



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN MURO TROMBE EN
UNA VIVIENDA EN EL NORTE DE CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA

MARCO ANTONIO ZARCO TARQUE

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALVARO VALENCIA MUSALEM
RAMÓN FREDERICK GONZALEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
CONICYT-PCHA/MagisterNacional/2014 – 22140560

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE: Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica.

POR: Marco Antonio Zarco Tarque.

FECHA: 26 de Julio del 2017.

PROF. GUÍA: Williams Calderón Muñoz.

MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN MURO TROMBE EN UNA VIVIENDA EN EL NORTE DE CHILE

En este trabajo se presentan simulaciones numéricas de la distribución de temperatura y velocidades en una vivienda que utiliza un sistema de calefacción pasiva, Muro Trombe tipo *Escalonado*, con el objetivo de calefaccionar viviendas que se encuentran alejadas de la red eléctrica (SING).

Este diseño innovador se caracteriza por poseer muros de concreto (masa térmica) equispaciados a una cierta distancia para mejorar la captación de energía solar y así aumentar la eficiencia térmica de la habitación. Las dimensiones exteriores; 2.5 [m] de alto, 5 [m] y 7.5 [m] de largo, para la pared superior e inferior respectivamente. Estos forman un ángulo de 45° con la horizontal inferior, aumentando la captación solar de la pared vidriada y producir mayores gradientes de temperaturas y velocidades al interior de la habitación. Las simulaciones se realizaron con el método de volúmenes finitos utilizando el software comercial ANSYS Fluent 17.1. Implementando los modelos de turbulencia $k - \epsilon$ Standard y carga solar (solar load model), incluyendo el método de ordenadas discretas (DO), el cual modela superficies semitransparentes (vidrio) con espesores pequeños.

Se presenta una evaluación térmica del sistema utilizando los datos climáticos horarios para un día típico de invierno y verano en la localidad de Putre, Región de Arica y Parinacota. Se encontró que las temperaturas promedio en la habitación son de 20 [°C] y 30 [°C] para invierno y verano respectivamente. Se produce el fenómeno de capa limite hidrodinámica en la pared superior, alcanzando un valor de 0.1 [m] para el día más caluroso y 0.08 [m] para invierno. Esto se debe a la condición de no deslizamiento y a la viscosidad del fluido.

Durante el día más frío, la energía máxima almacenada por la masa térmica es de unos 1800 [KJ] y durante el día más cálido es de unos 2200 [KJ]. Esta energía se entrega desde las columnas de concreto al aire en la habitación durante periodos sin insolación. Para futuros trabajos se propone considerar más parámetros para describir el entorno urbano y realizar un modelo a escala real de una vivienda típica del norte Chileno.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis padres, hermano y pareja quienes han sido un pilar fundamental en este nuevo camino que he decidido seguir, gracias por sus consejos.

En segundo lugar agradezco a los profesores Williams Calderón, Álvaro Valencia y Ramón Frederick, los cuales fueron un apoyo constante y me brindaron una orientación crucial para poder encaminar la realización de esta Tesis de Magister.

Un abrazo para los compañeros y amigos que compartieron estos 2 años en el Departamento de Ingeniería Mecánica (DIMEC) de la Universidad de Chile. Gracias a todos.

Por último, a Conicyt, el cual financio en parte este proyecto.

CONICYT-PCHA/MagisterNacional/2014 – 22140560

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Sistemas de Calefacción Solar Pasivos	2
1.3.1 Muro Trombe	2
1.3.2 Muro Trombe Zigzag	3
1.3.3 Muro Trombe Transwall	4
1.3.4 Muro Trombe Fluidizado	4
1.3.5 Muro Trombe con Paneles Fotovoltaicos.....	5
1.4 Definición del Problema.....	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo General	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.5.3 Alcances	7
1.6 Resultados Esperados.....	7
2. Antecedentes	8
2.1 Antecedentes Preliminares	8
2.1.1 Radiación Solar	9
2.1.2 Sistemas de Captación Solar Pasivos	10
2.1.3 Captación Solar	11
2.1.4 Principios de Funcionamiento de un Muro Trombe.....	12
2.2 Intercambio Energético en Viviendas	13
2.2.1 Ventilación o Renovación de Aire	13
2.2.2 Pérdidas y Ganancias de Calor	13
2.3 El Consumo Energético en Chile	14
2.3.1 Las Energías Renovables en Chile	15
2.3.2 La Energía Solar en el Norte de Chile.....	16
2.3.3 Región de Arica y Parinacota.....	18
2.3.4 Altiplano de la Región de Arica y Parinacota	18
2.4 Revisión de la Literatura	20

2.4.1	Muro Trombe	20
2.4.2	Muro Trombe Clásico	20
2.4.3	Análisis de Eficiencia.....	21
2.4.3.1	Efectos de Rejillas de Ventilación.....	22
2.4.3.2	Efecto de Ventiladores	22
2.4.3.3	Efecto del Tamaño	23
2.4.3.4	Efectos del Grosor y Color.....	24
2.4.3.5	Efectos de Aislamiento.....	25
2.4.3.6	Efectos de los Materiales de la Pared	26
2.4.3.7	Efectos del Acristalamiento.....	26
3.	Dinámica de Fluidos Computacional.....	28
3.1	Transferencia de Calor por Convección.....	28
3.2	Flotabilidad	29
3.3	Método de Volúmenes Finitos	30
3.3.1	Ecuaciones Gobernantes	31
3.4	Turbulencia	32
3.5	Modelos de Turbulencia.....	33
3.5.1	Modelo Estándar $k - \epsilon$	33
3.5.2	Modelo RNG $k - \epsilon$	35
3.5.3	Modelo $k - \omega$ Estándar	35
3.5.4	Efectos de la Flotabilidad en los Modelos de Turbulencia.....	35
3.6	Modelos de Radiación.....	36
3.6.1	Modelo P1	37
3.6.2	Modelo DO.....	37
3.7	Solar Load Model.....	38
3.8	Tratamiento Cerca de las Paredes	38
3.9	Condiciones de Borde	39
3.10	Métodos de Resolución	41
3.10.1	Acoplamiento de Presión Velocidad	41
3.10.2	Algoritmo SIMPLE.....	42
3.10.3	Algoritmo SIMPLEC	42
3.10.4	Algoritmo PISO.....	42
3.10.5	Algoritmo COUPLED.....	43

3.11	Discretizacion Espacial	43
3.12	Simulaciones Transientes	44
3.13	Aproximación de Boussinesq.....	45
3.14	Análisis Matemático.....	46
4.	Metodología.....	48
4.1	Planteamiento del Problema.....	48
4.2	Ubicación Geográfica de la Vivienda	48
4.3	Geometría.....	50
4.4	Condiciones de Borde	51
4.5	Mallado	52
4.6	Configuración en ANSYS Fluent.....	53
4.6.1	Convección Natural.....	53
4.6.2	Modelo Turbulencia y Tratamiento en paredes.....	54
4.6.3	Modelo de Radiación	54
4.6.4	Discretizaciones	54
4.7	Validación	55
5.	Resultados	56
5.1	Mallado y Análisis de Sensibilidad	56
5.2	Validación de resultados	59
5.3	Resultados invierno; Comportamiento de las temperaturas, velocidades y masa térmica	61
5.3.1	Casos N° 1, 2, 3: Muros 25-10; 25-15; 25-20	61
5.3.2	Casos N° 4, 5, 6: Muros 30-10; 30-15; 30-20	63
5.3.3	Casos N° 7, 8, 9: Muros 35-10; 35-15; 35-20	67
5.3.4	Contornos de Velocidades.....	70
5.3.5	Temperaturas promedio al interior de la habitación y confort térmico	71
5.4.6	Masa Térmica.....	77
5.4	Resultados verano; Comportamiento de las temperaturas, velocidades y masa térmica.....	78
5.4.1	Caso N° 1, 2, 3: Muros 25-10; 25-15; 25-20.....	78
5.4.2	Caso N° 4, 5, 6: Muros 30-10; 30-15; 30-20.....	81
5.4.3	Caso N° 7, 8, 9: Muros 35-10; 35-15; 35-20.....	84
5.4.4	Contornos de velocidades.....	87
5.4.5	Temperaturas promedio al interior de la habitación y confort térmico	89
5.4.6	Masa Termica.....	94

6. Rendimiento del Sistema.....	96
6.1 Temperatura promedio vs Temperatura exterior.....	96
6.2 Energía Almacenada por el muro Trombe Escalonado.....	97
6.3 Balance de energía y Eficiencia del sistema	98
Conclusiones.....	101
Bibliografía.....	103
Anexo.....	106

Índice de Figuras

1.1. Esquema de un muro Trombe ventilado	3
1.2. Muro Trombe Zigzag	3
1.3. Muro Trombe Transwall	4
1.4. Muro Trombe Fluidizado	5
1.5. Muro Trombe con panel fotovoltaico	6
2.1. Magnitud y composición electromagnética de la radiación solar	9
2.2. Trayectoria del sol respecto de la superficie horizontal terrestre.....	10
2.3. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.....	11
2.4. Efecto invernadero	12
2.5. Mecanismos de transferencia de calor en una vivienda	14
2.6. Consumo de electricidad a nivel nacional.....	15
2.7. Distintos tipos de mesetas en Chile.....	17
2.8. Radiación solar global en Chile	17
2.9. Región de Arica y Parinacota.....	19
2.10. Tipos de muro Trombe clásicos. a) Sin ventilación; b) modo invierno con termo- circulación de aire; c) modo verano con ventilación cruzada	20
2.11. Muro Trombe clásico	21
2.12. Muro Trombe con paneles fotovoltaicos y ventiladores	23
2.13. Ahorro de energía basado en el tamaño de la pared solar.....	24
3.1. Esquema de pared delgada	40
4.1. Posición del sol en el solsticio de invierno para una latitud de 20°	49

4.2. Posición del sol en el solsticio de verano para una latitud de 20°	49
4.3. Geometría de un muro Trombe Escalonado.....	50
4.4. Variación de parámetros a considerar	51
4.5. Geometría del caso N° 9 en el punto $x = 5.1$, $y = 2.4$, $z = 0.1$	53
5.1. Mallado del dominio	56
5.2. Mallado del dominio en 3 dimensiones	57
5.3. Corte transversal.....	57
5.4. Vista isométrica.....	57
5.5. Gráfico de temperatura medida en un punto fijo versus el número de elementos en los diferentes mallados.....	58
5.6. Curva obtenida por el modelo CFD, junto con la T.Bajc <i>et al.</i>	60
5.7. Distribución de los vectores de velocidad.....	60
5.8. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°1	61
5.9. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°2	62
5.10. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°3	62
5.11. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°3	63
5.12. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°3	63
5.13. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°4	64
5.14. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°5	65
5.15. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°5	65
5.16. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°5	66
5.17. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°6	66
5.18. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°7	67
5.19. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°8	68
5.20. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°9	68
5.21. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°9	69

