



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**CHUKUM (*HAVARDIA ALBICANS*) UNA POSIBILIDAD COMO
MATERIAL PARA EDIFICACIONES TÉRMICAMENTE
CONFORTABLES Y ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA
LUIS MAURICIO GARCÍA NOVEROLA

DIRECTOR DE TESIS
DR. INOCENTE BOJÓQUEZ BÁEZ

ASESORES
**DR. VÍCTOR MANUEL ROMERO MEDINA
M. EN P. SET JUBAL CASTILLO ÁVILA
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2021



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO
"CHUKUM (*HAVARDIA ALBICANS*) UNA POSIBILIDAD COMO MATERIAL PARA
EDIFICACIONES TÉRMICAMENTE CONFORTABLES Y ENERGÉTICAMENTE
EFICIENTES"

ELABORADO POR
LUIS MAURICIO GARCÍA NOVEROLA

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

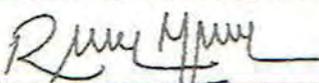
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ DE TESIS.

DIRECTOR:


DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ

ASESOR:


DR. VÍCTOR MANUEL ROMERO MEDINA

ASESOR:


M. EN P. SET JUBAL CASTILLO ÁVILA

ASESOR:


DR. GLORIANO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:


DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2021

“La próxima vez que hablen con alguien que niegue la existencia del cambio climático, díganle que haga un viaje a Venus. Yo me haré cargo de los gastos.”

-Stephen Hawking.

Segundo episodio de la serie documental *Stephen Hawking's favorite places*.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes crearon los pilares de lo que hoy soy como persona, gracias por su apoyo incondicional, siempre estaré en deuda con ustedes.

A la ciencia y al conocimiento científico, los cuales han llevado a los seres humanos a través del interminable viaje del descubrimiento del mundo y del porqué de las cosas.

El conocimiento encuentra su núcleo existencial en la libre circulación, la cual es la base principal del concepto “frontera del conocimiento” y ha llevado a la humanidad a evolucionar, y lo seguirá haciendo.

Gracias por compartir.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Dr. Inocente Bojórquez, por transmitirme sus valiosas enseñanzas en el salón de clases como fuera de él, por ser un ejemplo como profesionista y arraigado ambientalista, por su particular manera que lo caracterizó de empatizar con los estudiantes en sus épocas en la universidad, por sus consejos de vida en aquellas pláticas espontáneas, por brindarme su amistad y, sobre todo por dirigir tan atinadamente este trabajo.

Al M.E.S. Roberto Acosta Q.E.P.D., quién para mí fue un excelente profesor, amigo y tutor, además de su importante asesoramiento al inicio de este trabajo.

Al Dr. Víctor Romero, por sus enseñanzas en termofluidos y su motivación para adentrarme en el mundo de la dinámica de fluidos computacional, además de facilitarme a través de la Universidad del Caribe, los recursos computacionales necesarios para esta tesis.

Al M. en P. Set Castillo por su apoyo en el laboratorio de ISE al momento de realizar la parte experimental de este trabajo y a todos mis profesores de la Uqroo que constituyeron mi formación como ingeniero, gracias por su exigencia y calidad como docentes.

A mis tíos Maggi y Fide, por brindarme su apoyo y las facilidades para realizar mi estancia en Cancún durante la tesis.

A mi hermana Dana, por escucharme, apoyarme y procurar que siempre vaya por el camino del bien.

A mis amigos Roger, Geovani, Alfredo y Pepe, por aquellas reuniones compuestas de tareas, desvelos, proyectos y debates. A todos mis compañeros-colegas de la carrera, por haber formado una generación de ISE tan increíble y siempre tener el valor del compañerismo bien firme. Fue un placer coincidir con todos ustedes.

A mis amigos Murilo (Dr. Sunday), Leo, Erick, Dudu y todos los demás miembros de la fraternidad “κόμμα μι πτ”, por enseñarme que la vida también se trata de compartir momentos y sonrisas. “Que a vida é trem-bala parceiro, e a gente é só passageiro prestes a partir”.

A Maritza, quien me ha acompañado durante muchos años y durante mi etapa universitaria me dio ánimos, consejos y motivación, pero sobre todo por su amor incondicional.

Infinitas gracias.

Luis Mauricio García Noverola.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
METODOLOGÍA.....	4
APORTES.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
HIPÓTESIS.....	10
OBJETIVOS.....	10
CAPÍTULO I. NORMAS Y REGLAMENTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES Y VIVIENDA SUSTENTABLE EN MÉXICO.....	12
1.1 Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética en edificaciones.....	12
1.1.1 NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales.....	13
1.1.2 NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional.....	13
1.1.3 NOM-009-ENER-2014. Eficiencia energética en sistemas de aislamientos térmicos industriales.....	13
1.1.4 NOM-018-ENER-2011. Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba.....	14
1.2 Normas nacionales para edificaciones energéticamente eficientes y vivienda sustentable.....	14
1.2.1 NMX-C-7730-ONNCCE-2018. Industria de la Construcción-Ergonomía del ambiente térmico-Determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices VME y PEI y los criterios de confort térmico local.....	14
1.2.2 NMX-C-460-ONNCCE-2009. Industria de la Construcción-Aislamiento térmico-Valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la república mexicana-Especificaciones y verificación.....	15
1.2.3 NMX-J-C-I-489-ANCE-ONNCCE-NYCE-2014. Centros de Datos de Alto Desempeño-Sustentable y energético-Requisitos y métodos de comprobación.....	15
1.2.4 NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación sustentable-Criterios y requerimientos ambientales mínimos.....	15
1.2.5 NMX-AA-171-SCFI-2014. Requisitos y especificaciones de desempeño ambiental de establecimientos de hospedaje.....	15
1.2.6 NMX-AA-SCFI-157-2012. Requisitos y especificaciones de sustentabilidad para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y abandono del sitio de desarrollos inmobiliarios turísticos en la zona costera de la península de Yucatán.....	16
1.3 Certificaciones internacionales para la vivienda sustentable.....	16

1.3.1	Leadership in Energy and Enviromental Desing (LEED).....	16
1.3.2	Living Building Challenge (International Living Future Institute).....	17
1.3.3	BREEAM.....	18
1.3.4	EarthCheck.....	18
1.3.5	Sistema de evaluación Energy Star.....	19
1.4	Medidas y programas públicos en México para el ahorro energético en la vivienda.	19
1.4.1	NAMA Mexicana de Vivienda Sustentable.....	19
1.4.2	Hipoteca Verde.....	20
1.4.3	Vivienda Sustentable: Vida Integral Infonavit.....	21
1.4.4	Código de Conservación de Energía para las Edificaciones de México.....	21
1.4.5	Programa de Vivienda Social-PVS S177.....	22
1.5	Ley de Vivienda.....	22
1.5.1	Ley de Vivienda del estado de Quintana Roo.....	23
CAPÍTULO II. EXPERIMENTACIÓN: PROPIEDADES TÉRMICAS DEL CHUKUM.....		25
2.1	Propiedades de transporte.....	25
2.1.1	Conductividad térmica.....	25
2.1.1.a	Análisis de incertidumbre.....	32
2.1.2	Retardo térmico.....	33
2.1.3	Amortiguamiento térmico.....	33
2.2	Propiedades termodinámicas.....	34
2.2.1	Densidad.....	34
2.2.2	Calor específico.....	34
4.2.1	Difusividad térmica.....	35
2.2.4	Efusividad térmica.....	36
CAPÍTULO III. MEDICIONES <i>IN SITU</i> PARA EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.....		37
3.1	Caso de estudio: hotel Buenavista Bacalar.....	37
3.1.1	Ubicación del lugar.....	38
3.1.2	Caracterización de los sistemas constructivos.....	39
3.1.3	Cálculo de propiedades térmicas de los sistemas constructivos.....	40
3.2	Determinación del retardo y amortiguamiento térmicos de los sistemas.....	51
CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL CHUKUM EN ANSYS FLUENT.....		53
4.1	Modelo de estudio.....	53
4.1.1	Características del modelo 3D.....	54

4.1.2	Componentes de la envolvente del modelo.....	56
4.2	Discretización del modelo.....	57
4.2.1	Controles de malla local.....	58
4.2.2	Controles de malla global.....	60
4.3	Leyes de conservación.....	65
4.3.1	Principio de conservación de la masa.....	65
4.3.2	Principio de conservación de la cantidad de movimiento.....	66
4.3.3	Principio de conservación de la energía.....	67
4.4	Modelos utilizados en Ansys Fluent para el análisis numérico.....	68
4.4.1	Conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento.....	68
4.4.2	Modelo de energía.....	69
4.4.3	Modelo de radiación.....	70
4.4.4	Modelo Boussinesq.....	71
4.4.5	Modelo de turbulencia.....	71
4.5	Simulación numérica en Fluent.....	72
4.5.1	Configuración general.....	73
4.5.2	Modelos.....	73
4.5.3	Materiales.....	75
4.5.4	Condiciones en los volúmenes de control.....	76
4.5.5	Condiciones de frontera.....	77
4.5.6	Métodos de solución.....	81
4.5.7	Controles de solución.....	82
4.5.8	Reportes y monitores.....	83
4.5.9	Valores iniciales e inicio del cálculo.....	84
4.6	Resultados.....	92
4.6.1	Análisis del 23 de mayo.....	92
4.6.2	Análisis del 23 de diciembre.....	94
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
	ANEXOS.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Certificaciones LEED.	17
Figura 2.- Objetivos y categorías de problema BREEAM.	18
Figura 3.- Programa para la fase de entrada de la NAMA de Vivienda Sustentable.	20
Figura 4.- Mapa de México distribuido por zonas climáticas.	22
Figura 5.- Fotografía de los especímenes de chukum con sus canalizaciones para termopares.	26
Figura 6.- Fotografía del monitor SR630 para termopares tipo K.	26
Figura 7.- Fotografía del pesaje de especímenes en báscula.	27
Figura 8.- Fotografía de deshumidificación de especímenes en horno.	28
Figura 9.- Fotografía de colocación de termopares en las superficies de los especímenes.	28
Figura 10.- Secuencia espécimen-placas calefactoras-especimen antes de colocar en Conductímetro.	29
Figura 11.- Fotografía de colocación de termopares en el Conductímetro antes de ser ensamblado.	29
Figura 12.- Fotografía del ensamblaje del Conductímetro ya aislado adiabáticamente con silicón térmico.	30
Figura 13.- Ensayo de conductímetro listo para realizar corridas.	30
Figura 14.- Fotografía del registro de mediciones del ensayo.	31
Figura 15.- Fotografía del exterior de algunas habitaciones del hotel.	37
Figura 16.- Fotografía del exterior de una habitación y su balcón.	38
Figura 17.- Ubicación geográfica de Buenavista.	38
Figura 18.- Esquema del sistema de muro.	39
Figura 19.- Esquema del sistema de techumbre.	39
Figura 20.- Fotografía de la captura de imágenes fototérmicas en el techo.	49
Figura 21.- Imagen infrarroja de la techumbre.	50
Figura 22. Vista de planta del plano arquitectónico del edificio en cuestión del hotel Buenavista Bacalar.	54
Figura 23. Fachada frontal del edificio en cuestión del hotel Buenavista Bacalar.	54
Figura 24. Vista isométrica del modelo 3D con orientación sureste.	55
Figura 25. Vista isométrica del modelo 3D con orientación suroeste.	55
Figura 26. Volúmenes de fluido del modelo 3D con orientación sureste.	56
Figura 27. Volúmenes de fluido del modelo 3D con orientación noroeste.	56
Figura 28. Lista de walls de la envolvente del modelo.	57
Figura 29. Malla de los volúmenes de fluido generado por el método Patch Conforming Tetrahedrons.	59
Figura 30. Detalle de la malla en el volumen de fluido entre las persianas de la entrada de la habitación.	59
Figura 31. Vista interna de VCF tetraédricos de la malla de los volúmenes de fluido.	59
Figura 32. Ejemplo de VCF con elementos cuadráticos.	60
Figura 33. Opciones seleccionadas de la categoría Defaults.	60

Figura 34. Opciones seleccionadas de la categoría Sizing.	61
Figura 35. Opciones seleccionadas de la categoría Quality.	61
Figura 36. Opciones seleccionadas de la categoría Inflation.....	62
Figura 37. Opciones seleccionadas de las categorías Advanced y Statistics.....	62
Figura 38. Vista isométrica de la malla del modelo completo.	63
Figura 39. Vista frontal de la malla de la habitación superior del modelo.....	63
Figura 40. Vista de la malla del modelo con corte transversal a la mitad de la habitación..	64
Figura 41. Vista de la malla del modelo con corte transversal a una altura inmediata antes de la puerta del baño.....	64
Figura 42. Vista de la malla del modelo con corte transversal a la altura de la puerta del baño.	64
Figura 43. Vista de la malla del modelo con corte transversal a la altura de la ventana del baño.	65
Figura 44. Ventana de la configuración general.....	73
Figura 45. Ventana del modelo de turbulencia.....	74
Figura 46. Ventana del modelo de radiación.....	74
Figura 47. Ventana de la herramienta Solar Calculator.....	75
Figura 48. Ventana Create/Edit Materials para el sistema-muro.....	76
Figura 49. Ventana Create/Edit Materials para el aire.	76
Figura 50. Ventana Cell Zone Conditions.....	77
Figura 51. Ventana Boundary Conditions.	78
Figura 52. Condiciones de magnitud de velocidad de las fronteras tipo Velocity-Inlet.	79
Figura 53. Condiciones de temperatura de contraflujo de las fronteras tipo Pressure-Outlet.	79
Figura 54. Ventana Boundary Conditions de Wall_MuroEste_PA.....	80
Figura 55. Ventana Boundary Conditions de Wall_TechoExt_PA.....	81
Figura 56. Ventana Boundary Conditions de Wall_ShowerWindowExt_PA.....	81
Figura 57. Ventana Solution Methods.....	82
Figura 58. Ventana Solution Controls.....	83
Figura 59. Ventana Report Definitions.	84
Figura 60. Ventana Report File.	84
Figura 61. Ventana Solution Initialization.....	85
Figura 62. Escala de residuales al término de la corrida de verano.....	86
Figura 63. Contornos de temperatura en la envolvente del modelo en 120 Time Steps.	87
Figura 64. Planos yz y xz de temperatura del modelo en 120 Time Steps.....	87
Figura 65. Planos yz y xz de velocidad del modelo en 120 Time Steps.	88
Figura 66. Contornos de temperatura en la envolvente del modelo en 420 Time Steps.	88
Figura 67. Planos yz y xz de temperatura del modelo en 420 Time Steps.....	89
Figura 68. Planos yz y xz de velocidad del modelo en 420 Time Steps.	89
Figura 69. Contornos de temperatura en la envolvente del modelo en 720 Time Steps.	90
Figura 70. Planos yz y xz de temperatura del modelo en 720 Time Steps.....	90
Figura 71. Planos yz y xz de velocidad del modelo en 720 Time Steps.	91
Figura 72. Principio de funcionamiento del modelo Solar Load.....	92

Figura 73. Gráfica comparativa Muro Este: Simulada vs Medida.	93
Figura 74. Gráfica comparativa Techo: Simulada vs Medida.	93
Figura 75. Gráfica comparativa Temperatura Interior En Cama: Simulada vs Medida.....	94
Figura 76. Gráfica comparativa Muro Este: 23 diciembre vs 23 mayo.....	95
Figura 77. Gráfica comparativa Techo: 23 diciembre vs 23 mayo.	95
Figura 78. Gráfica comparativa Temperatura Interior En Cama: 23 diciembre vs 23 mayo.	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Métodos de prueba dentro de la NOM-018-ENER-2011.	14
Tabla 2.- Montos máximos de crédito para ecotecnologías.	21
Tabla 3.- Caracterización de especímenes de chukum.	27
Tabla 4.- Conductividad k del chukum para las cuatro corridas experimentales.	32
Tabla 5.- Porcentajes de incertidumbre de cada corrida e incertidumbre promedio del ensayo.	33
Tabla 6.- Conductividades térmicas k y espesor de los materiales de sistemas constructivos.	40
Tabla 7.- Resistencia térmica de morteros en superficies verticales.	45
Tabla 8.- Coeficiente U de morteros en superficies verticales.	45
Tabla 9.- Resistencia térmica de morteros en superficies horizontales.	46
Tabla 10.- Coeficiente U de morteros en superficies horizontales.	46
Tabla 11.- Resistencia térmica total de sistemas de muros con diferentes morteros.	47
Tabla 12.- Coeficiente U de sistemas de muros con diferentes morteros.	47
Tabla 13.- Resistencia térmica total de sistemas de techumbres con diferentes morteros. ...	48
Tabla 14.- Coeficiente U de sistemas de techumbres con diferentes morteros.	48
Tabla 15.- Propiedades térmicas y características dimensionales de los materiales de los sistemas constructivos.	51
Tabla 16.- Amortiguamiento térmico y capacidad de reducción de temperatura de los sistemas analizados.	52

RESUMEN

El extenso uso de la energía eléctrica en el sector residencial y el incremento de la temperatura media anual han incitado al desarrollo de sistemas constructivos para satisfacer las necesidades de confort térmico y de bajo consumo energético en edificaciones. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento térmico del chukum como material aislante para comprobar su efectividad en la obtención de confort térmico y un bajo consumo energético en edificaciones de la región sureste de México. La metodología inició con la revisión bibliográfica de la normatividad existente en materia de eficiencia energética y sustentabilidad en edificaciones, posteriormente se determinó la conductividad térmica del chukum mediante el conductímetro y, con ello, se obtuvieron analíticamente otras de sus propiedades térmicas; se realizaron mediciones de parámetros de confort de un caso de estudio con sistemas constructivos referidos al material en cuestión para analizar el comportamiento de las cargas térmicas y, finalmente, se simuló mediante CFD en *Ansys Fluent* un modelo de la edificación para comprobación y establecimiento de parámetros de diseño bajo distintas condiciones. Como resultado se comprobó la efectividad del chukum como aislante de sistemas constructivos, cumpliendo con criterios de confort térmico bajo condiciones climáticas específicas del sureste mexicano.

INTRODUCCIÓN

El sector energético es el que genera la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global, dentro del cual el mayor porcentaje corresponde a la producción de calor y electricidad. Los aumentos globales de la concentración de CO₂ son primordialmente consecuencias de la quema de combustibles fósiles. Según el *Intergovernmental Panel on Climate Change*, aproximadamente la mitad de las emisiones de GEI acumuladas entre los años 1750 y 2010 se produjeron en los últimos 40 años de ese periodo, correspondiendo para el año de 1970 un total de 27 gigatoneladas de emisiones antropogénicas de CO₂, mientras que para el 2010 corresponde un total de 52 gigatoneladas de CO₂ (Cerdá, 2018).

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2017 de la SENER (Secretaría de Energía, 2018a), el consumo energético nacional creció de 9,140.10 PJ (petajoules) a 9,249.75 PJ del 2016 al 2017, correspondiendo a un aumento porcentual del 1.2%. Del total, 32.1% corresponde al consumo del sector energético mismo, por otra parte, el consumo final total, el cual abarcó 59.45% del consumo nacional, se divide entre consumo no energético y consumo energético, siendo este último la energía destinada a combustión en los procesos y actividades económicas. Consecuentemente, se registró una repartición del consumo energético total del 17.17% perteneciente a los sectores residencial, comercial y público, precedidos solamente por los sectores de transporte y de la industria.

Mientras que en el 2018 (Secretaría de Energía, 2019), el consumo energético nacional fue de 9,236.86 PJ, manifestando un decremento del 0.14% con respecto al 2017, sin embargo, se registró un aumento comparado con el año anterior en lo que respecta al consumo propio del sector energético y el consumo perteneciente a los sectores residencial, comercial y público, siendo de 34.4% y 17.78%, respectivamente.

El sector residencial es uno de los más importantes consumidores de energía eléctrica del país. Para el 2017, el consumo nacional de electricidad alcanzó un total de 260 TWh, de los cuales 59.2 TWh fueron debido al sector residencial, ubicándose por encima de los sectores comercial, público, agropecuario y de transporte, y siendo rebasado solo por el sector industrial, que se divide en grandes empresas y pequeñas-medianas empresas alcanzando un consumo de electricidad entre los dos subsectores de 157 TWh (Secretaría de Energía, 2018b).

En un intento de neutralizar la generación de GEI debido a producción y consumo de energía, surgió la Reforma Energética a la Constitución Política decretada en el 2013 y la Ley de Transición Energética expedida en el 2015, las cuales tienen como objetivos reducir el precio de la electricidad e incrementar la participación de energías limpias en su generación, crear estrategias para obtener un suministro de combustibles con mejores precios, promover la reducción de emisiones de GEI a través de la eficiencia energética y la sustitución de combustibles para el uso de transporte individual que emplea hidrocarburos, además de liberar la importación de gasolina y su venta a precio de mercado (Rosas-Flores, 2017).

En México, la electricidad es el tipo de energía más utilizado en viviendas y edificaciones, debido al uso de electrodomésticos, equipos de iluminación y sistemas de climatización. En regiones del norte de México donde el clima es cálido-seco y en las costas, las cuales se caracterizan en su mayoría por ser de climas cálido-húmedo, la demanda de electricidad para

su uso en climatización es mayor al resto del país; las zonas desérticas del norte, así como el sureste, se identifican por un elevado uso del aire acondicionado comparado con el uso de los demás equipos eléctricos (CONAVI, 2006).

Teniendo una perspectiva integral de lo anterior, el calentamiento global forma parte del ciclo “causa-efecto” conformado por el alto consumo de energía eléctrica, la enorme producción de energía a base de combustibles fósiles y la consecuente emisión descontrolada de GEI a la atmósfera, de tal manera que es evidente el incremento de la temperatura media anual en el planeta. En México, la temperatura media anual de 22.6 °C en el 2017 superó por 1.6 °C el promedio anual entre 1981-2010, y por 0.2 °C el registro previo en 2016, de igual manera, Quintana Roo fue uno de los estados que alcanzó su año más cálido en el 2017 (CONAGUA, 2017). Específicamente en el sur de Quintana Roo, la temperatura media anual registrada en el periodo del 2000 al 2014 fue de 27.4 °C (Aguayo, 2016), mientras que en el periodo del 2005 al 2019 (misma cantidad de años), la temperatura media anual registrada por la CONAGUA (observe el ANEXO 1) fue de 27.6 °C, correspondiendo los meses más cálidos entre mayo y agosto, con temperaturas media anuales de 29.3 °C y 29.7 °C, respectivamente. De acuerdo con García (García & Fuentes, 2005), basado en el criterio de Szokolay para determinar los días grado en el sureste de Quintana Roo, la temperatura neutra observada en el periodo considerado es de 26.31 °C, situando la zona de confort térmico en ± 2.5 °C con respecto a la temperatura neutra. Este hecho demuestra la necesidad de mejorar el desempeño de la envolvente como aislante térmico con la finalidad de obtener espacios térmicamente confortables y energéticamente eficientes en edificaciones.

Así, en la presente investigación se discute la necesidad actual de utilizar materiales alternos a los utilizados comúnmente como acabados en los sistemas constructivos, como son los morteros a base de cemento Portland tipo 1 y polvo de piedra caliza y, en algunos casos, mezclas con cal. Consecuentemente, se realizó una revisión bibliográfica sobre normatividad de edificaciones energéticamente eficientes y viviendas sustentables en México, posteriormente, se determinó la conductividad térmica del chukum mediante el ensayo experimental del conductímetro y con ello, de manera analítica se obtuvieron otras de sus propiedades térmicas, utilizando el material a juicio como acabado en la envolvente. Seguidamente, se midieron ciertas variables de un caso de estudio para determinar el retardo y amortiguamiento térmicos de la edificación, para finalizar el análisis del comportamiento del chukum mediante una simulación de termofluidos del edificio en cuestión con las propiedades del material aplicado a los sistemas constructivos.

JUSTIFICACIÓN

La necesidad de mantener un ambiente confortable en las edificaciones es indispensable para obtener un buen rendimiento en las actividades diarias de las personas. En Quintana Roo, debido al tipo de clima cálido-húmedo, siendo de tipo Aw en la clasificación de Köppen (García, 2004), es importante que las condiciones del interior de los recintos se encuentren dentro de la zona de confort térmico caracterizada por el clima mismo.

El estado, al estar formado en su mayoría por un ecosistema selvático, permite utilizar materiales obtenidos de la naturaleza para diferentes aplicaciones, siendo una de estas su implementación en sistemas constructivos.

En el sureste de México, especialmente en la península de Yucatán, se ha utilizado el chukum (nombre en maya) como principal acabado superficial en muchas obras contemporáneas, tendencia que inició en el presente siglo y se ha vuelto popular entre arquitectos e ingenieros; principalmente en Mérida, Yucatán, y en distintas localidades a lo largo de la Costa Maya en Quintana Roo su aplicación ha sido creciente, lo cual hace relevante el estudio de este material con la finalidad de justificar su acertado uso en sistemas constructivos.

La mezcla del chukum se produce de la resina del árbol *Havardia albicans*, endémico de la misma región, el cual se caracteriza por ser de madera semidura y espinosa. El extracto de la resina es mezclado en distintas proporciones con cemento blanco y polvo de piedra caliza, para así tomar los taninos del chukum y dar un color característico a la mezcla final, además de contar con un mejor fraguado (C. García, 2019). El producto final es utilizado como acabado de fachadas en edificaciones, ya sea en muros, techos, pisos e incluso en superficies de albercas.

En una entrevista (I. Bojórquez, entrevista de campo, 25 de febrero de 2019) a los productores y aplicadores de chukum Velázquez A., Serafín F. y López E., quienes expresaron que algunos de los beneficios al utilizar el material son: genera una vista y textura agradables, es un material “vivo” debido a que se percibe cierta interacción o adaptación de acuerdo al ambiente donde es aplicado, proporciona un buen contraste en interiores combinado con mobiliario, presenta una amplia gama de colores, no necesita ningún otro recubrimiento, disminuye la necesidad de iluminación en muros, en superficies en contacto con agua genera un tono agradable y fresco y, por último, siendo el beneficio de mayor interés objeto de estudio en esta investigación, a pesar de ser justificado de manera empírica hasta el momento, es que genera una frescura en los espacios logrando mantener un ambiente interior térmicamente confortable.

De manera que, estudiar las propiedades termofísicas y el comportamiento térmico del chukum, es de vital importancia para comprobar la influencia del material en la generación de espacios térmicamente confortables en edificaciones que además presentan un ahorro energético.

METODOLOGÍA

Este estudio se basó en el método científico, de tal manera que su desarrollo consistió en los siguientes métodos empíricos:

- Descriptivo:

Con base en la investigación bibliográfica de trabajos realizados anteriormente y la normatividad vigente con respecto a edificación y vivienda en México, se analizaron las vertientes más significativas para correlacionar las variables comprometidas en materia de eficiencia energética y sustentabilidad.

- Experimental-confirmatorio:

Se determinó la conductividad térmica del chukum por medio de un experimento de laboratorio bajo condiciones controladas, de tal manera que se manipularon variables que influyeron en la variable experimental no comprobada. Consecuentemente, se determinaron

analíticamente otras de las propiedades térmicas del material con base en la verificación empírica del comportamiento de este en el experimento.

- Predictivo-confirmatorio de campo:

De acuerdo con los cálculos de resistencia y coeficiente global U de distintos materiales estudiados de la región, se compararon y analizaron estas propiedades del chukum conforme al mismo procedimiento analítico, para finalizar con la comprobación del comportamiento de los sistemas constructivos en cuestión mediante mediciones *in situ* en un caso de estudio.

- Predictivo-evaluativo:

Con los resultados obtenidos del comportamiento térmico del chukum a través de los métodos anteriores, se realizó una simulación del flujo de fluidos de la edificación del caso de estudio, incluyendo los fenómenos de transferencia de calor, con la finalidad de realizar una valoración de los resultados del comportamiento esperado del material bajo criterios específicos y obtener un juicio final en la efectividad de este.

APORTES

Una metodología para el análisis del confort térmico en edificaciones, compuesta por la determinación de las propiedades térmicas y termodinámicas del material, su comportamiento como aislante térmico en la envolvente y el análisis del comportamiento de los fenómenos de transferencia de calor en la envolvente y espacio interior en edificaciones.

MARCO TEÓRICO

La bioclimática es el estudio aplicado a conseguir espacios térmicamente confortables en edificaciones aprovechando las condiciones climáticas y los recursos naturales disponibles. Existen diversas líneas de investigación en este estudio, las cuales consisten principalmente en la reducción o aumento de la temperatura interior del recinto a través de la ganancia térmica de la envolvente, ya sea por medio de sistemas pasivos o activos de climatización, dependiendo del tipo de bioclima en cuestión; en la literatura, distintos investigadores han hecho aportes en el análisis de la ganancia térmica a través de sus experiencias en el diseño bioclimático.

Una fenomenología conocida para reducir la temperatura de los espacios es el enfriamiento evaporativo indirecto (EEI). García y Anais (2018) experimentaron con prototipos de sistemas pasivos de EEI aplicados a cubiertas de edificaciones para el clima cálido-húmedo en la ciudad de Mérida, Yucatán, las pruebas se realizaron con 5 módulos experimentales con diferentes sistemas, de los cuales el módulo que implicó el uso de masa y aislamiento térmicos presentó los mejores resultados obteniendo una disminución de 5 °C con respecto a la temperatura máxima exterior del ambiente.

Por otro lado, la orientación de las edificaciones con el afán de aprovechar la ventilación cruzada o corrientes de aire es también utilizada como constituyente de confort. En un estudio (Díaz *et al.*, 2017) se analizó el comportamiento térmico de una vivienda de interés social en la ciudad de Mérida, Yucatán, para lo cual se clasificaron los meses del año en tres periodos de diferentes microclimas, además se utilizó en cada uno de ellos modelos con cuatro

distintas orientaciones y con dos sistemas de techos diferentes (vigüeta-bovedilla de concreto con cámara de aire y vigüeta-bovedilla de poliestireno sin cámaras de aire) y se comparó en cada uno de ellos mediante simulación numérica los parámetros de temperatura de bulbo seco y humedad relativa, con las variaciones de utilizar cuatro distintas orientaciones de la casa, con los resultados se concluyó que para el periodo fresco conviene usar el sistema con bovedilla de poliestireno y para los demás periodos se recomienda el material con bovedilla de concreto, ambos con la misma orientación, sin embargo, la mayoría del año se registró incomfort térmico por lo que se recomienda mayor ventilación interna.

La ganancia solar directa en las edificaciones es un factor que propicia elevadas temperaturas dentro de los recintos debido a la alta radiación solar incidente en el territorio mexicano, por ello, los sistemas de control solar son mecanismos importantes en la arquitectura bioclimática. Oropeza (2017) propuso un método para diseñar un sistema de control solar (un alero exterior) para ventanas como protección de la radiación solar, formuló una ecuación en función de la altura de la ventana, el ángulo de elevación solar y el ángulo de inclinación del alero con un eje de rotación horizontal, en sus resultados obtuvo que para un ángulo de elevación solar menor a 45° la longitud del alero disminuye conforme el ángulo de inclinación es menor, mientras que para una elevación solar mayor a 45° la longitud del alero aumenta si el ángulo de inclinación es menor. También recomienda que los dispositivos de control solar sean dinámicos, es decir, debe responder tanto a la posición solar como a la longitud de la superficie por sombrear.

Otro principio por el cual puede ser tratada la ganancia de calor debido a la radiación solar además del control solar, es el tratamiento de la ganancia por medio de convección y conducción de las superficies semitransparentes. Oropeza (2019) analizó mediante simulación el comportamiento térmico, lumínico y acústico de una edificación con ventanas de doble vidriado bajo las condiciones climáticas cálidas de Ciudad Obregón, Sonora y Chetumal, Quintana Roo. Por medio del software EnergyPlus determinó que la temperatura al interior de la vivienda disminuyó en promedio 0.5°C , por lo cual concluyó que este mecanismo de enfriamiento pasivo presenta posibles ventajas significativas para el confort térmico si se combina con otros métodos como aislamiento de la envolvente, control solar, superficies verdes, entre otros.

Asimismo, la evapotranspiración causada por las cubiertas verdes es otro principio de funcionamiento para reducir la ganancia térmica en techumbres causada por la radiación solar. Morales, *et al.* (2010) compararon el flujo de calor por conducción de una techumbre tradicional de concreto con una techumbre con cubierta verde implementada en la Ciudad de México, alcaldía Xochimilco, para ello utilizaron ecuaciones dentro de la literatura y determinaron el flujo de calor para cada tipo de techumbre, siendo para la convencional de 120.3 W/m^2 por hora y para la de cubierta verde de 19.77 W/m^2 por hora; además, realizaron mediciones de la temperatura superficial promedio del plafón al interior del recinto y obtuvieron una disminución de 5°C para la techumbre ecológica respecto a la convencional, concluyendo que existe una reducción significativa de calor por conducción mediante la cubierta vegetal.

Entender que la envolvente actúa como filtro entre las condiciones externas e internas de la edificación para controlar la entrada de aire, calor, luz, ruidos y olores, de modo que los materiales que la conforman tienen un papel decisivo en el control de la radiación solar,

permite una precisa elección del material acabado de las superficies de muros y techumbres, conocidos como mortero en la región sureste del país. Borbón, *et al.* (2017) experimentaron con morteros a base de cemento y arena, los cuales aligeraron sustituyendo la arena con perlita preexpandida comercial en diferentes proporciones; realizaron pruebas de esfuerzo a la compresión y conductividad térmica comprobando la relación densidad-conductividad existente de las mezclas, para así determinar la aplicación sugerida de cada una de ellas.

De igual manera, el uso de maderas tropicales como componentes de la envolvente tanto en viviendas como en edificios no residenciales ha sido constante desde los primeros asentamientos humanos hasta la época contemporánea en la frontera del caribe mexicano. Bojórquez, *et al.* (2010) determinaron las propiedades térmicas de las maderas tsalam, jabín y caoba, así como el comportamiento sinusoidal de las temperaturas superficiales internas con respecto a las externas de las maderas, con lo cual recomendaron utilizar las maderas duras para elementos estructurales y las blandas para elementos de la envolvente.

Es importante correlacionar los beneficios proporcionados por las propiedades de los materiales de la envolvente con el nivel de satisfacción de los usuarios con respecto al uso de edificaciones para determinar si existe realmente la sensación de confort térmico en los espacios. Bojórquez, *et al.* (2017) propusieron una metodología para el diseño de recintos térmicamente eficientes y de bajo consumo energético basada en tres pasos: 1) analizar predictivamente las condiciones de confort durante el proceso del diseño conceptual mediante mediciones *in situ* del recinto, 2) medir los niveles de insatisfacción del espacio construido analíticamente mediante la metodología de Fanger y compararlos por medio de la aplicación de una encuesta de insatisfacción de acuerdo a los niveles de actividad de los usuarios y, 3) analizar mediante simulación, el comportamiento de los fluidos en el interior de la edificación por medio de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés).

Bárceñas (2007) experimentalmente analizó y comparó mediante el equipo llamado “caja caliente” el comportamiento térmico de materiales comúnmente utilizados en techumbres en el clima cálido-húmedo, tales como los asfálticos y elastoméricos con materiales polifásicos con fibras orgánicas y, además, determinó un modelo multivariable para la obtención de las temperaturas superficiales para cada superficie de los materiales mencionados, en función de la hora solar, la radiación solar y el ángulo de incidencia; el resultado que obtuvo fueron doce nomogramas para determinar temperaturas superficiales de seis diferentes materiales.

Otro estudio realizado bajo condiciones climáticas cálido-húmedas, específicamente en la Zona Maya de Quintana Roo, fue elaborado por Aguayo (2016), en el cual analizó el comportamiento térmico de un material reforzado con fibras orgánicas; de manera que elaboró distintas muestras del material con matriz de cemento Portland tipo 1 y las reforzó con fibra de la especie *Lagenaria siceraria* en distintas proporciones con polvo de piedra caliza y cal y determinó experimentalmente sus propiedades térmicas y de transporte mediante diversas metodologías, además, determinó las conductividades térmicas de sus materiales mediante un modelo de redes neuronales artificiales en MATLAB como una manera de acelerar el proceso de obtención de dicha propiedad y, simuló el comportamiento térmico del fluido de un modelo de una cabaña con las propiedades del material estudiado en *Ansys Fluent* y lo comparó con un modelo con materiales convencionales. Su estudio aportó una metodología para el análisis del confort térmico en edificaciones. Cabe recalcar que este

fue el primer estudio bioclimático realizado mediante simulación numérica con CFD en el estado de Quintana Roo.

Las cargas térmicas que actúan sobre la envolvente son una combinación de los efectos de radiación y convección, los cuales se originan por la radiación solar incidente y por el intercambio de calor con la temperatura del aire del entorno, respectivamente. Estas presentan fluctuaciones de comportamiento sinusoidal, se retardan y experimentan distorsiones en su amplitud al filtrarse a través de la envolvente. Diversos autores han estudiado los efectos del retardo y amortiguamiento térmicos que experimenta la envolvente, por lo cual han sido propiedades de los materiales esenciales en la búsqueda de confort térmico.

En un estudio realizado por Trujillo, *et al.* (2015) se comparó el desempeño térmico de un techo verde con uno de concreto reforzado para una vivienda experimental en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, por medio de mediciones de temperatura superficial y ambiental; se concluyó que el techo verde es un sistema con características térmicas adecuadas al clima de la ciudad, ya que sus propiedades térmicas y termodinámicas, principalmente densidad, calor específico y conductividad térmica, otorgaron al sistema temperaturas máximas y mínimas que permitieron una amplitud térmica menor con respecto al techo de concreto, de igual manera, presentó un retardo térmico de 6 horas y excedió el límite de temperatura de la zona de confort en un 90% menos comparado con la temperatura límite del techo de concreto. Otra investigación (Roux-Gutiérrez, 2018) efectuó un análisis similar de una técnica constructiva llamada “bahareque” (mezcla de material vegetal o industrial para la estructura, y tierra o barro como relleno y revestimiento) en comparación con muros de bloque de tierra comprimida, bloques de concreto vibro comprimidos y ladrillo; se realizaron pruebas de conductividad térmica para determinar esta propiedad en diferentes compuestos de bahareque y se realizaron mediciones de temperatura con imágenes termográficas para obtener el retardo térmico de cada compuesto a través de un análisis dinámico. Finalmente, se concluyó que los sistemas con esta técnica proporcionan un mayor retardo térmico que los sistemas convencionales, en especial el compuesto con poliestireno, además de que proporcionan temperaturas interiores menores y la mayoría de los compuestos proporciona temperaturas exteriores un poco mayores a los sistemas convencionales, pero gracias a la característica de retardo, logran mantener el espacio interior dentro de los límites de temperatura de confort para la región donde se realizó el estudio.

Asimismo, en un estudio (Bojórquez, *et al.*, 2010) se analizan dos sistemas de techos, concreto armado y vigueta y bovedilla, ambos con morteros variantes en su composición cemento-cal-arena; se concluyó que el previo conocimiento de las propiedades de los materiales permite aproximar el comportamiento térmico de estos, tales como la difusividad y efusividad térmica, densidad y calor específico, de igual manera, el coeficiente U y la resistencia térmica permiten determinar qué material es más eficiente para almacenar energía térmica, siendo los morteros compuestos con cal los de menor capacidad de transporte de flujo térmico; además, a través de un levantamiento fototérmico mediante imágenes infrarrojas, se determinaron los retardos y amortiguamientos térmicos en un periodo de 24 horas en uno de los días típicos más calurosos del mes de mayo, sin embargo, se obtuvo que a pesar de que el sistema de vigueta y bovedilla presentó temperaturas menores que el sistema de concreto armado en las horas de mayor irradiancia, la carga térmica interior con este se

mantiene siempre por encima del valor máximo de la zona de confort térmico (ZCT) local, mientras que el sistema de concreto armado presenta temperaturas dentro de la ZCT las primeras siete horas del día, en el período de mayor irradiancia las temperaturas se elevan por encima de los 40 °C. Esta metodología es útil para definir el punto de partida para las recomendaciones de diseño de los elementos de la envolvente.

