la ciudad. Latitud: 15.45 | Longitud: -87.93 | Altitud: 31

Tabla 8. Datos climáticos de la ciudad de San Pedro Sula. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Horas de Sol Promedio (Brillo solar) 1990-2012	165.5	163.7	200.1	186.7	177.5	176.0	175.9	189.1	167.2	148.4	110.4	124.8
Humedad Maxima Promedio 1954-2012	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Humedad Relativa Promedio 1954-2012	84	80	76	74	74	78	80	80	80	83	85	86
Humedad Minima Promedio 1954-2012	44	37	32	34	37	42	46	46	45	48	50	49
Temp Media C° 1954-2012	24.3	25.1	26.7	28.1	29.0	28.7	28.0	28.2	28.3	27.0	25.3	24.4
Temp Max prom 1954-2012	29.1	30.4	32.6	34.1	34.7	34.1	33.0	33.4	33.5	31.6	29.7	28.8
Temp Min Prom 1954-2012	19.5	19.7	20.8	22.2	23.3	23.4	22.9	23.0	23.1	22.3	21.0	20.1
Temp Min Absoluta C° 1954-2012	10.5	9.4	11.7	12.8	12.2	15.9	18.8	18.3	18.6	14.6	12.8	10.6
Temp Max Absoluta C° 1954-2012	37.6	42.2	43.3	41.7	42.1	40.6	38.7	38.1	39.5	37.8	37.5	37.0
Precipitacion Promedio (Milímetros) 1944-2012	73.3	54.9	36.1	29.7	63.6	146.2	121.1	112.8	150.6	150.6	138.4	111.8

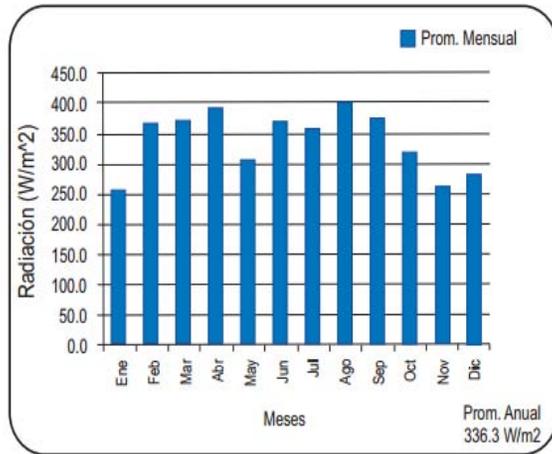


CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO

Tabla 9. Salidas y puestas del Sol. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Honduras, 2013.

Latitud		Longitud		Estación: La Mesa																							
15°27' 0.4032"		-87°55'47.9892"																									
Day	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre				
	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set	Rise	Set			
	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m			
1	618	1733	621	1750	609	1759	547	1804	528	1810	520	1819	525	1826	534	1822	539	1804	542	1741	548	1722	602	1719			
2	619	1733	621	1750	608	1800	546	1804	527	1810	520	1820	525	1826	534	1822	539	1803	542	1740	549	1722	603	1719			
3	619	1734	621	1751	607	1800	545	1804	527	1810	520	1820	525	1827	534	1821	539	1802	542	1739	549	1721	604	1720			
4	619	1734	620	1751	607	1800	545	1805	527	1810	520	1820	526	1827	535	1821	539	1802	542	1738	549	1721	604	1720			
5	620	1735	620	1752	606	1800	544	1805	526	1811	520	1821	526	1827	535	1820	539	1801	542	1738	550	1721	605	1720			
6	620	1735	620	1752	605	1800	543	1805	526	1811	520	1821	526	1827	535	1820	540	1800	542	1737	550	1720	605	1720			
7	620	1736	619	1752	605	1801	543	1805	525	1811	520	1821	527	1827	535	1819	540	1759	542	1736	550	1720	606	1721			
8	621	1737	619	1753	604	1801	542	1805	525	1812	520	1821	527	1827	536	1819	540	1758	542	1736	551	1720	607	1721			
9	621	1737	619	1753	603	1801	541	1805	525	1812	520	1822	527	1827	536	1818	540	1758	543	1735	551	1720	607	1721			
10	621	1738	618	1754	603	1801	540	1806	524	1812	520	1822	527	1827	536	1818	540	1757	543	1734	552	1719	608	1722			
11	621	1738	618	1754	602	1801	540	1806	524	1812	520	1822	528	1827	536	1817	540	1756	543	1734	552	1719	608	1722			
12	621	1739	618	1754	601	1801	539	1806	523	1813	521	1823	528	1827	536	1817	540	1755	543	1733	553	1719	609	1722			
13	622	1740	617	1755	601	1802	538	1806	523	1813	521	1823	528	1826	537	1816	540	1755	543	1732	553	1719	609	1723			
14	622	1740	617	1755	600	1802	538	1806	523	1813	521	1823	529	1826	537	1816	540	1754	543	1732	554	1719	610	1723			
15	622	1741	616	1755	559	1802	537	1806	523	1814	521	1823	529	1826	537	1815	540	1753	544	1731	554	1719	610	1724			
16	622	1741	616	1756	559	1802	536	1807	522	1814	521	1824	529	1826	537	1814	540	1752	544	1730	554	1718	611	1724			
17	622	1742	615	1756	558	1802	536	1807	522	1814	521	1824	530	1826	537	1814	540	1751	544	1730	555	1718	612	1724			
18	622	1743	615	1756	557	1802	535	1807	522	1815	522	1824	530	1826	537	1813	540	1751	544	1729	555	1718	612	1725			
19	622	1743	614	1757	556	1802	535	1807	522	1815	522	1824	530	1826	538	1813	541	1750	544	1729	556	1718	613	1725			
20	622	1744	614	1757	556	1803	534	1807	521	1815	522	1825	531	1825	538	1812	541	1749	545	1728	556	1718	613	1726			
21	622	1744	613	1757	555	1803	533	1807	521	1816	522	1825	531	1825	538	1811	541	1748	545	1727	557	1718	614	1726			
22	622	1745	613	1758	554	1803	533	1808	521	1816	522	1825	531	1825	538	1811	541	1748	545	1727	558	1718	614	1727			
23	622	1745	612	1758	553	1803	532	1808	521	1816	523	1825	531	1825	538	1810	541	1747	545	1726	558	1718	615	1727			
24	622	1746	612	1758	553	1803	532	1808	521	1817	523	1825	532	1825	538	1809	541	1746	546	1726	559	1718	615	1728			
25	622	1746	611	1758	552	1803	531	1808	521	1817	523	1826	532	1824	538	1809	541	1745	546	1725	559	1718	615	1728			
26	622	1747	611	1759	551	1803	530	1808	520	1817	523	1826	532	1824	538	1808	541	1744	546	1725	600	1718	616	1729			
27	622	1747	610	1759	550	1804	530	1809	520	1818	524	1826	533	1824	539	1807	541	1744	547	1724	600	1719	616	1730			
28	622	1748	609	1759	550	1804	529	1809	520	1818	524	1826	533	1823	539	1807	541	1743	547	1724	601	1719	617	1730			
29	622	1748			549	1804	529	1809	520	1818	524	1826	533	1823	539	1806	541	1742	547	1723	601	1719	617	1731			
30	621	1749			548	1804	528	1809	520	1819	524	1826	533	1823	539	1805	541	1741	547	1723	602	1719	618	1731			
31	621	1749			548	1804			520	1819			534	1822	539	1804			548	1723			618	1732			

En la tabla 9 se muestra la tabla con las entradas y salida del sol según los meses del año. Se puede observar que se tiene más horas de Sol desde mediados de marzo hasta a mediados de noviembre, siendo en mayo y junio donde se presenta las horas de salida más tempranas (5:20 am).



Meses	(W/m ²)
Ene	254.5
Feb	364.3
Mar	371.4
Abr	389.3
May	302.0
Jun	368.8
Jul	355.7
Ago	399.0
Sep	372.4
Oct	316.2
Nov	260.2
Dic	281.2
Prim.	336.3

Gráfica 5. Radiación solar entre el 2012 y el 2013 en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras. Fuente: Kawas, Mejía Escobar, & Gómez Canales, 2013.

“Honduras se encuentra en una de las regiones de mayor insolación en el ámbito mundial, sin embargo a pesar de las grandes posibilidades de aprovechamiento de ese recurso, no se cuenta con una red radiométrica ni con los resultados de un trabajo de investigación que muestre la distribución de la radiación solar en el país que permita el aprovechamiento eficiente del recurso. La estación Meteorológica Experimental del Departamento de Física de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, en Tegucigalpa, registró datos de radiación solar desde 1985 hasta 1990, con un promedio diario mensual total de radiación de 4.869 Kwh/m²”. (Barahona, Lagos, & Flores, 2001, págs. 1-6).

En la Gráfica 5 se presentan los valores de radiación obtenidos de la investigación realizada entre el 2012 y el 2013 en la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), en Tegucigalpa, debido que para la ciudad de San Pedro Sula no se cuentan con mediciones de radiación solar (Kawas, Mejía Escobar, & Gómez Canales, 2013).

3.3 Comparación del Clima cálido húmedo en México con San Pedro Sula, Honduras.

México posee aproximadamente el 4% del territorio con clima cálido-húmedo, siendo identificada especialmente en la zona sur del país. En el mapa de la Figura 36 se diferencian las zonas con los tipos de clima, en el cual la zona 1 posee clima cálido húmedo. Se identifica que en las ciudades de Ixtepec, Oaxaca y Villahermosa, Tabasco son las ciudades con clima similar a la ciudad de San Pedro Sula; pero se considera que la ciudad de Villahermosa posee las condiciones más similares debido a que el rango de temperatura varía entre 1°C a 2°C, siendo más elevada en San Pedro Sula, al mismo tiempo en Villahermosa el rango de humedad es entre el 60% al 80%.

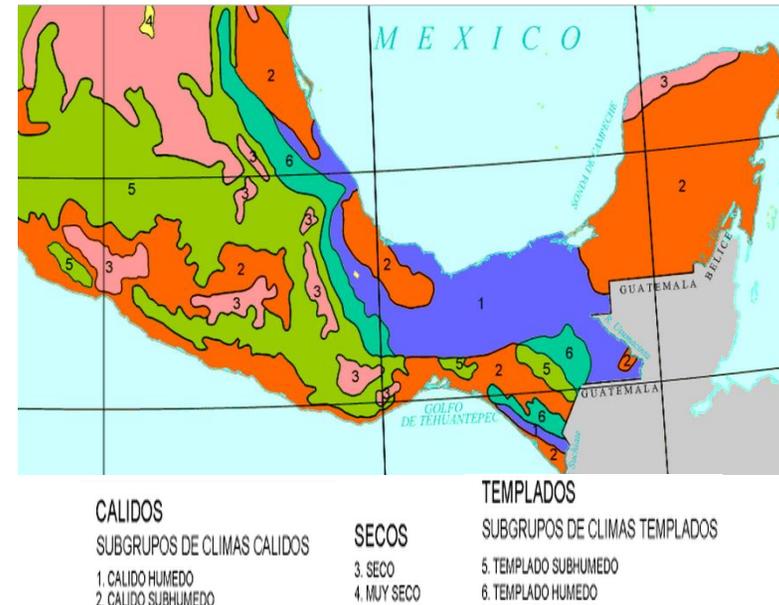
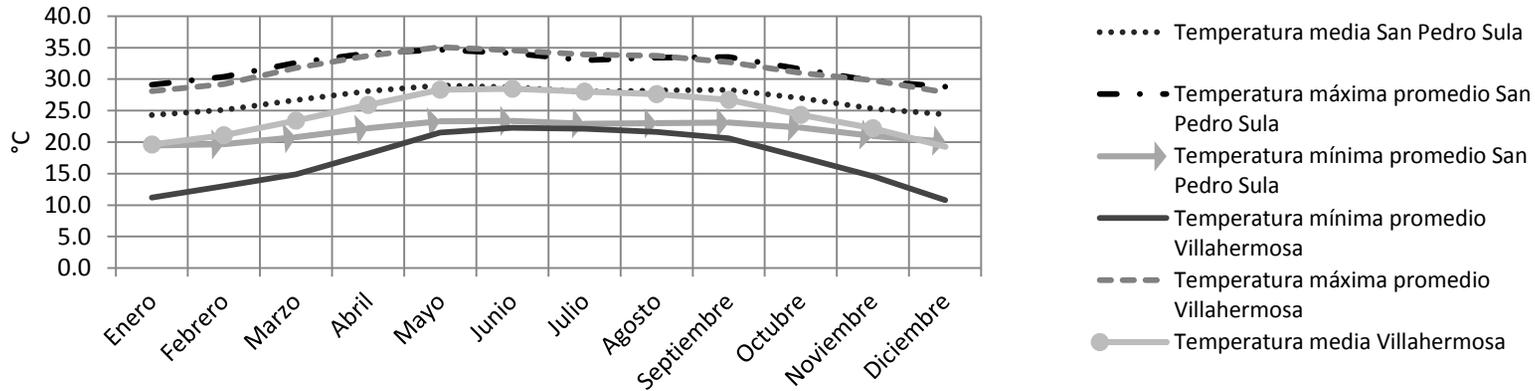
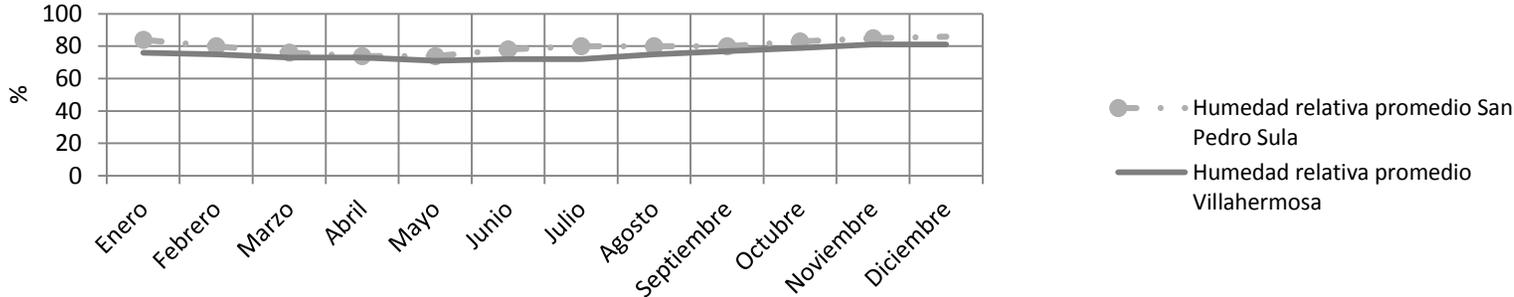


Figura 25. Mapa clima de México. Fuente: <http://smn.cna.gob.mx>



Gráfica 6. Comparación de la temperatura entre la ciudad de San Pedro sula, Honduras y Villahermosa, México. Fuente: Autoría propia de los datos obtenidos de las Normales Climatológicas de Villahermosa, México (período 1981-2000) y el Servicio Meteorológico de Honduras (período 1990-2012).

En la gráfica 6 se presentan una comparación de la temperatura mínima promedio, máxima promedio y media de la ciudad de San Pedro Sula, Honduras y Villahermosa, México. Se observa que la temperatura máxima promedio es similar en ambas localidades. La temperatura media y mínima promedio es similar entre los meses de mayo y septiembre, en los meses posteriores los valores de la temperatura en Villahermosa son menores que en San Pedro Sula.



Gráfica 7. Comparación de la humedad relativa entre la ciudad de San Pedro Sula, Honduras y Villahermosa, México. Fuente: Autoría propia de los datos obtenidos de las Normales Climatológicas de Villahermosa, México (período 1981-2000) y el Servicio Meteorológico de Honduras (período 1990-2012).

En la gráfica 7 se muestra la humedad relativa promedio de ambas localidades, las cuales presentan un comportamiento similar. En San Pedro Sula el rango es entre el 74% al 86% y en Villahermosa el rango es entre el 71% al 81%, por lo tanto el porcentaje de humedad es más elevado en San Pedro Sula.



3.4 Confort.

Para poder comprender el confort, que es lo que se desea lograr, primero se debe comprender el funcionamiento del cuerpo humano. El cuerpo humano es un sistema regulador de energía que mantiene una temperatura promedio de 37°C, esta temperatura varía según las partes del cuerpo. El calor que se produce en el interior del cuerpo se transporta a la piel y los pulmones por medio de los vasos sanguíneos, causando mecanismos fisiológicos como ser la transpiración y los escalofríos. Esto permite al cuerpo regular la temperatura disipando el calor por medio de conducción, convección, radiación y evaporación.

Existen diversas las definiciones de confort y parámetros que lo componen. Según Erga (2007), el confort térmico se define como un estado de completo bienestar físico, mental, emocional y social de las personas y que es favorable a la actividad que realizan. Watson D. (1979) define el confort térmico del ser humano como el estado mental en cual se expresa satisfacción con el ambiente. Olgay (1998) menciona que el hombre busca adaptarse a su entorno pero que requiera mínima energía, por lo que define a la zona de confort como aquella donde la mayor parte de la energía humana sea utilizada para la productividad (Olgay, 1998, pp. 16).

ASHRAE handbook define el confort térmico como el estado de la mente en el cuál se expresa satisfacción con el ambiente térmico. El propósito de las investigaciones que se han realizado con respecto al confort, han sido para definir las condiciones del ambiente térmico que el calentamiento, la ventilación y los sistemas de aire acondicionado (HVAC) deben de proveer para asegurar un ambiente confortable

(Santamouris, 2007, pp. 3). Fanger define confort como las condiciones en el cual el sujeto se encuentra entre ligeramente frío y ligeramente caliente (Givoni, 1998, pp. 29).

B. Givoni y L. Zeevaert mencionan que los seres humanos producen y pierden calor en condiciones saludables, debido a esto, en los espacios internos se debe producir confort controlando las pérdidas de calor en el cuerpo. El confort se logra cuando se alcanza el equilibrio entre la temperatura normal de la persona y la del medio ambiente. A nivel internacional se han implementado estándares que describen el confort térmico en espacios internos, los cuales se encuentran basados en análisis teóricos del intercambio de calor entre los seres humanos y el medio ambiente. Estos estándares utilizan los resultados de experimentos en laboratorios con climas controlados o en cámaras climáticas (Nicol, 2004).

Entre estos estándares se encuentra la ISO 7730, que utiliza el PMV (predicted mean vote) de Fanger, el cuál toma en cuenta seis variables térmicas: el rango metabólico (M), la ropa de los sujetos (Icl), la temperatura del aire (ta) y de las superficies que rodean (la temperatura radiante, tr), la presión del vapor de agua (pa) y la velocidad relativa del agua (var).

En el artículo realizado por Nicol (2004) menciona que uno de los problemas de la predicción del confort utilizando la ISO7730 en climas cálidos, es la limitación de la aplicación del PMV. En estos climas se ha encontrado que las personas se pueden sentir en confort en temperaturas que exceden los 30°C, especialmente si utilizan ventiladores.

De las definiciones anteriores, considero el confort como el estado en que el ser humano se encuentra en bienestar físico y



mental; el cual varía según las condiciones del clima en las que habita. Esto se debe a que las personas que se encuentran en climas cálidos poseen una mayor capacidad de resistir temperaturas más elevadas que las que habitan en climas fríos, y viceversa. Por lo tanto, es necesario plantear rangos de confort de temperatura y humedad según el tipo de clima.

3.5 Gráfica Psicométrica.

La gráfica psicométrica es una herramienta que se utiliza para analizar las condiciones climáticas de un lugar. Uno de los principales objetivos de esta herramienta es poseer un manejo óptimo del uso del aire acondicionado. En la gráfica, la parte superior de la gráfica se presenta la temperatura de bulbo seco y al costado la humedad contenida en el aire. La escala vertical es la humedad absoluta y muestra la humedad radio en gramos de vapor por gramo de aire seco. La línea curva es la humedad relativa, el cual representa el hecho de que a menor temperatura el aire puede retener menos humedad que con temperaturas altas. A mayor temperatura se tenga menor es el porcentaje de humedad y a menor temperatura el porcentaje de humedad es mayor.

Entre 1923 a 1925, ASHRAE desarrolla el índice de temperatura efectiva (ET), en el cuál se expresa en números el efecto de confort en combinación de la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del aire. Esta gráfica es creada con el objetivo de que los sistemas de aire acondicionado mantengan un clima de confort interno.

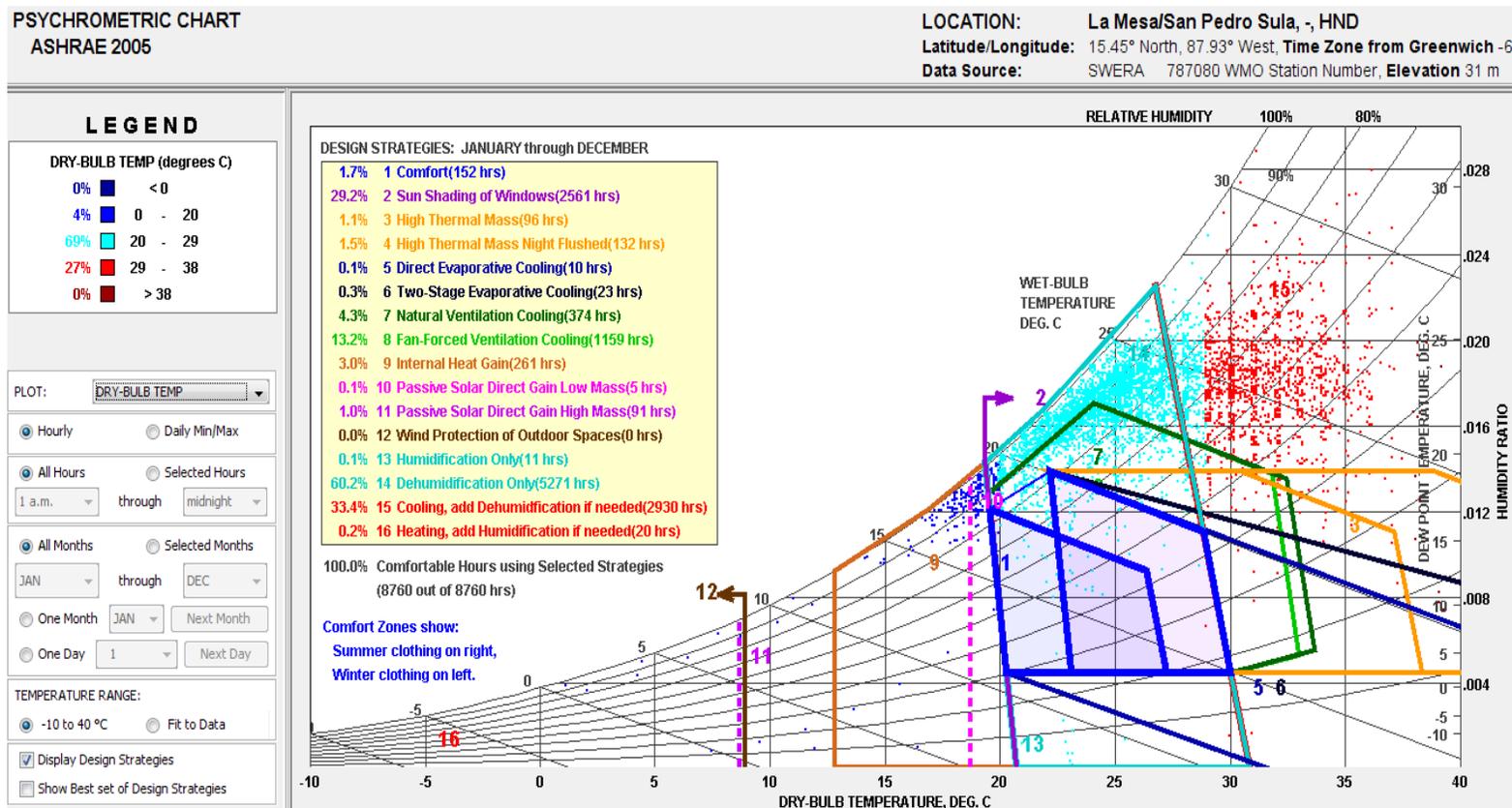
Posteriormente se genera la gráfica psicométrica bioclimática, la cual propone estrategias de diseño según la relación de la temperatura y humedad, con el objetivo de generar confort térmico en los espacios internos utilizando la

energía natural. Estas gráficas, como las define Givoni, facilitan el análisis de las características del clima según la localización desde el punto de vista de confort del ser humano. Se utilizan como una guía para maximizar el confort térmico en los espacios internos, en el cual se delimita la zona de confort, definida como el rango de condiciones climáticas en el cual la mayoría de personas no se encuentran en disconfort, ni muy caliente ni muy frío. Al mismo tiempo, estas gráficas se utilizan para proponer estrategias de diseño en edificios que no van a requerir equipos de aire acondicionado.

Todas las gráficas psicométricas proponen diversos rangos de confort. Olgay menciona que el rango de confort de temperatura es de 21°C a 27.8°C y con una humedad relativa promedio del 50% (Givoni,1998, pp. 25). Tanabe también realiza un estudio de sensación térmica en personas en Japón, basándose en el estudio de Fanger. Propone que el rango de temperatura de confort es de 26°C a 31°C con una velocidad del aire de 0.13 a 1.63 m/s (Givoni,1998, pp. 30). Estos rangos de confort dependen de las características climáticas de donde se desarrollaron los estudios de investigación; un ejemplo es la gráfica desarrollada por Olgay, la cual fue desarrollada para los diferentes climas en Estados Unidos. Otro ejemplo es la gráfica de Givoni, la cual es desarrolla para el clima de Israel. En el mundo se tienen diferentes características de clima, por lo que poseer un rango estándar de confort puede generar un desperdicio de energía por el enfriamiento o calefacción de los edificios en lugares donde la temperatura y los niveles de humedad no se encuentren justificados a las necesidades actuales de confort de una población específica. Por lo tanto, se recomienda analizar todas las metodologías y utilizar la que mejor se adecue a la zona en la que se está interviniendo.

En la gráfica 8 se presenta la psicrométrica para la ciudad de San Pedro Sula, la cual se realiza en el programa de computadora Climate Consultant 5.3. Este programa utiliza la base de datos del Departamento de Energía de Estados Unidos, el cual recolecta información de diversas estaciones meteorológicas a nivel mundial. Los datos se descargan de la página web de EnergyPlus. <http://www.energyplus.gov>

En la gráfica se puede observar que el 69% de la temperatura de bulbo seco se encuentre en el rango de 20°C a 29°C (puntos celestes), el 27% se encuentra en el rango entre 29°C y 38°C (puntos rojos) y el 4% esta entre el rango de 0°C a 20°C (puntos azules). También se muestra que solamente el 1.7% del tiempo se presentan condiciones de confort, el 60.2% se necesita deshumidificar y el 33.4% del tiempo se necesita enfriar y deshumidificar.



Gráfica 8. Carta psicrométrica de la ciudad de San Pedro Sula por hora. Fuente: Elaboración propia con el software Climate Consultant 5.3, 2013.

3.6. Estrategias de diseño.

Al realizar el análisis del clima de San Pedro Sula en la gráfica psicométrica del programa Climate Consultant 5.3, se genera una tabla con estrategias de diseño. En estas estrategias se señala el porcentaje de implementación de estas estrategias, donde se muestra que para San Pedro Sula el 60.2% de los días del año se necesita deshumidificación, el 33.4 % corresponde a un enfriamiento por medio de sistema mecánico, el 29.2% es de protección de las ventanas contra el sol y el 13.2% es de ventilación por medio de un ventilador. También indica que solamente el 1.7% de los días del años se encuentra en confort. Tomando como base la gráfica psicométrica realizada para la ciudad de San Pedro Sula, se plantean las siguientes estrategias de diseño para minimizar el consumo de la energía eléctrica y mantener las condiciones de confort térmico en el interior del edificio.

- Rodear las viviendas de áreas verdes, debido a que mantienen una temperatura constante y absorben menor radiación solar que otros materiales.

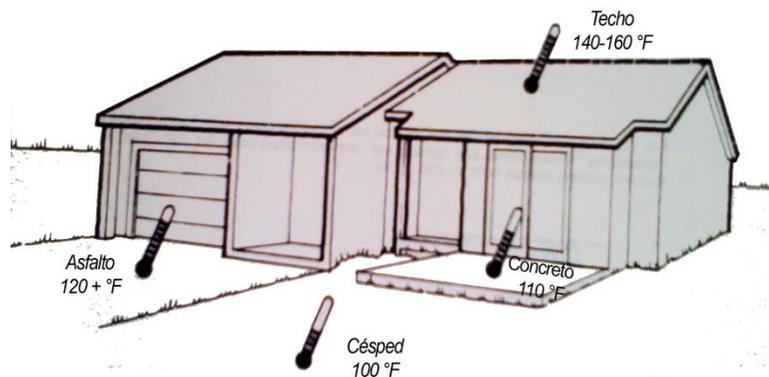


Figura 26. Diferentes temperaturas de las áreas de una vivienda.
Fuente: Traducido del libro de Watson D. (1979)

- Minimizar las áreas de paredes y techos expuestas a la radiación solar: Watson (1979) menciona que el SVR (relación entre la superficie y el volumen) es una manera de expresar la relación entre la superficie externa del edificio y el espacio encerrado; y que puede ser usado para comparar las diferentes formas del edificio que contienen volumen de espacios iguales. También indica que entre más compacto es la forma del edificio menor es la pérdida de calor.

Zeevaert (1998) señala que a medida que el volumen aumenta (vertical y horizontal) el impacto solar disminuye. Esto se refleja en los espacios pequeños, los cuales tienden a ser dependientes de la envoltura y se encuentran influidos directamente por el medio ambiente externo; mientras que en los espacios grandes tienden a ser dependientes de las cargas internas.

- Ventilación cruzada: Dicha estrategia consiste en generar aberturas estratégicamente ubicadas para facilitar el ingreso y salida del viento a través de los espacios interiores de los edificios, considerando de manera cuidadosa la dirección de los vientos dominantes.



Figura 27. Ventilación cruzada. Fuente: Dibujos realizados por el Arq. Guillermo Altamirano.



- Orientar adecuadamente los edificios: La orientación de las fachadas depende de la altitud, la latitud y la longitud del lugar. Para climas cálido-húmedos se recomienda que las fachadas más cortas se encuentren ubicadas en la orientación que donde la radiación solar incide más.

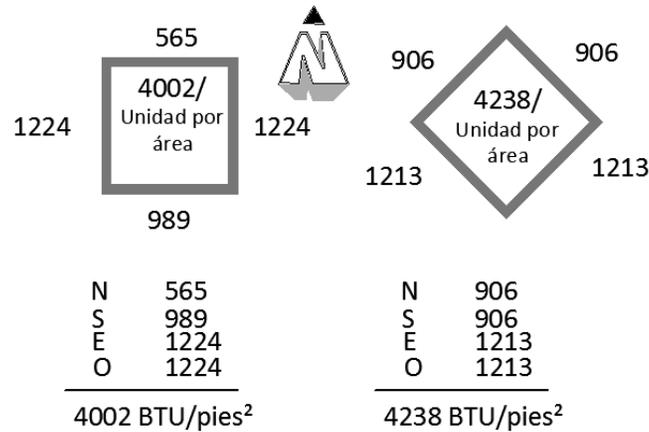


Figura 28. Irradiación Solar en BTU/m² en el área de paredes verticales en la ciudad de Dodge, Kansas. Fuente: Traducido del libro de Watson D., 1979.

- Altura del edificio: La altura del edificio tiene considerable influencia en la ganancia solar, debido a que si se incrementa la altura aumenta el área de las paredes expuestas al sol. En época de verano la radiación es más intenso en las superficies horizontales, lo cual es ventajoso disminuir el área del techo e incrementar la altura del edificio (las paredes); debido a que es más fácil proteger del sol las paredes que el techo. Esta relación entre el área de pared y el área del techo tiene mayor relevancia en regiones donde el enfriamiento es el requerimiento principal de energía. En las latitudes debajo del trópico de

Cáncer, cerca del Ecuador, las superficies horizontales reciben mayor radiación solar.

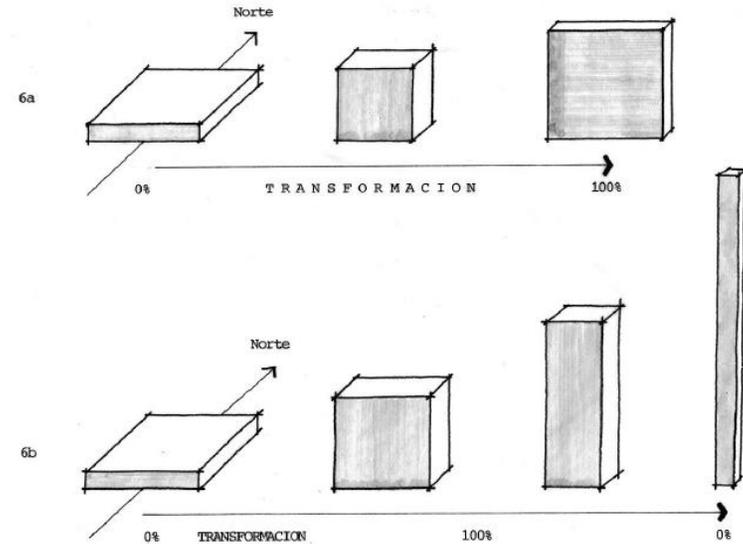


Figura 29. Transformación en la forma de un edificio de carácter horizontal a vertical. Fuente: Zeevaert. L. (1981)

- La forma y la inclinación del techo: el efecto de la ganancia solar en el techo va a depender del ángulo del sol. Cuando el sol se encuentra en el punto más alto, todos los techos de forma horizontal absorben más calor. En cambio, a más bajo sea el ángulo solar, en los techos con una pronunciada inclinación se incrementará el área expuesta al sol, incrementando la ganancia solar. Watson (1979) indica que lo más importante es lo que sucede debajo del techo que la forma del techo en sí, por lo tanto es importante generar ventilación entre el techo y el espacio habitable. También indica que en techos planos la ventilación se dificulta, generando una concentración de radiación solar sobre pequeñas superficies de área. En cambio, en los techos

inclinados se puede generar ventilación cruzada, evacuando el aire caliente producido en el interior y por la ganancia de calor del techo. La extracción del aire se puede hacer de manera natural o mecánica (ubicando un extractor de aire).

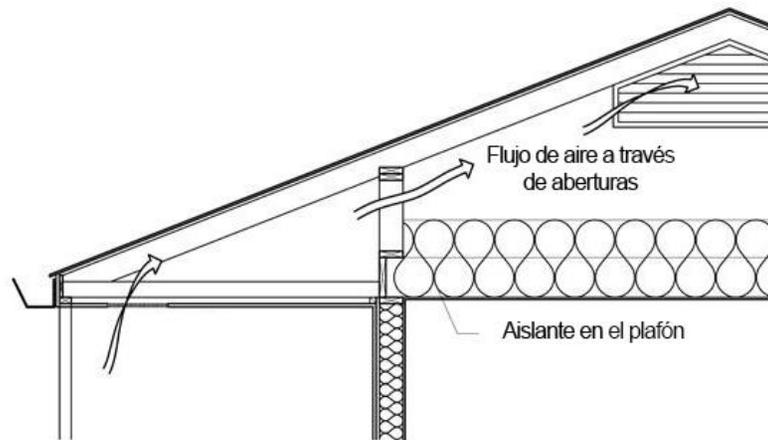


Figura 30. Ventilación del techo. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3, 2013.

En climas húmedos, los techos inclinados y con buena ventilación, trabajan bien para proteger de la lluvia y al extenderse pueden proteger las entradas, barandas y el pórtico.

- Salidas de aire caliente (efecto chimenea): reducir la temperatura interna por medio de la circulación constante del aire, eliminando el aire caliente. El aire caliente es menos denso y tiende a subir, por lo que esta estrategia plantea una abertura en el techo para evacuar el aire caliente. A mayor inclinación, más rápida es la evacuación del aire caliente.

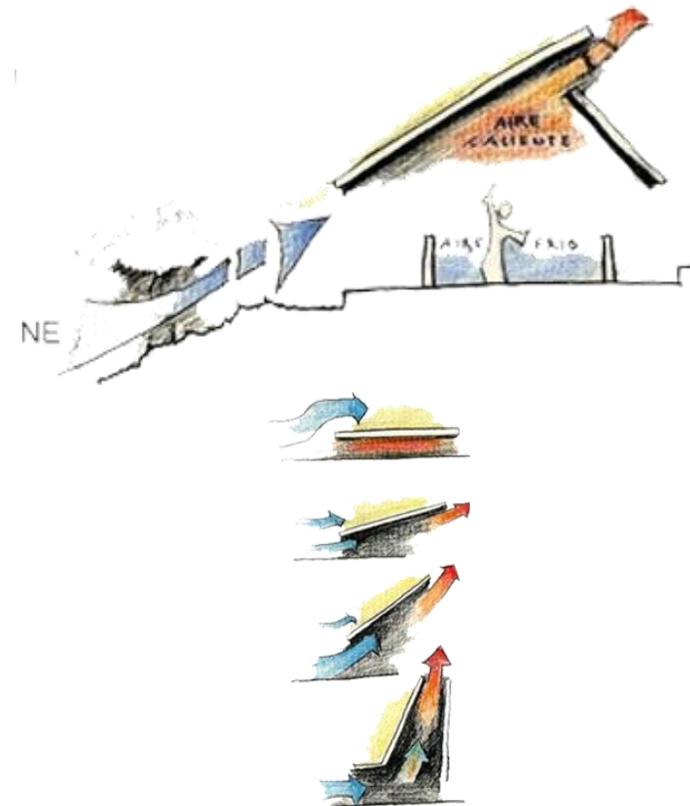


Figura 31. Esquemas de la extracción del aire caliente en el techo. Fuente: Dibujos realizados por el Arq. Guillermo Altamirano.

- Ubicar los diferentes espacios según la función y la orientación del sol: esta estrategia consiste en separar en diferentes zonas la vivienda según las actividades que se realizan y el movimiento del sol; dividiéndolas en zonas calientes y en zonas frías. Con el objetivo de disminuir el consumo de energía de los equipos utilizados para enfriar. En clima cálido-húmedo se pueden utilizar las áreas de



menor uso (área de lavado, bodega, baños, etc.) como aislantes para que retarden la transmisión de calor a las zonas de mayor uso; por lo que se ubican en las áreas con mayor incidencia solar.

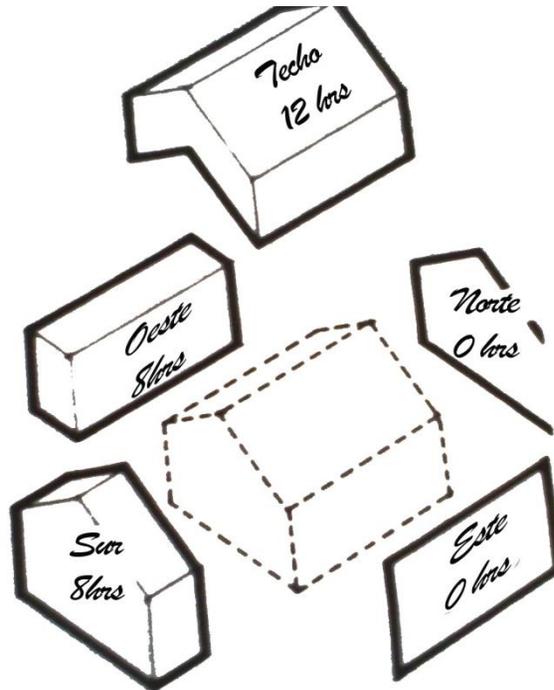


Figura 32. Análisis del tiempo en que incide el sol en la envolvente. Fuente: Traducido del libro de Watson D., 1979.

- Materiales: con los materiales se debe de conocer las características de cada una y para poder elegir el que mejor pueda ayudar a generar confort en el interior. Entre las características de los materiales a considerar se tiene la masa térmica (capacidad de acumulación de calor de los materiales) y la reflectancia (evita la absorción del calor reflejando dependiendo del acabado del material).

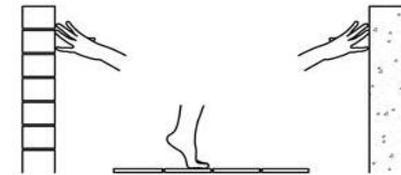
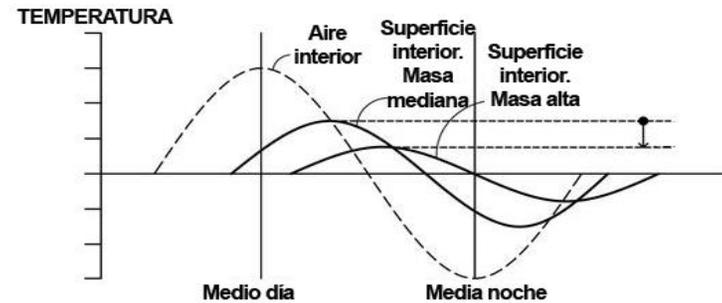


Figura 33. Utilizar materiales con alta masa térmica en el interior para reducir la temperatura. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3, 2013.

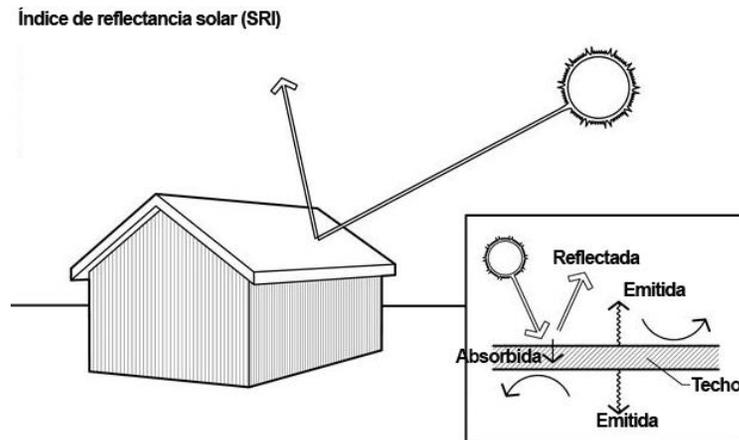


Figura 34. El uso de colores claros en los materiales del edificio y en el techo, reducen la conducción de calor. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3, 2013.



- Protección solar: controlar la cantidad de radiación solar directa de las paredes externas por medio de aleros, parasoles, corredores y terrazas. Estos elementos generan sombra en las paredes de la envolvente, la cual ayuda a prevenir el sobre-calentamiento del espacio interno.

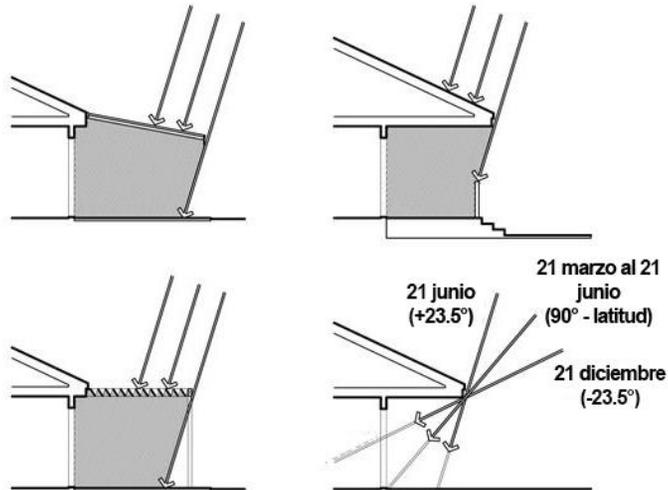


Figura 35. Protección de las ventanas diseñadas para esta latitud que puede reducir o eliminar el uso de aire acondicionado. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3, 2013.

- En climas cálidos húmedo los sistemas mecánicos siempre serán requeridos, pero se puede reducir el consumo de energía si el edificio se diseña para minimizar el sobrecalentamiento. Entre estos sistemas mecánicos se encuentran los ventiladores y el aire acondicionado. En días cálidos, el uso de ventiladores o de equipos que muevan el aire, pueden generar sensación de enfriamiento de hasta de 2.8°C menos de lo que necesita un aire acondicionado.

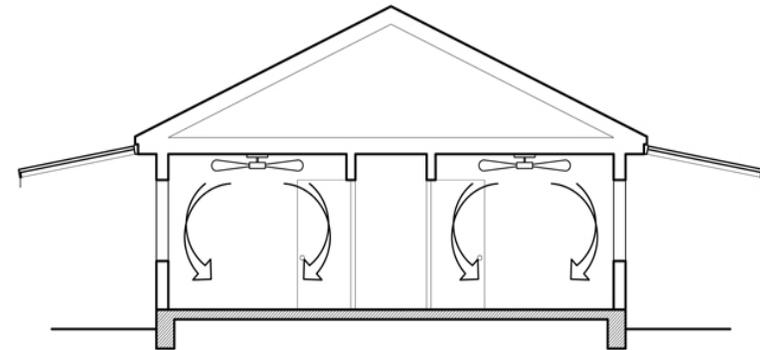


Figura 36. Utilización de ventiladores para el movimiento del aire del interior. Fuente: Climate Consultant 5.3, 2013.

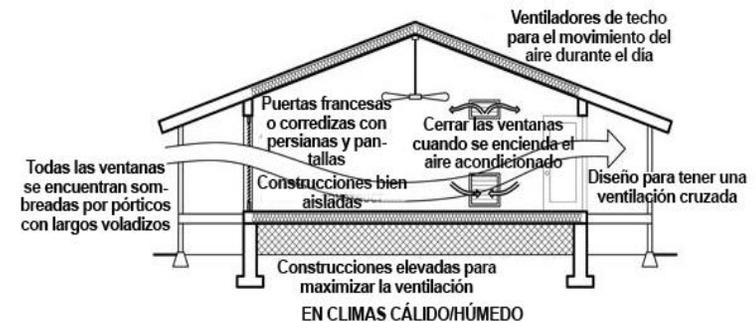
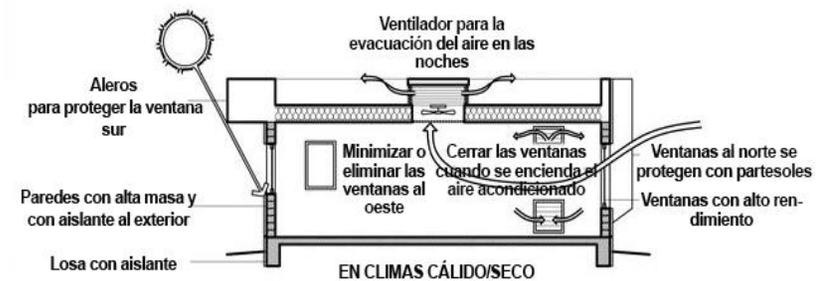
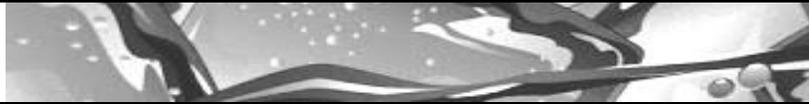


Figura 37. Diseño del edificio para minimizar el sobrecalentamiento y disminuir el tamaño de los equipos de aire acondicionado. Fuente: Traducido del software Climate Consultant 5.3, 2013.





CAPITULO 4: Demanda de energía y construcción



4. Demanda de energía y construcción.

El caso de estudio como se mencionó anteriormente es la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. En el capítulo 3 se presenta el análisis del clima de la ciudad, en este capítulo se analiza la demanda de energía y la tipología de construcciones que se realiza en la ciudad.

4.1 Demanda de energía en Honduras.

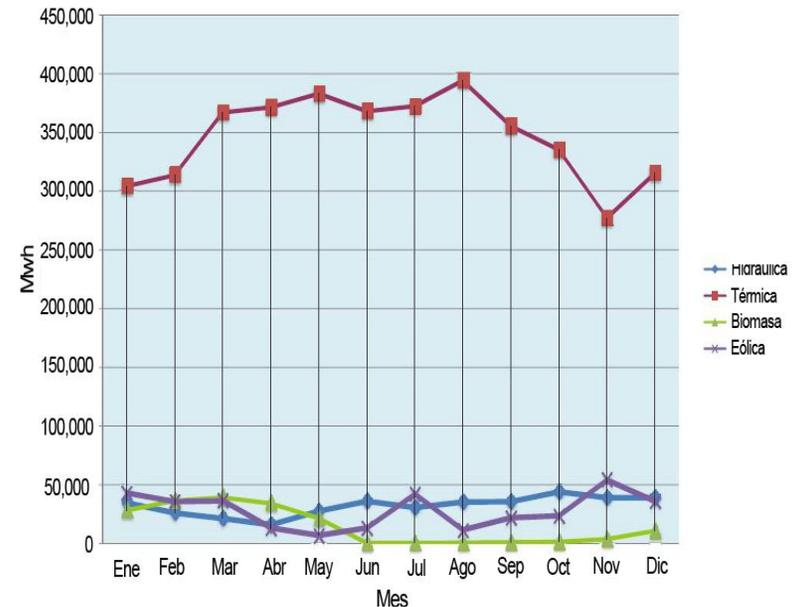
En Honduras, la energía térmica representa el mayor porcentaje en la producción de la energía, el cual es generado por motores de diésel (841,300 kW) y con turbinas de gas (39,500 kW), como se muestra en la gráfica 9 y en el cuadro 10.

Tabla 10. Energía generada en el sistema ENEE en el año 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

TIPO DE PLANTA	2011		2012		Variación	
	Potencia kW	Porcentaje %	Potencia kW	Porcentaje %	Potencia kW	Porcentaje %
Total	1,780,630	100.0	1,782,640	100.0	2,010	0.1
Hidráulica Estatal	464,400	26.1	464,400	26.1	0	0.0
Térmica Estatal	124,600	7.0	124,600	7.0	0	0.0
Motores Diesel	91,600	0.0	91,600.0	5.1	0	0.0
Turbina de Gas	33,000	0.0	33,000.0	1.9	0	0.0
Plantas Privadas	1,191,630	53.5	1,193,640	67.0	2,010	0.2
Hidráulica	71,780	4.0	73,390	4.1	1,610	2.2
Térmica	880,400	49.4	880,800	49.4	400	0.0
Motores Diesel	840,900	47.2	841,300	47.2	400	0.0
Turbina de Gas	39,500	2.2	39,500	2.2	0	0.0
Biomasa	137,450	7.7	137,450	7.7	0	0.0
Eólica	102,000	5.7	102,000	5.7	0	0.0

A pesar de que la mayor producción de energía es térmica, en los últimos años se ha buscado otras fuentes de energía alternativas para disminuir la dependencia del petróleo. Por lo

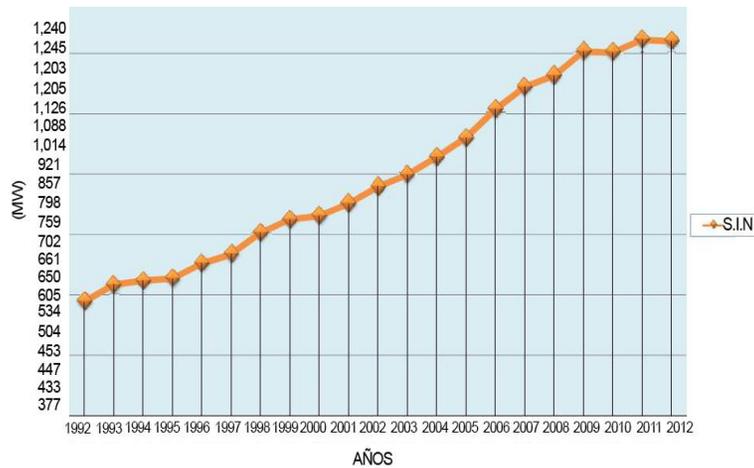
que se ha empezado a generar energía por medio de la producción eólica, hidráulica y la biomasa. Todavía los porcentajes de producción son mínimas en comparación con la térmica pero a medida que se generen nuevas políticas de inversión, estas energías se volverán más rentables y con mayor capacidad de producción (ver gráfica 9).



Gráfica 9. Energía generada en el sistema ENEE en el año 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

Como se observa en la gráfica 10, la demanda en el país ha ido ascendiendo. En el 2012 el consumo máximo fue de 1,282 MW en el mes de mayo, siendo en los meses de mayo a octubre los que se registraron con un mayor consumo. Esto se debe a que en esos meses la temperatura es la más alta, por lo tanto los sistemas de aire acondicionado realizan mayor esfuerzo, aumentando la demanda de energía eléctrica.

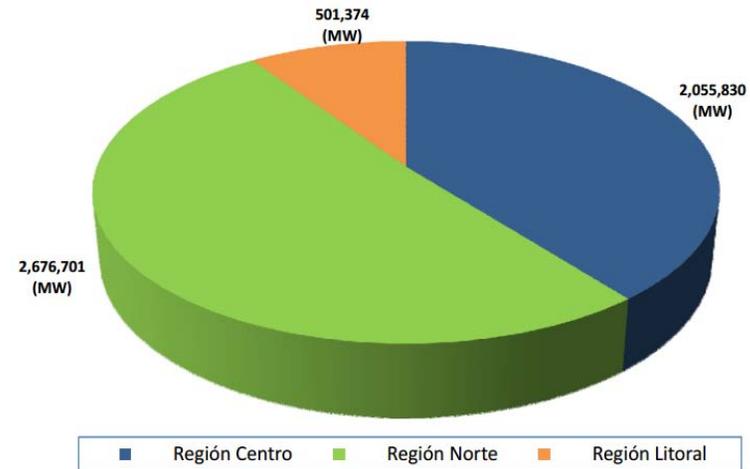
La Empresa de Energía Eléctrica (ENEE) proyecta que la demanda energética va ir aumentando cada año. En el sector residencial calcula que para este año el consumo será de 2,464,045 MWh y que para el 2027 aumentará a 5,244,101 MWh.



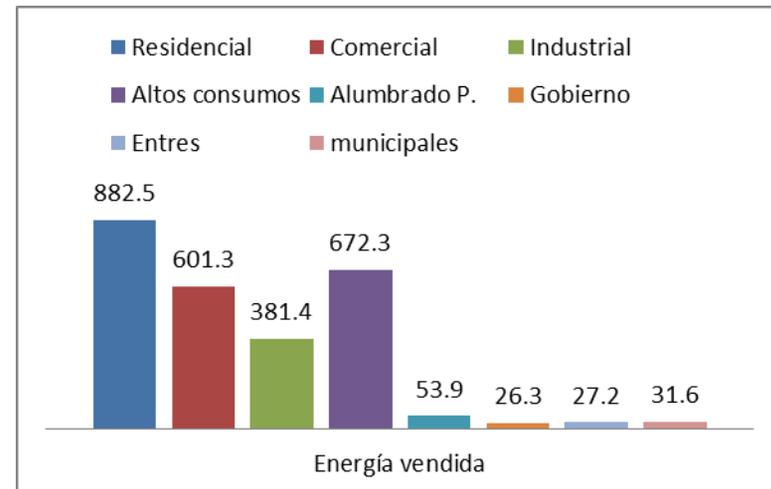
Gráfica 10. Demanda máxima histórica del sistema nacional interconectado de 1992 al 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

Para el 2012, la ENEE proyectó que la zona de mayor demanda de energía del país es la zona norte, como se muestra en la gráfica 11, representando el 51% del consumo. Esto se debe a que en esta zona se concentra la mayor industria del país, entre ellos maquilas, ingenios azucareros, industrias de plástico, cementeras entre otros. En la zona norte, el consumo de la energía del sector residencial representa un 33% y del sector comercial de un 23% (gráfica 12). En el sector industrial el consumo es menor debido a que muchas industrias mantienen políticas internas para el ahorro de energía y utilizan equipos e

instalaciones eficientes energéticamente (Mabel Méndez, 2010, p.p 6).

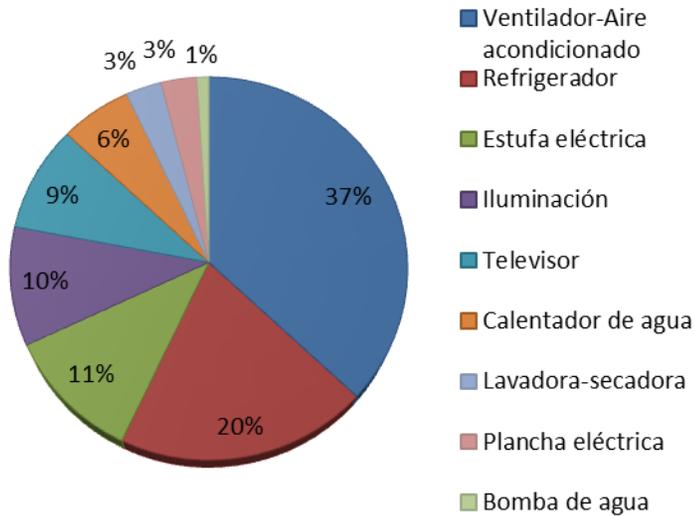


Gráfica 11. Energía interna vendida por región, 2012. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).



Gráfica 12. Tipos de usos de energía en la zona norte, 2011. Fuente: Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

El mayor consumo energético en la zona norte lo representa el sector residencial del cual el 37% del consumo es por el uso del aire acondicionado (gráfica 13), con el fin de generar confort térmico en los espacios internos.



Gráfica 13. Distribución de energía eléctrica por hogar en San Pedro Sula. Fuente: Generación Autónoma y uso racional de energía eléctrica GAUREE, 2005.

En los últimos años, la ENEE ha generado racionamiento en el abastecimiento de la energía realizando cortes continuos en diversos sectores de la ciudad, afectando específicamente al sector comercial. Esto se debe a que las altas temperaturas han generado el sobrecalentamiento de las líneas de distribución de la energía y al incremento de la demanda y a la poca oferta que se posee en la actualidad (Baquedano, 2013).