5.22. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°9	69
5.23. Contorno de velocidad a las 10 [hr]. Caso N°2.....	70
5.24. Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N°8.....	71
5.25. Líneas de corriente en la habitación a las 13 [hr]. Caso N°2	71
5.26. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 25 [cm]	72
5.27. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 30 [cm]	73
5.28. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 35 [cm]	73
5.29. Líneas paralelas utilizadas.....	74
5.30. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm]	74
5.31. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm]	75
5.32. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm]	75
5.33. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm]	76
5.34. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm]	76
5.35. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm]	77
5.36. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°1	79
5.37. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°2.....	79
5.38. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°3	80
5.39. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°3.....	80
5.40. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°3	81
5.41. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°4	82
5.42. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°5	82
5.43. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°5	83
5.44. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°5	83
5.45. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°6.....	84
5.46. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°7	85
5.47. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°8.....	85

5.48. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°8.....	86
5.49. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°8.....	86
5.50. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°9.....	87
5.51. Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N°5.....	88
5.52. Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N°3.....	88
5.53. Líneas de corriente en la habitación a las 13 [hr]. Caso N° 3.....	89
5.54. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 25 [cm].....	90
5.55. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 30 [cm].....	90
5.56. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 35 [cm].....	91
5.57. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].....	92
5.58. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].....	92
5.59. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].....	93
5.60. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].....	93
5.61. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].....	94
5.62. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].....	94
6.1. Distribución de temperatura en la habitación v/s temperatura exterior.....	96
6.2. Energía almacenada por el Muro Trombe Escalonado.....	97
6.3. Diferencia de temperatura entre sistemas.....	99

Índice de Tablas

2.1. Efectos de colores en el rendimiento de un muro Trombe.....	25
4.1. Casos a analizar para distintas geometrías	51
4.2. Condiciones de contorno usadas en el modelo	52
4.3. Valores promedio de las temperaturas exteriores	52
4.4. Propiedades de los materiales	52
4.5. Métodos de solución	55
4.6. Factores de relajación.....	55
5.1. Estadísticas de la malla	58
5.2. Porcentaje de volumen de concreto donde la temperatura es mayor a 5 [°C].....	77
5.3. Porcentaje de volumen de concreto donde la temperatura es mayor a 10 [°C].....	95
6.1. Flujos de calor sobre las superficies.....	98
6.2. Resumen del sistema implementado	99

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad las necesidades energéticas a nivel mundial han aumentado de manera significativa, debido a la sobrepoblación mundial. Para el 2050 se prevé que las temperaturas mundiales aumentaran y se espera que las emisiones de gases de efecto invernadero aumenten al doble. Hoy en día, los edificios consumen más del 40% de la energía primaria del mundo, que son responsables del 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero [11].

A nivel local, Chile se caracteriza por tener un territorio extenso de clima variado. El norte grande chileno presenta un gran potencial para la producción de electricidad y calor en base a tecnologías de conversión térmica, debido a sus altos niveles de irradiación y sus índices excepcionales de claridad [1].

Un número considerable de investigadores han descrito las cualidades del muro Trombe. Se han estudiado muros Trombe en régimen estacionario [2], obteniendo su eficiencia térmica entre otras, es un tema que en la actualidad cobra investigar para lograr autonomía energética en sectores alejados de la red eléctrica.

En este trabajo se estudia a través de modelación numérica el rendimiento de calefacción pasiva de una vivienda mediante el uso de un muro Trombe con un diseño innovador, que se adapta a las necesidades que presenta el norte de Chile.

1.2 Antecedentes

Hoy en día a nivel mundial existen diversos hechos que han planteado un debate acerca de las formas de generación de energía; eólica, geotérmica, solar, etc. Un considerable número de investigadores han estudiado los muros Trombe ventilados, no ventilados en estado estacionario [10]. Varios investigadores discuten que lo principal consideración del uso de sistemas de calefacción pasiva, como el muro Trombe se basa en el diseño adecuado, considerando; el tamaño, la posición y la orientación.

Koyunbaba y Yilmaz [3] comparan experimentalmente muros Trombe de vidrio simple, doble vidrio y con paneles fotovoltaicos adosados al muro Trombe, donde encontraron que el mayor

ahorro energético se logra con el sistema de muro Trombe de un solo vidrio. Koch-Nielsen [4] agregan que es económico en zonas climáticas calientes donde tanto el aire acondicionado para el enfriamiento y calefacción es necesaria. Thorpe [5] afirmó que, si se incorporan soluciones solares pasivas adecuadas en edificios existentes, la demanda de energía del edificio puede ser reducida drásticamente.

El muro Trombe tiene varias ventajas. Un estudio sobre el costo de la vida usando muros Trombe en viviendas mostro una solución rentable para el confort térmico interior en época de invierno, mientras que la reducción de las emisiones anuales de CO_2 fueron aproximadamente de 455 (kg) de CO_2 [5].

Cabe mencionar que, los Muros Trombe están en constante rediseño e investigación, para aumentar su eficiencia, confiabilidad y armonía con el entorno.

1.3 Sistemas de Calefacción Solar Pasivos

Los sistemas de calefacción solar pasivos, se caracterizan por el aprovechamiento de la energía que nos proporciona de manera regular el sol. Son útiles en los lugares que presentan temperaturas bajas durante todo el año o parte de ella.

1.3.1 Muro Trombe

Un muro Trombe es un sistema que hace uso de la ganancia solar indirecta. Es una pared, normalmente hecha de piedra, ladrillo o adobe, pintado de negro y se coloca detrás de un cristal con una orientación al sur. La inmensa masa térmica que se acumula entre el vidrio y el muro sirve como acumulador de calor, el cual se transfiere al interior de la vivienda para la calefacción en invierno y para liberar el movimiento del aire para la refrigeración en verano. Hay varios tipos de muros Trombe, desde los más clásicos a los más completos, su eficiencia se analiza y compara en varias investigaciones [6].

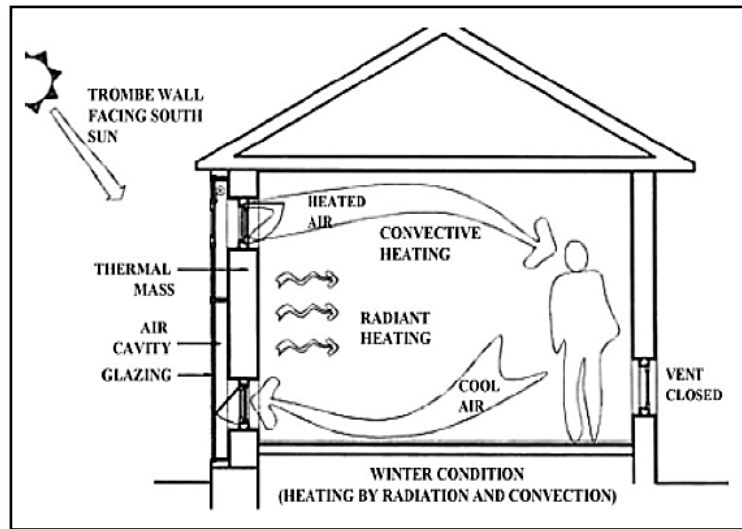


Figura 1.1: Esquema de un muro Trombe Ventilado [7].

Existen distintos tipos de muros Trombe, a continuación se nombrara los más importantes;

1.3.2 Muro Trombe Zigzag

Otro tipo de muro Trombe es un muro Trombe zigzag. Este tipo de muro está diseñado para reducir la excesiva ganancia de calor. El muro se compone de 3 secciones, una sección con orientación al sur, por tanto las otras 2 caras están orientadas hacia adentro formando un ángulo de 90° entre muros.

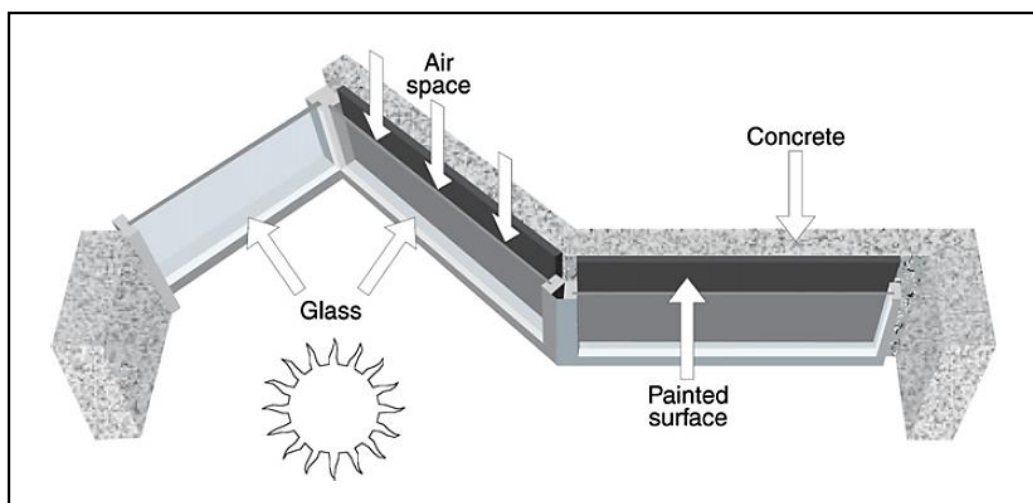


Figura 1.2: Muro Trombe Zigzag [8].

La cara que está orientada al sur posee una ventana que provee calor y luz en las mañanas frías cuando se requiere calefacción inmediata. Las otras 2 caras se comportan como un muro Trombe clásico, los cuales almacenan calor para la distribución en las noches frías.

1.3.3 Muro Trombe Transwall

Este tipo de muro Trombe se caracteriza por poseer una muralla de agua que cubre un vidrio donde incide los rayos solares. Este muro está construido sobre una estructura metálica que sostienen recipientes de agua contruidos de vidrio mediante una placa semi transparente que se coloca entre las paredes. La placa semi transparente absorbe cerca del 80% de la energía solar y transmite el resto de la energía dentro de la vivienda. Este tipo de muro es utilizado en zonas donde la temperatura del día es alta.

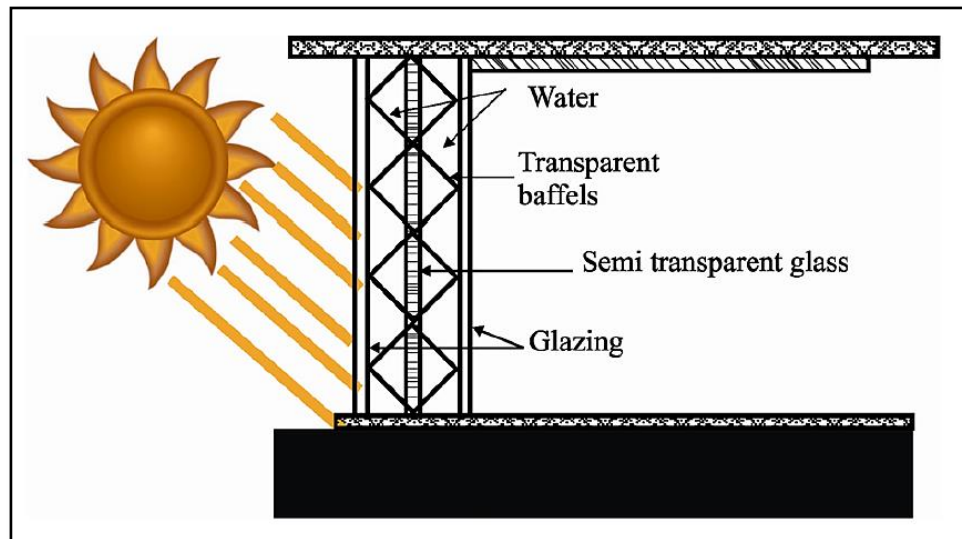


Figura 1.3: Muro Trombe Transwall [8].