En diseño bioclimático, la utilización apropiada del material y de la inercia térmica son muy importantes para conseguir confort térmico en el interior de la edificación, al igual que la sensación de equilibrio térmico, el cual se consigue cuando la temperatura ambiente se estabiliza con respecto a la temperatura corporal, dicho esto, se sabe que los medios con los cuales el cuerpo humano intercambia calor con su entorno son los procesos de radiación, conducción, convección y evaporación.

En realidad, la zona de confort está en función de parámetros como la edad y género de los individuos, su vestimenta y el tipo de actividad que realizan, además, de acuerdo con la ubicación geográfica del lugar y el período del año el tipo de clima transforma la zona de confort modificando los requerimientos térmicos. Conjuntamente, las magnitudes que definen los límites de la zona de confort térmico son la temperatura seca y la humedad relativa del ambiente, las cuales se considera que están en función de elementos climáticos los cuales deben ser modificados para lograr estar dentro de dichos límites.

Elementos como la velocidad del viento y la evaporación influyen en la temperatura seca, debido a la pérdida de calor por convección y el rechazo de calor del ambiente, respectivamente para cada uno de ellos; por otro lado, la presión de vapor, que es una medida de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, la cual afecta a la humedad relativa, al alcanzar cierto nivel ocasiona una sensación de opresión que puede ser contrarrestada por el efecto del viento, mientras que la radiación solar es un elemento útil ya que contribuye a la ganancia de calor en el cuerpo en presencia de bajas temperaturas del ambiente. Los estudios citados anteriormente utilizaron mediciones de estas variables climatológicas en su metodología y experimentación para determinar el comportamiento térmico de los espacios interiores y verificar si cumple con los requerimientos de confort.

El uso de software de simulación de CFD ha facilitado los avances científicos en muchas ramas de la ingeniería, y la bioclimática es una de ellas. El análisis numérico para la resolución de ecuaciones que satisfacen los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) es atractivo porque permite ahorrar significativamente recurso matemático y tiempo, además de que ofrece la posibilidad de un mayor control (cuando se cuenta con los datos necesarios) en las variables que influyen en el confort térmico del espacio, tales como la velocidad del viento, temperatura y radiación.

En el tutorial *Using Solar Load Model for Indoor Ventilation* (ANSYS, 2007) se realizó el análisis numérico del flujo de fluidos para simular el comportamiento térmico del espacio interior en una oficina de Fluent en Sheffield, Inglaterra; se controlaron principalmente las variables de temperatura de corriente libre y temperatura de radiación externa, utilizadas respectivamente en el cálculo por convección y radiación, ambas como condiciones de frontera de la envolvente, consecuentemente, se destacó el uso del modelo *Solar Load* para establecer la temperatura de radiación externa (o temperatura efectiva del cielo) en las fronteras, determinando la irradiancia total como la suma de la irradiancia directa, difusa y reflejada del suelo para cada superficie de la envolvente dependiendo su orientación. Con los

resultados se obtuvieron datos de distintos flujos de calor (flujo de irradiancia solar absorbida, irradiancia solar transmitida, etc.) e imágenes de post-procesamiento de los contornos de temperatura en las superficies de la envolvente.

Para consumar, la documentación realizada hasta ahora permite analizar los distintos métodos que se han estudiado para la obtención de espacios térmicamente confortables a través de diversas fenomenologías, llevándonos al punto de reconocer que el estudio en cuestión de los materiales que componen la envolvente es el más prometedor para los objetivos planteados en este trabajo. Debidamente, es necesario realizar las siguientes cuestiones:

- ¿Qué relación existe entre las propiedades térmicas del chukum y el comportamiento térmico del espacio en una edificación donde se ha aplicado el mismo?
- ¿El comportamiento térmico del chukum presenta mejores condiciones de confort comparado con los materiales comúnmente utilizados en la región?
- ¿El chukum presenta una mejora en las propiedades térmicas de los sistemas constructivos normalmente utilizados en la región?
- ¿De qué manera se correlaciona el comportamiento térmico de una edificación con chukum aplicado con el nivel de satisfacción térmica de los usuarios?
- ¿Existe una relación entre el comportamiento térmico, la satisfacción térmica y la eficiencia energética procedente en una edificación?

HIPÓTESIS

El comportamiento térmico del chukum como material de acabado en superficies es un componente efectivo para la obtención de espacios térmicamente confortables en edificaciones de bajo consumo energético comparado con materiales estándares de construcción.

OBJETIVOS

General:

- Evaluar la influencia del chukum en el comportamiento térmico de espacios interiores, para comprobar su efectividad como material aislante en la búsqueda de confort térmico mediante un bajo consumo energético en edificaciones de la región sureste de México.

Específicos:

- Investigar la normatividad existente en cuestión de eficiencia energética y materiales aislantes en edificaciones, así como la reglamentación existente para viviendas sustentables.
- Determinar experimentalmente la conductividad térmica del chukum mediante el banco de pruebas de conductividad térmica y consecuentemente, de manera analítica, otras de sus propiedades térmicas.
- Medir los parámetros de confort térmico de la edificación en cuestión mediante la captura de temperaturas superficiales a través de imágenes infrarrojas y de valores de humedad

relativa como condición *sine qua non* para el análisis del comportamiento térmico del espacio y para la simulación.

- Evaluar mediante simulación en *Ansys Fluent* el comportamiento térmico de la edificación en cuestión, utilizando un modelo que incluya las características termofísicas del chukum.

CAPÍTULO I. NORMAS Y REGLAMENTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES Y VIVIENDA SUSTENTABLE EN MÉXICO.

Actualmente México cuenta con un conjunto de normas oficiales en las cuales se conciertan las características técnicas deseables ya sea de un producto, proceso o servicio, las cuales deben acatar los sectores interesados (fabricantes, usuarios y gobierno), así como también los derechos y obligaciones que deben desempeñar las empresas y los individuos dentro del territorio nacional con relación al proceso, siendo el caso, a cualquier proceso industrial referente al aspecto energético.

A pesar de que en el 2013 fue impulsada la Reforma Energética, todo asunto normativo y de evaluación en materia de energía se rige bajo el marco de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, de la cual derivan los tres principales tipos de normas de aceptación mexicana para el desarrollo nacional (Ley Federal Sobre Metrología y Normalización, 1992):

- Normas Oficiales Mexicanas (NOM): son de observancia obligatoria y expedidas por las dependencias de Gobierno Federal a través de los Comités Consultivos Nacionales de Normalización (CCNN). En ellas se establecen reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se le refieran a su cumplimiento o aplicación.
- Norma Mexicana (NMX): son primordialmente de carácter voluntario y elaboradas por un organismo nacional de normalización. Dichas normas en ningún momento podrán contener especificaciones inferiores a las establecidas en las normas oficiales mexicanas y principalmente constituyen referencia para determinar la calidad de los productos y servicios de que se trate, particularmente para la protección y orientación de los consumidores.
- Normas de Referencia (NRF): son aquellas elaboradas por comités de normalización constituidas por entidades de la administración pública, para aplicarlas conforme a los bienes o servicios que adquieren, arrienden o contratan cuando las normas mexicanas o internacionales no cubran los requerimientos de estas o sus especificaciones resulten obsoletas o inaplicables.

1.1 Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética en edificaciones

El organismo federal que expide las diferentes NOM de eficiencia energética es la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), a través del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) de manera que, actualmente se rigen cuatro normas oficiales mexicanas en cuanto a mecanismos de eficiencia energética en edificaciones, las cuales se sintetizan a continuación.

1.1.1 NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales.

Esta norma tiene como objetivo optimizar el diseño de edificaciones no residenciales desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envolvente, de tal manera que dirige los cálculos de ganancia de calor por conducción y radiación considerando las partes opacas y transparentes de esta; además, considera la aplicación de parte soles, el cálculo de resistencias térmicas de los materiales del sistema constructivo y valores de irradiación determinadas para distintas ciudades de la república. Al final compara los cálculos de ganancia de calor entre el edificio proyectado y el edificio de referencia, el cual es utilizado para determinar un presupuesto energético máximo. Sin embargo, esta norma tiene un alto grado de incertidumbre respecto al cálculo debido a que, para el edificio de referencia, maneja valores constantes de ganancia de calor para las partes opacas y transparentes de la envolvente, mientras que, para el edificio proyectado, los valores de temperaturas promedio para cada ciudad también los considera constantes en cualquier época del año, además de estar desactualizados.

1.1.2 NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional.

Proporciona la reglamentación para el diseño térmicamente eficiente de edificaciones de tipo residencial, a través de la ganancia térmica de la envolvente. Esta norma presenta mucha similitud con la NOM-008-ENER-2001, con la diferencia de que en los cálculos de la ganancia de calor del edificio proyectado y del edificio de referencia considera porciones distintas de las partes opacas y transparentes de la envolvente, pero básicamente los valores de temperaturas promedio por ciudad y la metodología de cálculo son los mismos. Sin mencionar que, hay investigaciones que señalan que la norma se rige por un análisis de transferencia de calor en estado estacionario, de manera que los cálculos son independientes del tiempo, por lo que existe la posibilidad de una mayor incertidumbre (Barrios et al., 2012).

1.1.3 NOM-009-ENER-2014. Eficiencia energética en sistemas de aislamientos térmicos industriales.

La presente norma tiene como objetivo establecer la eficiencia energética de los sistemas de aislamientos térmicos industriales, a través del método de prueba de la densidad de flujo térmico en tuberías y equipos, teniendo como punto límite de referencia la máxima densidad de flujo térmico permitida; la finalidad de la norma es reducir las pérdidas y ganancias de calor en procesos que operan a altas y bajas temperaturas, respectivamente. El método de cálculo presenta procedimientos para determinar conducción térmica, transmitancia térmica, temperaturas en tuberías y tiempo de congelación del fluido en tuberías, así como en superficies planas. El rango de temperaturas para su aplicación es de los -200 °C hasta los 650 °C.

1.1.4 NOM-018-ENER-2011. Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba.

Dicha norma tiene como propósito establecer las características y métodos de prueba que debe cumplir todo producto, componente y/o elemento termoaislante aplicado en techos, plafones y muros en edificaciones. Tales métodos evalúan la conductividad térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua, adsorción de humedad y absorción de agua de aquellos materiales utilizados como aislante. A continuación, se muestran en la tabla 1 las respectivas Normas Mexicanas que considera la NOM-018-ENER-2011 para evaluar las distintas propiedades por medio de sus métodos de prueba.

Tabla 1.- Métodos de prueba dentro de la NOM-018-ENER-2011.

Propiedad	Método de prueba
Densidad aparente	NMX-C-125-ONNCCE-2010; NMX-C-126-ONNCCE-2010; NMX-C-213-ONNCCE-2010; NMX-C-258-ONNCCE-2010
Conductividad térmica	NMX-C-181-ONNCCE-2010; NMX-C-189-ONNCCE-2010
Permeabilidad al vapor de agua	NMX-C-210-ONNCCE-2010
Adsorción de humedad y absorción de agua	NMX-C-228-ONNCCE-2010

Fuente: NOM-018-ENER-2011.

1.2 Normas nacionales para edificaciones energéticamente eficientes y vivienda sustentable.

Como se mencionó anteriormente, estas normas son elaboradas y expedidas por organismos nacionales de normalización, sin embargo, muchas NOM se basan en consideraciones de las Normas Mexicanas. La ONNCCE y la SCFI son dos organismos encargados de elaborar normas en materia de edificación sustentable. Algunas se presentan a continuación.

1.2.1 NMX-C-7730-ONNCCE-2018. Industria de la Construcción-Ergonomía del ambiente térmico-Determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices VME y PEI y los criterios de confort térmico local.

Esta norma tiene como fin evaluar y pronosticar la sensación térmica en edificaciones y el grado de insatisfacción térmica que los usuarios experimentan dentro de los recintos, mediante métodos de cálculo como el índice VME y PEI bajo los criterios de confort térmico local, de tal manera que presenta las condiciones ambientales aceptables para espacios térmicamente confortables.

1.2.2 NMX-C-460-ONNCCE-2009. Industria de la Construcción-Aislamiento térmico-Valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la república mexicana-Especificaciones y verificación.

Tal norma establece las especificaciones de la resistencia térmica total (valor “R”) que se aplican a las envolventes de las viviendas con el fin de mejorar las condiciones de habitabilidad y disminuir la demanda de energía utilizada para acondicionar térmicamente su interior, de acuerdo con la zona térmica del estado en que se ubique. Se aplica a todo elemento de la envolvente que considere techos, plafones y muros, con excepción de cimentaciones; además, con base en la NOM-018-ENER-2011, el fabricante de los productos debe indicar densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua, adsorción de humedad, absorción de agua y la conductividad térmica medida a una temperatura de 24 °C del material. La región de la Península de Yucatán se encuentra dentro de la zona térmica 1 de la norma (Aw en la clasificación de Köppen), por lo que le corresponden ciertos valores de resistencia del aislamiento térmico para evitar el discomfort térmico.

1.2.3 NMX-J-C-I-489-ANCE-ONNCCE-NYCE-2014. Centros de Datos de Alto Desempeño-Sustentable y energético-Requisitos y métodos de comprobación.

El objetivo de esta norma es establecer los requisitos de diseño, operación y construcción de las edificaciones sustentables y energéticamente eficientes denominadas centros de datos de alto desempeño (CDAD). Dentro de la metodología se analiza el balance de los riesgos y se encauzan oportunidades hacia el uso de tecnologías de la información, además de realizar un estudio de ciclo de vida de materiales y equipos, asegurar una métrica de eficiencia energética y verificar las mejores prácticas de instalación de los sistemas involucrados.

1.2.4 NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación sustentable-Criterios y requerimientos ambientales mínimos.

Esta norma mexicana especifica los criterios y exigencias ambientales mínimos de una edificación sustentable para contribuir en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin descuidar los aspectos socioeconómicos que aseguran su viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano y natural. Su aplicación es voluntaria y comprende desde edificaciones públicas o privadas, destinadas total o parcialmente a actividades de índole habitacional, comercial, de servicios o industrial. Además, su aplicación será a una o varias de sus fases como diseño, construcción, operación y mantenimiento, así como en proyectos de remodelación del edificio (Secretaría de Economía, 2013).

1.2.5 NMX-AA-171-SCFI-2014. Requisitos y especificaciones de desempeño ambiental de establecimientos de hospedaje.

Actualmente, las exigencias de los turistas se inclinan hacia un turismo comprometido con respecto a los intereses ambientales, por lo cual la sustentabilidad se ha convertido en un

componente indispensable para el éxito dentro del contexto de competitividad en el sector turismo. Por ello, la implementación no obligatoria de la norma presente es para fomentar que los establecimientos de hospedaje tengan políticas y programas con actividades específicas con las que prevengan y mitiguen el impacto ambiental causados durante su operación, además de establecer los requisitos y especificaciones de desempeño ambiental en temas como hábitat, agua, residuos, energía, aire y mejores prácticas en adquisiciones y ahorro de recursos materiales (Secretaría de Economía, 2014).

1.2.6 NMX-AA-SCFI-157-2012. Requisitos y especificaciones de sustentabilidad para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y abandono del sitio de desarrollos inmobiliarios turísticos en la zona costera de la península de Yucatán.

Esta norma tiene como objetivo establecer los requisitos y especificaciones de desempeño ambiental para la operación de establecimientos de hospedaje. En su campo de aplicación se encuentran los prestadores de servicios turísticos, propietarios, desarrolladores inmobiliarios, administradores y demás interesados en demostrar el cumplimiento de las especificaciones de desempeño sustentable, que establece la presente norma en los desarrollos inmobiliarios turísticos que se ubiquen en la zona costera de la Península de Yucatán (Secretaría de Economía, 2012).

1.3 Certificaciones internacionales para la vivienda sustentable.

Es relevante conocer como marco informativo las certificaciones internacionales de vivienda sustentable, ya que estas mismas emanan de las normas internacionales que muchas veces son utilizadas como referencia para la creación y consignación de las normas oficiales del país.

1.3.1 Leadership in Energy and Environmental Design (LEED).

Esta certificación pertenece al *Green Building Council* de los Estados Unidos, el cual es uno de los organismos de edificación sustentable más reconocido a nivel mundial. Las certificaciones LEED proporcionan una amplia variedad de reconocimientos en materia sustentable como salud, eficiencia energética, reducción de contaminación, materiales amigables con el ambiente, ahorro de costos, entre otros; además, se aplican para todo tipo de edificación, algunas de ellas son: *Building Design and Construction (BD+C)*, *Interior Design and Construction (ID+C)*, *Building Operations and Maintenance (O+M)*, *Neighborhood Development (ND)*, *Homes, Cities and Communities*, *LEED Recertification* y *LEED Zero*. El nivel de las certificaciones LEED se califican según el puntaje obtenido a través de estrategias de sustentabilidad del edificio, según sea su categoría, desde la certificación normal (40-49 puntos), certificación *Silver* (50-59 puntos), certificación *Gold* (60-79 puntos) y certificación *Platinum* (80+) (U.S. Green Building Council, 2020). En la figura 1.1 se enlistan los tipos de certificación y algunas de sus subclasificaciones.

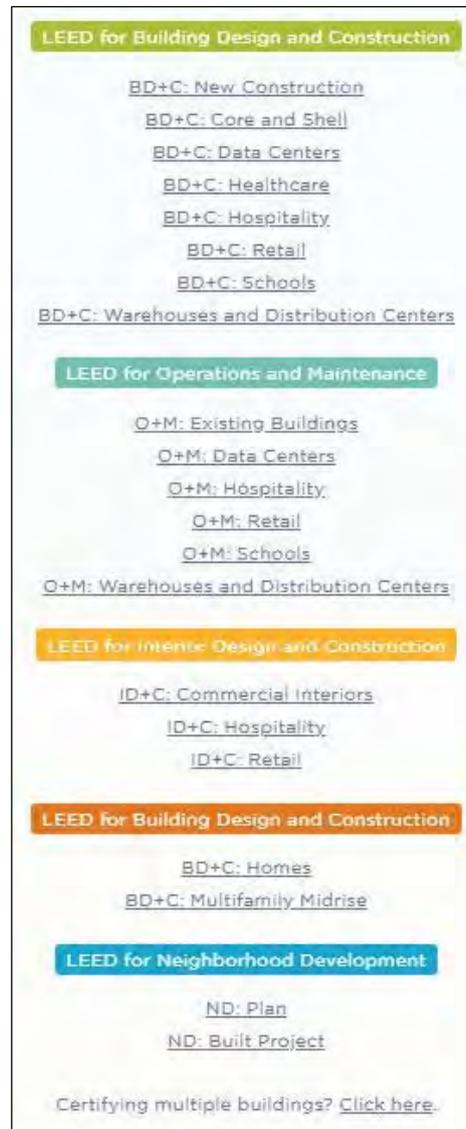


Figura 1.- Certificaciones LEED.

Fuente: <https://www.usgbc.org/discoverleed/certification/all/>

1.3.2 Living Building Challenge (International Living Future Institute).

Certificación otorgada por el *International Living Future Institute*, el cual es un instituto con objetivos de lograr ambientes tanto socialmente justos, culturalmente ricos, como ecológicamente restaurativos con el fin de obtener un crecimiento equilibrado en las relaciones humanas. La certificación *Living Building Challenge* tiene un sistema de calificación relativamente riguroso en cuanto a edificaciones sustentables, consiste en el cumplimiento de siete categorías de desempeño llamadas “pétalos” las cuales son: lugar, agua, energía, salud y felicidad, materiales, equidad y belleza. Los proyectos son aplicables en construcciones nuevas, existentes, en interiores y, en paisaje o infraestructura, y su operación tiene una duración mínima de doce meses. Los distintos tipos de certificaciones

son *Living Building and Petal*, *Zero Energy*, *Zero Carbon*, *Living Product* y *Living Community*. Su aplicación en México inició en 2009 y se están consolidando las bases para apoyar la formación de lo que sería el *Living Future Institute* de México, con el apoyo del Departamento de Arquitectura de la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México (Abilia, 2020).

1.3.3 BREEAM.

Esta certificación pertenece al *Building Research Establishment (BRE)*, el cual es un grupo del Reino Unido conformado por investigadores, científicos e ingenieros con el propósito de generar conocimiento mediante investigación independiente sobre edificación sustentable, para brindar productos, estándares y certificaciones a nivel internacional. La certificación BREEAM es reconocida en más de 80 países y asesora proyectos de edificación sustentable desde el diseño, construcción, gestión y mantenimiento para obtener las metas de desempeño tanto ambiental, social y económico; se aplica en nuevas edificaciones, viejas, en reformadas, en infraestructura y hasta en grandes proyectos de comunidades (BRE, 2020). En la figura 1.2 se muestran las categorías de problemas que encomiendan la certificación.



Figura 2.- Objetivos y categorías de problema BREEAM.

Fuente: <https://www.breeam.com/discover/how-breeam-certification-works/>

1.3.4 EarthCheck.

Es una organización líder a nivel mundial que ofrece consultoría, *benchmarking* científico, productos de tecnología digital y certificación en materia de sustentabilidad para la industria de viajes y turismo. Además de trabajar con empresas, también lo hace con comunidades y gobiernos respecto a diseñar, crear, gestionar y mantener edificaciones y destinos turísticos limpios, seguros, prósperos y saludables (EarthCheck, 2020). Esta certificación trata de apoyar a gobiernos locales enfocados a mejorar la eficiencia en edificios mediante la aplicación de normas internacionales.

1.3.5 Sistema de evaluación Energy Star.

En México, la CONUUE en conjunto con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) se encarga de reproducir el sistema de evaluación estadounidense *Energy Star*, el cual en el 2005 fue establecido en E.U.A. por la *Environmental Protection Agency* (EPA), promoviendo el uso de energía eficiente en gobiernos locales. En cuestión de edificación, mediante la reducción de consumo energético (Abilia, 2020).

1.4 Medidas y programas públicos en México para el ahorro energético en la vivienda.

El gobierno de México se ha esforzado por implementar cierta clase de políticas públicas bajo el concepto de edificación sustentable a través de programas especialmente enfocados en ahorro energético en la vivienda. Algunos programas de vivienda sustentable, promovidos y aplicados por organismos e instituciones públicas, se enlistan a continuación:

- NAMA Mexicana de Vivienda Sustentable (CONAVI)
- Hipoteca Verde (INFONAVIT)
- Vivienda Sustentable: Vida Integral Infonavit (INFONAVIT)
- Código de Conservación de Energía para las Edificaciones de México (IECC-México) (CONUEE)
- Programa de Vivienda Social-PVS S177 (CONAVI)

1.4.1 NAMA Mexicana de Vivienda Sustentable.

Es un esfuerzo de integración y desarrollo de una política homologada en materia de vivienda sustentable, desarrollada por la CONAVI, desde el 2012, este programa trabaja en conjunto con los tres niveles de gobierno y las instituciones que financian la adquisición de vivienda, además de ser apoyado por la Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ por sus siglas en alemán). La NAMA aborda la eficiencia energética en la construcción basándose en el desempeño integral de la vivienda, así, se fijan los estándares de demanda total de energía primaria basados en el prototipo de casa y zona bioclimática. Dichos estándares de eficiencia energética que los desarrolladores de vivienda pueden alcanzar con el fin de que se les otorgue apoyo son: Eco Casa 1, Eco Casa 2 y Eco Casa Max. Su sistema MRV (Monitoreo, Reporte y Verificación) se encarga del monitoreo de mejoras en la eficiencia de una amplia gama de ecotecnologías, diseños y materiales constructivos. Los niveles de eficiencia de la NAMA de Vivienda se combinarán con un sistema de etiquetado graduado para informar a los compradores la eficiencia esperada de su vivienda. El certificado ilustrará de manera clara el nivel de eficiencia, así como los ahorros esperados en energía, agua, gas y emisiones en comparación con la casa de referencia (CONAVI, 2013). En el país, se considera a la NAMA como un programa a largo plazo, empezando con acciones para las viviendas nuevas y, eventualmente, expandiéndose para promover la eficiencia dentro del total de viviendas existentes. En la primera fase de este, el gobierno busca reducir aún más los GEI con la expansión de otros programas como “Hipoteca Verde”. Para la segunda fase, de mediano a largo plazo, se contempla una consolidación de los programas voluntarios, reglamentos

constructivos obligatorios y programas de incentivos. En la figura 1.3 se observa el Programa para la fase de entrada de la NAMA.

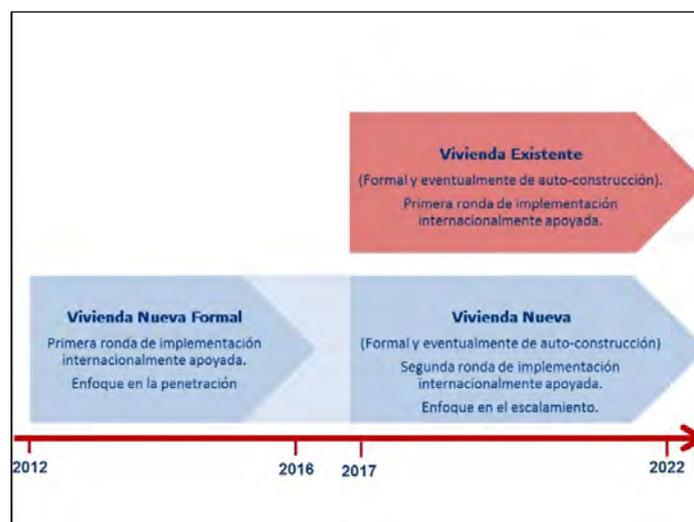


Figura 3.- Programa para la fase de entrada de la NAMA de Vivienda Sustentable.

Fuente:

https://www.conavi.gob.mx/images/documentos/sustentabilidad/2_NAMA_for_Sustainable_New_Housing_with_Technical_Annex.pdf

1.4.2 Hipoteca Verde.

De acuerdo con el Manual explicativo de la vivienda ecológica 2020 (INFONAVIT, 2020), la Hipoteca Verde se define como:

“El crédito que cuenta con un monto adicional para que el derechohabiente pueda adquirir una vivienda con tecnologías eficientes que disminuyan el consumo de agua, energía eléctrica y gas, o incorporarlas a la misma en caso de que la vivienda a adquirir no cuente con ellas en el momento de la formalización del crédito, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de nuestros acreditados al disminuir su gasto familiar, optimizar el uso de dichos recursos y mitigar las emisiones de CO₂ al medio ambiente”.

Entre los objetivos del programa, además de reducir el consumo de energéticos en la vivienda, están el contribuir al uso racional de recursos naturales y cuidado del medio ambiente, ofrecer transparencia y flexibilidad en la selección de ecotecnologías por el acreditado según sus requerimientos de ahorro en el consumo y, con los ahorros mensuales por las ecotecnologías cubrir el pago mensual del crédito. Existen tres clasificaciones de vivienda en las que puede ser otorgado el crédito Hipoteca Verde: línea II (compra de vivienda nueva o usada), línea III (construcción de vivienda individual) y línea IV (ampliar, reparar o mejorar la vivienda), consecuentemente, las ecotecnologías que se incorporen en la vivienda deberán garantizar un ahorro mínimo ligado al nivel de ingresos del trabajador y de acuerdo con la tabla 2.

Tabla 2.- Montos máximos de crédito para ecotecnologías.

Segmento en UMAM	Ahorro mínimo mensual	Monto de H.V. en UMAM	
1.10 – 2.60	100.00	Hasta 4	\$10,564.61
2.70 – 5.80	215.00	Hasta 10	\$26,411.52
5.90 – 6.30	250.00	Hasta 11	\$29,052.67
6.40 – 7.30	290.00	Hasta 13	\$34,334.98
De 7.40 en adelante	400.00	Hasta 20	\$52,823.04
Unidad de Medida y Actualización Mensual (UMAM) Un UMAM equivale a \$2,641.152 m.n.			

Fuente: Manual explicativo de la vivienda ecológica 2020.

1.4.3 Vivienda Sustentable: Vida Integral Infonavit.

Este programa certifica a las viviendas en las cuales los usuarios conservan su valor con el tiempo y les garanticen una mejor calidad de vida. Para que se consideren sustentables, las viviendas deben cumplir con la mayoría de los 20 atributos que las distinguen, entre los cuales están: la cercanía con respecto a escuelas, a servicio médico, a transporte, al mercado, a fuente de empleos, que cuenten con la prestación de servicios públicos como alumbrado y banqueta, internet, la superficie total de la edificación, si cuenta con el crédito Hipoteca Verde, etc. (INFONAVIT, 2016). Además, los desarrolladores de vivienda que ofrezcan sustentabilidad en sus obras obtendrán una serie de incentivos y beneficios (INFONAVIT, 2020).

1.4.4 Código de Conservación de Energía para las Edificaciones de México.

Es un código creado por el ONNCCE con el propósito de actuar como modelo regulador de los requisitos mínimos de conservación de energía para edificaciones nuevas, además de trabajar en conjunto con las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Mexicanas (International Code Council & CASEDI, 2016). Su aplicación es tanto para edificación residencial como no residencial y trata aspectos de conservación de energía como calefacción, ventilación, iluminación, calentamiento de agua y electricidad. El código funge como un documento de diseño hacia las características de la envolvente, estableciendo valores R mínimos de aislamiento térmico, así como factores U en las ventanas, con respecto a la eficiencia lumínica y eléctrica, y el aislamiento de conductos y distribución de agua, todo bajo las condiciones según el tipo de edificación y la zona climática en la que se encuentre. En la figura 1.4 siguiente, se observa la distribución del territorio mexicano por zonas climáticas.

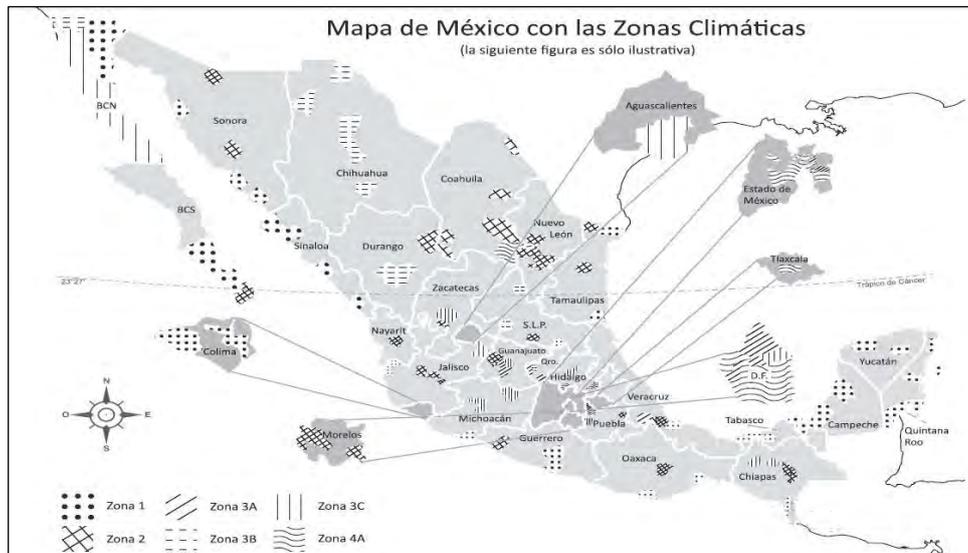


Figura 4.- Mapa de México distribuido por zonas climáticas.

Fuente: Código de Conservación de Energía para las Edificaciones en México (IECC-México).

1.4.5 Programa de Vivienda Social-PVS S177.

Este programa es el más reciente implementado por el Gobierno de México, fue creado en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 y maneja una política de vivienda que tiene como eje conductor el cumplimiento de las obligaciones del Estado relativas a promover, respetar, proteger y garantizar el derecho de la población mexicana a una vivienda adecuada. El programa tiene tres estrategias fundamentales para su funcionamiento, 1) atender a la población con mayor rezago, 2) contribuir a los grandes desafíos nacionales en materia urbana y de bienestar social y 3) fortalecer e incrementar intervenciones que favorezcan la Producción Social de Vivienda Asistida.

Las modalidades de aplicación para el subsidio son: a) adquisición de vivienda, b) autoproducción de vivienda, c) reubicación, d) reconstrucción de vivienda, e) mejoramiento integral sustentable y, f) mejoramiento de unidades habitacionales (CONAVI, 2019).

La modalidad de interés es el mejoramiento integral sustentable, el cual es un esquema operado en conjunto con la entidad ejecutora Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), tanto para ampliación y/o mejoramiento, con la tendencia de consolidar las viviendas deterioradas a través de actividades de reparación, reforzamiento estructural o rehabilitación, sin dejar atrás los criterios de eficiencia energética (SEDATU & CONAVI, 2020).

Cabe mencionar que los subsidios que otorga este programa abarcan los programas mencionados en los puntos anteriores.

1.5 Ley de Vivienda.

Esta ley federal es reglamentaria al artículo 4º de la Constitución Política Mexicana respecto a las garantías individuales de los mexicanos en materia de vivienda, con el objeto de

establecer y regular la política nacional, programas, instrumentos y apoyos para que toda familia pueda disfrutar de una vivienda digna.

La ley indica también las condiciones establecidas que conducen el desarrollo y promoción de las actividades de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, además, la manera en que esta mantendrá coordinación con los gobiernos de las entidades federativas y municipios, y la concertación con los sectores sociales y privados, con el fin de sentar las bases para aspirar a un desarrollo nacional más equitativo en materia de vivienda.

Además, la misma ley le otorga a la CONAVI el poder de formular y ejecutar las acciones de vivienda del gobierno federal, así como el poder de desarrollar y promover esquemas, mecanismos y programas de financiamiento, subsidio y ahorro para la vivienda, de tal manera que, la CONAVI tiene la facultad de trabajar en conjunto con otras instituciones públicas orientadas al desarrollo de la vivienda, así como también con empresas privadas y organismos de orientación social.

En lo que respecta a la calidad y sustentabilidad de la vivienda, la ley confiere a la Secretaría asignada (SEDATU) como instancia de carácter permanente Ejecutivo Federal para garantizar la ejecución de programas y acciones de vivienda en conjunto con la CONAVI; dentro del desarrollo de las acciones habitacionales se considera que las viviendas cuenten con espacios habitables en función al número de usuarios, además de contar con los servicios necesarios, seguridad estructural y el cumplimiento de criterios de sustentabilidad.

Se fomentará también el financiamiento y aplicación de ecotécnicas y tecnologías en vivienda y saneamiento que cumplan con parámetros de certificación y normalización que aseguren la calidad y sustentabilidad de la vivienda, lo cual se garantizará a través de mecanismos de investigación y experimentación tecnológicas acordes a los requerimientos sociales, regionales y a las características propias de la población. Así, se recalca la importancia de esta investigación al estudiar un material del sureste de México debido a las necesidades y características de los sistemas constructivos de la región con el cumplimiento de la normatividad oficial al marco de esta ley.

La Ley de Vivienda, que fue creada en el 2006, ha pasado por distintas reformas a través de los años con los diferentes gobiernos del país, siendo la última el 14 de mayo de 2019 con el gobierno actual (Ley de Vivienda, 2006).

1.5.1 Ley de Vivienda del estado de Quintana Roo.

Esta es una ley estatal que básicamente tiene los mismos objetivos generales de la Ley de Vivienda federal pero con un marco de acción dentro del estado de Quintana Roo; en ella se establece la aplicación de acciones de vivienda mediante instituciones públicas y dependencias del Estado, así como los sectores social y privado basándose en las normas de diseño y tecnologías de construcción; en lo que respecta en materia de sustentabilidad, calidad y seguridad de la vivienda, se concentra en proporcionar un desarrollo urbano ordenado, estableciendo planes y programas que regulan el uso y aprovechamiento de suelo atendiendo las necesidades de cada centro de población, enfatizando en la adaptación de medidas de mitigación de impacto al medio ambiente del estado.

Además, la ley fomenta la inclusión y derecho de las personas con discapacidad o movilidad reducida a la vivienda social, estableciendo las características de diseño y construcción

orientadas a este público, así como también se fomenta el desarrollo y aplicación de ecotécnicas y tecnologías en vivienda y saneamiento, de bajo costo y alta productividad, y que cumplan con los requerimientos sociales, regionales y características propias de la población. Se reitera en el uso de materiales y productos que contribuyen a evitar emisiones que deterioren el medio ambiente y que propicien un ahorro energético, uso eficiente de agua y un ambiente más confortable y saludable de acuerdo con las características climáticas de la región.

Esta ley fue creada en diciembre de 2011 y su última reforma fue el 13 de septiembre de 2019 (Ley de Vivienda Del Estado de Quintana Roo, 2011).

CAPÍTULO II. EXPERIMENTACIÓN: PROPIEDADES TÉRMICAS DEL CHUKUM.

Para cumplir con el objetivo general de la tesis, es indispensable conocer las propiedades térmicas de transporte y termodinámicas del material que se empleará en el espacio para analizar su comportamiento térmico. Dentro de las propiedades de transporte se encuentran la conductividad térmica y el amortiguamiento y retardo térmicos (las dos últimas serán determinadas en el capítulo tres); mientras que las propiedades termodinámicas estudiadas son el calor específico, densidad y, difusividad y efusividad térmica, las cuales serán calculadas de manera analítica consecutivamente de la experimentación.

2.1 Propiedades de transporte.

Un sistema (objeto de cualquier material) cuenta con energía interna propia, la cual es la suma de la energía cinética y potencial de sus moléculas. La energía cinética involucra las fuerzas que ejercen las moléculas de la materia entre sí y se relaciona con el calor sensible del sistema, mientras que, si al sistema se le agrega energía suficiente para vencer dichas fuerzas moleculares, provocando un cambio de fase en la materia, dicha energía se relaciona con el calor latente del sistema (Cengel & Gajhar, 2011).

Consecuentemente, la adición o sustracción de energía en la materia provoca cambios en las vibraciones moleculares induciendo cambios de temperatura en ella, cumpliendo con la condición de que se genere una diferencia de temperaturas para que exista transferencia de calor en el material. Dicho esto, se considera que las propiedades de conductividad, amortiguamiento y retardo térmico se incluyen en el transporte de energía.

2.1.1 Conductividad térmica.

La conducción es la forma de transferencia de calor de las partículas más energéticas de un material hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La razón de la conducción de calor a través de un medio, para este estudio nos enfocamos en superficies planas, depende de su geometría, espesor, material y de la diferencia de temperaturas a través de él.

Para determinar la conductividad térmica del chukum, se utilizó un Conductímetro de Placa Caliente Guardada, desarrollado en la Universidad de Quintana Roo de acuerdo con la norma ASTM C177-04, cumpliendo también el marco normativo de la NMX-C-189-ONNCCE-2010. Para la experimentación se usaron dos especímenes de chukum (figura 2.1), a los cuales se les administró calor en sus superficies interiores mediante una resistencia eléctrica; paralelamente, el calor fue disipado colocando placas frías de aluminio en las superficies exteriores de los especímenes, induciendo un gradiente de temperatura entre ambas superficies. La disipación de calor también fue producida por un flujo de aire generado por ventiladores colocados en la estructura del conductímetro.