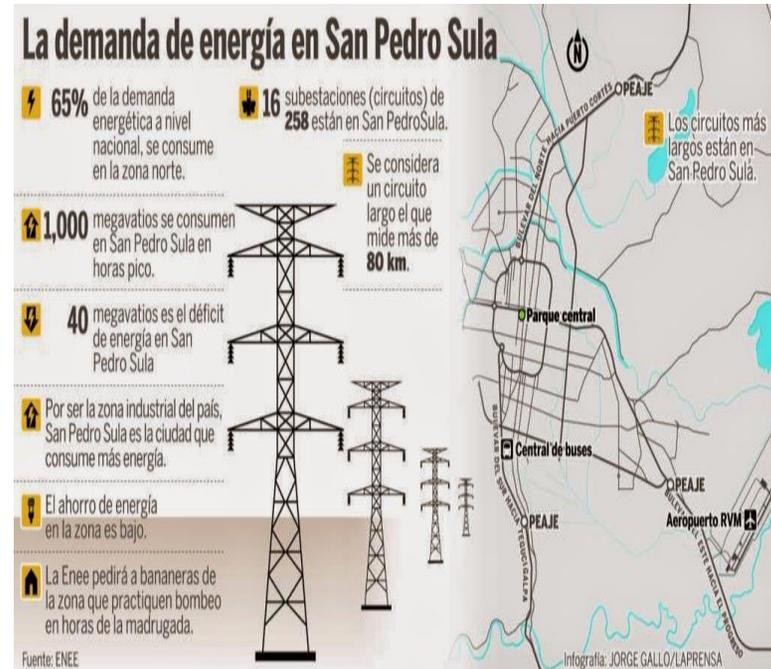
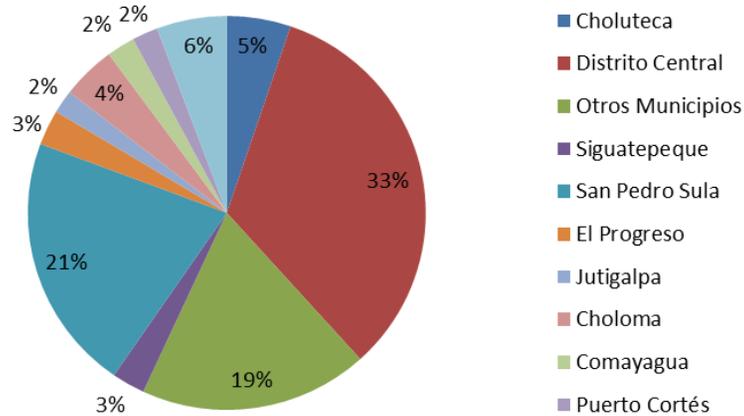


Figura 38. Demanda de energía en San Pedro Sula. Fuente: Méndez (2014)

4.2 Construcción en San Pedro Sula, Honduras.

Durante el 2012, la encuesta trimestral “Barrido de edificaciones” señala que la construcción en San Pedro Sula representó el 21.1% de la construcción del país, representando el segundo municipio con mayor construcción en ese año, ver gráfica 14.

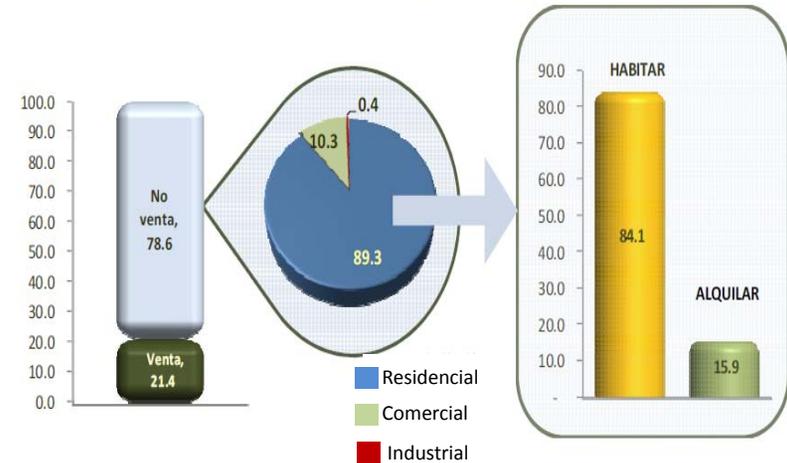


Gráfica 14. Estructura del área total construida, según municipio de enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras, BCH, 2012.

El área residencial representa el mayor porcentaje de área construida en el país y con mayor inversión, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Área total construida según destino de enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).

Destinos	Miles de m ²			
	2011 ^{p/}	2012 ^{p/}	Variación Relativa	
			2011/2010	2012/2011
Residencial	1,245.2	1,198.8	-0.1	-3.7
Comercial	367.7	497.8	8.8	35.4
Industrial	53.3	29.2	87.5	-45.1
Servicios	213.4	192.2	2.1	-10.0
Total	1,879.5	1,918.1	3.2	2.1



Gráfica 15. Mercado de las edificaciones, enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).

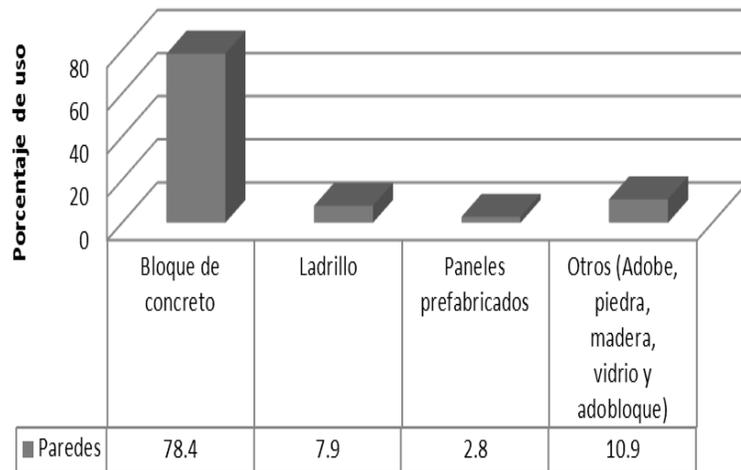
En la gráfica 15, se muestra que el 78.6% de las construcciones se destinó a “no venta”, correspondiendo a ser construcciones utilizadas por los propietarios o para alquiler. De ese 78.6%, el 89.3% se destinó para construir viviendas, del cual el 84.1% fueron ocupados por sus propietarios y el 15.9% fue para alquiler.

En las obras construidas, según la categoría socioeconómica, la mayor participación se ubica en el estrato alto con un 40.9%, equivalente a 784.9 miles de m². En los estratos medio y medio bajo representaron el 29.1% y 30% respectivamente.

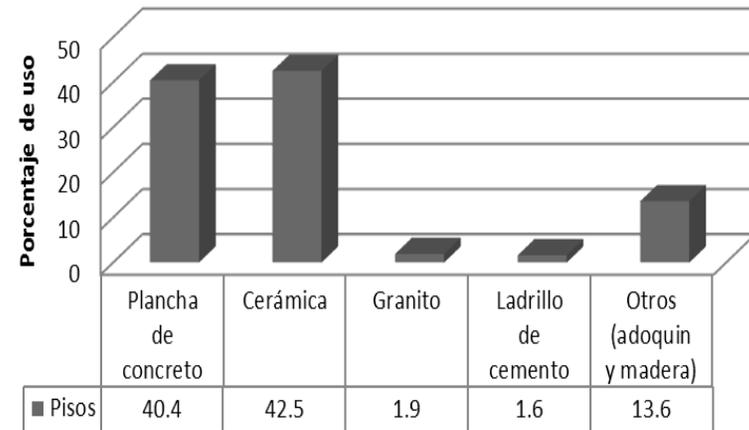
Tabla 12. Área total construida según estrato socioeconómico de enero a diciembre del 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).

Estrato	Miles de m ²		Variación Relativa		Peso	
	2011 ^{p/}	2012 ^{p/}	2011/2010	2012/2011	2011	2012
Alto ^{1/}	666.7	784.9	1.7	17.7	35.5	40.9
Medio	552.4	558.6	1.4	1.1	29.4	29.2
Medio Bajo ^{2/}	660.5	574.6	6.4	-13.0	35.1	30.0
Total	1,879.5	1,918.1	3.2	2.1	100.0	100.0

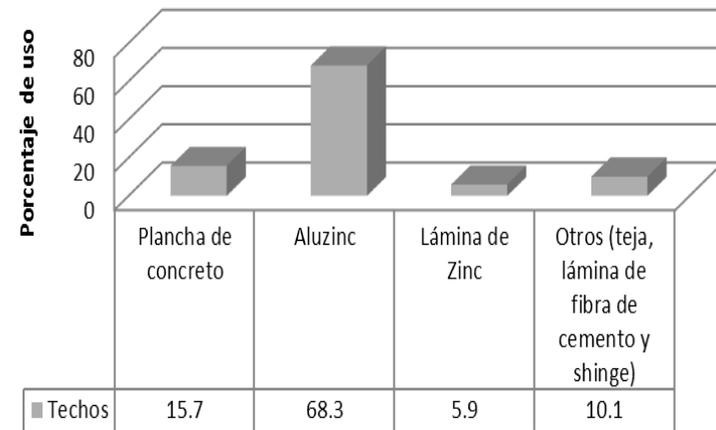
La encuesta indica que el material más utilizado para el levantamiento de paredes tanto internas como externas es el bloque de concreto, con un 82.4% en inmuebles residenciales. En los pisos sobresale la cerámica y la plancha de concreto con un 42.5% y un 40.4% respectivamente en edificaciones para uso industrial, comercial y residencial. En los techos el material más utilizado es la lámina de aluzinc con un 74.2% en las viviendas.



Gráfica 16. Principales materiales utilizados para paredes en el 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).



Gráfica 17. Principales materiales utilizados para pisos en el 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).



Gráfica 18. Principales materiales utilizados para techos en el 2012. Fuente: Banco Central de Honduras (2012).

4.3 Vivienda estándar.

Los metros cuadrados de construcción de las viviendas en la ciudad de San Pedro Sula, varían entre los 95 m² a 300 m²; dependiendo de las necesidades del usuario y del poder económico adquisitivo. Las viviendas de clase media son de aproximadamente 200 m² de construcción y poseen los siguientes espacios: dormitorio para huéspedes, baños (3½), sala, comedor, cocina, sala de estar o familiar, dormitorio principal, dormitorios secundarios (2), estudio, lavandería, cuarto de servicio y bodega.

En las viviendas estándar, el perímetro del lote se encuentra rodeado por un muro sólido de concreto, tanto las paredes exteriores como las interiores son de bloque de concreto. Las ventanas son corredizas de marco de aluminio y con vidrio de una sola lámina. Los pisos interiores son de cerámica al igual que los pisos exteriores que rodean la vivienda. Los techos son de estructura de canaleta y lámina metálica inclinada. Como acabado interior se encuentra el cielo falso (falso plafón) plano de tabla yeso o de paneles acústicos, que generan una cámara de aire, sin ventilación, entre la estructura del techo.

Uno de los problemas que han generado el aumento en la demanda energética es el inapropiado diseño de las viviendas, replicando estilos arquitectónicos de otras regiones con climas ajenos a la de la ciudad. Uno de los principales problemas del diseño de la vivienda estándar es la falta de protección solar en las fachadas y la falta de salida del aire caliente, especialmente en la cámara que se genera entre el techo y el plafón, lo que genera que se incremente la temperatura en el interior de los espacios. En las imágenes 11 y 12 se muestra la tipología con la que se construyen la mayoría de las viviendas en la ciudad.



Imagen 11. Tipología de las viviendas estándar en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 12. Tipología de las viviendas estándar en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia, 2014.

4.4 Comparación vivienda estándar vs. una vivienda con sistemas pasivos de enfriamiento.

En la tesis de *“Criterios de diseño bioclimático para la vivienda urbana en el clima tropical húmedo de San Pedro Sula, desarrollada en la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA) por la Arq. Fany Mabel Méndez (2010); realiza un estudio comparativo de dos tipos de viviendas en la ciudad de San Pedro Sula, una diseñada con criterios que toman en cuenta el clima y la otra es la vivienda típica que se ha desarrollado en los últimos años.*



Imagen 13. Panorama de viviendas estándar y bioclimáticas. Fuente: Mabel Méndez (2010).

En la tesis, se realizó mediciones de temperatura en el interior de las viviendas en el mes de Septiembre; teniendo como resultado la reducción de la temperatura interna de 4°C en las con diseño que toman en cuenta el clima comparadas con las viviendas estándar.

En las figuras 39 y 40 se muestran los esquemas del recorrido del Sol y de la circulación del aire en la vivienda estándar. La vivienda estándar se encuentra delimitada por un muro de bloques de concreto por lo que la ventilación se reduce especialmente en las fachadas noreste y noroeste. Al mismo tiempo debido a que entre el techo y el cielo falso (plafón) no

hay ventilación, lo que se genera que en dicho espacio se concentre el aire caliente, el cual transmite calor hacia el espacio interno.

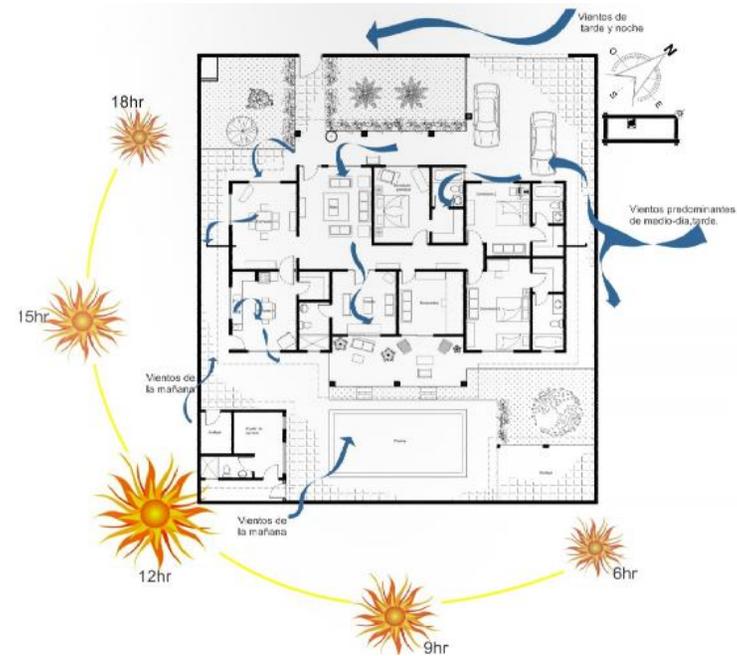


Figura 39. Esquema vivienda estándar. Fuente: Mabel Méndez, 2010, p.p 47.

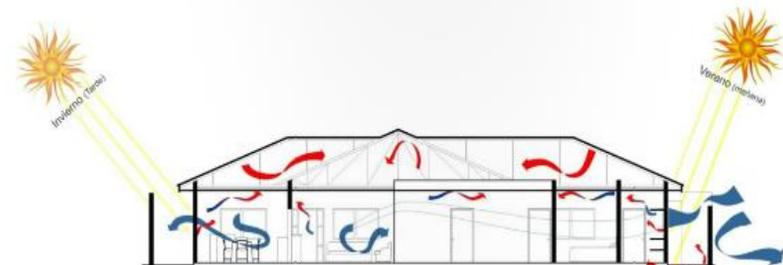


Figura 40. Sección de la vivienda estándar. Fuente: Méndez 2010, p.p 48.

En las figuras 41 y 42 se muestran los esquemas de recorrido del Sol y de la circulación del aire en la vivienda bioclimática. Se puede observar que al no poseer un cerramiento de las viviendas se tiene un mayor aprovechamiento del aire en la mayoría de las fachadas. En el techo se deja una abertura lo cual permite que se evacue el aire caliente generado en el espacio interno, al mismo tiempo se produce una renovación del aire por medio del efecto chimenea, incrementando la circulación del aire.

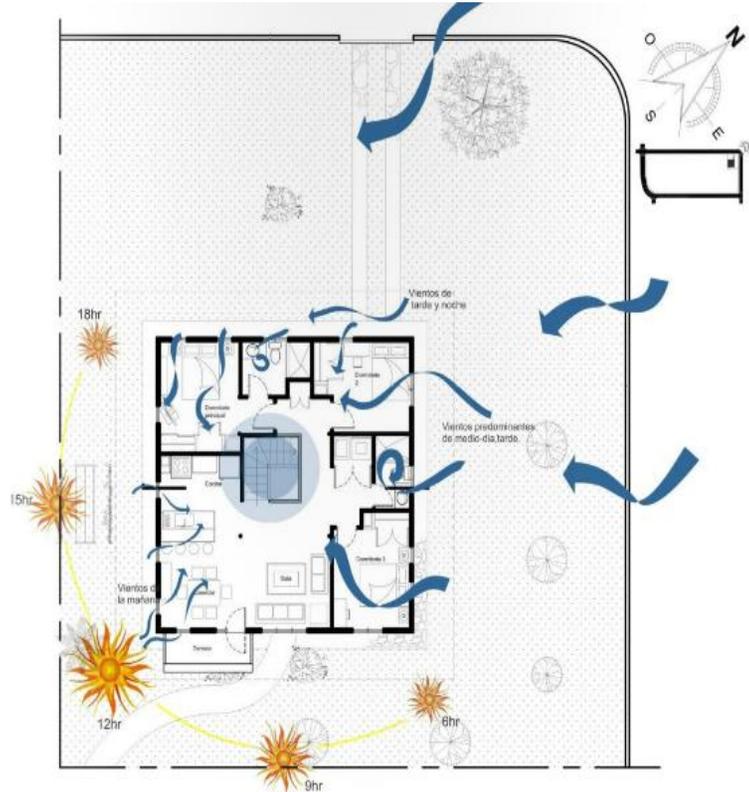


Figura 41. Esquema vivienda bioclimática. Fuente: Mabel Méndez , 2010, p.p 49.



Figura 42. Esquema vivienda estándar. Fuente: Mabel Méndez, 2010, p.p 50.

El uso de aleros de 1.4 m., reducen en su mayoría la radiación solar directa, lo que favorece a que la temperatura interna disminuya. A diferencia de la vivienda estándar, este tipo de vivienda utiliza alrededor vegetación, ayudando a la absorción térmica y generando al mismo tiempo un microclima más agradable.



Imagen 14. Fotos de las viviendas con sistemas pasivos del proyecto El Barrial, San Pedro Sula. Fuente: fotos propias, 2012.



Imagen 15. Fotos de las viviendas con sistemas pasivos del proyecto El Barrial, San Pedro Sula. Fuente: fotos propias, 2012.

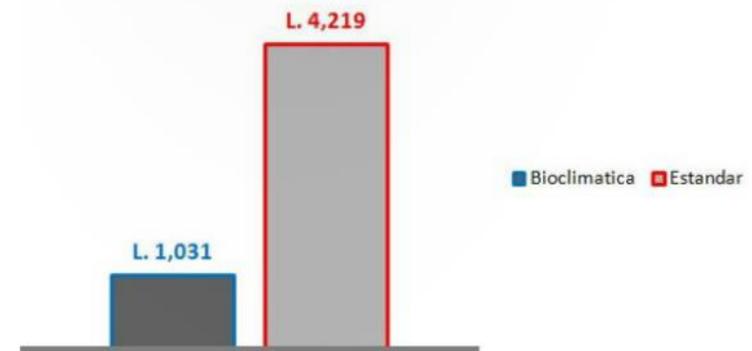
En la tesis se realiza un estudio sobre el confort de ambas viviendas, la cual se puede observar en la gráfica 19 donde en la vivienda con sistemas pasivos se posee un mayor confort, lo cual al mismo tiempo se refleja en el uso de aire acondicionado y en el consumo de energía (ver gráfica 20).

Uno de los principales problema que surge, es que debido al cambio climático, se registran temperaturas mayores a los 40°C; por lo tanto los sistemas de enfriamiento pasivo no son lo suficiente para generar las condiciones de confort deseadas, por lo que surge la necesidad de emplear los sistemas de aire acondicionado.



Gráfica 19. Comparación del confort térmico según los usuarios.

Fuente: Méndez 2010, p.p 52



Gráfica 20. Comparación del consumo de energía. Fuente: Méndez, 2010, p.p





CAPITULO 5: Sistema de enfriamiento



CAPÍTULO 5. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO



5. Sistema de enfriamiento.

En el ASHRAE Handbook se menciona sobre los paneles para calentar y enfriar los espacios, los cuales se emplean en superficies en las cuales se desea una temperatura controlada, por lo que se ubican en los pisos, paredes o el cielo falso (plafón) del edificio. Para controlar la temperatura de la superficie se realiza por medio de la circulación de agua, aire o por corriente eléctrica través de un circuito embebido en el panel (American Society Of Heating, 2003).

El sistema de enfriamiento que se estudia en la investigación, es el sistema que emplea el agua para enfriar las superficies de una edificación, empleando asimismo la radiación para enfriar las superficies cercanas a esta. Este sistema tiene como principio que el agua es 832 veces más densa que el aire, por lo que la densidad de la energía que se encuentra directamente relacionada con la densidad del material, puede ser capturada y canalizada más rápido por el agua que por el aire. En los siguientes subcapítulos se profundiza sobre el funcionamiento y principios del sistema de enfriamiento hidrónico.

5.1 Sistema de enfriamiento hidrónico.

El cuerpo humano intercambia calor por la radiación, conducción, convección y evaporación. Olgyay (1998) estima que el cuerpo humano pierde 2/5 partes del calor por la radiación, 2/5 partes por convección y 1/5 por evaporación. Kiel Moe (2010) menciona que el cuerpo humano usa la transferencia radiante para intercambiar la mayoría de su energía térmica con un 47.5%, como se muestra en la Figura 43. Los sistemas convencionales de enfriamiento emplean la convección como medio para enfriar los espacios. En cambio, el sistema de enfriamiento hidrónico utiliza la radiación, por lo

tanto este sistema se adapta con mayor facilidad al cuerpo humano que otros sistemas para generar confort debido a que la radiación es el medio con mayor porcentaje de intercambio de calor del cuerpo humano.

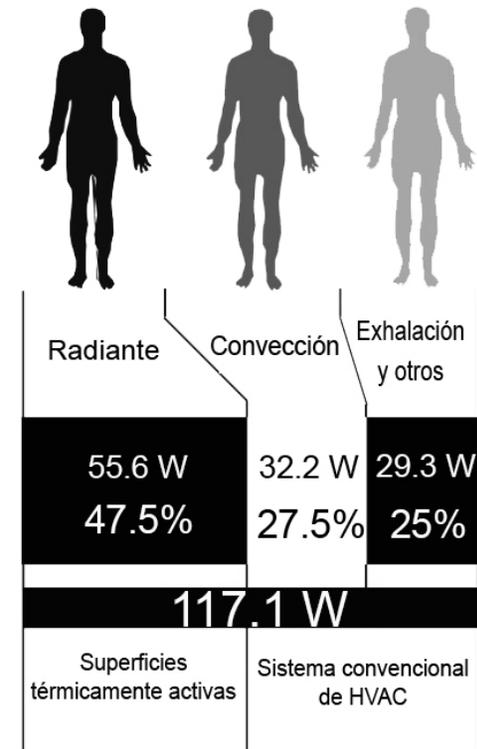


Figura 43. Proporción del exceso de la emisión de calor del cuerpo. Fuente: Traducido del libro de Moe, 2010, pp.69

El sistema de enfriamiento hidrónico radiante tiene como principio el funcionamiento del cuerpo humano, asemejándose en cuanto a que ambos son un sistema térmicamente activo. Al mencionar un sistema térmicamente activo se refiere al sistema

que utiliza un medio de circulación que permite el paso de un fluido, necesario para regular la temperatura de un cuerpo o material. En el caso del cuerpo humano, se realiza a través de las venas el recorrido de la sangre, siendo este fluido por el cual se genera la transferencia de calor a través de la piel (ver figura 44).

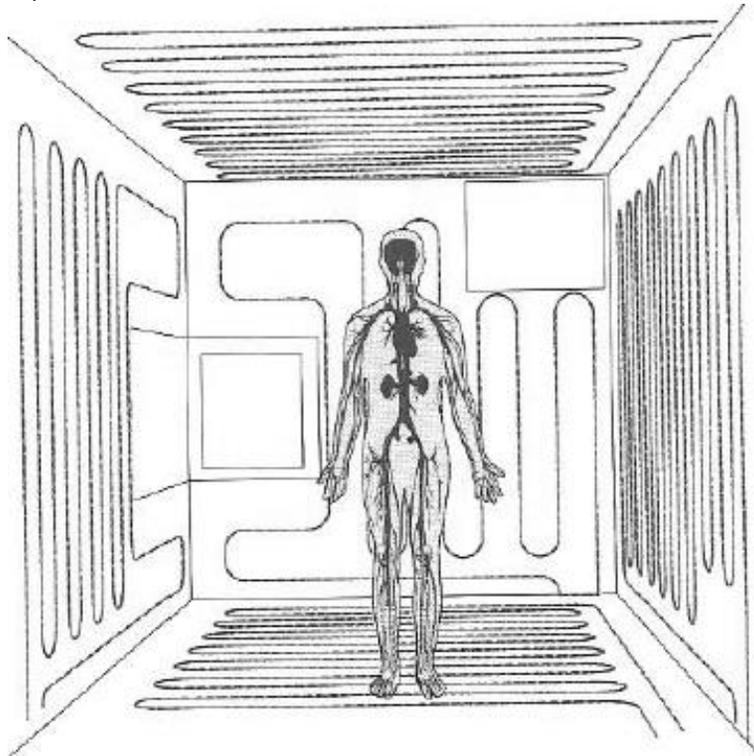


Figura 44. Comparación del sistema hidrónico del edificio con el cuerpo humano. Fuente: Moe, 2010, p.p 70.

Se estima que el sistema de enfriamiento hidrónico radiante tiene un ahorro entre el 25% al 40% comparado con el sistema de aire acondicionado tradicional (Energy Design Resources, 2003). Este porcentaje varía según las condiciones climáticas del

lugar, por lo que en climas húmedos este porcentaje de ahorro disminuye debido a que la temperatura del agua no puede ser menor a la temperatura de rocío para evitar generar condensación y por la necesidad de implementar equipos que eliminen la humedad del ambiente.

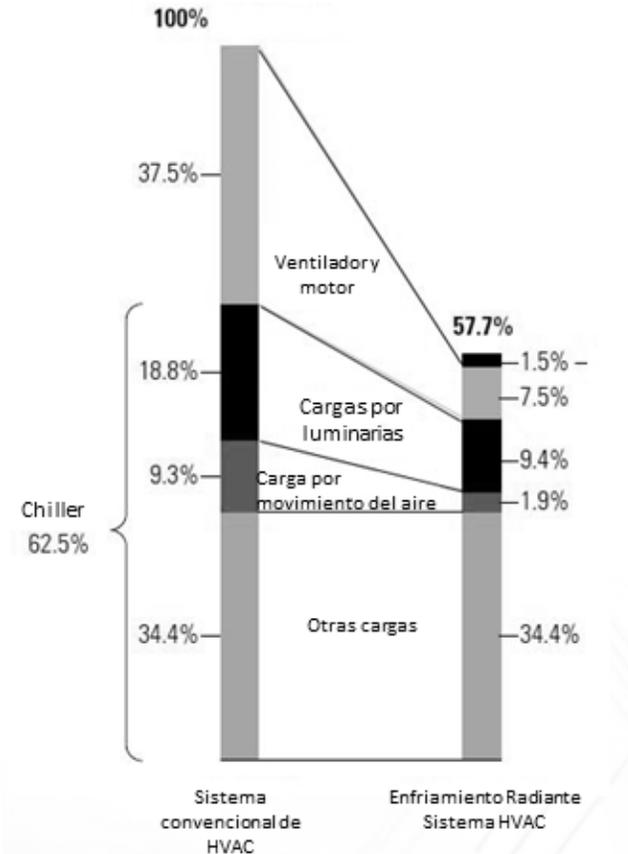


Figura 45. Comparación del porcentaje de consumo de energía entre el sistema convencional de HVAC y el sistema de enfriamiento radiante con el sistema HVAC. Fuente: Traducido de Energy Design Resources, 2003.



En la figura 45 se muestra las cargas en las que se genera ahorro de energía empleando el sistema hidrónico, teniendo un mayor porcentaje de ahorro en el ventilador y motor de los equipos de aire acondicionado.

Para instalar el sistema hidrónico, generalmente se utiliza las superficies más extensas del edificio. Se implementa el sistema en el suelo especialmente cuando se utiliza como sistema de calefacción, debido a que se genera una estratificación térmica la cual suele ser beneficiosa porque solo se necesita proporcionar condiciones de confort en la zona baja de un espacio (siendo esta la zona donde van a estar los usuarios) sin necesidad de acondicionar toda el área, lo que representa un ahorro en el consumo de la energía. Se instala el sistema en el plafón o cielo falso cuando se utiliza como sistema de enfriamiento debido a que el aire caliente sube y se enfría con el sistema hidrónico por medio de la radiación.

Este sistema posee ciertas limitaciones, las cuales son las siguientes:

- No genera una circulación convectiva del aire frío alrededor del espacio.
- Bajar la temperatura en exceso (debajo de 68°F o 20°C) para incrementar la capacidad de enfriamiento puede generar sensación de desconfort debido a la asimetría que se puede generar térmicamente (pies más fríos que la cabeza) o que se genere condensación en la superficie.
- La instalación inapropiada de la tubería o de otros elementos y/o el incorrecto dimensionamiento de la fuente de calor o de enfriamiento puede generar superficies con temperaturas dispares o no se puede

generar la capacidad necesaria para calentar o enfriar los espacios.

- La limitada experiencia de utilización del sistema por parte de los ingenieros y arquitectos.

Entre las ventajas que posee el sistema se presentan los siguientes puntos:

- El sistema es más efectivo en el modo de enfriamiento cuando la circulación del agua absorbe la ganancia solar directamente del material envolvente.
- La posible manipulación de la masa interna de un edificio. Esto se refiere a que el sistema enfría la masa térmica del edificio por lo que disminuye la transferencia de calor hacia el interior.
- Se poseen mejores niveles de confort que otros sistemas de acondicionamiento debido a que las cargas radiantes satisfacen directamente y el movimiento del aire en el espacio se encuentra en sus niveles normales de ventilación.
- Posee un bajo costo de mantenimiento.
- Mejoramiento de la eficiencia y disminución de tamaño de los equipos de aire acondicionado y del chiller.
- En hospitales donde se requiere por ley que haya una máxima limpieza, este sistema es altamente recomendado debido a que no generan bacterias como lo hacen los sistemas de aire acondicionado sin su debido mantenimiento.
- Tiene facilidad para acoplarse con otros sistemas de acondicionamiento.
- El enfriamiento radiante es una tecnología que crece día a día, más personas la elegirán en el futuro y, puesto que es elegible para los créditos de la certificación LEED.

- Es un sistema invisible debido a que no interfiere con la arquitectura original.

5.2 Instalación.

La instalación típica del sistema consiste en tubos de polietileno PEX de alta densidad, los cuales se encuentran embebidos en una losa de concreto. El tubo se encuentra cubierto por una capa de concreto, el cual es cubierto por el material del piso final. Luego se coloca una capa de aislante entre la losa estructural y la cubierta del tubo (Nall, 2013, p.p 34).

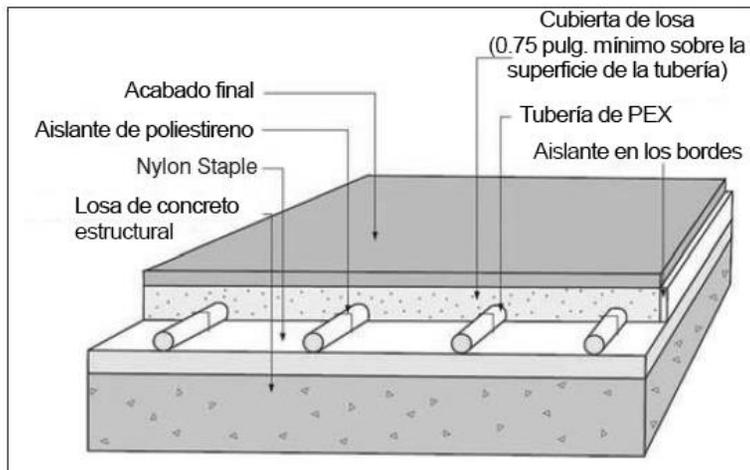


Figura 46. Configuración de construcción para la calefacción y el enfriamiento estándar del piso por medio de tubos de polietileno incrustados en la losa de concreto. Fuente: Traducido del artículo de Nall, 2013, p.p 34.

La instalación varía según en la superficie donde colocará el sistema, los materiales de la superficie y de los componentes del sistema que distribuye la empresa. En diversos casos la tubería se amarra con las varillas antes de colar el concreto.

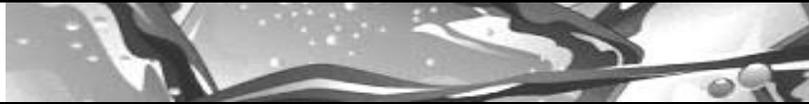
A continuación se presentan imágenes obtenidas de la empresa Funcosa en México sobre la instalación del sistema en el suelo.



Imagen 16. Colocación de la banda perimetral en el contorno de la superficie. Fuente: Funcosa, 2014.



Imagen 17. Colocación del panel aislante en la superficie. Fuente: Funcosa, 2014.



CAPÍTULO 5. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO



Imagen 18. Instalación de la tubería en la forma que se desea. Fuente: Funcosa, 2014.



Imagen 20. Realización de la prueba de presión para asegurar que no existan fugas en la instalación. Fuente: Funcosa, 2014.



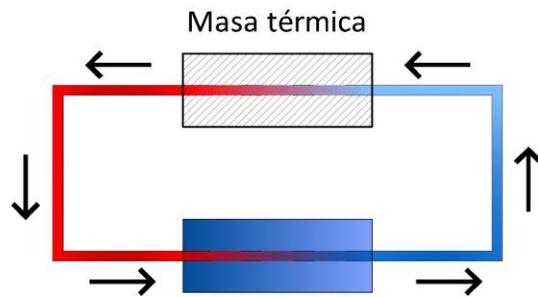
Imagen 19. Instalación de los colectores, conectando todos los circuitos de forma ordenada. Fuente: Funcosa, 2014.



Imagen 21. Colocación del firme final superando 4 cm de la tubería. Fuente: Funcosa, 2014.

5.3 Funcionamiento.

En la figura 47 se presenta el esquema del funcionamiento del sistema, el cual consiste en la circulación del agua al interior de la masa térmica del concreto, posteriormente llega al sistema de enfriamiento del agua, el cual puede realizarse por medio de sistemas pasivos o activos. Entre los sistemas pasivos para enfriar el agua se realiza por medio del agua subterránea y la temperatura del subsuelo. Otro método pasivo es el diferencial de temperatura entre el día y la noche, empleando la baja temperatura nocturna de la atmósfera (sumidero de calor) para absorber el calor obtenido durante el día, similar al sistema skytherm. Para utilizar estos métodos pasivos se debe realizar un estudio previo para garantizar que el agua se va a enfriar a la temperatura que se necesita. Entre los sistemas activos se utiliza el chiller o una bomba de calor.



Enfriamiento del agua:

- Pasivos: agua subterránea, bajas temperatura en la noche y por el subsuelo.
- Activos: Chiller y bomba de calor.

Figura 47. Diagrama del sistema hidrónico. Fuente: autoría propia.

En la figura 48 se muestra el esquema del funcionamiento del sistema empleando una bomba de calor como fuente para enfriar el agua. En el diagrama se presenta como elementos

principales los siguientes: la bomba de calor (enfriando el refrigerante del intercambiador de placa), el intercambiador de placa (en el interior posee refrigerante R410A por medio del cual se enfría el agua que circula dentro del intercambiador), el tanque de agua (contiene el agua del sistema y mantiene la temperatura del agua por un lapso de tiempo, por lo tanto se ahorra en el consumo de energía debido a que se evita el uso constante del intercambiador de placa y de la bomba de calor), la bomba (para la circulación del agua) y el manifold (distribuye las tuberías en la superficie a enfriar).

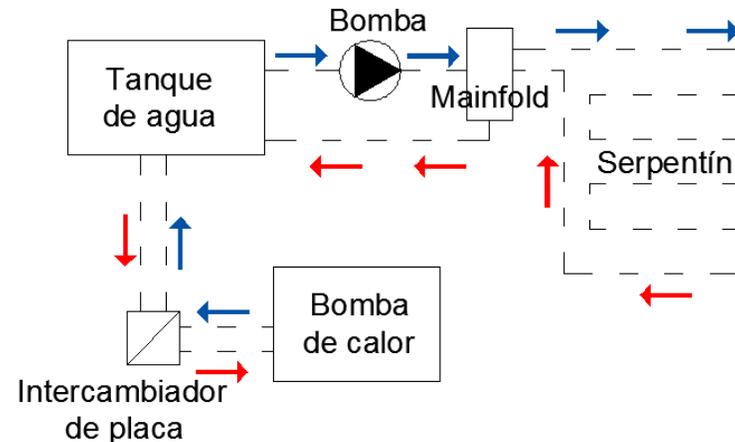


Figura 48. Esquema del funcionamiento del sistema empleando una bomba de calor para enfriar el agua del sistema. Fuente: Autoría propia.

Una de las desventajas que genera el sistema es que no provee ventilación ni deshumidificación, por lo tanto se complementa como complemento el sistema DOAS (dedicated outdoor air system) o con un sistema convencional de aire acondicionado. En climas húmedos, estos sistemas controlan que se mantenga el aire en el interior a una temperatura no mayor al punto de rocío durante las horas de operación del



sistema hidrónico. En climas húmedos, el DOAS requiere que el modo de recirculación del flujo sea bajo para controlar la temperatura del punto de rocío en los períodos donde el espacio se encuentre desocupado.

5.4 Componentes

Entre los diferentes componentes del sistema se encuentran los siguientes:

- Cajas de Colectores (mainfold): Son los colectores de donde parten las tuberías y suelen estar empotrados en la pared. En la imagen 22, se muestra el colector del cual salen diversos tubos. El sistema se puede configurar para que el flujo del agua sea constante o tenga un fluido variante, al mismo tiempo se puede tener un flujo de temperatura variada. Por lo que se requiere una bomba y una válvula mezcladora para tener las diferentes temperaturas del agua.



Imagen 22. Colector de distribución del piso radiante, mostrando la conexión individual de los tubos de polietileno. Fuente: Autoría propia.

- Zócalo Perimetral: Es una banda de espuma de polietileno cuya misión principal es absorber las dilataciones producidas por el mortero de cemento colocado sobre los tubos emisores, debido a su calentamiento/enfriamiento. Así mismo genera un aislamiento lateral del sistema. Se fija a las paredes de todas las áreas a calentar, desde el suelo base hasta la cota superior del pavimento.
- Film Polietileno: Es una barrera antihumedad entre el suelo base y la superficie emisora de suelo radiante colocada encima, de forma que evita el ascenso por capilaridad de humedades. Se suele instalar cuando existe riesgo de humedad en el forjado/solera. Puede venir incorporado en el panel aislante.
- Panel reticulado: este panel de plástico es utilizado para facilitar la instalación de la tubería y minimizar el tiempo de mano de obra. Este panel no posee ningún tipo de aislamiento.



Imagen 23. Panel de la marca Viega para la instalación de la tubería. Fuente: Autoría propia.



- **Aislante:** El aislamiento térmico del sistema es imprescindible en cualquier instalación del sistema hidrónico para que el calor que absorva el sistema provenga del espacio que se requiere. Asimismo se evita que la tubería por ser redonda absorva el calor del subsuelo o de otros elementos circundantes a la instalación. En algunas empresas que distribuyen el sistema utilizan paneles aislantes sobre los que se instalan las tuberías. Éstos paneles, pueden ser moldeados, sujetando los circuitos y facilitando su tendido con la separación entre tubos proyectada.



Imagen 24. Panel aislante para la instalación de la tubería. Panel de la marca Viega. Fuente: Autoría propia.

- **Tuberías:** Para realizar el tendido de circuitos desde los colectores, se utilizan tuberías de material plástico PEX (polietileno reticulado) con barrera de difusión de oxígeno, el cual evita que se introduzca el aire en la tubería permitiendo la circulación de solamente agua durante el recorrido. Es un tipo de tubería de plástico creada cuando se forman uniones entre las moléculas de polietileno mientras se fabrica la tubería. En el mercado existen diversos tipos de tuberías

según las especificaciones que se requieran y donde se localicen.



Imagen 25. Diversos tubos de la marca Viega. Fuente: Autoría propia.

- **Mortero de Cemento:** Una vez instalados los circuitos, se vierte el mortero de cemento sobre toda la superficie. El espesor recomendable es de 5 cm medidos a partir de la superior de la tubería.
- **Equipos de control de humedad y de punto de rocío:** con estos equipos se monitorea el porcentaje de humedad y punto de rocío del espacio para evitar que el sistema genere condensación.
- **Equipos mecánicos:** para el funcionamiento del sistema se requiere de equipos mecánicos para enfriar y calentar el agua y al mismo tiempo para el recorrido del mismo en las tuberías. Entre estos equipos se encuentran: bombas, válvulas, tanque de expansión, intercambiador de calor, chiller y una caldera.

5.5 Diseño.

Para implementar el sistema de enfriamiento radiante, primero se debe de realizar un diseño previo, el cual consiste en analizar el impacto de la radiación solar en la superficie; por lo tanto se debe examinar el comportamiento térmico y la estratificación térmica del aire en el espacio. Finalmente se debe de tener una evaluación que asegure el confort y evite la condensación.

Para el diseño de este sistema de enfriamiento se debe de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Realiza una simulación, en el cual se calcula el diseño del sistema. Una herramienta para realizar el cálculo es el EES (Engineering Equation Solver), utilizando al mismo tiempo los algoritmos de intercambio de calor estándar por ASHRAE. Existen diversos programas que realizan la simulación del sistema radiante, estos programas permiten evaluar las diferentes alternativas de acabados para saber su comportamiento, la profundidad de la losa, la longitud de los tubos, las diferentes combinaciones de temperatura y flujo del agua y la cantidad de absorción de calor. Antes de realizar el cálculo, también se necesita conocer el comportamiento térmico del edificio a implementar el sistema radiante, para saber cuanto calor se necesita eliminar o absorber del interior. Se pueden combinar los programas de simulación del sistema radiante con otros programas de simulación, para conocer como será el comportamiento térmico del espacio al instalar el sistema.
- Utilizar materiales con una alta resistencia térmica incrementa el diferencial de temperatura entre el agua que pasa en los tubos y la superficie. Si el sistema se coloca en el piso, se recomienda que en la superficie se coloque material

cerámico o piedra para que la transferencia de calor se realice adecuadamente, debido a que si se coloca material aislante el funcionamiento del sistema decae.

- Identificar la superficie en la que se va a instalar el sistema de enfriamiento: Jason Marston menciona que la distribución óptima para que el sistema de superficies térmicamente activas genere condiciones de confort estable es que el sistema radiante se encuentre en los seis lados de los espacios, como se muestra en la Figura 50. Esto se debe a dos razones específicas: se tiene una simetría radiante y como consecuencia se requiere menos suministro de energía para calentar o enfriar los espacios (Moe, 2010).

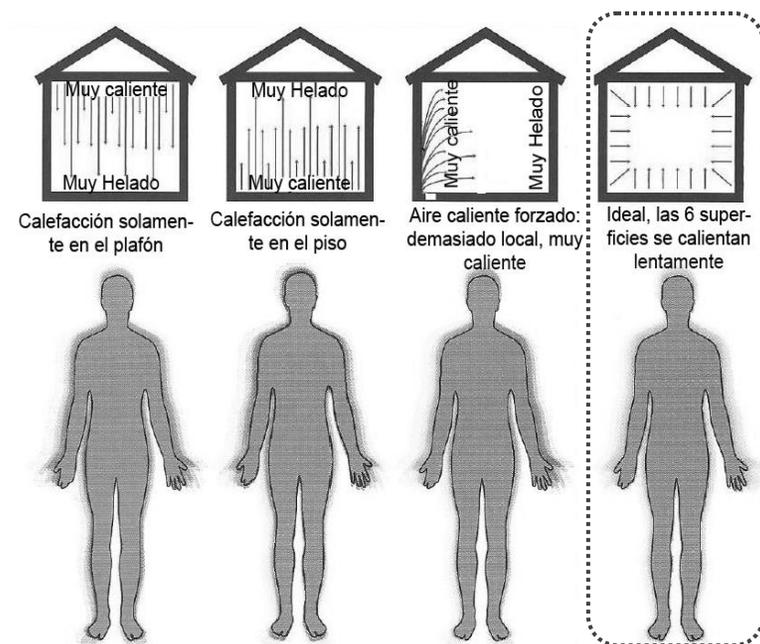


Figura 49. Comparación con la distribución termal asimétrica con la simétrica, según Fiton. Fuente: Traducción del libro de Moe, 2010, p.p 74.



- El flujo del agua del sistema: Nall (2013) señala que el flujo máximo del agua debe ser entre 2.0 y 2.5 gpm (0.12 a 0.16 L/s), esto se debe a que si el flujo del agua es mayor a este rango, el agua no presenta un mayor porcentaje de absorción de calor por la rapidez del flujo. Al mismo tiempo recomienda utilizar Glycol diluida en el agua, con el fin de poseer una mayor absorción de calor.
- La separación y el grosor de la tubería: Moe (2010), menciona que el circuito de tubería de PEX debe estar distribuido con una separación máxima entre tubos de 12 pulgadas (300mm) y con una separación mínima de 6 pulgadas (150 mm). Generalmente el rango de separación es entre 8 a 10 pulgadas (200 mm a 250 mm) con el objetivo de tener un balance económico óptimo sin utilizar mucha tubería. Para no elevar el costo del sistema muchos países europeos aplican la tubería con menor diámetro, siendo entre 1/2" a 5/8" (12mm a 15mm) con una separación de 6" (150mm).

En la industria se han generado diversas normas para el diseño del sistema, entre estas se encuentra la norma ISO 11855 en la cual se menciona el diseño, dimensionamiento, instalación y control del empotramiento del sistema de enfriamiento y calefacción radiante.

5.6 Distribución del sistema.

Existen diversas formas de distribuir la tubería PEX en una superficie, entre estas se encuentran las siguientes:

Distribución en serpentín: Es el tipo de distribución más sencillo y el más utilizado.

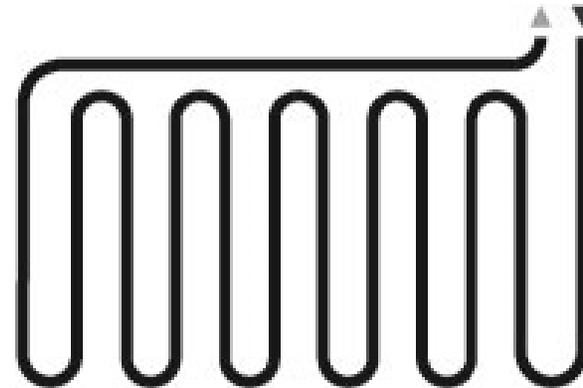


Figura 50. Distribución en serpentín. Fuente: Funcosa, 2014.

Distribución en doble serpentín: Esta tipo de distribución se utiliza en espacios irregulares y alargados.

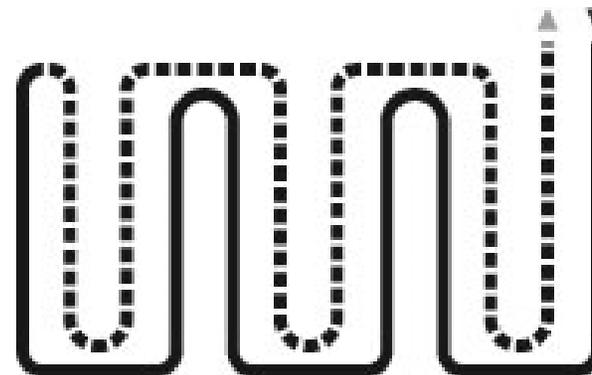


Figura 51. Distribución en doble serpentín. Fuente: Funcosa, 2014.

Distribución en espiral: Este tipo de distribución es de los más recomendados debido a que la temperatura del suelo es parejo porque alterna un tubo de entrada del agua con uno el de retorno del agua.

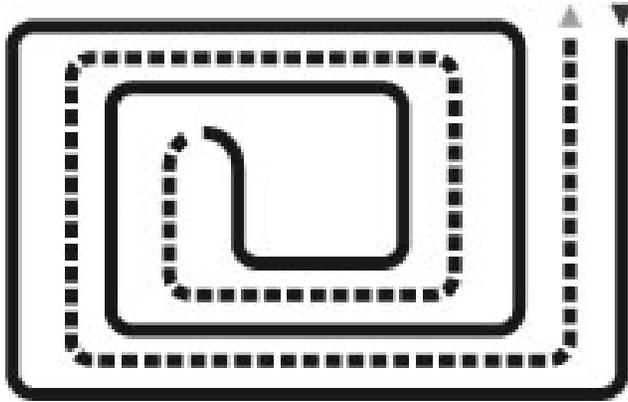


Figura 52. Distribución en espiral. Fuente: Funcosa, 2014.

Se recomienda que si se posee un área grande y el recorrido de la tubería es demasiado larga, que se divida la circulación de la tubería, con el objetivo de evitar que un área se encuentre más fría que en el otro extremo por la pérdida de calor del agua durante el recorrido.

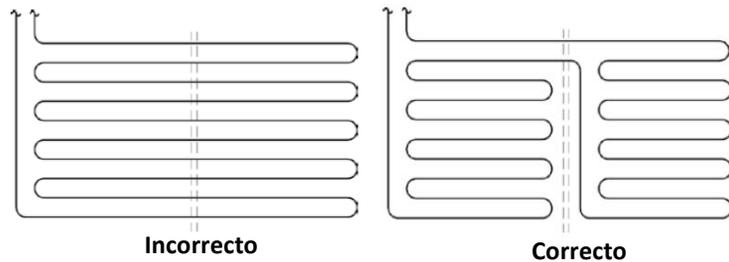


Figura 53. Distribución del recorrido de la tubería. Fuente: Viega, 2014, p.p 89.

En la figura 54 se presenta la instalación del sistema en el plafón o cielo falso con el controlador (manifold).

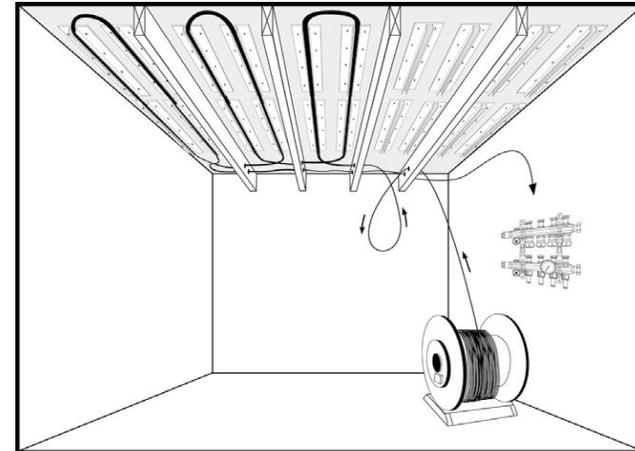


Figura 54. Instalación del sistema hidrónico en el plafón o cielo falso. Fuente: Viega, 2014, p.p 191.

5.7 Condensación.

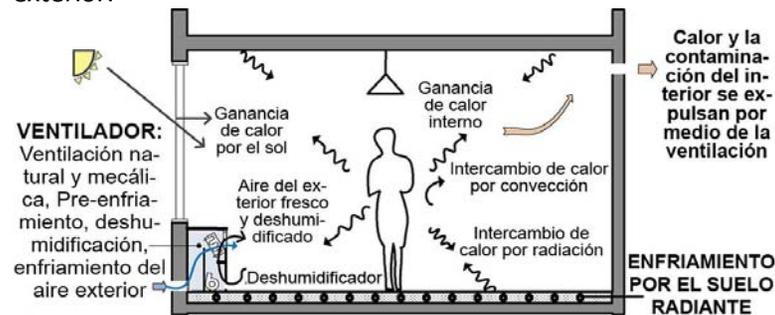
El correcto diseño del sistema, de las capas y del control son elementos cruciales para evitar la condensación del sistema. Con el respectivo diseño, la condensación no debería de ocurrir, incluso en los lugares con climas húmedos.

Entre la más importante estrategia para evitar condensación sobre o en el piso consiste en suministrar agua fría a una temperatura más elevada que la temperatura del punto de rocío del aire en el espacio. Otro factor importante para evitar condensación es disminuir la infiltración del aire externo hacia el interior, debido a que un alto rango de infiltración puede generar que se incremente el calor sensible, aumentando la temperatura del punto de rocío, por lo que se disminuye el margen de seguridad de temperatura para que se genere la condensación. Una estrategia para combatir la alta humedad producido por la infiltración en el edificio es colocar en la entrada un deshumidificador de aire. Otra estrategia es dejar

por fuera los tubos para calentar o enfriar del área del piso adyacente a la entrada, para que el aire circule entre los tubos y se remueva la humedad (Nall, 2013).

Diversos experimentos han demostrado que al combinar el sistema radiante con un sistema de ventilación/deshumidificación para controlar la temperatura y la humedad en el interior, se poseen mejores resultados y se logra evitar la condensación. También se recomienda implementar un sensor de humedad y de temperatura que activen el sistema de ventilación/deshumidificación cuando la temperatura se encuentre cerca a la temperatura de rocío.

En la siguiente figura se muestra el esquema de la combinación del sistema de enfriamiento de suelo radiante y el sistema de ventilación. El sistema radiante remueve el calor sensible disminuyendo la temperatura de la superficie del suelo, mientras que el sistema de ventilación deshumidifica el aire del interior para prevenir la condensación y de enfriar el aire del exterior.



Control del ambiente al interior del espacio con una constante ventilación y con el sistema de enfriamiento radiante. Sin embargo, si las condiciones del exterior son favorables durante la noche en esta época, se puede emplear el aire exterior para enfriar el interior.

Figura 55. Concepto del sistema de suelo radiante con el sistema de ventilación. Fuente: Seo, J.M.; Song, D. & Lee, K.H. (2014), p.p 220.

5.8 Sistemas de enfriamiento con energía solar.

En los últimos años se han desarrollado sistemas de enfriamiento que utilizan la energía solar como fuente principal para su funcionamiento. Existen dos formas de transformar la energía solar en energía: la solar térmica (energía en forma de calor) y la solar fotovoltaica (energía eléctrica). Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características y particularidades, tanto de equipos que posibilitan dichas transformaciones, como los rendimientos de las mismas.

En Europa y especialmente en España esta tecnología ya cuenta con el respaldo de varias empresas distribuidoras e instaladoras de sistemas de acondicionamiento del aire que utilizan la energía solar. El gobierno español a través del ministerio de ciencia e innovación con el centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas (CIEMAT), en su sección de ahorro y eficiencia energética en el programa “Plan Nacional de I+D-MEC” llevan a cabo el proyecto “Proyecto Singular Estratégico de I+D sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL)”. Este proyecto nace con el objetivo de ahorrar entre un 80% y 90% en el consumo de energía de los edificios mediante el uso de la energía solar pasiva y las tecnologías renovables, en el que participan importantes empresas constructoras y tecnológicas (ARFRISOL, 2009).

En México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha realizado diversos estudios de investigación de los sistemas de enfriamiento impulsado por la energía solar. En el 2010, Científicos del Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, con sede en Temixco, Morelos, desarrollaron un sistema de aire acondicionado solar, adecuado para las circunstancias climatológicas de insolación, temperaturas y



humedad para ser aplicado en la mayor parte del territorio de México. Este sistema funciona por un principio llamado de absorción, donde el compresor es sustituido por dos componentes: un absorbedor y un generador, que opera exclusivamente con calor producido por el Sol, no con electricidad. Además, cuenta con el condensador y el evaporador, donde se produce el frío (Romero, 2010).

En ese mismo año, especialistas de la UNAM desarrollaron un prototipo de aire acondicionado ecológico que utiliza la mitad de la energía eléctrica convencional y el resto lo obtiene de la energía solar. Este modelo fue realizado en la Facultad de Estudios Superiores Aragón con el propósito de ser aplicado en las diferentes áreas de la facultad (Juárez, 2010).

Para el 2013, los Científicos del Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, con sede en Temixco, Morelos, están desarrollando el segundo prototipo de refrigeración solar, utilizando la energía solar térmica.

“Este sistema térmico nos sirve tanto para dar calor a un sistema de refrigeración como, si es el caso de usar agua caliente en una casa o industria, hacerlo simultáneamente” (López, 2013).

En Honduras la energía solar térmica se ha utilizado principalmente para la calefacción del agua, siendo aplicado en viviendas y en hoteles. Se considera que debido a la elevada temperatura que presenta la ciudad de San Pedro Sula, la utilización del sistema térmico tiene potencial para disminuir la demanda energética de la ciudad.

5.8.1 Sistema frío Solar para enfriamiento radiante.

En el mercado se encuentra el producto de la empresa ClimateWell, compañía que tiene base en Suecia y fue formada en el 2001. La compañía desarrolló un sistema que utiliza la energía solar térmica para enfriar o calentar agua y poder ser distribuido en las paredes, suelo o cielo falso para enfriar o calentar los espacios por medio del enfriamiento radiante.

Los sistemas solares térmicos convencionales han estado tradicionalmente ligados a soluciones de agua caliente sanitaria (ACS), calefacción y climatización de piscinas. Con los sistemas de climatización o frío solar existe una coincidencia entre la oferta (radiación solar) y la demanda (necesidad de frío) siendo por eso unos de los sistemas eficientes y rentables (ClimateWell, 2009). Este sistema permite ser utilizado en invierno para calentar y en verano para enfriar por medio del cambio de temperatura del agua.

5.8.1.1 Funcionamiento.

El sistema se compone de dos contenedores, un contenedor (reactor), contiene el cloruro de Litio y otro contenedor (evaporador-condensador), contiene agua. Para favorecer el proceso de condensación ambos depósitos están en presión de vacío (climateWell, 2013).