1.3.4 Muro Trombe Fluidizado

Este tipo de muro se basa en el muro Trombe clásico pero donde el gap aire que se forma entre el muro y el vidrio se llena con un fluido muy absorbente y de densidad baja. Un ventilador transfiere el calor acumulado por el fluido y lo ingresa a la habitación a calefaccionar. Un estudio realizado por estudiantes Turkos comparan el muro Trombe Clásico con el muro Trombe Fluidizado, donde los resultados indicaron que el muro Trombe Fluidizado es más eficiente, debido a que la transferencia de calor del fluido esta en directo contacto con las partículas.

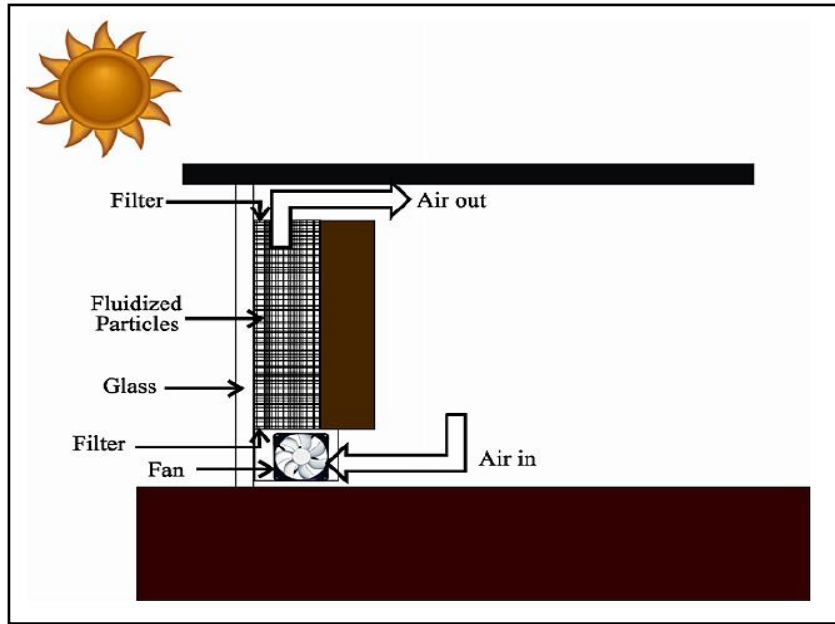


Figura 1.4: Muro Trombe Fluidizado [8].

1.3.5 Muro Trombe con Paneles Fotovoltaicos

Posee en la parte delantera del vidrio un panel fotovoltaico que simultáneamente convierte la energía incidente en energía para la calefacción de la vivienda. La eficiencia de este tipo de muro es reducida en términos de ganancia de calor pero la inclusión de paneles fotovoltaicos genera electricidad, lo cual se considera un beneficio. Sun *et.al.* analizo cuanto cambia la eficiencia de un muro Trombe con paneles fotovoltaicos y un muro Trombe clásico. El estudio revelo la instalación de paneles fotovoltaicos sobre los vidrios reduce el rendimiento térmico del muro Trombe en un 17% [8]. Esta reducción se debe a la obstrucción de los rayos solares sobre el muro.



Figura 1.5: Muro Trombe con panel fotovoltaico [8].

1.4 Definición del Problema

El problema a resolver radica en la necesidad de calefaccionar una vivienda en Chile, especialmente en el norte del país mediante un sistema de calefacción solar pasivo. Un muro Trombe convencional no cumple con lo dicho anteriormente, debido a la baja latitud que posee el norte del país, lo cual no favorece la incidencia del sol sobre el muro. Por este motivo, se busca un diseño innovador que aproveche los altos índices de radiación solar y claridad [9]. Se modelara computacionalmente utilizando el Software ANSYS Fluent 17.1 un muro Trombe *Escalonado*¹, el cual se adapta a las necesidades del altiplano nortino.

1.5 Objetivos

Los objetivos de este estudio se detallan a continuación:

1.5.1 Objetivo General

¹ Para más detalle de la geometría, diríjase al capítulo 4

Determinar a través de modelación numérica la relación entre dimensiones del muro Trombe Escalonado y comportamiento térmico de la habitación en la calefacción de una vivienda en el norte de Chile.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar la distribución de temperatura en una habitación de la vivienda utilizando muro Trombe Escalonado en régimen transiente.
- Obtener el flujo de calor transferido hacia la vivienda.
- Determinar dimensiones de diseño del muro Trombe Escalonado para la calefacción en la habitación, según el rango de confort térmico (ASHRAE).

1.5.3 Alcances

- Las variables a considerar en la modelación numérica son las siguientes; ubicación geográfica, clima, radiación solar.
- Construir un modelo numérico empleando el software computacional ANSYS Fluent 17.1 en régimen transiente.
- Analizar 2 casos; un día de invierno y un día de verano, considerando este último de 24 [hr].

1.6 Resultados Esperados

Se espera comprobar si la utilización de un Muro Trombe Escalonado en una vivienda produce un aumento en la temperatura interior de la misma en el norte de Chile. También se pretende determinar si el aumento de la temperatura de la vivienda mediante el uso de este diseño innovador es suficientemente mayor a la temperatura ambiente para evaluar su posible rentabilidad. Por último, el modelo numérico será utilizado como una herramienta práctica para futuras investigaciones en esta área.

Finalmente, se espera que el resultado de este trabajo logre contribuir a la integración de la energía solar a la matriz energética de Chile, ampliando el campo de investigación mediante energía solar aplicada en el norte de Chile

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se presenta una revisión de los principios de funcionamiento de los muros Trombe, se menciona el acontecer en la energía renovable en Chile y su posible implementación en el norte. Por último, se presentan múltiples investigaciones realizadas respecto al muro Trombe y una revisión completa de toda la bibliografía disponible respecto a las características y dimensiones óptimas de eficiencia térmica en una vivienda. La implementación de muros Trombe en latitudes elevadas no se encuentra detallado con claridad.

2.1 Antecedentes Preliminares

La energía fósil es un componente esencial de la vida cotidiana, cuyo impacto ambiental y rápido aumento de precio son dos preocupaciones importantes en la actualidad [12]. Por otra parte, el agotamiento de los recursos naturales genera interés en fuentes de energía renovables, tales como: energía solar, eólica, biomasa, mareomotriz, geotérmica, entre otras.

La energía solar cumple un rol importante para numerosas personas de diferentes ámbitos de la vida. La energía solar se puede utilizar en zonas remotas y poco desarrolladas para satisfacer las necesidades de las escuelas, clínicas y otros edificios. Los edificios representan el 33% de las emisiones de gases de efecto invernadero total a nivel mundial [13]. Factores como la arquitectura, ubicación geográfica entre otras, son las principales directrices para la conservación de la energía en el sector de la construcción.

Las técnicas solares pasivas pueden reducir la demanda de calefacción anual hasta un 25%. Varios dispositivos arquitectónicos, tales como escalonados solares, muros Trombe entre otros, se utilizan en la construcción. Estos dispositivos disminuyen la degradación del medio ambiente y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Los muros Trombe reducen el consumo de energía de un edificio hasta en 30% [13]. Un muro Trombe contribuye de manera importante a la arquitectura de edificios, beneficiándolo en distintos aspectos, tales como calefacción y refrigeración.

2.1.1 Radiación Solar

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). Aproximadamente la mitad de las ondas que recibimos están dentro del rango de 0.4 -0.7 (μm) pueden ser detectadas por el ojo humano [14].

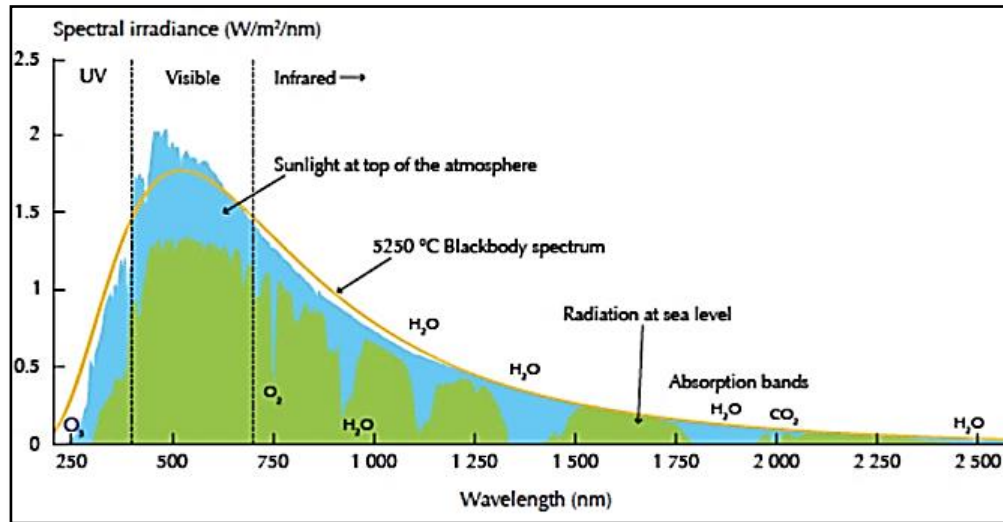


Figura 2.1: Magnitud y composición electromagnética de la radiación solar [14].

En función de cómo reciben la radiación solar, los objetos situados en la superficie terrestre se pueden distinguir estos tipos de radiación:

- Directa: es aquella que llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.
- Difusa: parte de la radiación que atraviesa la atmosfera es reflejada por las nubes o absorbida por estas. Esta radiación va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes, sino que las partículas de polvo atmosférico, montañas, arboles, edificios, suelo, etc. Se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, en cambio la radiación vertical es de menor intensidad.
- Reflejada: la radiación reflejada es como su nombre lo indica, aquella reflejada por al superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado Albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada porque no ven ninguna superficie terrestre, las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

- Global: la radiación total es la suma de las tres radiaciones antes mencionadas

La intensidad de la radiación solar sobre la superficie de la tierra está influenciada por varios factores:

- La forma de la Tierra
- Los movimientos de la Tierra
- Los fenómenos atmosféricos
- El ciclo día/noche
- La actividad humana

En condiciones ideales, la intensidad de la luz solar o irradiancia en la superficie de la Tierra es de $1000 \left(\frac{W}{m^2}\right)$ en promedio [14].