La energía eléctrica fue suministrada por un autotransformador variable con características de tensión nominal de entrada: 117 V CA a 60 Hz, tensión de salida: 130 V CA a 10 A y potencia nominal: 1.3 kW; los valores de tensión e intensidad de corriente fueron medidos

con un multímetro de gancho con resolución: 0.01 V y exactitud: $\pm(1.2\% + 5d)$ para un rango de 40 V en CA, y un multímetro con resolución: 10 mA y exactitud: $\pm(3\% \text{ de rdg} + 5d)$ para un rango de 10 A en CA, respectivamente; por otro lado, las temperaturas en cada una de las superficies de los especímenes y la temperatura ambiente se midieron a través de termopares tipo K y fueron registrados en un monitor SR630 de 16 canales con resolución: 0.1 °C y exactitud: ± 0.5 °C para termopares tipo K (figura 2.2).



Figura 5.- Fotografía de los especímenes de chukum con sus canalizaciones para termopares.

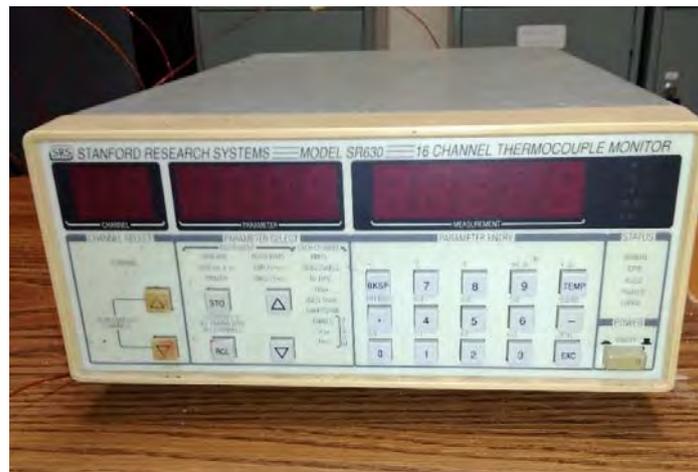


Figura 6.- Fotografía del monitor SR630 para termopares tipo K.

La metodología para la determinación de la conductividad térmica consistió en cuatro corridas (ANEXO 3), cada una con diferentes valores de tensión e intensidad de corriente, el registro de temperaturas se realizó cada 15 minutos hasta que el proceso alcanzó el estado estable, siendo este cuando las temperaturas en cuatro mediciones consecutivas para cada termopar alcanzaran una diferencia igual o menor a 0.1 °C (ANEXO 2).

La caracterización de los especímenes se muestra a continuación en la tabla 3.

Tabla 3.- Caracterización de especímenes de chukum.

Especificación de las muestras									
Espesor		Alto (a) x largo (b)		Área		Masa		Densidad	
M1									
L ₁ [m]	0.025	a ₁ [m]	0.155	S ₁ [m ²]	0.01937	m ₁ [kg]	0.73	ρ ₁ [kg/m ³]	1507.09677
		b ₁ [m]	0.125						
M2									
L ₂ [m]	0.0266	a ₂ [m]	0.1499	S ₂ [m ²]	0.01875	m ₂ [kg]	0.76	ρ ₂ [kg/m ³]	1523.60718
		b ₂ [m]	0.1251						
L ₁ +L ₂ [m]	0.0516			S _{prom} [m ²]	0.01906	Σm [kg]	1.49	ρ _{promedio} [kg/m ³]	1515.35198

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento del ensayo de conductividad térmica se muestra en las figuras 2.3 a la 2.10, el cual abarcó desde el pesaje de especímenes en una báscula de precisión con capacidad: 5 a 20,000 (kg o lb) y resolución: 0.001 a 5 (kg o lb) y su posterior deshumidificación en un horno con rango de operación de ambiente: +5 °C a 250 °C y resolución: 1 °C, además de la colocación de termopares, armado y sellado del Conductímetro y el registro de las mediciones.



Figura 7.- Fotografía del pesaje de especímenes en báscula.



Figura 8.- Fotografía de deshumidificación de especímenes en horno.

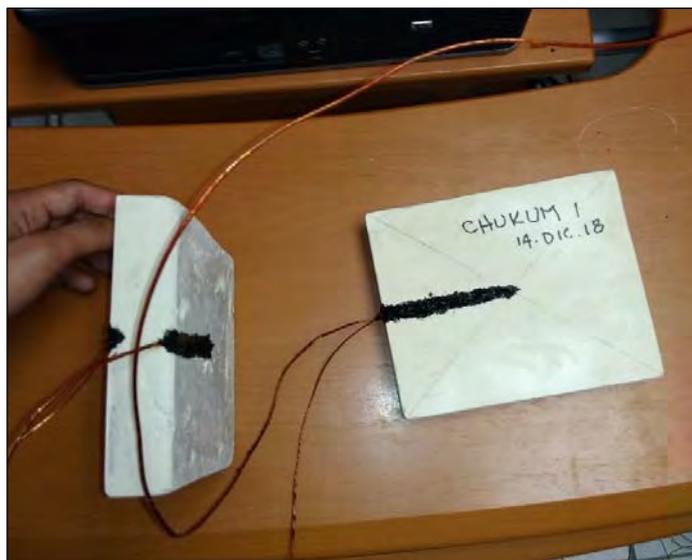


Figura 9.- Fotografía de colocación de termopares en las superficies de los especímenes.



Figura 10.- Secuencia espécimen-placas calefactoras-espécimen antes de colocar en Conductímetro.



Figura 11.- Fotografía de colocación de termopares en el Conductímetro antes de ser ensamblado.



Figura 12.- Fotografía del ensamblaje del Conductímetro ya aislado adiabáticamente con silicón térmico.

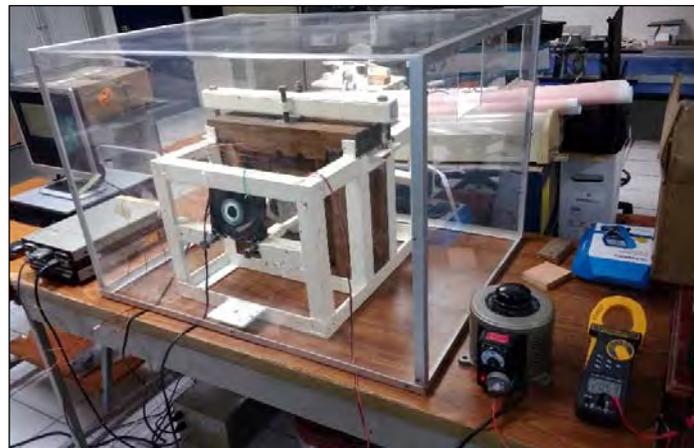


Figura 13.- Ensayo de conductímetro listo para realizar corridas.



Figura 14.- Fotografía del registro de mediciones del ensayo.

Una vez puesta en marcha el ensayo y después de haber alcanzado el estado estable, se procedió al cálculo de la conductividad térmica del material mediante la ecuación de Fourier modificada (ecuación 2.1) con base en la norma ASTM C518-91 que especifica el método de medición del flujo de calor en estado estable.

$$k = \frac{\dot{Q}(L_1 + L_2)}{2A(\Delta T_1 + \Delta T_2)} \quad (2.1)$$

Donde:

\dot{Q} : flujo de calor suministrado [W]

L_1, L_2 : espesores de cada espécimen [m]

A : área promedio de ambos especímenes [m²]

$\Delta T_1, \Delta T_2$: diferencias de temperaturas superficiales de cada espécimen [°C]

k : conductividad térmica [W/m °C]

Finalmente, se determinó la conductividad k para cada corrida (tabla 4) y se calculó la k definitiva aplicando un factor de corrección del 90% al valor medio de las corridas, dando una conductividad térmica del chukum de $k = 0.62324$ W/m °C. El resumen de las corridas del ensayo de conductividad térmica se observa en el ANEXO 4.

Tabla 4.- Conductividad k del *chukum* para las cuatro corridas experimentales.

Corrida	Conductividad térmica k [W/m °C]
1	0.66145
2	0.70132
3	0.69315
4	0.69181
MEDIA	0.69248

2.1.1.a Análisis de incertidumbre.

Toda información experimental debe ser analizada, ya que los errores reales en ella son los factores que siempre son vagos en cierta extensión y llevan cierta cantidad de incertidumbre. Para ello, es recomendable realizar un análisis de incertidumbre, el cual radica en estimar las variaciones de la información que caen fuera del margen de las desviaciones aleatorias esperadas; la eliminación de información errónea debe ser consistente y no depender de prejuicios basados en lo que debería ser.

Para el ensayo de conductividad térmica, se utilizó el método de Kline y McClintock (Holman, 1988) para la estimación de incertidumbre mediante la siguiente ecuación.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Donde:

W_R : incertidumbre del resultado

$\frac{\partial R}{\partial x_n}$: derivada del resultado con respecto a la variable independiente correspondiente

w_n : incertidumbre de las variables independientes

Los cálculos utilizando la ecuación 2.2 se muestran en el ANEXO 5. Los resultados de incertidumbre en cada corrida se observan en la tabla 5, así como la incertidumbre promedio del ensayo, siendo un valor del 1.11842 %.

Tabla 5.- Porcentajes de incertidumbre de cada corrida e incertidumbre promedio del ensayo.

Corrida	W _R [%]
1	1.11842
2	1.11842
3	1.11842
4	1.11842
PROMEDIO	1.11842

2.1.2 Retardo térmico.

Las cargas térmicas que se transmiten hacia el interior de una edificación mediante la envolvente experimentan un retardo o desfaseamiento en el comportamiento sinusoidal con respecto a las cargas térmicas exteriores.

La metodología para determinar esta propiedad se basa en la norma ASTM C1046-95, la cual es un análisis de la transferencia de calor de la envolvente en estado transitorio, y se sintetiza mediante la ecuación 2.3.

$$R_t = t(\Delta T_{m\acute{a}x}) - t(\Delta T_{0,m\acute{a}x}) = \frac{\varphi}{2} \sqrt{\frac{1}{\alpha\pi\eta}} \quad (2.3)$$

Donde:

R_t : retardo térmico [horas]

$\frac{1}{\eta}$: frecuencia de un día de 24 hrs equivalente a $1/86400 \text{ s}^{-1}$

α : difusividad térmica del material o sistema constructivo [m^2/s]

φ : aceleración de la gravedad [m/s^2]

$t(\Delta T_{m\acute{a}x})$: hora de la diferencia de temperatura superior interior máxima respecto a la temperatura media

$t(\Delta T_{0,m\acute{a}x})$: hora de la diferencia de temperatura superior exterior máxima respecto a la temperatura media

2.1.3 Amortiguamiento térmico.

Además del retardo, también existe un amortiguamiento en el comportamiento de la carga térmica interior con respecto a la exterior; representado a través del factor de amortiguamiento, el cual es equivalente a la relación entre las dos amplitudes con valores máximos de cada carga térmica con respecto a la temperatura media, esta se expresa en la ecuación 2.4.

$$\mu = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{\Delta T_{0,m\acute{a}x}} = \frac{b}{a} \quad (2.4)$$

Donde:

μ : factor de amortiguamiento

$\Delta T_{m\acute{a}x}$: diferencia de temperatura superior interior máxima respecto a la temperatura media

$\Delta T_{0,m\acute{a}x}$: diferencia de temperatura superior exterior máxima respecto a la temperatura media

2.2 Propiedades termodinámicas.

Estas propiedades comprenden toda característica que se pueda observar y cuantificar en un sistema, pueden ser intensivas (que son independientes de la masa del sistema) o extensivas (su valor depende del tamaño o extensión del sistema).

2.2.1 Densidad.

En general, la densidad de una sustancia depende de su temperatura y su presión. La densidad de la mayor parte de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura, tal como lo establece el comportamiento de un gas ideal. Por otra parte, los líquidos y sólidos se caracterizan por ser sustancias no compresibles y la variación de su densidad con respecto a la presión suele ser intrascendente; en cambio, suelen tener mayor dependencia con la temperatura, sin embargo, no en todos los casos esta variación es significativa (Cengel & Boles, 2014).

La densidad de un material se define como la masa por unidad de volumen (ecuación 2.5).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.5)$$

Donde:

ρ : densidad [kg/m³]

m : masa [kg]

V : volumen [m³]

En la Tabla 2.1 mostrada anteriormente, se determina la densidad promedio del chukum de acuerdo con las propiedades de ambos especímenes, siendo de $\rho = 1515.35198 \text{ kg/m}^3$.

2.2.2 Calor específico.

Dentro el estudio de las condiciones térmicas necesarias en los materiales, el calor específico tiene un papel esencial debido a que indica si el comportamiento térmico es factible para situaciones específicas, tal como se requiere en este estudio para aplicaciones en sistemas constructivos.

Esta propiedad está definida como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia y, representa la capacidad de almacenamiento de calor del material y puede ser bajo dos condiciones, a volumen constante (c_v) o a presión constante (c_p). El material en estudio, al tener su aplicación en estado sólido (mortero) se considera una sustancia incompresible, debido a que su volumen específico varía insignificadamente con la temperatura o la presión, por lo cual su calor específico es el mismo ya sea a volumen o a presión constante (en este trabajo el índice se conservará por pura notación) (Cengel & Gajhar, 2011).

De tal manera que, el calor específico es una propiedad en función del incremento de temperatura en la sustancia; por lo tanto, el cambio en la energía interna en un material se expresa mediante la ecuación 2.6. Considerando que se estudia el fenómeno de transferencia de calor, el cambio en la energía interna es equivalente a la cantidad de calor añadido al sistema.

$$\Delta U = Q = mc_p\Delta T \quad (2.6)$$

Donde:

ΔU : incremento en la energía interna [kJ]

Q : calor transferido al sistema [kJ]

m : masa del sistema [kg]

c_p : calor específico del material [kJ/kg °C]

ΔT : incremento en la temperatura del material [°C]

Existen normas tanto nacionales como internacionales para la determinación experimental del calor específico de los materiales, sin embargo, por el alcance, recursos y tiempo implicados en este trabajo, se determinó analíticamente.

Por ello, de acuerdo con los resultados de la razón de transferencia de calor (\dot{Q}) y valor promedio de la sumatoria de temperaturas ΔT_1 y ΔT_2 de la tabla que recopila la información de las cuatro corridas del ensayo de conductividad (ANEXO 4), y con el valor de la masa total de los especímenes mostrado en la Tabla 2.1, se resolvió la ecuación 2.6 para el calor específico del chukum, tomando en cuenta una $\Delta t = 3600$ s (tiempo en que los especímenes alcanzaron el estado estable en temperatura), ya que el registro de mediciones en el ensayo de conductividad se realizó cada 15 minutos. De esta manera, mediante el cálculo analítico, se determinó que el calor específico del chukum es de $c_p = 1.23226$ kJ/kg °C.

4.2.1 Difusividad térmica.

Representa la rapidez en que se difunde el calor por un material, por lo que se percibe como la razón entre el calor conducido a través de un material y el calor almacenado por unidad de volumen; por lo que un valor elevado de difusividad térmica significa una rápida propagación de calor por el medio y, un valor pequeño significa que el calor es absorbido por el material

y solo una pequeña parte es conducida a través de él (Cengel & Gajhar, 2011). Dicho esto, la ecuación 2.7 manifiesta esta propiedad.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.7)$$

Donde:

α : difusividad térmica [m^2/s]

k : conductividad térmica [$\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$]

ρc_p : capacidad térmica volumétrica [$\text{J}/\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$]

De esta forma, una vez obtenidas las propiedades en las secciones 2.1.1, 2.2.1 y 2.2.2 se procedió al cálculo de la difusividad térmica del chukum, siendo el valor de $\alpha = 3.33764 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.2.4 Efusividad térmica.

Siguiendo el mismo método analítico que se utilizó en la sección 2.2.3 se determinó la efusividad térmica, la cual se define como la capacidad de un material para absorber y posteriormente restituir el flujo de calor (Bojórquez, Castillo, Flores, et al., 2010), su relación se expresa en la ecuación 2.8 siguiente.

$$\beta = (k\rho c_p)^{1/2} \quad (2.8)$$

Donde:

β : efusividad térmica [$\text{J}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C s}^{1/2}$]

k : conductividad térmica [$\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$]

ρc_p : capacidad térmica volumétrica [$\text{J}/\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$]

Se hicieron los cálculos con las propiedades ya obtenidas anteriormente de tal manera que la efusividad térmica del chukum es de $\beta = 1.07878 \times 10^3 \text{ J}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C s}^{1/2}$.

CAPÍTULO III. MEDICIONES *IN SITU* PARA EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.

Para continuar con la integración de resultados que evalúan la influencia del chukum en el comportamiento térmico de espacios interiores, se realizaron mediciones *in situ* en una edificación, en la cual el chukum se emplea como mortero dentro de los sistemas constructivos que se utilizaron en ella, tanto en muros como techumbres. Por ello, primeramente, este capítulo aborda la descripción de la edificación y la caracterización de sus sistemas constructivos, después continúa con el cálculo analítico de las propiedades térmicas de cada uno de ellos para finalizar con la toma de mediciones, determinando con ello las propiedades de retardo y amortiguamiento térmicos introducidos en el capítulo 2.

3.1 Caso de estudio: hotel Buenavista Bacalar.

El hotel Buenavista Bacalar es un hotel boutique, el cual se identifica por ofrecer a sus ocupantes un ambiente natural y apto para “desconectarse del mundo” debido a que se encuentra dentro de un entorno rodeado de naturaleza y sus instalaciones brindan una variedad de confort, haciendo énfasis en el confort térmico, ya que fue diseñado con base en la bioclimática y construido con materiales endémicos de la región, principalmente maderas y chukum como acabado en las superficies. En las figuras 3.1 y 3.2 se observan fotos del hotel.



Figura 15.- Fotografía del exterior de algunas habitaciones del hotel.



Figura 16.- Fotografía del exterior de una habitación y su balcón.

3.1.1 Ubicación del lugar.

El hotel se encuentra ubicado en el poblado de Buenavista, Quintana Roo, perteneciente al municipio de Bacalar, entre los poblados de Bacalar y Pedro A. de los Santos, asimismo, el poblado de Buenavista colinda con una parte de la Laguna de Bacalar. La ubicación geográfica se observa en el punto rojo de la figura 3.3 y sus coordenadas geográficas son latitud: 18.8779° y longitud: -88.2398° .



Figura 17.- Ubicación geográfica de Buenavista.
Fuente: Google Maps.

3.1.2 Caracterización de los sistemas constructivos.

La edificación en cuestión utilizó maderas de la región, específicamente como materiales para fachada (interiores) y estructurales (exteriores), siendo caoba y jabín, respectivamente. En lo que respecta a muros y techumbres, se utilizaron respectivamente sistemas compuestos que consisten en: 1) mortero de chukum-bloque de concreto-mortero de chukum y 2) mortero de chukum-vigueta y bovedilla-capa de concreto armado-madera jabín. En la figura 3.4 y 3.5 se observan los esquemas de los sistemas de muro y techumbre, respectivamente.

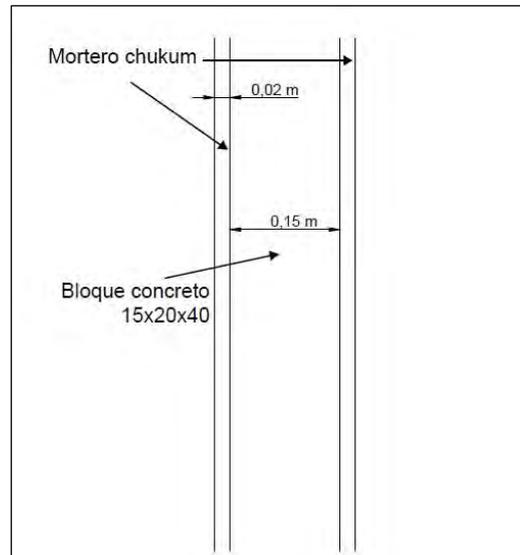


Figura 18.- Esquema del sistema de muro.
Fuente: Elaboración propia.

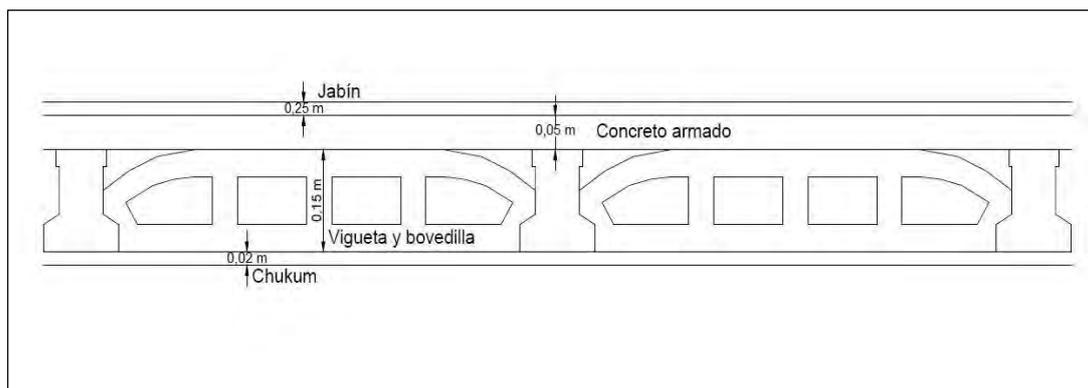


Figura 19.- Esquema del sistema de techumbre.
Fuente: Elaboración propia.

La caracterización del sistema de piso de la edificación consiste en: concreto armado-capa de chukum, las dimensiones de cada material son de 5 cm y 2 cm respectivamente, por lo que en la sección 3.1.3 también se calculan analíticamente las propiedades térmicas equivalentes de este, ya que estas se requerirán en el capítulo 4 de la investigación.

En la tabla 6 se observan las conductividades térmicas (k) y el espesor de las capas de cada material involucrado en los sistemas constructivos de la edificación y si pertenecen a un sistema homogéneo o no homogéneo, con su respectiva fracción; conjuntamente, en el ANEXO 6 se presentan las propiedades térmicas de todos los materiales involucrados en la edificación que posteriormente servirán para el modelo empleado en la simulación en el siguiente capítulo, cada una de ellas con su respectiva referencia.

Tabla 6.- Conductividades térmicas k y espesor de los materiales de sistemas constructivos.

		TECHO			MURO	PISO
Material		Espesor L [m]	Conductividad térmica k [W/m °C]	Fracción capa no homogénea F	Espesor L [m]	Espesor L [m]
Homogénea	Chukum	0.02	0.62324	---	0.02	0.02
	Concreto armado	0.05	1.4	---	---	0.05
	Jabín	0.02	0.23011	---	---	---
No homogénea	Vigueta	0.15	2	0.17	---	---
	Bovedilla		0.63	0.46	---	---
	Aire sin ventilar		0.06428	0.37	---	---
	Bloque concreto	---	0.87719	---	0.15	---
	Caoba	---	0.15978	---	---	---

3.1.3 Cálculo de propiedades térmicas de los sistemas constructivos.

Como se mencionó anteriormente, para conocer plenamente el comportamiento térmico del espacio, es necesario conocer las propiedades térmicas de los sistemas de construcción que conforman la envolvente de la edificación más que de cada material por separado; el coeficiente global de transferencia de calor (U) se considera el factor que generaliza la transferencia de calor en un sistema, involucrado directamente con la resistencia térmica total (R_T) de este.

Para el cálculo de R_T y U de los sistemas, se consideraron todos los componentes de la envolvente como paredes planas sin generación de energía interna, por consiguiente, el flujo de calor es constante y se conduce unidimensionalmente a través de las paredes en estado estable, de tal manera que a partir de la Ley de Fourier de conducción de calor, se obtuvo el flujo de calor por medio de la ecuación 3.1 (Incropera & DeWitt, 1999), cabe aclarar que las propiedades del fluido y los criterios de estos autores se utilizaron también para obtener los

coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación (h_c y h_r , respectivamente) a partir de las ecuaciones 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.11.

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L}(T_{s,1}, T_{s,2}) \quad (3.1)$$

Donde:

q''_x : flujo de calor unidimensional en estado estable

q_x : transferencia de calor en la dirección x de la pared

A : área de la pared

L : espesor de la pared

k : conductividad térmica del material

$T_{s,1}, T_{s,2}$: temperaturas superficiales interior y exterior de la pared

De esta manera, análogamente a la resistencia eléctrica en la conducción de electricidad, se define la resistencia térmica como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor correspondiente; así, la resistencia térmica por conducción se expresa en la ecuación 3.2.

$$R_{cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (3.2)$$

De igual manera se asocia la resistencia térmica por convección con la transferencia de calor por convección a una superficie, así, mediante la Ley de enfriamiento de Newton (ecuación 3.3) se deriva la resistencia térmica por convección, la cual se expresa en la ecuación 3.4.

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.3)$$

$$R_{conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{h_c A} \quad (3.4)$$

Donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Para su estudio se consideraron las corrientes de convección dentro del fluido bajo condiciones únicamente de convección libre, cuyas capas límites no están restringidas al flujo laminar debido a que pueden surgir turbulencias por efecto de inestabilidades hidrodinámicas causadas por la diferencia de densidades entre los fluidos caliente y frío. El número de Rayleigh (Ra_L) definido en la ecuación 3.5 correlaciona las fuerzas viscosas y de empuje del fluido que definen la transición a flujo turbulento.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.5)$$

El cálculo de Ra_L se realizó para el aire a presión atmosférica a 400 K con sus respectivas propiedades y bajo condiciones experimentales de temperatura superficial, con valores resultantes de 1.23×10^5 y 9.82×10^5 para superficies horizontales y verticales, respectivamente.

Seguidamente, se utilizaron las correlaciones propuestas por Churchill & Chu y McAdams (Incropera & DeWitt, 1999) para obtener el número de Nusselt (\overline{Nu}_L) promedio para superficies verticales y horizontales, respectivamente, las cuales se observan de la ecuación 3.6 a la 3.8 siguientes.

- Superficies verticales:

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (3.6)$$

- Superficies horizontales:

Superficie superior de placa caliente

$$\overline{Nu}_L = 0.54Ra_L^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (3.7)$$

Superficie inferior de placa caliente

$$\overline{Nu}_L = 0.27Ra_L^{1/4} \quad 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (3.8)$$

Las ecuaciones 3.7 y 3.8 se utilizaron para obtener el h_c interior y exterior de los sistemas de techumbres, respectivamente. Así, los resultados obtenidos a través de las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8 fueron la base para el cálculo del coeficiente de convección mediante la ecuación 3.9.

$$\bar{h}_c = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (3.9)$$

Como consecuencia, el valor de h_c para superficies verticales fue de $0.5227 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que, para las superficies horizontales, la superficie superior caliente fue de $4.56 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ y para la superficie inferior caliente fue de $2.28 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

La envolvente, al tratarse de un sistema bajo la incidencia de los rayos solares, se consideraron los efectos de radiación térmica con la premisa de que las superficies son separadas de los alrededores por medio de un gas (aire), existiendo con ello un intercambio

de calor entre ambos, por lo que la resistencia térmica por radiación se definió en la ecuación 3.10.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_r A} \quad (3.10)$$

Donde h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, su cálculo se basó en la ecuación 3.11 siguiente.

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{aire})(T_s^2 + T_{aire}^2) \quad (3.11)$$

Donde el valor de la emisividad ε se consideró de 0.9 y el de la constante de Stefan-Boltzmann σ , de acuerdo con la literatura, de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}^4$. Los valores de temperatura superficial y del aire para el cálculo se tomaron del ensayo de conductividad térmica, por lo que el valor de h_r para el mortero de chukum fue de $4.21 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Una vez conocidos los coeficientes de transferencia de h_c y h_r , se consideró el efecto en paralelo de las resistencias de convección, tanto interior como exterior, y de radiación, en donde el valor de la resistencia combinada para la superficie exterior contempló la velocidad del viento incidente, bajo condiciones experimentales.

Finalmente, para calcular la resistencia térmica total, el análisis contempló la envolvente como un sistema teórico unidimensional de estado estable, conformado por paredes compuestas, las cuales consideran la suma de las resistencias de cada material que compone el sistema, más las resistencias por convección y radiación, siendo todas las paredes verticales sistemas de capas homogéneas, mientras que la techumbre, al ser de vigueta y bovedilla, se consideró como un sistema de capas homogéneas y no homogéneas. El cálculo analítico se basó en la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009, siendo las ecuaciones correspondientes para el cálculo de la resistencia térmica total para los sistemas de muro y techumbre la 3.12 y 3.13, respectivamente.

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_e} \quad (3.12)$$

Donde:

h_i : conductancia superficial interior, debido a convección y radiación [$\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$]

h_e : conductancia superficial exterior, debido a convección y radiación [$\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$]

L : espesor de la capa del material [m]

k : conductividad térmica del material [$\text{W/m }^\circ\text{C}$]

n : número de capas de conforman la porción de la envolvente

y

$$R_T = \frac{1}{\frac{F_1}{R_p + (g/k_1)} + \frac{F_2}{R_p + (g/k_2)} + \frac{F_m}{R_p + (g/k_m)}} \quad (3.13)$$

Donde:

m : número de materiales que conforman la parte no homogénea de la porción de la envolvente

g : grueso de la capa no homogénea [m]

F : fracción del área total de la porción de la envolvente, ocupada por cada material en la capa no homogénea

k : conductividad térmica del material que forma la capa no homogénea de la porción de la envolvente [W/m °C]

R_p : resistencia térmica total de la porción homogénea de la envolvente del edificio, calculada de acuerdo con la ecuación 3.12 [m² °C/W]

Una vez calculadas las resistencias térmicas totales de los sistemas, se consideró que la razón de la caída de temperatura con respecto a la resistencia térmica a través de cualquier pared es constante, de modo que la caída de temperatura es proporcional a la resistencia térmica total del sistema, de tal manera que la transferencia de calor de un sistema de varias capas se definió a través de la ecuación 3.14.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (3.14)$$

Donde:

\dot{Q} : transferencia de calor en el sistema de varias capas

ΔT : caída de temperatura del sistema

R_T : resistencia térmica total del sistema

Debido a que el área de un sistema constructivo es constante para cada capa de este, es conveniente expresar la transferencia de calor como:

$$\dot{Q} = UA \Delta T \quad (3.15)$$

donde U es el coeficiente de transferencia de calor total con unidades de W/m² °C. Relacionando las ecuaciones 3.14 y 3.15, el coeficiente U es igual al inverso de la resistencia térmica total del sistema, como se expresa en la ecuación 3.16.

$$UA = \frac{1}{R_T} \quad (3.16)$$

El cálculo de resistencia térmica y coeficiente U del mortero de chukum se realizó tanto para superficies verticales como horizontales y se comparó con los valores de morteros típicos de

la región, a base de cemento, cal y polvo de piedra caliza (Bojórquez, Castillo, Flores, et al., 2010), en las tablas 7 y 8 se muestran los resultados de los morteros para superficies verticales de R_T y U , respectivamente, y en las tablas 9 y 10 se muestran los mismos valores de estos para superficies horizontales.

Tabla 7.- Resistencia térmica de morteros en superficies verticales.

RESISTENCIAS EN MORTEROS SUPERFICIES VERTICALES	
Mortero	R_T (m ² °C/W)
Mortero C-P 1:3	2.06447
Mortero C-C-P 1:1:3	2.07977
Mortero C-P 1:5	2.06227
Mortero C-C-P 1:1:5	2.06583
Mortero cemento (Norma)	2.06964
Mortero de cemento (Lit)	2.06968
CHUKUM	2.07064

Tabla 8.- Coeficiente U de morteros en superficies verticales.

CONDUCTANCIAS EN MORTEROS SUPERFICIES VERTICALES	
Mortero	U (W/m ² °C)
Mortero C-P 1:3	0.48438
Mortero C-C-P 1:1:3	0.48082
Mortero C-P 1:5	0.48490
Mortero C-C-P 1:1:5	0.48406
Mortero cemento (Norma)	0.48317
Mortero de cemento (Lit)	0.48316
CHUKUM	0.48294

Tabla 9.- Resistencia térmica de morteros en superficies horizontales.

RESISTENCIAS EN MORTEROS SUPERFICIES HORIZONTALES	
Mortero	R_T ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
Mortero C-P 1:3	0.52307
Mortero C-C-P 1:1:3	0.53775
Mortero C-P 1:5	0.52157
Mortero C-C-P 1:1:5	0.52704
Mortero cemento (Norma)	0.53085
Mortero de cemento (Lit)	0.53090
CHUKUM	0.52846

Tabla 10.- Coeficiente U de morteros en superficies horizontales.

CONDUCTANCIAS EN MORTEROS SUPERFICIES HORIZONTALES	
Mortero	U ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
Mortero C-P 1:3	1.91180
Mortero C-C-P 1:1:3	1.85957
Mortero C-P 1:5	1.91728
Mortero C-C-P 1:1:5	1.89736
Mortero cemento (Norma)	1.88374
Mortero de cemento (Lit)	1.88357
CHUKUM	1.89226

De igual manera, en las tablas 11 y 12 se observan los valores de los sistemas de muros de R_T y U , respectivamente, y en las tablas 13 y 14 se observan los mismos valores de los sistemas de techumbres con vigueta y bovedilla.

Tabla 11.- Resistencia térmica total de sistemas de muros con diferentes morteros.

RESISTENCIAS SISTEMAS DE MUROS	
Mortero	R_T ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$)
Mortero C-P 1:3	2.26221
Mortero C-C-P 1:1:3	2.29216
Mortero C-P 1:5	2.25855
Mortero C-C-P 1:1:5	2.26769
Mortero cemento (Norma)	2.27531
Mortero de cemento (Lit)	2.27541
CHUKUM	2.27373

Tabla 12.- Coeficiente U de sistemas de muros con diferentes morteros.

CONDUCTANCIAS SISTEMAS DE MUROS	
Mortero	U ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
Mortero C-P 1:3	0.44204
Mortero C-C-P 1:1:3	0.43626
Mortero C-P 1:5	0.44276
Mortero C-C-P 1:1:5	0.44097
Mortero cemento (Norma)	0.43949
Mortero de cemento (Lit)	0.43948
CHUKUM	0.43980

Tabla 13.- Resistencia térmica total de sistemas de techumbres con diferentes morteros.

RESISTENCIA EN EL SISTEMA DE TECHUMBRE		
Mortero	R_p ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$)	R_T ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$)
Mortero C-P 1:3	0.58663	1.06224
Mortero C-C-P 1:1:3	0.60132	1.08058
Mortero C-P 1:5	0.58513	1.06037
Mortero C-C-P 1:1:5	0.59061	1.06722
Mortero cemento (Norma)	0.59442	1.07197
Mortero de cemento (Lit)	0.59447	1.07203
CHUKUM C/MADERA	0.69016	1.19035
CHUKUM C/CALCRETO	0.59203	1.06898

Tabla 14.- Coeficiente U de sistemas de techumbres con diferentes morteros.

CONDUCTANCIA EN EL SISTEMA DE TECHUMBRE	
Mortero	U ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
Mortero C-P 1:3	0.94139
Mortero C-C-P 1:1:3	0.92542
Mortero C-P 1:5	0.94306
Mortero C-C-P 1:1:5	0.93701
Mortero cemento (Norma)	0.93285
Mortero de cemento (Lit)	0.93280
CHUKUM C/MADERA	0.84008
CHUKUM C/CALCRETO	0.93546

En el ANEXO 7 se presentan las gráficas que resumen los datos de las tablas 7 a la 14. Asimismo, los valores de calor específico total y densidad total de cada uno de los sistemas de construcción serán necesarios para finalizar la investigación en el capítulo 4; se realizaron mediciones de humedad relativa (HR) con un higrómetro digital con características para mediciones de temperatura de rango de medición: $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $60 \text{ } ^\circ\text{C}$, resolución: $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ y exactitud: $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (para $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $45 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $60 \text{ } ^\circ\text{C}$) y $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (para $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $45 \text{ } ^\circ\text{C}$) y características para mediciones de HR de rango de medición: 0% a 100% HR, resolución: 0.1% HR y exactitud: $\pm 2.5\%$ HR (10% a 90% HR a $25 \text{ } ^\circ\text{C}$) y $\pm 5\%$ HR (<10% y >90% HR a

25 °C); mientras, las temperaturas superficiales interior y exterior en la edificación se midieron a través de imágenes infrarrojas empleando una cámara fototérmica con características de rango de temperatura: -20 °C a 100 °C, precisión: ± 5 °C o 5% (el que sea mayor) y sensibilidad térmica: ≤ 0.1 °C a 30 °C (100 mK).

El levantamiento fototérmico se realizó en un periodo de 24 horas empezando el día 23 de mayo (según las normales climatológicas de la zona obtenidas de la CONAGUA, es el mes que presenta las mayores temperaturas y la menor precipitación durante el año) y consistió en la captura, a cada hora del día, de imágenes infrarrojas de la techumbre y muros con orientación este y oeste de la habitación con características climatológicas más críticas, además de la medición de la HR y temperatura dentro, fuera y en un punto específico de la habitación. El estudio mediante este equipo se basa en la norma ASTM C1046-95, la cual analiza la transferencia de calor en la envolvente a través del tiempo, este mismo servirá para analizar el comportamiento térmico del espacio en la sección 3.2 siguiente.

En el ANEXO 8 se observan los registros de mediciones de HR de la habitación junto con otras características observadas y de las temperaturas superficiales para la techumbre y los muros este y oeste de la misma. En las figuras 3.6 y 3.7 se muestran la captura de imágenes fototérmicas y una imagen infrarroja de la techumbre tomada con la cámara termográfica, respectivamente.



Figura 20.- Fotografía de la captura de imágenes fototérmicas en el techo.

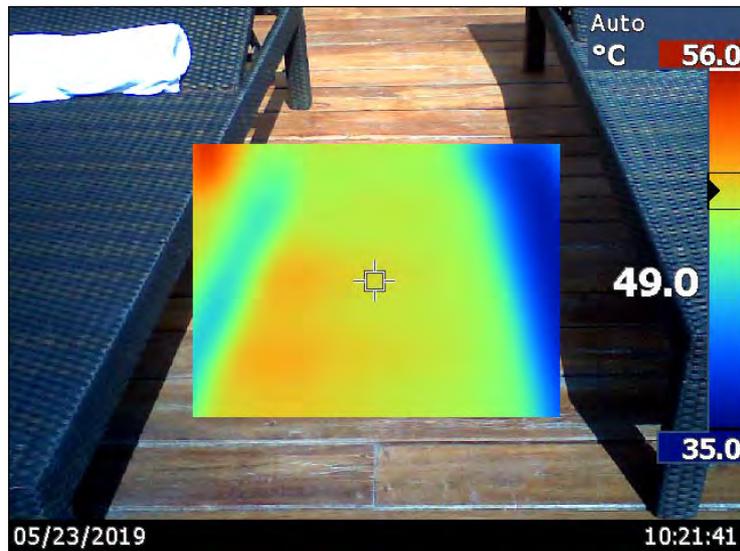


Figura 21.- Imagen infrarroja de la techumbre.