Durante el proceso de carga, se tiene el compartimiento con la disolución de agua y Cloruro de Litio conectados térmicamente a la generación de calor (paneles solares térmicos). Al añadir calor a la disolución el agua empieza a evaporarse, pasando al otro compartimiento donde se condensa como agua líquida. En este proceso no es necesaria ninguna bomba o elemento mecánico. Una vez que toda el agua pasa al condensador, se corta el paso de un compartimiento a otro,

almacenando de esta forma la energía por la sal cristalizada y para luego poder distribuir el frío cuando se requiera (agua fría).

Durante la descarga, para evaporar el agua que hay en el interior, el condensador “roba” el calor del edificio que se desea refrigerar. Este vapor pasa al otro compartimiento donde se disolverá en la sal (Cloruro de Litio). Esta acumulación de energía se realiza de forma química y no térmica.

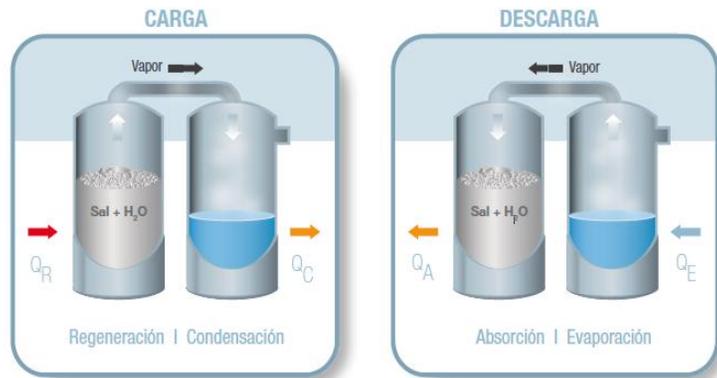


Figura 56. Procesos de carga y descarga de máquina de absorción ClimateWell.
Fuente: ClimateWell, 2013.

Para el funcionamiento de la máquina de absorción es indispensable que esta lleve conectados tres circuitos externos:

- Sistema de captación solar.
- Sistema de distribución.
- Sistema de disipación.

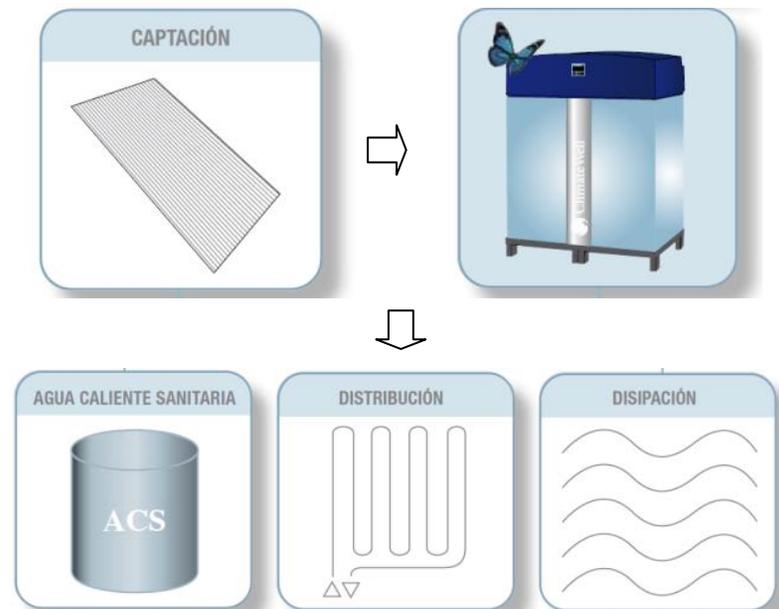


Figura 57. Esquema del funcionamiento del sistema ClimateWell

Fuente: ClimateWell, 2013.

Entre las formas para distribuir el frío, el sistema utiliza el sistema de superficies radiantes (suelo, pared o cielo falso). El más utilizado es el sistema de suelo radiante, como se muestra en la figura 58.

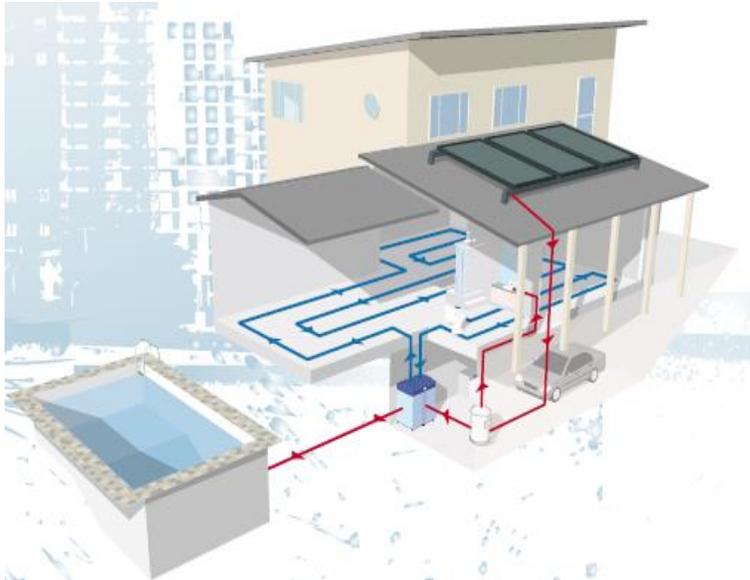


Figura 58. Esquema del funcionamiento del sistema ClimateWell en viviendas unifamiliares. Fuente: ClimateWell, 2013.





CAPITULO 6: Diseño del experimento



6.1 Descripción del método.

El método empleado en la investigación es experimental, el cual consiste en el uso del razonamiento hipotético-deductivo y del estudio de un fenómeno. Se encuentra dividida en dos partes: una cualitativa y otra cuantitativa. La cualitativa consistió la revisión bibliográfica para conocer el estado del arte del tema, siendo en este caso el sistema de enfriamiento radiante hidrónico; luego se procesó y analizó la información obtenida. Al mismo tiempo se estudió las propiedades de los materiales profundizando en el concreto (siendo el material del experimento) y sobre los diferentes tipos de sistemas de aire acondicionado.

La parte cuantitativa consiste en la fase experimental, la cual se realiza en etapas. La primera consiste en realizar mediciones del comportamiento térmico en una vivienda de clase media en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. La segunda etapa consiste en realizar dos prototipos de concreto; en uno se instalan el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría para analizar el funcionamiento y el porcentaje de enfriamiento de la masa térmica; y el otro se toma de referencia.

Con las diferentes etapas del experimento se tiene como finalidad analizar la factibilidad y potencial de uso del sistema hidrónico como sistema de enfriamiento de la masa térmica del concreto y de poder implementar el sistema en un clima cálido-húmedo.

6.2 Ubicación Experimento.

El experimento se realiza en tres escenarios, las cuales varían según las condiciones climáticas del lugar y la incidencia de la radiación solar. Estos escenarios son el Laboratorio de

Interacción con el medio y el observatorio en la azotea del Edificio “J” de la Unidad de Posgrados de la Universidad Nacional Autónoma de México. El tercer escenario es en la vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. Las primeras dos localidades se encuentran dentro del campus de la Ciudad Universitaria, en la Delegación Coyoacán del Distrito Federal; y se escoge debido a la facilidad de acceso al lugar y por la disponibilidad de los equipos de medición. Se realizan mediciones en estos dos escenarios con el fin de analizar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones (al interior y al exterior del edificio). Las coordenadas del edificio son latitud 19.3138° Norte, longitud 99.183° Oeste y con una altitud de 2312 m.s.n.m.

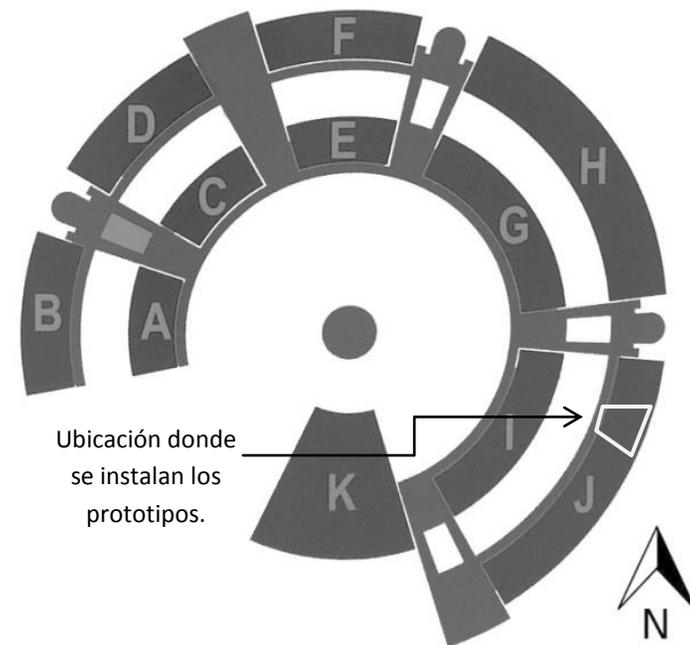


Figura 59. Distribución del edificio de Unidad de Posgrado UNAM. Fuente: Autoría propia, 2014.



Los pasos que se siguieron para realizar las mediciones se mencionan a continuación:

Para el experimento de la etapa 1 (medición de la temperatura en el interior de la vivienda en San Pedro Sula, Honduras):

- Se colocaron 4 sensores en las habitaciones y un sensor en el exterior.
- Posteriormente los datos obtenidos se tabularon, calculando los valores máximos, mínimos, promedio y la media por hora.
- Se realizaron las respectivas gráficas comparativas.

Para el experimento de la etapa 2 (Prototipo de los bloques de concreto en el laboratorio y en la azotea):

- Se calibraron los sensores.
- Se tomó un día para hacer los ajustes en los bloques e instalar los sensores.
- Se programó en el software Agilent BenchLink Data Logger 3, los equipos y el tiempo en que se realiza cada medición, las cuales se tomaron a cada cinco minutos.
- Con los termistores se registraron la temperatura de entrada del agua, la temperatura de salida del agua y la temperatura de los bloques. Con los Hobos U12-011 se registraron las mediciones de Bulbo seco (TBS), Humedad Relativa (HR) del ambiente.
- Posteriormente los datos obtenidos se tabularon en Excel; calculando los valores máximos, mínimos, promedio y la media por hora.
- Se realizaron las respectivas gráficas comparativas.



Imagen 28. Adquisidor de datos marca Agilent. Fuente: Autoría propia, 2014.

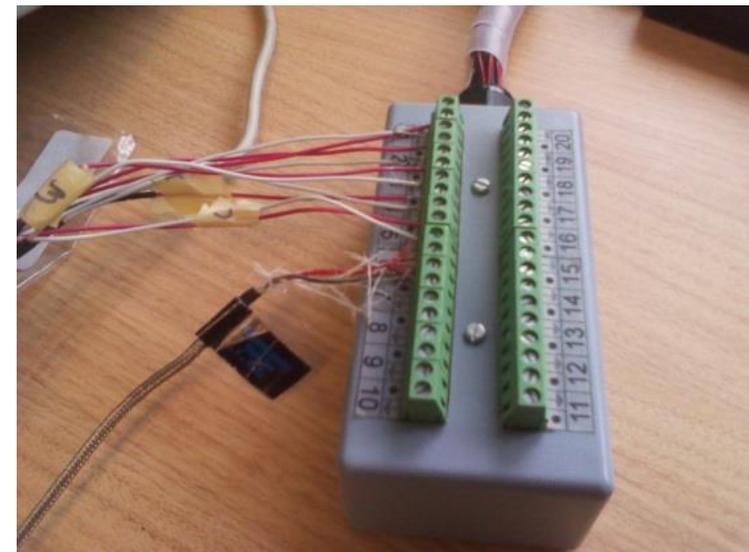


Imagen 29. Tarjeta que conecta los dispositivos de medición con el adquisidor de datos. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 30. Termistores que se utilizarán para medir la temperatura del agua y de la masa térmica. Fuente: Recuperado el 01 de agosto del 2015. Obtenido de es.rs-online.com

Para el experimento realizado en San Pedro Sula, Honduras (Prototipo del bloque de concreto con el sistema hidrónico):

- Se programó el HOBO U12-013, para realizar las mediciones de la temperatura, humedad relativa y temperatura de rocío ambiente. Al mismo tiempo se conectan los sensores TMC6-HD para registrar la temperatura del agua y del bloque.
- Posteriormente los datos obtenidos se tabularon en Excel, calculando los valores máximos, mínimos, promedio y la media por hora.
- Se realizaron las respectivas gráficas comparativas



Imagen 31. Equipos utilizados para el experimento realizado en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Recuperado el 15 de octubre del 2014. Obtenido de www.onsetcomp.com

6.3.1 Calibración

“La calibración es una serie de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores obtenidos por medio de un instrumento y los valores conocidos correspondientes de la medida. El resultado de este proceso de calibración es conocido como un Factor o constante de calibración” (Valeriano, 2011).

Para los equipos mencionados anteriormente, los únicos a los cuales se realiza una calibración son a los termistores, debido a que los HOBOS y los Air/Water/Soil Temp Sensor se encuentran calibrados por la fábrica.

Se denomina termistor a aquel sensor que es capaz de dar una indicación de la temperatura a través de la variación de su resistencia eléctrica. Se encuentra formado por un material semiconductor, el cual presenta una estructura cristalina en forma de red.

La calibración de los termistores consiste en ajustar los parámetros de una expresión teórica (conocida a priori) que da el valor de la resistencia “R” de un termistor en función de su temperatura “T”. Para ello se utiliza un baño termostático⁴, que permite mantener una masa de agua, en la que se encontrará sumergido el termistor, a un valor de temperatura controlada y fija. Se mide la temperatura “T” del agua con un termómetro de mercurio, y la resistencia “R” del termistor con un multímetro digital. Con estos datos se determinan las

⁴ Este baño consiste en un recipiente de agua, con un calentador y un sistema de recirculación para mantener la temperatura del agua en el recipiente lo más uniforme posible.

constantes desconocidas en la relación $R(T)$. Los termistores presentan oscilaciones de $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$.

Una expresión aproximada que se puede utilizar para vincular la temperatura T con la resistencia R de un termistor NTC es la siguiente:

$$R = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (4)$$

Dónde:

- R_0 es la Resistencia del termistor a una determinada temperatura T_0 .
- B es un parámetro positivo a priori desconocido.
- T es la temperatura, también absoluta, a la cual se encuentra el termistor, para la que presentará una resistencia eléctrica R .

Determinando la constante B se conoce la relación anterior y su relación inversa (despejando T en función de R). Obteniendo así la dependencia $T(R)$, al que se llama curva de calibración del termistor. Esta función permite, a través de la medida de la resistencia del termistor, conocer la temperatura a la que se encuentra. El método que se utiliza para determinar este parámetro B , es la medida de la resistencia del termistor a varias temperaturas (se recomiendan que sean 15). Haciendo un cambio de variable adecuado se puede linealizar la relación exponencial anterior lo que permite aplicar el método de regresión lineal para el ajuste de la curva $R(T)$.

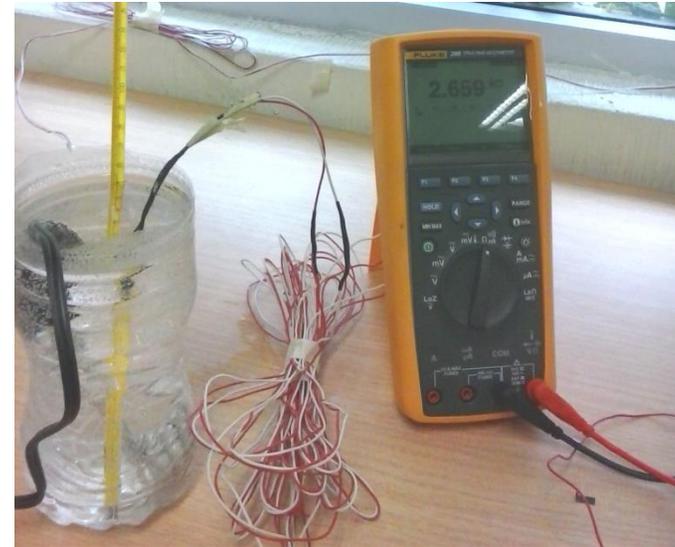
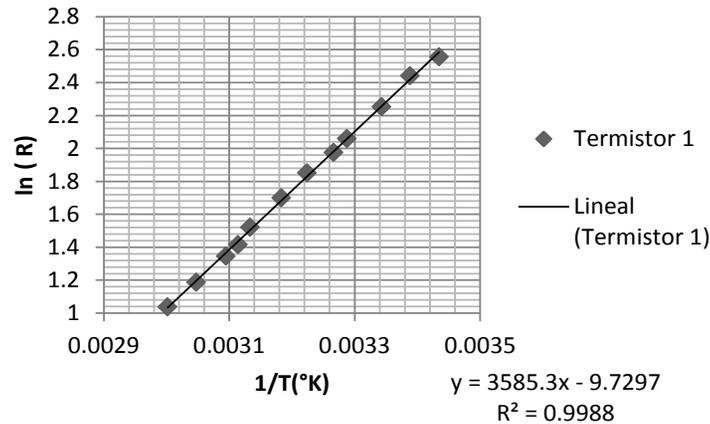


Imagen 32. Calibración de los termistores. Fuente: Autoría propia, 2014.

Tabla 14. Calibración termistor 1.

Termistor 1					
	T (°C)	R (K ohms)	T (°K)	X 1/T(°K)	Y ln (R)
1	18	12.88	291.15	0.00343466	2.55567572
2	22	11.48	295.15	0.00338811	2.44060639
3	26	9.51	299.15	0.0033428	2.25234388
4	31	7.85	304.15	0.00328785	2.06051353
5	33	7.21	306.15	0.00326637	1.97546895
6	37	6.37	310.15	0.00322425	1.85159947
7	41	5.47	314.15	0.00318319	1.69927862
8	46	4.58	319.15	0.00313332	1.521699
9	48	4.12	321.15	0.00311381	1.41585316
10	50	3.84	323.15	0.00309454	1.34547237
11	55	3.28	328.15	0.00304739	1.18784342
12	60	2.82	333.15	0.00300165	1.03673688



Gráfica 21. Gráfica de dispersión del termistor 1.

En la tabla 14, se muestra los datos obtenidos con respecto a la temperatura y a la resistencia del termistor 1. Con estos datos se adquiere los valores en “X = (1/T (°K))” e “Y = (Ln R)”, con los cuales se realiza la gráfica 21. El valor de la correlación es de 0.9988, siendo cercano a 1, por lo que los datos obtenidos siguen un comportamiento cercano a lo esperado; esto se debe a que los termistores empleados son nuevos. Al mismo tiempo, con la gráfica 21 se obtiene la ecuación que explica el comportamiento del termistor, siendo la siguiente:

$$y = 3585.3x - 9.7297 \quad (5)$$

Posteriormente se reemplaza de la ecuación 2 las variables “X” e “Y”, por las equivalentes, teniendo la siguiente ecuación:

$$\ln R = 3585.3 * (1/T - 9.7297) \quad (6)$$

Luego se despeja la variable “T”, siendo esta ecuación la necesaria para obtener la temperatura a partir del valor de la resistencia del termistor:

$$T = 3585.3 / (\ln R + 9.7297) \quad (7)$$

Este proceso se realiza por cada uno de los termistores utilizados en el experimento.

6.4 Etapas del proceso experimental.

La investigación se desarrolla de manera comparativa y experimental, el cual se desarrolla en diferentes etapas. La primera consiste en realizar mediciones de la temperatura y de la humedad en una vivienda estándar en San Pedro Sula, con el fin de obtener el comportamiento térmico en el interior. Las mediciones se realizan en las habitaciones del nivel superior de la vivienda entre el período del 18 de diciembre del 2014 y el 18 de enero del 2015. La descripción de la vivienda se realiza en el capítulo 4. En la segunda etapa se realizan dos prototipos de concreto, en uno de ellos se instala el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría y poder analizar el funcionamiento y el porcentaje de enfriamiento del sistema. El experimento se realiza en el edificio de la Unidad de Posgrados, se escogió desarrollarlo en la universidad por la facilidad de poder realizar el experimento y por la disponibilidad de los equipos de medición. También se realiza una réplica del prototipo y se realizan mediciones en la ciudad de San Pedro Sula, con el objetivo de poder analizar el sistema en clima cálido húmedo que presenta la ciudad.

6.4.1 Proceso experimental etapa 1: Análisis térmica de la vivienda.

Para el presente trabajo se analiza una vivienda de dos niveles, la cual posee un área de 248 m², teniendo la forma rectangular de 15.50 mts x 8 mts. El techo es a cuatro aguas con una pendiente de 30% y posee 0.60 mts. de alero para la protección del agua. Los materiales utilizados son los mencionados anteriormente para la vivienda estándar, techo de lámina grosor de 0.20 mm, las paredes internas y externas son de bloques de concreto de 15 cm y piso de cerámica.



Imagen 33. Fotos de la fachada frontal de la vivienda. Fuente: autoría propia, 2014.



Imagen 34. Foto de la fachada lateral de la vivienda. Fuente: autoría propia, 2014.

En esta etapa se desarrolla un análisis térmico de una vivienda estándar en San Pedro Sula, Honduras. El análisis se realiza por medio de mediciones térmicas en las habitaciones del nivel superior de la vivienda. Se toman solamente estas áreas debido a ser las que reciben mayor incidencia solar tanto en las paredes como en el techo, por lo que son las más calientes de la vivienda. Se localiza un HOBO U12-011 en cada una de las cuatro habitaciones de la planta superior y un HOBO U12-013 en el exterior para comparar el comportamiento térmico en cada habitación con el exterior. Las mediciones tienen duración de un mes, realizándose entre el 18 de diciembre del 2014 al 18 de enero del 2015; tomando las mediciones de la humedad relativa, la temperatura ambiente y la temperatura del punto de rocío. En la figura 60 se muestra el esquema de localización de los sensores en las habitaciones.



Figura 60. Esquema de localización de los sensores en las habitaciones.



Imagen 35. Habitación 2, con orientación suroeste. Fuente: Autoría propia, 2014.

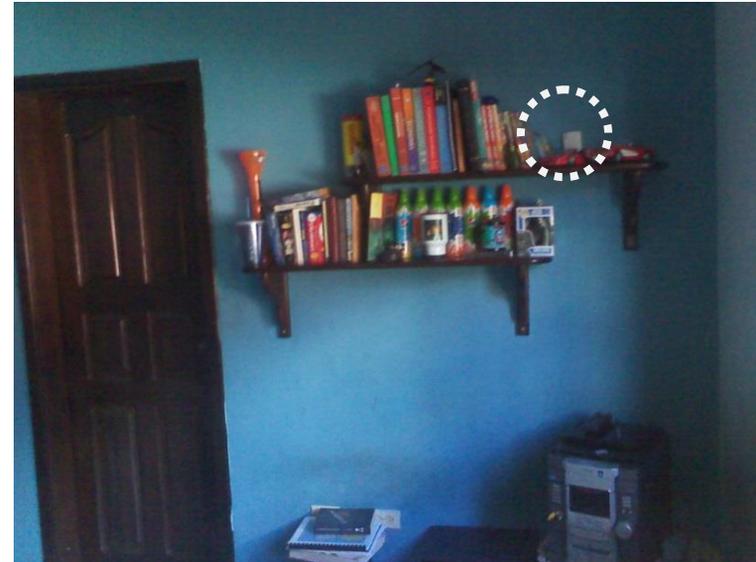


Imagen 36. Ubicación del HOBO U12-11 en la habitación 2. Fuente: Autoría propia, 2014.

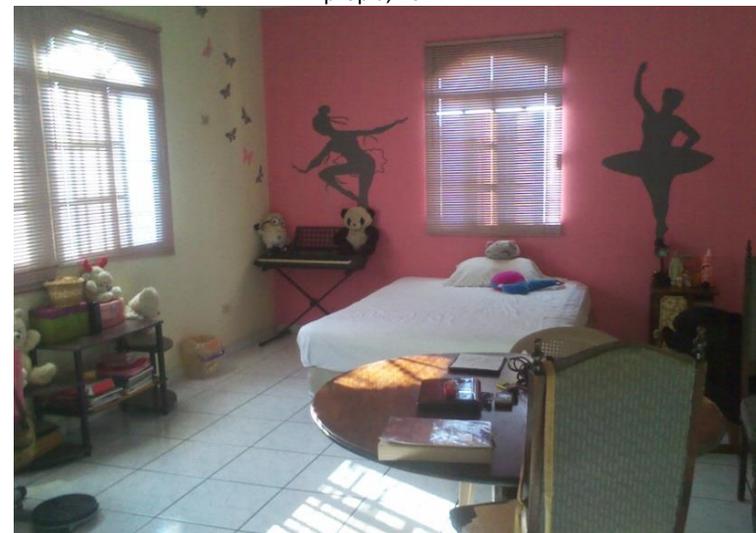


Imagen 37. Habitación 3, orientación sureste. Fuente: Autoría propia, 2014.

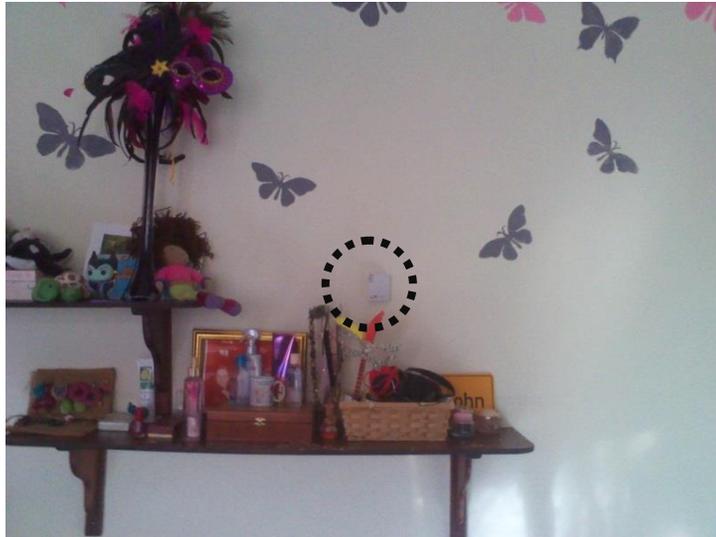


Imagen 38. Ubicación del HOBO U12-011 en la habitación 4. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 40. Ubicación del HOBO U12-011 en la habitación 4. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 39. Habitación 4, orientación noroeste. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 41. Habitación Principal, con orientación noreste. Ubicación del HOBO U12-011. Fuente: Autoría propia, 2014.



5.4.2 Proceso experimental etapa 2: Enfriamiento de la masa térmica.

En la segunda etapa se realiza el experimento en dos localidades. Una se desarrolla en el edificio de la Unidad de Posgrado de la UNAM en la ciudad del Distrito Federal, México; y la otra localidad es en una vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. En el experimento realizado en México se elaboró dos bloques de concreto para poder analizar el funcionamiento y el porcentaje de enfriamiento del sistema. En uno se instala el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría y el otro prototipo se utiliza como referencia.

Los bloques se realizaron el 22 de septiembre del 2014, los cuales son de 30cm de alto X 30cm ancho X 15cm de espesor. En el bloque con el sistema de enfriamiento hidrónico, se utiliza tubería de ½" y se coloca al centro de los 15cm de espesor del bloque y con una separación de 15 cm de eje entre la tubería; siendo estas las especificaciones establecidas por Kiel Moe (2010). Kiel menciona que el circuito de tubería de PEX debe estar distribuido con una separación máxima entre tubos de 12 pulgadas (300mm) y con una separación mínima de 6 pulgadas (150 mm). Generalmente el rango de separación es entre 8 a 10 pulgadas (200 mm a 250 mm) con el objetivo de tener un balance económico óptimo sin utilizar mucha tubería. Esta separación depende del diámetro de la tubería, entre mayor es el diámetro mayor es la separación. También menciona que para no elevar el costo del sistema muchos países europeos aplican la tubería con menor diámetro, siendo entre 1/2" a 5/8" (12mm a 15mm) con una separación de 6" (150mm), siendo esta las especificaciones empleadas para el desarrollo del experimento.

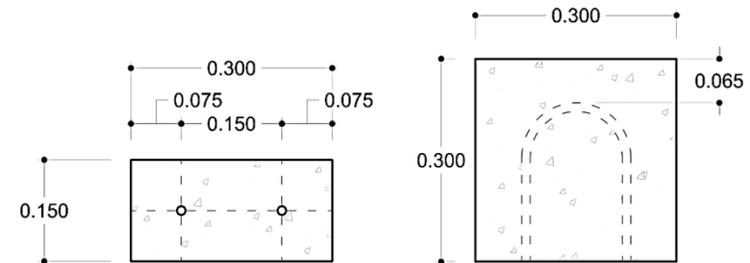


Figura 61. Distancia a la que se coloca la tubería en el prototipo. Fuente: Autoría propia.

Para realizar los bloques, primero se armó el encofrado, posteriormente se perfora uno de los encofrados para introducir la tubería. Luego se colocan las varillas de refuerzo, se introduce la tubería, se amarra con las varillas para darle la curva y la distancia deseada. Después se realiza una prueba para corroborar que el agua circula correctamente en la tubería y posteriormente se vierte el concreto en el encofrado.



Imagen 42. Realización del encofrado. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 43. Colocación de la tubería y de la varilla de refuerzo. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 45. Mezcla de concreto se vierte en el encofrado. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 44. Prueba para corroborar el flujo del agua en la tubería. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 46. Prueba de la circulación del agua con la bomba. Fuente: Autoría propia, 2014.

Para analizar el comportamiento del sistema de enfriamiento radiante en clima cálido húmedo, se realiza el experimento en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. En este experimento se desarrolla un bloque de concreto en el que se instala el sistema de tuberías de PEX, con el mismo procedimiento que el realizado en la ciudad del Distrito Federal, México. La diferencia es que se desarrolla el segundo bloque de referencia debido a la escasez de equipos de medición.



Imagen 47. Colado del bloque de concreto en San Pedro Sula, Honduras.
Fuente: Autoría propia, 2014.

6.4.2.1 Materiales:

Los materiales utilizados para realizar el experimento son los siguientes:

- Tubería: PEX de ½" (para la circulación del agua). Longitud: 2.7 metros.
- Concreto: volumen de 0.0135 m² por cada bloque.
 - Honduras:
 - Proporción: 1:2:2
 - Cemento: 420 kilos,
 - Arena: 0.670 m³
 - Grava: 0.67 m³
 - Resistencia a la compresión a los 28 días: 3000-3640 p.s.i; 214-260 kg/cm²
 - México:
 - Proporción: 1:3:4
 - Cemento: 260 kilos
 - Arena: 0.625 m³
 - Grava: 0.835 m³
 - Resistencia a la compresión a los 28 días: 1960-2520 p.s.i; 140-180 kg/cm²
- Hielera: Se colocan dos, en uno se enfría el agua que entra al bloque de concreto y el otro contiene el agua que sale del bloque de concreto. Cantidad: 2.
- Bomba de fuente sumergible marca Pond Boss. Cantidad: 1
Las especificaciones de la bomba son las siguientes:
 - Altura de bombeo: 2.1 metros.

- Flujo: máximo 5.52 Litros por minuto y mínimo 3 Litros por minuto.
 - Consumo de energía: 31 vatios / 0.35 amperios.
- Aislante para la tubería (para evitar la pérdida de temperatura del agua en el recorrido). Longitud: 2 m.
 - Llave esfera 16X1/2 FUNCO PEX: válvula para regular el flujo del agua.
 - Hielo, para el enfriamiento del agua.



Imagen 48. Bomba de fuente sumergible. Fuente: Autoría propia, 2014.

6.4.2.2 Instalación del experimento:

En el experimento realizado en la ciudad del Distrito Federal, México; la instalación se muestra en las imágenes 49, 50 y 51. El bloque A es el que posee el sistema de enfriamiento hidrónico y el bloque B es el de referencia. En el bloque A, la tubería se conecta con la bomba dentro de una de las hieleras, en esta hielera se encuentra con agua y es en la que se le introduce hielo para enfriar y mantener la temperatura del agua entre uno y dos grados arriba de la temperatura del punto de rocío. En la segunda hielera se conecta la tubería en la que sale el agua del bloque A. La hielera del agua de entrada y la de salida se encuentran conectadas entre sí con el fin de generar una circulación constante en el sistema.

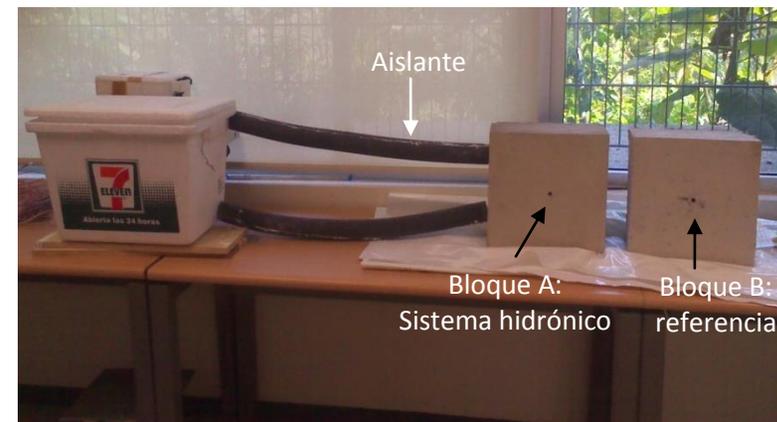


Imagen 49. Instalación del experimento en el laboratorio. Fuente: Autoría propia, 2014.



Imagen 50. Instalación del experimento en el laboratorio. Fuente: Autoría propia, 2014.

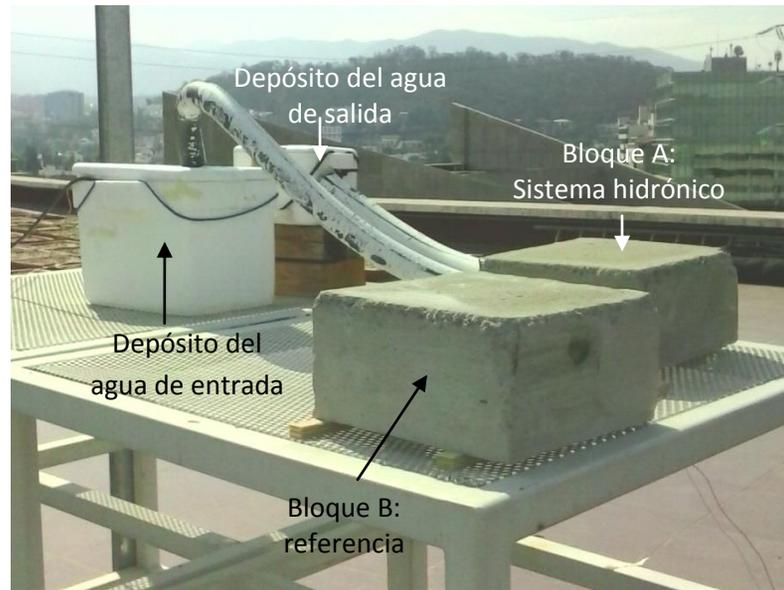


Imagen 51. Instalación del experimento en la azotea. Fuente: Autoría propia, 2015.

En el experimento desarrollado en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras; se desarrolla solamente un bloque de concreto, como se mencionó anteriormente, en el que se instala el sistema de enfriamiento radiante. En este experimento ambas tuberías del bloque se conectan a una sola hielera, una de estas conecta con la bomba para la circulación del agua y la otra para la salida del agua. Se emplea una hielera y no dos como en el experimento anterior, debido a la falta de sensores disponibles para poder llevar a Honduras que permitan medir la temperatura de entrada y de salida del agua.



Imagen 52. Experimento en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autoría propia, 2015.

6.4.2.3 Instalación de los equipos de medición:

En el experimento desarrollado en el edificio de la Unidad de Posgrados, en la ciudad del D.F en México; se instalan los termistores para medir la temperatura de la masa térmica de los bloques de concreto para analizar si con el sistema se puede modificar la temperatura interna. Al mismo tiempo se coloca termistores para mesurar la temperatura del agua de entrada al

bloque con el sistema hidrónico y la temperatura del agua de salida.

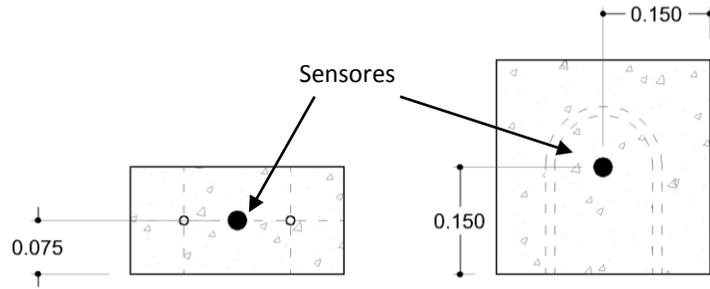


Figura 62. Ubicación de los sensores en el interior de los bloques de concreto.

También se colocó un piranómetro para medir la radiación que le incide a los bloques de forma vertical y horizontal durante las mediciones. Y se ubica el HOBO U12-03 para obtener la temperatura, humedad y temperatura de rocío del ambiente.



Imagen 53. Localización de los termistores en el experimento en el laboratorio.
Fuente: Autoría propia, 2014.

En el experimento desarrollado en la ciudad de San Pedro Sula, los equipos utilizados son los dos sensores de temperatura de aire, agua y suelo; y el HOBO Data Logger U12-013. Los

sensores se conectan al HOBO para registrar las mediciones, las cuales se realizan a cada 5 minutos. Los sensores se colocan en el interior bloque de concreto para registrar la temperatura de la masa térmica y en la hielera para el monitoreo de la temperatura del agua de entrada al bloque. Con el HOBO U12-013 también se registró la temperatura, humedad relativa y temperatura de punto de rocío del ambiente.

6.2.4.4 Variables:

Monroy (2006), desarrolla un esquema en el cual señala los factores del clima que afectan una localidad, las cuales se muestran en la figura 63 y se mencionan en el capítulo 3. Partiendo de este diagrama se retoma solamente las variables que van afectar en el experimento, siendo estas las que se presentan en la figura 64 y 65.

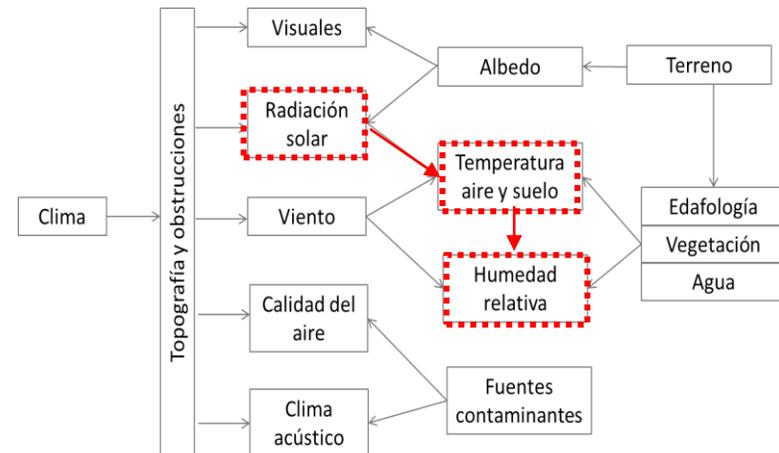


Figura 63. Vectores del entorno que modifican el microclima de un lugar.
Fuente: Monroy, 2006, p.p 62.

Las variables Independientes que intervienen en el experimento y que se extraen de la figura 63 son las siguientes:

- Radiación solar.
- Temperatura del aire.
- Humedad relativa.
- Temperatura del punto de rocío.

Las variables dependientes que intervienen en el experimento son las siguientes:

- Temperatura del agua de entrada.
- Temperatura del agua de salida.
- Temperatura de la masa térmica del interior del bloque.
- Temperatura en la superficie superior del bloque.
- Temperatura en la superficie inferior del bloque.
- Flujo del agua.
- Diámetro y separación de la tubería.
- Conductividad térmica del concreto
- Espesor del concreto

En el esquema de la figura 64 se muestra la relación de las variables que intervienen en la temperatura de la masa térmica del bloque de concreto de referencia. Las variables se dividen en dos partes, las que provienen del clima y las que influyen con las propiedades del material.

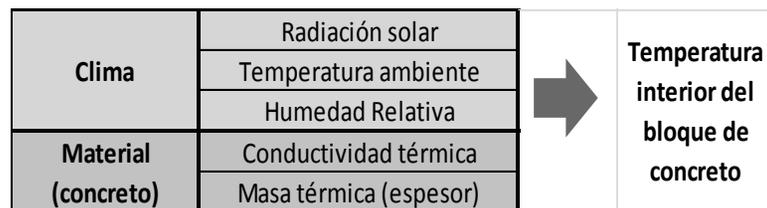


Figura 64. Esquema de la relación de las variables que influyen en el bloque de referencia.

En el esquema de la figura 65, se muestra las variables que influyen en la temperatura de la masa térmica del bloque de concreto con el sistema hidrónico. La variable que determina el porcentaje de enfriamiento de la masa térmica del concreto es la temperatura del agua, la cual se encuentra restringida por la temperatura del punto de rocío, debido a que la temperatura del agua no puede ser menor a la de rocío para evitar la condensación en el concreto. La temperatura del punto de rocío se encuentra acotada por la temperatura y la humedad relativa del ambiente; entre menor porcentaje de humedad y menor sea la temperatura ambiente, la temperatura de rocío es más baja. Otras variables que influyen en el funcionamiento del sistema son la velocidad del flujo del agua, el grosor de la tubería y la separación. Asimismo, intervienen las características térmicas y el grosor del material.

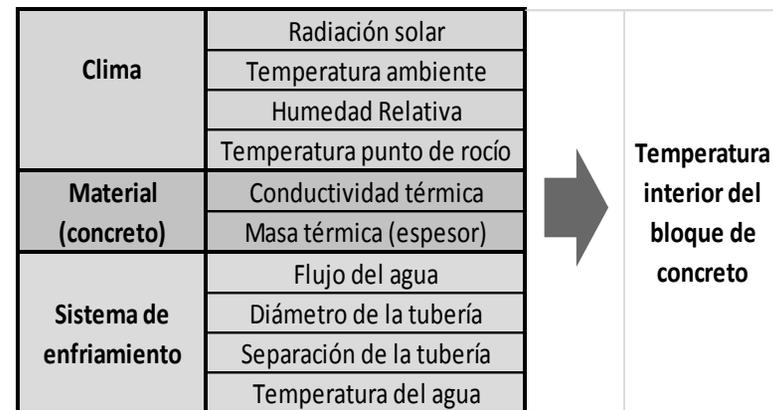


Figura 65. Esquema de la relación de variables que influyen en el bloque con el sistema de enfriamiento hidrónico.

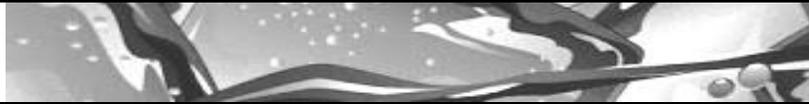


6.5 Condiciones en las que se desarrollaron el experimento.

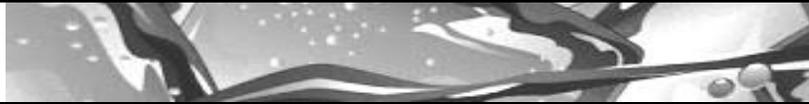
Durante el desarrollo del diseño del experimento se presentaron diversas restricciones, las cuales se mencionan a continuación:

1. El atraso en la construcción de los módulos experimentales localizados en la azotea, debido a que inicialmente se iba a instalar en uno de los módulos el sistema hidrónico y poder realizar una comparación del funcionamiento del sistema en escala 1:1.
2. Mediciones en períodos cortos por la falta de un equipo mecánico para enfriar el agua (minichiller o una bomba de calor); por lo tanto se empleó una hielera con agua fría, lo que generó que el enfriamiento se realizara manualmente aplicando hielo al agua y monitoreando constantemente la temperatura del punto de rocío con la del agua para evitar la condensación.
3. El experimento no fue un sistema cerrado, lo que generó que no se pudiera experimentar con Glycol para ser mezclado con el agua y comparar si esta solución posee un mayor porcentaje de enfriamiento de la masa térmica del concreto.
4. El experimento que se realizó en San Pedro Sula, Honduras, no se desarrolló en las mismas condiciones en el que se realizó en la Unidad de Posgrado en la ciudad de México, México.





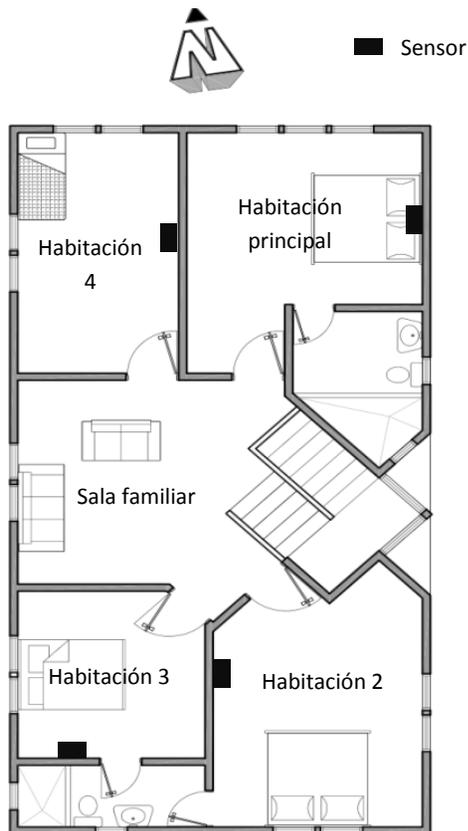
CAPITULO 7: Análisis y discusión de los resultados



7. Interpretación de los resultados.

El experimento se desarrolla de manera comparativa y experimental, el cual se desarrolla en diferentes etapas. La primera consiste en realizar mediciones de temperatura y humedad relativa en la vivienda en San Pedro Sula, Honduras; para analizar el comportamiento térmico de la vivienda en el interior. La segunda etapa consiste en realizar dos prototipos a escala de concreto, en uno se instala el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría y poder analizar el funcionamiento y el porcentaje de enfriamiento del sistema, comparándolo con el otro prototipo que es el de referencia.

7.1. Etapa 1: Análisis térmico de la vivienda.



Como se mencionó en el capítulo 6, se colocaron cinco sensores para obtener las mediciones del comportamiento térmico en el interior de una vivienda de clase media en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras. Se localizaron cuatro sensores en cuatro habitaciones del segundo piso, debido a ser las áreas que poseen una mayor incidencia solar y se colocó un sensor en el exterior para comparar la temperatura y humedad del exterior con el de cada habitación (ver figura 66).

Figura 66. Esquema de localización de los sensores en las habitaciones.

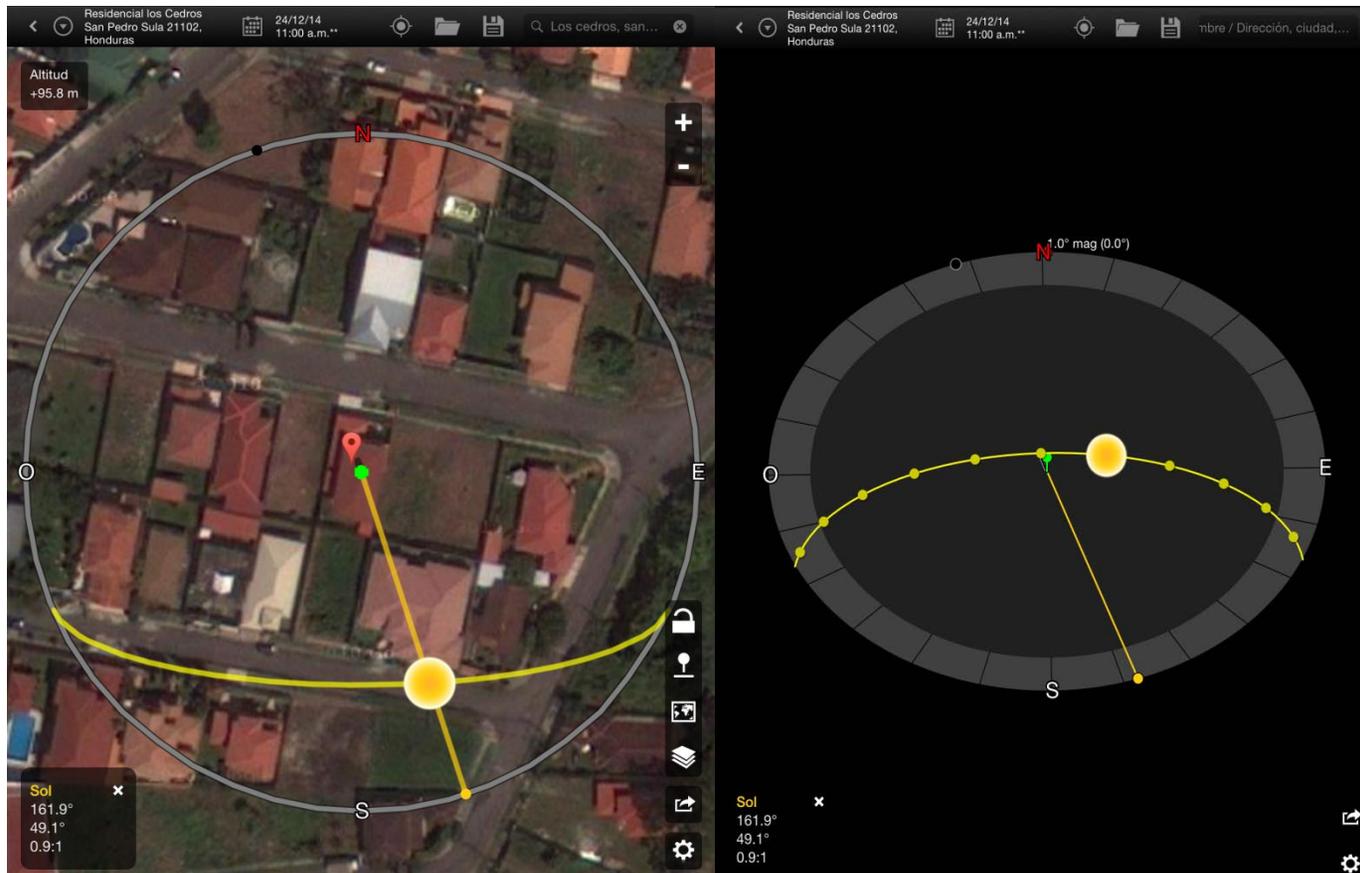
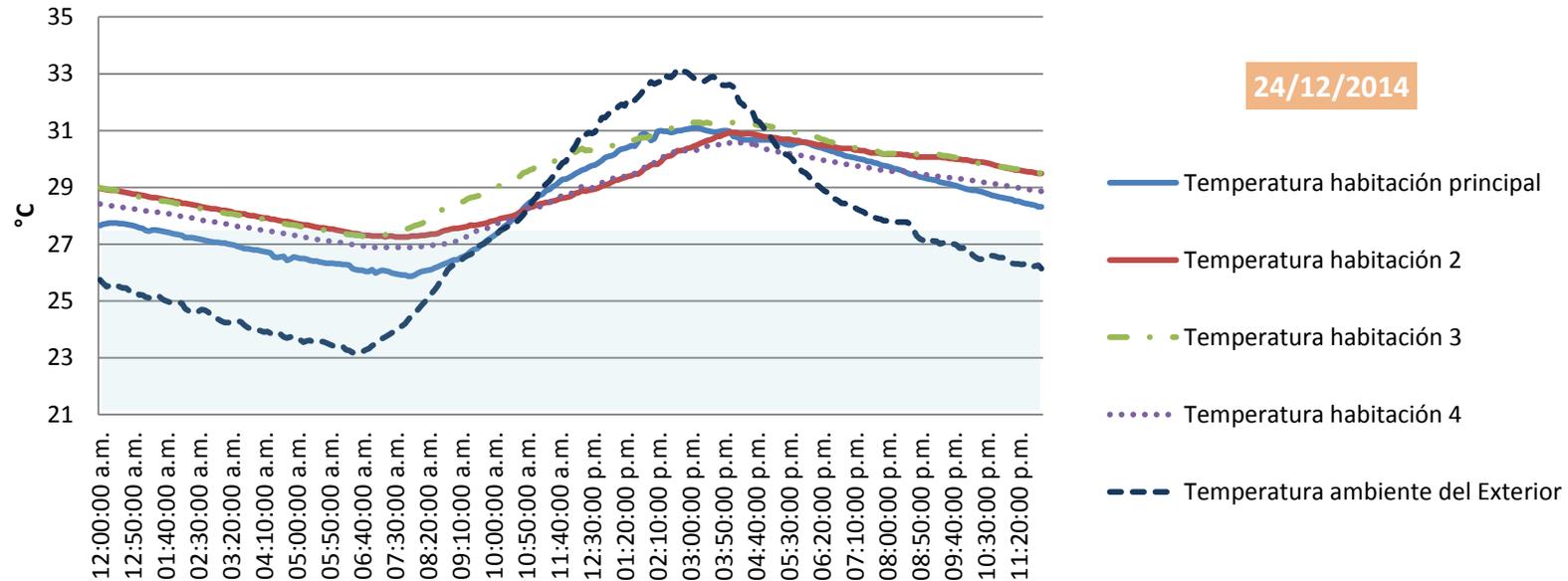


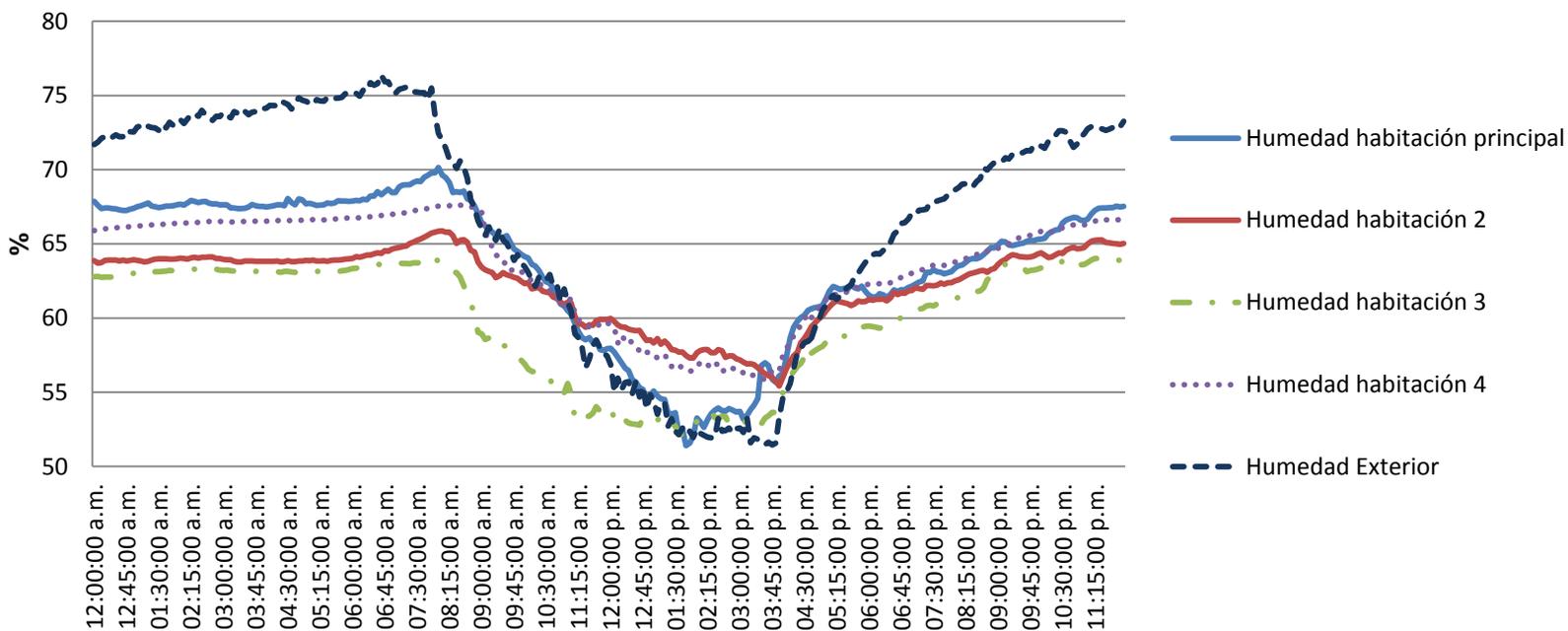
Figura 67. Diagrama Solar equidistante a las 11:00 am. Fuente: software SunSurveyor, 2014.

En la figura 67 se muestra el diagrama solar de la vivienda, se observa la trayectoria del sol durante el día 24 de mes de diciembre del 2014. Se observa que la fachada sur es la que se encuentra expuesta a lo largo del día a la radiación solar seguido de las fachadas este y oeste. Al mismo tiempo la habitación principal y la habitación 3 son las que reciben por mayor tiempo la radiación solar debido a la inclinación que posee la vivienda. Las mediciones tuvieron duración de un mes, desde el 18 de diciembre del 2014 al 18 de enero del 2015, siendo estos meses los que se presentan la temperatura más baja durante el año. Para el análisis se seleccionaron dos días, siendo estos días en los que se registraron la temperatura promedio más baja y la más alta.