2.1.2 Sistemas de Captación Solar Pasivos

Los sistemas de captación solar pasivos se pueden definir como elemento que utilizan la energía solar para distintos fines, como por ejemplo: calefacción y ventilación. Tal como se mencionó en el Capítulo 1, el muro Trombe es un sistema de calentamiento solar pasivo, es decir, que se relaciona con el espacio habitable y da origen a la arquitectura pasiva. Con este aspecto arquitectónico, se busca captar energía usando la propia estructura (ventanas, paredes y suelos) [15]. Uno de los aspectos más importantes a considerar a la hora de diseñar una vivienda, es la trayectoria que sigue el sol, la cual describe un arco en el cielo que nace en el este y finaliza en el oeste.

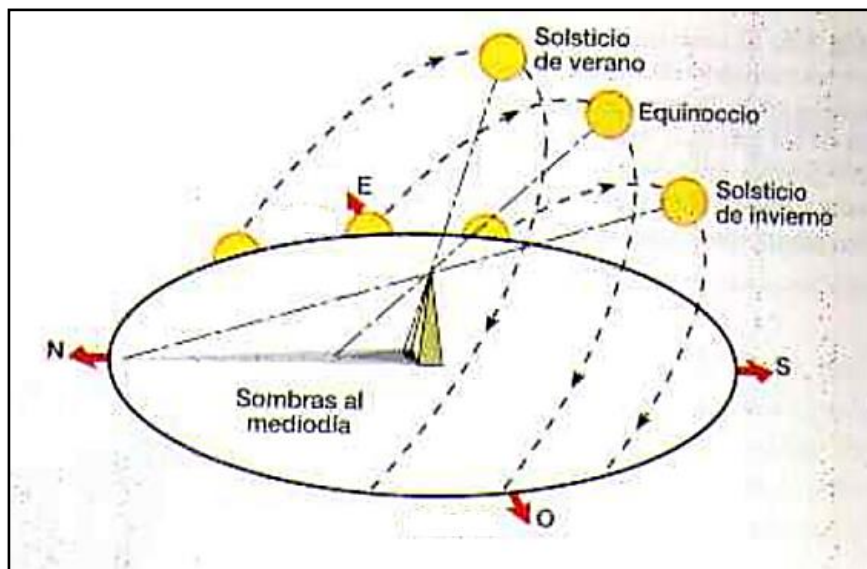


Figura 2.2: Trayectoria del sol respecto de la superficie horizontal terrestre [15].

Se observa que la mayor captación de energía solar se produce en el solsticio de verano.

2.1.3 Captación Solar

La captación solar en una vivienda se realiza a través de los elementos de la envolvente, principalmente elementos vidriados. Estos dependen de las propiedades de los elementos de la envolvente y el nivel de sombra a que estará expuesta la vivienda.

Las propiedades fundamentales relacionadas con la captación solar (o ganancia solar) de los elementos de la envolvente son [16]:

- En elementos opacos, donde el flujo medio captado depende principalmente de la absorptividad (para radiación solar) superficial del sistema constructivo y de la transmisividad térmica del mismo. Mientras mayor sea la absorción del material, mayor será la captación de calor. A menor transmisividad térmica, menos será la captación solar en el sistema constructivo opaco.
- En elementos vidriados, la ganancia solar se produce dada la transmisividad alta que presenta este material ante la radiación directa del sol.

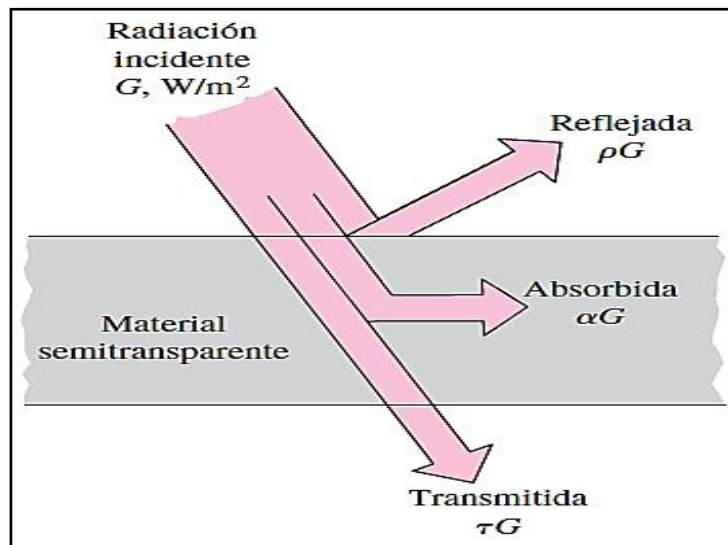


Figura 2.3: Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente [16].

La captación solar por ventanas es favorable en periodos fríos y desfavorables en periodos calurosos. En general, en nuestros climas es recomendable orientar ventanas al norte y evitar ventanas al oriente-poniente para evitar sobrecalentamiento en periodos de alta radiación solar.

2.1.4 Principios de Funcionamiento de un Muro Trombe

Los rayos solares, comprendidos en el espectro de longitudes de onda que se muestra en la Figura 2.4, atraviesan un vidrio transparente y son absorbidos sobre la superficie receptora del muro. El muro de hormigón de color opaco y oscuro ofrece un rendimiento muy bueno debido a la alta absorción de energía solar, sin embargo, lo ideal para la absorción solar es el denominado “Cuerpo Negro” de la física.

La superficie receptora emite radiación electromagnética en un dominio de longitudes de onda diferente al anterior, entre 4 y 30 (μm), lo cual corresponde a un espectro infrarrojo muy elevado del espectro visible. Esta radiación es absorbida totalmente por el vidrio de modo que el aire del colector se calienta produciéndose la termocirculación debido a las diferencias de temperatura [17]. En promedio, el vidrio absorbe un 7% de la radiación solar que recibe, 7% se refleja y el restante 86% se transmite al muro interior (masa térmica), por esta razón se supone que la temperatura en la masa térmica es mayor que la temperatura del vidrio.

El fenómeno denominado “efecto invernadero” es de particular importancia en los sistemas solares pasivos, debido a que el vidrio actúa como válvula, dejando entrar la radiación solar pero limitando las pérdidas de calor del sistema. Este fenómeno es beneficioso en invierno pero no así en verano, donde el concepto es proteger las ventanas de los rayos del sol y aprovechar al máximo la ventilación natural durante la noche.

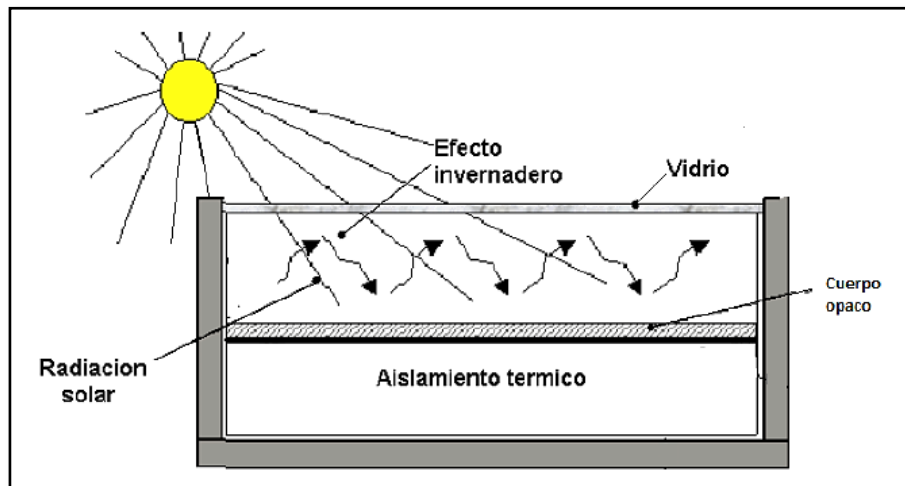


Figura 2.4: Efecto invernadero [17].

En el muro Trombe, al calentarse la masa térmica, emite energía calórica radiante no visible donde el vidrio no deja escapar esa energía debido a su impermeabilidad a ese tipo de radiaciones. El aire se calienta en el espacio entre el vidrio y el muro, circulando por convección natural dado que al estar más caliente se hace más liviano, circulando desde la parte inferior hacia la parte superior. A su vez, el calor almacenado en el muro se trasmite por medio de conducción a

la parte interior de la vivienda, emitiendo ese calor almacenado al interior del recinto a calefaccionar.

2.2 Intercambio Energético en Viviendas

La vivienda y sus elementos constructivos, en su interacción con el medio ambiente, se someten a una serie de fenómenos de transferencia, captación y almacenamiento de calor. El calor en un espacio puede estar presente como: calor sensible o calor latente, donde el primero se asocia directamente al aumento o disminución de temperatura producida en un cuerpo debido a las vibraciones existentes en las partículas y representa el potencial de este cuerpo para transmitir calor a otro de menor temperatura. Por otra parte, el calor latente se asocia a la energía necesario para producir el cambio de estado de materia. Por ejemplo, es el calor que se requiere para transformar agua líquida en vapor de agua.

2.2.1 Ventilación o Renovación de Aire

Un aspecto importante se refiere al confort habitacional, el cual se define como el estado de comodidad y bienestar de las personas frente a una situación particular [41]. Los habitantes no deben estar expuestos a ningún tipo de malestar térmico, contaminación o ruidos, entre otros. La ventilación o renovación de aire consiste en reemplazar gradualmente el aire viciado por aire nuevo o fresco para así eliminar las emisiones de CO_2 y otros contaminantes que se producen diariamente al interior de una vivienda. En verano, se requiere alcanzar condiciones de confort dentro de la vivienda, mientras que en invierno se necesita ventilación para obtener una calidad del aire interior aceptable, sin contaminantes. Las necesidades de ventilación al interior de las viviendas tienen que cumplir con el confort térmico, el cual se basa en la eliminación del exceso de calor o frío y el movimiento del aire para el refresco corporal.

2.2.2 Pérdidas y Ganancias de Calor

En una vivienda, existen tres mecanismos de transmisión de calor; convección, conducción y radiación. Al interior de la casa, el calor se transmite entre los elementos de la envolvente tales como: muros, techos y suelos principalmente por radiación, mientras que el aire al interior el fenómeno predominante es por convección [15]. El fenómeno de transferencia de calor se debe al intercambio de aire entre el interior y el exterior. El aire en el exterior a menor temperatura que en el interior, genera una pérdida de calor para el ambiente interior y constituye una ganancia si estas temperaturas se invierten. Por otra parte, hay que tener en cuenta las pérdidas de calor debido a los puentes térmicos, que son lugares de refuerzo o juntas de los elementos que pueden

estar contruidos con materiales diferentes, existiendo una discontinuidad de la capa aislante. Estos lugares pueden convertirse en vías rápidas de escape de calor.