Para la determinación del calor específico y densidad totales de los sistemas se consideró la ecuación 3.17 de la cantidad de calor transferido a un sistema, de tal manera que, conociendo el intervalo de tiempo y la diferencia de temperaturas transcurrido en la transferencia de calor de la edificación gracias al levantamiento fototérmico, se determinaron estas propiedades mediante un cálculo analítico.

$$Q = mc_p\Delta T = \dot{Q}\Delta t \quad (3.17)$$

Donde:

Q : cantidad de calor transferido

m : masa del sistema

c_p : calor específico del sistema

ΔT : diferencia de temperaturas del sistema

\dot{Q} : razón de la transferencia de calor

Δt : intervalo de tiempo en que se transfiere el calor

En la tabla 15 se presentan el c_p y ρ de los materiales que conforman los distintos sistemas, así, se determinó el volumen y la masa de cada una de las capas; posteriormente, se determinaron analíticamente las mismas propiedades para cada sistema constructivo mediante la ecuación 3.17, para ello fue necesario conocer el área total de las superficies que abarcan los sistemas constructivos de la edificación, siendo de 22.2811 m² para techo y piso, y 11.187 m² para muros.

Tabla 15.- Propiedades térmicas y características dimensionales de los materiales de los sistemas constructivos.

Material		Cp [kJ/kg °C]	ρ [kg/m ³]	Espesor capa [m]	Volumen capa [m ³]	masa capa [kg]
TECHO	Chukum	1.23226	1515.35198	0.02	0.44562	675.27418
	Vigueta y bovedilla (concreto)	---	2300	0.15	3.34216	7686.9795
	Concreto armado	0.88	2300	0.05	1.11405	2562.3265
	Jabín	1.04995	904	0.025	0.55702	503.55286
	Σ			0.245	5.45886	11428.13304
MURO	Chukum (2 capas)	1.23226	1515.35198	0.02	0.22374	339.04485
	Bloque concreto	0.92	2100	0.15	1.67805	3523.905
	Σ			0.19	2.12553	4201.99470
PISO	Chukum	1.23226	1515.35198	0.02	0.44562	675.27418
	Concreto armado	0.88	2300	0.05	1.11405	2562.3265
	Σ			0.07	1.55967	3237.60068

El resumen del cálculo analítico para cada sistema constructivo se muestra en las tablas del ANEXO 9. El cálculo de las propiedades del sistema de piso se realizó bajo la misma metodología de R_T y U anterior y utilizando los datos de la tabla 6.

3.2 Determinación del retardo y amortiguamiento térmicos de los sistemas.

Como componente final para el análisis del comportamiento térmico del espacio de la edificación, se determinaron las propiedades de transporte de retardo y amortiguamiento térmicos, los cuales se centran en el fenómeno que experimentan las cargas térmicas internas de una edificación con respecto a las externas. El levantamiento fototérmico mencionado anteriormente fue la primera parte de la metodología para determinar estas propiedades, la cual finalizó aplicando las ecuaciones 2.3 y 2.4 del capítulo 2.

En el ANEXO 10 se muestra el registro de las temperaturas superficiales, indicando el valor máximo (celda amarilla) de las exteriores e interiores, además, se muestra el valor de la temperatura media del sistema, el cual se calculó como el promedio de las medianas de la temperatura superficial exterior respecto a la interior y, la temperatura superficial interior respecto a la temperatura ambiente.

Conociendo las horas correspondientes de las diferencias de temperaturas superficiales interior y exterior máximas con respecto a la temperatura media y de acuerdo con la metodología, se determinó que el retardo térmico (R_t) de los sistemas de techo, muro este y oeste son los siguientes:

$$R_{t,techo} = 4 \text{ horas}$$

$$R_{t,este} = 4 \text{ horas}$$

$$R_{t,oeste} = 2 \text{ horas}$$

Mientras que los valores de amortiguamiento térmico y la capacidad de reducción de temperatura para cada sistema se observan en la tabla 16 siguiente:

Tabla 16.- Amortiguamiento térmico y capacidad de reducción de temperatura de los sistemas analizados.

TECHO			
a ($\Delta T_{0,m\acute{a}x}$)	b ($\Delta T_{m\acute{a}x}$)	Factor de amortiguamiento térmico	Capacidad de reducción de temperatura (%)
31.4	3	0.09554	90.44586
MURO ESTE			
a ($\Delta T_{0,m\acute{a}x}$)	b ($\Delta T_{m\acute{a}x}$)	Factor de amortiguamiento térmico	Capacidad de reducción de temperatura (%)
3.1	2.2	0.70968	29.03226
MURO OESTE			
a ($\Delta T_{0,m\acute{a}x}$)	b ($\Delta T_{m\acute{a}x}$)	Factor de amortiguamiento térmico	Capacidad de reducción de temperatura (%)
9.625	4.325	0.44935	55.06494

Para visualizar mejor los fenómenos de retardo y amortiguamiento térmicos de los sistemas analizados, en el ANEXO 11 se observan las gráficas de las cargas térmicas internas y externas de cada sistema, así como sus valores a y b , además, se observa el valor congruente de la capacidad de reducción de temperatura en cada gráfica.

CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL CHUKUM EN ANSYS FLUENT.

En este capítulo se describe el análisis numérico de la transferencia de calor en la envolvente del hotel Buenavista Bacalar mediante CFD a través de una simulación en *Ansys Fluent*. Primeramente, se desarrolló un modelo 3D de la habitación donde se realizaron las mediciones *in situ* en el módulo para construcción geométrica CAD, llamado *Design Modeler*. Después, se procedió a la discretización del modelo de la habitación mediante el módulo para generación de la malla llamado *Meshing*, en donde se generaron los volúmenes de control finitos (VCF) mediante funciones y algoritmos de mallado. Posteriormente, se abordaron las Leyes de Conservación, las cuales se integran por los principios de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía a través de ecuaciones de balance. Inmediatamente, se presentaron los modelos utilizados en *Fluent* para el análisis del comportamiento de los termofluidos en este trabajo. Por último, se utilizó el módulo *Fluent*, en el cual se configuraron los modelos de ecuaciones involucrados en la simulación, así como las propiedades de los materiales de los volúmenes de control y las condiciones de frontera aplicadas en el modelo 3D. Al final se presentan los resultados de la simulación.

4.1 Modelo de estudio.

Como se mencionó en el capítulo 3, las mediciones *in situ* se realizaron en una habitación de la planta alta perteneciente a uno de los tres edificios del hotel Buenavista Bacalar, de tal manera que el modelo 3D se construyó representando el edificio perteneciente a dicha habitación, con la premisa de que este consta de cuatro habitaciones completamente similares.

Para una mejor visualización del modelo, en las figuras 22 y 23 se observan respectivamente la vista de planta del plano arquitectónico del edificio en cuestión y la fachada frontal del mismo (perteneciente a la orientación Este). Las unidades están en metros.

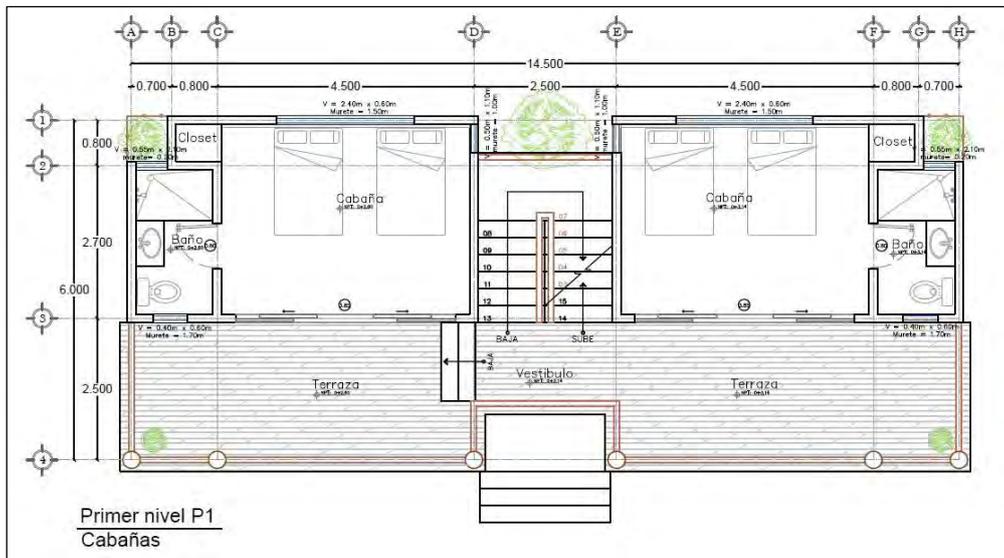


Figura 22. Vista de planta del plano arquitectónico del edificio en cuestión del hotel Buenavista Bacalar.
Fuente: Plano arquitectónico del hotel Buenavista Bacalar.

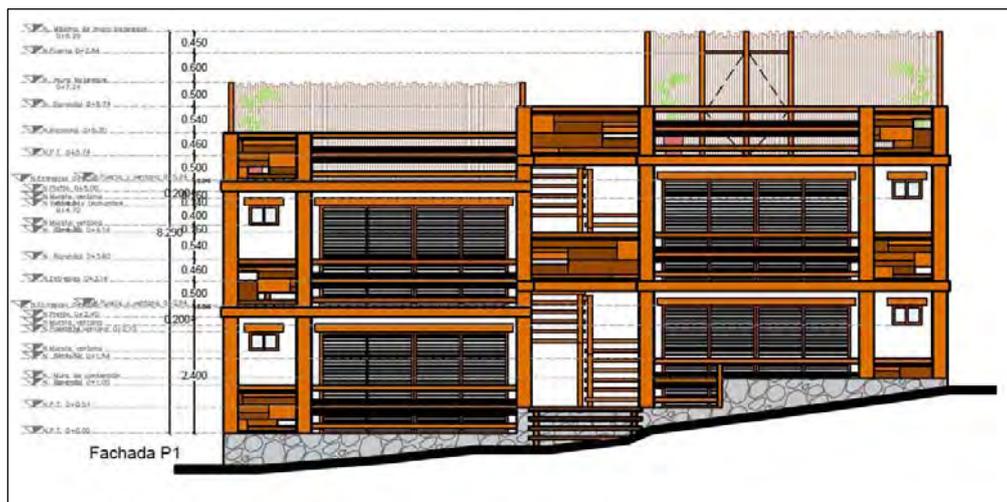


Figura 23. Fachada frontal del edificio en cuestión del hotel Buenavista Bacalar.
Fuente: Plano arquitectónico del hotel Buenavista Bacalar.

4.1.1 Características del modelo 3D.

Se utilizó el módulo *Design Modeler* para construir el modelo 3D, el cual consistió en dos habitaciones (superior e inferior) de la edificación y representa al edificio con un corte transversal a la mitad de la fachada frontal, esto se debió a que las mediciones de confort térmico mencionadas en el capítulo 3 se realizaron solamente en una de las habitaciones superiores. De igual manera, por motivos de simplificación, se eliminó la parte de la escalera y vestíbulo, además de los barandales de madera de la terraza y algunas de las persianas

transversales de madera de la entrada con el objetivo de obtener un modelo sin VCF muy pequeños que dificulten la generación de la malla, considerando la poca intervención de estos componentes en los fenómenos de radiación y convección. En las figuras 24 y 25 se muestran dos vistas diferentes del modelo; otra característica de este es que las paredes, pisos y techos se construyeron con el espesor real considerando todas las capas de esos componentes, los cuales se observan en la Tabla 3.1 del capítulo 3.

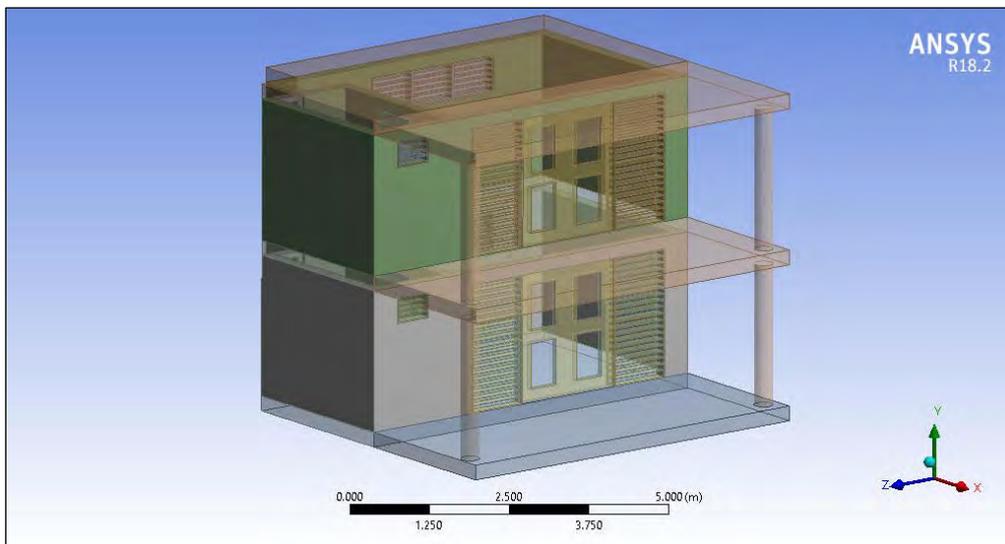


Figura 24. Vista isométrica del modelo 3D con orientación sureste.
Fuente: Elaboración propia.

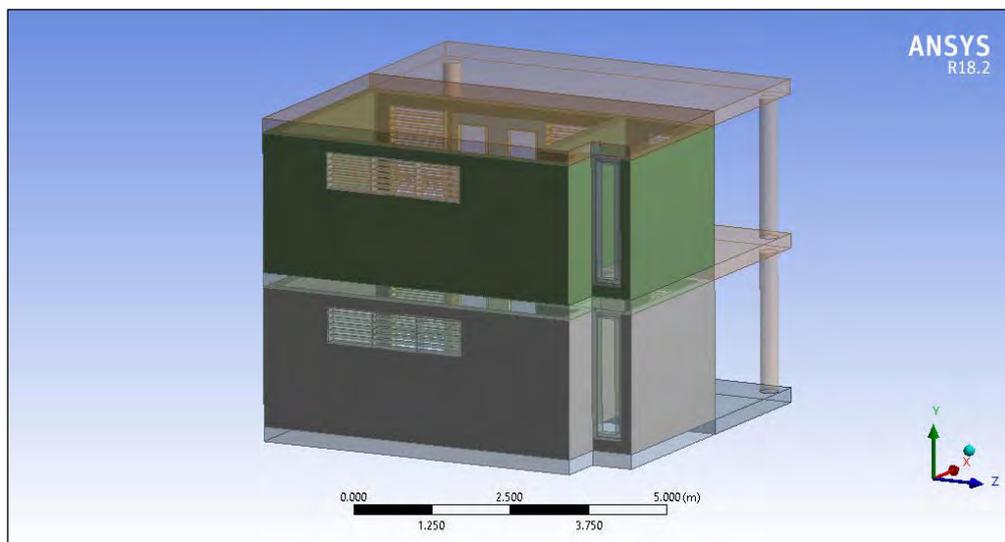


Figura 25. Vista isométrica del modelo 3D con orientación suroeste.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez construido el modelo de la edificación, se generaron los volúmenes de aire de los cuartos y baños mediante el comando *boolean*, los cuales se asignaron como volúmenes de

fluido mientras todos los demás como volúmenes sólidos. En las figuras 26 y 27 se observan los volúmenes de aire del cuarto y baño tanto para la planta alta (PA) como la planta baja (PB) en diferentes vistas.

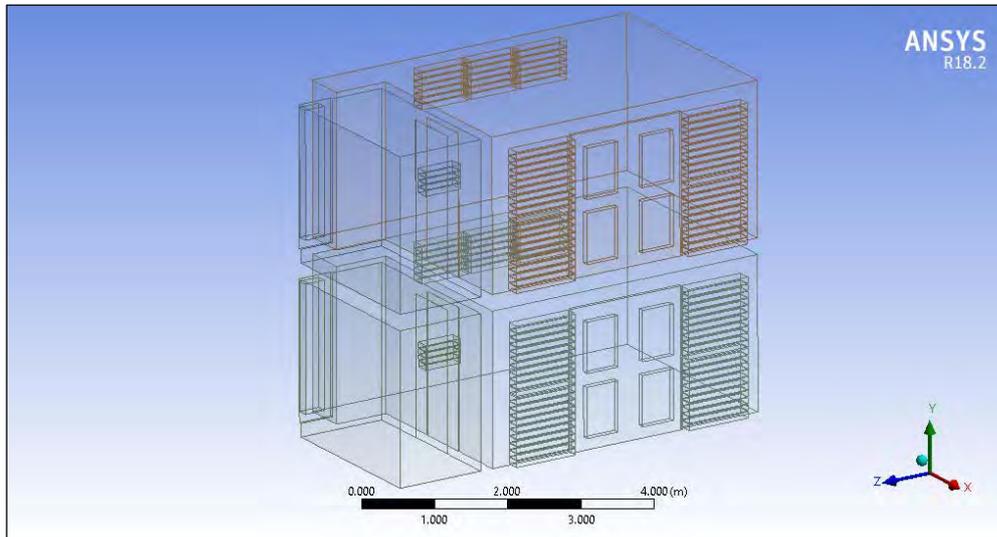


Figura 26. Volúmenes de fluido del modelo 3D con orientación sureste.
Fuente: Elaboración propia.

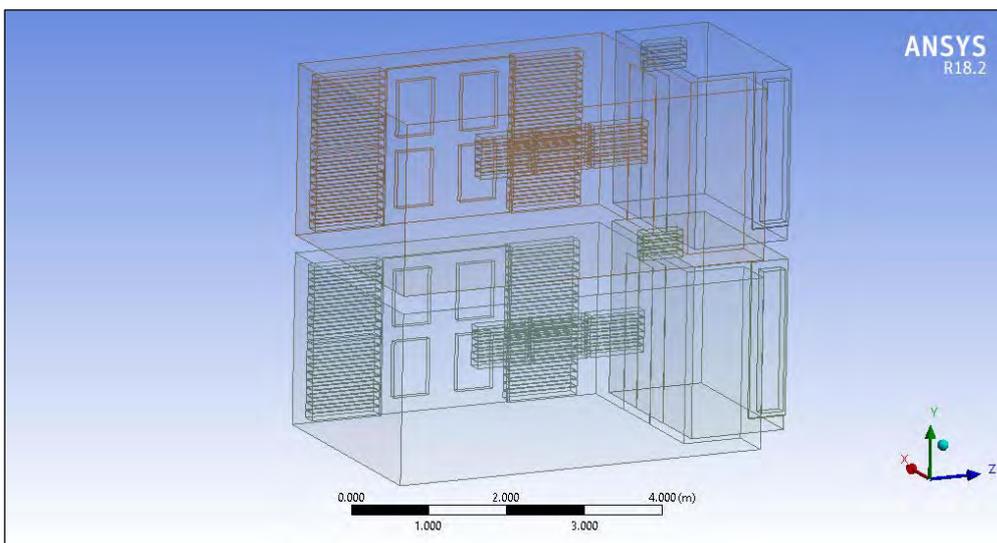


Figura 27. Volúmenes de fluido del modelo 3D con orientación noroeste.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Componentes de la envoltante del modelo.

Se utilizó el comando *Named Selection* para asignar nombres a las superficies que componen la envoltante del modelo, que posteriormente se utilizaron en *Fluent* para establecer las condiciones de frontera. En la figura 28 se observa la lista de todas las superficies de la envoltante nombradas de tipo *Wall*.

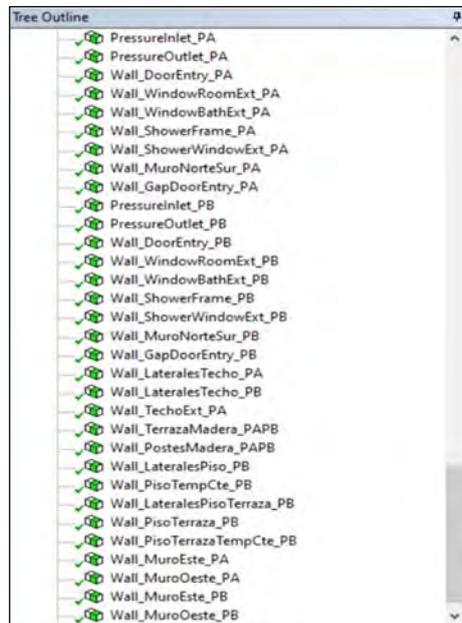


Figura 28. Lista de walls de la envolvente del modelo.

Es pertinente mencionar que los volúmenes de madera del interior (puertas, ventanas, marcos y persianas) y exterior (terraza, barandales, capa exterior de techumbre) de la edificación fueron hechas de caoba y tsalam, respectivamente, de tal manera que las propiedades térmicas y termodinámicas que se utilizaron en la simulación son las indicadas en el ANEXO 6 para estos componentes, mientras que para los sistemas de techo, muro y piso son las indicadas en el ANEXO 9.

Otra característica importante es que el techo de la planta baja es diferente al de la planta alta en sus componentes, de tal manera que está construido por un sistema de vigueta y bovedilla con las dos capas exteriores de chukum, sus propiedades son las indicadas también en el ANEXO 9.

4.2 Discretización del modelo.

En bioclimática, los problemas de transferencia de calor fundamentalmente involucran el efecto que causa el flujo de fluido (aire atmosférico) con respecto a la envolvente y al espacio interior que se analiza, por lo cual es importante entender muy bien los fundamentos de CFD. El comportamiento de los fluidos se describe mejor por medio de la descripción euleriana, la cual define un campo de flujo descrito por variables de campo de variables escalares o vectoriales (propiedades en función del espacio y el tiempo), en donde dicho campo representa el comportamiento del fluido dentro de VCF para describir el comportamiento de todas las partículas pertenecientes a estos.

Así, la discretización consiste en generar en el modelo dichos volúmenes de control en los cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales que representan los campos de flujo a través de la malla; al tratarse de un modelo 3D, los VCF también son generados mediante geometrías tridimensionales, en las cuales, la unión entre cada una de ellas es por medio de

nodos. Asimismo, la discretización de las ecuaciones dependerá del método de derivación de las ecuaciones diferenciales, entre los cuales se encuentran el método de diferencias finitas, el cual se realiza mediante series de Taylor, el método de residuos ponderados y el método de formulación de control de volumen, por mencionar algunos (Patankar, 1980). Debido al alcance de este trabajo no se profundizará en el desarrollo de los métodos.

En *Ansys*, el módulo encargado de generar la malla del modelo es *Meshing*, por lo que a continuación se describen las características utilizadas en el proceso de mallado. *Meshing* permite, independientemente si el modelo es un *Assembly* o un *Part/Body*¹, utilizar los *Local Mesh Controls* (controles de malla local), los cuales son funciones y algoritmos de mallado específico empleados en los objetos seleccionados para generar una malla más fina y así acoplarlos a la malla creada por los *Global Mesh Controls* (controles de malla global), los cuales son algoritmos y funciones utilizados para crear la malla general del modelo. Es importante mencionar que los algoritmos utilizados en los controles de malla local se sobrepone en los objetos donde también se aplican los algoritmos de controles de malla global.

4.2.1 Controles de malla local.

Una de las funciones del control de malla local es el *Method Control* (control de método), la cual genera automáticamente una malla satisfactoria en los objetos que, para volúmenes sólidos están disponibles los controles de método *Tetrahedron*, *Hex Dominant*, *Sweep* y *MultiZone*.

Se utilizó el *Tetrahedrons Method Control* para los cuatro volúmenes de fluido del modelo, el cual generó una malla con todos los VCF en forma de tetraedros, en conjunto del algoritmo *Patch Conforming*, el cual utiliza la triangulación Delaunay para el mallado tetraédrico combinado con una técnica de inserción de punto frontal avanzado para el refinamiento de la malla. El método de mallado *Patch Conforming Tetrahedrons* proporcionó principalmente:

- Soporte para *3D inflation*².
- Capa piramidal incorporada para una *quad-tet transition* conforme.
- Crecimiento incorporado y control de suavidad basado en el factor de crecimiento especificado.

Posteriormente, se seleccionó en la función *Element Order* (orden de elementos) la opción *Use Global Setting*, de tal manera que el orden de elementos se mantuvo como el seleccionado en los controles de malla global.

En la figura 29 se observa la malla generada de los volúmenes de fluido del modelo mediante el control de malla local y en la figura 30 se muestra un detalle de la malla en el volumen de fluido entre las persianas de la entrada de la habitación, mientras que en la figura 31 se observan internamente los VCF tetraédricos mediante un corte transversal de los volúmenes de fluido del modelo.

¹ Para saber más sobre los conceptos *Part* y *Body* consultar *Ansys Help Viewer 18.2* en la sección *Assembly Level Meshing* vs. *Part/Body Level Meshing*.

² Para más información sobre el concepto consultar *Ansys Help Viewer 18.2* en la sección *Inflation Group*.

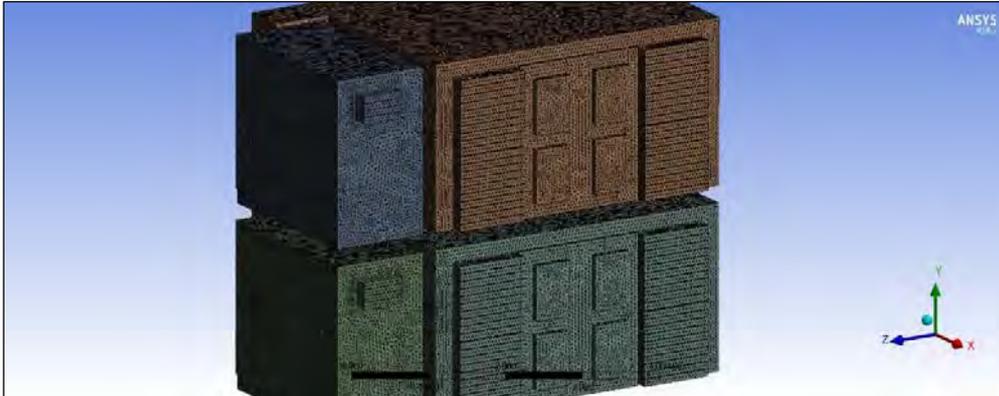


Figura 29. Malla de los volúmenes de fluido generado por el método Patch Conforming Tetrahedrons.
Fuente: Elaboración propia.

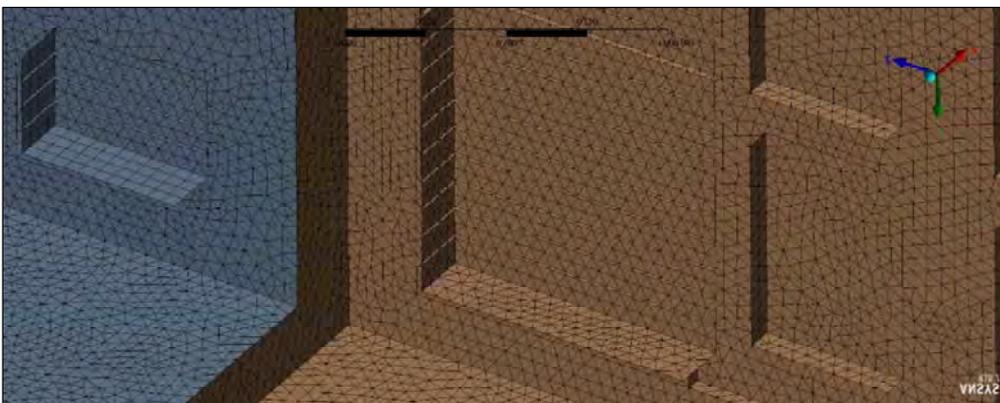


Figura 30. Detalle de la malla en el volumen de fluido entre las persianas de la entrada de la habitación.
Fuente: Elaboración propia.

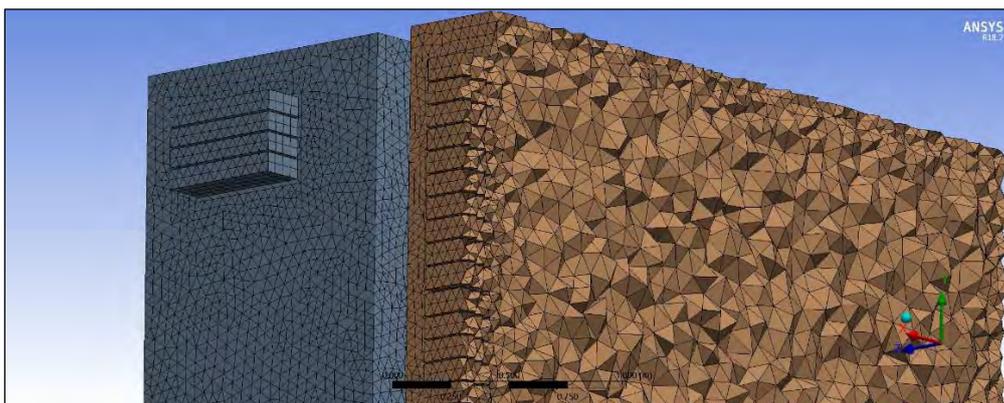


Figura 31. Vista interna de VCF tetraédricos de la malla de los volúmenes de fluido.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Controles de malla global.

Como ya se mencionó, son las funciones y algoritmos encargados de generar la malla general del modelo; en esta sección se sintetiza el funcionamiento de las distintas categorías predeterminadas.

La categoría *Defaults* controló la interacción de *Meshing* con el módulo *Workbench* de *Ansys* y permitió elegir el tipo de solucionador de ecuaciones, los cuales están en función del tipo de análisis que requiere el modelo; también controló el nivel de refinamiento con el que se generó la malla, así como el tipo de elementos de malla (lineales o cuadráticos) que le dan los “grados de libertad” a la geometría.

Un ejemplo de elementos cuadráticos en los VCF de la malla se observa en la figura 32, donde la línea vertical representa el límite de las condiciones de frontera entre los VCF.

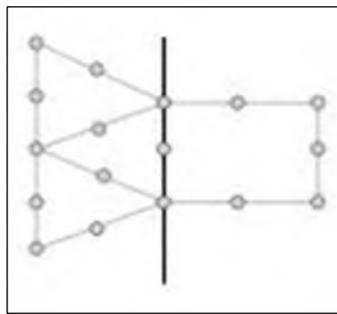


Figura 32. Ejemplo de VCF con elementos cuadráticos.
Fuente: Ansys Help Viewer 18.2.

En la figura 33 se muestra la ventana *Details of "Mesh"*, en la cual se observan las opciones seleccionadas del mallado de la categoría *Defaults*.

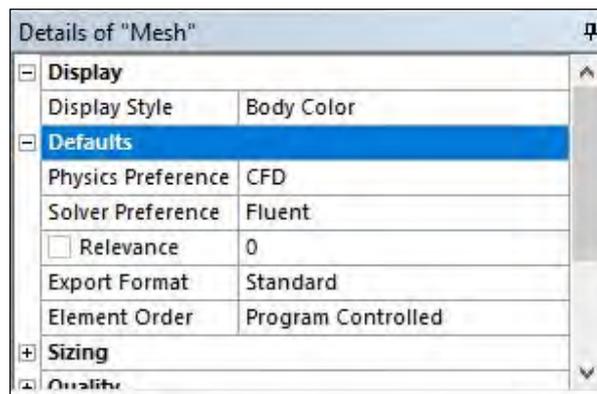


Figura 33. Opciones seleccionadas de la categoría Defaults.

La categoría *Sizing* proporcionó un mejor control del tamaño de los elementos de malla distribuidos a través de las superficies y volúmenes en el modelo, además, se empleó de una manera dinámica relacionando todas las opciones de la categoría; la función *Size Function* permitió controlar propiedades de la malla tales como los ángulos entre elementos adyacentes, número de elementos por capa de la geometría y la progresión entre elementos

mínimos y máximos; dependiendo del valor de la función se seleccionaron las demás opciones de la categoría.

En la figura 34 se muestra la ventana *Details of "Mesh"*, en la cual se observan las opciones seleccionadas de la categoría *Sizing* de la malla.

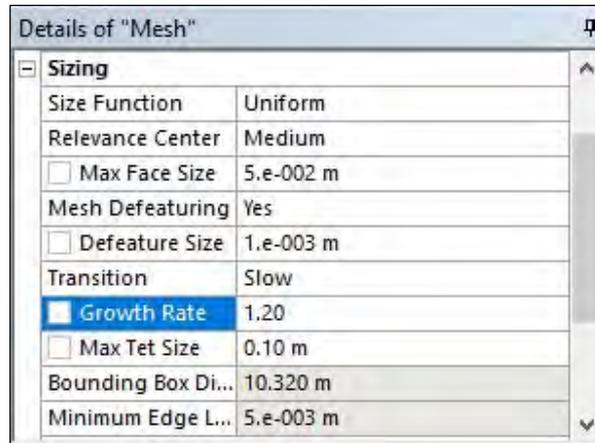


Figura 34. Opciones seleccionadas de la categoría *Sizing*.

La categoría *Quality* es aquella que permitió corroborar la calidad de la malla, localizando errores en los elementos e indicando límites en las características de esta; determinó cómo se comporta *Meshing* con respecto a los límites de error y advertencia de la malla, además de la oblicuidad de las superficies de los elementos y la calidad de estos en función de la posición de los nodos de los VCF.

En la figura 35 se observa la ventana *Details of "Mesh"* con las opciones seleccionadas de la categoría *Quality* de la malla.

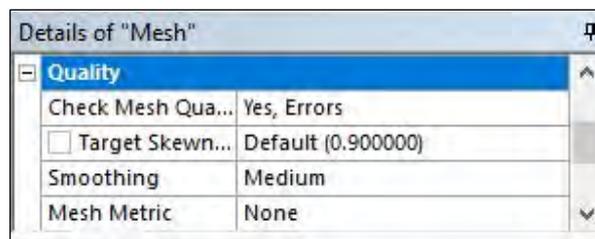


Figura 35. Opciones seleccionadas de la categoría *Quality*.

En el caso de modelos resueltos mediante CFD, la característica de inflación es útil para una mejor resolución de las capas límites. La categoría *Inflation* es aceptada para los métodos de mado de volúmenes como *Patch Conforming*, *Patch Independent*, *Sweep*, *MultiZone* y algoritmos de mado de ensamblaje como *CutCell* y *Tetrahedrons*.

La categoría *Inflation* proporcionó control sobre todos los límites y propiedades de inflación del modelo, tales como la fuente geométrica donde se generó la inflación, el tipo de crecimiento de inflación distribuido en el modelo, la tasa de crecimiento de las capas de inflación y su algoritmo.

En la figura 36 se muestra la ventana *Details of "Mesh"* con las opciones seleccionadas de la categoría *Inflation* de la malla.

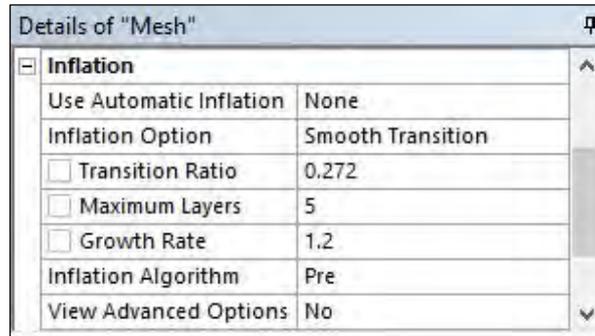


Figura 36. Opciones seleccionadas de la categoría *Inflation*.

La categoría *Assembly Meshing* se refiere a la generación de la malla del modelo entero como un solo proceso de mallado. Las opciones disponibles son *None*, *CutCell* y *Tetrahedrons*. Se seleccionó *None*, de tal manera que no se utilizó ningún método de mallado de ensamblaje y los controles del método no fueron mostrados, sino que se generó la malla a nivel de *part*, correspondiendo al tipo del modelo.

La categoría *Advanced* permitió configurar algunas opciones avanzadas con respecto a la generación de elementos de la malla a nivel de procesamiento, así como algunas de sus propiedades geométricas. Mientras que la última categoría, *Statistics*, es únicamente informativa y contiene información acerca del número de nodos y elementos generados en el modelo.

En la figura 37 se observa la ventana *Details of "Mesh"* con las opciones seleccionadas de las categorías *Advanced* y *Statistics* de la malla.

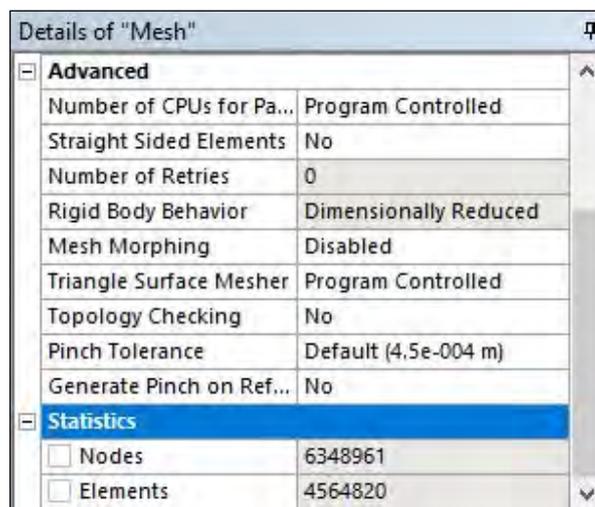


Figura 37. Opciones seleccionadas de las categorías *Advanced* y *Statistics*.

En las figuras 38 y 39 se muestran respectivamente la vista isométrica de la malla del modelo completo y la vista frontal de la malla de la habitación superior del modelo. En ambas se aprecia la uniformidad de los VCF de la malla, característica de la función *Size Function* seleccionada como *Uniform*.

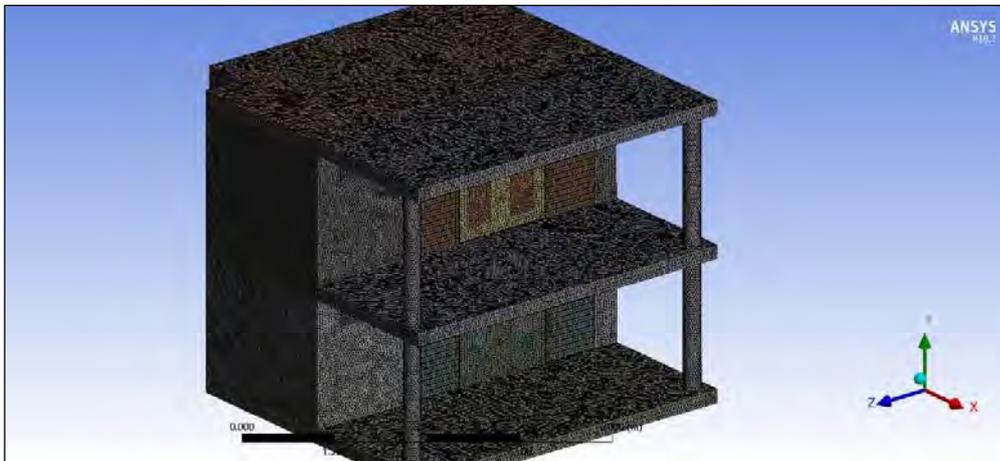


Figura 38. Vista isométrica de la malla del modelo completo.
Fuente: Elaboración propia.