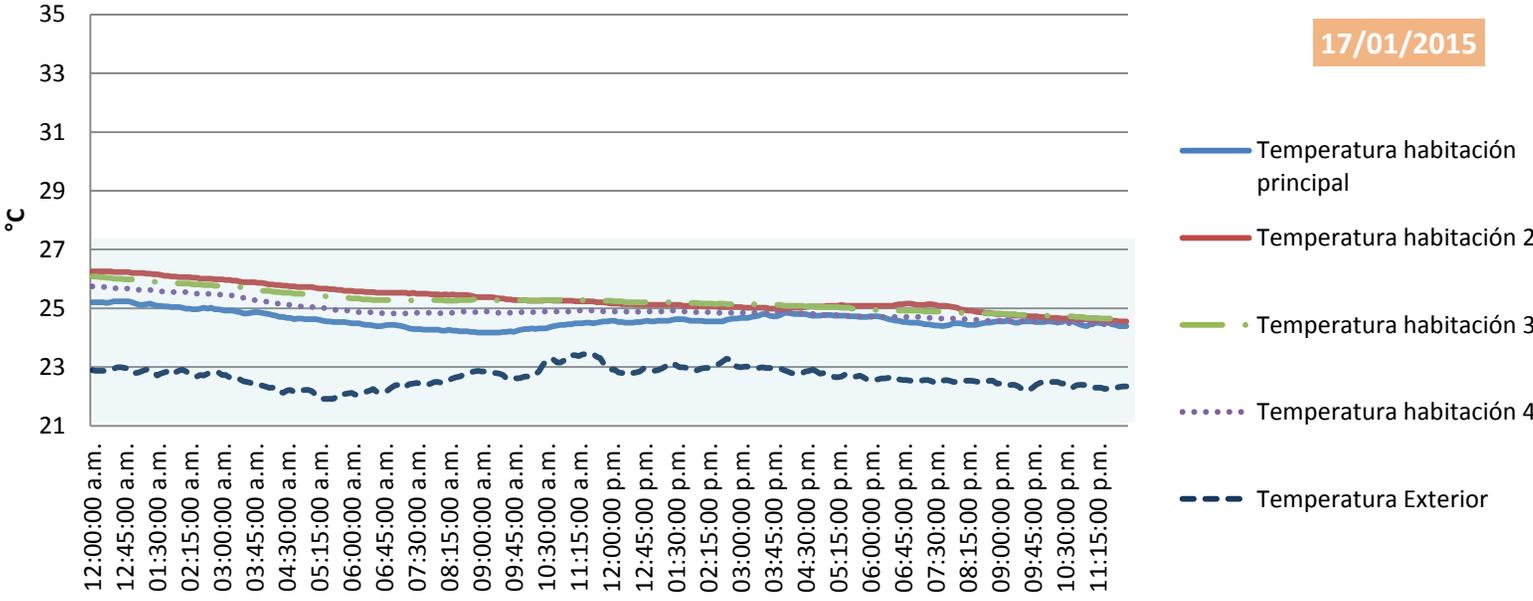
Gráfica 22. Comparación de la temperatura en los espacios el día 24 de diciembre del 2014.

En la gráfica 22 se presenta el comportamiento de la temperatura en las habitaciones y en el exterior el día 24 de diciembre, siendo este día el que se registra con la temperatura promedio más alta registrada. En la gráfica, se observa que la temperatura del exterior, entre las 9:00 am hasta las 5:30 pm aproximadamente, sobrepasa la temperatura de las habitaciones, incrementándose hasta alcanzar los 33.15°C a las 2:40 pm, con una humedad relativa de 52.42%. La habitación 3 es la que presentó mayor temperatura en el interior, esta habitación se encuentra orientada hacia el noreste. También se observa que el comportamiento de la temperatura de la habitación principal es similar a la temperatura del exterior, presentando un incremento a las 10:00 am y decreciendo desde las 5:00 pm. Las habitaciones 2 y 4 son las que presentan comportamientos similares de temperatura. En la gráfica 22 se muestra una franja de color azul, la que marca el rango de confort establecido por Olgay, como se presentó en el capítulo 2, siendo el rango de temperatura entre los 21°C y los 27.8°C. Se observa que la temperatura del exterior se encuentra dentro de este rango desde las 10:30 pm hasta las 10:30 am aproximadamente. En el interior, solamente la habitación principal se encuentra dentro del rango de confort entre las 5:00 am y las 10:00 am; lo cual se debe al calentamiento de la masa térmica del bloque de concreto por la falta de protección de la radiación solar de la envolvente que incrementan la temperatura del material y del interior, generando que el material almacene el calor y no lo pueda perder durante la noche debido a que no se posee el diferencial necesario de temperatura entre el día y la noche para enfriar el material por medio del sumidero de calor de la atmósfera.



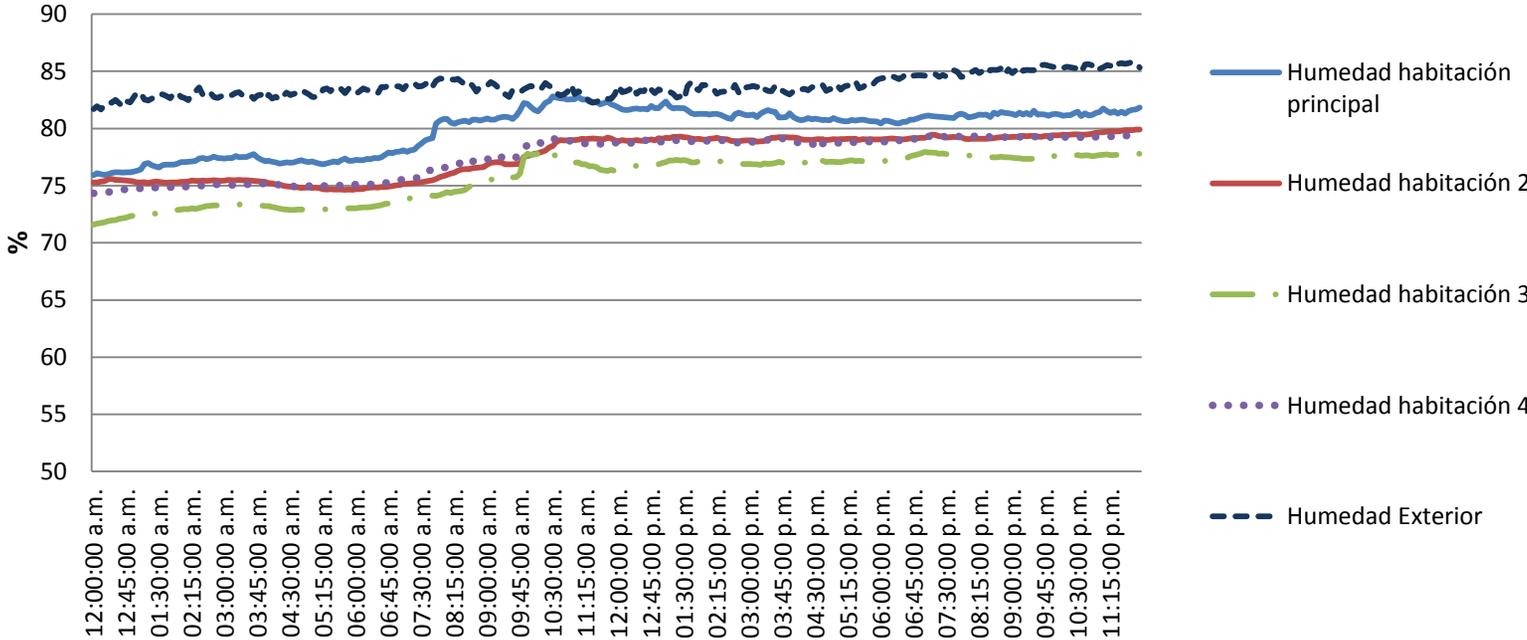
Gráfica 23. Comparación de la humedad en los espacios el día 24 de diciembre del 2014.

En la gráfica 23 se presenta el comportamiento de la humedad relativa en las habitaciones y en el exterior. Se observa que entre las 10:00 am y las 5:00 pm se presenta los porcentajes de humedad más bajo, coincidiendo con el período en el que la temperatura es más alta. Por lo que a mayor temperatura, menor porcentaje de humedad se posee. El rango de humedad que plantea Olgay para generar confort es entre los 30% y los 50%; en la gráfica se observa que el porcentaje de humedad tanto en el exterior como en el interior sobrepasa estos valores, por lo que no se presenta condiciones de confort.



Gráfica 24. Comparación de la temperatura el día 17 de enero del 2015.

En la gráfica 24 se presenta el comportamiento de la temperatura en el interior de las habitaciones y el exterior, el 17 de enero del 2015, siendo este el día el que presento la temperatura promedio más baja. Se observa en la gráfica que la temperatura del exterior oscila entre los 21°C y los 23.5°C; sin sobrepasar la temperatura registrada en el interior de las habitaciones y se encuentra en el rango de la temperatura de confort establecida por Olgay. La habitación 2 y 3, el comportamiento de la temperatura son las más elevadas, siendo la habitación 2 la que presenta mayor temperatura. La habitación principal presenta las temperaturas más bajas en comparación con las demás.



Gráfica 25. Comparación de la humedad relativa el día 17 de enero del 2015.

En la gráfica 25 se presenta la comparación del porcentaje de humedad relativa, se observa que el porcentaje en el exterior es más elevada, registrando entre el 81.6 y 85.7%. También se presenta que el porcentaje de humedad relativa de la habitación 3 es la más baja y en la habitación principal la más elevada.

Comparando ambos días, se puede observar que el 17 de enero la temperatura y la humedad relativa se mantuvieron casi constantes, causando que el diferencial entre las mediciones máximas y mínimas fueran leves; esto se debe a que durante este día el clima se encontró nublado y con lluvias constantes; por lo que la radiación solar fue menor en comparación con el día 24 de diciembre del 2014.



7.2 Etapa 2: Comparación de enfriamiento del sistema hidrónico en la masa térmica.

En la segunda etapa del experimento se realizan dos prototipos de concreto, en uno se instala el sistema de tuberías en el interior para el paso del agua fría y el otro prototipo se utiliza como referencia. En la siguiente imagen se muestran la localización de los termistores con los que se realizaron las mediciones. Los termistores que miden la temperatura de la masa térmica se encuentran localizados al centro de la masa térmica para analizar el comportamiento interno. El experimento se realiza en dos localidades diferentes: En la ciudad del Distrito Federal, el edificio J de la Unidad del Posgrado y la vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.

Para esta etapa se utilizan las siguientes abreviaturas:

T.A = Temperatura Ambiente.

T.P.R = Temperatura de punto de rocío.

H.R = Humedad relativa.

T.I.H = Temperatura del interior del bloque hidrónico.

T.I.R = Temperatura del interior del bloque de referencia.

T.S.I.H = Temperatura superficie inferior del bloque hidrónico.

T.S.I.R = Temperatura superficie inferior del bloque de referencia.

T.S.S.H = Temperatura superficie superior del bloque hidrónico.

T.S.S.R = Temperatura superficie superior del bloque de referencia.

T.A.E = Temperatura del agua de entrada.

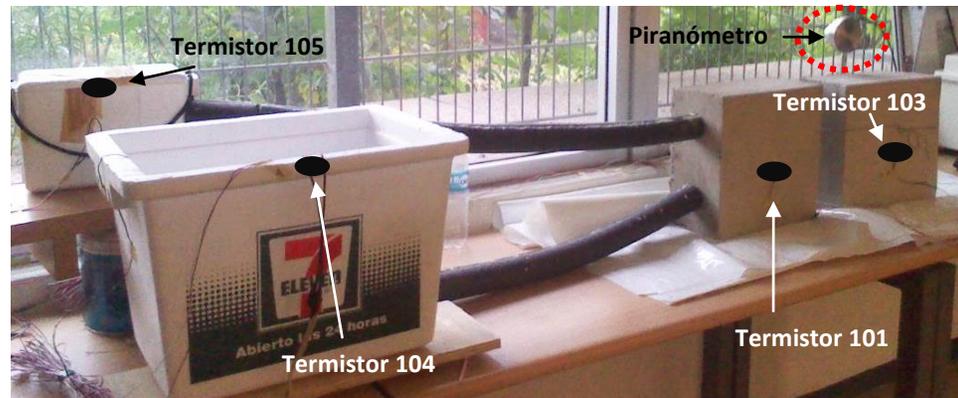
T.A.S = Temperatura del agua de salida.

7.2.1 Comparación de enfriamiento del sistema hidrónico en la masa térmica en clima cálido templado subhúmedo.

En el edificio “J” de la Unidad de Posgrado, en la ciudad del Distrito Federal, se realiza el experimento en el Laboratorio de Interacción con el Medio (LIM) y en el Observatorio de la azotea del edificio. Se desarrolla en dos ubicaciones del edificio para obtener el comportamiento del sistema de enfriamiento en condiciones de espacio interior y exterior.

7.2.1.1 Laboratorio de Interacción con el Medio (LIM).

Se efectuaron las mediciones en el Laboratorio de Interacción con el Medio debido a que en la fecha que se realizaron, noviembre, fue época lluviosa en la ciudad del Distrito Federal. Por esta razón se trató de evitar que los bloques se humedecieran y que dicha humedad influyera en los resultados del experimento, realizando las pruebas en el interior del laboratorio. El flujo del agua que se utilizó en las mediciones realizadas en el laboratorio fue de 5 litros por minuto, siendo este flujo el que tiene la bomba que se empleó en esta etapa del experimento. Los bloques se instalaron de manera vertical debido a que la cantidad de radiación solar que incidió fue mínima por lo que el sentido de la colocación no influyó en el funcionamiento del sistema hidrónico.



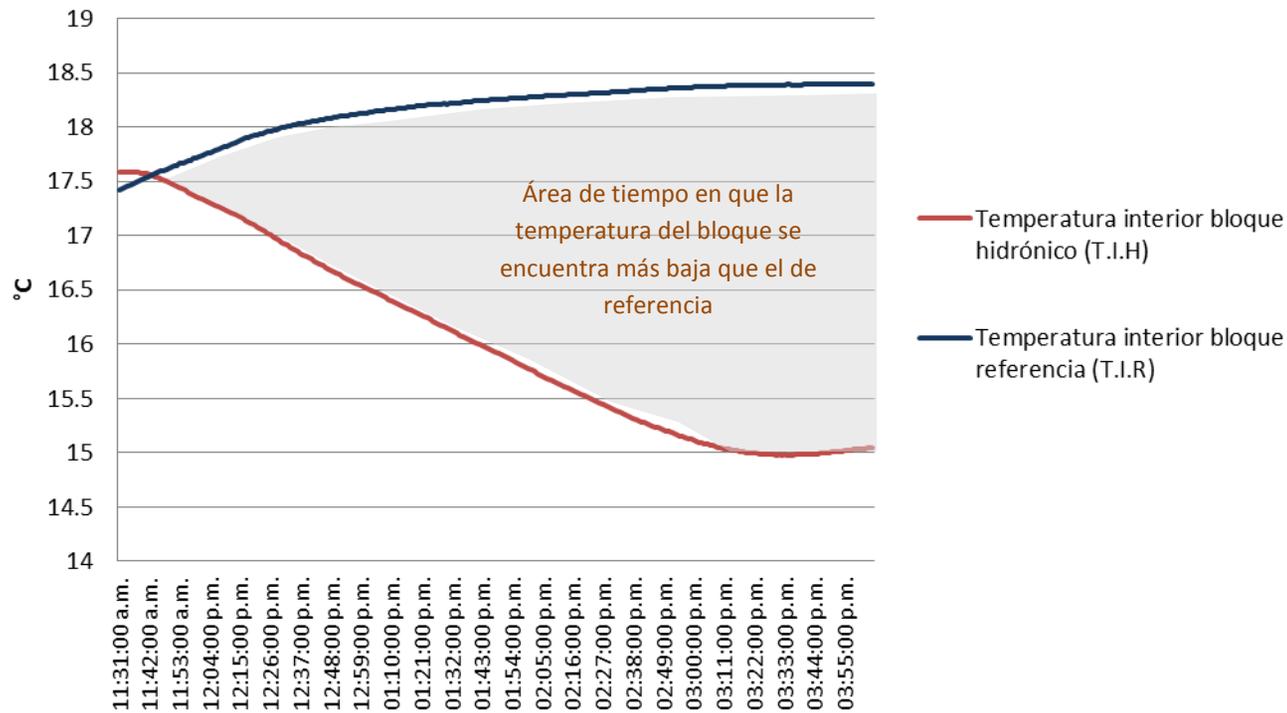
Termistores	
101	Temperatura del bloque sistema hidrónico
103	Temperatura del bloque referencia
104	Temperatura del agua de entrada al bloque
105	Temperatura de salida del agua del bloque

Imagen 54. Localización de los termistores en el experimento. Fuente: Autonomía propia, 2014.

Para las mediciones se utilizaron cuatro termistores: dos para medir la temperatura del agua y los otros se colocan en el centro de los bloques de concreto a 0.75 cm de profundidad para obtener la temperatura en el interior de la masa térmica del concreto. Las primeras mediciones se realizaron el día 21 de noviembre del 2014, entre las 11:30 am hasta las 16:05 pm. Se realizó en este período por a la disponibilidad de tiempo que se tuvo debido a que el enfriamiento del agua se realizó manualmente (por la falta de un equipo mecánico que realizara el monitoreo y el enfriamiento automáticamente); el cual consistió en el monitoreo de la temperatura del punto de rocío del ambiente y de la temperatura del agua, corroborando que la temperatura del agua no sea menor a la del punto de rocío para evitar la condensación (teniendo un rango entre 1°C a 2°C de diferencia). Se incorporó hielo en la hielera donde se encuentra el agua de entrada a la tubería del bloque de concreto cuando la temperatura del agua aumentaba para mantenerla cerca de la temperatura del punto de rocío y poder enfriar la masa térmica del concreto.

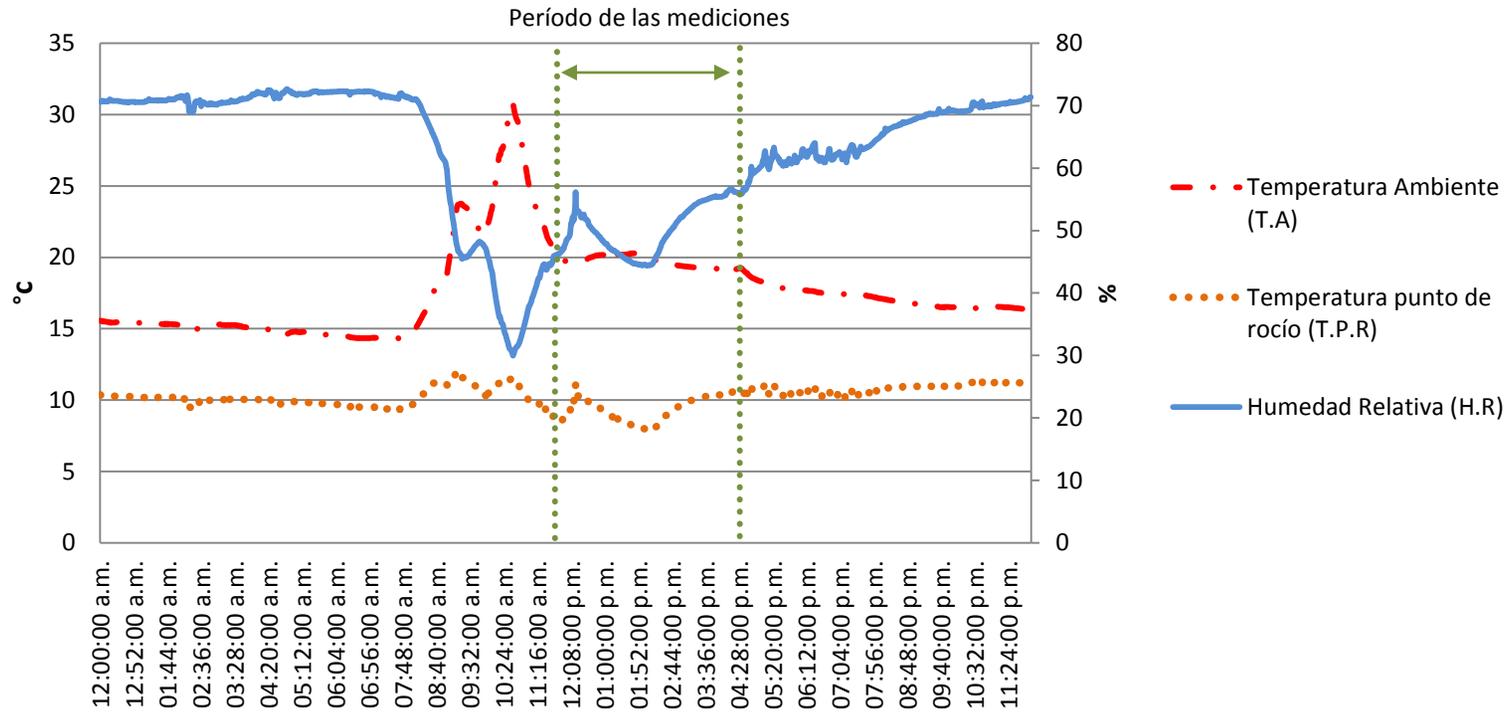
Tabla 15. Resultados promedio, mínimo y máximo de las mediciones el día 21 de noviembre del 2014.

	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Radiación, W/m ²	Temperatura Punto de rocío (°C)	Temperatura interior Bloque hidrónico (°C)	Temperatura interior Bloque referencia (°C)	Temperatura agua entrada (°C)	Temperatura agua salida (°C)
Mínimo	19.175	43.82	0.80	7.79	14.98	17.42	8.95	9.49
Máximo	21.461	56.14	18.09	11.09	17.59	18.40	12.97	13.73
Promedio	19.84	49.44	5.92	9.23	16.04	18.16	10.92	11.57



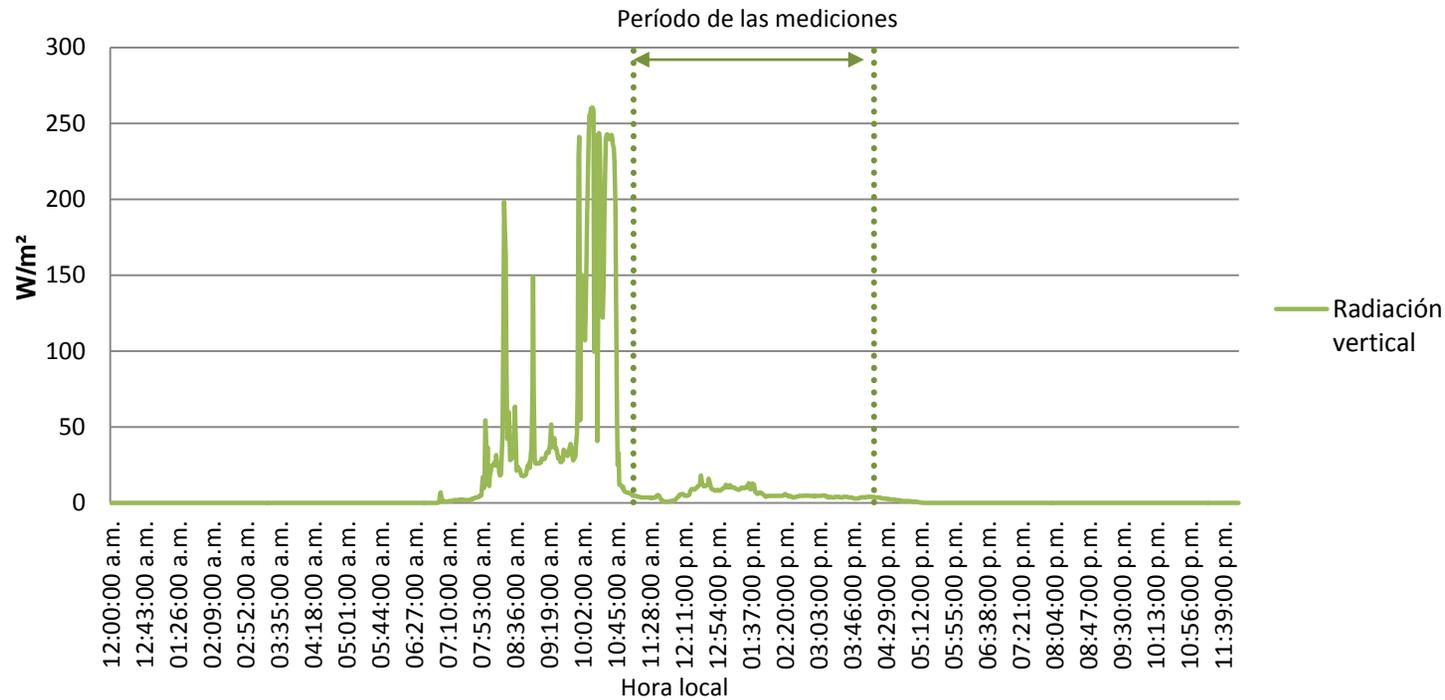
Gráfica 26. Comparación de la temperatura de la masa térmica del bloque de referencia con el bloque que posee el sistema de enfriamiento radiante del día 21-11-14.

En la gráfica 26 se puede observar que la temperatura al interior del bloque hidrónico (T.I.H) mínima se presentó a las 3:38 pm y la temperatura del concreto de referencia al interior a la misma hora fue de 18.38°C, por lo que la diferencia fue de **3.9°C**. La temperatura al interior del bloque de referencia (T.I.R) más baja fue la temperatura de inicio a las 11:30 am, teniendo un incremento en el transcurso del día hasta llegar a la temperatura máxima registrada de 18.4°C. En la gráfica también se muestra que la temperatura del interior del bloque de referencia (T.I.R) va aumentando, caso contrario al bloque con el sistema hidrónico donde la temperatura interior disminuye hasta llegar a la temperatura mínima registrada.



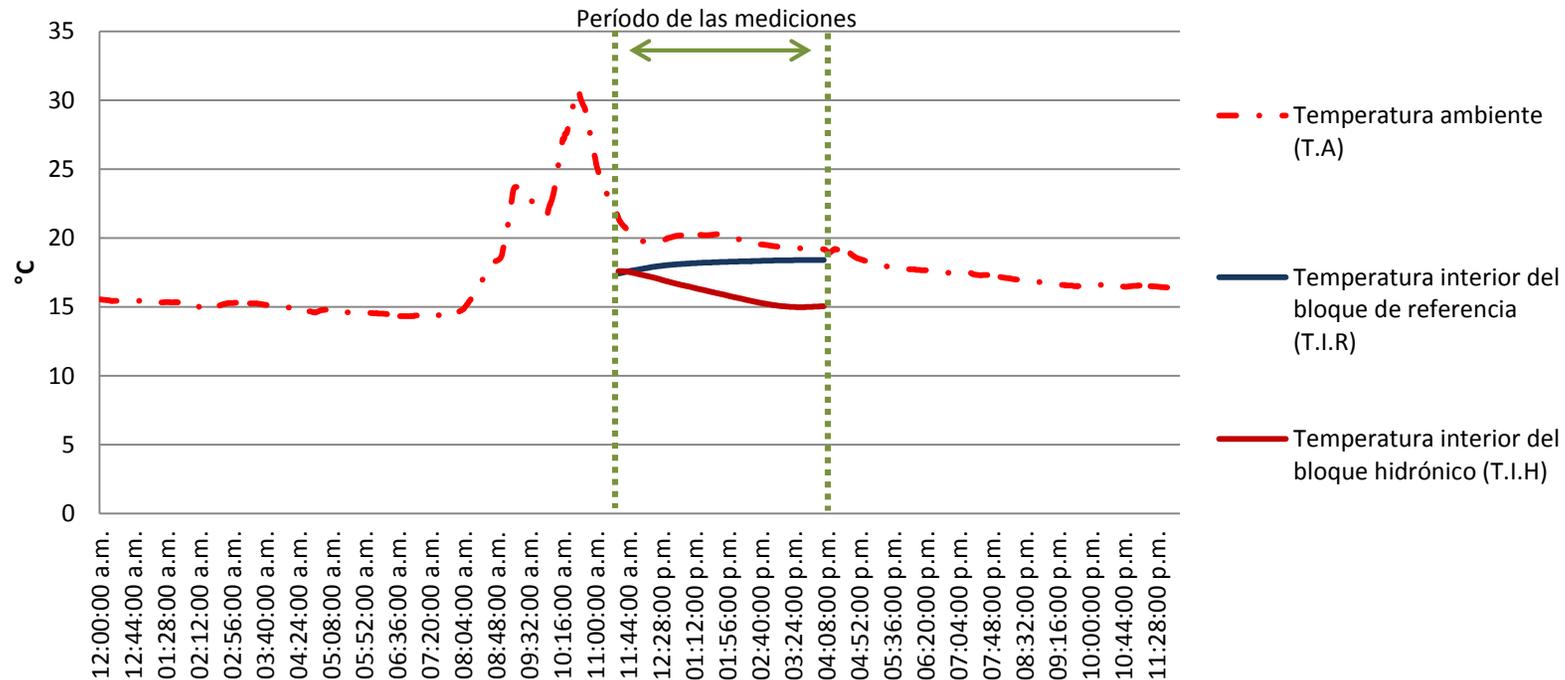
Gráfica 27. Temperatura, Humedad Relativa y Temperatura de punto de rocío en el laboratorio el día 21 de noviembre del 2014.

En la gráfica 27 se muestra el comportamiento de la temperatura ambiente (T.A), la humedad relativa (H.R) y la temperatura del punto de rocío (T.P.R) al interior del laboratorio, donde se realizó el experimento. La temperatura del punto de rocío (T.P.R) es la principal limitante del sistema debido a que la temperatura del agua de entrada (T.E.A) al sistema no debe ser menor para evitar la condensación. El día 21 de noviembre del 2014 la T.A osciló entre los 19.17°C y los 21.46 °C, siendo estos los valores mínimos y máximos durante el período que se realizaron las mediciones.



Gráfica 28. Radiación vertical dentro del espacio que incide en los bloques de concreto en la ventana.

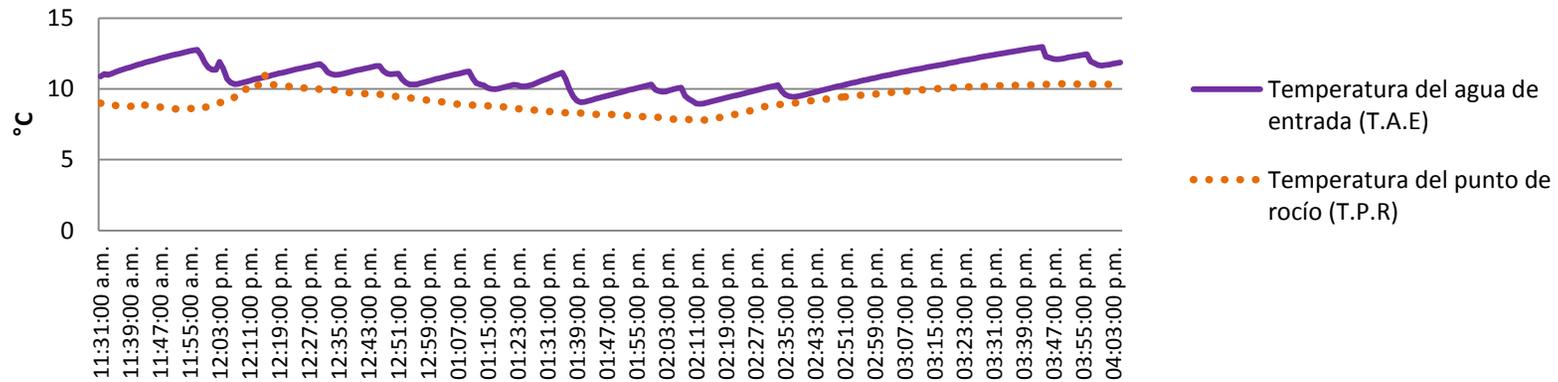
En la gráfica 28 se presenta la radiación vertical que incidió en los bloques a través de la ventana. Se observa que entre las 7:30 am y las 11:00 am se posee la mayor cantidad de radiación solar, esto se debe a que la ventana del laboratorio se encuentra localizada en la fachada este. Durante las horas en las que el sistema de enfriamiento hidráulico se pone a funcionar, la radiación vertical es mínima, teniendo un rango entre los 18.09 W/m² y los 0.78 W/m².



Gráfica 29. Comparación temperatura ambiente con la temperatura al interior de los bloques el 21 de noviembre del 2014.

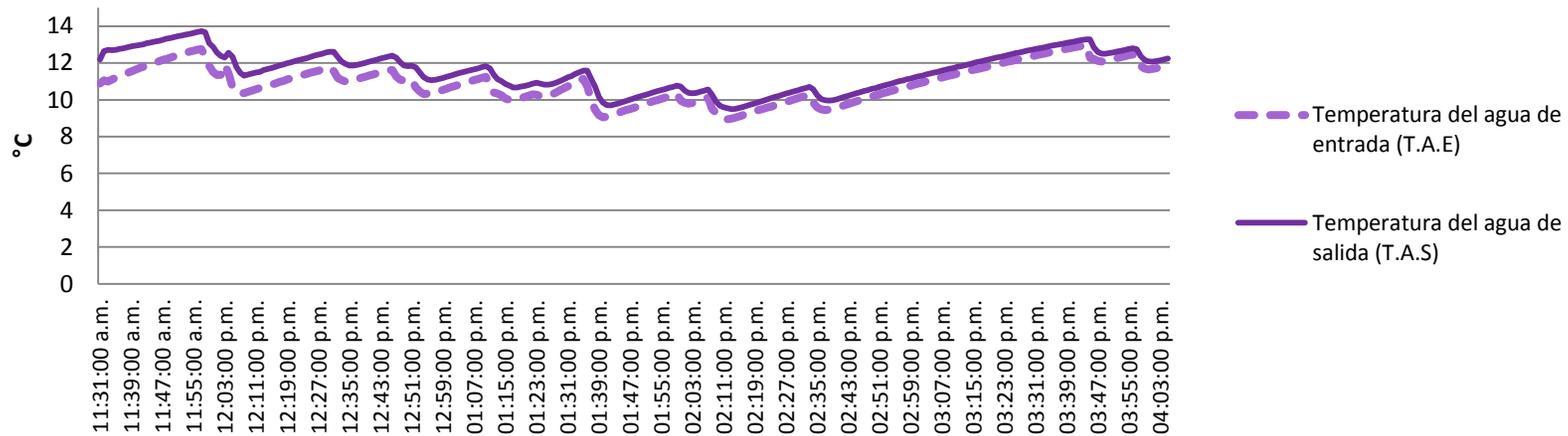
En la gráfica 29 se realiza una comparación de la T.I.R, la T.I.H con la T.A, con el fin de analizar la relación entre la temperatura ambiente con la temperatura de la masa térmica del concreto al interior. Se observa que en el período en el que se realizan las mediciones, la Temperatura al interior de ambos bloques no sobrepasan la T.A, la T.I.R al finalizar las mediciones se va incrementando presentando una diferencia de 0.775°C a las 4:05 pm con respecto a la T.A. También se observa que cuando disminuye la T.A, la T.I.R se incrementa, esto se debe al tiempo que tarda el material en desprender la temperatura almacenada en las primeras horas de la mañana, cuando la temperatura se encontraba más elevada y cuando se tuvo una mayor radiación solar vertical a través de la ventana, como se puede observar en la gráfica 28.

En la gráfica también se presenta que la diferencia con la T.A y la T.I.H es de 4.12°C al finalizar las mediciones a las 4:05 pm; siendo esta diferencia de temperatura por el sistema de enfriamiento hidrónico.



Gráfica 30. Temperatura del agua de entrada comparada con la temperatura del punto de rocío el 21 de noviembre del 2014.

En la gráfica 30 se presenta la comparación de la T.P.R y la T.A.E entre las 11:30 am y las 4:00 pm, se puede observar que la T.P.R osciló entre los 7.79°C y los 11.09°C, con un promedio de 9.23°C. La T.A.E al sistema se enfrió por medio de un proceso manual, por lo que la temperatura se mantuvo en un monitoreo constante, bajando la temperatura constantemente para mantenerla con una diferencia de 1 a 2 °C aproximadamente. En la gráfica 27 se puede observar que la T.P.R disminuye cuando se tiene un porcentaje de humedad relativa baja y cuando la temperatura es también baja, por lo que se tiene mayor posibilidad de disminuir la temperatura del agua y presentar una mayor diferencia entre la temperatura de la masa térmica del concreto.



Gráfica 31. Comparación de la temperatura del agua de entrada al bloque y la de salida el 21 de noviembre del 2014.

En la gráfica 31 se muestra la T.A.E con respecto al T.A.S, presentando una diferencia de temperatura promedio de 0.655°C ; lo que indica que se pierde un porcentaje de temperatura en el recorrido de 2.8 metros de longitud que posee la tubería y del calor que absorbe el agua de la masa térmica del concreto.

En la imagen 55 se muestran fotografías térmicas de los prototipos de concreto. En el bloque A, se puede observar el flujo del agua fría en el interior del bloque y cómo pierde temperatura el agua cuando sale del circuito. Al mismo tiempo en las esquinas no se alcanza a enfriar debido a que se posee una mayor distancia con el recorrido de la tubería. En las imágenes se obtiene la temperatura de la superficie de los bloques, en el bloque A la temperatura a las 3:56 pm fue de 15.8°C ; mientras que el bloque B la temperatura fue de 17.7°C , presentando una diferencia de 1.9° . Esto muestra que en el interior se tiene una diferencia de 3.9°C y en el exterior una diferencia de 1.9°C , por lo que se tiene una variación de 2°C entre la temperatura de la superficie y la del centro del bloque.

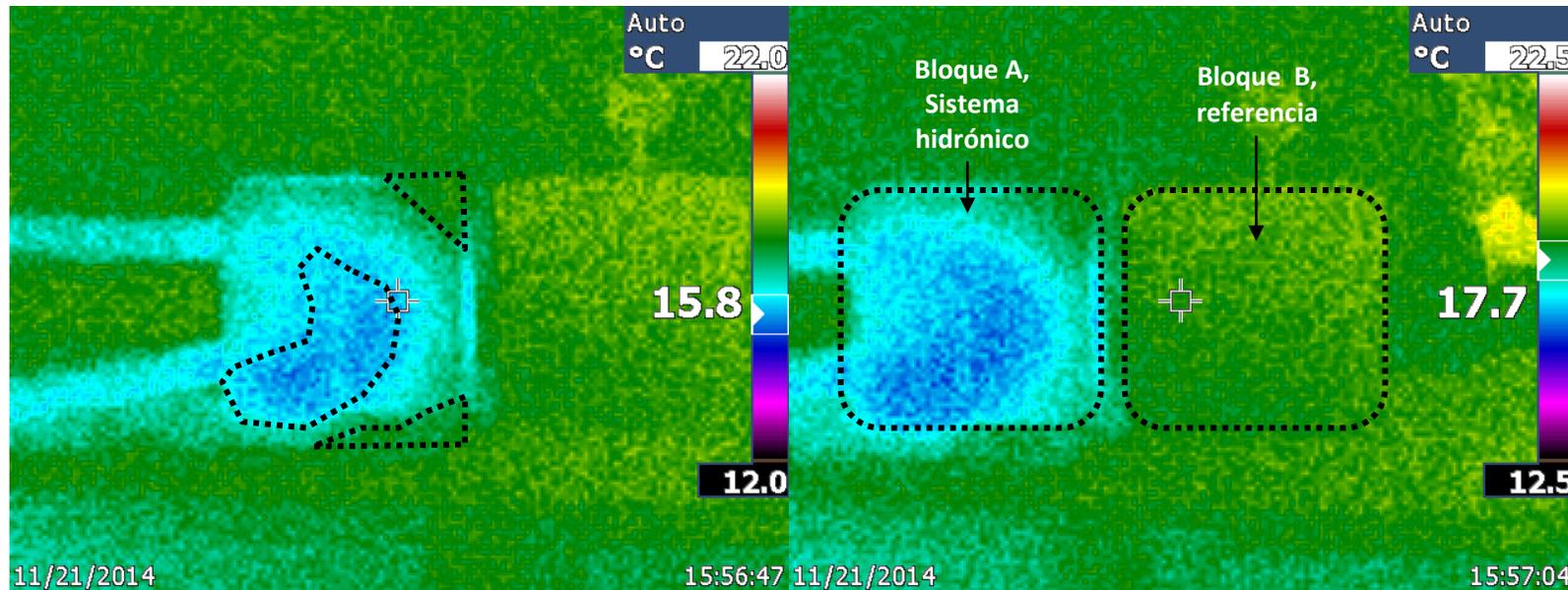


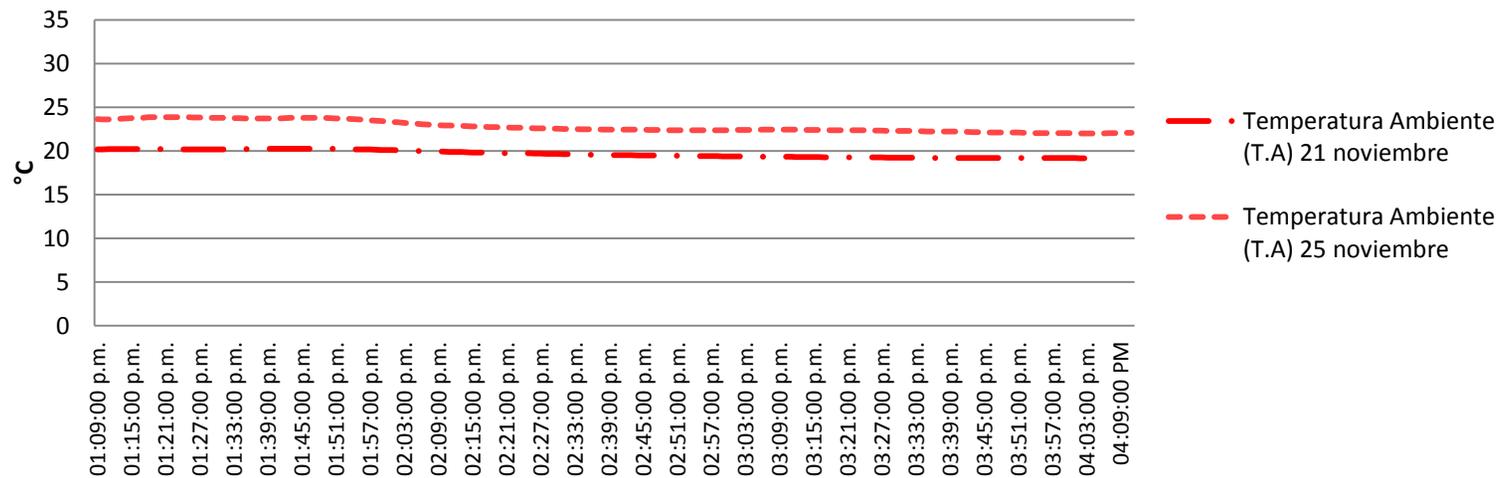
Imagen 55. Imágenes térmicas de los bloques de concreto a las 3:56 pm. Fuente: Autoría propia, 2014.

Posteriormente se realizaron mediciones el día **25 de noviembre del 2014**, debido a que las condiciones climáticas ambientes fueron diferentes a las del día 21 de noviembre, con el fin de analizar cómo afectan estas condiciones al funcionamiento del sistema; mostrando los resultados en la siguiente tabla. Las mediciones se realizaron entre la 1:09 pm y las 4:09 pm.

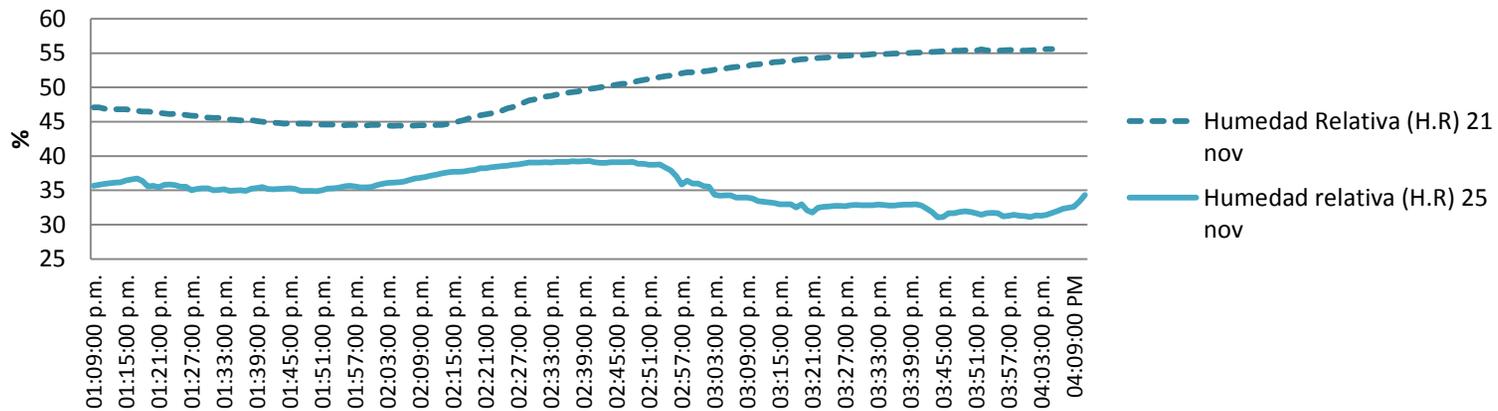
Tabla 16. Resultados promedio, mínimo y máximo durante el período de las mediciones el día 25-11-14.

	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura Punto de rocío (°C)	Temperatura interior Bloque hidrónico (°C)	Temperatura interior Bloque referencia (°C)	Temperatura agua entrada (°C)	Temperatura agua salida (°C)
Mínimo	21.99	31.07	4.44	15.96	19.29	7.94	8.42
Máximo	23.88	39.30	8.47	19.72	20.13	11.46	11.70
Promedio	22.80	35.21	6.91	17.49	19.84	9.18	9.65

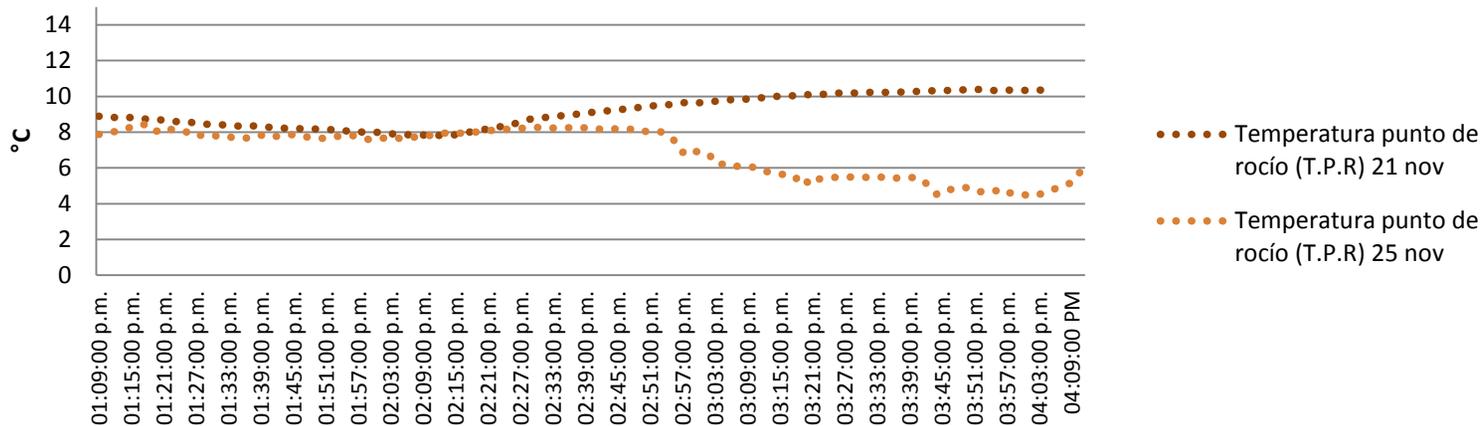
En la tabla 16 se puede observar que la temperatura mínima, máximas y promedio de las variables que se registraron. La Temperatura al interior del bloque hidrónico (T.I.H) mínima se presentó a las 4:11 pm, siendo la hora que se finalizan las mediciones. La Temperatura al interior del bloque de referencia (T.I.R) a la misma hora fue de 20.13°C, siendo esta la temperatura máxima, por lo que se tiene una diferencia entre ambos bloques de **4.17 °C**. Se puede observar que la diferencia de temperatura al interior entre ambos bloques es mayor la del 25 de noviembre comparado con las mediciones del 21 de noviembre (de 3.9°C), ver gráfica 35. El incremento de la diferencia de temperatura se debe a que las condiciones ambientes son diferentes, durante el día 25 de noviembre se tiene una mayor temperatura ambiente que el día 21, pero el porcentaje de humedad relativa y la temperatura del punto de rocío el día 25 son menores (ver gráficas 32, 33 y 34). Al tener una temperatura del punto de rocío (T.P.R) menor se tiene un mayor porcentaje para poder disminuir la temperatura del agua de entrada (T.A.E) y tener una mayor diferencia de temperatura al interior de la masa térmica del concreto.



Gráfica 32. Comparación de la temperatura ambiente de los días 21 y 25 de noviembre del 2014.

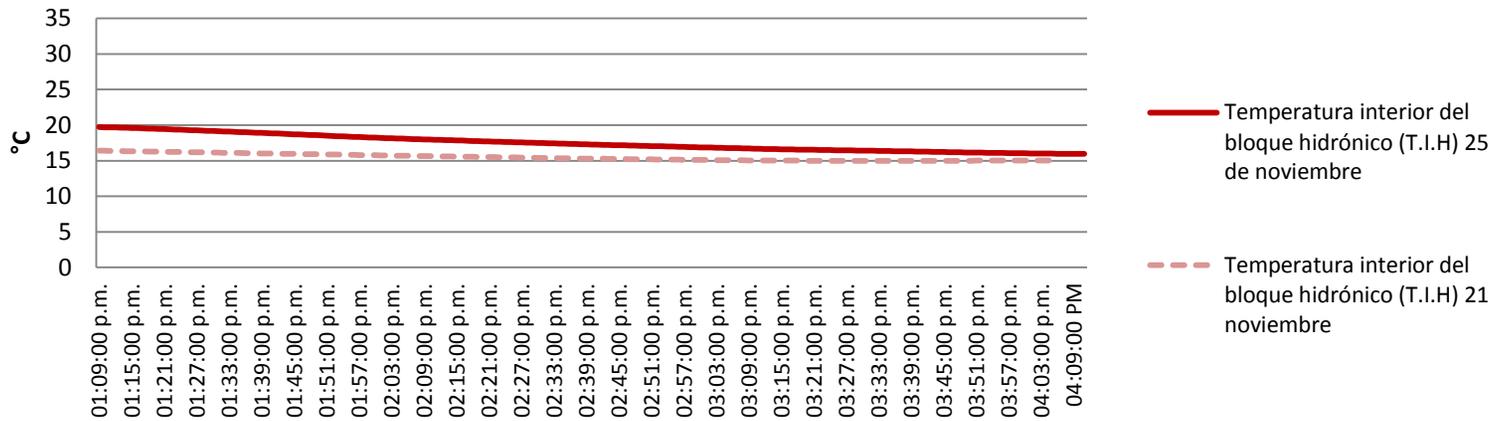


Gráfica 33. Comparación de la humedad relativa el 21 y 25 de noviembre del 2014.



Gráfica 34. Comparación de la temperatura del punto de rocío el 21 y 25 de noviembre del 2014.

En la gráfica 34 se muestra la T.P.R del 21 y 25 de noviembre del 2014; el rango de la T.P.R del día 21 se encontró entre los 7.79°C y los 11.09°C, con promedio de 9.23°C; en cambio el día 25 osciló entre los 4.44°C y los 8.47°C, con promedio de 6.91°C. Se observa que la T.P.R en ambos días es similar hasta las 2:20 pm aproximadamente, la T.P.R del día 21 se incrementa, lo cual se debe al incremento de H.R; caso contrario el día 25, donde decrece debido a que la H.R decrece (ver gráfica 33).



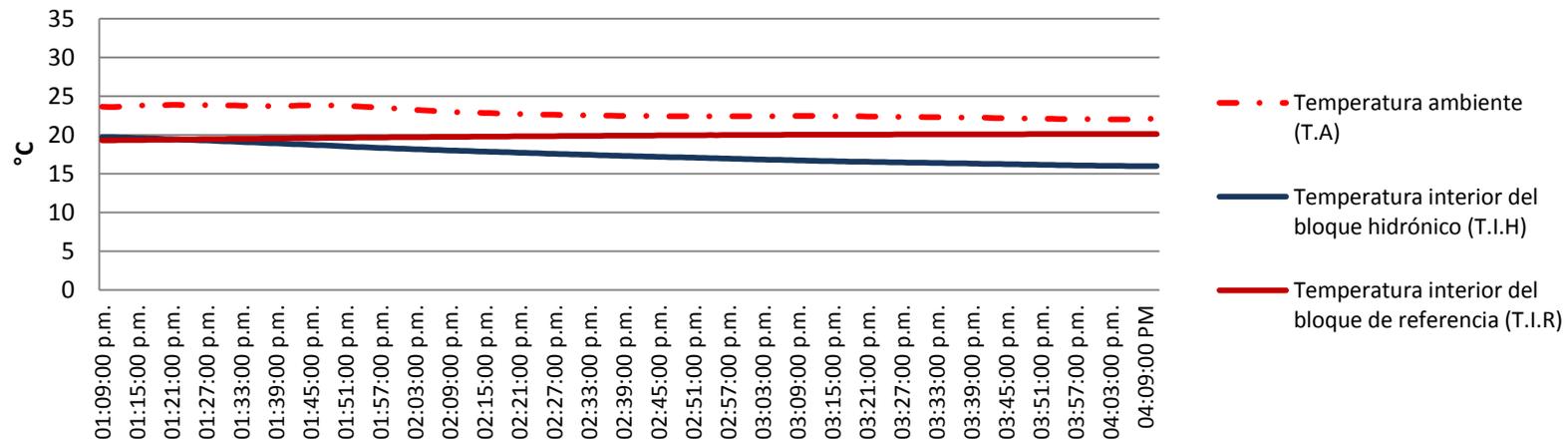
Gráfica 35. Comparación de la temperatura de la masa térmica del bloque radiante el 21 y 25 de noviembre.

En la gráfica 35 se observa que el bloque hidrónico en el día 25 de noviembre, la T.I.H disminuyó en un tiempo más corto que en el del día 21 de noviembre. La T.I.R y la T.I.H del día 25 de noviembre presentó una diferencia de temperatura de 4.17°C en un tiempo de 3 horas, mientras que el día 21 de noviembre la temperatura se disminuye 3.90°C en un tiempo de 4 horas con 45 minutos; por lo que se requirió un menor tiempo para enfriar la masa térmica el día 25 de noviembre. Esto se debe a que se tuvo una menor temperatura del punto de rocío (T.P.R), por lo que la temperatura del agua se pudo enfriar hasta llegar a los 4.44°C, mientras que el 21 de noviembre la temperatura mínima a la que se pudo enfriar el agua fue de 7.19°C.

Tabla 17. Tabla comparativa del 21 y 25 de noviembre del 2014.

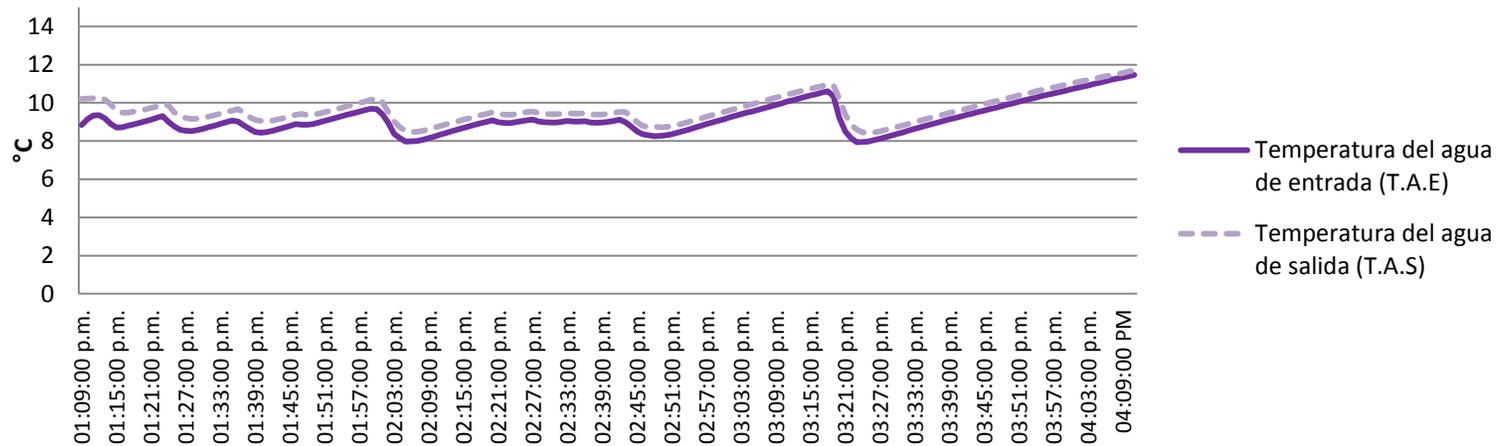
		T.A	H.R (%)	T.P.R (°C)	T.I.R (°C)	T.I.H (°C)	T.A.E (°C)	T.A.S (°C)	Tiempo (Horas)
21/11/2014	Mínimo	19.18	43.82	7.79	17.42	14.98	8.95	9.49	4.50
	Máximo	21.46	56.14	11.09	18.40	17.59	12.97	13.73	
	Promedio	19.84	49.44	9.23	18.16	16.04	10.92	11.57	
25/11/2014	Mínimo	21.99	31.07	4.44	19.29	15.96	7.94	8.42	3.00
	Máximo	23.88	39.30	8.47	20.13	19.72	11.46	11.70	
	Promedio	22.80	35.21	6.91	19.84	17.49	9.18	9.65	

En la tabla 17 se presenta los datos comparativos de ambos días que se mostraron en las gráficas anteriores; se observa que el día 21 de noviembre la T.A fue menor que el día 25 de noviembre; pero el H.R y la T.P.R fue mayor el 21 de noviembre, por lo tanto la T.A.E del día 25 de noviembre fue menor lo que generó que se disminuyera en menor tiempo la T.I.H.



Gráfica 36. Comparación de la temperatura de la masa térmica el 25 de noviembre del 2014.

En la gráfica 36 se muestra el comportamiento de la T.I.R y la T.I.H con respecto a la T.A el 25 de noviembre. Este día las mediciones se realizaron de las 1:09 pm hasta las 4:09 pm. En la gráfica se observa que la T.I.R, al finalizar las mediciones, se obtuvo una diferencia de aproximadamente 2°C con respecto a la T.A. La T.I.H presentó una diferencia de 6.13°C con respecto a la T.A, por lo tanto el sistema de enfriamiento hidrónico disminuye la temperatura 4.13°C con respecto al bloque de referencia.