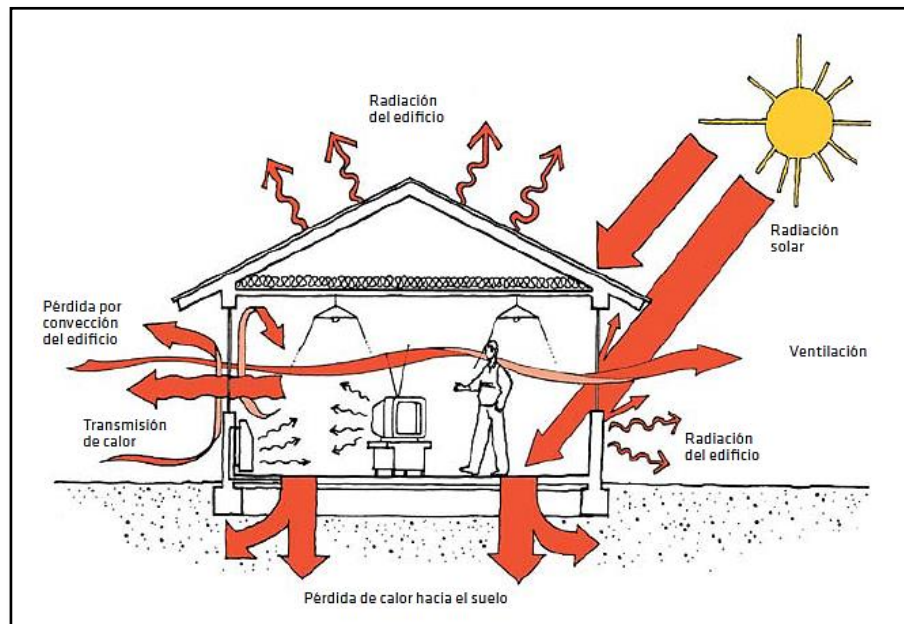


Figura 2.5: Mecanismos de Transferencia de calor en una vivienda. [15]

En cuando a las ganancias de calor, se tiene las obtenidas por la incidencia del sol en la envolvente opaca, superficies vidriadas de la vivienda y las ganancias internas debido al aporte de los usuarios (personas, electrodomésticos, cocina, iluminación, entre otros). La ganancia de calor de las personas y de otras actividades se expresa en calor aportado al interior de la vivienda.

Por último, en una vivienda se producen permanentemente fenómenos de transferencia de calor, lo que se resume en lo siguiente:

- Transmisión de calor a través de elementos opacos y vidriados de la vivienda
- Ganancia o perdidas de calor por intercambio de aire entre el interior y exterior
- Ganancia solar tanto por elementos opacos como vidriados
- Ganancias internas

2.3 El Consumo Energético en Chile

Elaborar políticas energéticas en Chile requiere considerar la disponibilidad del recurso energético, que sea sustentable y de bajo costo. Considerando el tipo de uso final de la energía, es común desagregar el consumo en tres grandes grupos:

- Consumo del sector transporte
- Consumo del sector industrial y minero

➤ Consumo del sector comercial, público y residencial

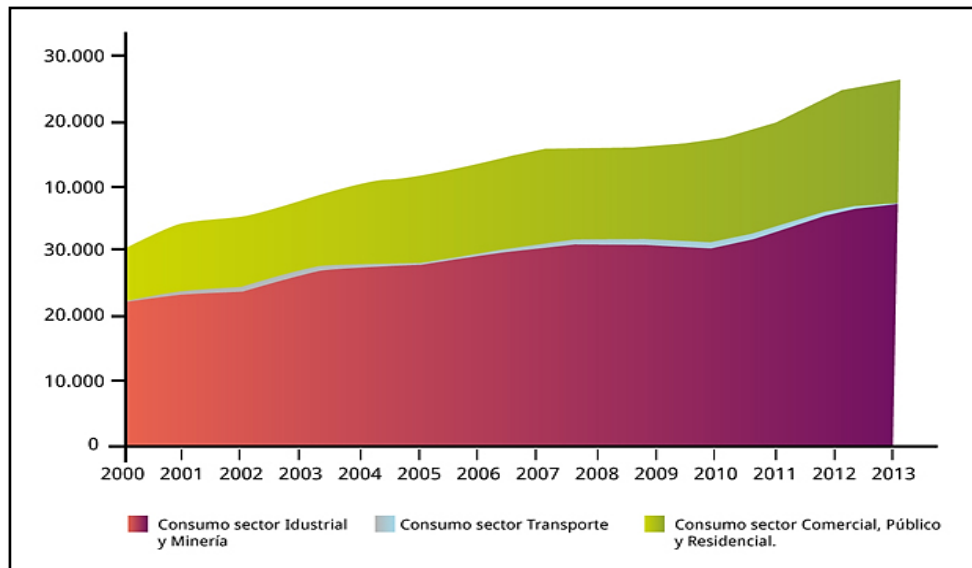


Figura 2.6: Consumo de electricidad a nivel nacional (valores en Tcal). [16]

La participación del sector Transporte creció de 0,6% durante la década del 2000 a un 0,8% estos últimos años. Para el sector CPR² la participación aumentó de un 29% en el año 2000 a un 33,5% durante el 2013. Esto último debido a un crecimiento promedio sostenido en el consumo del sector CPR igual a un 5,7%. El sector Industrial y Minero ha crecido a una tasa promedio del 6% estos últimos tres años [16]. La evolución del consumo de estos tres sectores se puede visualizar en el siguiente gráfico:

Esto demuestra el sostenido aumento del consumo de electricidad en el país, lo cual ha impulsado políticas de gobierno a incentivar otras formas de generar energía limpia y libre de CO_2 .

2.3.1 Las Energías Renovables en Chile

Chile vive una verdadera revolución en materia de energías renovables. De acuerdo a la última versión del New Energy Finance Climascoppe elaborado por Bloomberg New Energy Finance y el banco Interamericano de desarrollo, nuestro país tiene el tercer lugar en el ranking global que mide el atractivo de inversión en energías renovables [16]. En total a la fecha, existen en construcción 49 proyectos en el SING y el SIC, equivalente a 4.117 (MW), por una inversión total de US\$ 11,3 billones. De los MW que producirán dichos proyectos, 46% provendrán de energías renovables, cifra que sube a 67% al contemplar la totalidad de los proyectos de recursos renovables.

²Se refiere al sector Comercial, Público, Residencial.

Las energías renovables se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil no se consume ni se agotan en una escala humana. Entre estas fuentes de energías están: la hidráulica, la solar, la eólica y la de los océanos. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la biomasa, la energía geotérmica y los biocombustibles.

2.3.2 La Energía Solar en el Norte de Chile

En el norte de Chile, hay alrededor de 80.000 (km^2) de área con más de 5.5 horas de radiación solar directa por día, que recibe alrededor de 1.32×10^7 (Gwh) de energía solar al mes, 226 veces el consumo eléctrico total de Chile en 2009 [16]. El modo más directo de transformar esa energía en electricidad es a través de paneles fotovoltaicos, los cuales solo obtienen un 15% de eficiencia, lo que no lo hace atractivo hasta el momento.

En la actualidad se considera que uno de los lugares del mundo de mayor potencial como fuente energética solar es el norte de Chile, debido a las características climáticas y de relieve presentes en gran parte de la región norte del país, esta zona presenta un alto número de días despejados (sin nubes) en el año.

Estas características óptimas corresponden a las pampas interiores que ofrecen grandes extensiones de terreno y donde el clima de tipo desértico normal presenta condiciones de extrema aridez con ausencia de nubosidad y cielos limpios casi permanentes. Diferente es el área costera, ya que posee un clima desértico donde la fuerte influencia del océano se hace sentir con nieblas que cubren este territorio gran parte del día hasta una altitud cercana a los 1000 ($m.s.n.m$), lo cual disminuye la radiación solar recibida. La franja altiplánica tiene la ventaja de estar sobre 3000 ($m.s.n.m$) con un clima de espeta de altura de cielos diáfanos y que solo presenta precipitaciones estivales.

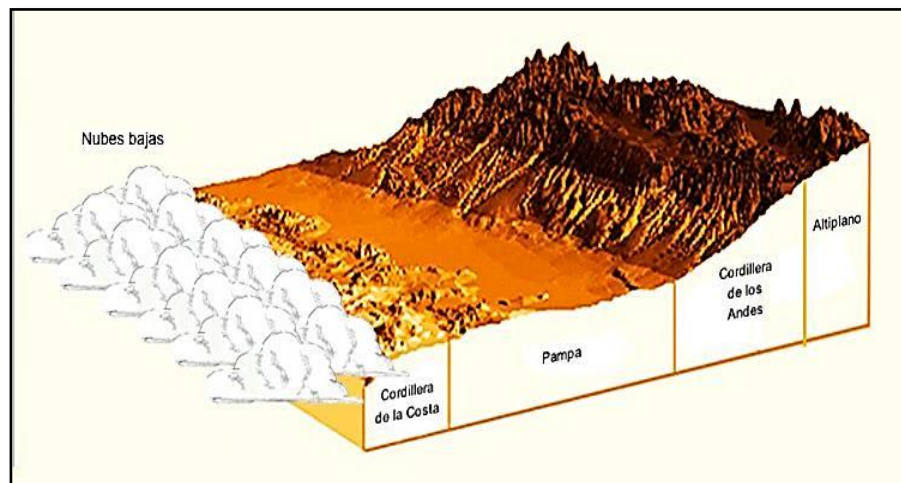


Figura 2.7: Distintos tipos de mesetas en Chile. [16]

Otro aspecto importante a considerar es la radiación incidente en Chile. La difusión que se produce debido a la presencia de polvo y a la contaminación del aire depende, en gran medida, del lugar donde se mida. Los efectos meteorológicos locales tales como la nubosidad, lluvia o nieve afectan a la radiación solar que llega a un determinado lugar. En la Figura 2.5 se aprecia la distribución de energía solar en Chile, donde se observa que el norte de Chile posee una mayor radiación solar incidente, cercano a $1000 \left(\frac{kW}{m^2}\right)$.

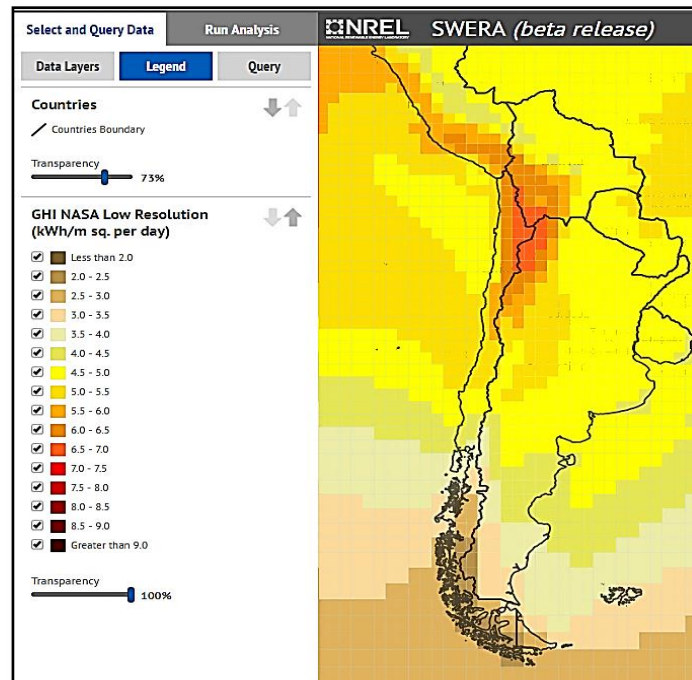


Figura 2.8: Radiación Solar global en Chile. [18]

En el norte de Chile ya se han realizado los primeros proyectos de energía solar de gran tamaño, y en determinadas condiciones la electricidad generada con energía solar ya es competitiva frente a la generación de energía convencional. Sin embargo, la existencia de diversos obstáculos ha impedido hasta ahora que se produzca un uso más amplio de la energía solar.