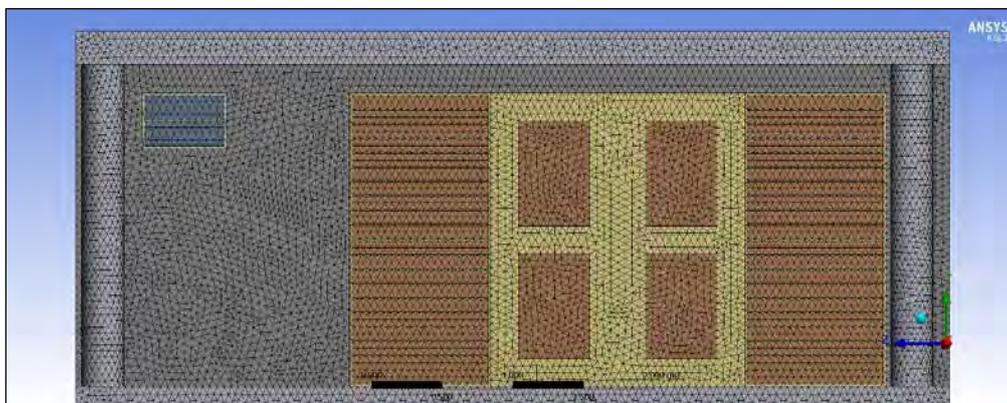


Figura 39. Vista frontal de la malla de la habitación superior del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 40 a la 43 se muestran vistas de la malla del modelo con un corte transversal a diferentes alturas de este, en las cuales se aprecian con mayor detalle el comportamiento de las características de tamaño seleccionadas como *Max Face Size*, *Max Tet Size*, *Growth Rate*, *Transition*, y las de inflación como *Smooth Transition*, *Maximum Layers* y *Growth Rate*, las cuales se observan mayormente en las áreas próximas entre volúmenes.

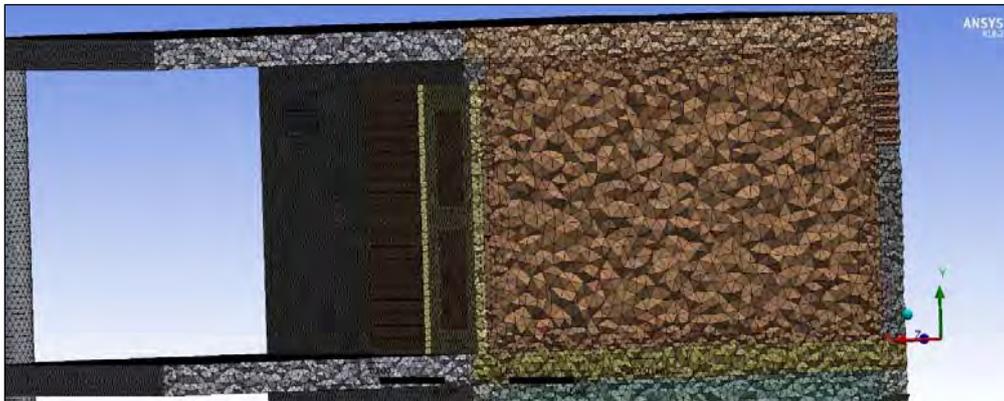


Figura 40. Vista de la malla del modelo con corte transversal a la mitad de la habitación.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 41. Vista de la malla del modelo con corte transversal a una altura inmediata antes de la puerta del baño.
Fuente: Elaboración propia.

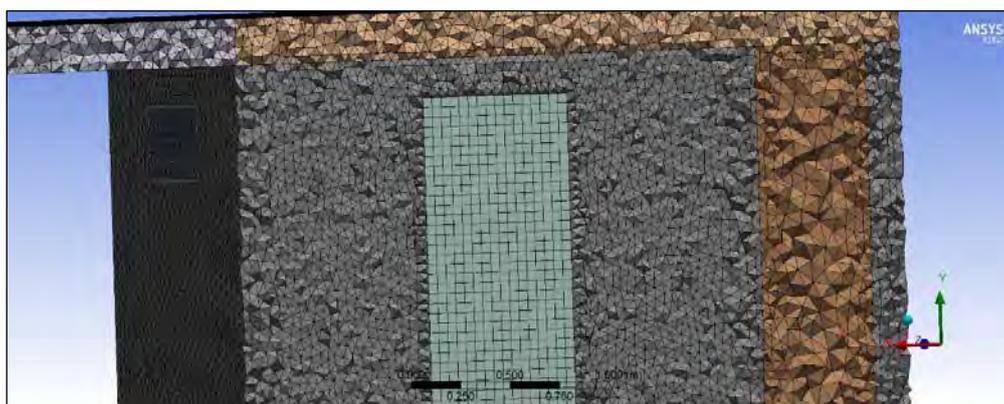


Figura 42. Vista de la malla del modelo con corte transversal a la altura de la puerta del baño.
Fuente: Elaboración propia.

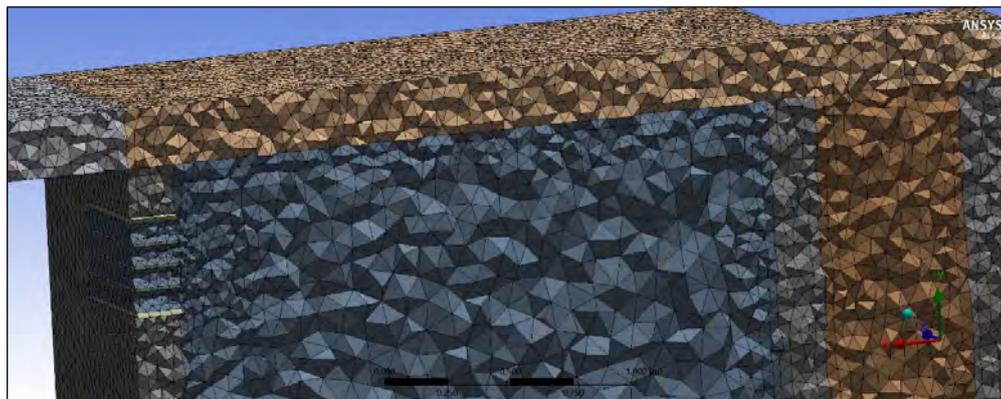


Figura 43. Vista de la malla del modelo con corte transversal a la altura de la ventana del baño.
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Leyes de conservación.

El comportamiento de fluidos como de materiales sólidos en sistemas de VCF, es representado mediante ecuaciones diferenciales que describen las leyes de conservación de la mecánica de fluidos; estas leyes se aplicaron primeramente a una cantidad fija de materia (sistemas cerrados), pero gracias a la descripción euleriana, se extendió su aplicación a volúmenes de control (sistemas abiertos) a través de la aplicación del Teorema de Transporte de Reynolds (TTR), el cual expresa la relación entre las razones de cambio respecto al tiempo de las propiedades extensivas (mismas en los campos de flujo) de los volúmenes y superficies de control (Cengel & Cimbala, 2006).

4.3.1 Principio de conservación de la masa.

El principio de conservación de la masa explica que, en todo proceso, la masa es una propiedad de la materia que se conserva, lo cual significa que no se puede crear ni destruir, en la mayoría de los casos, se puede transformar en alguna otra representación física, como en energía. Sin embargo, en procesos de sistemas abiertos como los volúmenes de control, la masa puede cruzar sus fronteras y, por ende, es pertinente considerar la razón de masa que entra y sale del volumen de control (VC), esto quiere decir, considerar el flujo de masa que pasa por la superficie de control (SC) del sistema.

Siendo así, Cengel et al. (2006) manifiestan este principio para un volumen de control como:

La transferencia neta de masa hacia dentro de un volumen de control, o hacia fuera de éste durante un intervalo Δt es igual al cambio neto (aumento o disminución) en la masa total que está dentro de ese volumen en el transcurso de Δt (p. 175).

La ecuación de balance y su forma integral aplicando el TTR del principio de conservación de la masa se observan respectivamente en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (4.1)$$

Donde:

\dot{m}_{ent} y \dot{m}_{sal} = razones totales de flujo másico hacia dentro y fuera del VC

dm_{VC}/dt = razón de cambio de la masa dentro de las fronteras del VC

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})dA = 0 \quad (4.2)$$

Donde:

ρdV = masa de un volumen diferencial dentro del VC

$\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})dA$ = razón de flujo de masa a través de dA , a la velocidad normal del fluido

4.3.2 Principio de conservación de la cantidad de movimiento.

Se basa en las leyes de Newton aplicadas al movimiento de flujo de fluidos, principalmente la segunda Ley de Newton, la cual plantea que “la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa”. Consecuentemente, la segunda Ley de Newton se puede enunciar mejor como sigue: “la razón de cambio de la cantidad de movimiento de un cuerpo es igual a la fuerza neta que actúa sobre él”. Por ello, en la mecánica de fluidos, este principio hace referencia al estudio de las fuerzas generadas como resultado de los cambios de velocidad de los flujos de fluidos. Es importante mencionar que la cantidad de movimiento es un múltiplo constante de la velocidad y, debido a que esta es una cantidad vectorial, la dirección de la cantidad de movimiento será la misma que la de la velocidad del flujo.

La ecuación de balance de este principio se observa en la ecuación 4.3 siguiente.

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} \quad (4.3)$$

Donde:

$\sum \mathbf{F}$ = fuerza neta que actúa sobre el cuerpo

m = masa del cuerpo

\mathbf{a} = aceleración del cuerpo bajo la influencia de la fuerza

$m\mathbf{v}$ = cantidad de movimiento del cuerpo

Es pertinente saber que para un VC fijo, donde no hay movimiento ni deformación de este, se tiene que la velocidad relativa del fluido que sale de la SC es igual a la velocidad total del fluido. Finalmente, para el cálculo de la sumatoria de fuerzas que actúan sobre el VC, es necesario estudiar las fuerzas que actúan sobre este, que primordialmente se consideran la fuerza de

gravedad que actúa sobre la masa del fluido efectuando una integral de volumen, y las fuerzas superficiales que actúan en el VC utilizando una integral de área, que se componen de fuerzas de presión, fuerzas viscosas y las fuerzas de reacción necesarias para cambiar la dirección del flujo. Es común que en el análisis de fuerzas para un VC solo se consideren las fuerzas externas, de tal manera que se simplifica el análisis restando las presiones atmosféricas (utilizando solo manométricas) e ignorando las presiones de salida donde el fluido se descarga a la atmósfera (Cengel & Cimbala, 2006).

Por lo tanto, mediante el TTR, la forma integral del principio de conservación de la energía se representa en la ecuación 4.4.

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \mathbf{v} dV + \int_{SC} \rho \mathbf{v} (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) dA \quad (4.4)$$

Donde:

\mathbf{v}_r = velocidad del fluido con relación a la SC

\mathbf{v} = velocidad del fluido desde un marco inercial de referencia

\mathbf{n} = vector unitario perpendicular a la diferencial de área de la SC

$\rho(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n})dA$ = flujo de masa que fluye por dA , hacia dentro o fuera del VC

4.3.3 Principio de conservación de la energía.

Hace referencia a la también conocida Primera Ley de la Termodinámica, la cual expresa que “la energía no se puede crear ni destruir en el transcurso de un proceso, solo cambiar de forma”, esto se manifiesta de tal manera que el cambio en el contenido de energía de un sistema es igual a la diferencia entre la entrada de energía y la salida de energía del sistema. El contenido de energía de una cantidad fija de masa puede ser transformado mediante dos mecanismos, transferencia de calor Q y transferencia de trabajo W .

Así, las razones de transferencia de calor y trabajo, representan respectivamente las diferencias de entrada y salida de cada uno de ellos; en el caso de sistemas compresibles simples, la energía total del sistema involucra la energía interna, la cinética y la potencial; estas componentes de energía hacen referencia a la ecuación de Bernoulli y, en el análisis de la conservación de la energía, esta es una propiedad, por lo que su valor no cambia a menos que cambie el estado del sistema (Cengel & Cimbala, 2006).

La ecuación de balance del principio de conservación de la energía se muestra en la ecuación 4.5.

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E \quad (4.5)$$

Donde:

E_{ent} = energía que entra al sistema

E_{sal} = energía que sale del sistema

ΔE = cambio en la energía interna del sistema

Dicho lo anterior, la ecuación 4.5 se puede expresar en términos de integral de volumen como en la ecuación 4.6 siguiente.

$$\dot{Q}_{ent,neta} + \dot{W}_{ent,neta} = \frac{dE_{sist}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{sist} \rho e dV \quad (4.6)$$

Donde:

$\dot{Q}_{ent,neta}$ = razón neta de transferencia de calor hacia el sistema

$\dot{W}_{ent,neta}$ = razón neta de transferencia de trabajo hacia el sistema

ρdV = masa del elemento diferencial de volumen

e = energía total del sistema

Aplicando el TTR, la forma integral de este principio se muestra en la ecuación 4.7.

$$\dot{Q}_{ent,neta} + \dot{W}_{ent,neta} = \frac{d}{dt} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} e \rho (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}) dA \quad (4.7)$$

Siendo esta la forma general del principio de conservación de la energía para VCF, la cual expresa que la razón neta de transferencia de energía hacia un VC mediante transferencia de calor o trabajo es igual a la razón de cambio respecto al tiempo del contenido de energía del VC más el gasto neto de energía hacia fuera de la SC debido al flujo de masa.

4.4 Modelos utilizados en Ansys Fluent para el análisis numérico.

En *Ansys, Fluent* es el encargado de la solución de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos de transporte del flujo de fluidos que ocurren en la envolvente de una edificación, tales como la transferencia de energía en forma de calor entre fluidos y materiales sólidos, así como los efectos de turbulencia y vectores de velocidad que influyen en el fluido al interactuar con volúmenes sólidos y los efectos de flotabilidad en el fluido debido a gradientes de presión y temperatura. Para todo tipo de flujo de fluidos, Fluent resuelve primeramente las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento y, en función del tipo de flujo (flujo con reacciones químicas, con diversas especies, turbulento, etc.), soluciona las ecuaciones de modelos específicos; en el caso de flujos compresibles que involucren transferencia de calor entre fluidos y sólidos, adicionalmente se incluye la ecuación de la conservación de la energía.

4.4.1 Conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento.

Tal como lo indica la guía *Ansys Fluent Theory Guide Release 15.0* (2013), las ecuaciones de transporte que corresponden al principio de conservación de la masa y al principio de conservación de la cantidad de movimiento se observan respectivamente en las ecuaciones 4.8

y 4.9. De igual manera, la misma referencia se utilizó para describir los modelos siguientes utilizados en este trabajo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4.8)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

\mathbf{v} = vector de velocidad del fluido

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (4.9)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

\mathbf{v} = vector de velocidad del fluido

p = presión estática del fluido

$\boldsymbol{\tau}$ = tensor de esfuerzos del volumen del fluido

$\rho \mathbf{g}$ = fuerza gravitacional del volumen del fluido

4.4.2 Modelo de energía.

El modelo de energía describe la capacidad de la transferencia de calor de una masa a otra mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación, los cuales intervienen en el fenómeno de transporte de energía según la física del problema por resolver. La transferencia de calor entre una región sólida y un fluido se modela mediante conducción y convección, de acuerdo con esto, *Fluent* utiliza una variación de la ecuación de la energía con la particularidad de que el usuario determina las condiciones de frontera térmicas y las propiedades iniciales de los materiales que gobiernan los fenómenos de transferencia. La ecuación de transporte del modelo de energía se observa en la ecuación 4.10.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4.10)$$

Donde:

k_{eff} = conductividad efectiva, siendo $k_{eff} = k + k_t$, donde k_t es la conductividad térmica de turbulencia

$k_{eff} \nabla T$ = transferencia de energía debido a conducción

S_h = término fuente de calor interno, debido al modelo de radiación

$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$, donde h es la entalpía del gas o del fluido

p = trabajo de presión ejercido sobre el fluido

$v(\rho E + p)$ = energía cinética del fluido

4.4.3 Modelo de radiación.

En el caso de la transferencia de calor por radiación, esta puede ocurrir entre cualquier medio absorbente, emisor y dispersante, y en cualquiera de los tres estados físicos de la materia; la ecuación que describe este fenómeno es la ecuación de transferencia por radiación, la cual se observa en la ecuación 4.11. Sin embargo, en algunos problemas, como en el caso de bioclimatismo, basta con modelar la radiación del Sol sobre el dominio computacional del modelo sin considerar la emisión de superficies como en la mayoría de los problemas de radiación, de tal forma que, tratando el componente reflectante de la carga solar de manera uniforme sobre todas las superficies, es posible obtener resultados satisfactorios.

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \frac{an^2\sigma}{\pi}T^4 \quad (4.11)$$

Donde:

$I(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ = intensidad de radiación, en función de la posición \mathbf{r} y la dirección \mathbf{s}

a = coeficiente de absorción

σ_s = coeficiente de dispersión

n = índice de refracción

σ = constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es $5.669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

En *Fluent* existe un modelo de radiación llamado *Solar Load* que ofrece las características antes mencionadas, por el cual mediante el algoritmo *Solar Ray Tracing* calcula la irradiancia sobre las condiciones de frontera definidas en el modelo, induciendo un flujo de calor de acuerdo con la posición del Sol, este flujo se introduce como término fuente en la ecuación del modelo de energía. Además, la herramienta *Solar Calculator* integrada en este modelo, permite calcular la dirección e intensidad de la irradiancia en función de la hora del día, fecha y geolocalización, por lo que los valores de entrada a configurar son: posición global (latitud, longitud y zona horaria), fecha y hora de cálculo, orientación de la malla, método de irradiación solar y un factor de rayo solar.

Consecuentemente, el método de irradiación solar *Fair Weather Conditions* que utiliza este algoritmo proporciona una mejor atenuación, la cual representa condiciones atmosféricas más reales según los valores de entrada. La ecuación utilizada por este método para calcular la irradiancia normal directa, tomada del *ASHRAE Handbook* y se observa en la ecuación 4.12.

$$Edn = \frac{A}{e^{\frac{B}{\sin(\beta)}}} \quad (4.12)$$

Donde:

Edn = irradiancia normal directa

A = irradiancia solar aparente a una masa de aire $m = 0$

B = coeficiente de extinción atmosférica

β = altitud solar sobre el plano horizontal, en grados

4.4.4 Modelo Boussinesq.

Cuando existe una variación en la densidad del fluido debido al incremento de su energía térmica, se genera un flujo natural inducido por la fuerza de gravedad que actúa sobre el fluido a diferentes temperaturas, este fenómeno se llama flotabilidad y, cuando este se produce debido a variaciones pequeñas de densidad, es decir, las diferencias de temperatura en el fluido son pequeñas, *Fluent* utiliza la masa del fluido dentro del dominio del modelo, lo cual es posible especificando una densidad inicial constante para calcular la variación de densidad a través del modelo Boussinesq. La ecuación de este modelo se observa en la ecuación 4.13 siguiente.

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (4.13)$$

Donde:

ρ_0 = densidad inicial constante del fluido

T_0 = temperatura de operación inicial del fluido

β = coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica está definido como se observa en la ecuación 4.14, el cual influye en el valor del número de Rayleigh³, siendo este el que determina si el flujo de flotabilidad es laminar o turbulento.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4.14)$$

4.4.5 Modelo de turbulencia.

El fenómeno de turbulencia considera el movimiento aleatorio inestable hacia todas las direcciones del flujo cuando estos presentan números de Reynolds elevados, lo cual es descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes, sin embargo, la resolución de estas mediante simulación numérica directa es complicada en muchos casos debido al amplio rango de escalas en tiempo

³ Para saber cómo influye el número de Rayleigh en el modelo Boussinesq consultar *Ansys Fluent Theory Guide 15.0* en la sección 5.2.2 *Natural Convection and Buoyancy-Driven Flows Theory*.

y espacio en los cuales se desarrollan, consecuentemente, en CFD se utilizan procedimientos que promedian las ecuaciones para filtrar parte de todo el espectro de turbulencia.

El procedimiento más conocido resulta en las ecuaciones llamadas *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), con el cual se obtienen campos de presión y velocidad promediados con variación suave, eliminando las estructuras del flujo turbulento, sin embargo, este proceso añade términos desconocidos a las ecuaciones de transporte que hacen referencia a flujos y esfuerzos de Reynolds. Existen otros procedimientos alternativos, como el *Large Eddy Simulation* (LES), el cual utiliza un método de resolución de escalamiento, y algunos métodos híbridos entre el RANS y el LES, por lo que la elección del método para la solución de las ecuaciones depende de la física del problema y la exactitud requerida, además del tiempo de simulación y recursos de computación disponibles.

Dicho esto, se utilizó el modelo de turbulencia *Standard κ - ϵ* , siendo un modelo semi empírico de tipo RANS de dos ecuaciones, cuyas ecuaciones de transporte corresponden a la energía cinética de turbulencia (κ) y su razón de disipación (ϵ), por lo tanto, el modelo resuelve la magnitud de turbulencia y la escala de tiempo en que acontece el flujo de fluido. Este modelo estándar es el más simple y sus ecuaciones de transporte se observan en las ecuaciones 4.15 y 4.16.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] \quad (4.16)$$

Donde:

ρ = densidad

k = energía cinética de turbulencia

ϵ = razón de disipación de la energía cinética de turbulencia

\mathbf{v} = velocidad del fluido

μ_t = viscosidad turbulenta definida como $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$

C_μ = constante de la viscosidad turbulenta con valor de 0.09

σ_k = número de Prandtl para k constante con valor de 1.0

σ_ϵ = número de Prandtl para ϵ constante con valor de 1.3

4.5 Simulación numérica en Fluent.

Fluent es el módulo de *Ansys* en el cual se configuran las opciones del solucionador que resuelve las ecuaciones discretizadas para el modelo 3D, los materiales de los VCF y sus propiedades, los modelos de ecuaciones que se aplican al modelo y, ciertamente, las condiciones de frontera empleadas para proporcionar los valores iniciales del cálculo. A continuación, en los siguientes apartados se describen las configuraciones utilizadas para el análisis numérico del comportamiento térmico del hotel Buenavista Bacalar.

4.5.1 Configuración general.

El menú de configuración general se divide en tres partes principales, la primera trata aspectos en relación con la malla (*mesh*), la segunda en relación con el solucionador (*solver*) y la última con respecto a la fuerza de gravedad aplicada al modelo (*gravity*).

- Mesh*: contiene características para verificar la escala y unidades del modelo 3D y para verificar la correcta generación de la malla y su cualidad.
- Solver*: se configuró el solucionador de tipo *pressure-based* con el cálculo de velocidad absoluta y el cálculo de tipo transitorio con respecto al tiempo.
- Gravity*: se activó el efecto de la gravedad en el modelo sobre el eje “y” con un valor de la aceleración de la gravedad de -9.81 m/s^2 .

En la figura 44 se observa el menú *General* con las opciones de configuración general seleccionadas.

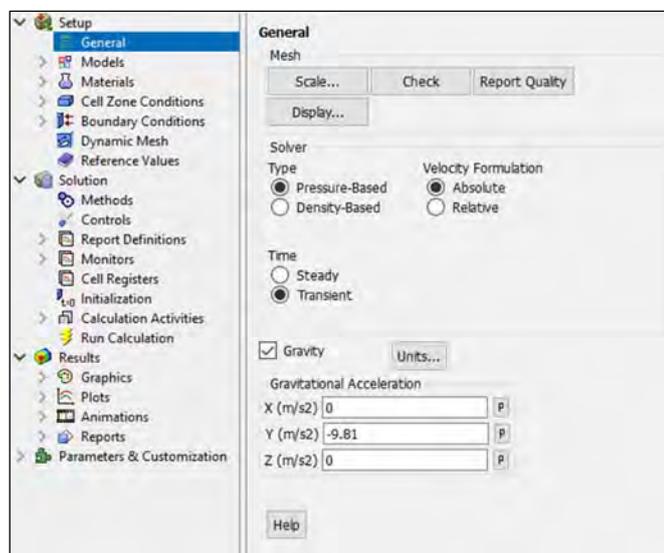


Figura 44. Ventana de la configuración general.

4.5.2 Modelos.

En el menú *Models* se activaron y configuraron los modelos de ecuaciones aplicados al modelo 3D, con excepción al modelo Boussinesq, el cual se activó al configurar los materiales. A continuación, se enlistan los modelos con su respectiva configuración seleccionada.

- Energy*: *On*.
- Viscous* (turbulencia): *Standard k-e*.
- Radiation*: *model: Off*, *Solar Load: Solar Ray Tracing*.

En la figura 45 se muestran las opciones configuradas para el modelo de turbulencia, en él se activaron las opciones de *Enhanced Wall Treatment* junto con *Pressure Gradient* y *Thermal Effects*, además de la opción *Full Buoyancy Effects*.

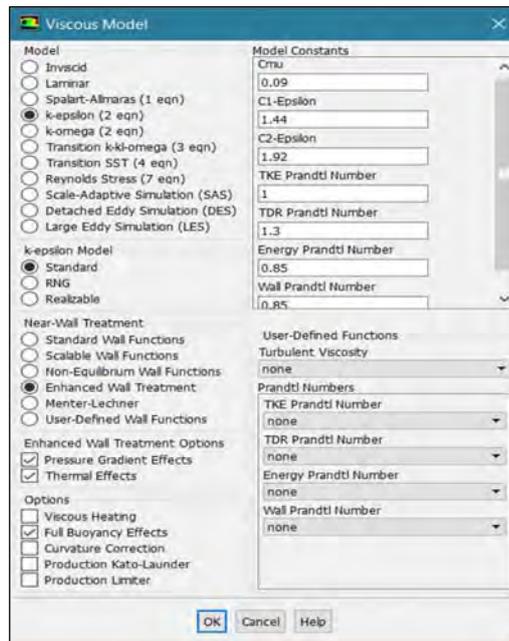


Figura 45. Ventana del modelo de turbulencia.

En la figura 46 se observa que no se activó un modelo de radiación para las superficies, sin embargo, se activó el modelo *Solar Load* con el algoritmo *Solar Ray Tracing*, el cual trata el componente reflectante de la carga solar sobre las fronteras del modelo 3D como ya se explicó en el apartado 4.4.3; se observa que se seleccionó un intervalo de actualización por cada *Time Step* para la carga solar y que se utilizaron los vectores de dirección del Sol al igual que las magnitudes de irradiación solar directa y difusa generados por el *Solar Calculator*.

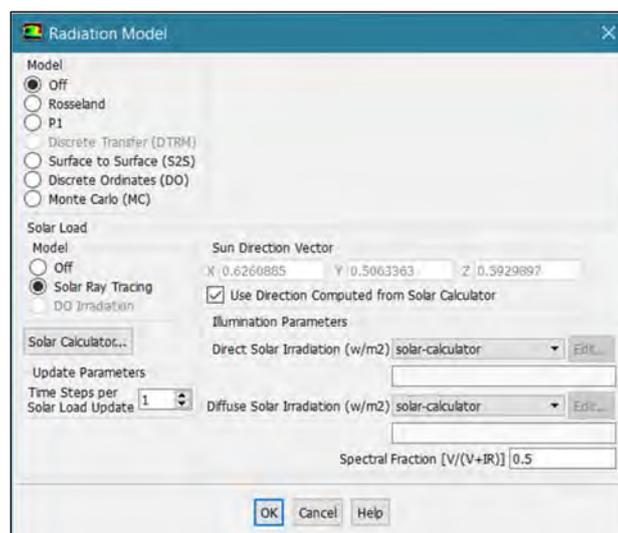


Figura 46. Ventana del modelo de radiación.

Las opciones configuradas de la herramienta *Solar Calculator* fueron el posicionamiento global del modelo en cuestión (mencionado en el capítulo 3), la orientación de este con respecto a la dirección norte-este del Sol, el día del año y hora en que se realizó el cálculo, y el método de irradiación solar siendo el *Fair Weather Conditions*. La ventana del *Solar Calculator* se muestra en la figura 47.

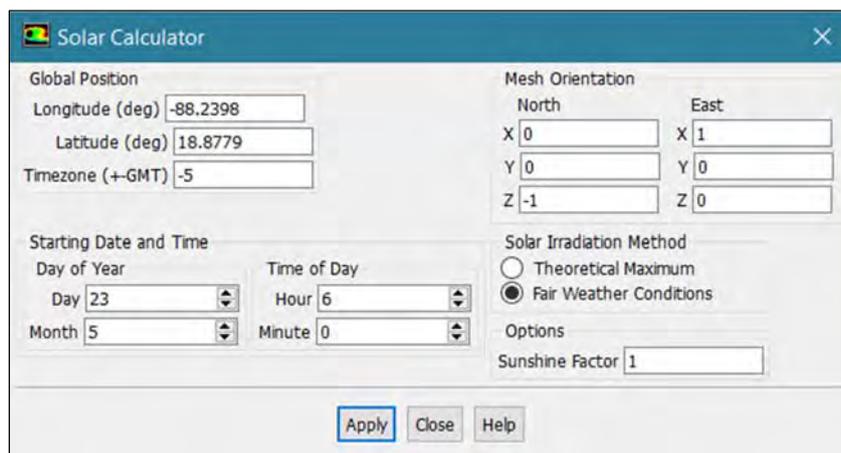


Figura 47. Ventana de la herramienta *Solar Calculator*.

4.5.3 Materiales.

En este menú se configuraron las propiedades termodinámicas y de transporte necesarias para la simulación de los materiales implicados en los volúmenes y superficies de control del modelo, siendo las de la caoba, jabón y vidrio común mostrados en el ANEXO 6 y las de los sistemas constructivos mostrados en el ANEXO 9.

En la figura 48 se muestra la ventana creación/edición de materiales, siendo el material nombrado como “sistema-muro” de tipo sólido y con sus propiedades de densidad, calor específico y conductividad térmica. De igual manera, en la figura 49 se observa la ventana creación/edición de materiales para el aire (material de la base de datos de *Fluent*) de tipo fluido con la diferencia de que en la densidad se activó el modelo Boussinesq y el coeficiente de expansión térmica se consideró para una temperatura de 15 °C.

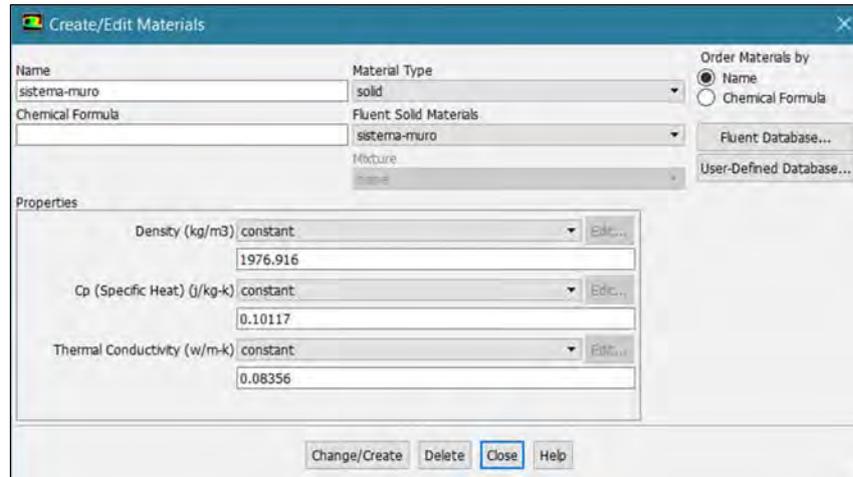


Figura 48. Ventana Create/Edit Materials para el sistema-muro.

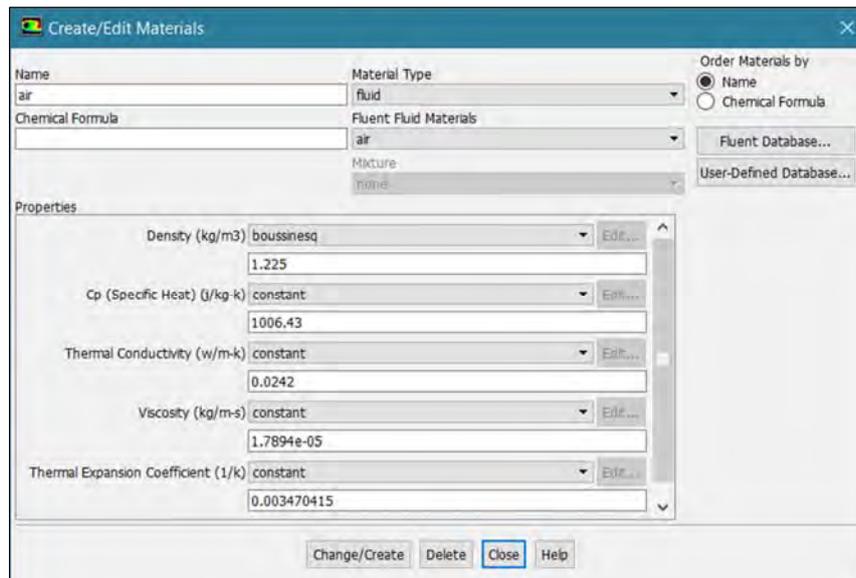


Figura 49. Ventana Create/Edit Materials para el aire.

4.5.4 Condiciones en los volúmenes de control.

En el menú *Cell Zone Conditions* se encontraron los VC del modelo definidos por el usuario en el módulo *Design Modeler*, los cuales los integraron los volúmenes de aire del interior de la edificación y los volúmenes de todos los elementos sólidos del modelo (puertas, ventanas, muros, techos, etc.). Así, para cada VC, únicamente se definió el tipo (fluido o sólido) y el material del que está compuesto. En la figura 50 se muestra la ventana del menú *Cell Zone Conditions*.

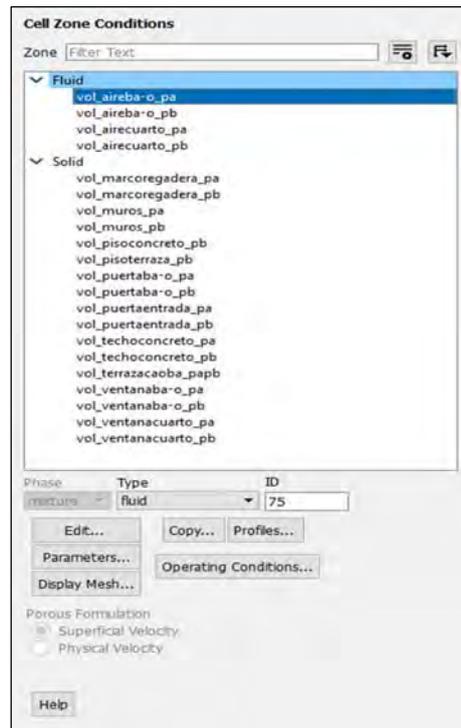


Figura 50. Ventana Cell Zone Conditions.

4.5.5 Condiciones de frontera.

Las fronteras de un modelo, también consideradas las superficies de control en los bordes del modelo, son aquellas superficies que contienen los valores iniciales de las variables aplicadas a este para llevar a cabo el análisis numérico; en problemas de bioclimatismo o análisis de CFD en edificaciones, se considera como fronteras a la envolvente de la edificación. Las fronteras relevantes para esta investigación son las llamadas *Inlets*, *Outlets* y *Walls*, también definidas en el módulo *Design Modeler*. En la figura 51 se observa el menú *Boundary Conditions*, en el cual se configuraron los distintos tipos de fronteras y sus condiciones.



Figura 51. Ventana Boundary Conditions.

A continuación, se describen brevemente las condiciones que se configuraron para cada tipo de frontera en el modelo:

- a) *Inlets*: estas SC son las entradas del flujo de fluido en la envolvente de la edificación; aunque se han nombrado *pressure-inlet*, estas fronteras se definieron como tipo *velocity-inlet*, por lo tanto, se configuró la magnitud de velocidad de entrada, su temperatura y se activó su participación en el *Solar Ray Tracing* (pestañas *Momentum*, *Thermal* y *Radiation*, respectivamente). Los valores de la magnitud de velocidad se obtuvieron a través del software SAM⁴ y su configuración se realizó mediante tablas transitorias, la cual se observa en la figura 52.

⁴ System Advisor Model (SAM) del National Renewable Energy Laboratory.

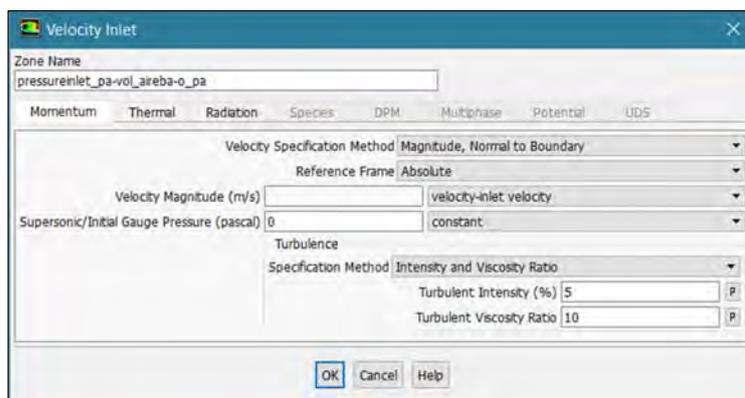


Figura 52. Condiciones de magnitud de velocidad de las fronteras tipo velocity-Inlet.

- b) *Outlets*: son las SC de salida del flujo de fluido en la envolvente de la edificación, se definieron como tipo *pressure-outlet* y se configuró su presión manométrica, su temperatura de contraflujo y se activó su participación en el *Solar Ray Tracing* de manera similar a las *inlets*. Las condiciones configuradas para la temperatura de contraflujo se observan en la figura 53.

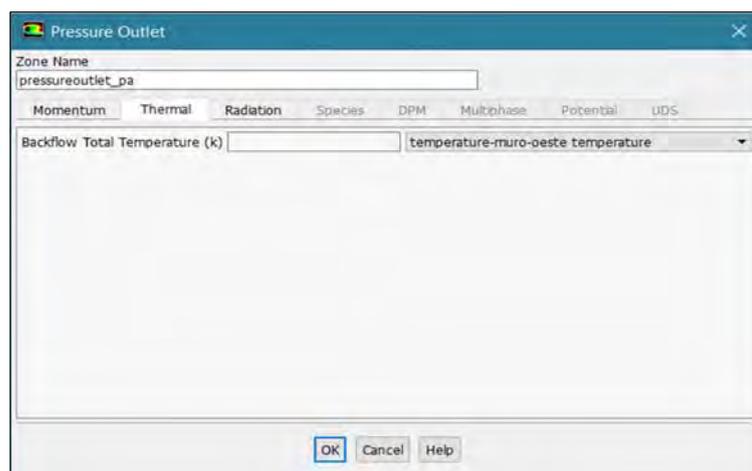


Figura 53. Condiciones de temperatura de contraflujo de las fronteras tipo pressure-Outlet.

- c) *Walls*: son las SC de superficies sólidas que constituyen la envolvente de la edificación, se conformaron por las superficies de muros, techos, piso y los bordes de madera de las ventanas y entradas, tal como se mencionó en el apartado 4.1.2. Las condiciones de las fronteras de tipo *Wall* fueron de dos tipos, térmicas (*Thermal*) y de radiación (*Radiation*), las cuales se resumen a continuación:

- *Thermal*:
 - Condiciones térmicas: se seleccionó *mixed*, el cual involucra transferencia de calor por convección y radiación.
 - Material: se seleccionó entre los materiales definidos en función de la SC.

- Coeficiente de transferencia de calor h : se utilizó $12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para las SC del techo y $20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para todas las demás SC, considerando valores similares en la literatura y tras varias pruebas experimentales de simulación.
- Temperatura de flujo libre (T_∞): se utilizaron los valores de temperatura ambiente obtenidos a través del software SAM y se configuraron mediante tablas transitorias para todas las fronteras dependiendo su orientación.
- Temperatura de radiación externa (T_{cielo}): se aplicaron los valores de T_{cielo} resultantes de la metodología usada en el tutorial de *Fluent: Using Solar Load Model for Indoor Ventilation* (ANSYS, 2007) a través de tablas transitorias, con distintas temperaturas para cada frontera de acuerdo a su orientación.
- Emisividad: para las SC de sistemas constructivos el valor fue 0.9, para las de acabado en madera fue de 0.94 y para las SC de vidrio común fue de 0.6, estos valores se tomaron de la literatura.
- Espesor de la superficie: solo en las SC de vidrio común se especificó un espesor de 0.006 m, mientras que en las restantes no se definió valor debido a que sus espesores se consideraron en los VC.
- Radiation:
 - Tipo de condición de frontera: se seleccionó “semitransparente” para las SC de control nombradas Wall_ShowerWindowExt_PA y Wall_ShowerWindowExt_PB, mientras que para todas las demás SC de la envolvente se seleccionó “opaco”.
 - Solar Ray Tracing: se activó la influencia del algoritmo sobre todas las SC excepto en donde no incidió la irradiancia como en las superficies adyacentes al suelo.