Gráfica 37. Comparación de la temperatura del agua de entrada con el agua de salida del sistema el 25 de noviembre del 2014.

En la gráfica 37, se observa la T.A.E y la T.A.S del bloque con el sistema hidrónico, se presenta una diferencia promedio de temperatura de $0.467\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo estos los grados que absorbe el sistema en el recorrido del agua. El día 21 de noviembre la diferencia promedio fue mayor de $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo tanto este día hubo una mayor transferencia de calor del concreto al agua en un lapso de tiempo mayor que el día 25 de noviembre.

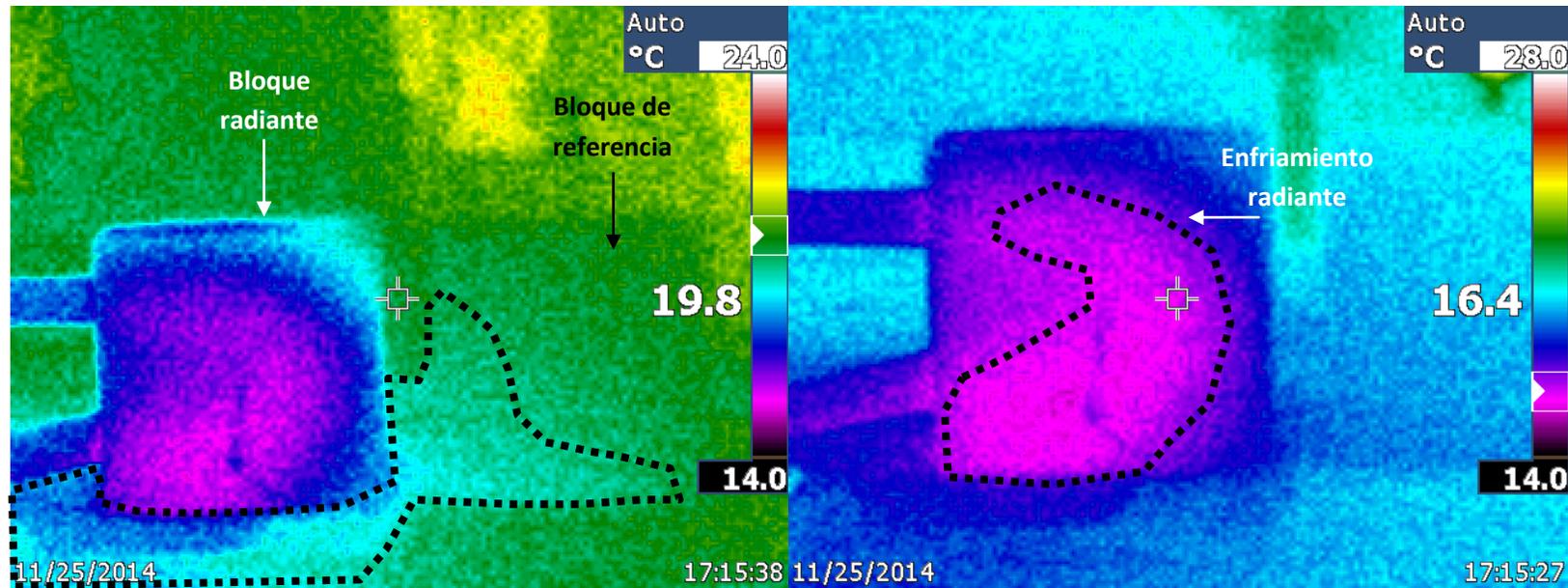
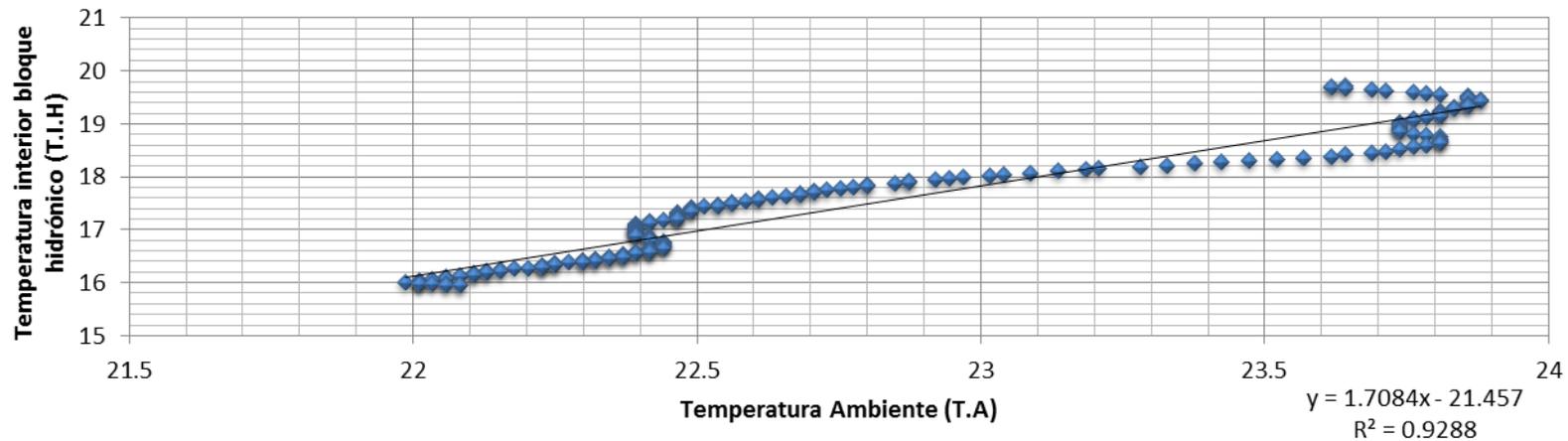
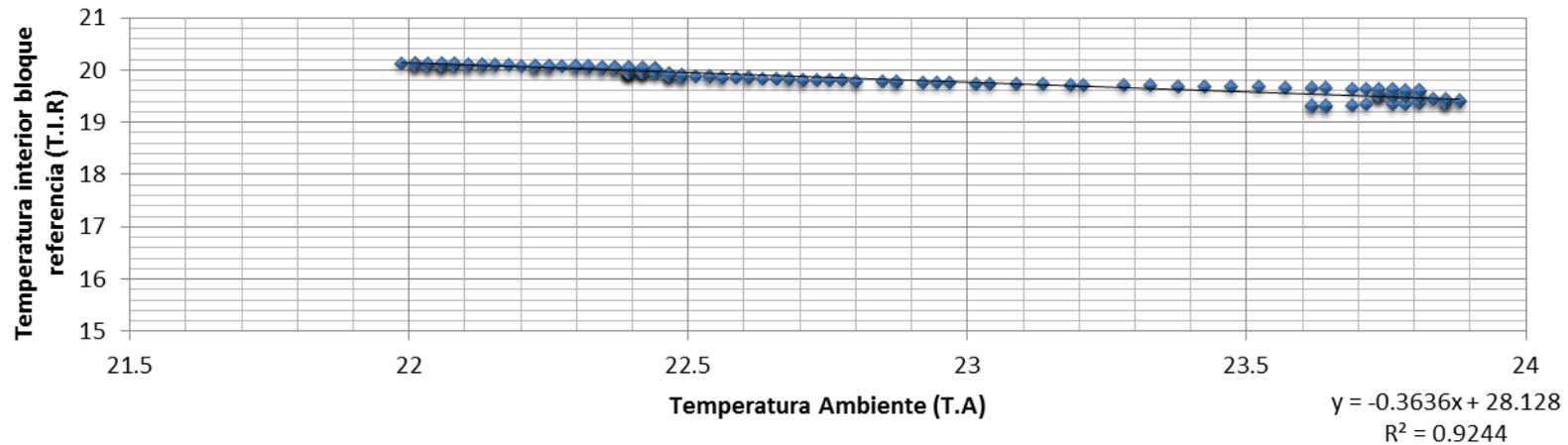


Imagen 56. Comportamiento térmico de la masa térmica de ambos bloques el 25 de noviembre del 2014. Fuente: Autonomía propia.

En la imagen 56 se muestra el comportamiento de la temperatura de la térmica de los bloques, el cual presenta un comportamiento similar a las del 21 de noviembre. Se observa que en el centro inferior del bloque se concentra la temperatura más baja, aumentando la temperatura a medida se acerca a los extremos. Por lo tanto, la temperatura de la masa térmica bloque no es constante en toda la superficie, siendo menor por donde pasa la tubería para la circulación del agua y mayor a medida se va alejando, por lo que la distancia entre la tubería influye en el funcionamiento del sistema. En la imagen también se puede observar que el bloque con el sistema hidrónico no solamente enfría la masa térmica del concreto sino que también disminuye la temperatura del área circundante al bloque, enfriando por medio de radiación la mesa y parte de la masa térmica del bloque de referencia.



Gráfica 38. Correlación entre la temperatura del interior del bloque hidrónico y la temperatura ambiente del día 25 de noviembre del 2014.



Gráfica 39. Correlación entre la temperatura del interior del bloque de referencia y la temperatura ambiente del día 25 de noviembre del 2014.

En la gráfica 38 se presenta la correlación entre la T.I.H con respecto a la T.A, se puede observar que se posee una correlación de 0.928, siendo alta por encontrarse cercano a 1, representando que la T.A tiene una alta influencia en la T.I.H. En la gráfica 39 se muestra la correlación entre la T.I.R con respecto a la T.A, se obtiene una correlación negativa de 0.92 la cual es alta, pero se presenta una línea descendente; esto se debe a que cuando la T.A disminuye, la T.I.R aumenta, debido al retardo de transferencia de calor del concreto

desde la superficie hacia el interior; caso contrario al comportamiento de la gráfica 40, en donde el sistema hidrónico disminuye dicha transferencia absorbiendo un porcentaje de calor del interior del bloque, lo que genera que posee un comportamiento similar a la T.A.

7.2.1.2 Observatorio LIM (azotea edificio J).

Se desarrolla el experimento en la azotea con el objetivo de analizar el sistema afectado por la incidencia de la radiación solar. El flujo del agua que se utilizó en las mediciones realizadas en el laboratorio fue de 1 litros por minuto, por lo que se empleó una válvula reguladora del flujo para disminuir el flujo que trae la bomba. En la imagen 56 se muestra la instalación del experimento en la azotea, se colocan los bloques de forma horizontal debido a la incidencia de la radiación solar. Las mediciones se realizaron durante seis días: 24 y 25 de enero del 2015; 02, 03, 05 Y 06 de marzo del 2015. Para el análisis se escogen los días 02 y 06 de marzo, el día 02 de marzo se presentó la diferencia máxima de temperatura al interior de ambos bloques y el 06 de marzo se realizaron mediciones de la temperatura en la superficie superior e inferior de ambos bloques para poder realizar una comparación con la temperatura interior.

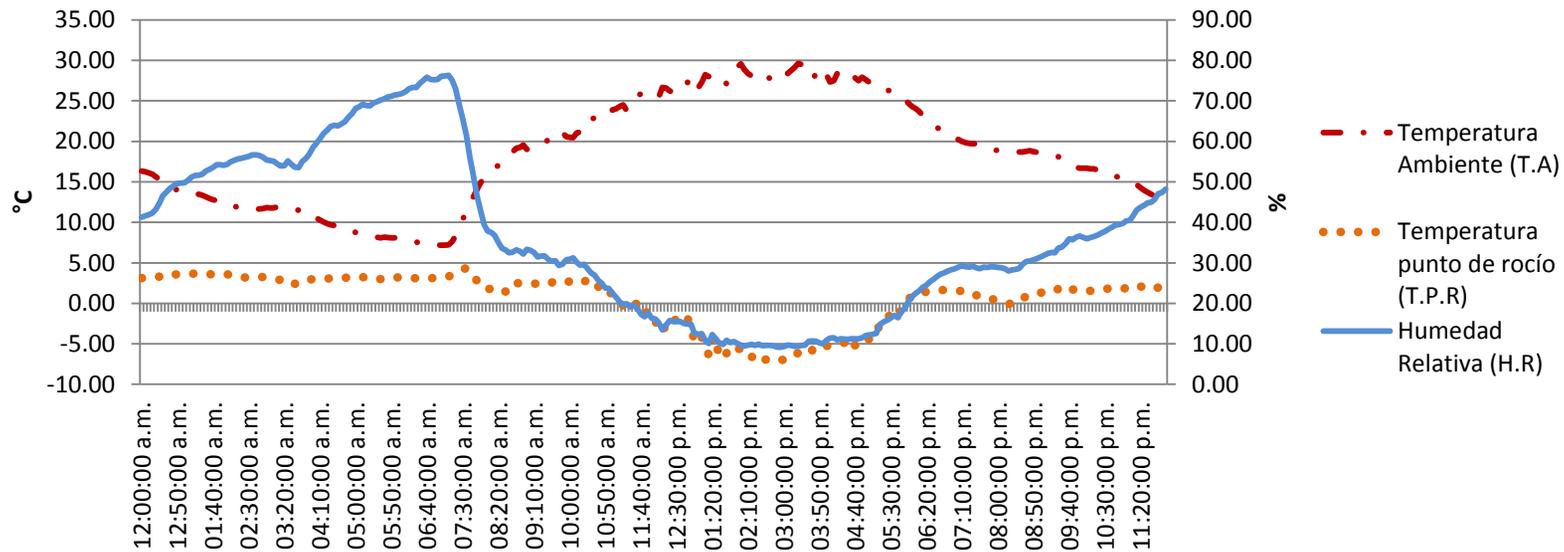


Imagen 57. Imágenes del experimento en la azotea. Fuente: Autonomía propia, 2015.

Tabla 18. Resultados de las pruebas realizadas el 02 de marzo del 2015.

	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura Punto de rocío (°C)	Temperatura interior Bloque referencia	Temperatura interior Bloque hidrónico	Temperatura agua entrada (°C)	Temperatura agua salida (°C)
Mínimo	7.20	9.16	-7.14	16.81	15.70	2.04	3.26
Máximo	29.60	76.28	4.36	32.84	23.92	15.68	18.73
Promedio	18.62	36.01	0.54	27.05	20.85	4.22	5.33

El día **02 de marzo del 2015** se realizan mediciones desde las 10:25 am hasta las 6:00 pm. En la tabla 18 se muestran los valores máximos, mínimos y promedios. Los valores de la Temperatura al interior de los bloques y del agua fue entre las 10:25 am y las 6:00 pm (período que se realizaron las mediciones) y los valores de la Temperatura ambiente (T.A), Humedad relativa (H.R) y Temperatura de punto de rocío (T.P.R) son de las 24 horas de dicho día.

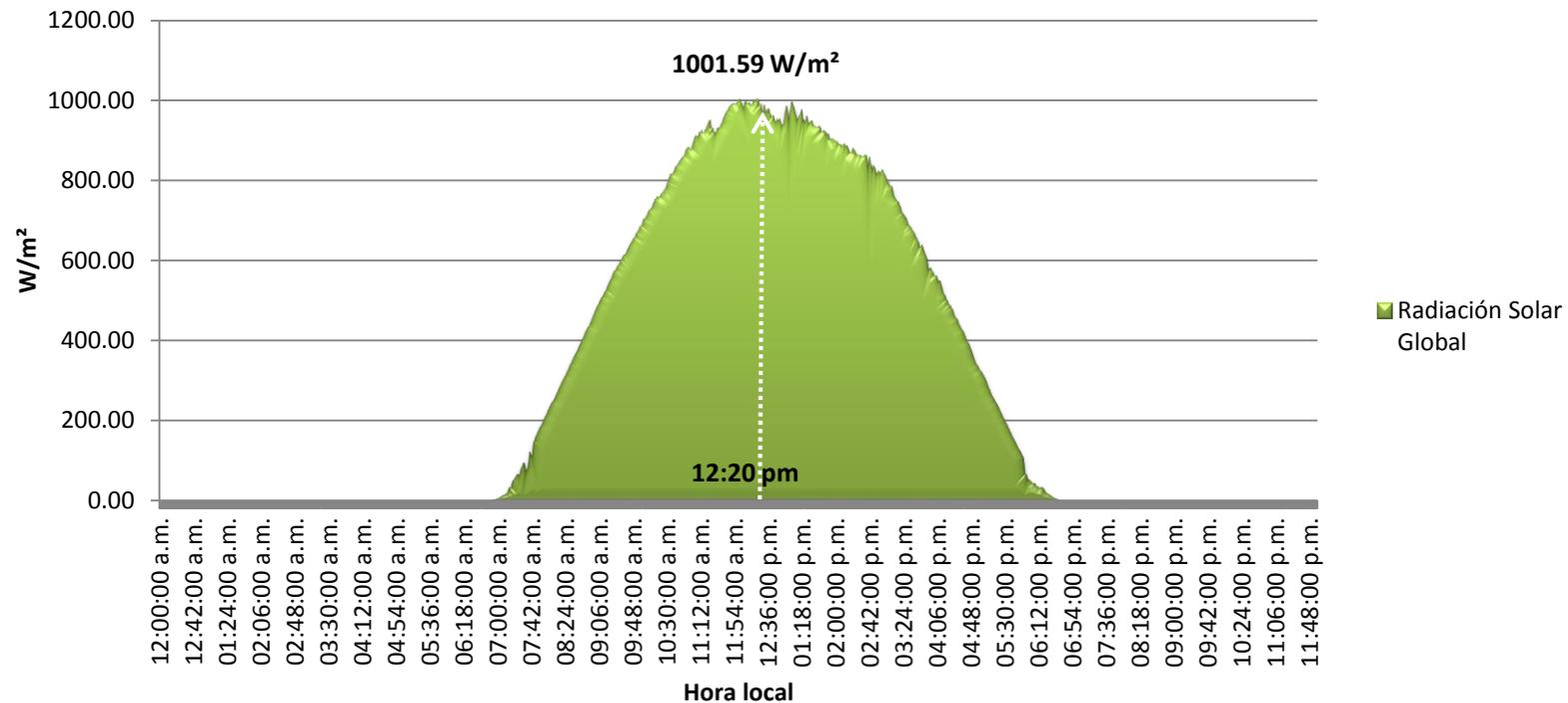


Gráfica 40. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el día 02 de marzo del 2015. Fuente: Estación meteorológica de Geofísica.

UNAM



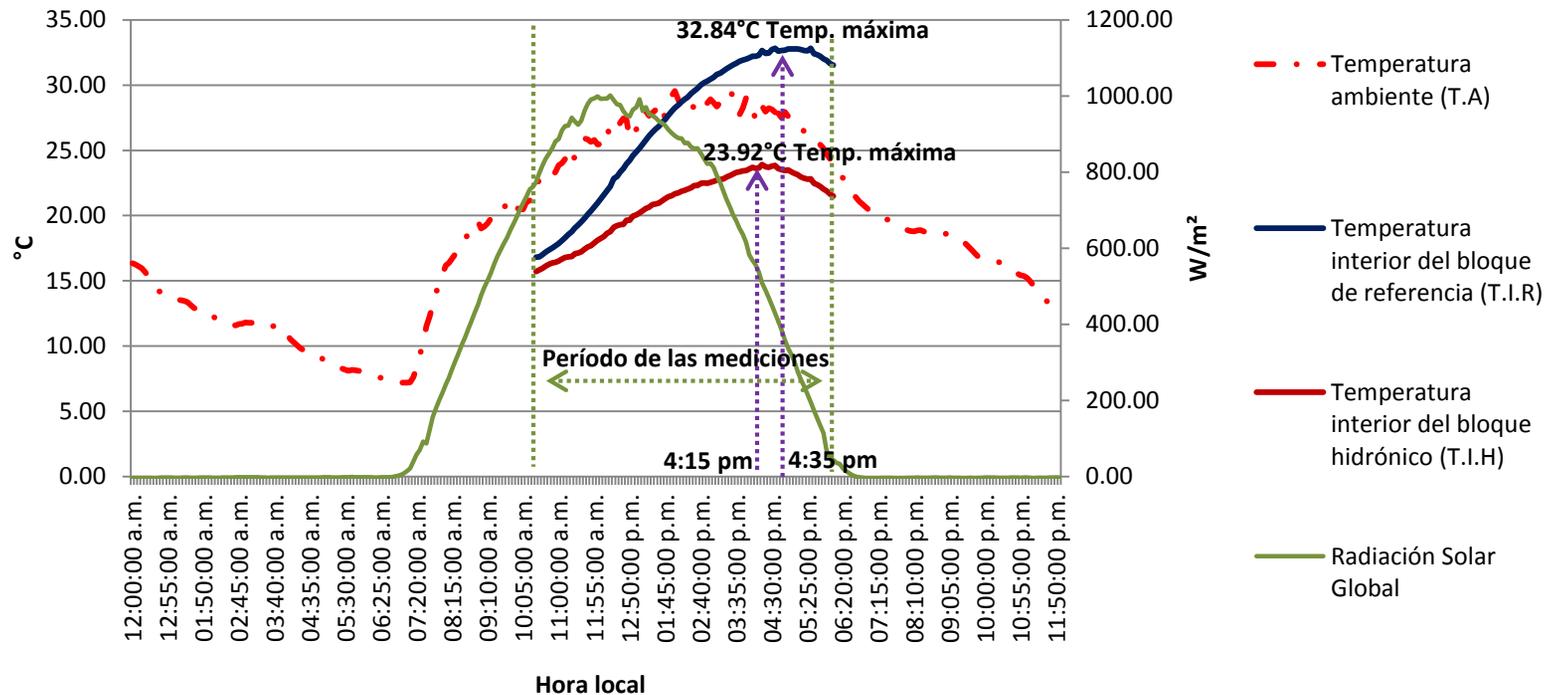
En la gráfica 40 se presenta las condiciones climatológicas, las cuales se obtuvieron de la estación meteorológica localizada en el Instituto de Geofísica de la UNAM. En la gráfica se muestra que la T.A osciló entre los 7.20°C y los 29.60°C, con promedio de 18.62°C; la H.R se encontró entre los 9.16% y los 76.28%, con promedio de 36.01%; y la T.P.R fue entre los -7.14°C y los 4.36°C, con promedio de 0.54°C. Durante los días que se realizaron las mediciones, el 02 de marzo fue el que presentó una menor T.P.R, por lo que la T.A.E fue de las más bajas, lo que generó que se presentara una mayor diferencia de temperatura al interior de los bloques.



Gráfica 41. Radiación solar el día 02 de marzo del 2015. Fuente: Estación meteorológica de Geofísica UNAM

En la gráfica 41 se presenta la incidencia de radiación solar global que se registró el día 02 de marzo. El mayor nivel de radiación solar registrado fue de 1001.59 W/m² a las 12:20pm hora local. De la página de internet NOAA: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division de Estados Unidos; se calcula la hora en la que el sol se encuentra en el cenit con el NOAA Solar Calculator, para este día fue a las 12:48 pm.

La energía total que recibieron los bloques durante este día fue de 24,722.86 KJ/seg; siendo este día el que se registra con mayor energía durante los días que se realizaron las mediciones.

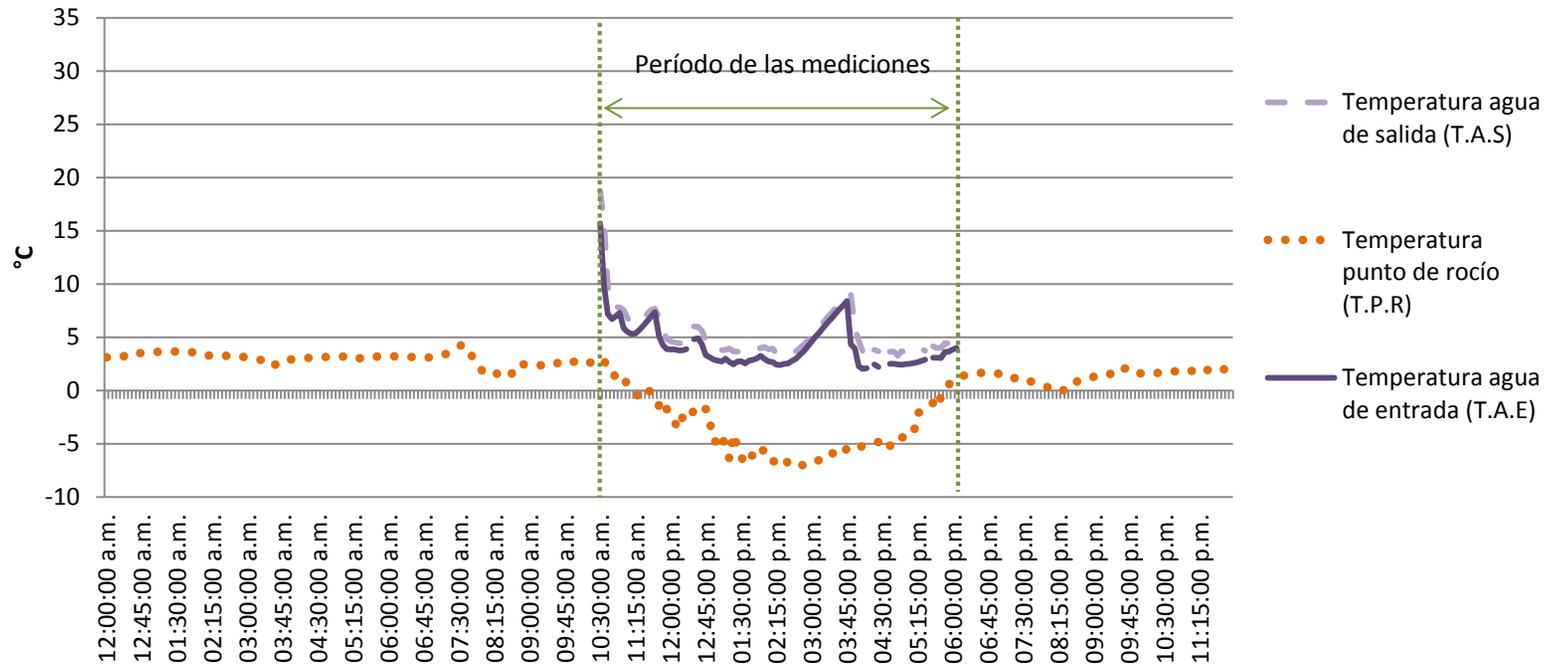


Gráfica 42. Comparación de la temperatura del interior de los bloques con la temperatura ambiente y la radiación solar el 02 de marzo del 2015.

La T.I.H mínima que se registró en el bloque con el sistema hidrónico fue de 15.70°C, el cual se presentó al iniciar las mediciones a las 10:25 am. La T.I.R a esta hora fue de 16.80°C, presentando una diferencia entre ambos bloques de 1.1°C. Al finalizar las mediciones, a las 18:00 horas, la T.I.R es de 31.53°C y la T.I.H es de 21.5°C, con una diferencia de **10.03°C**; siendo este día el que mayor diferencia presentó la temperatura del interior de ambos bloques. En la gráfica 42 se presenta la temperatura del interior de los bloques, se observa que la T.I.R máxima se registra a las 4:35 pm con 32.84°C y la T.I.H se registra a las 4:15 pm con 23.92°C; teniendo una diferencia de 20 minutos entre cada uno. En el bloque de referencia se obtuvo un retardo de 2 horas con 54 minutos de tiempo entre la cantidad máxima de calor que recibió la superficie por la radiación solar hasta llegar al interior del bloque de concreto. Cuando se presenta la T.I.R



máxima, la T.A es de 27.92°C presentando una diferencia de 4.92°C. La T.I.H máxima se registra de 23.92°C a las 4:15 pm presentando un retardo de calor de 2 horas con 34 minutos, la T.A de 28.90°C por lo tanto se tiene una diferencia de 4.98°C.



Gráfica 43. Comparación de temperatura del agua de entrada con el de salida el 02 de marzo del 2015.

En la gráfica 43 se presenta la comparación de la T.A.E con respecto a la T.A.S, se presenta una diferencia de la temperatura promedio de 1.1°C, siendo estos los grados en promedio en que el agua durante el recorrido absorbe el calor del concreto en el interior. Debido a que el enfriamiento del agua se realizó de manera manual, la T.A.S y T.A.E presentan incrementos y descensos de temperatura en las gráficas, esto se debe a que no es constante con la T.P.R por el período en el que se enfriaba el agua.

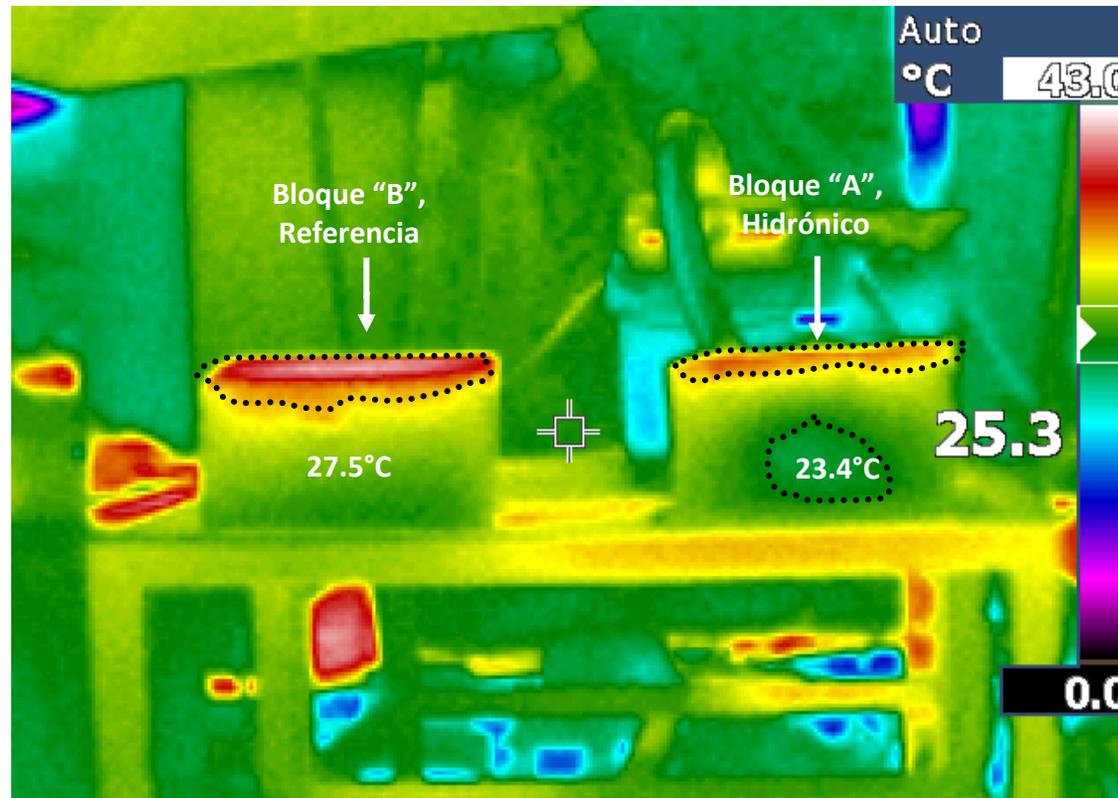
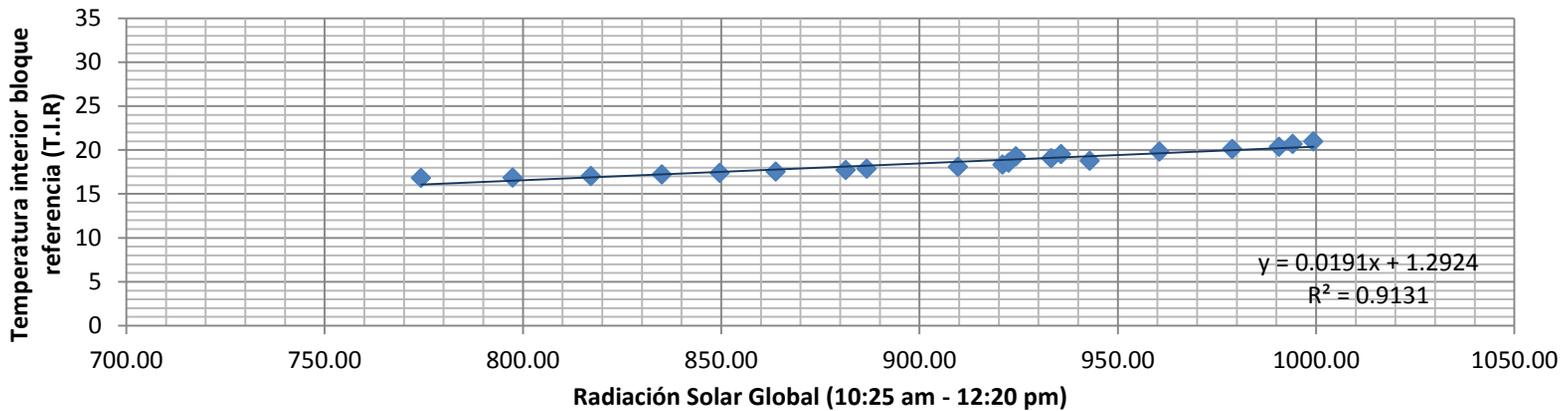


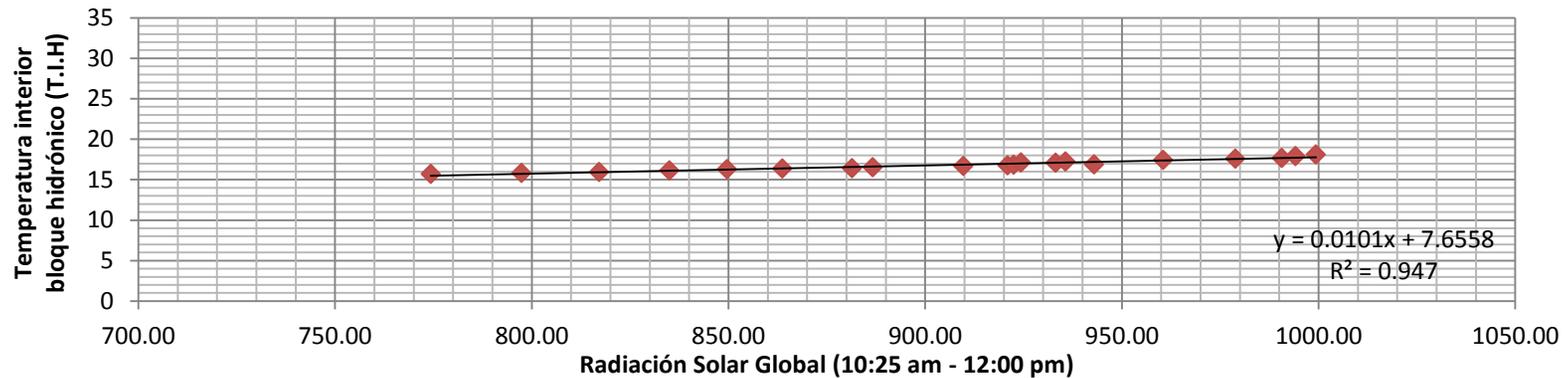
Imagen 58. Imágenes térmicas de los bloques el día 02 de marzo del 2015 a las 2:10 pm. Fuente: Autoría propia.

En la imagen 58, se muestra la imagen térmica de los bloques, donde se observa que en el interior del bloque "A" se encuentra con menor temperatura que en el bloque "B". También se presenta una diferencia de 4.1°C entre la cara norte de ambos bloques, siendo en el bloque "A" la temperatura más baja de 23.4°C. Esto se debe a que en el sistema hidrónico absorbe parte del calor adquirido por la radiación solar, lo cual se puede observar en la imagen superior izquierda, donde el área marcada en rojo (representando la superficie más caliente) del bloque "B" es mayor que la del bloque "A".

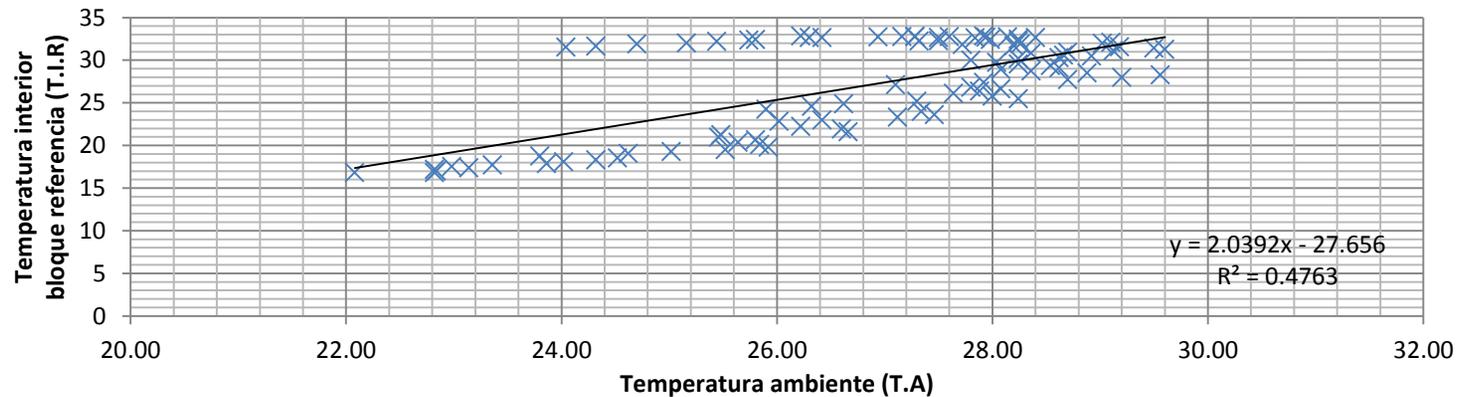


Gráfica 44. Correlación entre la temperatura al interior del bloque de referencia con la radiación solar entre las 10:25 am y las 12:00 pm (máximo nivel de radiación).

En la gráfica 44 se presenta la correlación de la T.I.R con la radiación solar. Para este día el nivel más alto de radiación se presentó a las 12:20 pm, siendo este el límite en la gráfica para la correlación. El coeficiente de correlación es de 0.91, por lo tanto la correlación entre la T.I.R con respecto a la radiación solar es alta por estar cercano a uno. En la gráfica 45 se realiza la correlación de la T.I.H y la radiación solar; el coeficiente de correlación es de 0.94, similar al valor de la gráfica 44, esto se debe a que la T.I.H y la T.I.R aumentan a medida que se incrementan los niveles de la radiación solar.

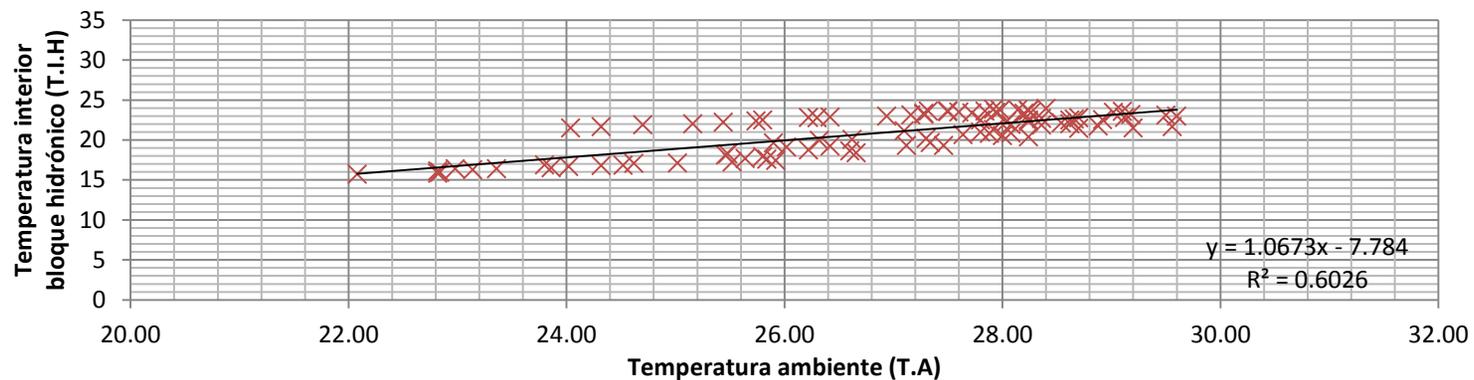


Gráfica 45. Correlación entre la temperatura al interior del bloque con el sistema hidrónico con la radiación solar entre las 10:25 am y las 12:00 pm (máximo nivel de radiación).



Gráfica 46. Correlación con la Temperatura ambiente y la temperatura al interior del bloque de referencia.

En la gráfica 46 se presenta la correlación de la T.I.R con la T.A, el coeficiente de correlación es de 0.47, el cual es bajo; esto se debe a que la T.I.R se va incrementando paulatinamente hasta finalizar las mediciones que empieza a disminuir la temperatura; en cambio la T.A al alcanzar la temperatura máxima disminuye presentando con una diferencia de 3 horas en lo que alcanza la T.I.R su nivel máximo para disminuir la temperatura. En la gráfica 47 se muestra la correlación de la T.I.H con la T.A, el coeficiente de correlación es de 0.60, el cual es relativamente bajo pero más elevado que la correlación con la T.I.R; esto se debe a que el tiempo en el transcurre para que la T.I.H alcance el nivel máximo y posteriormente disminuya es menor con respecto a la T.A, presentando una diferencia de 1 hora entre la T.A máxima y la T.I.H máxima.



Gráfica 47. Correlación con la Temperatura ambiente y la temperatura al interior del bloque con el sistema hidrónico.

En las gráficas de correlaciones, se observa que tanto en el bloque de referencia como el que posee el sistema de enfriamiento hidrónico, la Radiación solar es la variable que mayor posee correlación con la temperatura interna de ambos bloques, siendo en ambos bloques arriba de 0.9. En cambio, con la Temperatura ambiente (T.A) la correlación fue en menor grado; por lo tanto, se demuestra que la radiación solar es la principal variable que incide en el funcionamiento del sistema; por lo tanto, entre mayor son los niveles de radiación que recibe el concreto, mayor es el incremento en la temperatura al interior del bloque.

El día **06 de marzo del 2015** se realizan mediciones desde las 10:30 am hasta las 6:00 pm. En este día se colocó un sensor para medir la temperatura de la superficie inferior del bloque, con el fin de realizar una comparación entre la temperatura que se tiene en la superficie superior (siendo esta la que recibe la radiación solar directa), la temperatura del interior y la temperatura en la superficie inferior del bloque. Para obtener la temperatura en todas las caras de los bloques, se dividen las caras de los bloques en seis partes las superficies laterales: norte, sur, este y oeste; y en nueve partes la superficie superior del bloque. Se realizan mediciones a cada 10 minutos por una hora con el termómetro infrarrojo de FLUKE en cada una de las divisiones, para obtener la temperatura promedio en cada superficie y compararlas con la temperatura de los termistores.

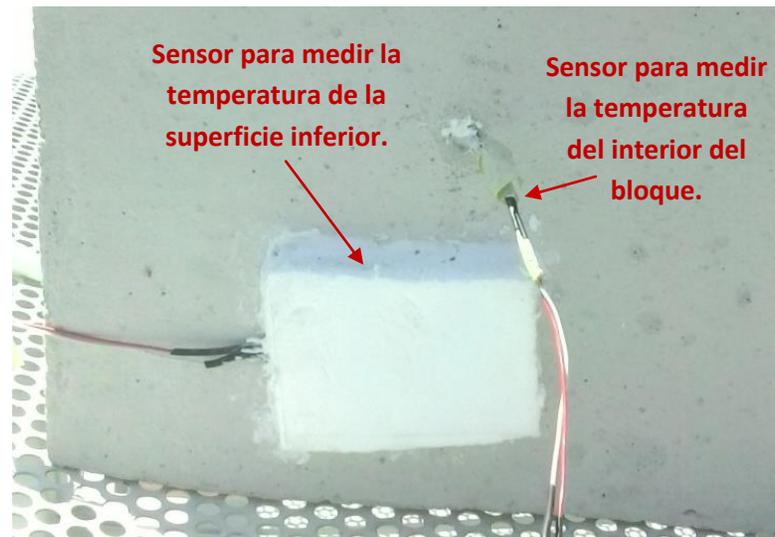


Imagen 59. Ubicación de los sensores en la superficie inferior de los bloques. Fuente: Autoría propia, 2015.

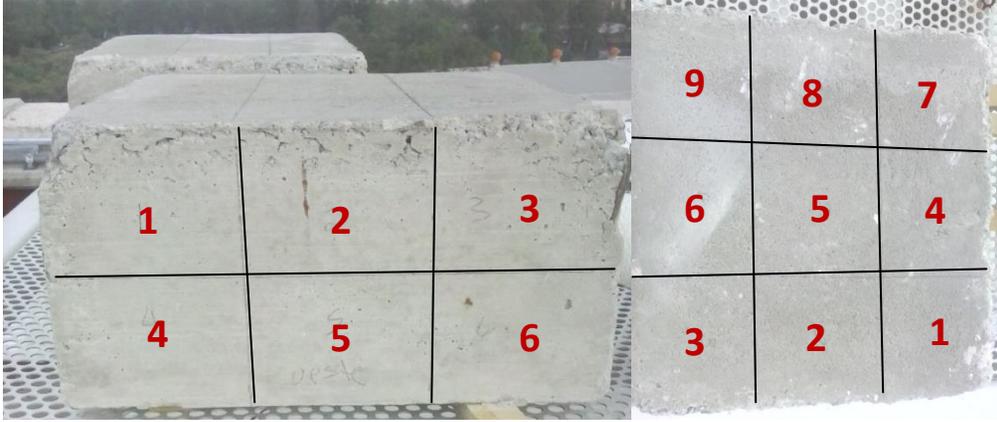


Imagen 60. División de las superficies en todas las caras de los bloques. Fuente: Autoría propia, 2015.

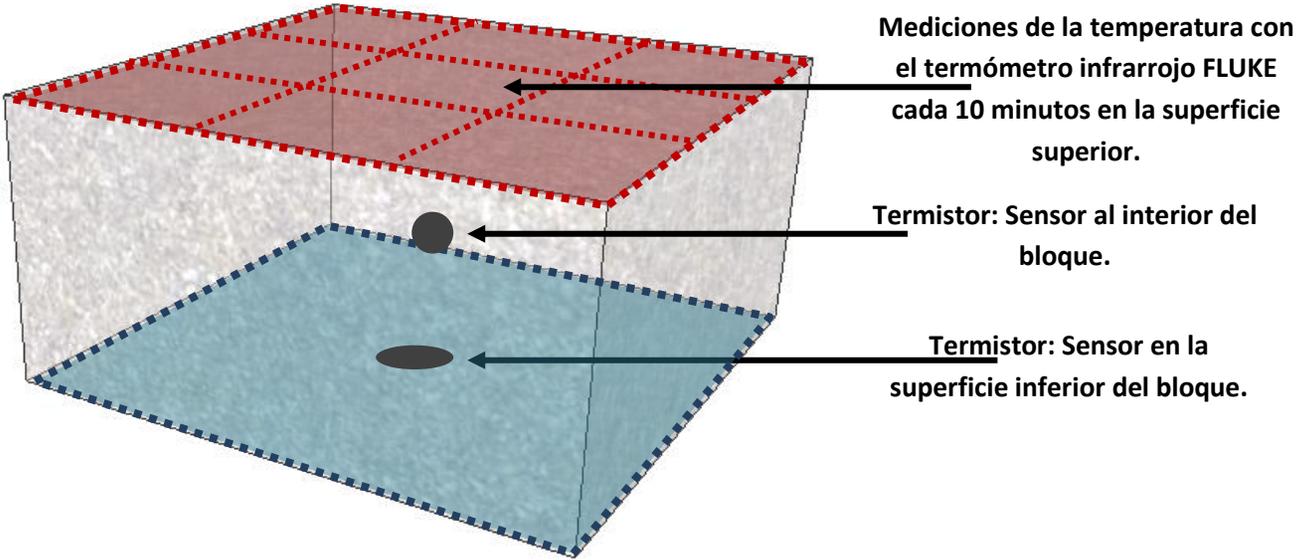
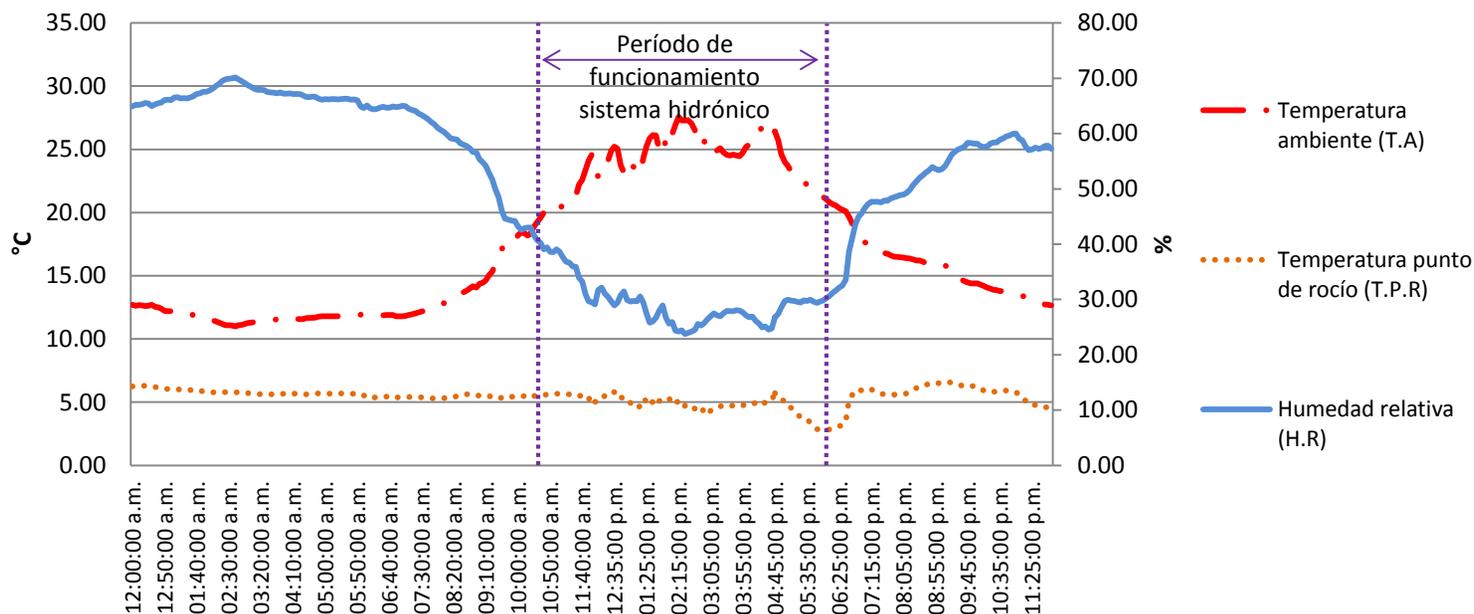


Figura 68. Esquema de la colocación de los sensores en el bloque.

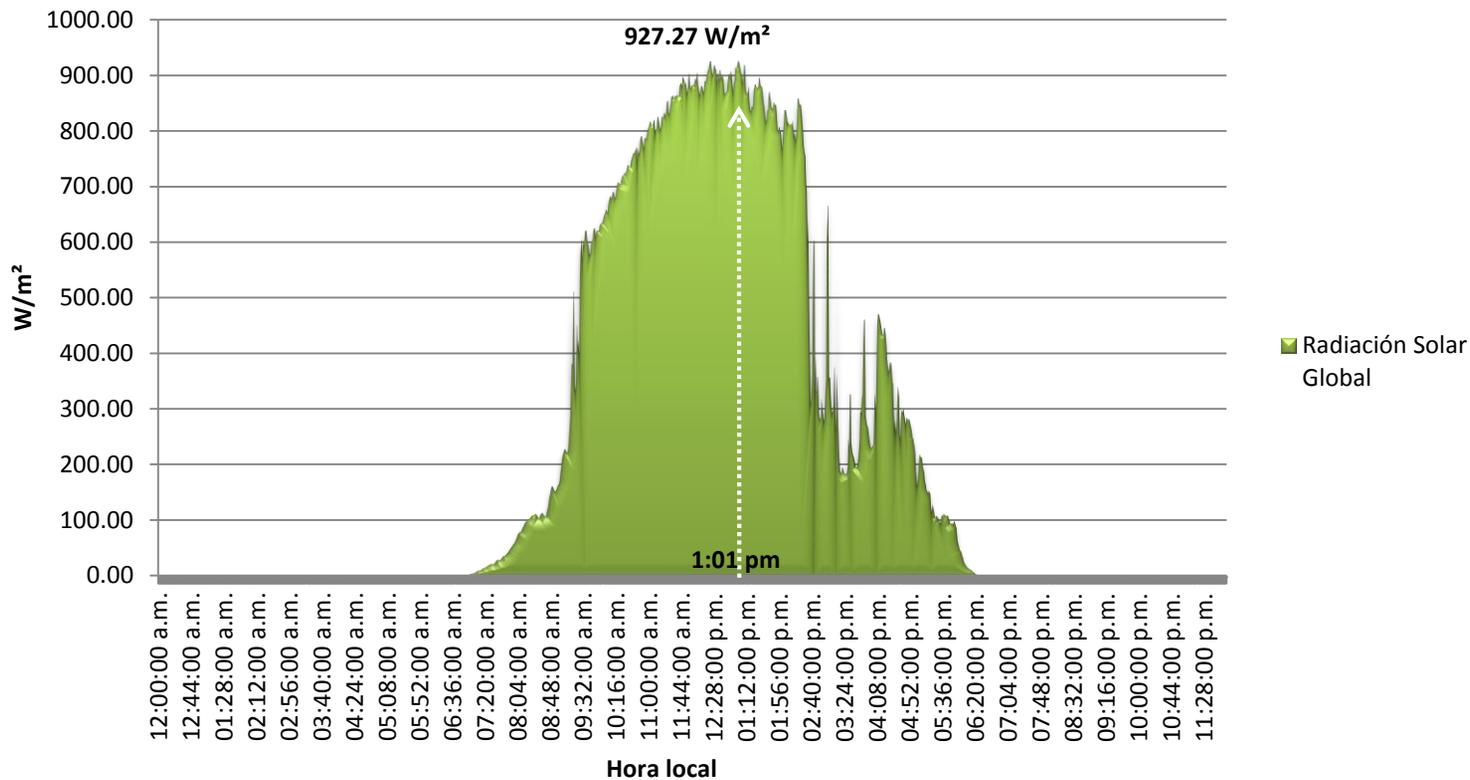
Tabla 19. Resultados de las mediciones realizadas el 06 de marzo del 2015.

	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura Punto de rocío (°C)	Temperatura interior Bloque referencia (°C)	Temperatura Superficie inferior bloque referencia	Temperatura interior Bloque hidráulico (°C)	Temperatura Superficie inferior bloque hidráulico	Temperatura agua entrada (°C)	Temperatura agua salida (°C)
Mínimo	11.00	23.76	2.83	11.662	11.923	11.59	11.849	7.47	8.30
Máximo	27.56	70.16	6.59	28.893	28.803	22.28	23.832	12.69	16.91
Promedio	17.03	49.55	5.40	18.65	18.59	16.26	16.82	10.44	11.25

En la gráfica 48 se muestra la temperatura ambiente T.A, la H.R y la T.P.R que se presentó el día 06 de marzo del 2015. La T.A osciló entre los 11°C y los 27.56°C; la H.R se encontró en un rango entre el 23.76% y el 70.16% y la T.P.R se mantuvo entre los 2.83°C y los 6.59°C. La T.A máxima se registra a las 2:09 pm, con una H.R de 24.18% y con una T.P.R de 5.19°C. En la gráfica se observa que cuando aumenta la T.A, la H.R disminuye. Durante este día, el sistema hidráulico se encontró en funcionamiento de las 10:30 am hasta las 6:00 pm.



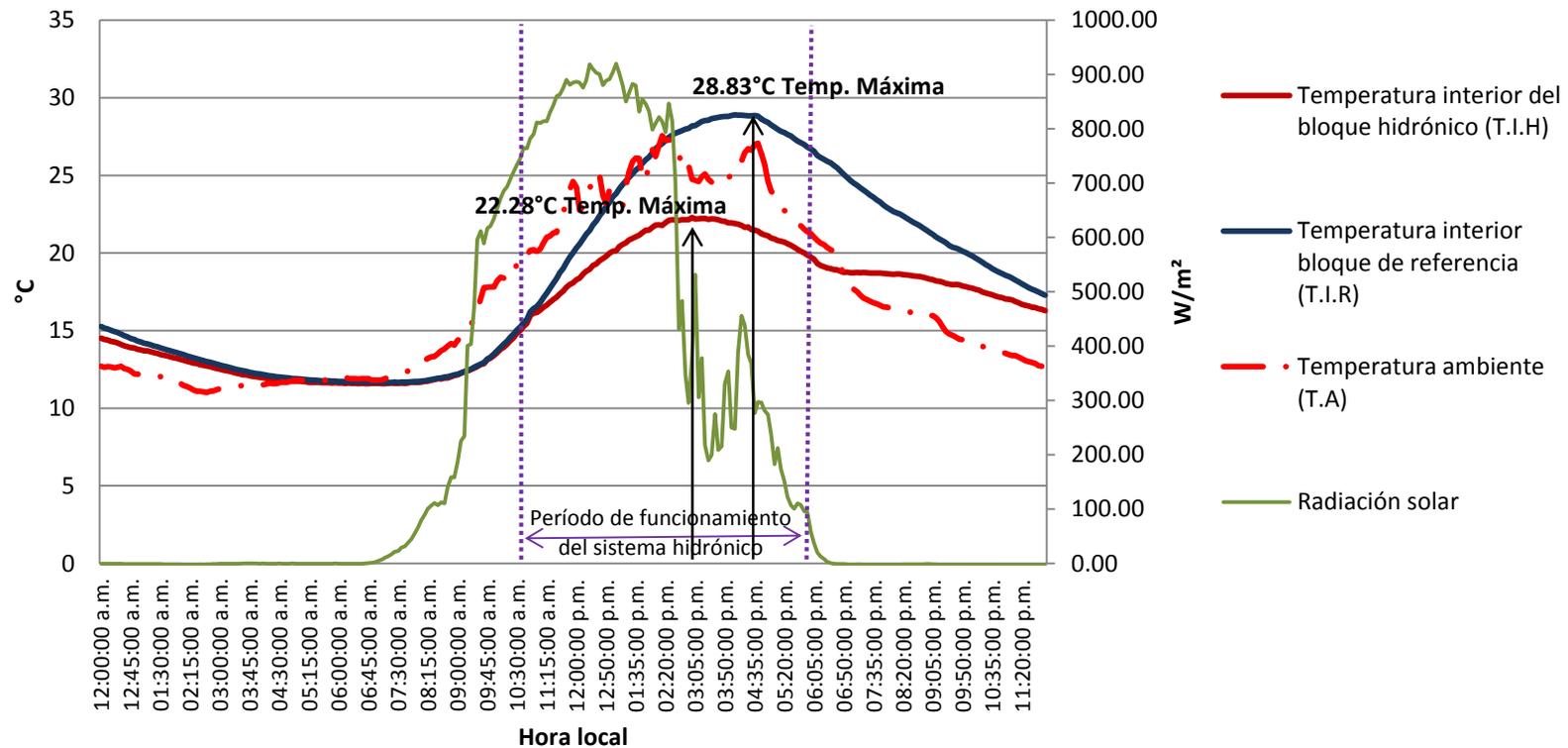
Gráfica 48. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el día 06 de marzo del 2015.