Si bien Chile ha demorado el desarrollo del uso de energía solar, desde las últimas décadas del siglo XX hubo varios proyectos rurales. Organismos estatales entregaron a las familias pequeños paneles fotovoltaicos para sus necesidades de iluminación y también para el bombeo de agua de pozo para consumo humano, de sus animales y para riego. Esta práctica se ha extendido a lo largo de los años, de modo que en la actualidad es fácil encontrar pueblos remotos con sistemas de energía solar [19].

Por el momento solo existen pocos oferentes en el mercado, falta personal técnico calificado entre otras. Debido a la reducida oferta, los costos en Chile aún se encuentran en un nivel alto en comparación a países más desarrollados y para las instituciones financieras las tecnológicas

usadas, en especial en el caso de plantas de pequeña escala y autoconsumo, no son atractivas, además de ellos se constata vacíos en el marco regulatorio y una falta de instrumentos de fomento adecuados.

2.3.3 Región de Arica y Parinacota

La Región de Arica y Parinacota se encuentra ubicado en el extremo norte del país, limita al norte con Perú, al sur con la región de Tarapacá, al este con Bolivia y al oeste con el océano pacifico. Esta se divide en 2 provincias; Arica y Parinacota [19]. La provincia de Arica tiene 2 comunas; Arica y Camarones. A su vez también la provincia de Parinacota se divide en 2 comunas: Putre y General Lagos. En el sector costero las temperaturas son gratas, con variaciones diarias y estacionales poco marcadas. Hacia el interior, considerando como desierto absoluto, la sequedad atmosférica es extrema y las oscilaciones térmicas diarias son muy amplias

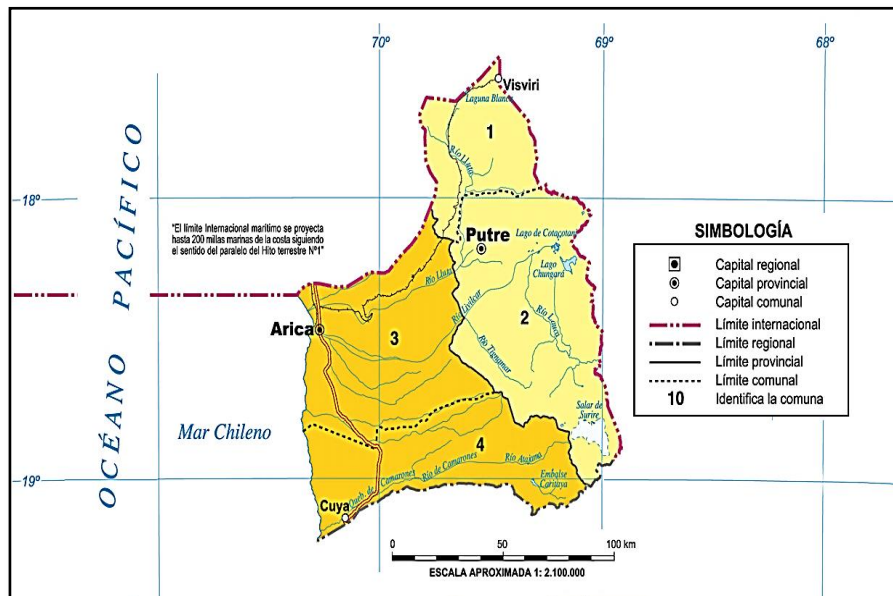


Figura 2.9: Región de Arica y Parinacota. [19]

2.3.4 Altiplano de la Región de Arica y Parinacota

La comuna de Putre está ubicada a 3300 metros sobre el nivel del mar y a 145 km. de la ciudad de Arica. Posee una superficie de 6000 (km^2) aprox. Y está ubicada entre los $18^{\circ}00'$ y $18^{\circ}15'$ de latitud y $69^{\circ}30'$ a $69^{\circ}45'$ de longitud. Según el censo 2012, la comuna de Putre posee una población total de 2500 habitantes residentes, sin embargo, este número aumenta de manera significativa debido al turismo que se desarrolla en la zona altiplánica. [19]

En cuanto al servicio de electricidad, se puede indicar que todas las localidades cercanas cuentan con este servicio; Putre, Socoroma, Zapahuirá, Murmuntani, Chapiquiña, Belén, Lupica, Saxamar y Ticnamar. En relación a la parte alta o cordillera, hay varias localidades que aún no cuentan con este servicio, tales como Caquena y Guallatire entre otras. Estas últimas localidades se abastecen de electricidad a través de generadores eléctricos diésel administrados por la comunidad y subsidiados por la Ilustre Municipalidad de Putre con la entrega de 300 litros de combustible al mes que utilizan para el funcionamiento del generador por 3 horas en la noche.

Finalmente, según el Censo del año 2012, existen en Putre un total de 1185 viviendas y de acuerdo a la evolución y turismo que existe en esa localidad y sus alrededores, las viviendas en dicha comuna aumentarían cerca del 10% en un plazo de 10 años [19]. Bajo estos antecedentes, toma importancia la necesidad del ahorro energético, especialmente en lugares alejados a las redes eléctricas (SING). Este trabajo se centra en satisfacer las necesidades de calefacción de una vivienda (donde actualmente se gasta electricidad en calefaccionarlas) para así producir un ahorro en el consumo eléctrico en estas localidades.

2.4 Revisión de la Literatura

2.4.1 Muro Trombe

El objetivo del muro Trombe es usar la energía del sol para calefaccionar y ventilar edificios en varias regiones climáticas [20]. Funciona mediante la absorción de rayos solares y la conversión de su energía. Un muro Trombe almacena energía durante periodos de uso altos y provee esa energía cuando los ocupantes de un edificio lo requieren. Diferentes configuraciones se utilizan para adaptar muros Trombe a diversos climas, propósitos y estaciones.

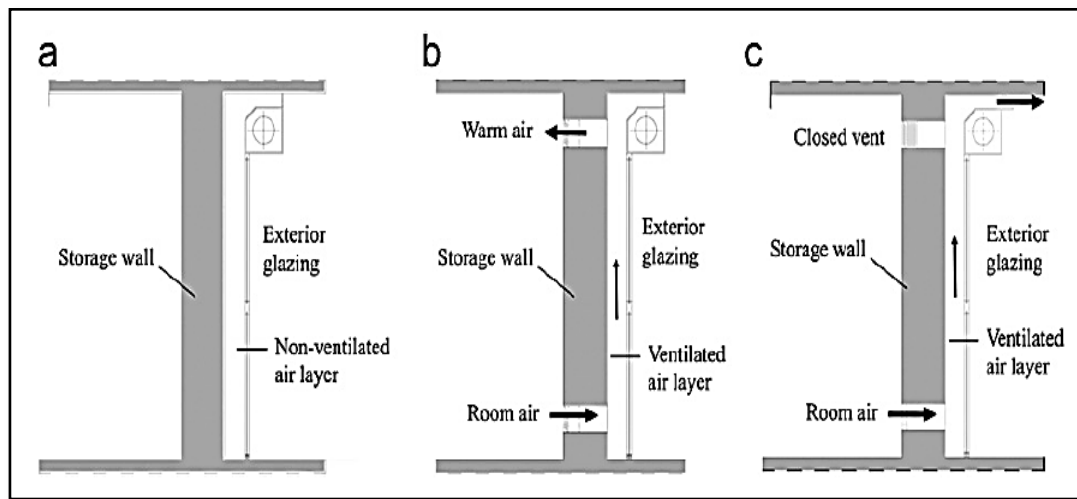


Figura 2.10: Tipos de muro Trombe clásicos. a) Sin ventilación; b) modo invierno con termocirculación de aire; c) modo verano con ventilación cruzada. [20]

2.4.2 Muro Trombe Clásico

Un clásico muro Trombe es un muro simple donde existe un cristal y se forma un espacio de aire entre ellos, lo cual produce un aislamiento del muro del ambiente al aire libre. El inventor de este tipo de muro Trombe fue Edward Morse, un ingeniero Americano quien patentó el diseño en 1881. Sin embargo, el muro Trombe clásico ha sido popularizado por Felix Trombe y Jacques Michel, un ingeniero francés y un arquitecto francés, respectivamente. Por lo tanto, este muro es conocido como un muro Trombe.

Hatamipur and Abedi [21] han afirmado que la idea de los muros Trombe es igual a la pasarela vernácula del golfo pérsico. Esta pasarela es un corredor que separa la entrada principal de las habitaciones de la sala principal y tiene ventanas en los lados.

El diseño clásico de un muro Trombe está basado en el uso de materiales con alta capacidad de almacenamiento de calor. La superficie exterior del muro es de color negro para incrementar la absorción de calor.

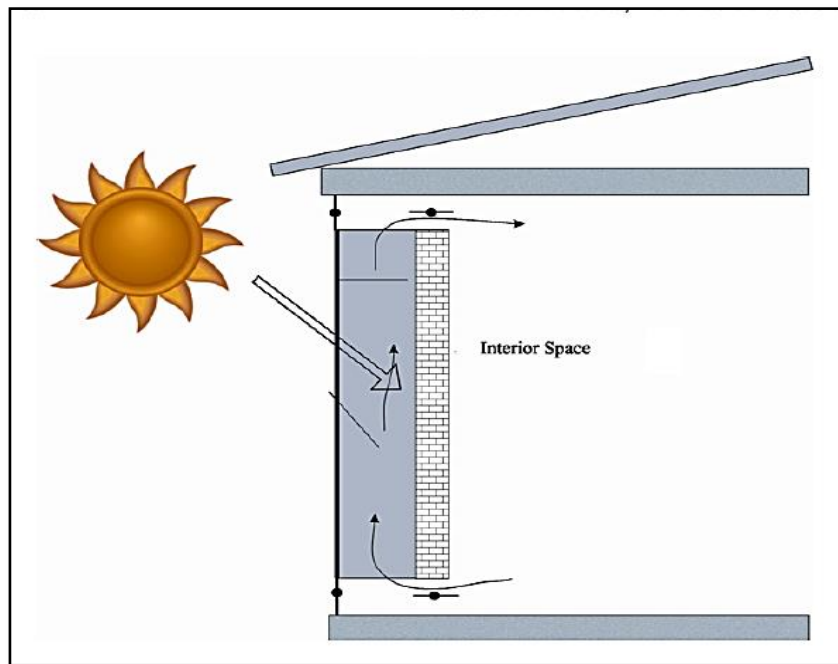


Figura 2.11: Muro Trombe clásico. [21]

El muro absorbe radiación solar directa y difusa durante el día para luego transferir el calor al interior de la pared por convección o conducción por la noche. El espacio entre el vidrio y la pared varía normalmente de 3 (cm) a 6 (cm) [21]. El calor que se almacena en la masa térmica se libera poco a poco. Esta transmisión de calor se produce a través de radiación y convección para aumentar el confort térmico de los habitantes del edificio. Según Khedari *et.al*, [22] este tipo de muro Trombe induce bien la ventilación natural con una superficie de 2 (m^2) de muro y un espacio de aire de 14 (cm) se puede obtener una ventilación de aire entre 20- 90 ($\frac{m^3}{hr}$).