En las figuras 54 a la 56 se muestran las ventanas *Boundary Conditions* de las SC nombradas *Wall_MuroEste_PA*, *Wall_TechoExt_PA* y *Wall_ShowerWindowExt_PA*, respectivamente.

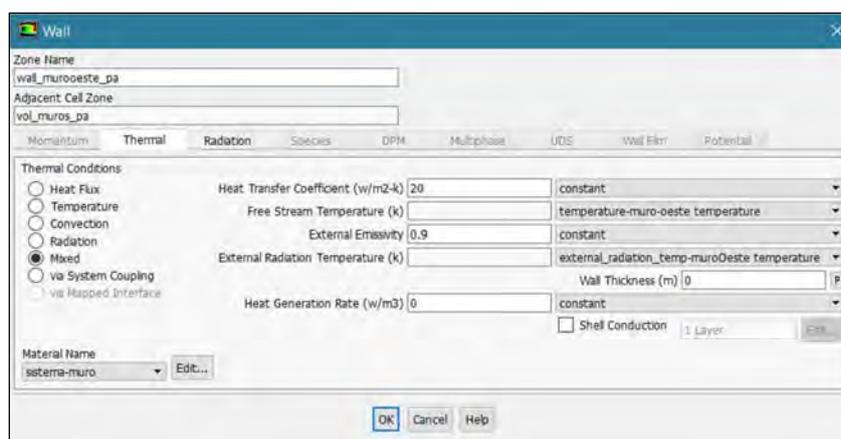


Figura 54. Ventana *Boundary Conditions* de *Wall_MuroEste_PA*.

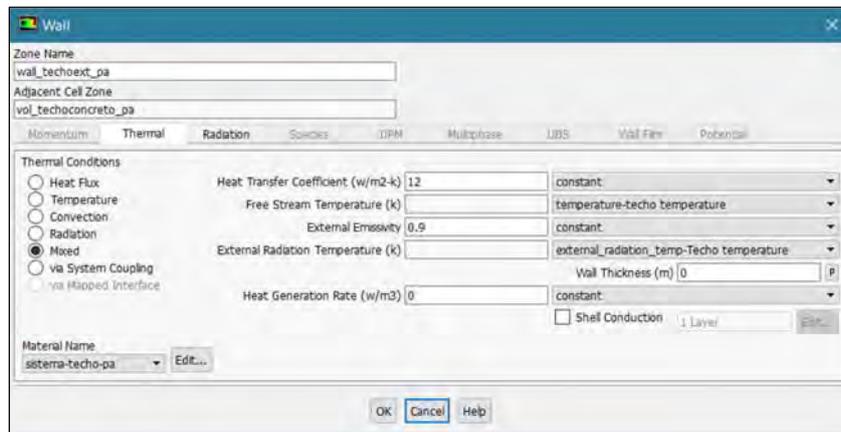


Figura 55. Ventana Boundary Conditions de Wall_TechoExt_PA.

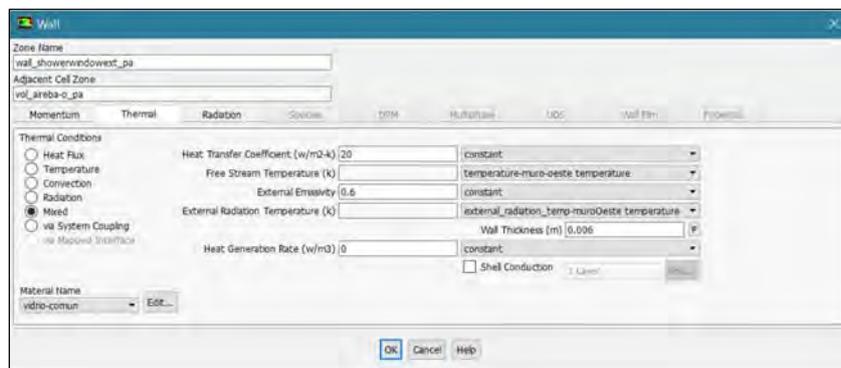


Figura 56. Ventana Boundary Conditions de Wall_ShowerWindowExt_PA.

Las tablas transitorias utilizadas en las condiciones de frontera se exponen en el ANEXO 12. Los menús de *Dynamic Mesh* y *Reference Values* se establecieron con la configuración predeterminada de *Fluent*.

4.5.6 Métodos de solución.

En el menú *Solution Methods* se definieron los métodos⁵ encargados de solucionar los cálculos de las ecuaciones en referencia a la presión, velocidad, gradiente, momento, energía cinética de turbulencia, su razón de disipación y energía. La configuración utilizada en este análisis fue el siguiente:

- *Pressure-velocity Coupling: SIMPLE.*
- *Gradient: Least Squares Cell Based.*
- *Pressure: Body Forced Weighted.*
- *Momentum: Second Order Upwind.*
- *Turbulent Kinetic Energy: First Order Upwind.*

⁵ Para saber más sobre los métodos de solución utilizados en *Fluent* consultar *Ansys Fluent Theory Guide 15.0* en el capítulo 20: *Solver Theory*.

- *Turbulent Dissipation Rate: First Order Upwind.*
- *Energy: Second Order Upwind.*

En la figura 57 se observa el menú de *Solution Methods* con su configuración para el modelo, los métodos y algoritmos empleados son relevantes para el tiempo de cálculo.



Figura 57. Ventana Solution Methods.

4.5.7 Controles de solución.

En este menú se configuran los controles de relajación para los modelos de ecuaciones aplicados, estos controles influyen en los coeficientes de las variables de las ecuaciones afectando el tiempo de convergencia del cálculo. En la figura 58 se muestra la ventana de los controles de solución.



Figura 58. Ventana Solution Controls.

4.5.8 Reportes y monitores.

Ya que el objetivo de la simulación numérica fue realizar una comparación con las mediciones de temperatura vistas en el capítulo 3, primeramente, se crearon superficies de tipo point en la envolvente del modelo para el muro este (E), oeste (O), el techo (T) y un punto específico en el interior de la habitación (C) representado en una posición sobre la cama, con el fin de facilitar su comparación con las imágenes infrarrojas generadas en la edificación. Los puntos tuvieron las siguientes coordenadas: E (3.69, 3.93, 0.225), O (0, 3.53, 2.745), T (3.5, 5.32, 3.1) y C (0.52, 3.38, 3.3).

Después se crearon *Report Definitions* para cada uno de esos puntos, incluyendo sus respectivas *Walls* en el caso de las superficies. Estas definiciones fueron seleccionadas para registrar el valor promediado de la temperatura total en las superficies, así como el valor de la magnitud de velocidad en *Inlets* y *Outlets*. En la figura 59 se muestra la ventana *Report Definitions* con el listado de definiciones y sus propiedades.

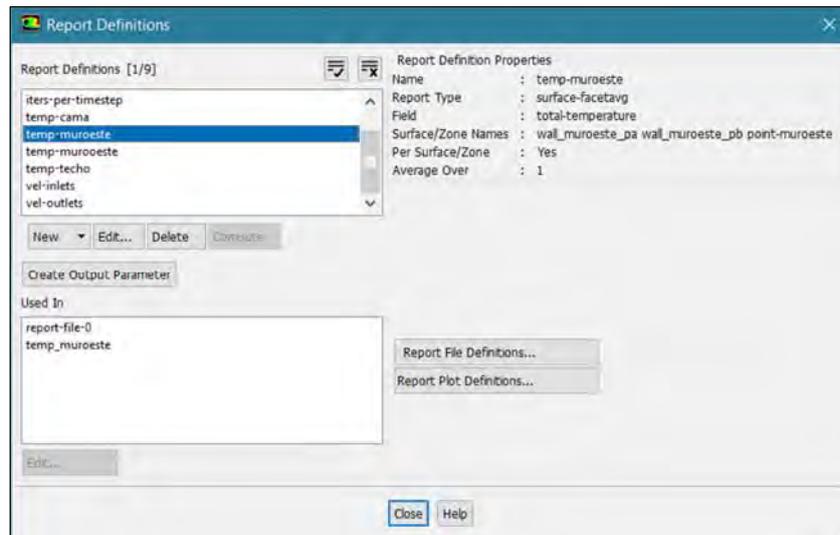


Figura 59. Ventana Report Definitions.

Seguidamente, se creó un *Report File*, el cual generó un archivo de datos por cada paso de tiempo con los valores de las variables de cada superficie de los *Report Definitions*, este se observa en la figura 60. De igual manera, las definiciones creadas sirvieron para generar *Report Plots*, los cuales son gráficas de las variables medidas de cada superficie que se mostraron en la interfaz gráfica de *Fluent* una vez iniciado el cálculo.

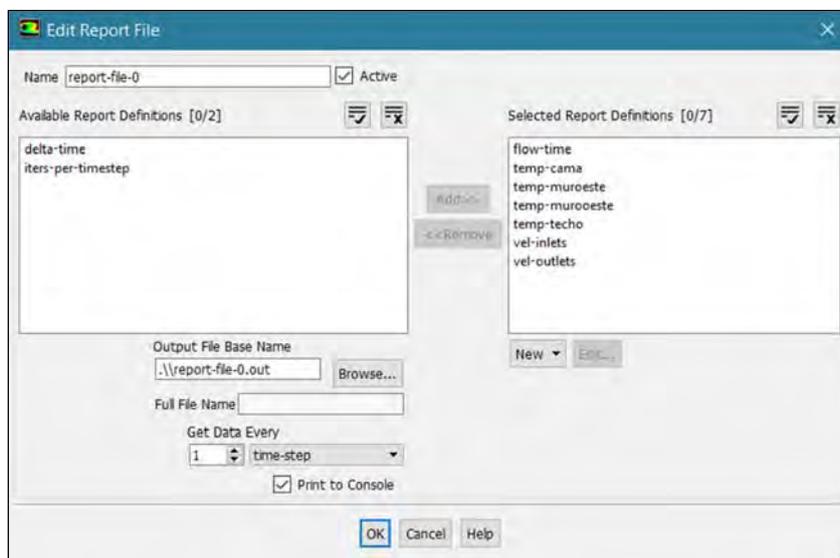


Figura 60. Ventana Report File.

4.5.9 Valores iniciales e inicio del cálculo.

En el menú *Solution Initialization* se realizó la configuración para darle los valores iniciales a las variables involucradas en el cálculo, también se seleccionó el método de inicialización

estándar y un marco de referencia relativo al volumen de control. Los valores iniciales de las variables se observan en la figura 61; una vez realizada la inicialización, se ejecutó un *Patch* de temperatura al modelo, el cual consistió en iniciar el cálculo con todos los VC a la temperatura de 26.5 °C (para PB) y 27.5 °C (para PA), mismas indicadas como valores iniciales en la tabla transitoria de temperatura ambiente.

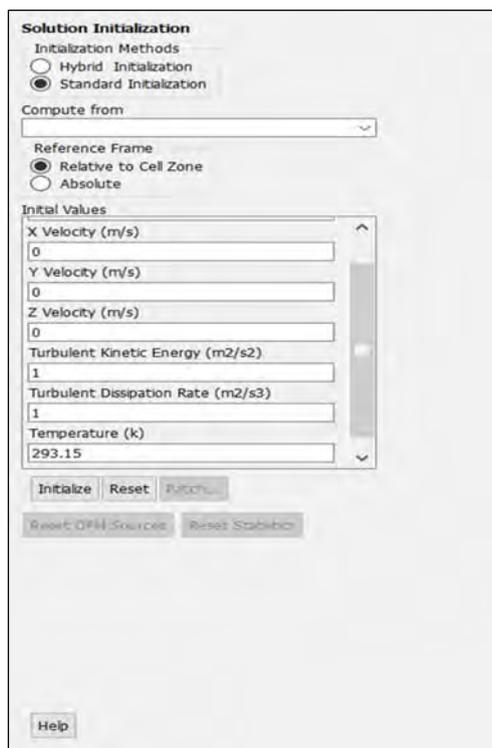


Figura 61. Ventana Solution Inicialization.

Posteriormente, se inició el cálculo numérico mediante el menú *Run Calculation*, donde se configuró lo siguiente:

- *Time Step Size* (s): 60
- *Max Iterations/Time Step*: 3
- *Number of Time Steps*: la metodología realizada fue que, de acuerdo con la hora del día simulada, varió el *Sunshine Factor* del método *Fair Weather Conditions* de la calculadora solar (figura 47), lo cual permitió asemejar el sombreado en la envolvente por efectos de vegetación y edificios colindantes a la edificación. Se utilizó un valor de 0.2 de 06 a 08 hrs., 0.3 de 08 a 09 hrs., 0.4 de 09 a 10 hrs. y un valor de 1 de 10 a 22 hrs.

Se realizó una corrida considerando el modelo *Solar Ray Tracing* para el día 23 de mayo y una segunda corrida para el día 23 de diciembre, ambas de 06 a 22 hrs y con sus respectivos valores de temperatura en las tablas transitorias, con la finalidad de comparar los resultados de la simulación con las mediciones realizadas en primavera y después hacer una simulación para invierno, para así tener una aproximación del comportamiento real de la edificación.

Al inicio, durante y al término del cálculo, se visualizaron los residuales de convergencia de las variables correspondientes a las iteraciones de acuerdo con los *Time Steps*. En la figura 62 se muestra la escala de residuales para la fecha 23 mayo, a las 22 hrs, equivalente a 960 *Time Steps* y 2880 iteraciones.

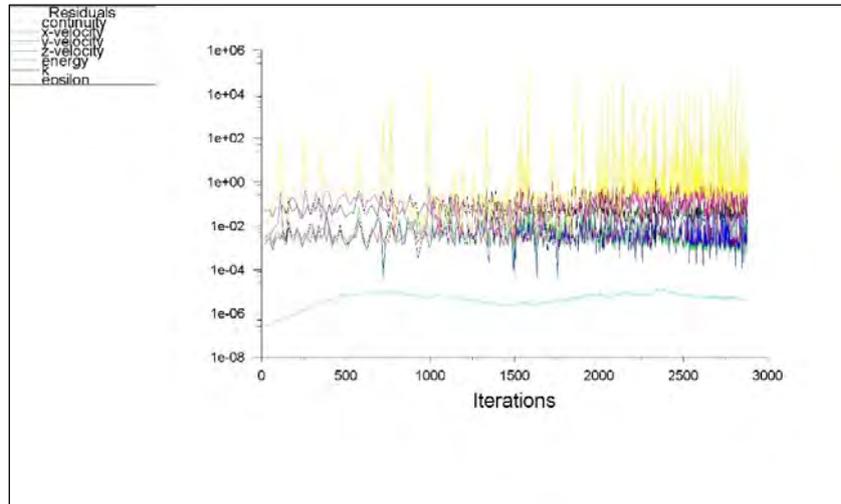


Figura 62. Escala de residuales al término de la corrida de verano.

Una vez terminados los análisis numéricos, se generaron imágenes de post-procesamiento de los resultados en el módulo *CFD-Post* mediante diversos objetos gráficos. Se utilizaron contornos de temperatura en todas las superficies de control que constituyen la envolvente para representar la temperatura superficial exterior del hotel, de igual manera, se utilizó un plano YZ en $x = 2.2$ m para representar la variación de temperatura y velocidad en sólidos y fluidos a lo largo de ese corte transversal, y un plano XZ en $y = 4$ m para representar la variación de temperatura y velocidad en sólidos y fluidos sobre este.

En las figuras 63 a la 65 se muestran los contornos de temperatura de la envolvente del modelo y los planos transversales de temperatura y velocidad correspondientes a la corrida del 23 de mayo a las 08 hrs. equivalente a 120 *Time Steps*, mientras que en las figuras 66 a la 68 se muestran los mismos objetos gráficos correspondientes al 23 de mayo a las 13 hrs. equivalente a 420 *Time Steps*, y en las figuras 69 a la 71 se observan los mismos para el 23 de mayo a las 18 hrs. equivalente a 720 *Time Steps*.

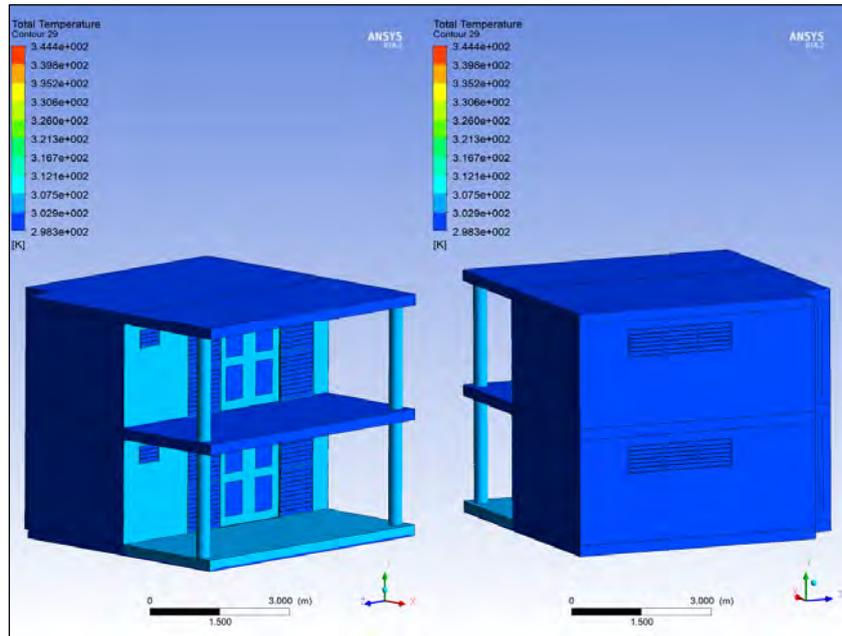


Figura 63. Contornos de temperatura en la envoltura del modelo en 120 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

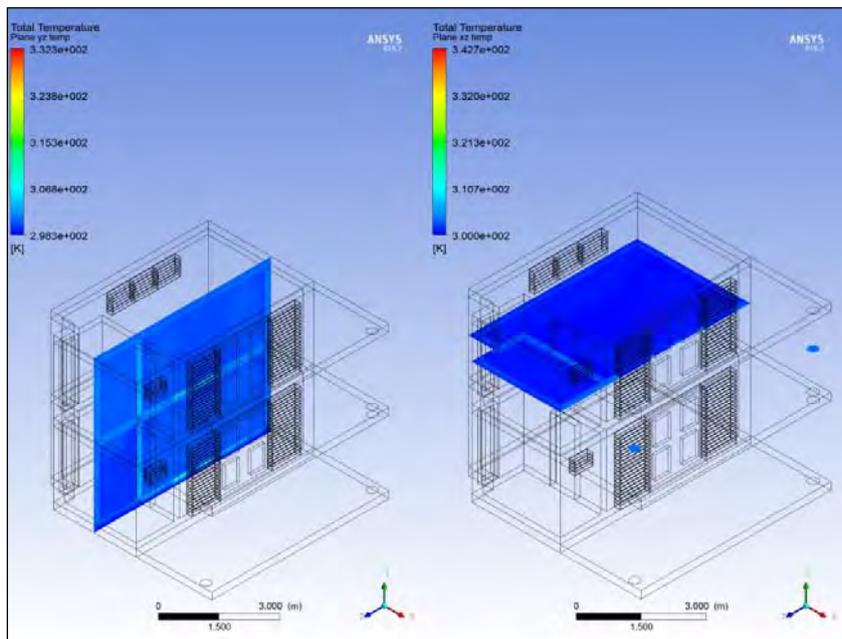


Figura 64. Planos yz y xz de temperatura del modelo en 120 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

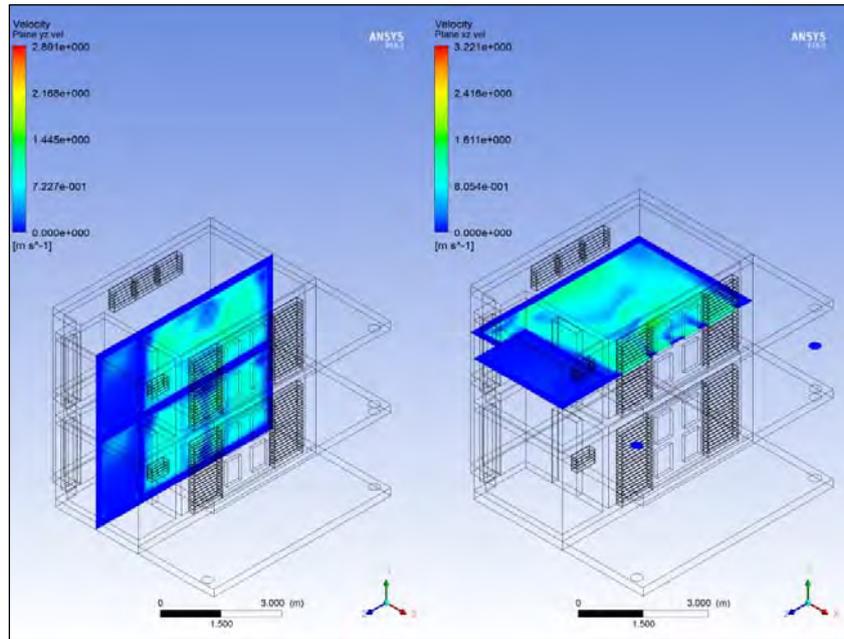


Figura 65. Planos yz y xz de velocidad del modelo en 120 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

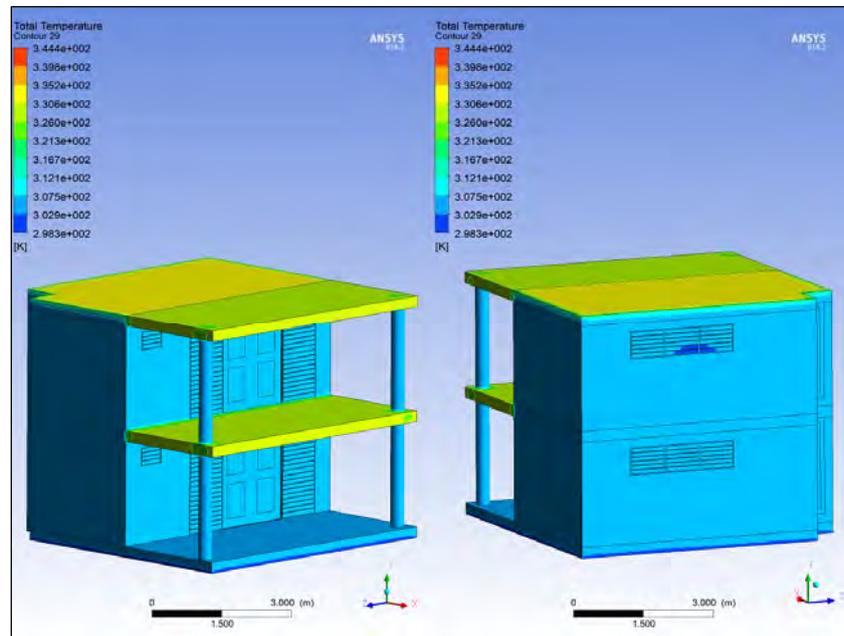


Figura 66. Contornos de temperatura en la envoltura del modelo en 420 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

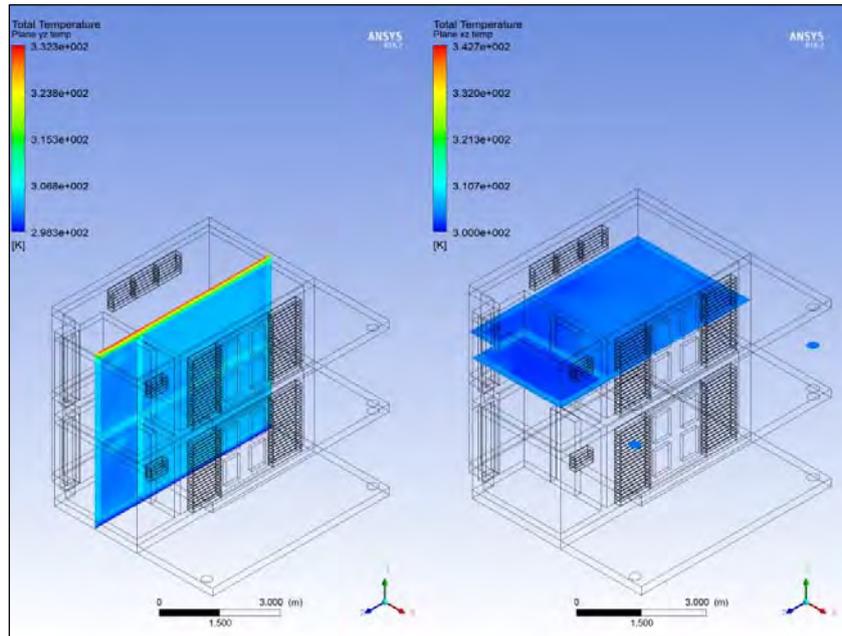


Figura 67. Planos yz y xz de temperatura del modelo en 420 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

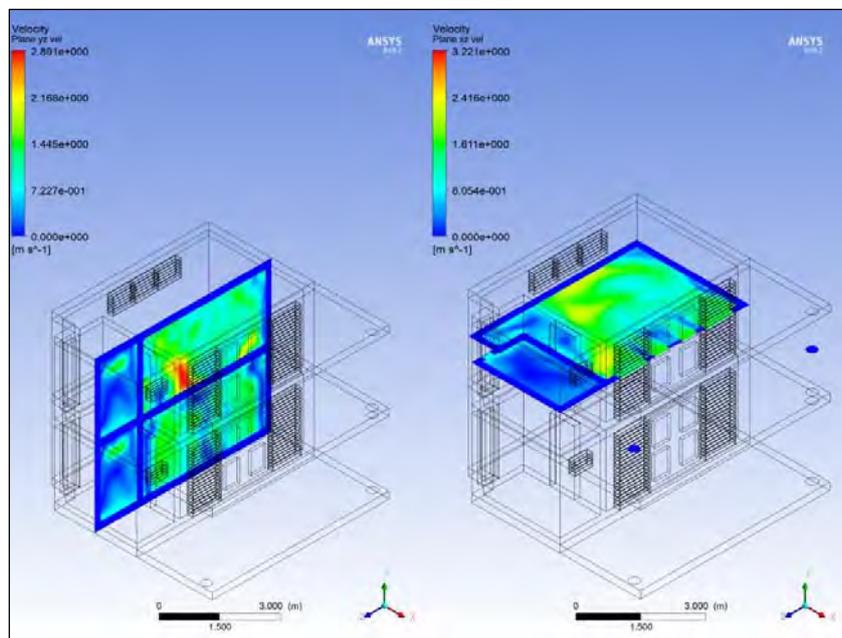


Figura 68. Planos yz y xz de velocidad del modelo en 420 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

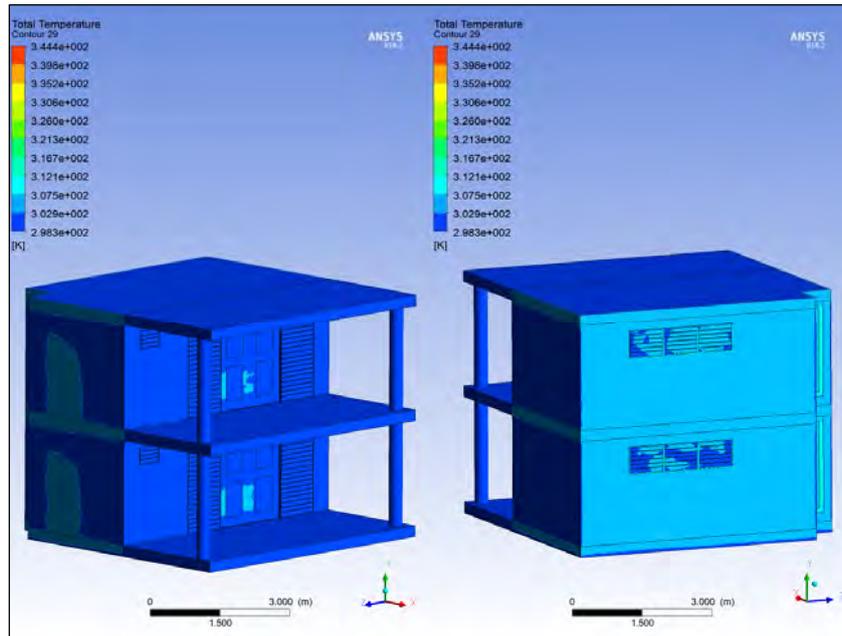


Figura 69. Contornos de temperatura en la envoltura del modelo en 720 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

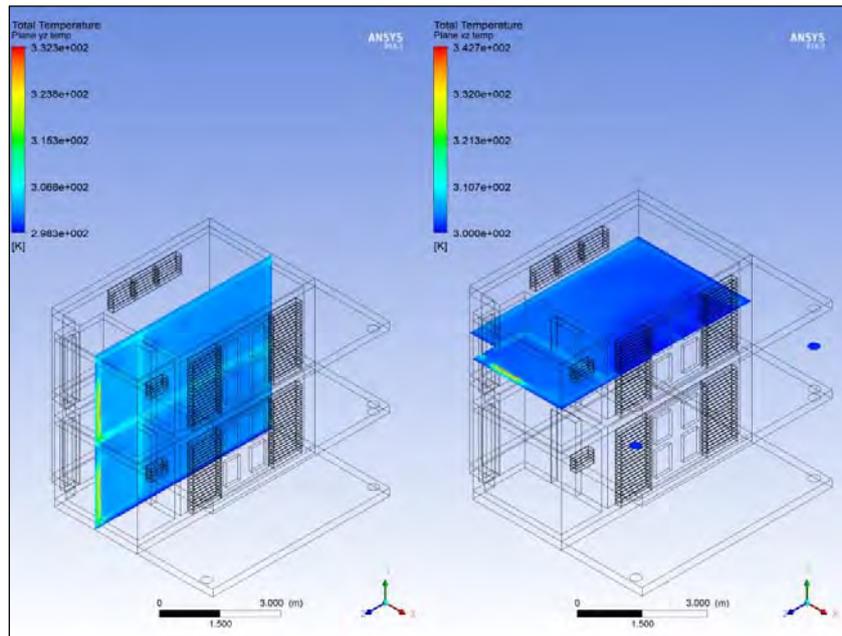


Figura 70. Planos yz y xz de temperatura del modelo en 720 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

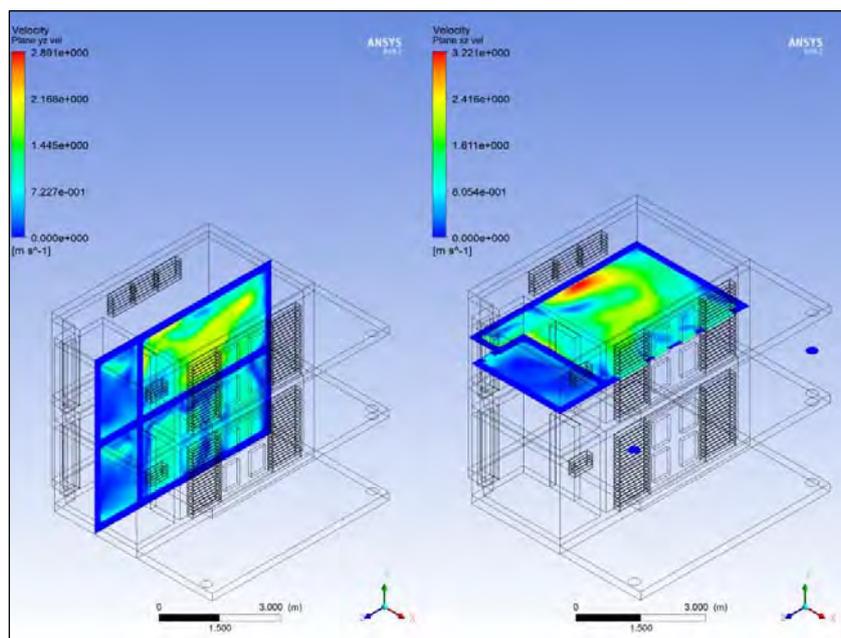


Figura 71. Planos yz y xz de velocidad del modelo en 720 Time Steps.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los contornos de temperatura de la envolvente, se observa cómo en las primeras horas (120 *Time Steps*) la irradiancia generada por el modelo *Solar Load* incidió sobre los muros este calentando las superficies, por lo que siguiendo el recorrido solar en dirección hacia el oeste, la temperatura alcanzó su valor máximo en la techumbre alrededor del mediodía (420 *Time Steps*) y finalizó calentando las superficies de los muros oeste conforme terminó su trayectoria (720 *Time Steps*), el principio de funcionamiento de la trayectoria solar del modelo *Solar Load* se observa en la figura 72; con respecto a los planos de temperatura, se observa uniformidad en las partes de fluido con pequeños gradientes en ciertas regiones, mientras que en las partes sólidas del plano se observan con mayor evidencia los contornos de temperatura, por otra parte, los planos de velocidad indican que conforme aumentó la temperatura en el interior de la habitación se generaron mayores gradientes de velocidad pero predominando la convección natural de acuerdo con el plano YZ, mientras que el plano XZ indicó que los gradientes de velocidad del fluido correspondieron con las entradas y salidas de presión en la habitación.

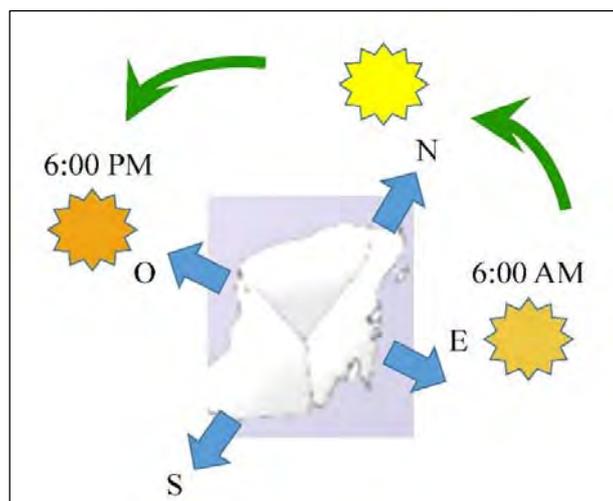


Figura 72. Principio de funcionamiento del modelo Solar Load.
Fuente: Propiedad del Dr. Víctor Romero.

4.6 Resultados.

Finalmente, se analizaron las temperaturas del muro este, el techo y en el interior de la habitación (punto sobre cama) del hotel Buenavista Bacalar mediante una comparación entre los datos generados en el análisis numérico y las mediciones de temperatura superficial exterior de cada superficie realizadas en el capítulo 3. Cabe mencionar que no se analizó la temperatura del muro oeste de la edificación debido a dificultades con respecto a la precisión de las mediciones reales de temperatura en esa superficie.

4.6.1 Análisis del 23 de mayo.

En las figuras 73, 74 y 75 se observan respectivamente las gráficas comparativas del muro este, el techo y temperatura interior en cama utilizando el *Solar Calculator* el día 23 de mayo de 06 a 22 horas.

Tal como se observa en las gráficas, los resultados de la simulación se asemejaron a las mediciones de temperatura superficial del hotel, mostrando pequeñas diferencias de temperatura entre los valores medidos y simulados, sobre todo en el comportamiento de la carga térmica en el techo y en el interior de la habitación, hecho que valida el análisis numérico en *Fluent* como herramienta de diseño. De igual manera, en la gráfica de la Temperatura Interior En Cama se observa que la temperatura se encuentra dentro de la ZCT definida anteriormente bajo el criterio de Szokolay en las primeras horas del día (06 a 10 hrs.) y en las últimas (después de las 21 hrs.).

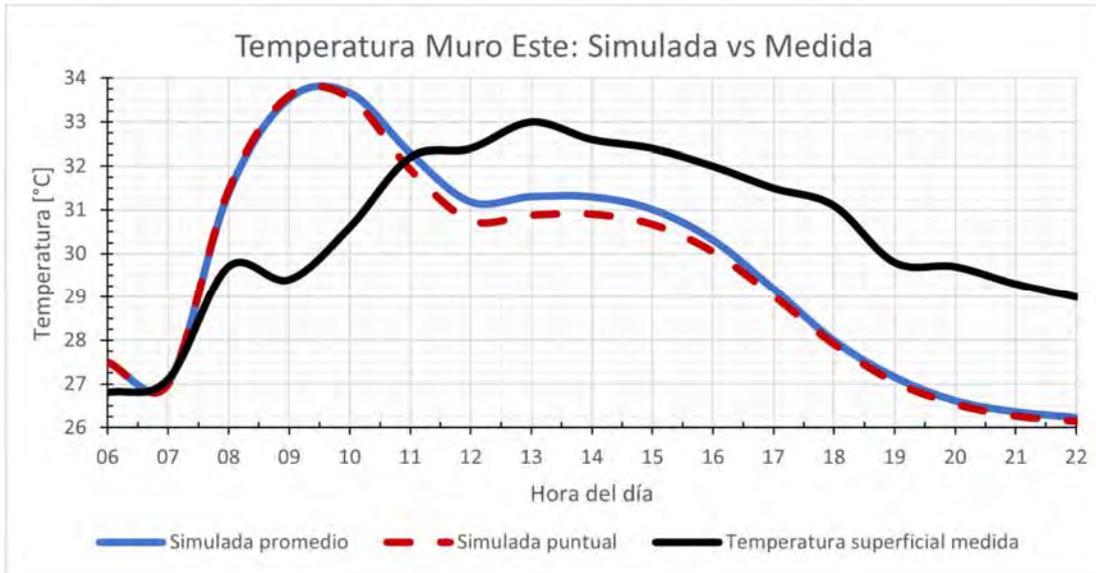


Figura 73. Gráfica comparativa Muro Este: Simulada vs Medida.
Fuente: Elaboración propia.

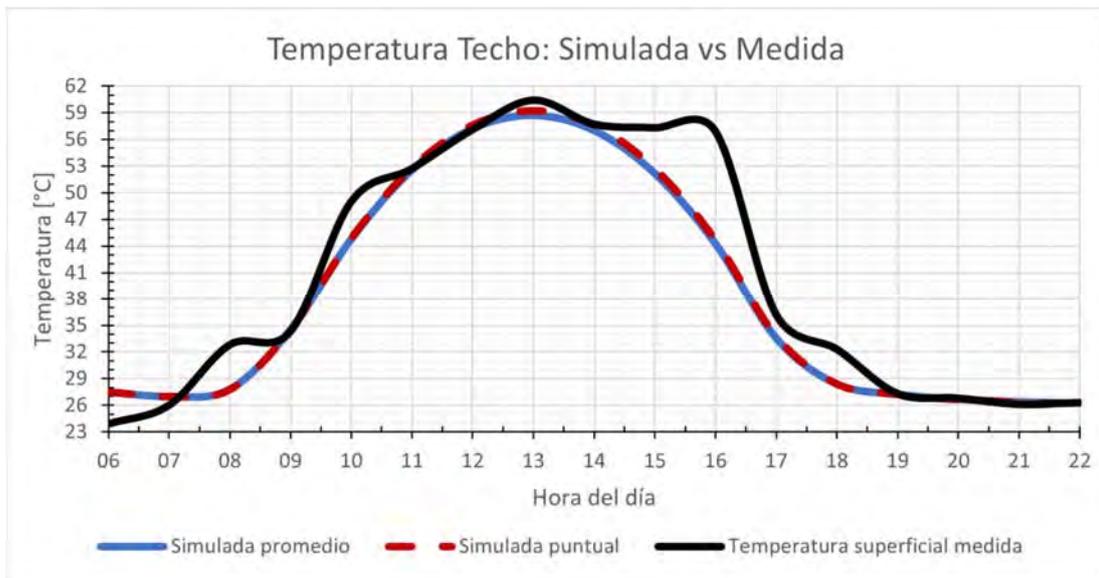


Figura 74. Gráfica comparativa Techo: Simulada vs Medida.
Fuente: Elaboración propia.