Gráfica 49. Radiación solar el día 06 de marzo del 2015.

En la gráfica 49 se presenta la radiación solar durante el día, se observa que la radiación máxima registrada fue de 927.27 W/m² a la 1:01 pm hora local. Posterior de las 2:30 pm aproximadamente, los niveles de radiación solar disminuyen debido a la presencia de nubes y aerosoles en la atmósfera. La energía que recibieron los bloques de concreto durante este día fue de 19,052.84 KJ/seg.

Para este día, con el NOAA Solar Calculator se calcula la hora en el que el Sol se encuentra en el cenit, el cual fue a las 12:47 pm.

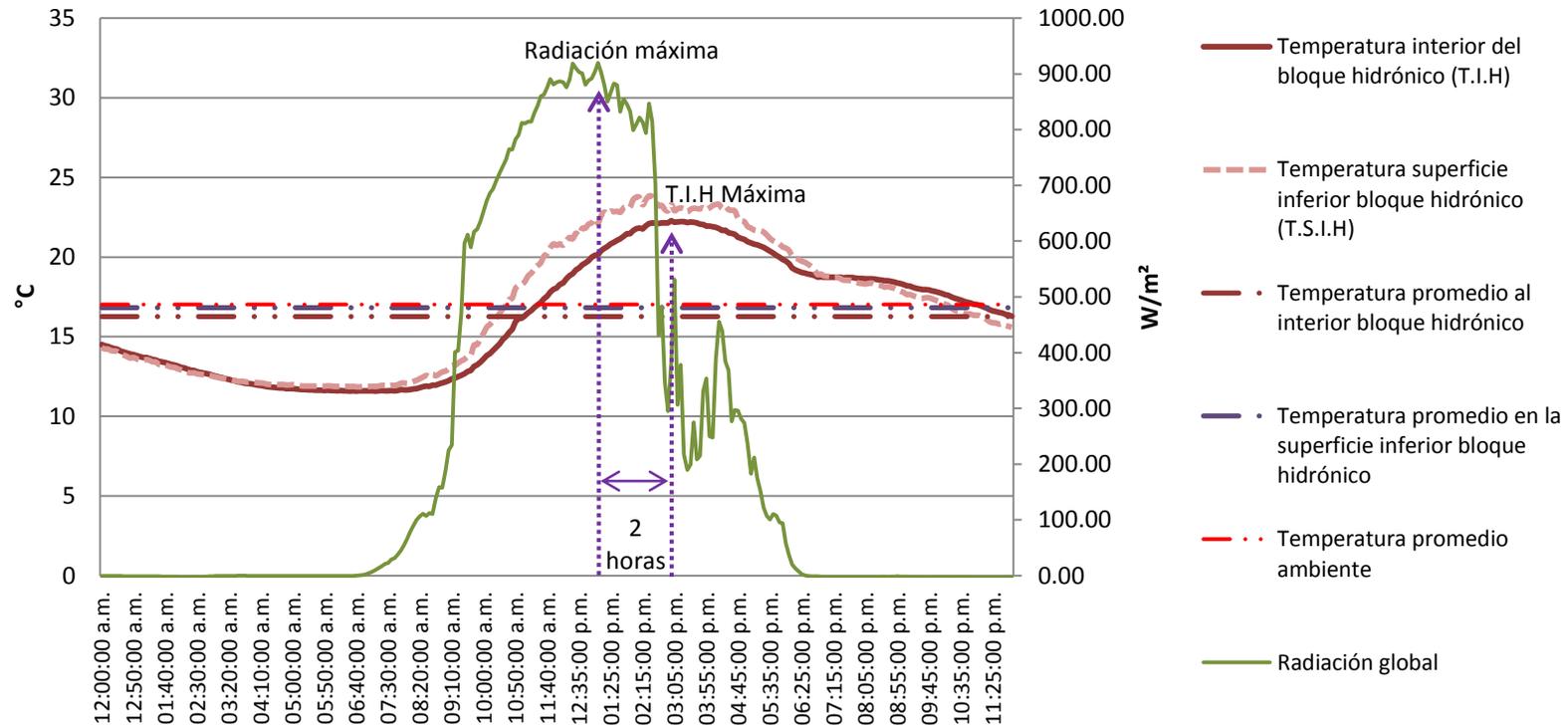


Gráfica 50. Comparación de la temperatura al interior de ambos bloques con respecto a la temperatura ambiente y a la radiación solar el día 06 de marzo del 2015.

La diferencia máxima entre la temperatura del interior de ambos bloques fue de **7.41°C** (ver gráfica 50), la cual se dio a las 4:40 pm. A esta misma hora se presenta la temperatura máxima de la superficie de ambos bloques, teniendo una diferencia de **5.71°C**, obteniendo las siguientes temperaturas (ver gráfica 53):

- Bloque de referencia:
 - T.I.R: 28.83°C
 - T.S.I.R: 28.60°C
 - Diferencia entre ambas temperaturas: 0.23°C
- Bloque con el sistema hidrónico:
 - T.I.H: 21.42°C

superior hasta el interior y un retardo de tres horas con 39 minutos con respecto a la cara inferior. En la gráfica, se muestra que la Temperatura promedio al interior del bloque fue de 18.65°C y en la superficie inferior de 18.59°C, teniendo una diferencia de 0.06°C. La temperatura promedio ambiente fue de 17.03°C. En la gráfica se observa que la temperatura promedio en el bloque es superior a la ambiente por 1.62°C.

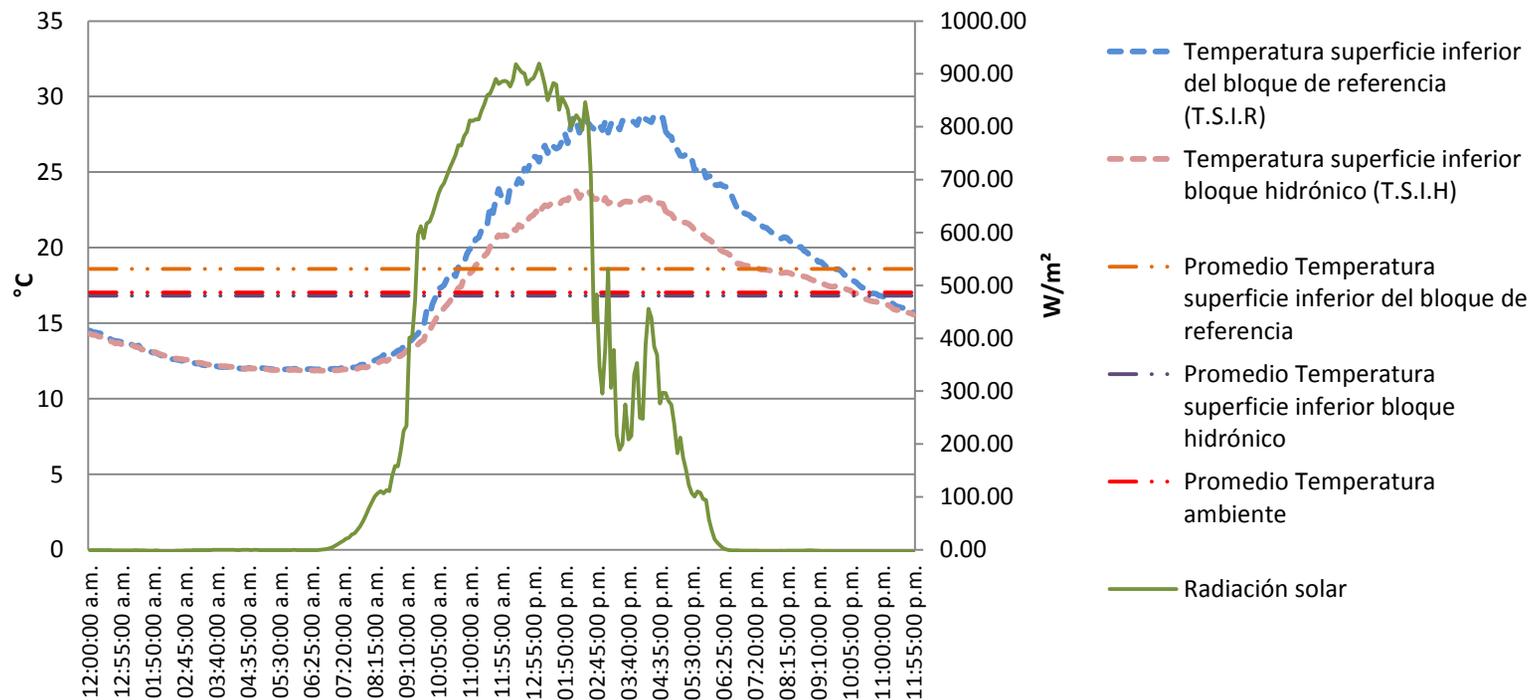


Gráfica 52. Comparación de la Temperatura interior y de la superficie inferior del bloque hidrónico el 06 de marzo del 2015.

En la gráfica 52 se presenta el comportamiento en el bloque hidrónico de la T.I.H y la T.S.I.H. La T.I.H máxima se registra a las 3:00 pm con 22.28 °C y la T.S.I.H máxima a las 2:25 pm con 23.83°C. Con respecto a la radiación solar se presenta un retardo de dos horas con respecto a la T.I.H y dos horas con 24 minutos con respecto a la T.S.I.H. Se disminuye el tiempo de retardo debido a que en el interior el agua absorbe parte del calor transmitido de la superficie superior por la radiación solar y la T.S.I.H es más elevado debido a las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesta (T.A y la H.R). En la gráfica, se muestra que la Temperatura promedio al interior



del bloque fue de 16.26°C y en la superficie inferior de 18.82°C, teniendo una diferencia de 0.56°C. La Temperatura promedio ambiente fue de 17.03°C. En la gráfica se observa que la Temperatura promedio ambiente es superior a la Temperatura promedio al interior del bloque por 0.8°C; por lo tanto durante las 7 horas y media que el sistema de enfriamiento hidrónico se encuentra funcionando, disminuye la Temperatura al Interior del Bloque manteniendo una Temperatura Promedio Interior menor a la Temperatura Ambiente durante las 24 horas.

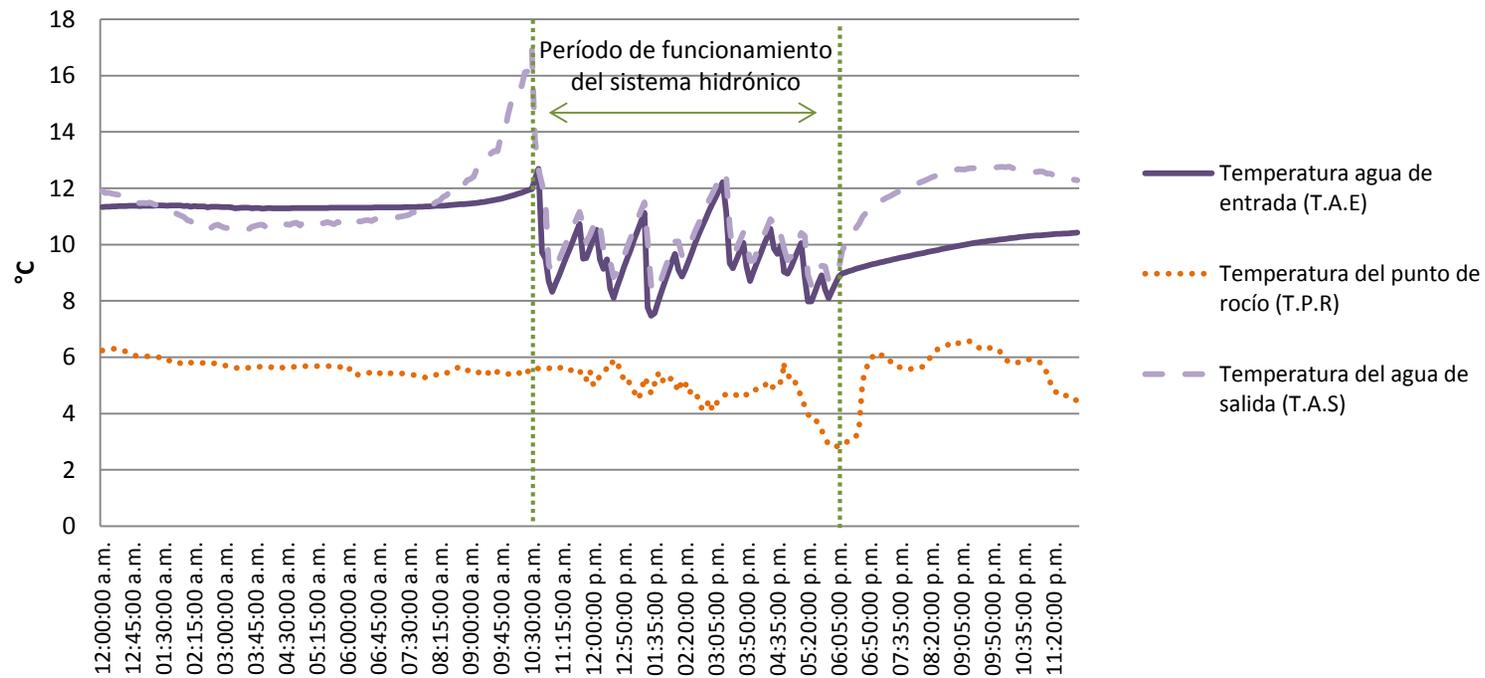


Gráfica 53. Comparación de la temperatura de la superficie inferior de ambos bloques el día 06 de marzo del 2015.

En la gráfica 53 se presenta una comparación entre la T.S.I.R y la T.S.I.H, se observa que durante el tiempo en que el sistema hidrónico se encuentra funcionando, la T.S.I.H es menor que la T.S.I.R, presentando una diferencia máxima durante este período de 5.71°C y una diferencia promedio de 1.79°C. Asimismo, en la gráfica se muestra la temperatura promedio ambiente y de las superficies inferiores de ambos bloques. Se observa que el promedio de la temperatura en la superficie inferior del bloque de referencia es de



18.59°C, encontrándose arriba de la temperatura promedio ambiente por 1.56°C. En cambio, la temperatura promedio en la superficie inferior del bloque hidrónico es de 16.82°C, siendo menor al promedio de la temperatura ambiente por 0.21°C de diferencia.



Gráfica 54. Comparación de la temperatura del agua de entrada y de salida del sistema hidrónico el día 06 de marzo del 2015.

En la gráfica 54 se presenta el comportamiento de la T.A.E y la T.A.S, presentando una diferencia de temperatura promedio de 1.08°C, siendo esta la temperatura que aumenta el agua al final del recorrido del sistema. La T.A.E para este día se encontró entre un rango de 7.47°C y los 12.69°C debido a que la T.P.R osciló entre los 4.96°C y los 8.06°C. En la gráfica la T.A.E se observa que no fue constante, lo cual se debe a que el enfriamiento se realizó manualmente, monitoreando la T.A.E y la T.P.R; si se hubiera realizado de forma automática, con un controlador y un equipo del enfriamiento del agua, la T.A.E sería constante, teniendo un comportamiento similar a la T.P.R.

Tabla 20. Temperatura promedio en las caras de los bloques el 06 de marzo del 2015.

Hora	Temperatura superficies Bloque referencia					Temperatura superficies Bloque hidrónico				
	Superior	Norte	Oeste	Este	Sur	Superior	Norte	Oeste	Este	Sur
11:30:00 a.m.	37.63	22.17	22.03	33.18	28.28	38.83	22.95	21.43	34.15	27.52
11:40:00 a.m.	38.14	21.03	20.75	32.92	28.33	37.58	22.33	20.23	33.15	26.65
11:50:00 a.m.	38.33	21.48	21.45	32.27	28.77	39.70	22.85	21.20	32.87	28.40
12:00:00 p.m.	38.00	20.82	20.85	30.52	28.30	38.63	22.57	21.17	30.42	28.50
12:10:00 p.m.	38.28	20.62	21.65	31.65	29.00	40.21	23.17	21.58	31.72	28.42
12:20:00 p.m.	39.37	21.72	22.25	30.63	30.10	39.46	22.83	21.98	30.52	28.50
12:30:00 p.m.	40.27	23.53	24.22	28.82	29.75	40.23	23.33	22.52	28.85	31.63
12:40:00 p.m.	42.14	22.97	24.18	29.28	31.62	39.98	23.08	22.52	29.82	31.53
12:50:00 p.m.	41.68	24.33	25.33	28.98	32.00	41.27	23.78	23.60	29.08	34.07
01:00:00 p.m.	42.80	24.00	25.03	28.57	32.77	40.90	23.67	24.50	29.20	34.55
01:10:00 p.m.	41.37	23.70	25.10	28.32	33.03	40.39	23.37	24.23	28.03	34.68
01:20:00 p.m.	40.62	24.47	26.10	27.02	33.02	39.09	24.40	24.95	26.72	33.77
01:30:00 p.m.	40.62	24.13	26.00	27.43	33.67	38.37	23.77	24.70	26.42	32.83
04:30:00 p.m.	30.58	27.38	28.15	27.15	28.98	27.07	25.25	27.07	24.80	27.37
04:40:00 p.m.	27.76	26.05	26.67	25.23	25.78	25.04	24.37	25.20	23.22	24.02
04:50:00 p.m.	26.72	25.30	25.47	23.93	25.23	23.93	23.83	24.37	22.03	22.92
05:00:00 a.m.	25.89	24.60	24.97	23.45	24.90	23.28	22.92	24.98	21.75	23.20
05:10:00 p.m.	25.30	23.27	24.23	23.53	25.75	22.74	22.42	24.50	21.65	22.75
05:20:00 p.m.	24.58	23.27	23.72	22.92	24.20	21.82	22.08	24.00	21.22	22.67
05:30:00 p.m.	22.52	22.65	22.63	21.73	23.07	20.59	21.07	22.50	20.46	21.03

En la tabla 20 y 21 se presenta las temperaturas promedio, las cuales se obtuvieron con las mediciones a cada 10 minutos en las diferentes divisiones que se realizaron en las caras de los bloques. Se comparan las diferentes temperaturas registradas durante las 11:30 pm - 1:30 pm y las 4:30 pm – 5:30 pm. Las mediciones se escogen realizar en dichas horas por ser en la que se registran los niveles más elevados de radiación solar y por ser la hora cercana en la que se deja de funcionar el sistema hidrónico.

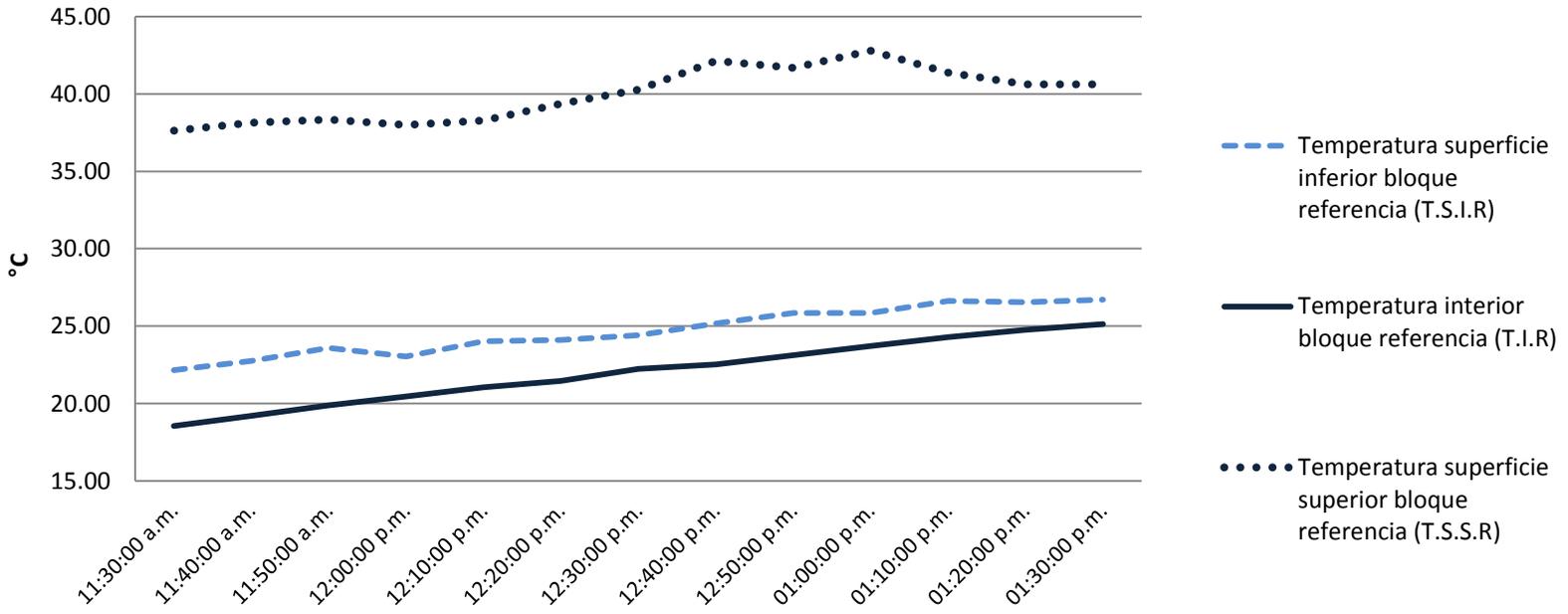
En la tabla 20 se muestran las mediciones realizadas con el termómetro láser FLUKE en todas las caras de ambos bloques. Se observa que entre las 11:30 am y las 1:30 pm la temperatura entre las caras es similar en ambos bloques; en cambio entre las 4:30 pm y las 5:30 pm la temperatura en las caras del bloque con el sistema hidrónico es menor en todas sus caras.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS
Resultados Azotea 06 de marzo del 2015

Tabla 21. Temperatura promedio en las caras de los bloques el 06 de marzo del 2015.

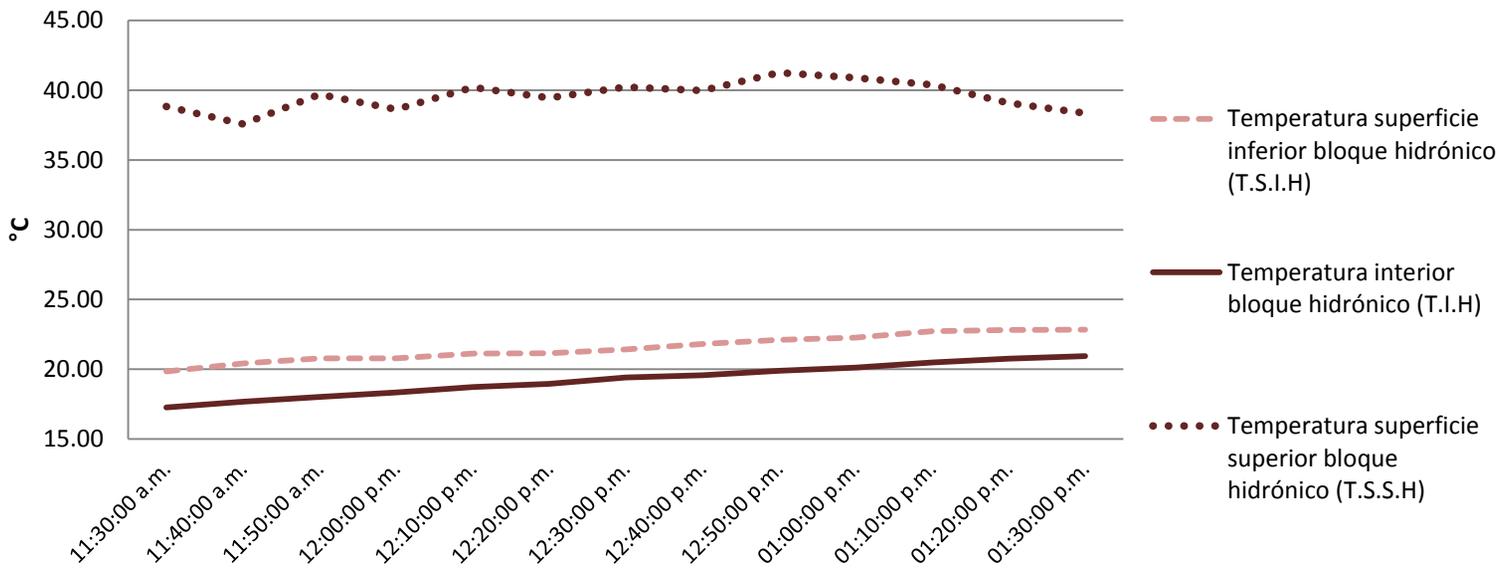
Hora	Inferior			Interior			Superior		
	bloque referencia	bloque hidrónico	Diferencia	Bloque de referencia	Bloque hidrónico	Diferencia	Bloque de referencia	Bloque hidrónico	Diferencia
11:30:00 a.m.	22.16	19.86	2.30	18.54	17.26	1.28	37.63	38.83	1.20
11:40:00 a.m.	22.75	20.41	2.34	19.19	17.67	1.53	38.14	37.58	0.57
11:50:00 a.m.	23.60	20.78	2.82	19.87	18.02	1.86	38.33	39.70	1.37
12:00:00 p.m.	23.04	20.79	2.25	20.46	18.33	2.13	38.00	38.63	0.63
12:10:00 p.m.	24.01	21.12	2.89	21.05	18.73	2.32	38.28	40.21	1.93
12:20:00 p.m.	24.10	21.14	2.96	21.45	18.96	2.49	39.37	39.46	0.09
12:30:00 p.m.	24.41	21.43	2.98	22.23	19.40	2.83	40.27	40.23	0.03
12:40:00 p.m.	25.16	21.80	3.36	22.53	19.57	2.97	42.14	39.98	2.17
12:50:00 p.m.	25.85	22.11	3.74	23.12	19.88	3.24	41.68	41.27	0.41
01:00:00 p.m.	25.84	22.27	3.57	23.72	20.13	3.59	42.80	40.90	1.90
01:10:00 p.m.	26.62	22.71	3.91	24.29	20.48	3.81	41.37	40.39	0.98
01:20:00 p.m.	26.54	22.81	3.73	24.76	20.75	4.01	40.62	39.09	1.53
01:30:00 p.m.	26.71	22.84	3.86	25.12	20.94	4.18	40.62	38.37	2.26
PROMEDIO	24.68	21.54	3.13	22.03	19.24	2.79	39.94	39.59	1.16
MÁXIMA	26.71	22.84	3.91	25.12	20.94	4.18	42.80	41.27	2.26
MÍNIMA	22.16	19.86	2.25	18.54	17.26	1.28	37.63	37.58	0.03
04:30:00 p.m.	28.62	22.96	5.66	28.85	21.50	7.35	30.58	27.07	3.51
04:40:00 p.m.	28.15	22.66	5.49	28.73	21.34	7.40	27.76	25.04	2.71
04:50:00 p.m.	27.38	22.25	5.13	28.47	21.14	7.33	26.72	23.93	2.79
05:00:00 a.m.	26.54	21.87	4.67	28.19	20.93	7.25	25.89	23.28	2.61
05:10:00 p.m.	26.08	21.68	4.40	27.90	20.78	7.12	25.30	22.74	2.56
05:20:00 p.m.	26.16	21.61	4.55	27.70	20.65	7.05	24.58	21.82	2.76
05:30:00p.m.	25.89	21.39	4.49	27.54	20.50	7.04	22.52	20.59	1.93
PROMEDIO	26.97	22.06	4.91	28.20	20.98	7.22	26.19	23.50	2.70
MÁXIMA	28.62	22.96	5.66	28.85	21.50	7.40	30.58	27.07	3.51
MÍNIMA	25.89	21.39	4.40	27.54	20.50	7.04	22.52	20.59	1.93

En la tabla 21, se realiza una comparación entre las temperaturas de la superficie superior, del interior y de la superficie inferior de ambos bloques entre las 11:30 am – 1:30 pm y las 4:30 pm – 5:30 pm. En las siguientes gráficas se realiza el análisis de cada bloque de las mediciones que se presentan en esta tabla.



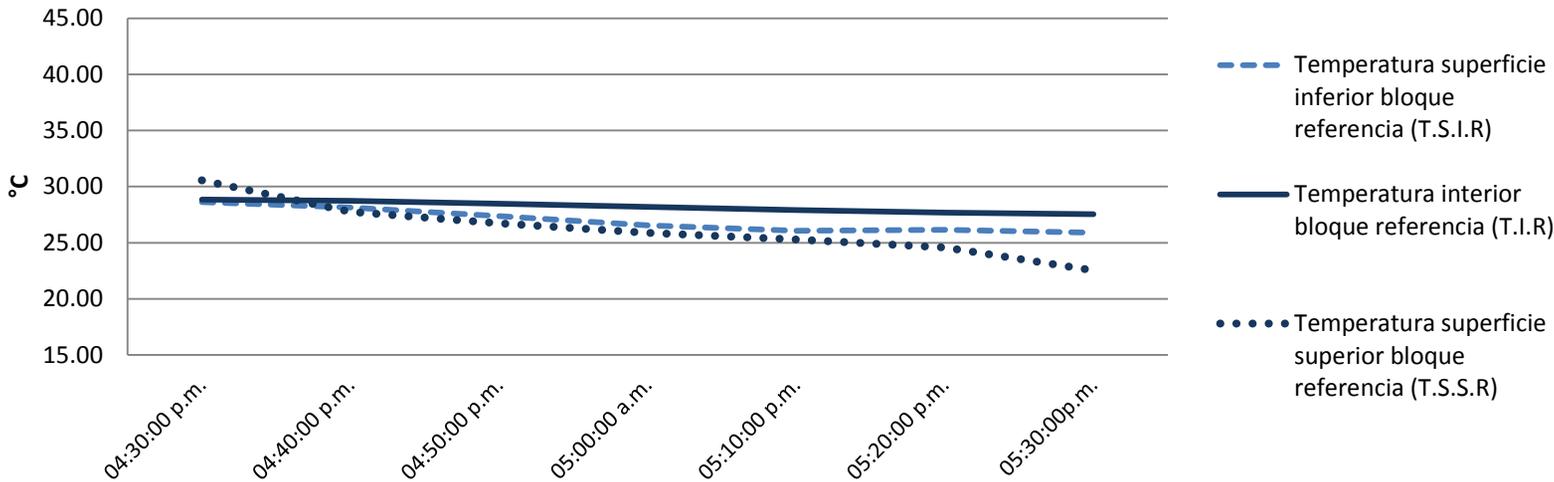
Gráfica 55. Comparación de temperatura entre las superficies y el interior del bloque de referencia el 06 de marzo del 2015 entre las 11:30 am y la 1:30 pm.

En la gráfica 55 se presenta las temperaturas de las superficie superior, inferior e interior del bloque de referencia entre las 11:30 am hasta las 1:30 pm. La T.S.S.R se obtuvieron con las mediciones a cada 10 minutos en las diferentes divisiones que se realizaron en las caras de los bloques con el termómetro infrarrojo FLUKE, las demás temperatura se realizaron con los termistores (sensores de contacto). En el bloque de referencia se observa que la T.S.S.R se encontró entre los 42.80°C y los 37.63°C, con un promedio de 39.94°C. La T.S.I.R oscila entre los 26.71°C y los 22.16°C, con promedio de 24.68°C; y la T.I.R se encontró entre los 25.12°C y los 18.54°C, con promedio de 22.03°C. Se presenta una diferencia de temperatura promedio de 15.26°C entre la T.S.S.R con la T.S.I.R; y una diferencia de 17.91°C con respecto a la T.S.S.R y la T.I.R.

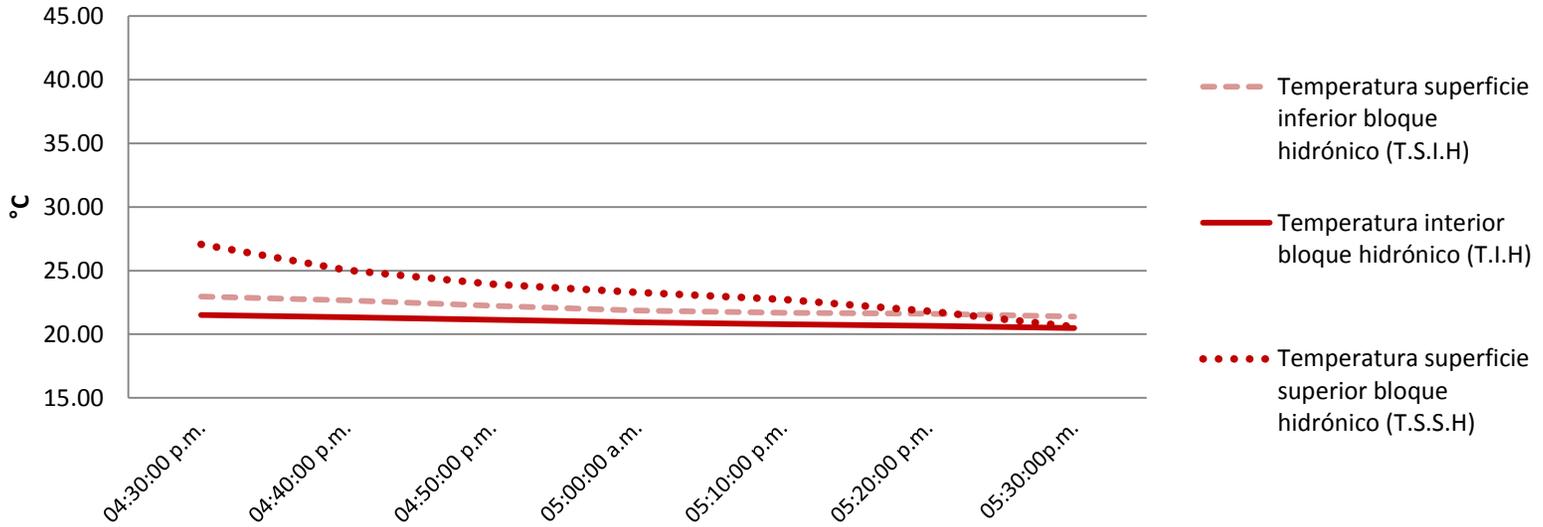


Gráfica 56. Comparación de temperatura entre las superficies y el interior del bloque hidrónico el 06 de marzo del 2015 entre las 11:30 am y la 1:30 pm.

En la gráfica 56 se presenta las temperaturas de las superficies superior, inferior e interior del bloque hidrónico entre las 11:30 am hasta las 1:30 pm. En el bloque de referencia se observa que la T.S.S.H se encontró entre los 41.27°C y los 37.58°C, con un promedio de 39.59°C. La T.S.I.H oscila entre los 22.84°C y los 19.86°C, con promedio de 21.54°C; y la T.I.H se encontró entre los 20.94°C y los 17.26°C, con promedio de 19.24°C. Se presenta una diferencia de temperatura promedio de 18.05°C entre la T.S.S.H con la T.S.I.H; y una diferencia de 20.35°C con respecto a la T.S.S.H y la T.I.H. Comparando la diferencia entre dichas temperaturas promedio con el bloque de referencia, es mayor entre la temperatura de la superficie superior y las demás superficies, lo cual se debe al sistema hidrónico. Con la T.S.I.R y la T.S.I.H entre ambos bloques se presenta una diferencia promedio de 3.14°C, siendo en este período de tiempo en el que se recibe la mayor cantidad de calor por la radiación solar, considerando estos grados los que el sistema hidrónico reduce en el funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado en el interior de los espacios.



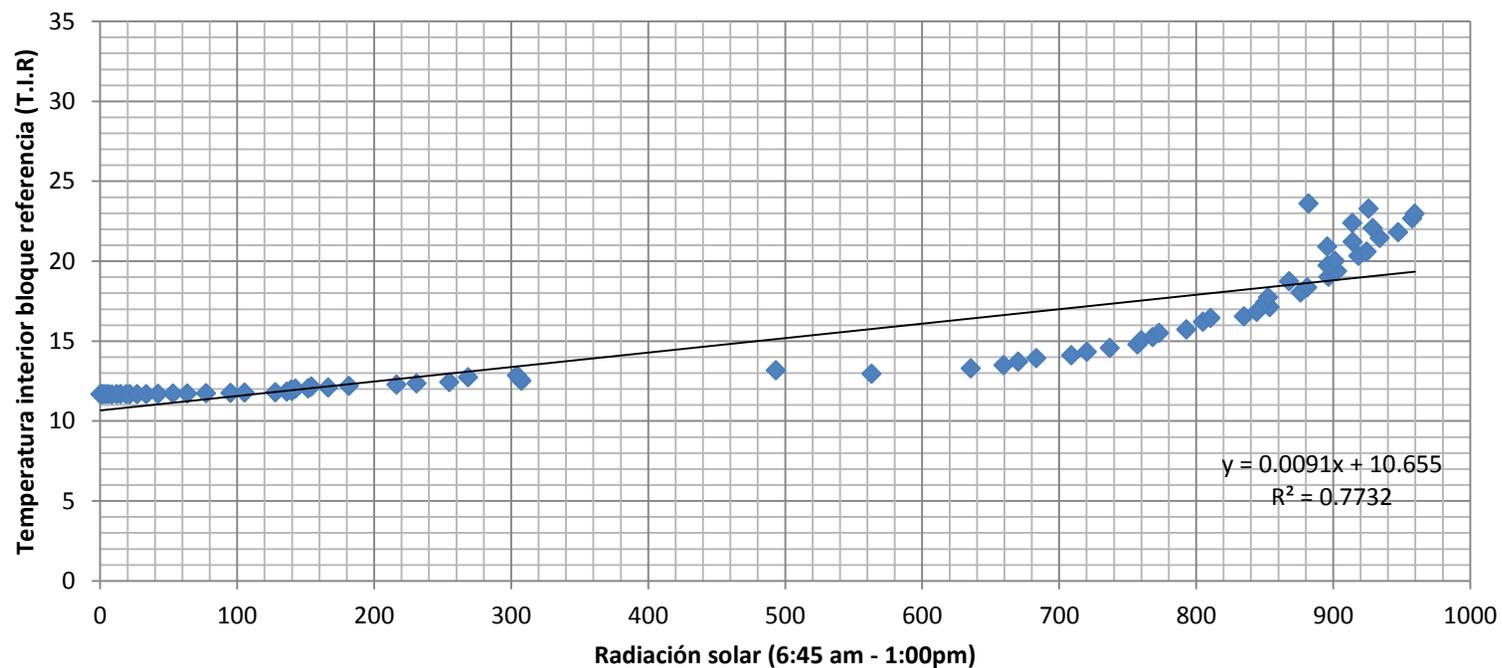
Gráfica 57. Comportamiento de la temperatura de la superficie superior, inferior e interior del bloque de referencia.



Gráfica 58. Comportamiento de la temperatura de la superficie superior, inferior e interior del bloque con el sistema de enfriamiento hidráulico.



En las gráficas 57 y 58 se presenta el comportamiento de las temperaturas de la superficie superior, inferior e interior de ambos bloques entre las 4:30 pm y las 5:30 pm. En la gráfica 57 se observa que la T.S.S.R del bloque de referencia es menor a las otras debido a que en este período de tiempo la radiación solar es menor y porque el calor se concentra en el interior debido al retraso del flujo de calor del concreto, por lo que la T.I.R es la más alta. En la gráfica 58 se observa que la T.S.S.H disminuye paulatinamente pero no es menor que la T.I.H debido a que en el interior el sistema hidráulico absorbe el calor del concreto. En esta gráfica la T.I.H es menor que las otras temperaturas, caso contrario que la T.I.R donde es mayor debido a que a esas horas el calor adquirido de la superficie superior por la radiación solar se concentra en el interior, registrando la temperatura máxima de 28.89°C a las 4:05 pm.

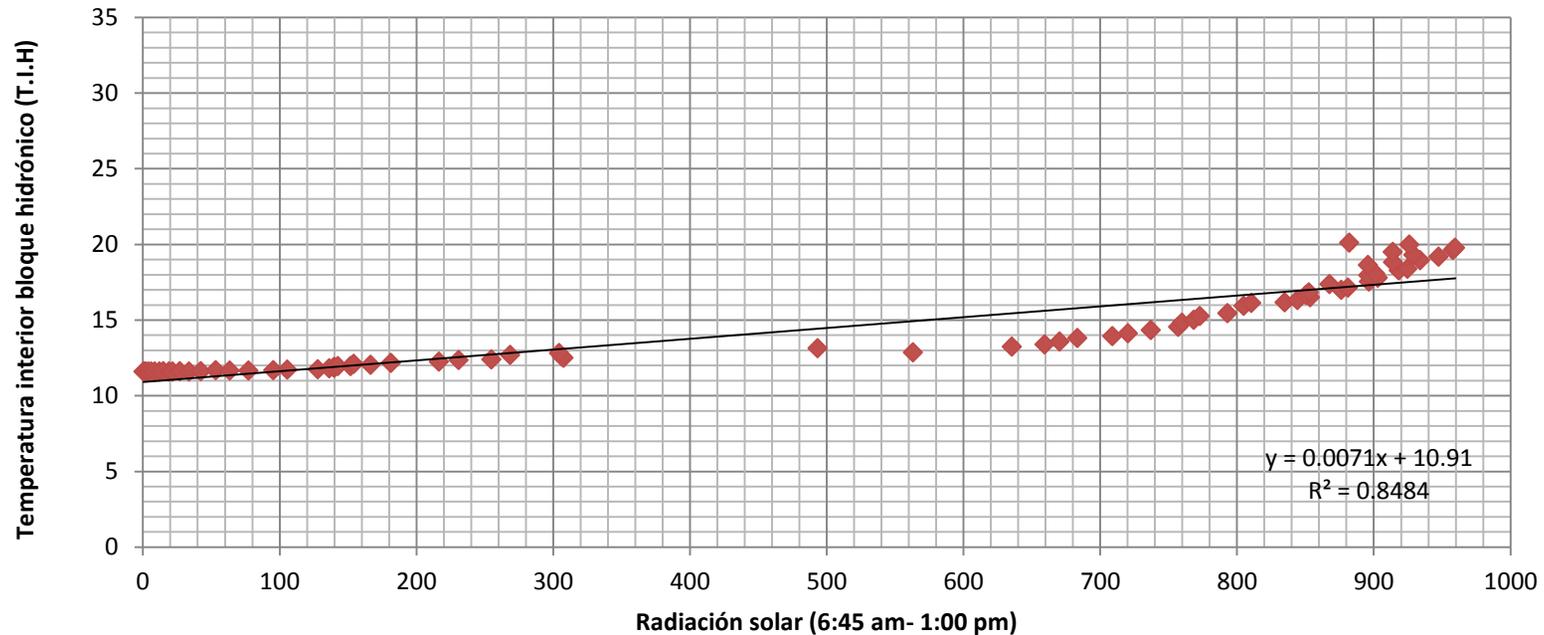


Gráfica 59. Correlación entre la temperatura al interior del bloque de referencia con la radiación solar entre las 6:45 am y las 1:00 pm (máximo nivel de radiación).

En la gráfica 59 se presenta la correlación entre la T.I.R con respecto a la Radiación solar, se realiza la correlación hasta las 1:00 pm por ser a esta hora en la que se registra el nivel más alto de radiación solar. En la gráfica, la correlación de la T.I.R con la radiación solar presenta un coeficiente de correlación de 0.77. Se considera un valor de correlación relativamente alto, pero más bajo que el día 02 de marzo. Una de las razones que se considera por la cual el valor disminuye es porque el día 02 de marzo se encontró despejado y con

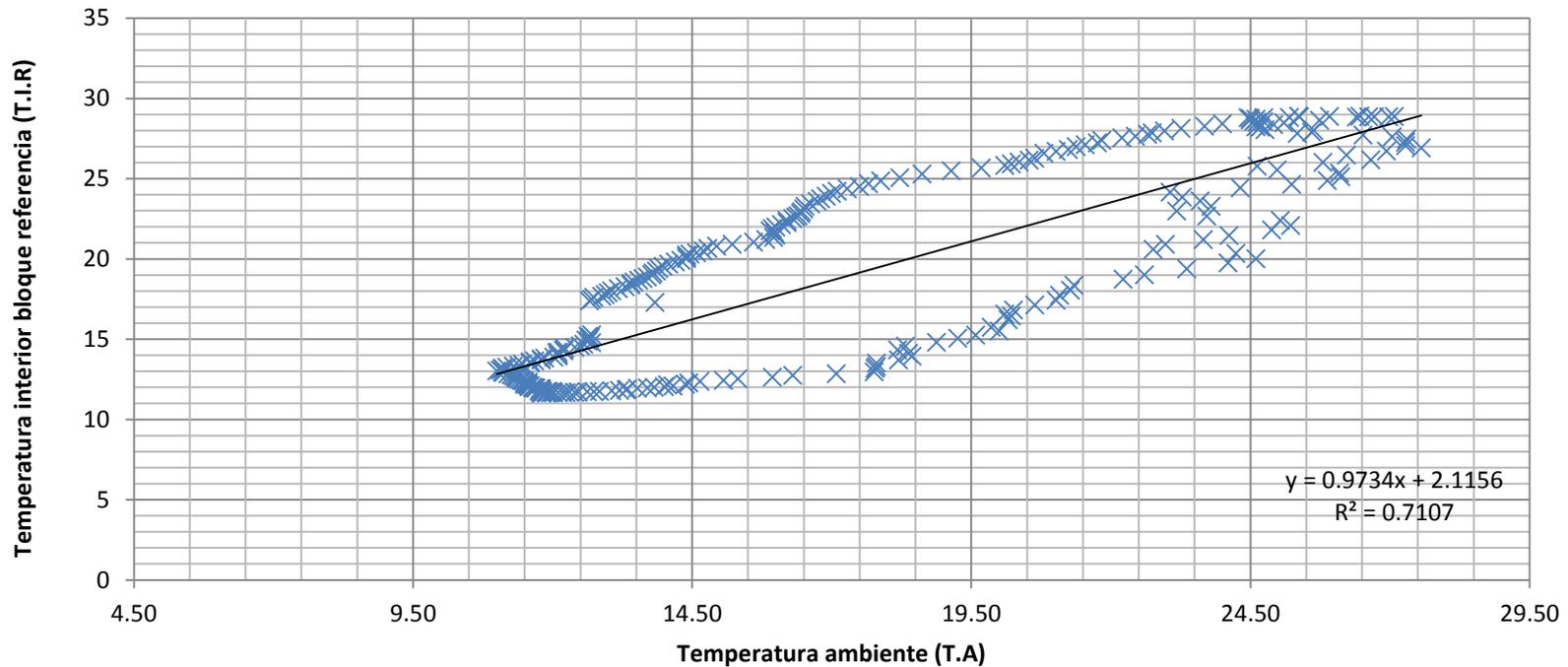


mayor nivel de radiación solar que el día 06 de marzo, por lo tanto al tener mayor radiación solar, mayor es el incremento de la temperatura al interior del bloque.



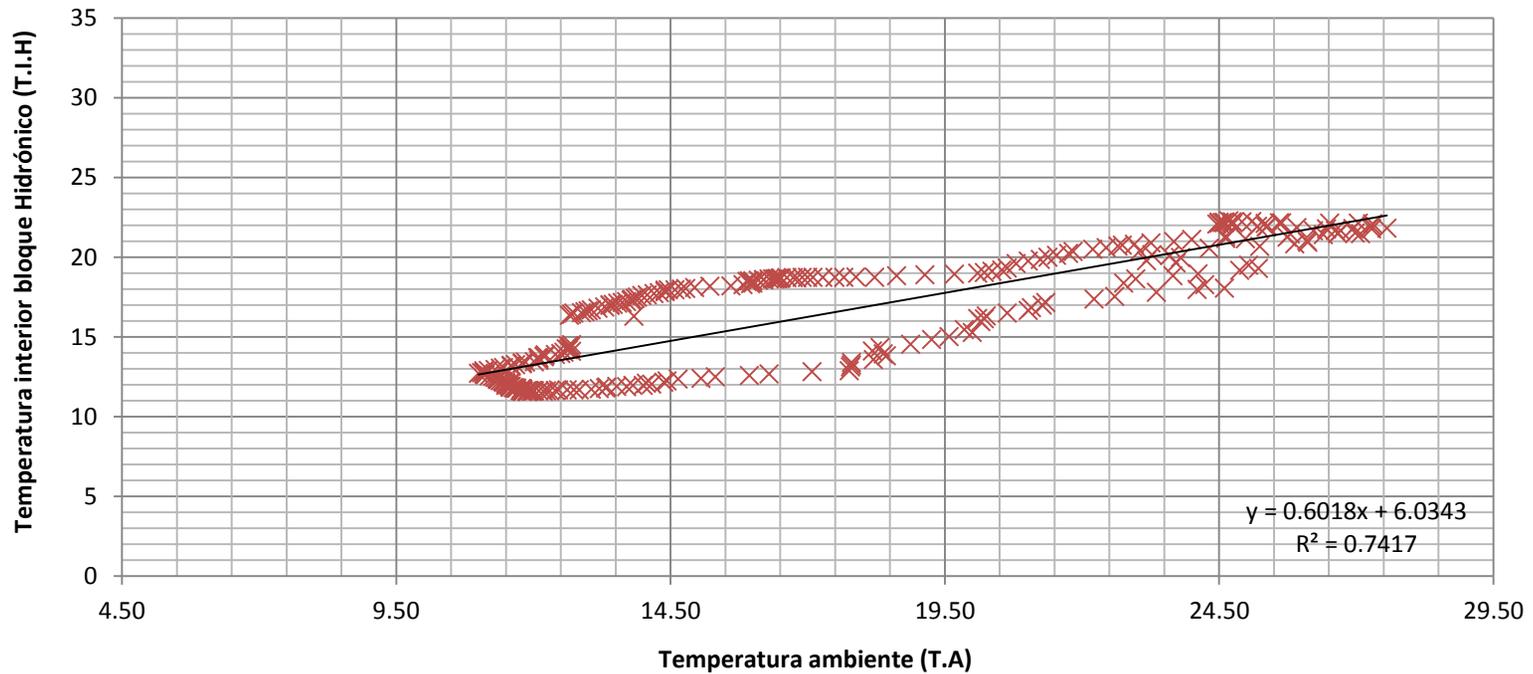
Gráfica 60. Correlación entre la temperatura al interior del bloque hidrónico con la radiación global entre las 6:45 am y la 1:00 pm.

En la gráfica 60 se presenta la correlación entre la T.I.H con respecto a la Radiación solar, presentando un coeficiente de correlación de 0.84, el cual es alto por su cercanía a uno. Se observa el bloque hidrónico posee una mayor correlación con la radiación solar que el bloque de referencia, pero al igual que el de referencia el valor es menor que el día 02 de marzo por las razones que se mencionaron con anterioridad.



Gráfica 61. Correlación entre la temperatura al interior del bloque de referencia y la temperatura ambiente el día 06 de marzo del 2015.

En la gráfica 61 se presenta la correlación entre la T.I.R con respecto a la T.A, se consigue una correlación positiva de 0.71, siendo relativamente alta, lo cual indica que la T.A tiene influencia en el comportamiento de la T.I.R; por lo que si aumenta la T.A la temperatura al interior aumenta. En la gráfica 62 se muestra la correlación entre la T.I.H con respecto a la T.A, se obtiene una correlación positiva de 0.74, siendo similar a la correlación del T.I.R. En ambos bloques el valor de correlación es menor que la correlación con la Radiación Solar, por lo tanto esta variable es la que mayor influencia posee en el comportamiento de la Temperatura al interior de ambos bloques (T.I.R y T.I.H).



Gráfica 62. Correlación entre la temperatura al interior del bloque hidrónico y la temperatura ambiente el día 06 de enero del 2015.

En la imagen 61 se muestra la imagen térmica de ambos bloques a las 12:30 pm, se observa que en ambas superficies se encuentran con mayor temperatura debido a la radiación solar. Posteriormente en la imagen 62 se presentan los bloques a las 4:30 pm, mostrando que en el bloque B, en el centro se encuentra almacenado el calor absorbido de la radiación solar por la superficie superior. En cambio, el bloque A ha perdido dicho calor absorbido por el sistema hidrónico, amortiguado el flujo de calor del concreto. En la imagen 61 se observa el flujo de calor en el bloque de concreto de referencia.

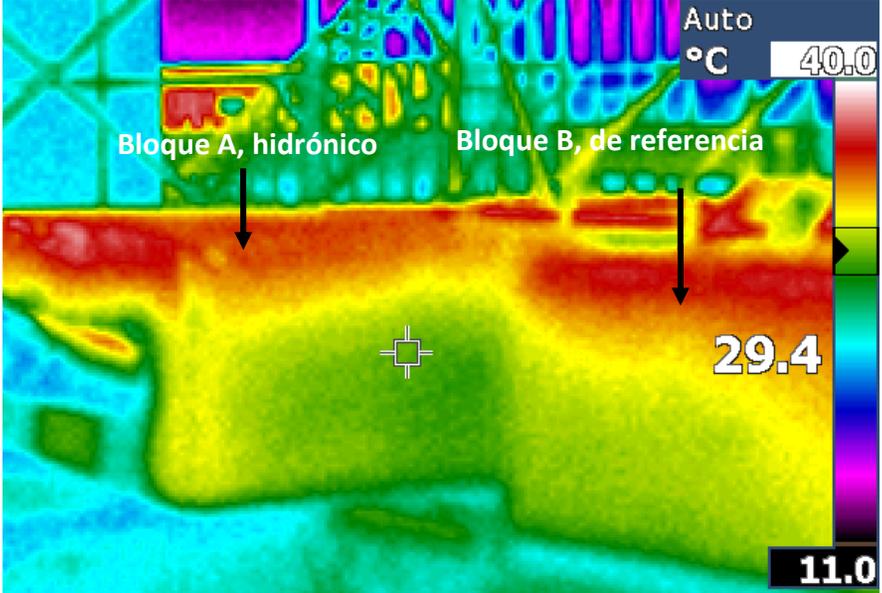


Imagen 61. Imagen térmica de ambos bloques a las 12:30 pm el día 06 de marzo del 2015. Fuente: Autoría propia.

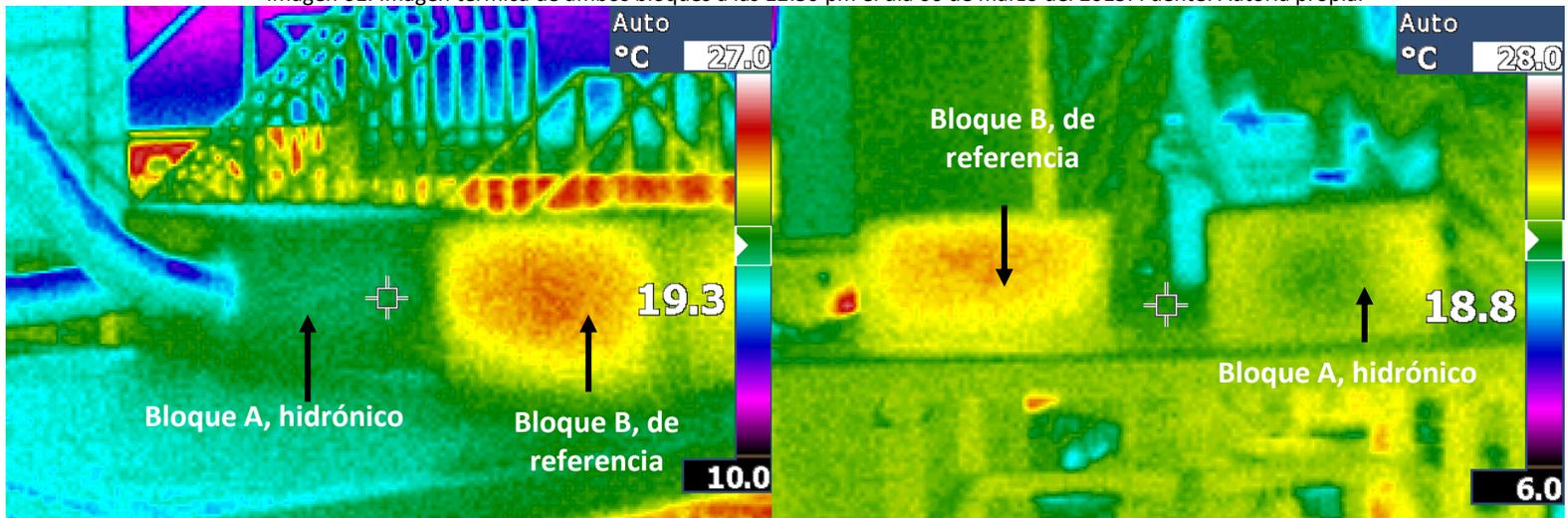


Imagen 62. Imágenes térmicas de los bloques a las 4:30 pm el día 06 de marzo del 2015. Fuente: Autoría propia.