2.4.3 Análisis de Eficiencia

Los muros Trombe tienen varios accesorios que ayudan a aumentar la eficiencia, tales como: rejillas de ventilación, ventiladores y aislamiento [23] entre otras. Además, los muros Trombe contienen atributos que contribuyen a la eficiencia de la pared; tamaño, grosor, color, materiales del muro, materiales del revestimiento del muro y acristalamiento. En las secciones siguientes se discutirán estos accesorios y atributos.

2.4.3.1 Efectos de Rejillas de Ventilación

El muro Trombe clásico podría clasificarse en 2 tipos: con ventilación y sin ventilación (ver Figura 2.10). Para muros Trombe ventilados, 2 aberturas son instaladas en la parte superior e inferior del muro para ayudar a la circulación de calor. Estas están diseñadas para controlar la pérdida de calor, la cual se produce en el espacio de aire entre el cristal y el muro mediante convección, conducción o radiación hacia la atmosfera. Cuanto mayor sea la temperatura de la cámara de aire, mayor es la pérdida de calor, donde las rejillas de ventilación se instalan en la pared superior e inferior para reducir la pérdida de calor. Como el aire en el espacio que se produce entre el muro y el vidrio se calienta y es más ligero, entra en la habitación a través de la rejilla de ventilación superior y el aire frío recircula a través de la rejilla de ventilación inferior [23].

En los muros Trombe con ventilación, las rejillas son un importante mecanismo de control que puede ayudar a edificios en la calefacción y refrigeración adecuada. La eficiencia del muro Trombe con ventilación y sin ventilación durante mucho tiempo ha sido considerada un tema importante a nivel energético pasivo. Balcomb y McFarland [24] estudiaron el funcionamiento del muro Trombe con circulación térmica ventilado y no ventilado en nueve diferentes climas de EE.UU. su estudio revelo que los ventiladores producen un flujo inverso durante la noche y reducen en gran medida la eficiencia en determinadas circunstancias.

Balcomb y McFarland [24] proponen el uso de amortiguadores para controlar las rejillas de ventilación y así evitar el flujo inverso. Sus resultados revelaron que el uso de rejillas de ventilación controlada no afecta significativamente en el rendimiento del térmico del muro Trombe en climas templados. Por ultimo concluyeron que el muro Trombe con ventilación es 10-20% más eficiente en climas áridos, tales como Boston.

Una simulación se llevó a cabo utilizando el software “Energy Plus” por un grupo de Portugueses en 3 diferentes regiones climáticas de Portugal. El objetivo del estudio era determinar el efecto de las rejillas de ventilación en la eficiencia del muro Trombe [25]. Los resultados del estudio confirmaron los resultados de Balcomb y McFarland [24].

En el diseño del muro Trombe, el tamaño de la rejilla de ventilación es un parámetro importante y depende de la fracción de ahorro solar que queremos. Además, ventilación externa que puede ser instalado en la parte exterior del muro Trombe facilita la circulación del aire. Esta circulación permite una mejor ventilación y enfría el espacio de aire entre el cristal y la pared principal durante el verano.

2.4.3.2 Efecto de Ventiladores

Es cuestionable la viabilidad de utilizar ventiladores para ayudar a la circulación de calor a través de las rejillas de ventilación. Una simulación fue hecha por Sebald *et al.* [26] en un muro Trombe con ventilación exterior controlada por un termostato. El ventilador controlado por termostato se inicia cuando la temperatura de la pared exterior supera los 29 [°C]. Los resultados revelaron que el rendimiento del ventilador depende de parámetros tales como el espesor de la pared y el clima. Por ejemplo, un ventilador puede mejorar la eficiencia de una habitación de 37 (m^2) utilizando muro Trombe en un 22% en Albuquerque, 20% en Santa Barbara y 7% en Madison.

En la Universidad de California, Sebald y Phillips [27] realizaron otra investigación, donde simularon la eficiencia de un muro Trombe con ventilador equipado. En el estudio, el ventilador comenzó cuando la calefacción de la habitación deseada y la temperatura de la separación entre el cristal y la pared superaron la temperatura ambiente por más de 10 [°C]. Los resultados indicaron que un ventilador mejora el rendimiento del muro Trombe hasta en un 8%.

Otra simulación, que fue validado por una prueba de campo, se llevó a cabo por Jie *et al* [28] en la eficiencia de un muro Trombe con paneles fotovoltaicos integrados, con y sin ventilación en la University of Science and Technology of China. El estudio determinó que el ventilador reduce la temperatura interna en 0.5 [°C] y reduce la temperatura de las celdas fotovoltaicas en 1.28 [°C]. Además, se observó que un ventilador puede reducir la temperatura de las celdas fotovoltaicas en 1.28 [°C] entre las 7:00 y 17:00 [hr], el cual causa que las celdas fotovoltaicas aumenten su eficiencia. Sin embargo, basado en la revisión realizada por los autores, la mayoría de las investigaciones realizadas en esta área depende exclusivamente en modelaciones computacionales y su validez no ha sido totalmente abordada.

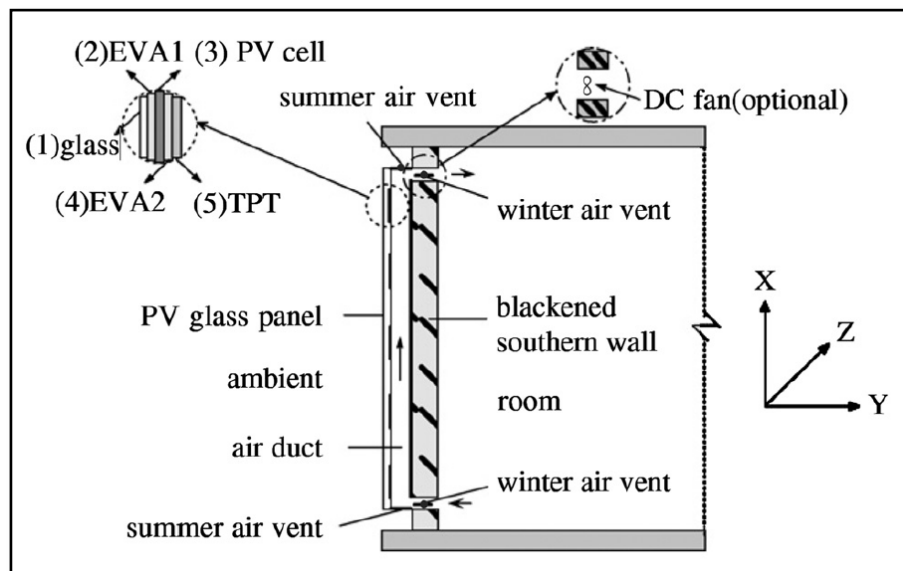


Figura 2.12: Muro Trombe con paneles fotovoltaicos y ventiladores. [28]

2.4.3.3 Efecto del Tamaño

El tamaño del muro Trombe, o más precisamente, la relación entre el área del muro Trombe y el área total de la pared se ha propuesto como un parámetro de eficiencia del muro Trombe. Basado en una investigación realizada por Jaber *et al.* [29] en una típica casa de Jordania que fue modificada mediante un muro Trombe, la relación entre el área del muro Trombe a la zona de la pared (α) tiene un efecto directo sobre la eficiencia térmica. Si (α) = 20%, el muro Trombe puede ahorrar hasta 22.3 % de calefacción auxiliar de energía anualmente. Sin embargo si (α) = 37 %, el muro Trombe podrá ahorrar hasta 32.1 % de calefacción auxiliar de energía al año. Para (α) mayores de 37%, la cantidad de ahorro será casi insignificante (Figura 2.13). En otras palabras, en el diseño de un muro Trombe, la proporción de área óptima del muro Trombe es 37%.

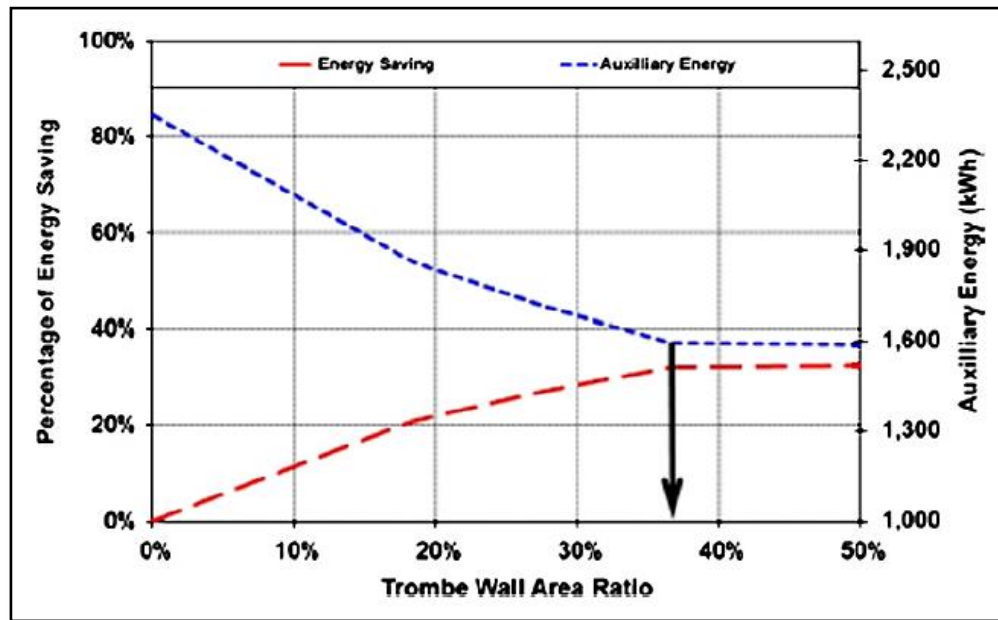


Figura 2.13: Ahorro de energía basado en el tamaño de la pared solar. [29]

2.4.3.4 Efectos del Grosor y Color

Generalmente, el grosor óptimo de un muro Trombe está relacionado con la latitud, el clima y la pérdida de calor [30]. El espesor de la masa es un parámetro que contribuye a la eficacia de los muros Trombe. Por ejemplo, con hormigón hay un desfase de 120 a 150 (min) para la entrega de calor del exterior al interior por cada 10 (cm) de espesor. Con un muro Trombe muy grueso, el calor requiere demasiado tiempo para llegar al interior, que causa malestar térmico para los ocupantes del edificio. En este sentido, en la India, Agrawal *et al.* [31] han propuesto un muro Trombe hecho de hormigón con 30-40 (cm) de espesor para obtener resultados óptimos.