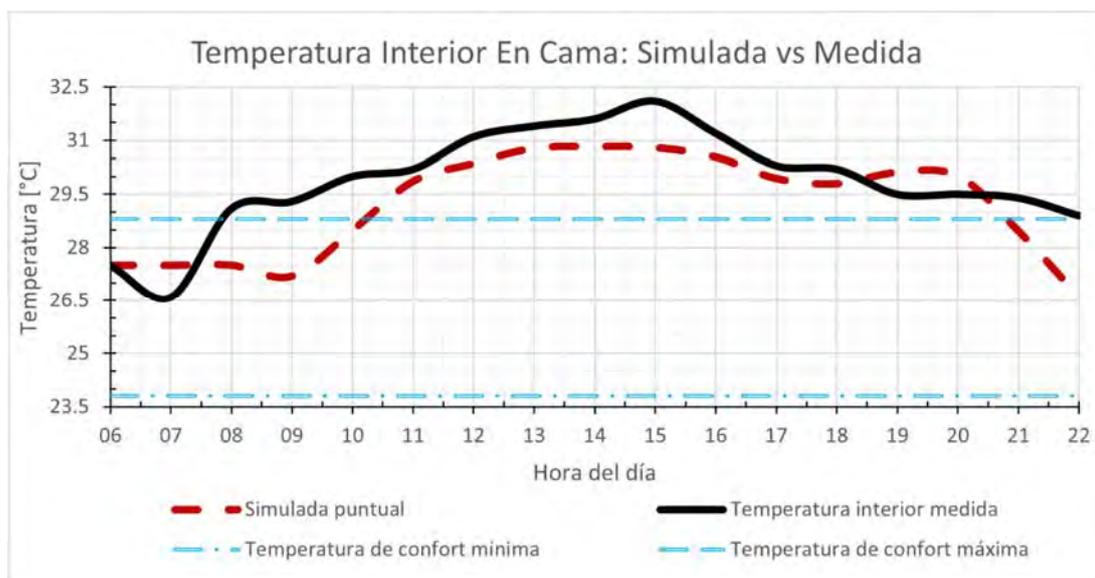


Figura 75. Gráfica comparativa Temperatura Interior En Cama: Simulada vs Medida.
Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Análisis del 23 de diciembre.

Posteriormente se realizó una corrida únicamente cambiando la fecha en que se aplicó el *Solar Calculator* al 23 de diciembre y manteniendo las demás configuraciones con respecto a modelos de ecuaciones, materiales y condiciones de frontera. Se obtuvieron los datos de temperatura de las mismas superficies de la envolvente y se compararon con la corrida realizada en mayo. En las figuras 76, 77 y 78 se observan respectivamente las gráficas comparativas para el muro este, el techo y la temperatura interior en cama.

En las gráficas se observa un comportamiento de la temperatura del 23 de diciembre muy similar a la simulada el 23 de mayo pero con una diferencia de temperaturas en cada punto de estas, lo cual favorece el uso de *Fluent* principalmente para predecir el comportamiento térmico de la edificación en cualquier fecha del año (en este caso en invierno), tal como se observa en la gráfica de Temperatura Interior En Cama, donde la temperatura se encuentra dentro de la ZCT la mayor parte del día (de 10:30 hrs. en adelante).



Figura 76. Gráfica comparativa Muro Este: 23 diciembre vs 23 mayo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 77. Gráfica comparativa Techo: 23 diciembre vs 23 mayo.
Fuente: Elaboración propia.

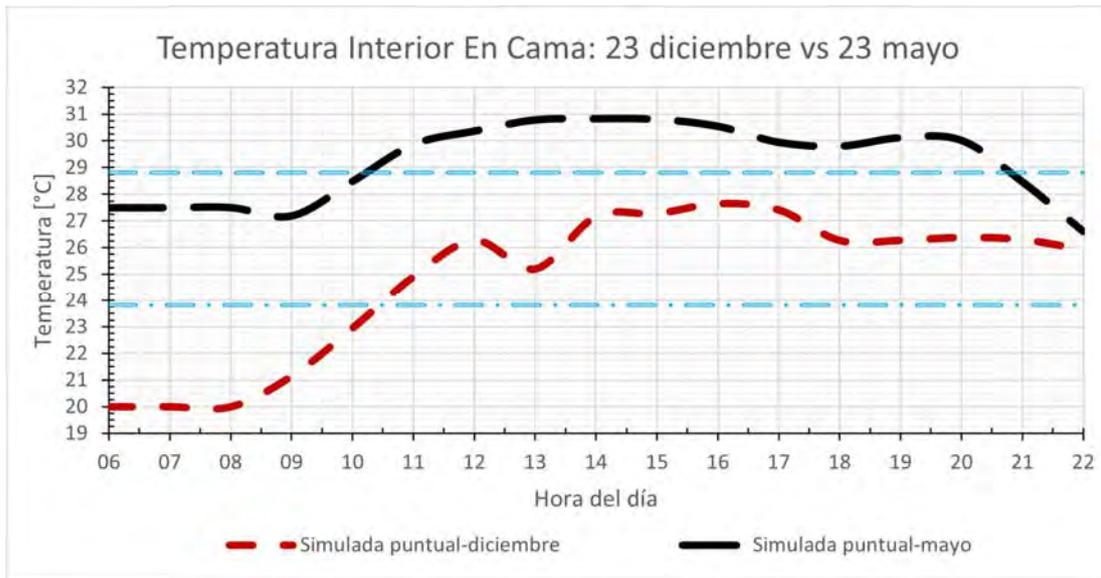


Figura 78. Gráfica comparativa Temperatura Interior En Cama: 23 diciembre vs 23 mayo.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- La normatividad y reglamentación en materia de edificación y vivienda sustentable en México permiten tener una perspectiva dentro del marco legal en cuestión de diseño y construcción de edificaciones, sobre todo orientada hacia el uso de materiales aislantes y los métodos de cálculo de ganancia térmica en la envolvente.
- Las normas mexicanas referentes al confort térmico y requerimientos ambientales mínimos sostienen debidamente sus exigencias para el cuidado ambiental de acuerdo con los fines y zonas donde son construidas las edificaciones.
- Existe en el país la intención del gobierno de promover la vivienda digna y sustentable a través de programas que brindan apoyo mediante subsidios a los ciudadanos para la obtención de ecotecnologías, materiales y productos que promuevan el cuidado del medio ambiente y el ahorro energético.
- Realizando una comparación de las propiedades termodinámicas del chukum con las propiedades de los morteros típicos utilizados en la región, se encuentra que éste mantiene características similares al mortero compuesto por cemento, cal y polvo en proporciones C-C-P 1:1:3 de acuerdo con la bibliografía, concluyendo que el chukum posee una capacidad para transportar el flujo térmico relativamente baja y es más eficiente para almacenar energía térmica con respecto a los demás morteros típicos de la zona en diferentes proporciones.
- Los resultados de las propiedades térmicas del chukum permiten establecerlo como material apto para las condiciones climáticas de la región y las características energéticas requeridas, ya que principalmente presenta una baja conductividad térmica y posee una difusividad y efusividad térmicas mayores a la mayoría de los morteros comunes de la zona, revelando estas dos últimas propiedades, una capacidad considerable del material de retardar las cargas térmicas.
- Bajo el criterio de cálculo de resistencia térmica para el caso del hotel Buenavista Bacalar, el mortero de chukum presenta valores aceptables comparados con los morteros típicos de la región, tanto en superficies verticales como horizontales, teniendo el valor más alto después del mortero C-C-P 1:1:3, mientras que en los sistemas constructivos, el sistema de muros con chukum presenta valores de resistencia térmica total mínima muy cercanos a los indicados para los morteros de cemento de la norma y, en el sistema de techumbres de vigueta y bovedilla, el sistema de chukum con capa exterior de calcreto presenta valores aceptables respecto a los morteros C-C-P para techumbres, mientras que el sistema de chukum con capa exterior de madera (tal como se aplicó en el caso de estudio) es el que presenta la mayor resistencia térmica total para techumbres, teniendo una ventaja bastante significativa.
- El sistema de techos empleado en el hotel posee la mayor capacidad de amortiguamiento térmico, posiblemente debido a que la capa de la superficie exterior es de jabón, la cual presenta una conductividad térmica alta entre las maderas pero una baja capacidad de almacenamiento de calor de acuerdo con la literatura, de manera que las altas temperaturas recibidas en el exterior de la techumbre son transmitidas rápidamente hacia el interior pero con un gran amortiguamiento gracias a las demás capas del sistema, manteniendo la temperatura superficial interior del espacio con pocas variaciones y muy cercanas al límite superior de la ZCT local.

- Respecto a los sistemas de muros, es posible que debido a las características climatológicas de acuerdo con la orientación de las superficies en la envolvente, como una menor radiación solar directa y mayor contacto con las corrientes de aire, presentan una capacidad de reducción de calor menor al de sistema de techumbres, sin embargo, obedecen la razón de que al existir un aumento en la difusividad térmica α del sistema, aumenta su capacidad de almacenar y restituir el calor, lo cual se refleja en el comportamiento sinusoidal de las cargas térmicas interiores al alcanzar un amortiguamiento equilibrado a lo largo del día.
- Las temperaturas superficiales alcanzadas en cada sistema analizado también dependen de sus características respecto a su orientación, debido a que factores como la incidencia y dirección del viento y la cantidad de área sombreada según la hora del día, precisan la cantidad de calor ganado en las superficies.
- Con respecto a la simulación en *Ansys Fluent*, se obtuvieron conductas muy similares en las temperaturas superficiales y en el comportamiento térmico del espacio interior de la habitación durante el análisis del 23 de mayo comparadas con las mediciones en la edificación estudiada, de esta manera se verificó la certeza del análisis numérico y se confirmó el software como una buena herramienta de diseño.
- A través del análisis realizado el 23 de diciembre, se predijo el comportamiento térmico del espacio interior de la edificación para el invierno, el cual fue aceptable dentro de los rangos de la ZCT local preestablecida, comprobándose así, la efectividad del chukum para la obtención de espacios térmicamente confortables y energéticamente eficientes.
- La característica que brinda *Ansys Fluent* para realizar análisis en estado transitorio permite observar el comportamiento de la ganancia térmica de la envolvente con mayor efectividad involucrando todo el rango de valores de las variables involucradas en el cálculo numérico.

RECOMENDACIONES

- Es conveniente considerar dentro de las NOM una metodología en estado transitorio en el cálculo para la obtención de ganancias térmicas en edificaciones, además de actualizar los materiales utilizados en los sistemas constructivos en las diferentes regiones del país.
- Se debe considerar el cumplimiento obligatorio, o al menos con mayor rigor, de las NMX referentes al confort térmico y los requerimientos ambientales mínimos en edificaciones para que exista una conservación real del medio ambiente en las distintas regiones de México.
- Es necesario corroborar la correcta aplicación de los subsidios y, por ende, la factibilidad en el transcurso de la vida útil de la vivienda que implican los programas implementados por el gobierno como lo son la NAMA de Vivienda Sustentable, Hipoteca Verde y Vida Integral Infonavit.
- Es pertinente realizar los ensayos de densidad y calor específico del chukum basados en las normas ASTM C1185-99 y ASTM C351-92 respectivamente, para obtener estas propiedades bajo los criterios correspondientes.
- Respecto a la edificación estudiada en este trabajo, es recomendable implementar algún otro sistema pasivo de acondicionamiento de aire al menos en esa habitación en específico en la época más crítica del año de acuerdo con el análisis en *Ansys Fluent*, debido a que la temperatura interior del espacio no se encontró dentro de la ZCT local esperada en la mayor parte del día para esa fecha.
- Para obtener una simulación en *Ansys Fluent* más efectiva, se recomienda optimizar la malla y tener mediciones más específicas que puedan servir como condiciones de frontera en todo el rango del cálculo transitorio.
- Es recomendable introducir un análisis que involucren las variables de índice de masa corporal, edad, tipo de ropa y tipo de actividad, debido a que el confort térmico está relacionado directamente con ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abilia. (2020). *12 normas y certificaciones de edificación sustentable en México*. <http://conciencia-sustentable.abilia.mx/12-normas-certificaciones-sustentable-mexico/>
- Aguayo, O. (2016). *Lagenaria siceraria una posibilidad para compuestos de origen orgánico energéticamente eficientes*. Universidad de Quintana Roo.
- ANSYS FLUENT 13. (2013). *Ansys Fluent Theory Guide*. ANSYS Inc., USA, 15317(November), 724–746.
- ANSYS, I. (2007). *Tutorial: Using Solar Load Model for Indoor Ventilation* (pp. 1–18). <https://es.scribd.com/doc/150516854/Tutorial-Using-Solar-Load-Model-for-Indoor-Ventilation>
- Bárceñas, J. (2007). *Análisis comparativo del efecto de la radiación solar, entre materiales polifásicos con fibras orgánicas y materiales asfálticos y elastoméricos* (Issue November 2007). Universidad de Quintana Roo.
- Barrios, G., Huelsz, G., & Rojas, J. (2012). Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms. *Applied Thermal Engineering*, 40, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.051>
- Bojórquez, I., Castillo, S., Flores, F., & Hernández, J. (2010). Criterios para el diseño térmico de techumbres en climas cálido-húmedos, a partir de materiales locales. *Palapa*, 5(2), 27–38.
- Bojórquez, I., Castillo, S., & Moen, M. (2010). Propiedades térmicas de maderas tropicales utilizadas en la vivienda. *XXXIV Semana Nacional de Energía Solar 2010*, 1–6.
- Bojórquez, I., Romero, V., & Aguayo, O. (2017). Correlación entre niveles de insatisfacción térmica en espacios y comportamientos térmicos de materiales empleados en la vivienda. *XLI Semana Nacional de Energía Solar 2017*, 61–68.
- Borbón, A. C., Kaplan, M., Burgos, D., & Ramírez, M. (2017). Estudio termofísico de morteros aligerados con perlita preexpandida. *XLI Semana Nacional de Energía Solar 2017*.
- BRE. (2020). *BREEAM. Helping create sustainable real estate around the world*. <https://www.bregroup.com/products/breeam/>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2014). *Termodinámica* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. (1st ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Cengel, Y., & Gajhar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Cerdá, E. (2018). Cambio Climático y Energía: Una visión a nivel global. *Papeles de Europa*, 31(1), 1–17. <https://doi.org/10.5209/PADE.61486>
- CONAGUA. (2017). Reporte del Clima en México. In *Reporte Anual 2017*. Servicio Meteorológico Nacional. <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>

- CONAVI. (2006). *Uso eficiente de la energía en la vivienda* (1st ed., Vol. 53, Issue 9).
- CONAVI. (2013). *NAMA apoyada para la Vivienda Sustentable en México-Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros*.
<https://www.conavi.gob.mx/gobmx/viviendasustentable/>
- CONAVI. (2019). *Programa de Vivienda Social-PVS S177*.
<https://www.gob.mx/conavi/acciones-y-programas/s177-programa-de-vivienda-social-pvs>
- Díaz, A., Ojeda, J., & Esparza, C. (2017). Mejoramiento del comportamiento térmico de un modelo de vivienda de interés social en clima cálido subhúmedo por variaciones en su orientación. *XLI Semana Nacional de Energía Solar 2017*, 105–110.
<https://anes.org.mx/index.php/memorias/>
- EarthCheck. (2020). *Bueno para los negocios. Bueno para el planeta*. <https://es.earthcheck.org/>
- García, C. (2019). *CHUKUM, HERENCIA MAYA — Areia Realty*.
<https://www.areiarealty.com/blog-1/2019/2/28/chukum-herencia-maya>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. In *Instituto de Geografía-UNAM*. Instituto de Geografía-UNAM.
- García, J., & Anais, E. (2018). Caracterización de sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto en un clima cálido húmedo. *XLII Semana Nacional de Energía Solar 2018*, 47–52. <https://anes.org.mx/index.php/memorias/>
- García, J., & Fuentes, V. (2005). *Viento y Arquitectura: el viento como factor de diseño arquitectónico* (3rd ed.). Trillas.
- Ley Federal sobre Metrología y Normalización, Diario Oficial de la Federación, México, D.F., 1 de julio de 1992 (1992).
- Ley de Vivienda, Diario Oficial de la Federación, México, D. F., 27 de junio de 2006 (2006).
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LViv_230617.pdf
- Ley de Vivienda del Estado de Quintana Roo, (2011).
<https://www.congresoqroo.gob.mx/leyes/59/>
- Holman, J. P. (1988). *Métodos experimentales para ingenieros*. McGraw-Hill Education.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4th ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.
- INFONAVIT. (2016). *Descripción operativa de los atributos de la vivienda sustentable*.
<https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/2f32bac8-ee68-4e65-a19b-4fd8662ca0c6/AtributosViviendaSustentable+%281%29.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mmCMhqv>
- INFONAVIT. (2020a). *MANUAL EXPLICATIVO DE LA VIVIENDA ECOLÓGICA 2020*. INFONAVIT. https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/bfe5a064-769e-4b8d-b1ff-70e81d3e2320/Manual_Explicativo_Vivienda_Ecologica.pdf?MOD=AJPERES&CVID=

m.Ju2Y4

- INFONAVIT. (2020b). *Programa del Infonavit para Desarrolladores*. https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/portal/infonavit.web/proveedores-externos/para-tu-gestion/desarrolladores/programa-desarrolladores!/ut/p/z1/pZF4C4JQEIV_SwuXOaPGxdppmCnSA5JsNqFhN0G9YZb177PHrroFzW6G75w5wwBBBFTGp4zHdSbKOG_7FbE1cxHHw542cX3UcT61F7NQt40g0
- International Code Council, & CASEDI. (2016). *Código de Conservación de Energía para las Edificaciones en México (IECC-México)*. CASEDI.
- Morales, J., Ortega, A., López, R., & Canseco, M. (2010). Comparación del desempeño térmico de una techumbre tradicional vs. una techumbre con cubierta verde. *XXXIV Semana Nacional de Energía Solar 2010*.
- Oropeza, I. (2017). Método simplificado para el diseño de un sistema de control solar exterior de acuerdo a su ángulo de inclinación y a la elevación solar. *XLI Semana Nacional de Energía Solar 2017*, 151–155.
- Oropeza, I. (2019). Uso de superficies de doble y triple vidriado para confort térmico, lumínico y acústico en condiciones de clima cálido. *XLIII Semana Nacional de Energía Solar 2019*, 15–21. <https://anes.org.mx/index.php/memorias/>
- Patankar, S. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow* (1st ed.). Hemisphere Publishing Corporation.
- Rosas-Flores, J. A. (2017). Elements for the development of public policies in the residential sector of Mexico based in the Energy Reform and the Energy Transition law. *Energy Policy*, 104(January), 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.015>
- Roux-Gutiérrez, R. (2018). Bahareque y su Inercia Térmica para muros de viviendas de Interés Social. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 23, 1–16. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477954382024>
- Secretaría de Economía. (2012). *NMX-AA-157-SCFI-2012. Requisitos y especificaciones de sustentabilidad para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y abandono del sitio de desarrollos inmobiliarios turísticos en la zona costera de la Península de Yucatán*.
- Secretaría de Economía. (2013). *NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación sustentable-Criterios y requerimientos ambientales mínimos*.
- Secretaría de Economía. (2014). *NMX-AA-171-SCFI-2014. Requisitos y especificaciones de desempeño ambiental de establecimientos de hospedaje*.
- Secretaría de Energía. (2018a). Balance Nacional de Energía 2017. In *Primera Edición, 2018*. <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>
- Secretaría de Energía. (2018b). *Reporte Anual del Potencial de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero en el Sector Eléctrico*.
- Secretaría de Energía. (2019). Balance Nacional de Energía 2018. In *Primera Edición, 2019*. <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2018>

SEDATU, & CONAVI. (2020, February 4). *Reglas de Operación del Programa de Vivienda Social*.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/531571/ROP_PVS_2020_02_04_.pdf

Trujillo, R., Ranger, Y., & Castañeda, G. (2015). Desempeño térmico del techo verde, una alternativa viable para la edificación, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 18, 103–113.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947306007>

U.S. Green Building Council. (2020). *LEED rating system*. <https://www.usgbc.org/leed>

ANEXOS

ANEXO 1. Temperatura media anual periodo 2005-2019 del observatorio meteorológico de la CONAGUA en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2005	24.2	25.6	28.1	28.6	30.0	29.6	30.0	30.1	29.6	27.8	26.0	25.7	27.9
2006	24.9	24.3	27.3	28.4	28.4	28.1	28.3	29.5	29.5	27.6	25.0	24.9	27.2
2007	25.3	25.5	26.4	28.0	28.6	28.6	30.0	29.1	28.6	26.9	25.1	25.3	27.3
2008	24.4	26.1	26.0	27.7	29.1	28.1	28.8	30.0	28.9	26.0	23.8	25.3	27.0
2009	24.7	25.8	26.8	28.9	29.8	28.8	29.8	29.5	29.4	28.6	25.1	25.9	27.8
2010	23.1	24.6	24.9	28.4	29.0	30.0	29.0	29.7	28.4	26.9	25.5	23.0	26.9
2011	24.7	25.1	26.4	28.7	29.6	29.0	28.8	29.3	29.0	26.6	25.3	24.4	27.2
2012	25.0	25.7	26.9	28.1	28.6	28.6	28.8	29.0	29.4	26.9	25.3	25.8	27.3
2013	25.4	26.4	26.0	28.7	29.3	29.1	28.6	28.8	28.1	28.2	25.8	25.7	27.5
2014	23.9	26.8	28.1	29.0	28.5	29.4	30.0	30.6	28.4	28.1	25.1	25.1	27.8
2015	24.7	25.1	27.8	29.2	29.6	28.6	30.2	30.7	29.5	28.6	27.3	27.4	28.2
2016	24.5	24.7	28.0	29.5	30.1	29.3	30.2	29.9	29.9	28.2	26.2	27.0	28.1
2017	25.5	27.1	27.0	28.9	29.7	29.5	30.0	29.9	29.9	27.1	25.0	25.1	27.9
2018	23.2	26.5	26.9	28.3	29.0	29.0	29.5	29.2	29.0	28.2	26.8	25.5	27.6
2019	24.0	27.0	27.3	28.5	30.0	29.8	30.3	30.5	29.5	29.0	26.1	*	28.4

* Sin datos

Mínimo	23.1	24.3	24.9	27.7	28.4	28.1	28.3	28.8	28.1	26.0	23.8	23.0	26.9
Máximo	25.5	27.1	28.1	29.5	30.1	30.0	30.3	30.7	29.9	29.0	27.3	27.4	28.4
Medio	24.5	25.8	26.9	28.6	29.3	29.0	29.5	29.7	29.1	27.6	25.6	25.4	27.6

ANEXO 2. Registro de temperaturas de las superficies de los especímenes de chukum.
Ensayo conductímetro a 20 V.

Datos de los 16 canales del TermoPar SR630					
Hora	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
Fecha y Hora de inicio de las mediciones					
26/03/2019 12:26	27	30.3	30.7	27.2	24.8
26/03/2019 12:41	27.3	30.9	31.1	27.4	25.2
26/03/2019 12:56	27.6	31.1	31.4	27.8	25.4
26/03/2019 13:11	27.8	31.4	31.7	27.9	25.2
26/03/2019 13:26	27.6	31.5	31.8	27.8	24.7
26/03/2019 13:41	27.2	31.4	31.7	27.4	24
26/03/2019 13:56	27	31.1	31.4	27.1	24.4
26/03/2019 14:11	27.3	31	31.3	27.4	25.3
26/03/2019 14:26	27.9	31.5	31.8	28	25.7
26/03/2019 14:41	28.1	31.7	32	28.1	25.7
26/03/2019 14:56	28.1	31.9	32.1	28.2	25.7
26/03/2019 15:11	28.2	31.9	32.2	28.3	26
26/03/2019 15:26	28.4	32	32.3	28.5	26.1
26/03/2019 15:41	28.6	32.2	32.4	28.7	26.2
26/03/2019 15:57	28.8	32.5	32.7	28.8	26.3
26/03/2019 16:12	28.9	32.6	32.8	28.9	26.4
26/03/2019 16:27	28.9	32.6	32.9	29	26.4
26/03/2019 16:42	29	32.9	33	29.1	26.5
26/03/2019 16:57	28.9	32.8	33	29	26.2
26/03/2019 17:12	29.1	32.9	33.2	29.2	26.4
26/03/2019 17:27	29	32.9	33.2	29.1	26.5
26/03/2019 17:42	29.1	32.9	33.2	29.2	26.5
26/03/2019 17:57	29.2	33.1	33.3	29.3	26.6

Ensayo conductímetro a 25 V.

Datos de los 16 canales del TermoPar SR630					
Hora	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
Fecha y Hora de inicio de las mediciones					
27/03/2019 10:41	27.4	27.8	27.8	27.5	27.2
27/03/2019 10:57	28.3	31.5	31.8	28.4	27.2
27/03/2019 11:12	29.4	33.7	34	29.4	27.2
27/03/2019 11:27	30	34.9	35.3	30.1	27.2
27/03/2019 11:42	30.3	35.7	36	30.4	27.1
27/03/2019 11:57	30.6	36.2	36.6	30.7	27.2
27/03/2019 12:12	30.7	36.5	36.9	30.8	27
27/03/2019 12:27	30.7	36.7	37.1	30.9	27
27/03/2019 12:42	30.7	36.7	37.1	31	26.9
27/03/2019 12:57	30.8	36.8	37.2	31	27
27/03/2019 13:12	30.8	36.9	37.3	30.9	26.9
27/03/2019 13:27	30.8	37	37.4	30.9	26.3
27/03/2019 13:42	30.3	36.8	37.2	30.4	25.6
27/03/2019 13:57	30.1	36.5	36.9	30.1	25.5
27/03/2019 14:12	29.6	36.1	36.5	29.7	24.9
27/03/2019 14:27	29.2	35.7	36.2	29.4	24.8
27/03/2019 14:42	29.2	35.5	36	29.3	24.8
27/03/2019 14:57	28.8	35.2	35.6	29	24.5
27/03/2019 15:12	28.7	35	35.4	28.8	24.4
27/03/2019 15:27	28.7	34.8	35.2	28.9	25.1
27/03/2019 15:42	29.2	35	35.4	29.3	25.6
27/03/2019 15:57	29.4	35.2	35.5	29.5	26
27/03/2019 16:12	29.7	35.5	35.8	29.8	26.1

Ensayo conductímetro a 30 V.

Datos de los 16 canales del TermoPar SR630					
Hora	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
Fecha y Hora de inicio de las mediciones					
28/03/2019 11:13	26.5	26.7	26.7	26.5	26.3
28/03/2019 11:29	28	32.4	32.8	28	26.4
28/03/2019 11:44	29.2	35.4	35.9	29.4	26.1
28/03/2019 11:59	30.1	37.2	37.7	30.2	26.1
28/03/2019 12:14	30.5	38.1	38.7	30.6	26
28/03/2019 12:29	30.8	38.8	39.4	31.1	26.1
28/03/2019 12:44	31.1	39.3	39.9	31.3	26.2
28/03/2019 12:59	31.4	39.8	40.2	31.5	26.1
28/03/2019 13:14	31.3	40	40.6	31.5	25.8
28/03/2019 13:29	31.1	40.1	40.7	31.5	25.6
28/03/2019 13:44	31	40	40.7	31.3	25.4
28/03/2019 13:59	30.8	39.9	40.5	31.1	25.2
28/03/2019 14:14	30.6	39.8	40.3	31	25
28/03/2019 14:29	30.6	39.6	40.2	30.9	25.3
28/03/2019 14:44	31.1	39.7	40.3	31.3	25.9
28/03/2019 14:59	31.5	40	40.5	31.6	26.1
28/03/2019 15:14	31.8	40.2	40.8	31.9	26.5
28/03/2019 15:29	32.1	40.6	41.1	32.1	26.5
28/03/2019 15:44	31.9	40.6	41.1	32	26.4
28/03/2019 15:59	32.1	40.7	41.3	32.2	26.5
28/03/2019 16:14	32.1	40.8	41.4	32.2	26.5
28/03/2019 16:29	32.1	40.9	41.4	32.2	26.4
28/03/2019 16:44	32	40.8	41.4	32.2	26.4

Ensayo conductímetro a 35 V.

Datos de los 16 canales del TermoPar SR630					
Hora	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
Fecha y Hora de inicio de las mediciones					
29/03/2019 12:36	32.3	43.2	44	32.5	26
29/03/2019 12:52	32.9	44	44.8	33	26
29/03/2019 13:07	33.3	44.6	45.4	33.4	26
29/03/2019 13:22	33.3	44.8	45.5	33.5	26.4
29/03/2019 13:37	33.6	45.2	46	33.8	26.2
29/03/2019 13:52	34	45.5	46.2	34	26.5
29/03/2019 14:07	34	45.6	46.3	34	26.7
29/03/2019 14:22	34.1	45.8	46.6	34.1	26.6
29/03/2019 14:37	34.3	46	46.8	34.3	26.5
29/03/2019 14:52	34.2	46	46.8	34.3	26.5
29/03/2019 15:07	34.2	46	46.8	34.3	26.5
29/03/2019 15:22	34.1	46.1	46.8	34.3	26.5
29/03/2019 15:37	34.2	46	46.8	34.3	26.5

ANEXO 3. Corridas de registro de temperaturas de los especímenes en estado estable.

Corrida 1.

CORRIDA 1									
FECHA: 26/03/19									
Hora inicial:		12:27							
Hora final:		17:12							
Duración [min]		286							
			ESPECÍMEN 1		ESPECÍMEN 2		TEMP. AMB.	T. media esp. 1	T. media esp. 2
Voltaje	Intensidad	Hora	SUP. EXT.	SUP. INT.	SUP. INT.	SUP. EXT.			
[V]	[A]		T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	[°C]	[°C]
20.25	0.19	17:12	29.1	32.9	33.2	29.2	26.4	31	31.2
20.25	0.19	17:27	29	32.9	33.2	29.1	26.5	30.95	31.15
20.26	0.19	17:42	29.1	32.9	33.2	29.2	26.5	31	31.2
20.27	0.19	17:57	29.2	33.1	33.3	29.3	26.6	31.15	31.3
20.2575	0.19	T. prom.	29.1	32.95	33.225	29.2	26.5		

dT1	3.85	dT2	4.025
$\Delta T1 + \Delta T2$	7.875		

Corrida 2.

CORRIDA 2			ESPECÍMEN 1		ESPECÍMEN 2		TEMP. AMB.	T. media esp. 1	T. media esp. 2
Voltaje	Intensidad	Hora	SUP. EXT.	SUP. INT.	SUP. INT.	SUP. EXT.			
[V]	[A]		T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	[°C]	[°C]
25.41	0.25	12:27	30.7	36.7	37.1	30.9	27	33.7	34
25.38	0.25	12:42	30.7	36.7	37.1	31	26.9	33.7	34.05
25.39	0.25	12:57	30.8	36.8	37.2	31	27	33.8	34.1
25.39	0.25	13:12	30.8	36.9	37.3	30.9	26.9	33.85	34.1
25.3925	0.25	T. prom.	30.75	36.775	37.175	30.95	26.95		

dT1	6.025	dT2	6.225
$\Delta T1 + \Delta T2$	12.25		

Corrida 3.

CORRIDA 3			ESPECÍMEN 1		ESPECÍMEN 2		TEMP. AMB.	T. media esp. 1	T. media esp. 2
Voltaje	Intensidad	Hora	SUP. EXT.	SUP. INT.	SUP. INT.	SUP. EXT.			
[V]	[A]		T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	[°C]	[°C]
30.59	0.3	15:59	32.1	40.7	41.3	32.2	26.5	36.4	36.75
30.56	0.3	16:14	32.1	40.8	41.4	32.2	26.5	36.45	36.8
30.55	0.3	16:29	32.1	40.9	41.4	32.2	26.4	36.5	36.8
30.54	0.3	16:44	32	40.8	41.4	32.2	26.4	36.4	36.8
30.56	0.3	T. prom.	32.075	40.8	41.375	32.2	26.45		

dT1	8.725	dT2	9.175
$\Delta T1 + \Delta T2$	17.9		

Corrida 4.

CORRIDA 4			ESPECÍMEN 1		ESPECÍMEN 2		TEMP. AMB.	T. media esp. 1	T. media esp. 2
Voltaje	Intensidad	Hora	SUP. EXT.	SUP. INT.	SUP. INT.	SUP. EXT.			
[V]	[A]		T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	[°C]	[°C]
35.53	0.35	14:37	34.3	46	46.8	34.3	26.5	40.15	40.55
35.53	0.35	14:52	34.2	46	46.8	34.3	26.5	40.1	40.55
35.53	0.35	15:07	34.2	46	46.8	34.3	26.5	40.1	40.55
35.52	0.35	15:22	34.1	46.1	46.8	34.3	26.5	40.1	40.55
35.5275	0.35	T. prom.	34.2	46.025	46.8	34.3	26.5		

dT1	11.825	dT2	12.5
$\Delta T1 + \Delta T2$	24.325		

ANEXO 4. Tabla resumen de corridas-ensayo de conductividad.

CORRIDA	I [A]	V [V]	Q _{punto} [W]	L ₁ +L ₂ [m]	Área [m ²]	m ₁ +m ₂ [kg]	ΔT ₁ +ΔT ₂	T. amb. prom. [°C]	Conductividad térmica k [W/m °C]
1	0.19	20.2575	3.84892	0.0516	0.01906	1.49	7.875	26.5	0.66145
2	0.25	25.3925	6.34812	0.0516	0.01906	1.49	12.25	26.95	0.70132
3	0.3	30.56	9.168	0.0516	0.01906	1.49	17.9	26.45	0.69315
4	0.35	35.5275	12.43462	0.0516	0.01906	1.49	24.325	26.5	0.69181
		Prom	7.94991			Prom	15.5875	MEDIANA	0.69248

ANEXO 5. Análisis de incertidumbre.

Porcentajes de incertidumbre asignados a las variables independientes del ensayo de conductividad.

Datos	Valor	Incertidumbre (w _n)
Q [W/m ²]	Variable	
dQ	0.10%	0.001
L ₁ +L ₂ [m]	0.0516	
dL	2%	0.02
A [m ²]	0.01906	
dA	2%	0.02
ΔT ₁ +ΔT ₂ [°C]	Variable	
d(ΔT ₁ +ΔT ₂)	1%	0.01

Derivadas parciales resueltas para las variables independientes del ensayo de conductividad.

$$k_{nom} = \frac{q (L_1 + L_2)}{2 A (\Delta T_1 + \Delta T_2)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial Q} = \frac{(L_1 + L_2)}{2 A (\Delta T_1 + \Delta T_2)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial (L_1 + L_2)} = \frac{q}{2 A (\Delta T_1 + \Delta T_2)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial A} = -\frac{1}{A^2} \cdot \frac{q (L_1 + L_2)}{2 (\Delta T_1 + \Delta T_2)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial (\Delta T_1 + \Delta T_2)} = -\frac{1}{(\Delta T_1 + \Delta T_2)^2} \cdot \frac{q (L_1 + L_2)}{2 A}$$

Cálculo de incertidumbre para cada corrida del ensayo de conductividad.

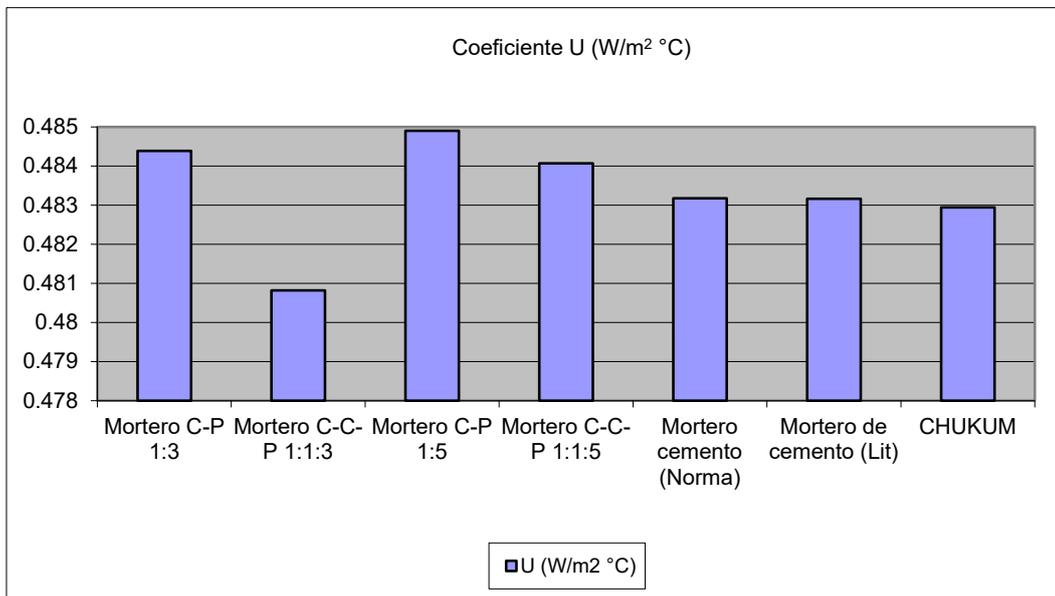
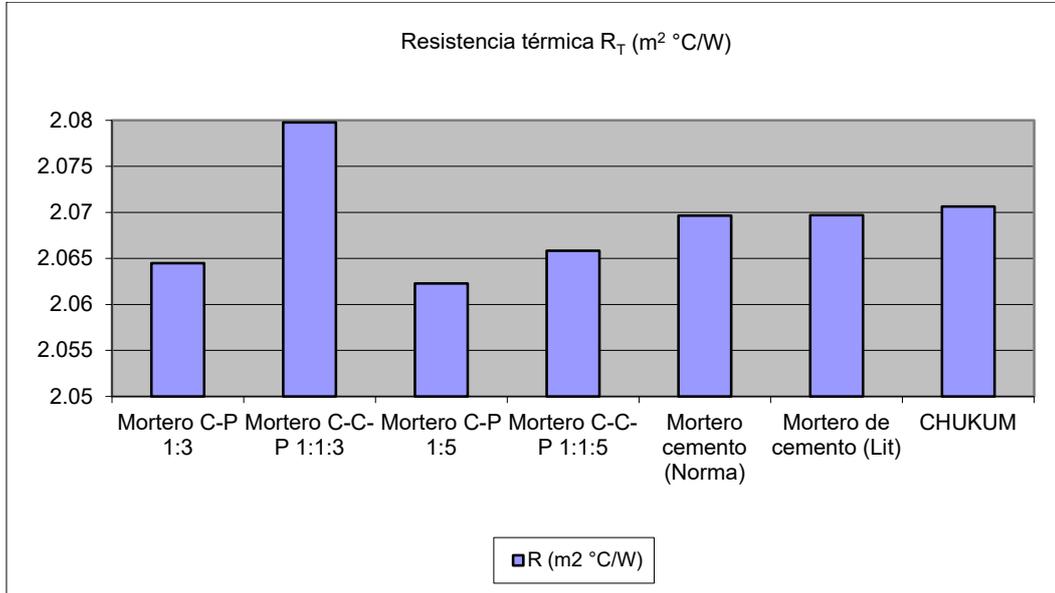
Corrida	I	V	Q	L ₁ +L ₂	A	ΔT ₁ +ΔT ₂	k _{nom}	∂k/∂Q	∂k/∂(L ₁ +L ₂)	∂k/∂A	∂k/∂(ΔT ₁ +ΔT ₂)	w _R [W/m °C]	w _R [%]
1	0.19	20.258	3.849	0.052	0.019	7.875	0.661	0.172	12.819	-34.697	-0.084	0.740	1.1184
2	0.25	25.393	6.348	0.052	0.019	12.250	0.701	0.110	13.592	-36.789	-0.057	0.784	1.1184
3	0.3	30.560	9.168	0.052	0.019	17.900	0.693	0.076	13.433	-36.360	-0.039	0.775	1.1184
4	0.35	35.528	12.435	0.052	0.019	24.325	0.692	0.056	13.407	-36.290	-0.028	0.774	1.1184

ANEXO 6. Propiedades térmicas de los materiales utilizados en el hotel Buenavista Bacalar y sus referencias bibliográficas.