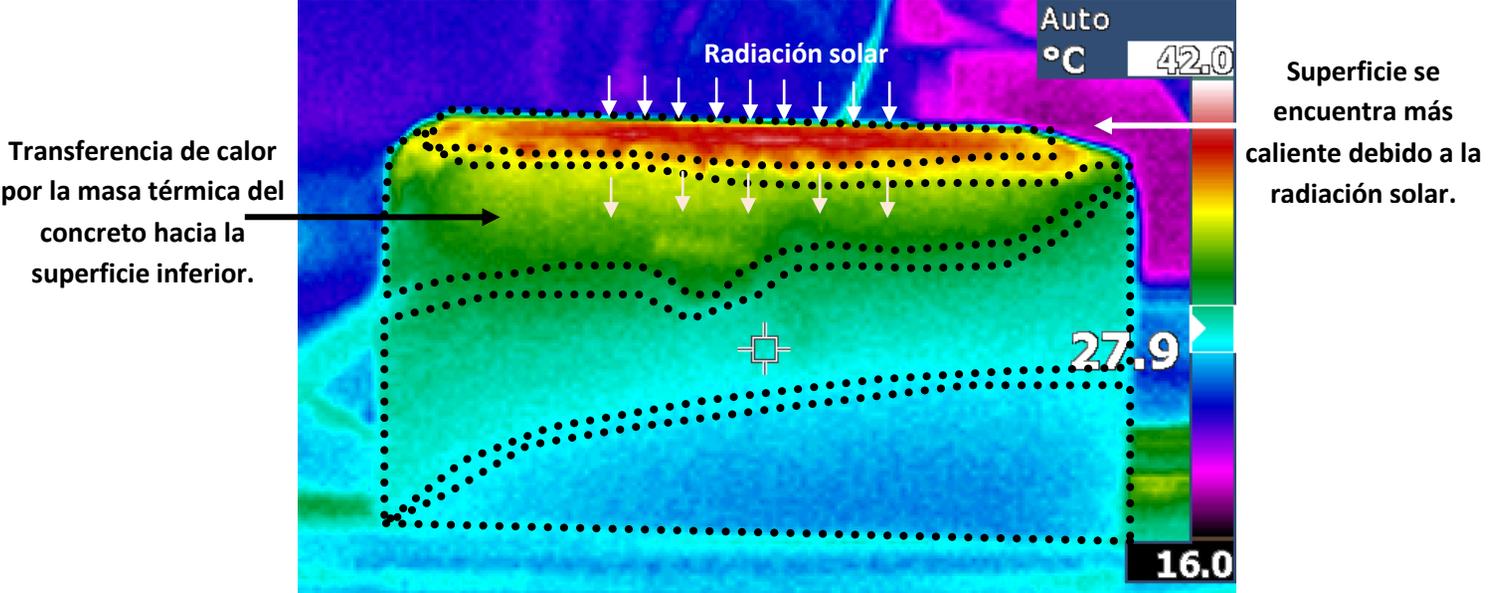


Imagen 63. Imagen térmica del bloque de referencia. Fuente: Autoría propia, 2015.

En la imagen 63 se presenta la estratificación de temperatura del bloque referencia. Asimismo se observa el efecto de la radiación solar en el material, donde parte del calor recibido es absorbido y se transfiere a la masa del material de la superficie superior hasta la superficie inferior paulatinamente (flujo de calor).

En la tabla 22, se presenta una comparación entre las mediciones realizadas el día 02 y 06 de marzo, con el fin de analizar el efecto de las condiciones del clima en el funcionamiento del sistema de enfriamiento hidrónico.

Tabla 22. Comparación del día 02 y 06 de marzo del 2015.

02 de marzo 2015	06 de marzo del 2015
Mayor nivel de radiación solar global: 1004.55 W/m ²	Menor nivel de radiación solar global: 927.27 W/m ²
Cielo despejado.	Cielo nublado después de las 2:00 pm.
Mayor Temperatura Ambiente (T.A) Rango 7.2 °C – 29.60°C A mayor temperatura ambiente, mayor es el calor.	Menor Temperatura Ambiente (T.A) Rango 11 °C – 27.56°C



CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS
Resultados Azotea 06 de marzo del 2015

Menor porcentaje de Humedad Relativa. Rango 9.16 % - 76.28 %. Promedio 36.01%.	Mayor porcentaje de Humedad Relativa. Rango 23.76 % - 70.16 %. Promedio 49.55%
Menor Temperatura de Punto de Rocío. Rango: -7.14°C a 4.36°C. Promedio: 0.54°C	Mayor Temperatura Punto de Rocío Rango: 2.83 °C – 6.59°C. Promedio 5.4°C
Con menor Temperatura de Punto de Rocío, menor fue la Temperatura de entrada del agua al sistema de enfriamiento. Rango: 2.04°C – 15.68°C. Promedio: 4.22°C	Mayor Temperatura del agua de entrada. Rango: 7.47°C – 12.69°C. Promedio 10.44°C
Mayor Temperatura al interior del bloque hidrónico (T.I.H). Rango: 15.50°C – 23.92°C. Promedio: 20.85°C	Menor Temperatura al interior del bloque hidrónico (T.I.H). Rango: 11.59°C – 23.83°C. Promedio: 16.82°C
Mayor Temperatura al interior del bloque de referencia (T.I.R). Rango: 16.81°C – 32.84°C. Promedio: 27.05°C	Menor Temperatura al interior del bloque de referencia (T.I.R). Rango: 11.66°C – 28.89°C. Promedio: 18.65°C
La diferencia máxima entre la Temperatura al interior de ambos bloques (T.I.H y la T.I.R) es mayor de 10.03°C	La diferencia máxima entre la Temperatura al interior de ambos bloques (T.I.H y la T.I.R) es menor de 7.41°C
La diferencia entre la Temperatura promedio al interior de ambos bloques (T.I.H promedio y la T.I.R promedio) es mayor de 6.2°C	La diferencia entre la Temperatura promedio al interior de ambos bloques (T.I.H promedio y la T.I.R promedio) es menor de 6.09°C
Mayor porcentaje de enfriamiento con respecto a la diferencia máxima de la temperatura interna de ambos bloques (T.I.H y la T.I.R) de 31.82%	Menor porcentaje de enfriamiento con respecto a la diferencia máxima de la temperatura interna de ambos bloques (T.I.H y la T.I.R) de 25.7%
Mayor valor de correlación entre la T.I.H y la Radiación solar con 0.94; y entre la T.I.R y la Radiación solar con 0.91	Menor valor de correlación entre la T.I.H y la Radiación solar con 0.8; y entre la T.I.R y la Radiación solar con 0.73
Mayor valor de correlación entre la T.I.H y la T.A con 0.76; y entre la T.I.R y la T.A con 0.8	Menor valor de correlación entre la T.I.H y la T.A con 0.74; y entre la T.I.R y la T.A con 0.71

En la tabla 22, se observa que a pesar de que el día 02 de marzo los niveles de Radiación Solar y la Temperatura Ambiente (T.A) fueron más elevados, presentando una diferencia mayor en la Temperatura al interior entre ambos bloques; esto se debe a que el día 02 de marzo el porcentaje de Humedad Relativa (H.R) y la Temperatura de Punto de Rocío (T.P.R) fueron menor, por lo tanto la Temperatura del agua de entrada se fue menor al del día 06 de marzo. Con lo anterior, también se observa que a pesar de que la correlación entre la Temperatura interna en los bloques y la Radiación Solar y la Temperatura Ambiente (T.A) es más elevada en día 02, lo que determina el porcentaje de enfriamiento del sistema es la Temperatura del agua de entrada (T.A.E).

Asimismo, en la tabla se presentan la diferencia máxima y la promedio de la temperatura interior de ambos bloques (T.I.H y T.I.R); el día 02 de marzo se presentó una diferencia máxima entre ambos bloques que el día 06 de marzo, pero la diferencia promedio entre ambas temperaturas durante el tiempo que funcionó el sistema de enfriamiento hidrónico fue similar, teniendo una diferencia entre ambos días de 0.11°C.

7.2.2 Comparación de enfriamiento del sistema hidrónico en la masa térmica en clima cálido húmedo.

En la segunda parte del experimento se realiza una réplica del experimento en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras; con un clima cálido-húmedo. En esta parte del experimento solamente se realiza el bloque con el sistema radiante debido a la escasez de equipos de medición. El período en el que se realizaron las mediciones fue del 8 al 18 de enero del 2015. Los equipos utilizados para esta parte del experimento es un HOBO U12-013, para realizar las mediciones de la temperatura, humedad relativa y temperatura de rocío ambiente. A este equipo se conectaron los sensores TMC6-HD para registrar la temperatura del agua y del bloque.



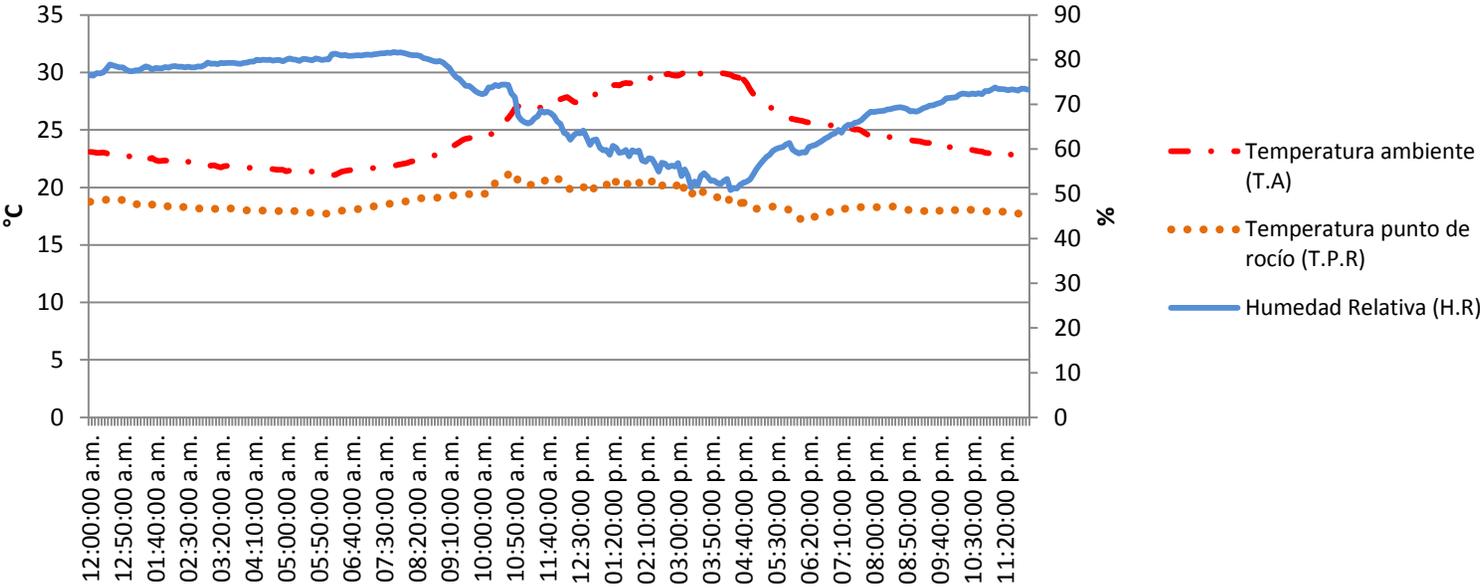
Imagen 64. Instalación del experimento en la vivienda en San Pedro Sula, Honduras. Fuente: Autonomía propia, 2015.

Inicialmente se localiza el experimento en un área sombreada debido a que los primeros días de las mediciones se presentaron lluvias constantes, por lo que se trató de evitar que se humedeciera el bloque para obtener resultados óptimos, por lo que no la radiación solar no tuvo incidencia en el bloque. Se coloca el bloque de forma horizontal, lo cual se muestra en la imagen 64. Durante las mediciones, dos días no se puso a funcionar el sistema hidrónico (12 y el 18 de enero), para obtener el comportamiento de la masa térmica del concreto con respecto a la temperatura ambiente. También se realizaron mediciones con dos flujos de agua diferente: 5

litros por segundo y 3 litros por segundo; siendo estas las velocidades máxima y mínima de la bomba de agua utilizada para el experimento; obteniendo mayores diferencia entre la Temperatura ambiente (T.A) y la Temperatura al interior del bloque (T.I.H). Para el análisis se presentan los días 08 y 12 de enero del 2015, se escogen dichos días por ser el 08 de enero el que se presentó una mayor diferencia de la Temperatura al interior del bloque (T.I.H) con respecto a la Temperatura ambiente (T.A), y el 12 de enero por ser uno de los día en los que el sistema de enfriamiento no funcionó.

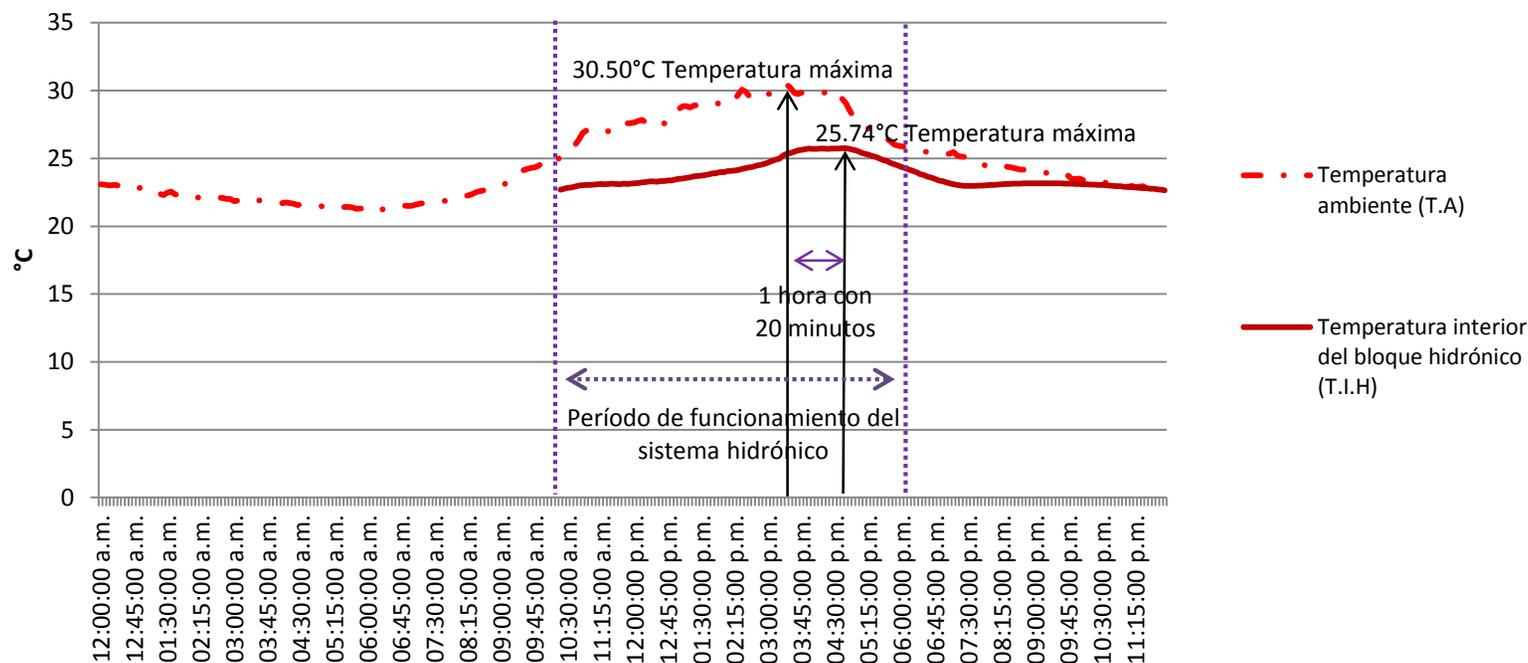
Tabla 23. Mínimo, máximo y promedio del día 08 de enero del 2015.

	Temperatura Ambiente °C	Humedad Relativa %	Temperatura punto de rocío	Temperatura interior del bloque	Temperatura de entrada del agua	Diferencia entre temperatura ambiente e interior del bloque °C
Mínimo	21.06	50.82	17.16	22.66	17.75	0.02
Máximo	30.50	81.66	21.32	25.74	25.36	5.85
Promedio	24.67	70.30	18.75	23.75	20.66	2.73



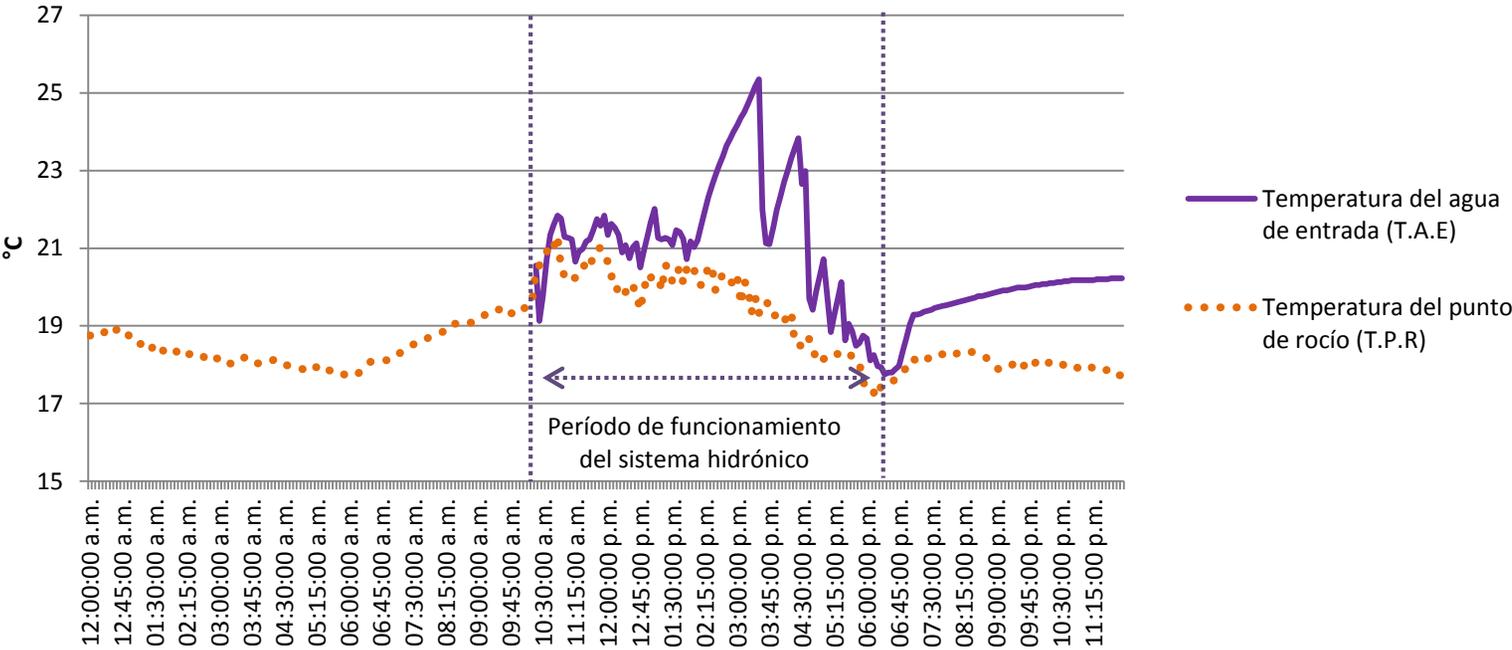
Gráfica 63. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el 08 de enero del 2015.

En la gráfica 63 se presenta el comportamiento de la T.A, H.R y T.P.R del 08 de enero del 2015. La T.A osciló entre los 22.68°C y los 30.50°C, la H.R fluctuó entre los 50.82% y 74.44%; y la T.P.R se encontró entre los 17.16°C y los 21.32°C. El sistema hidrónico funciona entre el período de las 10:30 am hasta las 6:30 pm y la velocidad de la bomba fue la mínima de 3 litros por segundo.



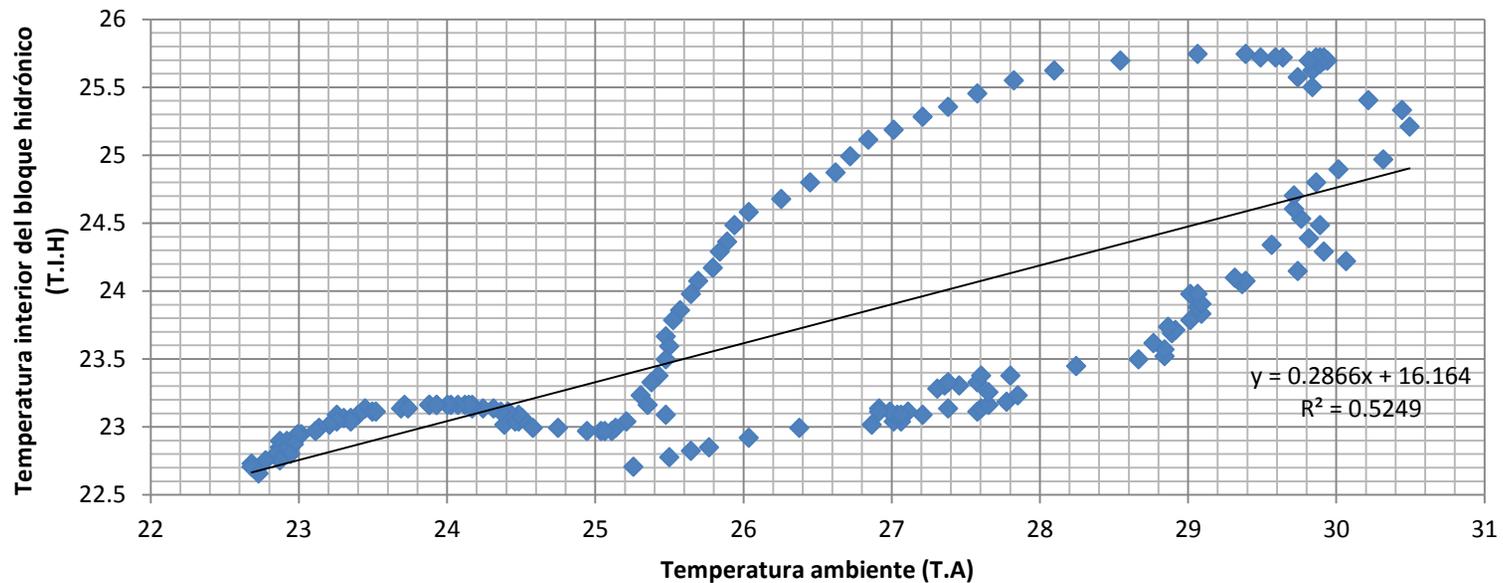
Gráfica 64. Comparación temperatura ambiente con la temperatura de la masa térmica del concreto con el funcionamiento del sistema hidrónico el día 08-01-15.

En la gráfica 64 se presenta el comportamiento de la T.A y de la T.I.H; se observa que la T.I.H no sobrepasa la T.A, siendo menor hasta las 10:50 pm donde ambas temperaturas son similares. En este día se registra la diferencia más elevada entre la T.A y la T.I.H durante los días que se realizaron las mediciones, siendo de 5.85°C. La T.A máxima es de 30.50 °C, se registra a las 3:20 pm; a esa hora la H.R fue de 51.36%, la T.P.R de 19.35°C y la T.I.H fue de 24.21°C. La T.I.H más alta registrada fue de 25.74°C a las 4:40 pm, por lo que se tuvo un retardo de la onda de calor de una hora con 20 minutos entre la T.A máxima y la T.I.H máxima. A las 4:40 pm la T.A fue de 29.39°C, la H.R de 52.44% y la T.P.R de 18.66°C.



Gráfica 65. Comparación temperatura de entrada del agua con la temperatura del punto de rocío el día 08 de enero del 2015.

En la gráfica 65 se presenta la comparación entre la T.P.R y T.A.E. La T.P.R osciló entre los 17.16°C y los 21.32°C, siendo este rango el límite para la T.A.E para evitar la condensación en el concreto. Como se observa la T.P.R es más elevada a la T.P.R de la ciudad de México, debido al clima cálido húmedo que posee la ciudad de San Pedro Sula, Honduras; por lo que la diferencia entre la temperatura al interior del bloque y la temperatura ambiente es menor. La T.A.E fluctuó entre los 17.75°C y los 25.36°C.

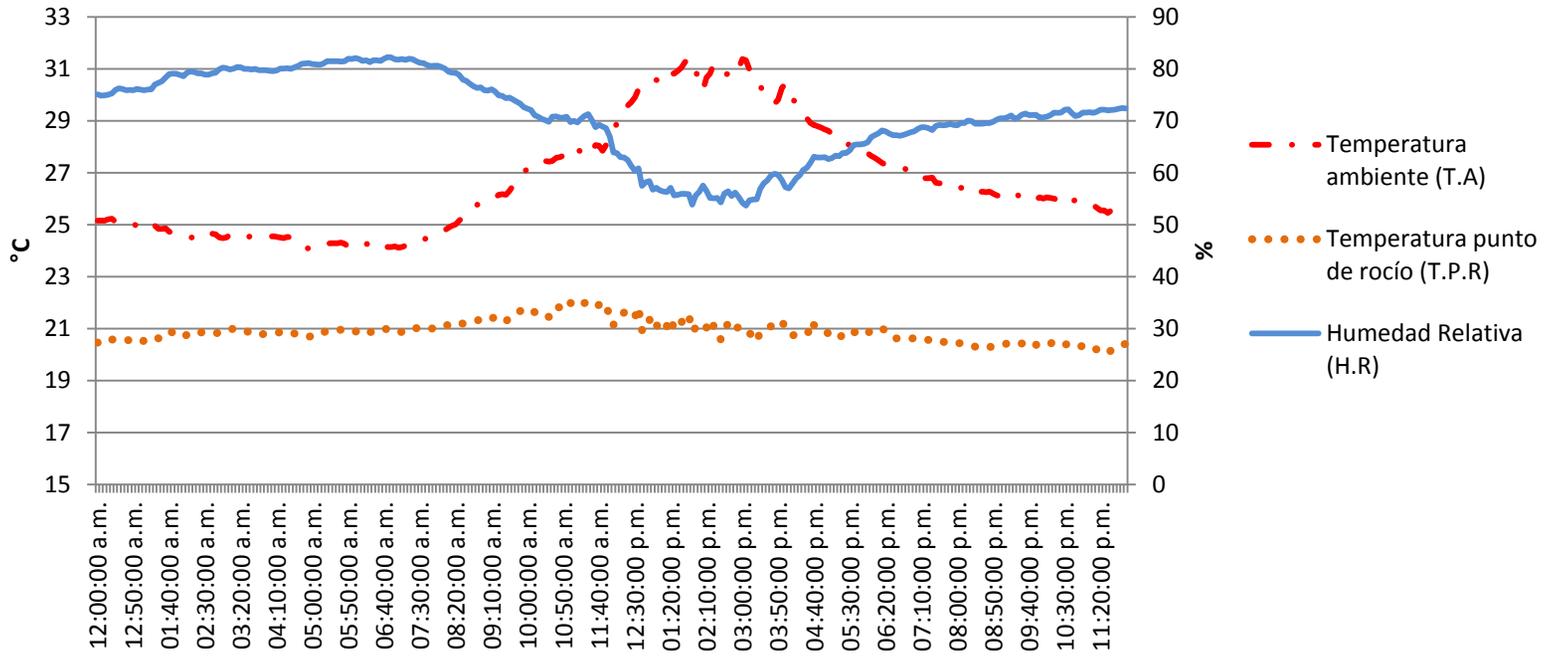


Gráfica 66. Correlación entre la Temperatura interior del bloque hidrónico y la Temperatura ambiente el día 08 de enero del 2015.

En la gráfica 66 se presenta la correlación entre la temperatura al interior del bloque hidrónico y la temperatura ambiente, presentando un coeficiente de correlación de 0.52, esta correlación varía según las condiciones climáticas del lugar y del día, debido a que en ninguno de los días medidos la correlación fue constante.

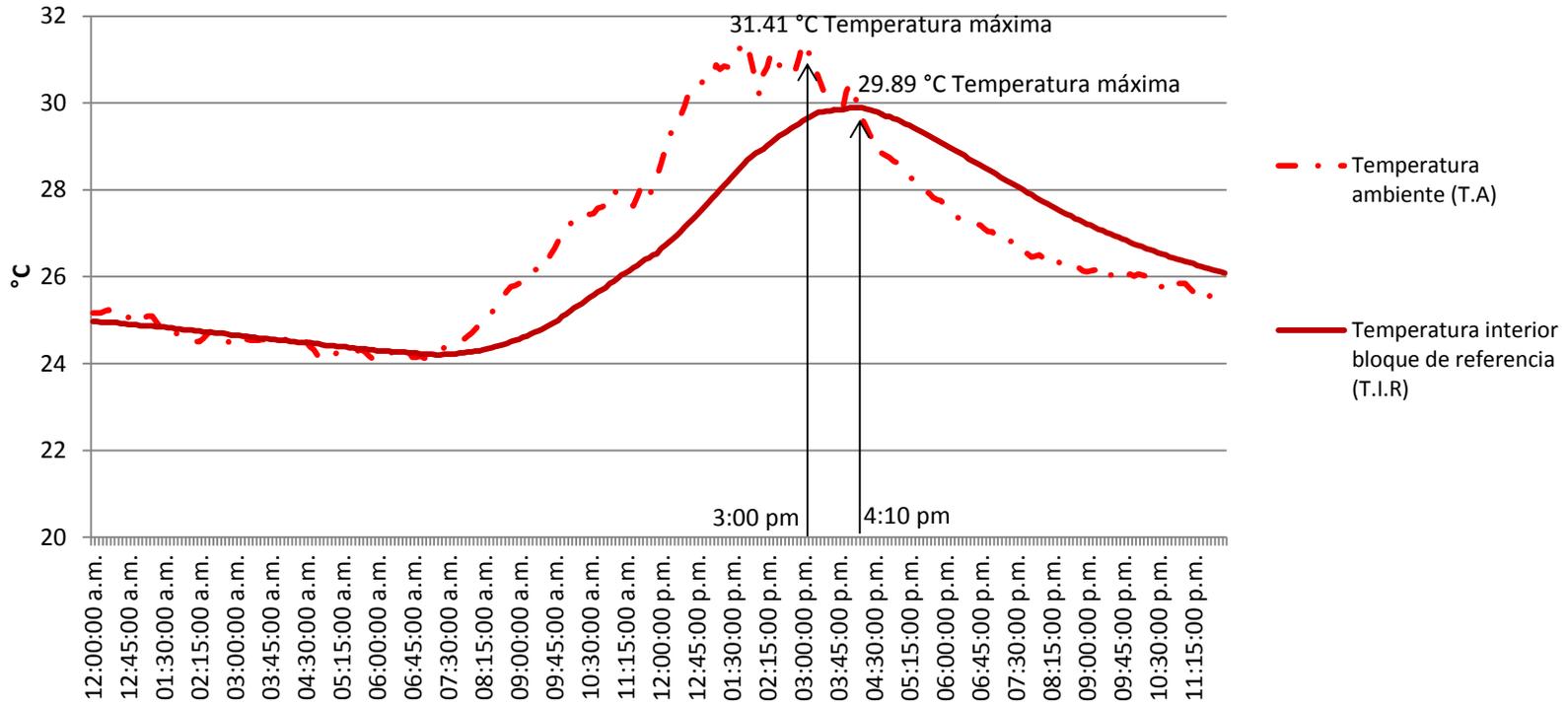
Tabla 24. Datos del día 12 de enero del 2015.

	Temperatura Ambiente °C	Humedad Relativa %	Temperatura punto de rocío °C	Temperatura interior del bloque °C	Temperatura de entrada del agua °C	Diferencia entre temperatura ambiente e interior del bloque °C
Mínimo	24.10	53.67	20.07	24.20	23.02	0.00
Máximo	31.41	82.26	22.09	29.89	25.62	2.98
Promedio	26.69	71.06	20.90	26.46	24.13	0.95



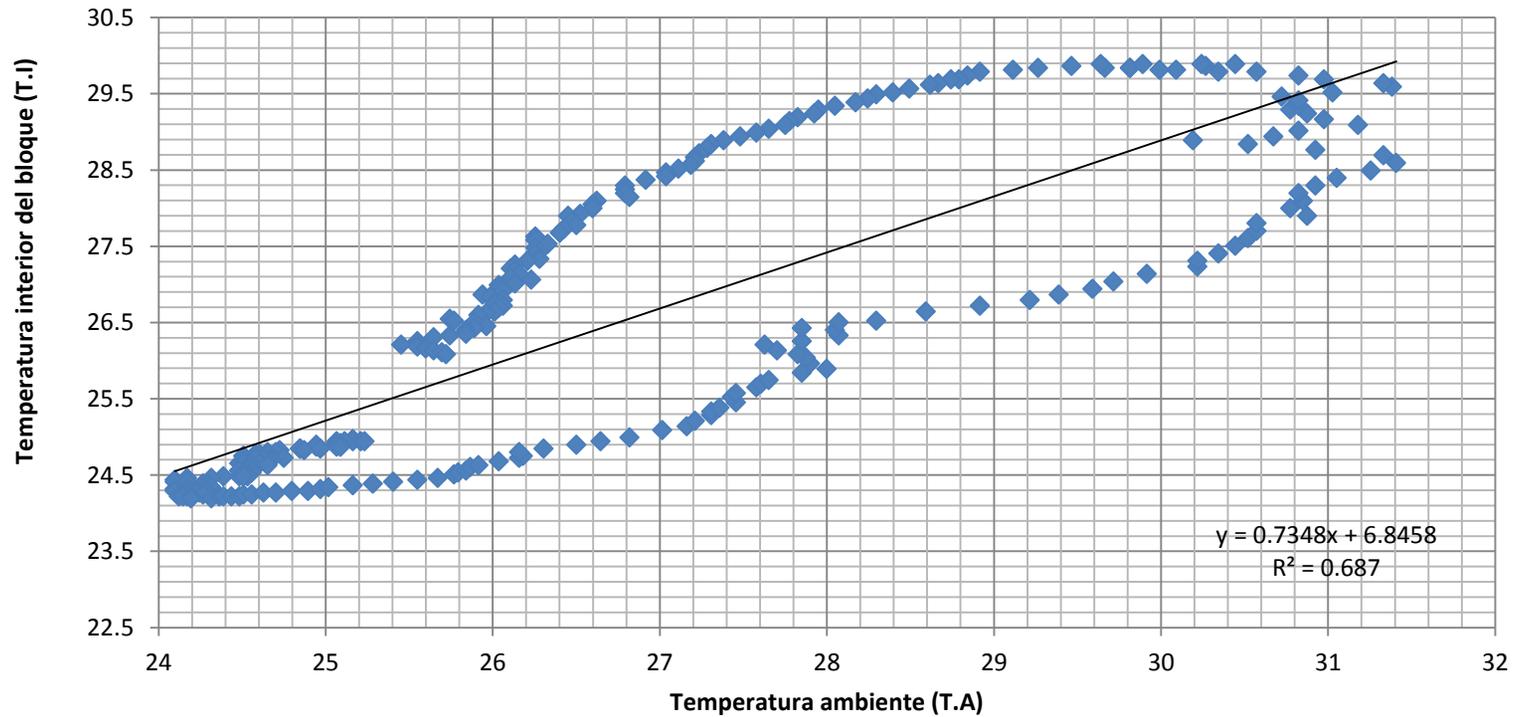
Gráfica 67. Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del punto de rocío el día 12 de enero del 2015.

En la tabla 24 y en la gráfica 67 se presentan los datos máximos, mínimos y promedio de las diferentes variables. En la gráfica 67 se presenta el comportamiento de la T.A, H.R y T.P.R del 08 de enero del 2015. La T.A osciló entre los 24.10°C y los 31.40°C, la H.R fluctuó entre los 53.67% y 82.26%; y la T.P.R se encontró entre los 20.07°C y los 22.09°C. Durante este día, el sistema hidrónico se encontró apagado con el objetivo de analizar el comportamiento de la Temperatura al interior del bloque sin el sistema, debido a que no se realizó el bloque de referencia por la falta de instrumentos de medición.



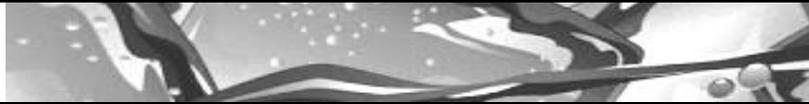
Gráfica 68. Comparación de la temperatura ambiente con la temperatura al interior del bloque el día 12 de enero del 2015.

En la gráfica 68 se presenta el comportamiento de la temperatura ambiente con la temperatura de la masa térmica del concreto sin el funcionamiento del sistema hidrónico. Se puede observar que la T.I.R tiene un comportamiento similar a la T.A, sobrepasando la T.A después de las 4:00 pm, caso contrario al comportamiento de la T.I.R cuando el sistema hidrónico se encuentra en funcionamiento donde no sobrepasa la T.A. La T.A máxima registrada es de 31.41°C a las 3:00 pm, a esta hora la H.R fue de 54.25%, la T.P.R de 21.05°C y la T.I.R de 29.59°C. La T.I.R máxima fue de 29.89 °C entre las 4:00 pm y las 4:10 pm, por lo que se tiene un retardo de la onda de calor de una hora con 15 minutos aproximadamente; presentando una diferencia entre 40 y 25 minutos entre el día 08 de enero. La diferencia máxima que se da entre la T.A y la T.I.R es de 2.98°C a las 12:35 pm, donde la T.A es de 30.21°C y la T.I.H de 27.23°C.



Gráfica 69. Correlación entre la temperatura al interior del bloque y la temperatura ambiente el día 12 de enero del 2015.

En la gráfica 69 se muestra la correlación entre T.I.R con respecto a la T.A, teniendo un coeficiente de relación de 0.68. En la gráfica se observa que el coeficiente aumenta en comparación con la gráfica 66, donde el sistema hidrónico estuvo funcionando, lo cual indica que la T.A posee mayor incidencia en el comportamiento de la T.I.R sin el sistema de enfriamiento.



CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS
Resultados clima cálido-húmedo



Conclusiones y Recomendaciones





El agua posee una capacidad para almacenar energía superior que la mayoría de todos los materiales comunes. Por lo tanto una cantidad de agua relativamente pequeña absorbe una gran cantidad de calor que produce un aumento de temperatura de poca magnitud. Por esta razón el agua se convierte en un agente refrigerante muy útil que se utiliza en los sistemas de enfriamiento de los automóviles y de otros motores; por lo tanto se considera un elemento para enfriar la masa térmica de los materiales.

Partiendo del principio anterior, se han desarrollado sistemas que emplean el agua como medio para generar confort o disminuir el consumo de los equipos de climatización en los espacios internos. Entre los sistemas pasivos que emplean el agua se encuentra el techo-tanque, con el cual se logra reducir el flujo de calor del exterior hacia los espacios internos; pero solamente es aplicable en lugares con climas extremos, donde la temperatura es elevada durante el día y disminuye drásticamente durante la noche. Esto permite enfriar el agua, utilizando el cielo como sumidero de calor. Para lugares con clima cálido-húmedo, como es el caso de la ciudad de San Pedro Sula en Honduras, la eficiencia de este sistema de enfriamiento se encuentra limitado debido a la alta presión de vapor en el aire, a la nubosidad y a la poca diferencia de temperaturas diurnas-nocturnas; por lo que no se puede realizar de forma pasiva el enfriamiento del agua (no se logra efectuar la pérdida de calor). Debido a esta razón el sistema pasivo se descarta para poder implementarlo en el caso de estudio.

Los sistemas de enfriamiento hidrónico activos modifican la temperatura de las paredes, techo y/o suelo de un espacio. Este sistema funciona debido a que la temperatura del cuerpo humano es más o menos equivalente a la media de la

temperatura radiante y a la temperatura del aire; por lo tanto la temperatura radiante es la temperatura media de todos los objetos que rodean el cuerpo. El sistema de enfriamiento hidrónico consiste en un conjunto de tuberías de PEX instaladas en el interior de las paredes, techo o suelo de un espacio interior.

A diferencia de los sistemas de aire acondicionado, los sistemas de enfriamiento hidrónico no afectan la calidad del aire interior, debido a que no genera movimiento del aire ni lo renuevan; pero reducen considerablemente la cantidad de ventilación mecánica que se necesita para garantizar el confort, y disminuyen el número de conductos que requeriría un sistema convencional de aire acondicionado (Hernández, 2014).

En la investigación, se aborda el fenómeno térmico, específicamente en la reducción de la ganancia de calor por las condiciones ambientales externas (Radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa), empleando un sistema hidrónico para enfriar la masa térmica al interior del concreto. Con el objetivo de disminuir la temperatura en la superficie al interior de los espacios. En la etapa experimental, se comprueba la hipótesis en la que se indica que el sistema de enfriamiento hidrónico disminuye la temperatura de la masa térmica del concreto; y con los resultados obtenidos del experimento en los tres escenarios se concluye lo siguiente:

1. Cuando el concreto se encuentra expuesto a la radiación solar alcanza temperaturas arriba de los 40°C, lo cual incrementa la temperatura en las superficies del material en contacto con el espacio interior de los edificios. Con el experimento desarrollado en la azotea, se comprueba que el sistema de enfriamiento hidrónico absorbe parte del



calor recibido por la radiación solar, disminuyendo la temperatura al interior del bloque hasta 10°C y amortiguando la transferencia de calor de la superficie exterior a la interior hasta 5.71°C .

El sistema, en esta etapa del experimento, presenta un porcentaje de enfriamiento con respecto a la diferencia máxima de la Temperatura interior de ambos bloques (T.I.H y la T.I.R) de 31.82% y con la diferencia máxima entre la superficie inferior de ambos bloques (T.S.I.R y T.S.I.H) es de 25.49%. Asimismo el porcentaje de enfriamiento varía según las condiciones de clima. El día 02 de marzo del 2015, el sistema disminuyó la temperatura al interior 10°C . Este día se registró la temperatura de punto de rocío más baja, por lo tanto la temperatura del agua se enfrió hasta los 2°C .

2. Cuando los bloques se colocaron al interior del Laboratorio de Interacción con el Medio, se obtuvo una disminución máxima entre la temperatura al interior de ambos bloques de concreto de 4.17°C y una diferencia máxima con respecto a la temperatura ambiente y la temperatura interior del bloque hidrónico de 6.16°C . La diferencia de temperatura al interior de ambos bloques fue menor en comparación a cuando se encontraron expuestos a la radiación solar, por lo tanto el sistema de enfriamiento presenta un mejor funcionamiento para absorber el calor generado por la radiación.

Asimismo, el sistema hidrónico, al no estar expuesto el concreto a la radiación, generó que el material enfriara por radiación la superficie en contacto al bloque y parte de la superficie del bloque de referencia, como se muestra en la imagen 65. Por lo tanto el sistema al encontrarse en

espacios interiores tiene la función de absorber el calor generado por las personas, los equipos y la iluminación, y de poder enfriar las superficies por medio de radiación; contrario a los resultados del experimento en el inciso 1, donde el sistema solamente se concentró en disminuir la transferencia de calor generado por la radiación solar.

El sistema, bajo condiciones de espacios interiores tuvo un porcentaje de enfriamiento con respecto a la diferencia máxima entre la Temperatura interior de ambos bloques (T.I.R y T.I.R) de 20.72%. Este porcentaje se encuentra sujeto a las condiciones de Temperatura ambiente (T.A), Humedad relativa (H.R) y Temperatura de punto de rocío (T.P.R).

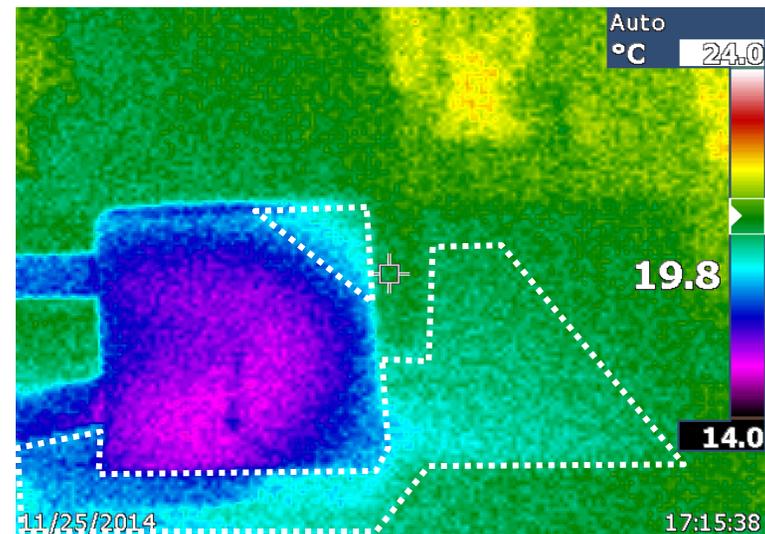


Imagen 65. Imagen térmica de los bloques el día 25 de noviembre del 2014.

3. El enfriamiento del sistema depende del dimensionamiento de la tubería y especialmente a su separación. Por lo tanto



si se tiene una distancia mayor a 15 cm el grosor de la tubería debe de ser mayor a $\frac{1}{2}$ ". En la imagen 64 se observa que en las esquinas del bloque con el sistema hidrónico, la temperatura es menor, por lo que a medida que a mayor distancia se encuentra la tubería de la superficie el funcionamiento del sistema decrece.

4. Cuando se desarrolló el experimento en San Pedro Sula, Honduras; disminuyó la temperatura al interior del bloque de concreto presentando una diferencia máxima de 5.85°C en comparación con la Temperatura ambiente. Esta diferencia se encontró sujeta a la temperatura del aire, humedad relativa, temperatura de punto de rocío y a la velocidad del flujo del agua. En este experimento se trabajó con dos velocidades del flujo del agua, 3 y 5 litros por segundo. Con los resultados se muestra una mayor diferencia entre la temperatura al interior del bloque y la temperatura ambiente con la velocidad de 3 litros por segundo. Por lo tanto entre menor es la velocidad, mayor es el enfriamiento del sistema.
5. Como se indicó en el inciso anterior, la velocidad del flujo del agua influye en el porcentaje de enfriamiento de calor del sistema. Para el experimento del inciso 1 (cuando el concreto se expuso a la radiación solar), la velocidad del agua fue de 1 litro por segundo. En el experimento del inciso 2, la velocidad fue de 5 litros por segundo. Por lo tanto se recomienda que la velocidad del flujo del agua no sea mayor a 1 litro por segundo para poseer mejores resultados.
6. Con respecto al tiempo de enfriamiento, se concluye que se encuentra ligado a la temperatura de punto de rocío,

debido a que el sistema disminuye la temperatura en un tiempo más corto cuando la temperatura del agua es menor. Esto se pudo observar en el experimento realizado en el laboratorio, en donde el día 21 de noviembre del 2014 el sistema disminuyó la temperatura 3.9°C en cuatro horas y media; en cambio el 25 de noviembre del 2015 el sistema redujo la temperatura 4.17°C en tres horas. Esta variación de temperatura y tiempo se debe a que el día 25 de noviembre la temperatura del punto de rocío fue menor que la del día 21 de noviembre, por lo tanto la Temperatura del agua de entrada (T.A.E) al sistema de enfriamiento fue menor.

7. El sistema de enfriamiento hidrónico posee diversas ventajas sobre otros sistemas, lo que ha hecho que su implementación en las edificaciones vaya en aumento. Entre las desventajas que posee es la utilización de equipos que utilizan energía eléctrica para enfriar el agua.

Entre las opciones para el enfriamiento del agua del sistema de forma pasiva es por medio de la refrigeración geotérmica, el cual se basa en que la temperatura de la tierra es inferior a la del aire exterior durante la mayor parte del año; por lo tanto el calor procedente del edificio puede almacenarse en el subsuelo; por la alta inercia térmica, la baja conductividad del subsuelo y por ser un sumidero de calor. En la investigación se analiza la propuesta de enfriar el agua de la tubería empleando una cisterna de concreto en la que se almacena el agua. Con los resultados obtenidos se considera que la temperatura del agua de la cisterna no es lo suficientemente baja para enfriar el agua del sistema radiante; esto se debe a que el agua se calienta durante el recorrido al llegar a la cisterna,



por lo tanto se tendría que bajar la temperatura del agua de la cisterna para que se pueda emplear como medio para enfriar el agua de la tubería del sistema de enfriamiento hidrónico (Ver Anexo 4).

Entre las opciones que emplean energías renovables que se presentan en el mercado para enfriar el agua se encuentra el sistema frío solar de ClimateWell, el cual genera agua fría y agua caliente según lo que se desee en el transcurso del año, utilizando el sol como fuente de energía. El sistema ha tenido auge en Europa principalmente, por lo que sería importante analizar su funcionamiento para corroborar si la temperatura del agua que genera es la necesaria para enfriar la masa térmica de las viviendas en climas cálido-húmedos.

- Una limitante del sistema es la condensación, por lo tanto el sistema se encuentra restringido por la temperatura del punto de rocío, entre más bajo es esta temperatura se puede emplear agua más fría en el sistema, generando un mayor porcentaje de enfriamiento de la masa térmica del concreto. Esto se observa con los resultados obtenidos en la ciudad de San Pedro Sula y con la ciudad de México; donde se obtuvo mejores resultados en un clima seco que en el húmedo. Por lo tanto, para el clima de la ciudad de San Pedro Sula se recomienda que el espacio donde se va a encontrar el sistema se encuentre aislado de las condiciones climáticas externas para que el sistema posea un buen rendimiento, y que se cuente con un sistema de ventilación/deshumidificación como complemento al sistema de enfriamiento hidrónico para el movimiento y el cambio del aire en el espacio (ver figura 69). Asimismo, evitar que se introduzca al espacio interior las condiciones

de temperatura ambiental y humedad relativa del exterior, especialmente para este tipo de climas.

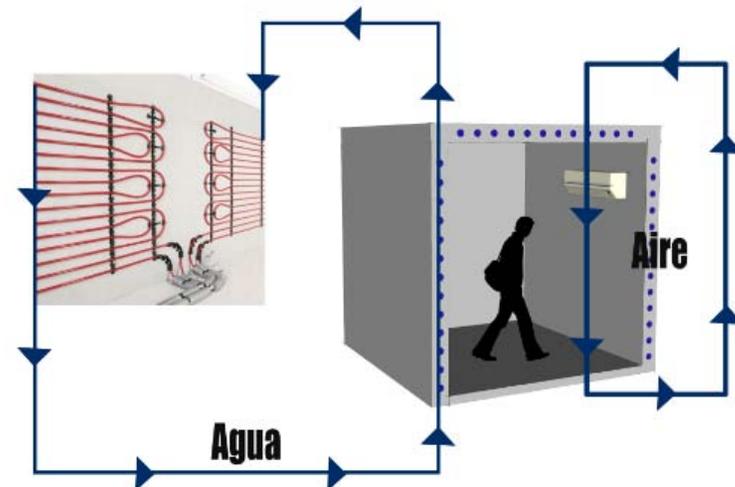


Figura 69. Esquema de sistema hidrónico con el sistema del aire acondicionado. Fuente: Autoría propia.

Con el desarrollo tecnológico se han generado sistemas de ventilación y deshumidificación que utilizan la energía solar para su funcionamiento; por lo que se recomienda emplear estos sistemas como complemento al sistema de enfriamiento hidrónico.

También es importante utilizar sistemas automatizados que monitoreen la temperatura del agua acorde a las variaciones de la temperatura del punto de rocío del espacio interior, con el fin de evitar la condensación.

- Con la realización de las gráficas de correlación, se observa que 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.

10. En el caso de San Pedro Sula, los valores de correlación no solamente dependieron de la temperatura ambiente, sino que también de la velocidad del flujo del agua, siendo mayor cuando la velocidad fue de 5 litros por segundo. Esto se debe a que el enfriamiento del concreto es menor por lo tanto el comportamiento de la temperatura al interior del concreto es similar a la temperatura ambiente; caso contrario a cuando se empleó la velocidad de 3 litros por segundo (ver anexo 2).
11. Para la investigación se analiza el concreto como material para enfriar la masa térmica con el sistema hidrónico debido a que es el material más utilizado en Honduras para la construcción; al mismo tiempo por sus características y especialmente por el rango de temperatura a las que el material puede soportar sin afectar su resistencia. Dentro de este rango se obtiene las temperaturas menores de 100°C no poseen influencia en el concreto y solamente a temperaturas extremadamente bajas, que producen el congelamiento del agua generan debilitamiento en el concreto, pero con aditivos aireantes se puede contrarrestar estos efectos. Por lo tanto la temperatura del agua del sistema de enfriamiento no influye en la resistencia del concreto, debido a que no se manejan temperaturas arriba de los 100°C ni debajo de los 0°C.

12. Entre las ventajas que se mencionaron en el capítulo 5, las que se comprobaron con el experimento son las siguientes:

- El sistema es más efectivo en el modo de enfriamiento cuando la circulación del agua absorbe la ganancia solar directamente del material envolvente.
- La posible manipulación de la masa interna de un edificio. Esto se refiere a que el sistema enfría la masa térmica del edificio por lo que disminuye la transferencia de calor hacia el interior.
- Posee un bajo costo de mantenimiento.
- Tiene facilidad para acoplarse con otros sistemas de acondicionamiento.
- Es un sistema invisible debido a que no interfiere con la arquitectura original.

Aplicaciones del sistema:

A continuación se plantea de forma puntual las aplicaciones del sistema en una edificación:

- El sistema cuando no se encuentra afectado por la radiación solar directa e indirecta, se emplea para absorber las cargas de calor generadas por los equipos eléctricos, las luminarias y las personas. Al mismo tiempo la superficie con el sistema de enfriamiento hidrónico enfría por radiación las superficies que lo rodean.



- Se emplea para amortiguar el calor generado por la radiación solar introducida al interior de los espacios por las ventanas.
- Se utiliza para amortiguar el calor absorbido por el concreto por la radiación solar.

Recomendaciones:

Para mejorar el experimento se realizan las siguientes recomendaciones:

- Se considera que para mejorar el experimento es necesario realizarlo con un sistema mecánico que enfríe el agua y no desarrollarlo de manera manual, con el fin de obtener un mayor control de la temperatura del agua de entrada y evitar los picos que se generaban en las gráficas. Al mismo tiempo realizarlo en un área más extensa del material para observar el enfriamiento del concreto con mayor recorrido del agua.
- Realizar el experimento con la misma dosificación de concreto en ambas localidades, para descartar que la dosificación o la composición influya en los resultados.
- Utilizar la misma velocidad del flujo del agua en los diversos escenarios.
- Realizar el experimento en un espacio cerrado para comprobar si el sistema disminuye la temperatura al interior de un espacio y corroborar la disminución en el consumo de energía en los sistemas de aire acondicionado.

- Al analizar los resultados del experimento en el inciso 1 y 2 de las conclusiones, 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.

Futuras líneas de investigación.

- Realizar estudios sobre otros fluidos para disminuir el tiempo del enfriamiento de la masa térmica y mejorar el funcionamiento del sistema.
- Realizar investigaciones sobre otros tipos de materiales en los que se instale el sistema hidrónico y poder comparar resultados con el concreto.
- Desarrollar el experimento con diferentes resistencias del concreto con las mismas condiciones climáticas.
- Analizar el comportamiento del sistema en el concreto cuando se tiene presencia del acero estructural, para comprobar si el diferencial de temperatura del agua no influye en la resistencia del material.
- Analizar el sistema con diferente diámetro y separación de la tubería en una superficie más extensa para analizar la pérdida de calor del agua según la distancia de recorrido de la tubería.



- Realizar pruebas en escala 1:1, en los módulos de la azotea, para analizar el comportamiento térmico al interior del espacio con y sin el sistema hidrónico.
- Realizar un estudio de los modelos de software que simulan el funcionamiento del sistema hidrónico en los edificios y compararlos con mediciones reales.
- Desarrollar un estudio económico del sistema y compararlo con los sistemas tradicionales de aire acondicionado, para obtener un ahorro monetario del sistema y la tasa de retorno.





Referencias



REFERENCIAS

**Bibliografía.**

Addington, M., & Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies for architecture and design professions*. Oxford: Architectural Press.

Carrier air conditioning company. (2009). *Manual de aire acondicionado*. Barcelona: Marcombo.

Diamant, R. (1979). *Aislamiento térmico y acústico de edificios*. Madrid: H. Blume Ediciones.

Giovani, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. United State: Van Nonstrand Reinhold.

Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. United State: Van Nonstrand Reinhold.

González, E., Hinz, E., De Oteiza, P., & Quiros, C. (1986). *Proyecto clima y arquitectura*. México: G. Gili. S.A de C.V.

Gore, A. A. (2006). *An inconvenient truth*. New York: Rodale.

Hausladen, Saldanha & Liedl (2006). *ClimateSkin*. Berlín: Birkhäuser.

Holcim. (2008). *Manual Técnico de Construcción*. México: Fernando Porrúa.

Jiménez, P., García, A., Morán, F. (2009). *Hormigón armado*. México: Editorial Gustavo Gili.

Kottas, D. (2011). *Arquitectura y Construcción: Hormigón*. Barcelona: Links.

Lozano, Á. L. (2008). *La piel del edificio*. Cali: Universidad del Valle.

Mazria, E. (1979). *La arquitectura Bioclimática*. Rodale Press.

Meadows, D. H., Randers, J., & Meadows, D. (1992). *Más allá de los límites del crecimiento*. México, D.F: El Pais Aguilar.

Miranda, Á. (2007). *Técnicas de climatización*. Barcelona: Alfaomega.

Moe, K. (2010). *Thermally active surface in architecture*. New York: Princenton Architectural Press.

Odum, Eugene P. (1995). *El vínculo entre las ciencias naturales y las sociales*. México. Editorial Continental, S.A de C.V

Olgay, V. (1998). *Arquitectura y clima : manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.

Patricio, I. (1996). *La construcción de la arquitectura*. Cataluña: Instituto de tecnología de la construcción de Cataluña.