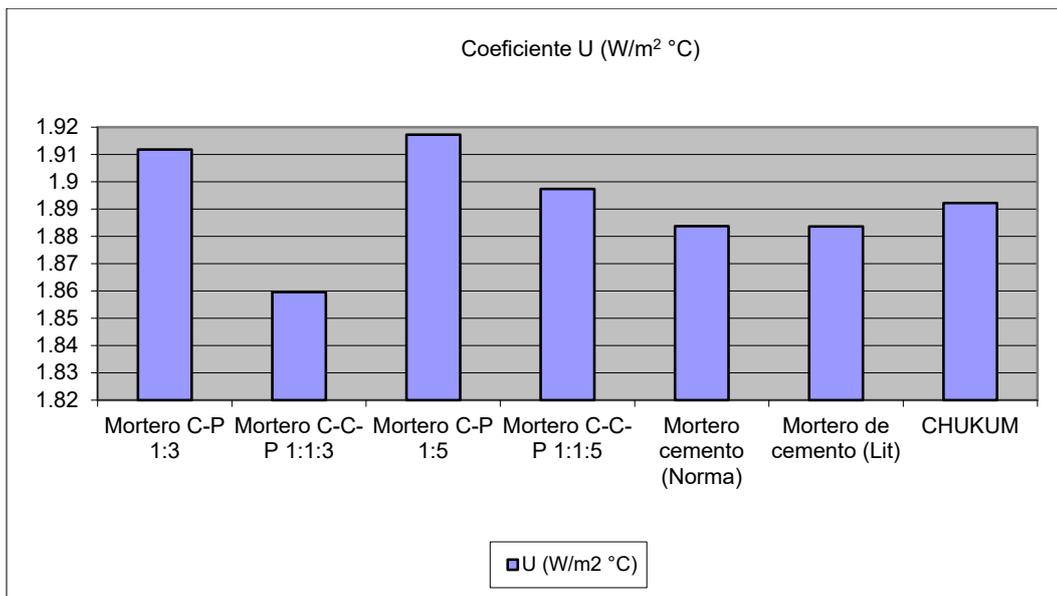
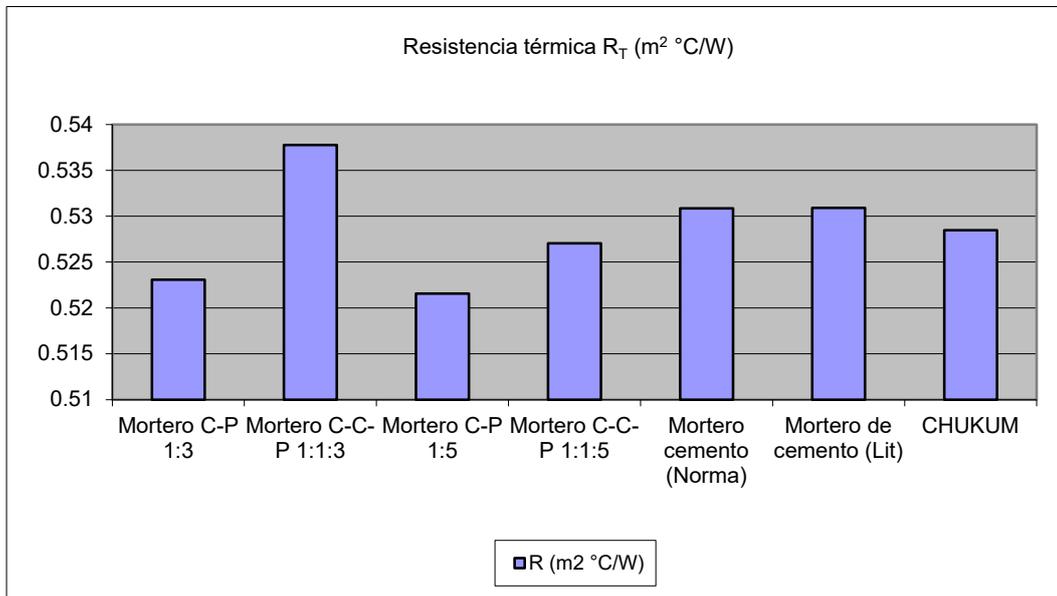
Referencia	Material	Conductividad térmica k [W/m °C]	Calor específico C_p [kJ/kg °C]	Densidad ρ [kg/m³]
Investigación propia	Chukum	0.62323	1.23226	1515.35198
Bojórquez, Castillo & Moen (2010)	Jabín	0.23011	1.04995	904
	Caoba	0.15977	1.71379	477
ASHRAE (2017) y Pérez, Cabanillas, Hinojosa & Borbón (2011)	Bloque de concreto (agregado de peso normal, 2 núcleos)	0.87719	0.92	2100
Bojórquez, Castillo, Flores & Hernández (2010)	Vigueta	2	---	---
	Bovedilla	0.63	---	---
	Aire sin ventilar	0.06428	---	---
Cengel & Gajhar (2011)	Concreto armado	1.74	0.88	2300
	Vidrio de sílice (vidrio común)	1.38	0.745	2220

ANEXO 7. Valores de R_T y U de morteros y sistemas de construcción.

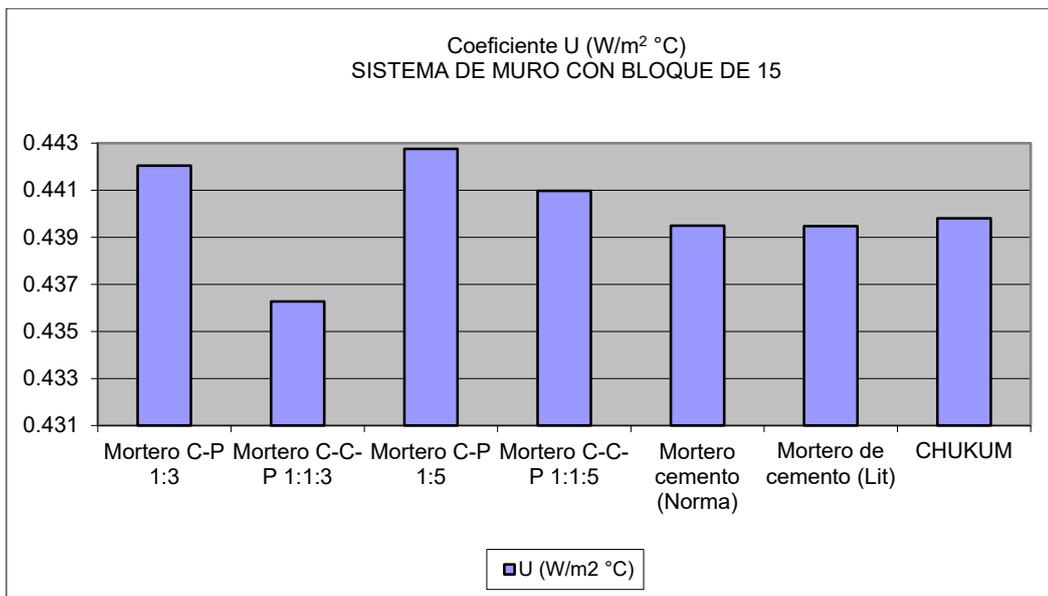
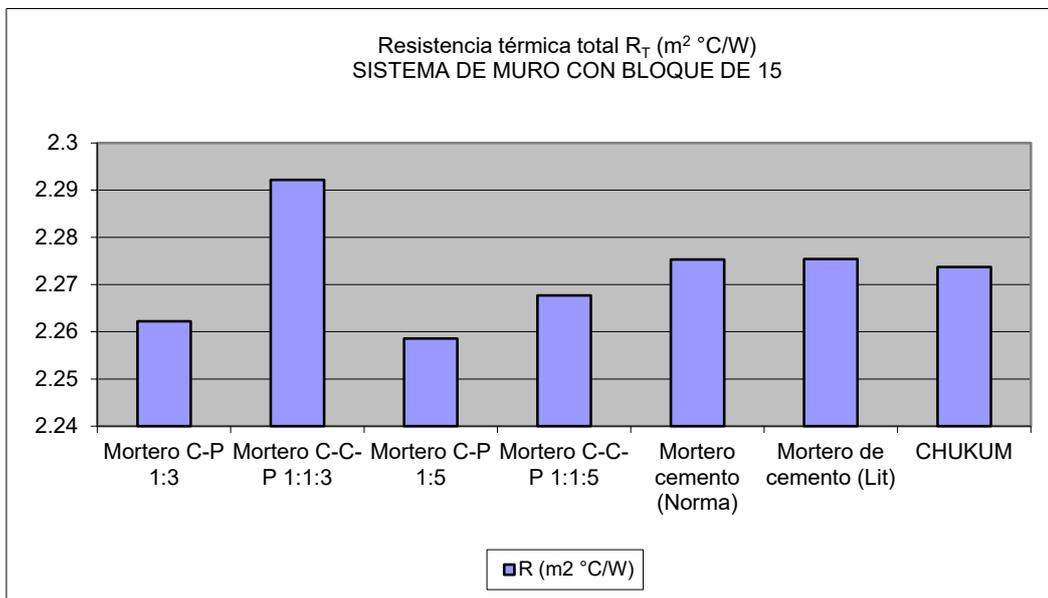
Morteros en superficies verticales:



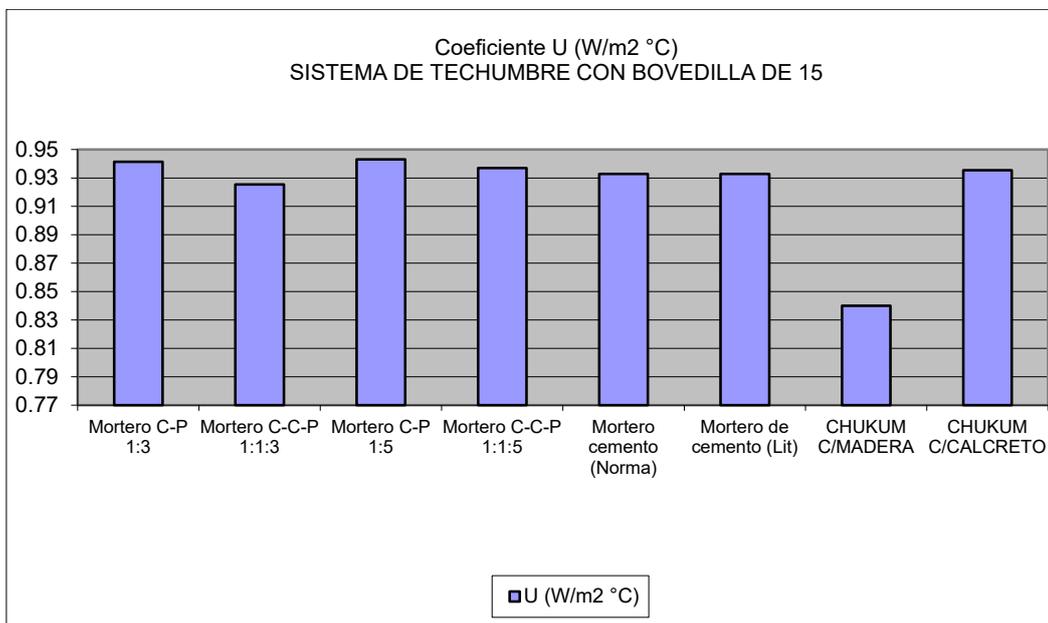
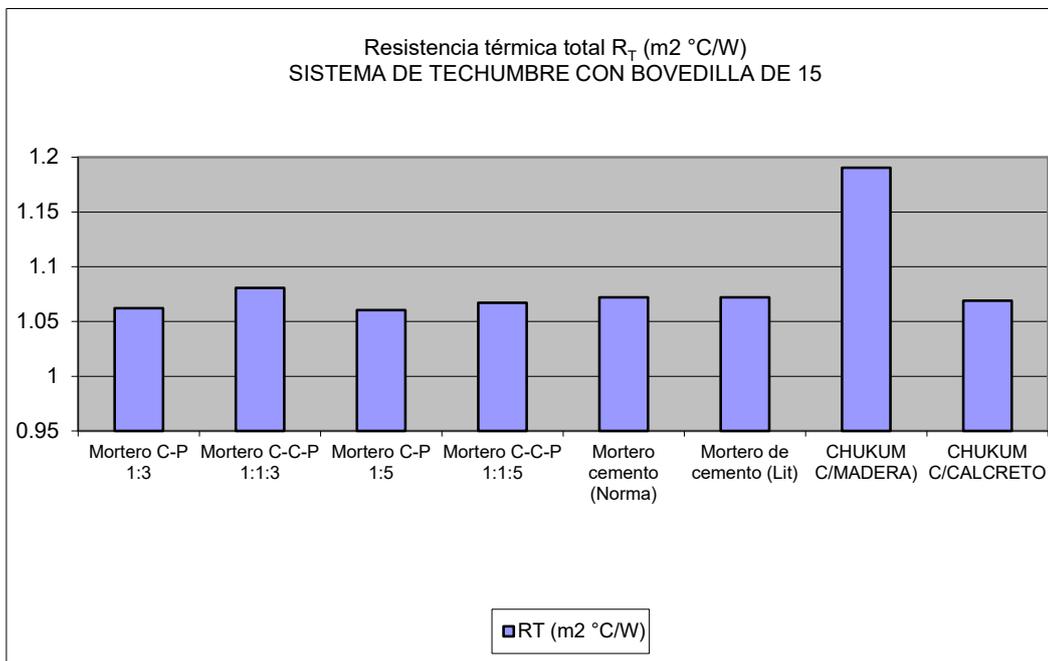
Morteros en superficies horizontales:



Sistemas de muros con diferentes morteros:



Sistemas de techumbres con diferentes morteros:



ANEXO 8.**Mediciones de HR y temperatura de la habitación.****MEDICIONES DE CONFORT
TÉRMICO**

UBICACIÓN: HOTEL BUENAVISTA
BACALAR (ESPACIO INT.)

EQUIPO: Higrotermómetro Digital
(THERMO HYGROMETER)

FECHA	HORA	TEMP. EXT. [°C]	TEMP. INT. [°C]	ZC mín.	ZC máx.	Dif. Temp. Ext-Int	HR EXT.	HR INT.	VEL. DE VIENTO EXT. [m/s]	VEL. DE VIENTO INT. [m/s]	DIRECCIÓN
22/05/2019	17:00	30.1	30.5	23.75	28.75	-0.4	72.1	64	0.6	0.1	NE
	18:00	29.8	30	23.75	28.75	-0.2	68.5	70.2	0.3	0.3	NE
	19:00	28.9	28.9	23.75	28.75	0	77.7	79	1.2	0	NE
	20:00	28.4	28.8	23.75	28.75	-0.4	78.9	79.3	0.2	0	NO
	21:00	28.4	28.6	23.75	28.75	-0.2	79.9	78.8	0	0	
	22:00	27.9	28	23.75	28.75	-0.1	82.9	84.4	0.1	0	NO
	23:00	28.1	28	23.75	28.75	0.1	81.5	84	0.1	0	NE
23/05/2019	00:00	27	27.6	23.75	28.75	-0.6	81.2	84	0	0	
	01:00	27.5	28.1	23.75	28.75	-0.6	82.9	82	0.3	0	NE
	02:00	26.5	27.1	23.75	28.75	-0.6	82.7	84.1	0	0	
	03:00	26.6	27	23.75	28.75	-0.4	85	86	0	0	
	04:00	26.3	26.5	23.75	28.75	-0.2	84.4	86.4	0	0	
	05:00	26.5	27.3	23.75	28.75	-0.8	82.8	81.6	0	0	
	06:00	26.2	26.3	23.75	28.75	-0.1	83	86.1	0	0	
	07:00	26.3	26.9	23.75	28.75	-0.6	82.7	84.5	0.4	0	SE
	08:00	30.9	30.7	23.75	28.75	0.2	70.1	68.9	1.3	0	NO
	09:00	29.4	31.8	23.75	28.75	-2.4	70.6	62.5	0.6	0.1	SE
	10:00	31.3	30.7	23.75	28.75	0.6	63.1	64.9	1.6	0.6	NE
	11:00	30.9	32.3	23.75	28.75	-1.4	64.9	59.6	0.8	0.1	NE
	12:00	32.1	32	23.75	28.75	0.1	61.1	60.8	1.1	0.2	E
	13:00	33	32.7	23.75	28.75	0.3	56.1	54.8	0.9	0.1	NE
	14:00	33.7	32.9	23.75	28.75	0.8	52.4	53.2	0.4	0.3	SE
	15:00	34.1	33.2	23.75	28.75	0.9	55.6	55.2	0.5	0.1	SE
	16:00	33.2	33.9	23.75	28.75	-0.7	58	57.1	0.7	0.1	NE

Mediciones de temperatura superficial en techumbre.

TEMPERATURA SUPERFICIAL TECHO				
FECHA	HORA	TEMP EXT [°C]	TEMP INT [°C]	ΔT [°C]
22/05/2019	17:00	36.2	32	4.2
	18:00	32.3	31.5	0.8
	19:00	27.3	31.8	-4.5
	20:00	26.8	31.2	-4.4
	21:00	26.1	30.9	-4.8
	22:00	26.3	31.2	-4.9
	23:00	26.1	31.2	-5.1
23/05/2019	00:00	25.1	31.2	-6.1
	01:00	25.7	30.6	-4.9
	02:00	24.6	30.4	-5.8
	03:00	25	30.4	-5.4
	04:00	23.7	30.1	-6.4
	05:00	24.4	30	-5.6
	06:00	23.9	29.8	-5.9
	07:00	26	29.3	-3.3
	08:00	32.8	29.7	3.1
	09:00	34.3	29.6	4.7
	10:00	49	30.2	18.8
	11:00	52.7	30.5	22.2
	12:00	57.1	31.1	26
	13:00	60.4	31.3	29.1
	14:00	57.7	31.7	26
	15:00	57.3	31.2	26.1
	16:00	56.9	31	25.9
PROM		35.7375	30.74583333	4.99166667
ΔT_{prom}		4.99166667		

Mediciones de temperatura superficial en muro oeste.

TEMPERATURA SUPERFICIAL MURO OESTE				
FECHA	HORA	TEMP EXT [°C]	TEMP INT [°C]	ΔT [°C]
22/05/2019	17:00	31.5	31.1	0.4
	18:00	31.8	31.2	0.6
	19:00	29	30.8	-1.8
	20:00	28.9	30.6	-1.7
	21:00	28.6	29.1	-0.5
	22:00	28.1	30.4	-2.3
	23:00	27.2	28.8	-1.6
23/05/2019	00:00	27.8	30.2	-2.4
	01:00	26.6	29.7	-3.1
	02:00	26.8	29.7	-2.9
	03:00	25.8	29.5	-3.7
	04:00	26.7	29.4	-2.7
	05:00	25.3	28.2	-2.9
	06:00	26.2	28.6	-2.4
	07:00	26.6	28	-1.4
	08:00	29	29.1	-0.1
	09:00	29.4	29.3	0.1
	10:00	31.8	29.8	2
	11:00	35	30.5	4.5
	12:00	36	31	5
	13:00	39.1	33.4	5.7
	14:00	37.2	31.1	6.1
	15:00	36.2	33.8	2.4
	16:00	35.4	32.4	3
PROM		30.25	30.2375	0.0125
ΔT_{prom}		0.0125		

Mediciones de temperatura superficial en muro este.

TEMPERATURA SUPERFICIAL MURO ESTE				
FECHA	HORA	TEMP EXT [°C]	TEMP INT [°C]	ΔT [°C]
22/05/2019	17:00	31.5	32.1	-0.6
	18:00	31.1	31.4	-0.3
	19:00	29.8	31	-1.2
	20:00	29.7	31.1	-1.4
	21:00	29.3	30.5	-1.2
	22:00	29	30.3	-1.3
	23:00	28.7	30.4	-1.7
23/05/2019	00:00	28.2	29.9	-1.7
	01:00	28.1	30.2	-2.1
	02:00	27.8	29.3	-1.5
	03:00	28	29.4	-1.4
	04:00	27.4	29	-1.6
	05:00	27.8	29.9	-2.1
	06:00	26.8	28	-1.2
	07:00	27.1	28.4	-1.3
	08:00	29.7	28.6	1.1
	09:00	29.4	29.6	-0.2
	10:00	30.6	29.5	1.1
	11:00	32.2	29.7	2.5
	12:00	32.4	30.4	2
	13:00	33	30.4	2.6
	14:00	32.6	31	1.6
	15:00	32.4	31.2	1.2
	16:00	32	31.7	0.3
PROM		29.775	30.125	-0.35
ΔT_{prom}		0.35		

ANEXO 9. Resumen de cálculos analíticos de las propiedades de los sistemas constructivos.

SISTEMA TECHO PA

ΔT [°C]	Δt [s]	U_{techo} [W/m ² °C]	Q_{punto} [W]	Q [kJ]	$C_{p_{total}}$ [kJ/kg °C]	ρ_{total} [kg/m ³]	k_{techo} [W/m °C]
4.9917	86400	0.84009	93.43442	8072.73423	0.14151	2093.49812	0.20582

SISTEMA MURO

ΔT [°C]	Δt [s]	U_{muro} [W/m ² °C]	Q_{punto} [W]	Q [kJ]	$C_{p_{total}}$ [kJ/kg °C]	ρ_{total} [kg/m ³]	k_{muro} [W/m °C]
0.0125	86400	0.43981	0.06150	5.31371	0.10117	1976.91621	0.08356

SISTEMA PISO

ΔT [°C]	Δt [s]	U_{piso} [W/m ² °C]	Q_{punto} [W]	Q [kJ]	$C_{p_{total}}$ [kJ/kg °C]	ρ_{total} [kg/m ³]	k_{piso} [W/m °C]
6	86400	1.79468	239.92489	20729.51019	1.06712	2075.81485	0.12563

SISTEMA TECHO PB

ΔT [°C]	Δt [s]	U_{techo} [W/m ² °C]	Q_{punto} [W]	Q [kJ]	$C_{p_{total}}$ [kJ/kg °C]	ρ_{total} [kg/m ³]	k_{techo} [W/m °C]
4.9917	86400	0.93847	104.37622	9018.10569	0.15809	2093.49812	0.22523

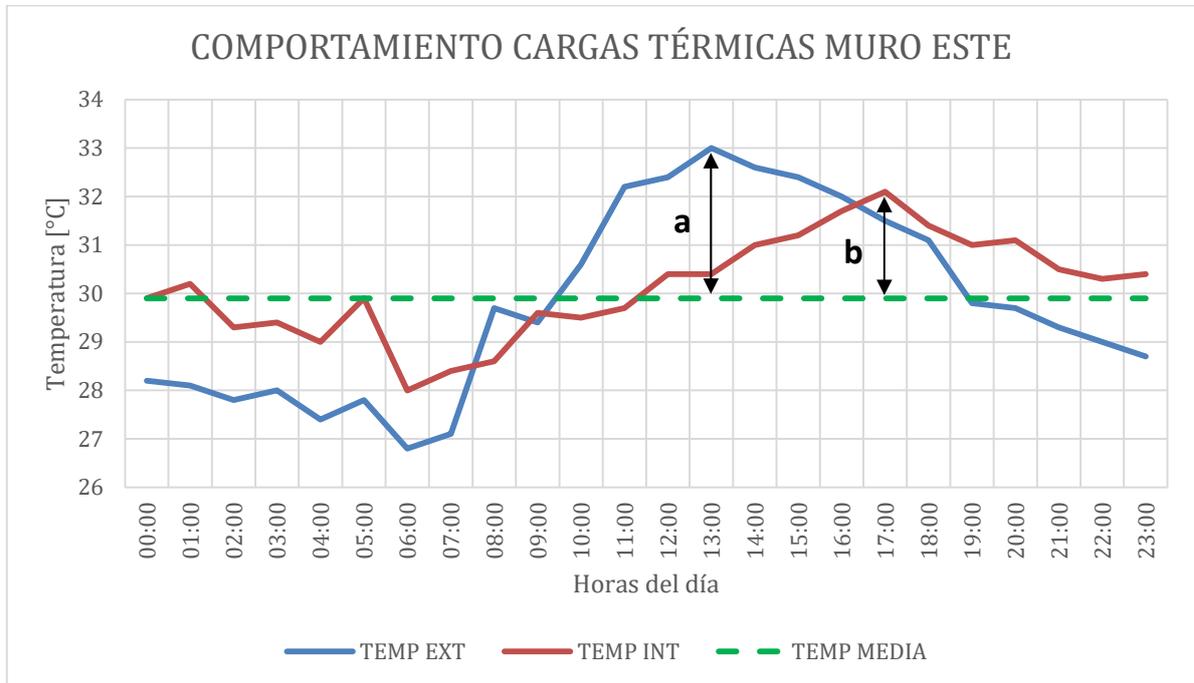
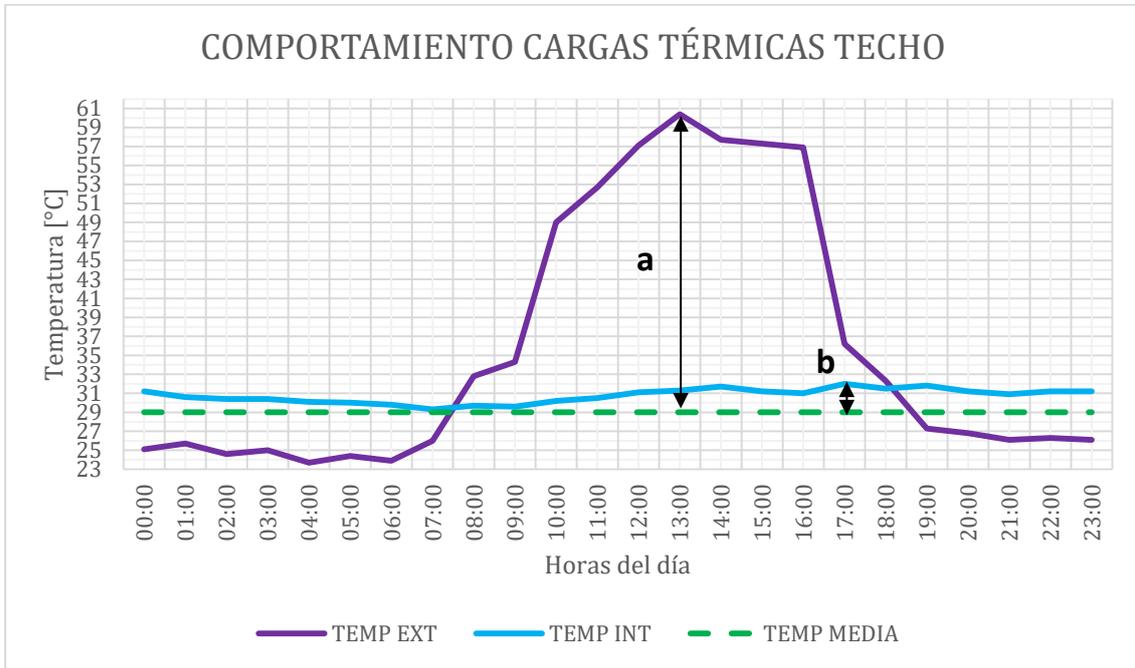
ANEXO 10. Registro de temperaturas superficiales para cálculo de retardo y amortiguamiento térmicos.

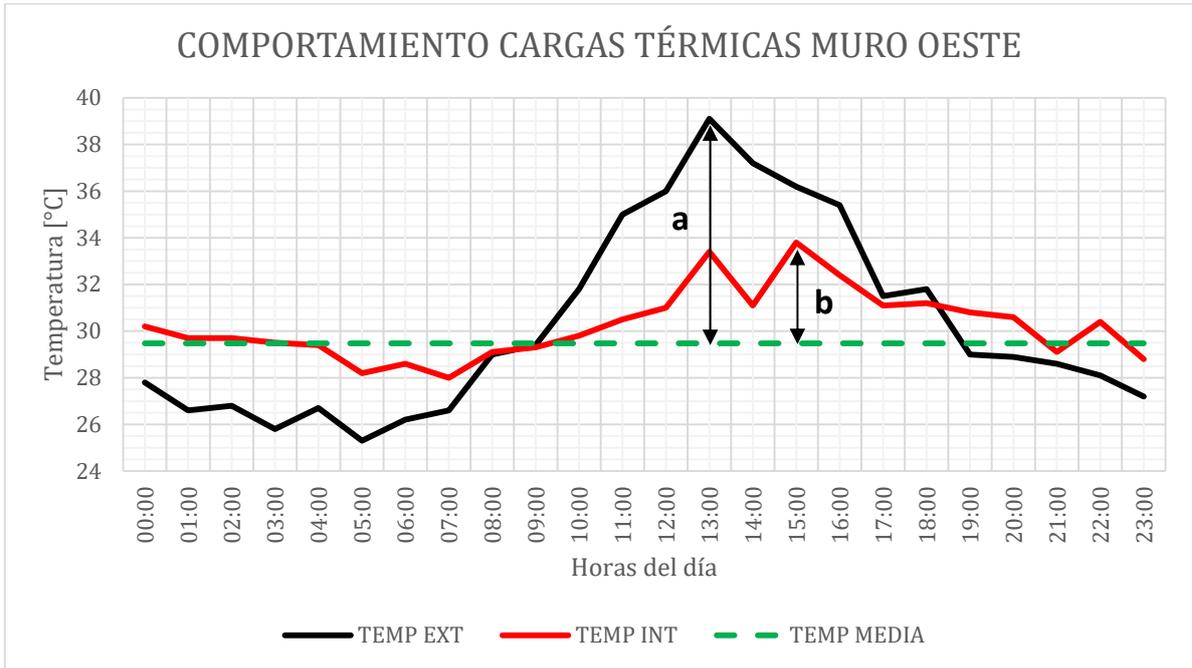
TEMPERATURA SUPERFICIAL TECHO				
HORA	TEMP EXT	TEMP INT	TEMP AMB	ΔT
00:00	25.1	31.2	27	-6.1
01:00	25.7	30.6	27.5	-4.9
02:00	24.6	30.4	26.5	-5.8
03:00	25	30.4	26.6	-5.4
04:00	23.7	30.1	26.3	-6.4
05:00	24.4	30	26.5	-5.6
06:00	23.9	29.8	26.2	-5.9
07:00	26	29.3	26.3	-3.3
08:00	32.8	29.7	30.9	3.1
09:00	34.3	29.6	29.4	4.7
10:00	49	30.2	31.3	18.8
11:00	52.7	30.5	30.9	22.2
12:00	57.1	31.1	32.1	26
13:00	60.4	31.3	33	29.1
14:00	57.7	31.7	33.7	26
15:00	57.3	31.2	34.1	26.1
16:00	56.9	31	33.2	25.9
17:00	36.2	32	30.1	4.2
18:00	32.3	31.5	29.8	0.8
19:00	27.3	31.8	28.9	-4.5
20:00	26.8	31.2	28.4	-4.4
21:00	26.1	30.9	28.4	-4.8
22:00	26.3	31.2	27.9	-4.9
23:00	26.1	31.2	28.1	-5.1
MEDIANA	27.05000	30.95000		4.991666667
TEMP MEDIA	29.00000			

TEMPERATURA SUPERFICIAL MURO ESTE				
HORA	TEMP EXT	TEMP INT	TEMP AMB	ΔT
00:00	28.2	29.9	27	-1.7
01:00	28.1	30.2	27.5	-2.1
02:00	27.8	29.3	26.5	-1.5
03:00	28	29.4	26.6	-1.4
04:00	27.4	29	26.3	-1.6
05:00	27.8	29.9	26.5	-2.1
06:00	26.8	28	26.2	-1.2
07:00	27.1	28.4	26.3	-1.3
08:00	29.7	28.6	30.9	1.1
09:00	29.4	29.6	29.4	-0.2
10:00	30.6	29.5	31.3	1.1
11:00	32.2	29.7	30.9	2.5
12:00	32.4	30.4	32.1	2
13:00	33	30.4	33	2.6
14:00	32.6	31	33.7	1.6
15:00	32.4	31.2	34.1	1.2
16:00	32	31.7	33.2	0.3
17:00	31.5	32.1	30.1	-0.6
18:00	31.1	31.4	29.8	-0.3
19:00	29.8	31	28.9	-1.2
20:00	29.7	31.1	28.4	-1.4
21:00	29.3	30.5	28.4	-1.2
22:00	29	30.3	27.9	-1.3
23:00	28.7	30.4	28.1	-1.7
MEDIANA	29.55	30.25		-0.35
TEMP MEDIA	29.9			

TEMPERATURA SUPERFICIAL MURO OESTE				
HORA	TEMP EXT	TEMP INT	TEMP AMB	ΔT
00:00	27.8	30.2	27	-2.4
01:00	26.6	29.7	27.5	-3.1
02:00	26.8	29.7	26.5	-2.9
03:00	25.8	29.5	26.6	-3.7
04:00	26.7	29.4	26.3	-2.7
05:00	25.3	28.2	26.5	-2.9
06:00	26.2	28.6	26.2	-2.4
07:00	26.6	28	26.3	-1.4
08:00	29	29.1	30.9	-0.1
09:00	29.4	29.3	29.4	0.1
10:00	31.8	29.8	31.3	2
11:00	35	30.5	30.9	4.5
12:00	36	31	32.1	5
13:00	39.1	33.4	33	5.7
14:00	37.2	31.1	33.7	6.1
15:00	36.2	33.8	34.1	2.4
16:00	35.4	32.4	33.2	3
17:00	31.5	31.1	30.1	0.4
18:00	31.8	31.2	29.8	0.6
19:00	29	30.8	28.9	-1.8
20:00	28.9	30.6	28.4	-1.7
21:00	28.6	29.1	28.4	-0.5
22:00	28.1	30.4	27.9	-2.3
23:00	27.2	28.8	28.1	-1.6
MEDIANA	28.95	30.00000		0.0125
TEMP MEDIA	29.47500			

ANEXO 11. Gráficas de cargas térmicas internas y externas de cada sistema y, valores *a* y *b* de amortiguamiento térmico.



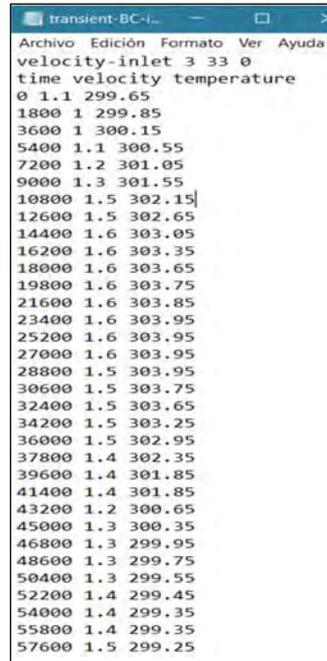


ANEXO 12. Tablas transitorias utilizadas en las condiciones de frontera.

Tablas utilizadas en la corrida del 23 de mayo:

- Velocity-inlet

Esta tabla incluyó valores de tiempo, velocidad y temperatura.



time	velocity	temperature
0	1.1	299.65
1800	1	299.85
3600	1	300.15
5400	1.1	300.55
7200	1.2	301.05
9000	1.3	301.55
10800	1.5	302.15
12600	1.5	302.65
14400	1.6	303.05
16200	1.6	303.35
18000	1.6	303.65
19800	1.6	303.75
21600	1.6	303.85
23400	1.6	303.95
25200	1.6	303.95
27000	1.6	303.95
28800	1.5	303.95
30600	1.5	303.75
32400	1.5	303.65
34200	1.5	303.25
36000	1.5	302.95
37800	1.4	302.35
39600	1.4	301.85
41400	1.4	301.85
43200	1.2	300.65
45000	1.3	300.35
46800	1.3	299.95
48600	1.3	299.75
50400	1.3	299.55
52200	1.4	299.45
54000	1.4	299.35
55800	1.4	299.35
57600	1.5	299.25

- Free Stream Temperature

La temperatura fue la misma para todas las superficies de la envolvente, por lo que únicamente cambió el nombre de la tabla para cada orientación en esta condición de frontera.

time	temperature
0	299.65
1800	299.85
3600	300.15
5400	300.55
7200	301.05
9000	301.55
10800	302.15
12600	302.65
14400	303.05
16200	303.35
18000	303.65
19800	303.75
21600	303.85
23400	303.95
25200	303.95
27000	303.95
28800	303.95
30600	303.75
32400	303.65
34200	303.25
36000	302.95
37800	302.35
39600	301.85
41400	301.85
43200	300.65
45000	300.35
46800	299.95
48600	299.75
50400	299.55
52200	299.45
54000	299.35
55800	299.35
57600	299.25

- External Radiation Temperature

La temperatura en esta condición de frontera varió según la orientación de la superficie, a continuación, se muestran las tablas transitorias para el muro este, muro oeste y el techo, respectivamente.

time	external_radiation_temp-muroEste	external_radiation_temp-muroOeste	external_radiation_temp-Techo
0	299.65	299.65	299.65
1800	299.85	299.85	299.85
3600	300.15	300.15	300.15
5400	310.187	300.55	300.55
7200	318.335	301.05	301.05
9000	321.787	301.55	305.95
10800	322.665	302.15	323.42
12600	321.646	302.65	337.30
14400	319.046	303.05	348.42
16200	314.958	303.35	357.26
18000	309.373	303.65	364.11
19800	301.965	303.75	369.17
21600	303.85	303.85	372.56
23400	303.95	303.95	374.36
25200	303.95	303.95	374.60
27000	303.95	303.95	373.29
28800	303.95	303.95	370.41
30600	303.75	307.28	365.88
32400	303.65	313.47	359.61
34200	303.25	317.962	351.43
36000	302.95	321.064	341.07
37800	302.35	322.534	328.13
39600	301.85	322.341	311.92
41400	301.85	320.1	301.85
43200	300.65	313.475	300.65
45000	300.35	300.35	300.35
46800	299.95	299.95	299.95
48600	299.75	299.75	299.75
50400	299.55	299.55	299.55
52200	299.45	299.45	299.45
54000	299.35	299.35	299.35
55800	299.35	299.35	299.35
57600	299.25	299.25	299.25

Nota: Las tablas transitorias utilizadas en la corrida del 23 de diciembre corresponden a los datos generados en el software SAM y los datos de irradiancia del *Solar Calculator* generados para esa fecha.