Parker, H. (1982). *Diseño simplificado de concreto reforzado*. México: Editorial Limusa.

Hernández, C. (2014). *Un Vitruvio ecológico: principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible*. Barcelona: Gustavo Gilli.



- Ramírez, J. D., Morillón, D., Hernández, V., & Mesa, N. (2007). *Sistemas pasivos de climatización, para la descarga de calor por muros y techos*. México: dgapa.
- Sánchez Quintana, F. (1992). *Instalaciones de calefacción por suelo radiante*. Sevilla: PROGENSA.
- Santamouris, M. (2007). *Advances in Passive Cooling*. Londres: Earthscan.
- Wassouf, M. (2014). *De la casa pasiva al estándar, la arquitectura en climas cálidos*. España: Gustavo Gili.
- Watson, D. (1979). *Energy conservation through building design*. McGraw-Hill Co., N.Y., USA.
- Hemeroteca.**
- Baskin, E. (2005). *Evaluation of hydronic force-air and radiant slab heating and cooling systems*. *ASHRAE Journal*, 525-534.
- Bean, R., W. Olesen, B., & Woo Kim, K. (2010). *Part 1 History of radiant heating and cooling systems*. *ASHRAE Journal*, 40-47.
- Bean, R., W. Olesen, B., & Woo Kim, K. (2010). *Part 2 History of radiant heating and cooling systems*. *ASHRAE Journal*, 50-55.
- Carli, M. D., Zarrela, A., & Zecchin, R. (2009). *Comparison between a radiant floor and two radiant walls on heating and cooling energy demand*. *ASHRAE Journal*, 563-572.
- Crossette, B. (2011). *Estado de la Población Mundial 2011*. Nueva York: UNFPA.
- Enteria, N., & Mizutani, K. (2011). *The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2095-2122.
- Gómez Mejía, C. (2013). *Evaluación de la zeolita como desecante aplicado a la arquitectura del clima tropical cálido húmedo*. México, D.F: Tesis Maestría en Arquitectura en el campo de Tecnología. Universidad Autónoma Nacional de México.
- González Gamero, G. (2007). *Agua encapsulada como amortiguador térmico sobre losas de concreto*. Colima, México: Tesis Maestría en Arquitectura con especialidad en Diseño Bioclimático. Universidad de Colima, México.
- Hernández Gómez, V.H (2006). *Estudio del muro escudo a la radiación solar como sistema pasivo de enfriamiento y parte de la envolvente de la edificación*. Ciudad Universitaria, México: Tesis para obtener el grado de Doctor en ingeniería energía-diseño bioclimático. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Holmes, H. D., & MacPherson, M. (2011). *Walls to heat, cool*. *ASHRAE Journal*, 62-66.



- Leigh, S., Song, D., Lee, S., & Hwang, S. (2005). A study for evaluation performance of radiant floor cooling integrated with controlled ventilation. *ASHRAE*, 71-82.
- Mabel Méndez, F. (2010). *Criterios de diseño bioclimático para la vivienda urbana en el clima tropical húmedo de San Pedro Sula*. San Pedro Sula, Honduras: Tesis Master energías renovables, arquitectura y urbanismo. Universidad Internacional de Andalucía, España.
- Monroy, M. (2006). *Calidad Ambiental en la edificación para las Palmas de Gran Canaria. Islas Canarias*. Las Palmas de Gran Canaria: Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria.
- Nall, D. H. (2013). Part 1. Thermally active floors. *ASHRAE Journal*, 32-44.
- Nall, D. H. (2013). Part 2 Design. Thermally active floors. *ASHRAE Journal*, 36-46.
- Nall, D. H. (2013). Part 3 Making it work. Thermally active floors. *ASHRAE Journal*, 54-61.
- Nicol, F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, 628-637.
- Olesen, B. (2008). Radiant floor cooling systems. *ASHRAE Journal*, 16-22.
- Olsen, B. W. (2012). Using building mass to heat and cool. *ASHRAE Journal*, 44-52.
- Scheatzle, D. (2006). Combining radiant and convective systems with thermal mass for a more comfortable home. *ASHRAE Journal*, 253-268.
- Seo, J.M., Song, D. & Lee, K. H. (2014). Possibility of coupling outdoor air cooling and radiant floor cooling under hot and humid climate conditions. *Energy and Buildings* 81, 219-226
- Seong-Ryong, R., Myoung-Souk, Y., Jae-Han, L., & Kwang-Woo, K. (2004). A study on the control methods for radiant floor heating and cooling system in residential building. *ASHRAE Journal*, 106-116.
- Song, D. & Kato, S. (2004). Radiational panel cooling system with continuous natural cross ventilation for hot and humid regions. *Energy Building* 36, 1275-1280.
- Rosales Cardoza, E. N., & Zelaya López, E. I. (2012). *Implementación del diseño Tropical bioclimático en San Pedro Sula*. Tegucigalpa, Honduras: Tesis de posgrados. Master en administración de proyectos. UNITEC.
- Valeriano, A. (2011). *Iluminación natural en arquitectura: validación de los métodos de cálculo en la ciudad de México*. Ciudad de México, México. Tesis de maestría en Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vargas Palma, G. A. (s.f.). *SISTEMAS EN FACHADAS. Hacia la bioclimática vertical en la Ciudad de México*. Ciudad



Universitaria, México: Tesis Maestría en Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Zeevaert Alcántara, L. B. (1981). *Passive approaches to solar architectural design for Mexico*. Tesis de maestría en Artes, Facultad de Estudios de Arquitectura, Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad de Sheffield, Inglaterra.

Internet.

ARFRISOL. (2009). *ARFRISOL*. Recuperado el 17 de Mayo de 2013. Obtenido de <http://www.arfrisol.es/ARFRISOLportal/>

Banco Central de Honduras (2012). *Barrido de Edificaciones*. Recuperado el 10 de Marzo del 2014. Obtenido de <http://www.bch.hn>

Baquadano, K. (02 de Mayo de 2013). *Negligencia de la Ene agobia a sampedranos*. Recuperado el Mayo de 05 de 2013. Obtenido de www.laprensa.hn.

Bainbrindge, D. (1981). *A water wall solar design manual*. Recuperado el 28 de junio del 2014. Obtenido de www.builditsolar.com

ClimateWell (2013). *Catálogo comercial*. Recuperado el 03 de octubre del 2013. Obtenido de www.climatewell.com

Energy design resources (2003). *Radiant cooling*. Recuperado el 10 de agosto del 2014, de www.energydesignresources.com

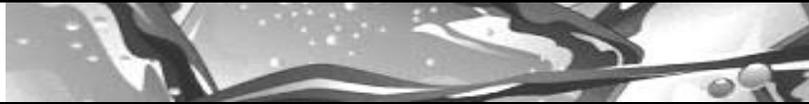
Funcosa (2014). Recuperado el 05 de octubre del 2014. Obtenido de www.funcosa.com.mx

Fundación de la energía de la comunidad de Madrid y Consejería de economía y hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y minas. (2011). *Guía del frío solar: ahorro y eficiencia energética con refrigeración solar*. Madrid. Recuperado el 21 de noviembre del 2013. Obtenido de www.fenercom.com

Hooper, E. (2014). *Garden & Greenhouse Cover Story - Sun-Lite® Thermal Storage Tubes*. Garden & Greenhouse Magazine, January issue. Recuperado el 28 de septiembre del 2014. Obtenido de www.gardenandgreenhouse.net

Juárez, A. (25 de Febrero de 2010). Prototipo de aire ahorra 50 por ciento de energía eléctrica. *Gaceta UNAM*(4,226). Recuperado el 16 de Mayo de 2013. Obtenido de www.gaceta.unam.mx

López, P. (24 de Enero de 2013). Desarrolla el CIE segundo prototipo de refrigerador solar. *Gaceta UNAM*(4,484). Recuperado el 16 de Mayo de 2013. Obtenido de www.gaceta.unam.mx



Méndez, M. (06 de Agosto de 2014). *San Pedro Sula consume hasta mil megas de energía en horas pico*. Recuperado el 13 de Agosto de 2014. Obtenido de www.laprensa.hn

NOAA: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division de Estados Unidos (13 de junio del 2015). Recuperado el 13 de junio del 2015. Obtenido de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/sunrise.html>

Redacción La Prensa. (29 de Marzo de 2013). *Reportan niveles récords de demanda eléctrica en menos de 3 meses*. Recuperado el 05 de Mayo de 2013. Obtenido de www.laprensa.hn

Romero, L. (29 de Julio de 2010). Sistema de aire acondicionado. *Gaceta UNAM*(4,262). Recuperado el 16 de Mayo de 2013. Obtenido de www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2010_439.html

Sastry, G. (2012). *First radiant cooled commercial building in india – critical analysis of energy, comfort and cost*. Recuperado el 15 de julio del 2014. Obtenido de www.aeecenter.org

Servicio Meteorológico de Honduras. Recuperado el 15 de Enero del 2014. Obtenido de www.smn.gob.hn/web/node/2094.

Viega, 2014. *ProRadiant Heatind and Cooling Design Manual*. Recuperado el 08 de junio del 2014. Obtenido de www.viega.us

World Business Council for Sustainable Development. (2009). *The Cement Sustainability Initiative*. Washington: WBCSD. Recuperado el 21 de mayo del 2014. Obtenido de www.wbcscd.org



ANEXOS

ANEXOS



ANEXOS



ANEXO A. Sistemas de acondicionamiento de aire.

Los sistemas de acondicionamiento de aire tienen como objetivo principal proporcionar un ambiente confortable a los ocupantes de un edificio. Este ambiente confortable es el resultado del control simultáneo de humedad, temperatura, limpieza y distribución del aire, incluyendo el nivel acústico adecuado (Carrier air conditioning company, 2009, p.p 496).

Para que estos sistemas funcionen, el aire primero debe de llegar a los difusores a través de conductos desde un acondicionador donde se hace una limpieza del aire y pasa a través de intercambiadores de calor por cuyo interior circulan los medios o agentes de calefacción o refrigeración. Dependiendo el tipo de sistemas, algunas unidades terminales de inducción que se sitúan dentro de una habitación, tienen serpentines secundarios que proporcionan un suplemento de frío o calor (Carrier air conditioning company, 2009, p.p 496).

A.1 Calidad del aire.

La habitabilidad considera como elementos principales la salud humana y la comodidad ambiental en los edificios, los cuales dependen de un aporte continuo de aire exterior con la pureza y calidad adecuada, que carezca de contaminantes que dañen el organismo, produzca molestias o sean ofensivos al olfato.

En las ciudades, la gran mayoría de los edificios se encuentran sometidos a numerosas fuentes de contaminación artificial producidas por actividades industriales, comerciales o las generadas por el tráfico. Al mismo tiempo los edificios son fuentes de contaminación, debido a que las actividades realizadas en el propio edificio pueden ser fuentes de contaminación interna y generar

importantes molestias a sus ocupantes. Se recomienda controlar el recorrido del aire interno para evitar que el aire contaminado fluya a través de áreas limpias. Esto se logra generando espacios cerrados y con sistemas mecánicos que purifiquen el aire del exterior para poder introducirlo al interior con los niveles de pureza requeridos.

En el diseño se debe de evitar las posibles fuentes de contaminación interior y la inmisión de contaminantes exteriores, aplicando por ello criterios de diseño de renovación natural o forzada para expulsar los contaminantes y evitar la transmisión de aire contaminado entre locales habitados.

La exposición al CO² en grandes cantidades puede generar problemas para la salud, afectando a individuos que padecen deficiencias circulatorias (siendo particularmente susceptibles los enfermos con angina de pecho, así como aquellos con arterioesclerosis), hasta una intoxicación aguda por inhalación de grandes cantidades del contaminante en espacios cerrados y/o en un lapso de tiempo corto.

En México se ha generado una norma con respecto a la concentración permisible de monóxido de carbono, con el fin de evaluar la calidad de aire, con fines de proteger la salud de la población. La Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, señala que la concentración de monóxido de carbono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o lo que es equivalente a 12,595 µg/m³ en promedio móvil de ocho horas una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible.

En el capítulo III de la ventilación, iluminación y dimensiones de las construcciones del Reglamento de Ingeniería Sanitaria Relativo a

Edificios, se encuentra el ART. 38, el cual señala que para los locales a los que se les deba suministrar ventilación artificial, deberá ser proporcionada por medio de instalaciones mecánicas que garanticen la renovación eficiente del aire en el interior. Las instalaciones para la renovación del aire, se diseñarán considerando los factores de velocidad, movimiento del aire, temperatura y humedad relativa. El movimiento no será superior a 0.25 metros por segundo, velocidad medida a una altura de 0.90 metros sobre el nivel del piso del local. La temperatura (bulbo seco), estará comprendida entre los 17 y 23° C, y la humedad relativa comprendida entre el 30 y 60. En términos generales, la renovación del aire tendrá seis cambios por hora como mínimo.

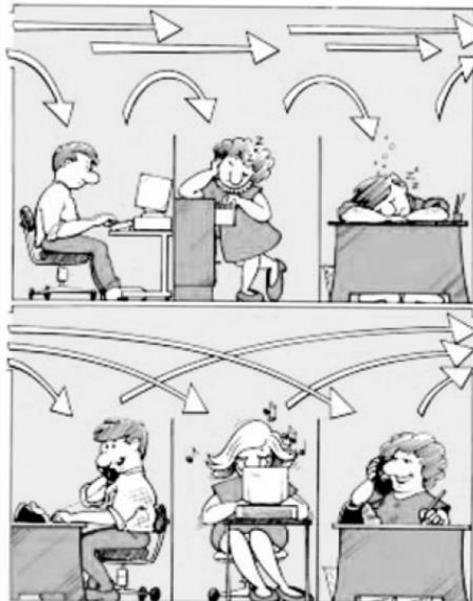


Figura A-1. Envejecimiento del aire en su recorrido por el local. Fuente: Monroy, 2006, p.p 100.

El edificio ideal sería aquel que no necesitara climatización mediante sistemas activos, una vez que se haya constatado que las medidas pasivas adoptadas en el proyecto serán suficientes para garantizar la comodidad térmica en el interior del edificio, considerando las condiciones climáticas típicas en las diferentes épocas del año. Solo en el caso de que fuera imprescindible recurrir a instalaciones de climatización, éstas se deberían plantear como equipos de apoyo con un dimensionamiento estricto, con la potencia mínima necesaria para alcanzar unas temperaturas interiores aceptables en los períodos climáticos extremos.

A.2 Tipos de sistemas.

Según el tipo de fluido, los sistemas de acondicionamiento de aire se clasifican en cuatro categorías:

a) *Sistemas todo-agua.*

Solo se emplea agua, la cual se enfría o calienta en una unidad central y se distribuye a los espacios a acondicionar (Miranda, 2007, p.p. 119). El sistema de *fancoils* es el más frecuente y se basa en distribuir agua, fría o caliente, hasta las unidades denominadas *fan-coils* que distribuyen el calor o el frío al ambiente mediante unas baterías provistas de un ventilador (Carrier air conditioning company, 2009, p.p. 497).

b) *Sistemas todo-aire.*

Se trata de instalaciones que enfrían o calientan el aire, únicamente aire, que es introducido en el local que se desea climatizar. Se encuentra dividido en mono conductos (aire transportado por un solo conducto y se le conoce como sistema convencional) y doble conductos (tienen doble conductos de aire pero han sido

descontinuados por cuestiones de ahorro energético y normativas (Miranda, 2007, p.p 118).

El sistema posee la siguiente clasificación:

- Sistemas de caudal variable (VAV): una manera de compensar las variaciones de carga es por regulación del caudal de aire frío, esto es, si establecer ninguna combinación especial para las variaciones de carga del local.
- Sistema con *by-pass* del aire de retorno: otra manera de compensar las variaciones de carga es reducir la cantidad de aire enfriado, pero manteniendo constante el caudal de aire que se suministra, incluyendo aire reciclado procedente del local acondicionado.
- Sistema con recalentamiento: La combinación utilizada para hacer frente a la carga reducida puede modificarse mediante el empleo del recalentamiento en el acondicionador o en la unidad terminal, como en un sistema de inducción de caudal constante o en el interior de las bocas de impulsión.

Entre los nuevos sistemas de aire se encuentra el DOAS (Sistema Exterior para Manejo de Aire – Dedicated Outside Air System). El DOAS usa 100% de aire exterior en cada espacio acondicionado por medio de una unidad de aire de volumen constante con toda la recuperación energética. Además de ventilar cada espacio, DOAS mejora el control de humedad y por consiguiente prácticamente elimina problemas de microbios o cualquier otra situación relacionada al síndrome del edificio enfermo.

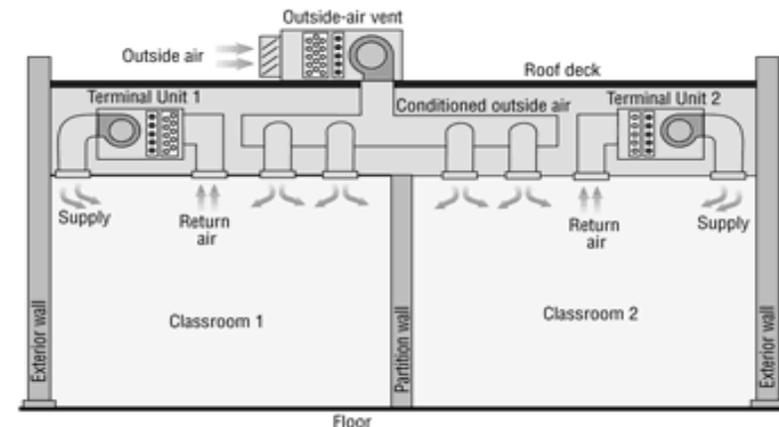


Figura A-2. Sistema DOAS. Fuente: Obtenido el 05 de Mayo del 2014 de <http://hvac.com/ventilation-iaq/low-cost-dedicated-outdoor-air-0710>

c) Sistemas de aire-agua.

Los sistemas aire-agua permiten eliminar carga térmica de forma selectiva, una parte el aire y otra el agua, obteniendo unos elevados niveles de confort; además el aire permite resolver los problemas de ventilación (Carrier air conditioning company, 2009, p.p 499).

Estos sistemas emplean los dos fluidos (el aire y el agua) como elementos de calefacción en invierno o de refrigeración en verano. El aire se trata en una unidad central y se distribuye a los locales como si se tratase de un sistema todo aire de conducto único. El agua se enfría o se calienta en otra unidad central y se hace llegar a los locales mediante una red de tuberías (sistema de *fan-coils* o el sistema de suelo radiante) (Miranda, 2007, p.p 119).

d) *Sistemas fluido frigorífico.*

Este sistema que utiliza un fluido frigorífico para enfriar los espacios, para controlar la temperatura de operación del motor y obtener un óptimo desempeño.

Tabla A-1 Componentes del sistema de acondicionamiento del aire.

Fuente: Carrier air conditioning company, 2009.

Componentes del sistema	Función que realizan
Circuito de aire	
1. Toma de aire exterior	Aire para ventilación y refrigeración en las estaciones intermedias.
2. Batería de precalentamiento	Calienta el aire
3. Toma de aire de retorno	Entrada de aire de retorno o re-circulado
4. Filtro	Elimina la suciedad del aire
5. Batería de enfriamiento	Enfria y seca el aire
6. Batería de calefacción	Calienta en invierno y produce un caldeo del aire a efectos de regulación de humedad
7. Humectador	Humedece el aire
8. Ventilador	Propulsión del aire
9. Conductos	Distribución del aire a las distintas zonas
10. Rejillas	Distribución del aire dentro de cada espacio
11. Unidad terminal	Unidad de impulsión de aire que puede tener cámara de mezcla, serpentín enfriador, y/o batería de caldeo, tratamiento acústico y boca de impulsión
Circuito de refrigerante	
12. Aparato de refrigeración (compresor, condensador, enfriador y tuberías)	Elemento enfriador
Circuito de agua	
13. Bomba	Propulsión de agua
14. Tubería de agua	Circulación del agua entre los intercambiadores
15. Torre de enfriamiento	Enfriamiento del agua del condensador
Circuito de calefacción	
16. Caldera y accesorios	Produce vapor de agua caliente
17. Tuberías	Circulación de vapor o agua caliente

ANEXO B. Resultados del comportamiento térmico de la vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.

ANEXO B. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA VIVIENDA EN LA CIUDAD DE SAN PEDRO SULA, HONDURAS.

Tabla B-1. Tabla Resumen de la temperatura, humedad ambiente y temperatura de rocío registrados por los sensores durante el mes de diciembre del 2014.

		dic-14														
		Fecha	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Exterior	Mínimo	Temp, °C	22.73	21.628	23.28	23.4	22.321	22.274	23.184	22.609	21.676	22.25	23.424	24.195	24.074	23.809
		HR, %	60.47	61.954	63.991	59.081	56.186	48.99	51.446	73.468	58.939	56.281	55.68	58.775	52.093	65.351
		Pt rocío, °C	18.20	17.934	19.546	18.614	18.417	17.775	18.661	19.12	18.454	18.462	19.619	20.087	19.734	19.34
	Máximo	Temp, °C	28.42	29.615	29.165	29.09	29.565	33.574	33.157	26.134	29.715	30.419	31.663	31.944	31.919	28.593
		HR, %	76.05	80.88	81.734	83.206	79.483	79.319	76.387	81.055	82.484	79.764	79.271	80.088	82.124	80.531
		Pt rocío, °C	20.11	21.607	22.379	21.964	21.676	23.611	22.578	21.087	21.269	21.307	22.498	23.347	22.145	22.144
	Promedio	Temp, °C	25.02	24.52	25.39	25.54	25.48	26.58	27.43	24.26	24.92	25.52	26.68	26.83	26.98	25.89
		HR, %	69.24	73.88	76.08	73.82	71.00	66.87	66.63	76.90	73.18	71.87	71.22	72.72	69.86	73.72
		Pt rocío, °C	18.97	19.52	20.86	20.45	19.79	19.76	20.55	19.97	19.71	20.01	20.96	21.48	20.87	20.83
Habitación 4	Mínimo	Temp, °C	25.48	24.436	25.866	26.329	25.914	25.866	26.891	25.793	25.04	25.162	26.109	26.744	26.989	26.842
		HR, %	62.99	63.75	67.235	60.419	58.228	53.508	55.84	66.603	65.707	63.532	62.62	68.173	59.218	65.776
		Pt rocío, °C	19.53	19.251	20.903	20.11	19.788	18.261	20.112	20.413	19.907	19.785	20.741	21.309	20.873	20.58
	Máximo	Temp, °C	27.31	28.147	28.394	28.568	29.14	31.51	30.621	28.841	27.407	27.554	28.791	29.464	29.49	27.974
		HR, %	69.00	73.774	74.398	75.601	70.896	68.549	67.668	71.573	73.072	74.038	73.762	75.726	76.329	72.895
		Pt rocío, °C	20.27	21.865	22.448	22.442	21.864	22.612	22.447	22.223	20.949	21.363	22.233	23.247	22.796	22.069
	Promedio	Temp, °C	26.39	26.11	27.09	27.37	27.37	27.95	28.65	27.16	26.11	26.46	27.45	27.89	28.05	27.31
		HR, %	66.49	69.91	71.33	69.09	66.26	62.69	63.50	69.21	70.04	69.61	69.57	70.82	67.42	69.36
		Pt rocío, °C	19.85	20.35	21.60	21.33	20.72	20.37	21.26	21.21	20.37	20.62	21.55	22.26	21.62	21.39
Habitación principal	Mínimo	Temp, °C	25.33	23.905	25.21	25.817	25.137	24.847	25.866	25.234	24.267	24.532	25.671	26.28	26.353	25.89
		HR, %	60.10	62.339	62.256	52.468	52.25	53.721	51.402	67.573	59.43	59.835	59.434	62.763	55.071	66.877
		Pt rocío, °C	19.29	19.191	20.786	18.618	18.739	18.808	19.842	20.413	19.642	19.69	20.803	21.461	20.146	20.26
	Máximo	Temp, °C	27.90	28.221	28.965	29.24	29.389	30.52	31.103	28.295	28.072	28.568	29.74	29.414	29.815	27.677
		HR, %	69.61	75.858	78.205	78.8	74.046	72.329	70.157	75.608	77.043	76.735	78.69	78.73	78.379	74.853
		Pt rocío, °C	20.29	21.792	22.765	22.653	21.831	22.274	22.836	22.219	21.282	22.035	22.555	23.203	22.786	22.181
	Promedio	Temp, °C	26.52	26.07	27.09	27.28	27.22	27.63	28.50	26.45	25.93	26.54	27.64	27.71	27.84	26.86
		HR, %	65.38	69.95	71.67	68.99	66.23	64.46	63.55	72.13	70.81	69.66	69.83	71.60	67.78	70.80
		Pt rocío, °C	19.71	20.29	21.65	21.18	20.54	20.47	21.10	21.16	20.33	20.68	21.76	22.24	21.44	21.27

ANEXO B. Resultados del comportamiento térmico de la vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.

Habitación 3	Mínimo	Temp, °C	26.40	25.113	26.158	26.598	26.353	26.744	27.235	26.207	25.21	25.72	26.524	27.407	27.308	27.382
		HR, %	60.99	61.029	63.269	57.002	54.802	50.068	52.094	63.946	62.427	59.014	57.135	63.68	55.856	62.43
		Pt rocío, °C	19.63	19.377	20.847	19.862	19.714	18.102	19.63	20.386	19.814	19.762	20.353	21.43	20.721	20.43
	Máximo	Temp, °C	27.80	28.493	28.916	28.965	29.715	31.459	31.281	29.464	27.727	28.667	29.715	29.665	30.192	28.742
		HR, %	65.79	69.966	73.469	74.365	67.357	64.746	64.174	69.767	72.159	69.441	70.637	72.515	72.682	70.624
		Pt rocío, °C	20.40	21.722	22.43	22.517	21.997	22.383	22.788	22.245	20.985	21.498	22.238	23.185	23.109	21.936
	Promedio	Temp, °C	27.11	26.93	48.28	27.85	28.18	28.88	29.41	27.68	38.23	27.30	28.29	28.51	28.81	27.90
		HR, %	63.99	66.44	68.95	66.79	62.82	59.31	59.90	66.67	67.83	66.26	66.14	68.25	64.80	66.77
		Pt rocío, °C	19.95	20.34	21.57	21.25	20.65	20.37	21.05	21.13	20.31	20.65	21.56	22.28	21.70	21.35
Habitación 2	Mínimo	Temp, °C	26.33	25.089	26.426	26.72	26.329	27.456	27.259	26.036	25.04	25.598	26.5	27.235	27.284	27.284
		HR, %	62.49	63.329	67.317	60.072	58.141	55.601	55.417	64.99	65.26	63.71	62.967	66.795	58.007	62.733
		Pt rocío, °C	19.70	19.476	21.002	20.054	19.828	18.936	20.071	20.562	19.998	19.977	20.85	21.495	20.816	20.665
	Máximo	Temp, °C	27.55	28.369	28.419	28.766	29.414	31.382	30.925	29.464	27.554	27.751	29.09	29.565	29.84	28.766
		HR, %	66.05	72.809	73.04	74.963	69.862	70.328	65.877	71.198	74.252	73.878	73.335	75.476	75.525	72.05
		Pt rocío, °C	20.50	21.691	22.621	22.572	22.169	22.73	22.824	22.499	21.032	21.535	22.517	23.36	22.98	22.284
Promedio	Temp, °C	27.00	26.66	27.54	27.70	46.33	28.62	29.03	27.80	26.24	26.84	27.87	28.22	28.44	27.85	
	HR, %	64.76	68.01	69.72	68.10	64.86	64.12	62.23	68.30	70.15	68.93	68.80	69.79	66.42	68.10	
	Pt rocío, °C	20.03	20.45	21.69	21.43	20.80	21.36	21.31	21.62	20.52	20.83	21.78	22.35	21.74	21.61	

En la tabla B-1 se presenta la temperatura máxima, mínima y promedio registrada durante el mes de diciembre del 2014. Se observa que en el exterior la temperatura máxima fue de 24 de diciembre del 2014 con 33.15°C y la temperatura mínima fue el día 26 de diciembre del 2014 con 6.67°C.

ANEXO B. Resultados del comportamiento térmico de la vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.

Tabla B-2. Tabla Resumen de la temperatura, humedad ambiente y temperatura de rocío registrados por los sensores durante el mes de enero del 2015.

		ene-15																		
		Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Exterior	Mínimo	Temp, °C	23.448	24.968	23.569	22.872	25.234	23.28	22.441	21.06	21.22	22.441	22.68	24.098	23.69	23.184	23.881	22.92	21.915	21.294
		HR, %	54.766	59.802	61.688	55.728	58.127	64.06	67.773	50.82	65.68	62.888	59.28	53.671	56.28	52.378	59.658	64.951	81.676	61.458
		Pt rocío, °C	19.591	20.879	20.012	19.581	19.771	19.17	18.382	17.16	21.46	19.274	19.09	20.066	20.11	20.411	20.279	19.372	18.97	18.581
	Máximo	Temp, °C	30.9	29.89	31.026	31.919	30.874	28.87	26.72	30.5	27.48	28.841	29.41	31.408	31.69	32.536	30.117	28.444	23.472	27.456
		HR, %	81.324	79.47	81.22	82.138	76.505	81.17	84.508	81.66	83	82.518	81.32	82.264	83.61	85.117	82.527	81.604	85.808	86.356
		Pt rocío, °C	22.034	21.996	23.205	22.641	22.022	21.92	21.24	21.32	24.73	21.236	21.45	22.091	22.72	22.665	22.104	22.579	20.424	21.064
	Promedio	Temp, °C	26.50	26.81	26.16	26.59	27.17	25.37	24.04	24.67	23.82	25.14	25.55	26.69	25.66	25.99	26.37	24.61	22.66	23.82
		HR, %	71.96	72.94	75.74	72.23	69.68	74.99	77.14	70.30	74.54	73.99	72.94	71.06	76.37	74.99	72.96	78.02	83.71	77.89
		Pt rocío, °C	20.94	21.53	21.52	21.06	21.13	20.61	19.77	18.75	19.01	20.14	20.29	20.90	21.16	21.10	21.06	20.53	19.78	19.66
Habitación 4	Mínimo	Temp, °C	26.109	26.989	26.378	26.182	27.186	26.43	25.501	24.46	24.27	24.774	25.4	26.402	26.5	25.793	26.036	25.768	24.436	23.93
		HR, %	64.019	66.865	70.391	65.109	65.132	67.27	67.956	59.8	66.54	66.777	64.4	63.111	67.97	65.612	67.009	70.26	74.332	65.714
		Pt rocío, °C	20.701	21.718	21.275	21.012	21.018	20.52	19.343	18.53	18.82	19.755	20.2	21.062	21.16	21.197	21.116	20.691	20.236	18.947
	Máximo	Temp, °C	28.32	28.444	28.32	29.19	28.692	27.68	26.426	26.94	26.28	27.481	28.22	28.642	27.85	28.072	27.899	27.235	25.744	25.963
		HR, %	74.519	74.308	74.638	75.976	70.997	73.68	75.949	74.32	76.88	77.142	75.35	75.028	75.18	78.13	75.763	76.094	79.498	79.813
		Pt rocío, °C	22.317	22.353	22.847	22.75	22.294	22.05	21.234	20.18	20.62	21.287	21.56	22.442	22.45	22.666	22.16	22.289	21.063	21.311
	Promedio	Temp, °C	27.20	27.58	27.39	27.60	27.88	26.90	25.77	25.43	47.70	26.02	26.83	27.47	27.05	26.79	27.01	26.35	24.92	24.90
		HR, %	70.09	71.14	72.68	70.18	68.23	70.80	72.46	68.46	70.22	71.14	69.66	69.42	72.39	73.31	71.48	73.60	77.56	75.70
		Pt rocío, °C	21.43	22.03	22.19	21.83	21.68	21.31	20.58	19.35	19.52	20.52	20.98	21.53	21.79	21.72	21.56	21.37	20.78	20.38
Habitación principal	Mínimo	Temp, °C	25.404	26.524	26.158	25.307	26.598	25.65	24.992	23.86	23.59	24.508	25.09	26.061	26.16	25.428	25.623	25.162	24.171	23.521
		HR, %	58.19	66.457	68.349	61.436	60.952	66.94	69.292	59	66.48	64.487	58.26	59.188	66.25	65.425	64.815	70.92	75.925	60.891
		Pt rocío, °C	20.15	21.49	21.32	20.897	20.63	20	19.555	18.05	18.63	19.985	20.01	20.581	20.98	21	20.914	20.584	20.255	18.723
	Máximo	Temp, °C	29.015	28.221	28.766	29.84	29.365	27.06	25.914	26.52	26.04	28.122	28.82	29.14	28.54	27.974	28.394	26.989	25.234	26.744
		HR, %	77.153	75.987	76.309	79.147	73.647	76.13	79.591	77.2	78.93	79.439	77.93	29.14	77.28	80.077	78.401	78.475	82.807	82.682
		Pt rocío, °C	22.442	22.454	23.206	23.128	22.288	21.9	21.29	20.41	20.48	21.428	21.59	22.498	22.78	23.067	22.4	22.586	21.416	21.852
	Promedio	Temp, °C	27.11	27.29	27.42	27.44	27.70	26.51	25.39	25.15	24.78	26.17	26.99	27.44	27.05	26.73	27.03	26.10	24.61	25.19
		HR, %	70.40	72.03	73.06	70.97	68.75	72.26	74.31	69.23	71.81	71.10	69.18	69.45	72.96	74.47	71.57	74.65	79.95	75.61
		Pt rocío, °C	21.36	21.94	22.29	21.80	21.60	21.25	20.59	19.24	19.47	20.63	21.00	21.48	21.91	21.89	21.57	21.35	20.94	20.59

ANEXO B. Resultados del comportamiento térmico de la vivienda en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.

Habitación 3	Mínimo	Temp, °C	26.549	27.628	26.867	26.573	27.751	26.72	25.647	24.77	24.73	25.113	25.96	26.989	26.82	26.256	26.549	26.085	24.629	24.171
		HR, %	59.32	64.493	67.838	61.463	60.875	64.44	66.741	60.61	64.3	61.819	58.72	59.439	64.7	62.065	63.658	67.841	71.589	65.776
		Pt rocío, °C	20.85	21.572	21.24	20.938	21.005	20.58	19.509	18.73	18.83	19.51	20.22	20.566	21.02	20.295	20.808	20.521	20.268	19.471
	Máximo	Temp, °C	29.365	28.891	28.841	30.041	29.815	28.49	26.695	27.01	26.43	28.023	29.29	29.065	28.47	28.023	28.345	27.53	26.085	26.329
		HR, %	70.866	71.524	28.841	71.23	67.326	71.07	73.663	71.89	74.9	74.022	71.11	72.694	74.31	75.943	73.878	74.019	78.229	78.424
		Pt rocío, °C	22.344	22.49	22.771	22.826	22.287	22.01	21.277	20.07	20.64	21.469	21.73	22.34	22.36	22.529	22.428	22.201	21.249	21.53
	Promedio	Temp, °C	28.08	28.28	27.91	28.38	28.79	27.57	26.09	25.71	25.57	26.69	27.71	28.01	27.48	27.19	27.58	26.80	25.24	25.31
		HR, %	66.69	68.13	70.20	66.91	64.47	67.88	70.58	67.14	68.45	68.38	65.83	66.61	70.40	71.28	68.98	71.13	75.69	74.26
		Pt rocío, °C	21.49	22.03	22.15	21.83	21.66	21.30	20.48	19.34	19.51	20.54	20.93	21.40	21.77	21.67	21.54	21.28	20.72	20.48
Habitación 2	Mínimo	Temp, °C	26.475	27.579	26.867	26.5	27.825	26.72	25.598	24.8	24.87	25.21	26.33	27.431	26.74	25.987	26.818	26.061	24.557	24.46
		HR, %	63.229	65.856	70.092	63.044	63.997	65.33	67.569	60.42	65.83	66.199	63.53	61.364	66.9	64.947	67.508	70.929	74.627	67.685
		Pt rocío, °C	20.65	21.762	21.465	21.14	21.147	20.77	19.442	18.75	19.25	20.03	20.84	21.101	21.69	21.599	21.491	21.112	20.844	19.445
	Máximo	Temp, °C	28.568	28.766	26.867	29.414	29.09	28.39	26.793	26.94	26.48	27.677	28.74	29.115	28.59	28.742	28.543	27.456	26.256	26.012
		HR, %	74.068	72.935	70.092	76.28	68.843	72.48	76.148	74.88	75.78	76.886	73.63	75.461	75.82	79.903	78.119	76.05	79.896	80.016
		Pt rocío, °C	22.715	22.689	21.465	22.852	22.544	22.25	21.48	20.36	20.6	21.436	22.21	22.977	22.75	24.237	24.306	22.486	21.694	21.539
Promedio	Temp, °C	27.59	28.08	27.70	27.97	28.50	27.46	26.03	25.64	25.66	26.44	27.57	28.26	27.49	27.09	27.55	26.79	25.32	25.19	
	HR, %	69.37	70.03	72.01	69.26	66.45	69.30	72.22	68.68	69.38	70.86	68.62	68.00	72.27	74.75	72.40	73.92	77.61	76.09	
	Pt rocío, °C	21.64	22.27	22.34	21.97	21.86	21.51	20.78	19.60	19.80	20.86	21.46	21.96	22.19	22.31	22.28	21.87	21.18	20.74	

En la tabla B-2 se presenta la temperatura máxima, mínima y promedio registrada durante el mes de enero del 2015. Se observa que en el exterior la temperatura máxima fue de 14 de enero del 2015 con 32.53°C y la temperatura mínima fue el día 8 de enero del 2015 con 21.06°C.



ANEXO C. Resultados del experimento del sistema de enfriamiento hidrónico en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.

ANEXO C. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DEL BLOQUE CON EL SISTEMA HIDRÓNICO DESARROLLADO EN LA CIUDAD DE SAN PEDRO SULA, HONDURAS.

Tabla C-1. Tabla Resumen con el mínimo, máximo y promedio de las variables registrados por los sensores durante el experimento del bloque con el sistema hidrónico los días desde el 08 al 18 de enero del 2015.

	08/01/2015						09/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	22.66	22.68	0.02	17.16	50.82	0.52	21.22	21.22	0.00	17.57	65.68	0.70
MAXIMO	25.74	30.50	5.85	21.32	74.44		24.73	27.48	3.42	21.01	83.00	
PROMEDIO	23.75	26.48	2.73	18.97	63.77		23.00	23.82	0.93	19.01	74.54	
Velocidad del agua (litros por segundo)			3			3						

	10/01/2015						11/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H	Temperatura interior bloque	Temperatura ambiente	Diferencia	Temp. punto rocío	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	22.97	22.44	0.00	19.27	62.89	0.57	22.82	22.68	0.00	19.09	59.28	0.72
MAXIMO	25.77	28.84	3.70	21.24	82.52		26.38	29.41	3.74	21.45	81.32	
PROMEDIO	24.21	25.14	1.15	20.14	73.99		24.50	25.55	1.12	20.29	72.94	
Velocidad del agua (litros por segundo)			3			5						

	10/01/2015						11/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H	Temperatura interior bloque	Temperatura ambiente	Diferencia	Temp. punto rocío	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	22.97	22.44	0.00	19.27	62.89	0.57	22.82	22.68	0.00	19.09	59.28	0.72
MAXIMO	25.77	28.84	3.70	21.24	82.52		26.38	29.41	3.74	21.45	81.32	
PROMEDIO	24.21	25.14	1.15	20.14	73.99		24.50	25.55	1.12	20.29	72.94	
Velocidad del agua (litros por segundo)			3			5						

	12/01/2015						13/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	24.20	24.10	0.00	20.07	53.67	0.68	23.47	23.69	0.00	20.11	56.28	0.80
MAXIMO	29.89	31.41	2.98	22.09	82.26		36.36	31.69	6.02	22.72	83.61	
PROMEDIO	26.46	26.69	0.95	20.90	71.06		25.89	25.66	1.06	21.16	76.37	
Velocidad agua (litros por segundo)			0			5						



**ANEXO C. Resultados del experimento del sistema de enfriamiento hidrónico
en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras.**

	14/01/2015						15/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia	Temp. punto rocío	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	23.26	23.18	0.00	20.41	52.38	0.82	24.07	23.88	0.00	20.28	59.66	0.72
MAXIMO	27.80	32.54	4.74	22.67	85.12		26.30	30.12	4.30	22.10	82.53	
PROMEDIO	24.78	25.99	1.25	21.10	74.99		25.08	26.37	1.35	21.06	72.96	
Velocidad agua (litros por segundo)			5			3						

	16/01/2015						17/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H	Temperatura interior bloque	Temperatura ambiente	Diferencia	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	22.87	22.92	0.00	19.37	64.95	0.59	22.01	21.92	0.00	18.97	81.68	0.58
MAXIMO	24.99	28.44	3.57	22.58	81.60		22.87	23.47	0.74	20.42	85.81	
PROMEDIO	23.84	24.61	0.86	20.53	78.02		22.54	22.66	0.17	19.78	83.71	
Velocidad agua (litros por segundo)			3			3						

	18/01/2015					
	Temperatura interior bloque °C	Temperatura ambiente °C	Diferencia °C	Temp. punto rocío °C	Humedad Relativa %	Correlación T.A y T.I.H
MINIMO	21.60	21.29	0.00	18.58	61.46	0.85
MAXIMO	25.87	27.46	2.58	21.06	86.36	
PROMEDIO	23.07	23.82	0.82	19.66	77.89	
Velocidad agua (litros por segundo)			0			

En la tabla C-1, se presenta los valores mínimos, máximos y promedio de las variables que se realizaron mediciones durante los días del 08 al 18 de enero del 2014 realizados en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras, con un clima cálido-húmedo. De las tablas, se identifican con color azul los días que se empleó la bomba con una velocidad de 3 litros por segundo, los que se encuentran en color gris el sistema de enfriamiento no se puso a funcionar, el que se encuentra en anaranjado y rojo la velocidad de la bomba fue de 5 litros por segundo. Los días 13 y 14 de enero, se encuentran en rojo debido a que estos dos días el bloque se expuso a la Radiación solar. El día 13 se expuso durante 3 horas aproximadamente entre las 9:00 am y las 12:00 pm, y el día 14 se expuso durante una hora entre las 9:20 am y las 10:20 am; debido a que posteriormente se presentaron constantes lluvias por lo tanto se introdujeron a un espacio techado para evitar que la humedad por la lluvia en el concreto afectaran las mediciones.

Con respecto a los valores de correlación entre la Temperatura al interior del bloque (T.I.H) y la Temperatura ambiente (T.A), se observa que los días que se expusieron al sol y que la velocidad de la bomba fue de 5 litros por segundo fueron los valores más altos, esto se debe a que la T.I.H tuvo un comportamiento similar a la T.A debido a que el sistema absorbió en menor proporción el calor que cuando la velocidad fue de 3 litros por segundo.



ANEXO D. Resultado experimento del sistema de enfriamiento hidrónico en la ciudad de México.

ANEXO D. RESULTADO DEL EXPERIMENTO REALIZADO EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

Tabla D-1. Tabla Resumen con el mínimo, máximo y promedio de las variables registrados por los sensores durante el experimento del bloque con el sistema hidrónico y el de referencia los días desde el 21 y 25 de noviembre del 2014, 24 y 25 de febrero del 2015, 02,03,05 y 06 de marzo del 2015.

		Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa %	Temperatura punto de rocío (°C)	Temperatura interior bloque referencia (°C)	Temperatura interior bloque hidrónico (°C)	Temperatura agua de entrada (°C)	Temperatura agua de salida (°C)	Radiación Solar (W/m ²)	Velocidad del agua (litro por segundo)
21/11/2014	Mínimo	19.18	43.82	7.79	17.42	14.98	8.95	9.49	—	5
	Máximo	21.46	56.14	11.09	18.40	17.59	12.97	13.73		
	Promedio	19.84	49.44	9.23	18.16	16.04	10.92	11.57		
25/11/2014	Mínimo	21.99	31.07	4.44	19.29	15.96	7.94	8.42	—	5
	Máximo	23.88	39.30	8.47	20.13	19.72	11.46	11.70		
	Promedio	22.80	35.21	6.91	19.84	17.49	9.18	9.65		
24/02/2015	Mínimo	8.00	21.90	2.44	23.71	20.48	1.90	2.39	—	1
	Máximo	26.60	86.60	9.42	29.08	25.61	22.48	22.51		
	Promedio	16.46	56.09	6.17	27.15	23.72	6.41	7.02		
25/02/2015	Mínimo	9.22	19.44	1.08	15.28	14.133	5.391	6.377	—	1
	Máximo	26.62	81.94	9.12	28.65	21.98	11.48	12.25		
	Promedio	16.53	52.34	5.44	24.70	19.66	8.14	8.83		
02/03/2014	Mínimo	7.20	9.16	-7.14	16.806	15.703	2.041	3.261	—	1
	Máximo	29.60	76.28	4.36	32.837	23.924	15.678	18.733		
	Promedio	18.62	36.01	0.54	27.05	20.85	4.22	5.33		
03/03/2014	Mínimo	7.50	16.02	-1.51	11.12	11.28	5.28	5.98	—	1
	Máximo	28.54	66.84	4.86	32.09	24.21	15.89	17.19		
	Promedio	17.99	39.43	2.38	20.99	18.37	12.12	12.19		
05/03/2014	Mínimo	9.98	21.26	-3.24	12.58	12.70	4.94	6.18	—	1
	Máximo	27.00	67.52	4.27	30.73	23.94	15.22	18.66		
	Promedio	18.18	43.89	1.64	20.71	18.19	2.62	12.57		
06/03/2014	Mínimo	11.00	23.76	2.83	11.66	11.59	7.47	8.30	—	1
	Máximo	27.56	70.16	6.59	28.89	22.28	12.69	16.91		
	Promedio	17.03	49.55	5.40	18.65	16.26	10.44	11.25		



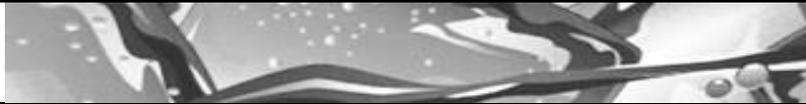
ANEXO D. Resultado experimento del sistema de enfriamiento hidrónico en la ciudad de México.

En la tabla D-1, se presenta los valores mínimo, máximo y promedio de las variables que se realizaron mediciones los días 21 y 25 de noviembre del 2014 en el interior del Laboratorio de Interacción con el Medio (LIM). Y los días 24 y 25 de febrero del 2015; 02,03, 05 y 06 de marzo del 2015 al exterior en el Observatorio de la Azotea del Edificio de la Unidad de Posgrado.

Tabla D-2. Correlación de las variables entre la temperatura al interior del bloque de referencia y del bloque con el sistema hidrónico.

		Temperatura interior del bloque	Correlación			
			Temperatura ambiente	Temperatura del agua de entrada	Radiación solar	Temperatura punto rocío
Laboratorio LIM (Interior)	21/11/2014	Bloque de referencia	0.44	—	—	0.021
		Bloque hidrónico	0.53	0.0034	—	-0.044
	25/11/2014	Bloque de referencia	0.92	—	—	-0.54
		Bloque hidrónico	0.92	0.21	—	0.62
Azotea (Exterior)	24/02/2015	Bloque de referencia	-0.7	—	-0.76	0.77
		Bloque hidrónico	0.93	0.16	0.49	-0.85
	25/02/2015	Bloque de referencia	0.18	—	0.47	-0.88
		Bloque hidrónico	0.37	-0.12	0.48	-0.87
	02/03/2015	Bloque de referencia	0.47	—	0.91	-0.44
		Bloque hidrónico	0.6	-0.25	0.94	-0.55
	03/03/2015	Bloque de referencia	0.8	—	0.81	-0.4
		Bloque hidrónico	0.76	0.6	0.81	-0.05
	05/03/2015	Bloque de referencia	0.6	—	0.84	0.032
		Bloque hidrónico	0.613	0.56	0.48	0.0014
06/03/2015	Bloque de referencia	0.71	—	0.73	0.02	
	Bloque hidrónico	0.74	0.56	0.8	0.001	

En la tabla D-2, se muestra los valores de correlación entre la Temperatura al interior de ambos bloques (T.I.R y T.I.H) con respecto a la Temperatura ambiente (T.A), Temperatura del agua de entrada (T.A.E), Radiación solar global y Temperatura de punto de rocío (T.P.R). De estos valores se observa que en las mediciones realizadas al interior del laboratorio la T.A es la que posee los valores más altos, especialmente durante el día 25 de noviembre del 2014. Con respecto a los valores en el exterior realizados en la azotea, la Radiación solar es la variable que posee mayor correlación con la Temperatura interior de los bloques, por lo tanto es la variable que más afecta en el comportamiento térmico del concreto.



ANEXO E. ANÁLISIS DEL ENFRIAMIENTO DEL AGUA.

Entre las opciones para el enfriamiento del agua del sistema de forma pasiva se encuentra la refrigeración geotérmica, el cual se basa en que la temperatura de la tierra es inferior a la del aire exterior durante la mayor parte del año; por lo tanto el calor procedente del edificio puede almacenarse en el subsuelo; por la alta inercia térmica, la baja conductividad del subsuelo y por ser un sumidero de calor.

En la ciudad de San Pedro Sula, en la mayoría de las viviendas se desarrollan cisternas de concreto para el almacenamiento del agua. Por lo que para emplear el enfriamiento geotérmico se plantea como propuesta emplear el agua de la cisterna para enfriar el agua de la tubería del sistema de enfriamiento, debido a que se considera que por encontrarse almacenada en el subsuelo la temperatura del agua es mejor. En la figura 69 se presenta un esquema del recorrido de la tubería, el cual consiste en el recorrido de las superficies a enfriar de la edificación, posteriormente la tubería pasa por la cisterna, donde el agua se encuentra a una temperatura más baja que la temperatura ambiente para el enfriamiento del agua el cual se ha calentado por la absorción del calor de los materiales de las superficies.

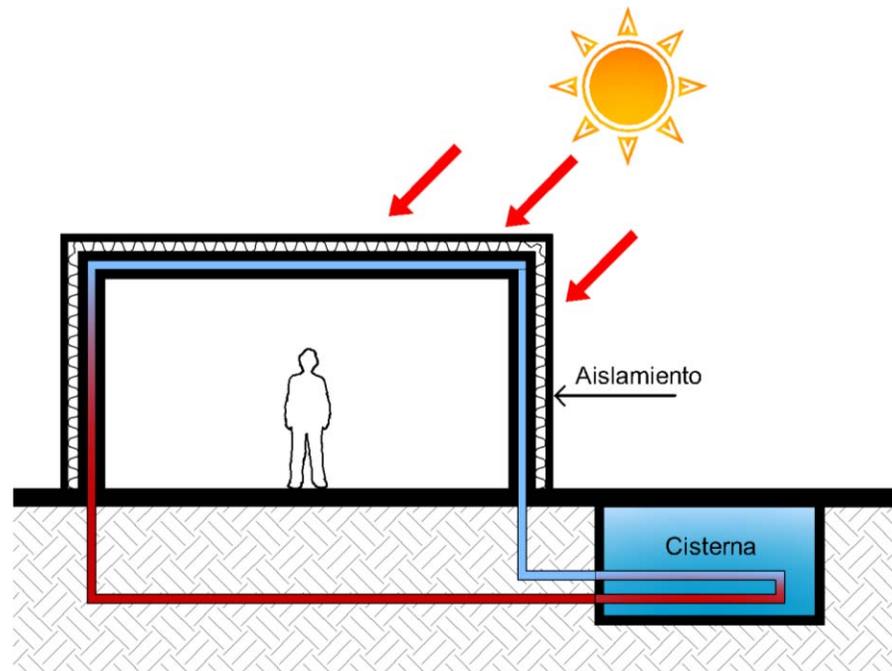


Figura E-1. Propuesta para el enfriamiento del agua del sistema de enfriamiento hidrónico.



ANEXO E. Análisis del enfriamiento del agua empleando la cisterna.

Para la propuesta anterior se desarrolla un estudio de la temperatura del agua de la cisterna localizada en la vivienda en la que se realizan las mediciones térmicas de los espacios al interior. Para analizar la temperatura del agua se realizan mediciones del agua a diferentes horas del día y con diferentes profundidades. La cisterna posee las siguientes especificaciones:

- Medidas de la cisterna: largo (1.80) x ancho (1.20) x alto (1.70)
- Altura de llenado para las mediciones: 0.90 m
- Volumen de la cisterna: 3.67 m³.

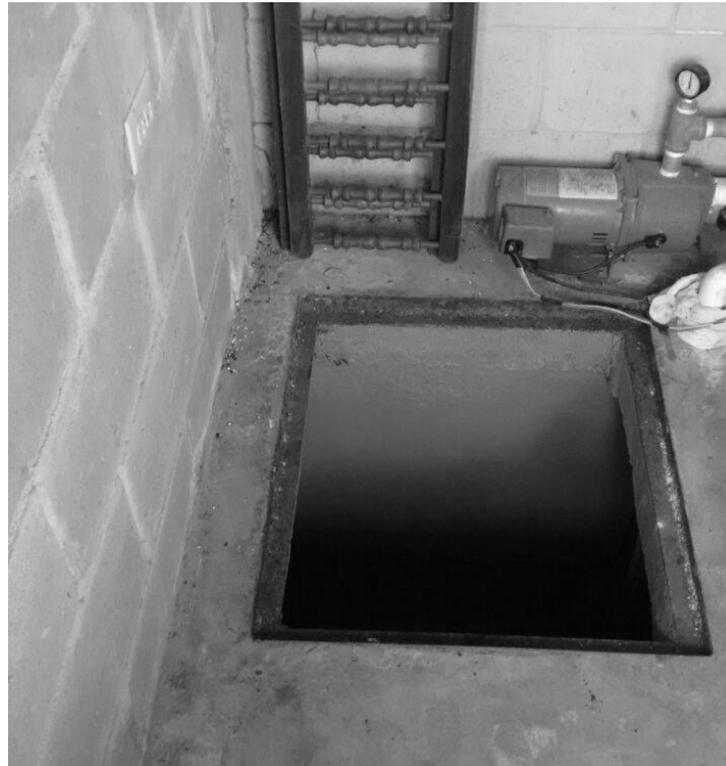


Imagen E-1. Cisterna en la que se realizaron las mediciones.

En la imagen 64 se muestra la imagen de la cisterna para las mediciones, la cual se encuentra cubierta, por lo que la temperatura del agua no se encuentra influenciada por la radiación solar.

Tabla E-1. Mediciones de la temperatura del agua de la cisterna a diferentes profundidades.

	14/05/2015	15/05/2015				16/05/2015				17/05/2015			18/05/2015			
	11:00 a.m.	08:20 a.m.	12:00 p.m.	02:00 p.m.	06:00 p.m.	08:05 a.m.	12:10 p.m.	02:10 p.m.	05:05 p.m.	07:00 a.m.	12:00 p.m.	03:15 p.m.	08:10 a.m.	12:10 m.	02:00 p.m.	05:00 p.m.
Temp. Ambiente °C	32.2	29.5	31.6	30.7	30.4	29.7	32.2	33.1	31.6	28.6	32.6	32.4	30.6	31.9	33.3	31.6
Humedad Relativa %	44.00	64.50	49.00	53.00	68.80	56.70	38.00	47.80	54.00	66.00	44.50	50.10	62.60	50.10	46.40	50.10
Temp. Punto de rocío °C	18.33	22.06	19.52	19.97	23.99	20.14	16.00	20.49	21.10	21.58	18.87	20.61	22.60	20.16	20.18	19.88
Temp. Fondo °C	28	28	28	28	27	27.8	28	28	28	28	28	27.9	28	27.9	28	28
Temp. Medio °C	28.5	28	28	28	27.8	27.9	28	28	28	28	28	28	28.1	28	28	28
Temp. Superficial °C	28.6	28	28	28	27.8	27.8	28	28	28	28	28	28	28.1	28.1	28	28

	25/05/2015				27/05/2015				28/05/2015				29/05/2015			
	09:00 a.m.	12:10 m.	02:10 p.m.	05:00 p.m.	08:15 a.m.	12:05 m.	02:10 p.m.	05:05 p.m.	08:25 a.m.	01:00 p.m.	02:00 p.m.	05:05 p.m.	08:30 a.m.	12:05 m.	02:10 p.m.	05:00 p.m.
Temp. Ambiente °C	30.3	32.9	33.2	31.5	30.6	32.7	33.7	31.5	30.8	32.7	33.0	31.3	30.5	32.0	33	31.2
Humedad Relativa %	55.1	32.9	44.2	31.5	56.1	45.1	44.6	49.9	57.6	48.2	40.2	51.6	61.1	50.6	46.1	50.5
Temp. Punto de rocío °C	20.23	14.36	19.31	12.47	20.80	19.18	19.90	19.72	21.42	20.26	17.60	20.08	22.11	20.41	19.81	19.64
Temp. Fondo °C	28.0	28.0	28.0	28.0	28.1	28.0	28.1	28.0	28.1	28.1	28.0	28.0	28.0	28.1	28.0	28.0
Temp. Medio °C	28.2	28.4	28.5	28.3	28.5	28.4	28.2	28.3	28.3	28.2	28.2	28.3	28.4	28.2	28.3	28.2
Temp. Superficial °C	28.3	28.5	28.7	28.5	28.6	28.5	28.5	28.3	28.6	28.6	28.3	28.5	28.6	28.5	28.5	28.5

En la tabla E-1 se presenta el resultado de las mediciones realizadas al agua de la cisterna durante cinco días, desde el 14 al 18 de mayo y del 25 al 29 de mayo del 2015. Se observa que la temperatura promedio del agua entre dichos días fue de 28°C, manteniéndose constante. Se considera que el agua de la cisterna se calienta en las tuberías de distribución municipal hasta la vivienda. Por esta razón se considera que la temperatura del agua de la cisterna no es lo suficientemente baja para enfriar el agua del sistema de enfriamiento. Para poder emplear la propuesta planteada anteriormente es necesario enfriar el agua de la cisterna previamente.