Con respecto a los efectos del color, en Turquía, Ozbalata y Kartal [32] emplean un método “unutilisability” para determinar los efectos de tres colores en el rendimiento de los muros Trombe. Los colores incluyen oscuro, natural y claro. Pared de ladrillo, hormigón y concreto

aireado (esterilizado) fueron utilizados como el material principal de la masa térmica. El estudio reveló que la ganancia de calor anual osciló de 20.5% a 7.1% para el ladrillo, 26.9% a 9.7% para el hormigón y 13.0% a 4.3% para el concreto aireado, de acuerdo al color de la superficie.

Solar wall colour	Annual solar heat gain %		
	Reinforced concrete	Brick	Autoclaved Aerated concrete
Dark colour	26.9	20.5	13.0
Natural colour	20.2	16.4	7.9
Light colour	9.7	7.1	4.3

Tabla 2.1: Efectos de colores en el rendimiento de un muro Trombe. [32]

2.4.3.5 Efectos de Aislamiento

Un muro Trombe clásico posee baja resistencia térmica y pierde una gran cantidad de calor por la noche. En climas calientes y sobre todo en edificios bien aislados, los muros Trombe podrían funcionar como fuente de ganancia de calor no deseado y sobrecalentamiento debido a la transferencia de calor inversa. Para evitar la transferencia de calor inversa, deben aislarse adecuadamente los muros Trombe. Hace 15 años, un británico investigó este problema con un programa de CFD validado experimentalmente [33]. El estudio sugiere que un aislamiento adecuado es necesario para maximizar la tasa de ventilación de un edificio integrado con muros Trombe durante el verano. Además propone que el interior del muro Trombe debe estar aislado.

Otra investigación empírica se llevó a cabo en un edificio residencial en Alcona, centro de Italia. El estudio utilizó una simulación que emplea el software “Energy Plus”. El objetivo era analizar los efectos del aislamiento en el muro Trombe [20]. Se compararon los resultados de las simulaciones de un muro Trombe normal y un muro Trombe súper aislado. Los resultados mostraron que la demanda de energía de calefacción por temporada para un muro Trombe normal fue 58.33 (kWh/m^2). Sin embargo, el mismo parámetro para un muro Trombe súper aislado fue 16.21 (kWh/m^2), que es aproximadamente el 28% del resultado del muro Trombe anterior. Para el enfriamiento, los resultados fueron lo contrario. Para un muro Trombe normal, la cantidad de energía requerida fue aproximadamente 9.19 (kWh/m^2) y para un muro Trombe súper aislado fue 23.31 (kWh/m^2) aproximadamente.

Sin embargo Zalewski *et al.* [34] cree que la eficiencia del aislamiento en muros Trombe depende de muchas variables. Zalewski sugirió que la utilidad del aislamiento en un muro Trombe debe ser investigado por separado, según el tipo de muro Trombe y la ubicación.

2.4.3.6 Efectos de los Materiales de la Pared

El tipo de material utilizado para construir un muro Trombe contribuye de forma importante a la eficiencia del almacenamiento de calor de la pared, convección y conducción. Un grupo de académicos Argelinos utilizan la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el análisis de una habitación situada en Bechar, Algeria [35]. Llegaron a la conclusión de que la masa de pared (volumen de la pared) es la parte más crucial de un muro Trombe clásico. Del mismo modo, Zalewski *et al.* [34] encontró que el material del muro Trombe es determinante en la capacidad de almacenamiento térmico. Se realizó un estudio experimental mediante la sustitución de un muro de metal mezclado con parafina y un muro de hormigón. Los resultados revelaron que una pared de hormigón reduce la masa de almacenamiento en un 90% y aumenta la eficiencia del sistema en más de 20%. Aumentar el peso y el volumen de un muro Trombe acrecienta la capacidad de almacenamiento térmico de las paredes. Sin embargo, este aumento excesivo no es deseable para los arquitectos e ingenieros estructurales.

Los materiales utilizados para recubrir la masa de pared (volumen de pared) se considera otro parámetro importante. Por lo tanto, es importante el estudio de los efectos de los materiales de revestimiento en el rendimiento general de los muros Trombe. Para solucionar este problema, un grupo de académicos de la Universidad de Nigeria [36] investigaron los efectos de una gama de valores de la capa de absorción de revestimiento sobre la eficiencia de un muro Trombe dado. El estudio numérico reveló que los materiales de revestimiento con una alta absorción mejoran la capacidad de almacenamiento del muro Trombe. Una investigación similar se llevó a cabo por Nwosu *et al.* [37] para la región ecuatorial, donde analizó el equilibrio en la transferencia de calor a través de un muro Trombe. El estudio encontró que los materiales de recubrimiento altamente absorbentes mejoran la capacidad de almacenamiento del muro y mejora la eficiencia del sistema en general.

2.4.3.7 Efectos del Acristalamiento

El uso de materiales de acristalamiento adecuados es otro tema importante en el diseño de un muro Trombe. La vidriería no solo es importante, el material, el espesor y el número de capas de vidrios son factores relevantes. Normalmente el acristalamiento es simple o doble de acuerdo con Stazi *et al.* [10] en Italia. El doble acristalamiento mejora el funcionamiento del muro Trombe. En Canadá, Richman *et al.* [38] introdujeron un nuevo tipo de acristalamiento, que utiliza una película de recubrimiento de baja emisividad, pulverizado sobre vidrio enchapado. El acristalamiento aumenta la eficiencia del muro Trombe reduciendo la radiación.

Una simulación realizada por Zalewski *et al.* [34] en Trapees (longitud: 2°01', latitud: 48°46') y Carpentras (longitud: 5°03', latitud: 44°08'), estudio los efectos de los materiales de acristalamiento en el rendimiento de un muro Trombe. Los resultados revelaron que el uso de un doble acristalamiento de baja emisión incremento la energía absorbida. La cantidad alcanzada fue

de 242% en los muros Trombe no ventilados, 193% en muros Trombe clásicos, 188% en muros Trombe aislados y 217% en los muros Trombe compuestos. Además el estudio revelo que los efectos de los materiales de acristalamiento dependen de la longitud y latitud de la ubicación de los muros Trombe. Por esta razón, Trappes mostro cambios más significativos en comparación a Carpentras.

Capítulo 3

Dinámica de Fluidos Computacional

En este capítulo se menciona la teoría y ecuaciones gobernantes utilizados para resolver los problemas de transferencia de calor y masa. Se mencionan las ecuaciones gobernantes a utilizar, modelos de turbulencia y radiación asociados al problema. Por último se nombra los métodos de resolución que se utilizaran en ANSYS Fluent 17.1.

3.1 Transferencia de Calor por Convección

En transferencia de calor por convección, los parámetros adimensionales son los siguientes: el número de Reynolds, definido como la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas, el número de Nusselt Nu , definido como la relación entre la transferencia de calor por convección y conducción, el número de Prandtl, que relaciona la difusividad de momentum y la difusividad térmica, y el número de Stanton St , que mide la relación entre la transferencia de calor a la capacidad térmica de un fluido;

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad Nu = \frac{Lh}{k} \quad (3.1)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad St = \frac{h}{c_p \rho u} \quad (3.2)$$

$$Nu = Re \cdot Pr \cdot St \quad (3.3)$$

Donde L es la longitud característica, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, k es la conductividad, C_p es la capacidad calorífica, μ es la viscosidad dinámica y U es la velocidad del aire.

Para flujos completamente desarrollados entre placas paralelas de ancho w y profundidad l , donde $w \ll l$, el diámetro hidráulico d , es:

$$L = 2w \quad (3.4)$$

3.2 Flotabilidad

Los flujos impulsados por la flotabilidad o convección natural ocurren cuando los cambios de temperaturas que ocurren en un fluido causan cambios en la densidad correspondiente. El flujo puede ser inducido debido a la fuerza gravitacional que actúa sobre un fluido en una región de diferente densidad. El número de Grashof mide la relación entre la fuerza de flotación y la de viscosidad;

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (3.5)$$

Donde ν es la viscosidad dinámica, L es la longitud y β es el coeficiente de expansión térmica;

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (3.6)$$

La importancia de la flotabilidad en convección mixta (natural y forzada) puede ser determinada por el número de Grashof y Reynolds:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta\Delta TL}{\nu^2} \quad (3.7)$$

Cuando esta relación es mayor o igual a la unidad, se espera que las fuerzas de flotación contribuyan fuertemente al flujo. Cuando esta proporción es mucho menor que la unidad, las fuerzas de flotación pueden ser insignificantes. En la convección natural, la importancia de la flotabilidad puede ser determinada por el número de Rayleigh:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.8)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3 \rho}{\mu \alpha} \quad (3.9)$$

Donde α es la difusividad térmica:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.10)$$

En general la transición de turbulencia ocurre sobre el rango de $10^8 < Ra < 10^{10}$.

Cuando se resuelven los campos de flujo con fuerzas de flotación, la aproximación de Boussinesq se aplica a menudo. La aproximación de Boussinesq indica que la densidad del aire es constante, excepto cuando aparecen en términos multiplicados por la aceleración debido a la gravedad. Esta es una simplificación común para los flujos impulsados por la flotabilidad, es decir, la convección natural. En términos apropiados, la densidad del aire se convierte en una función de la temperatura [39];

$$\rho = \rho_o[1 - \beta(T - T_o)] \quad (3.11)$$

Donde ρ_o y T_o son la densidad y temperatura de operación. Esta aproximación es válida para variaciones de densidades, específicamente cuando;

$$\beta(T - T_o) \ll 1 \quad (3.12)$$

3.3 Método de Volúmenes Finitos

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por sus siglas en inglés: Computational Fluid Dynamics, es una herramienta útil para modelar sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones, combustión, etc. CFD ha sido una destacada herramienta de diseño y análisis en la industria aeroespacial durante décadas, especialmente para la aerodinámica. Ahora es una herramienta utilizada en áreas como la electrónica, turbomaquinas, ciencias atmosféricas, calefacción y ventilación [39].

En edificios, CFD es una herramienta que proporciona una opción para simulaciones de sistemas complejos sin la necesidad de experimentos físicos.

En este trabajo se utilizara el software comercial ANSYS 17.1. CFD ANSYS Fluent contiene 3 elementos principales: Pre – procesamiento, resolvidor, y post-procesado.

i. Pre – procesamiento

El pre-procesamiento consiste en la creación del dominio computacional (geometría), generación de los elementos del volumen de control (mallado) y definición de las condiciones de borde.

Las ecuaciones gobernantes en el fluido son resueltas en cada nodo para cada celda o volumen de control en la malla. La malla a menudo define el recurso computacional (tiempo, hardware) requerido para resolver el dominio. En general, se requieren mallas más finas en áreas del dominio donde se espera que el flujo cambie más significativamente. Definir el dominio y generar una malla apropiada puede requerir generalmente más de la mitad de la cantidad de tiempo y trabajo gastado en un problema dado.

ii. Resultados

El método de volúmenes finitos es fundamental para la mayoría de software que utilizan CFD, en este caso ANSYS Fluent. El algoritmo básicamente involucra 3 pasos: integrar las ecuaciones gobernantes en un volumen de control individual, discretizando las ecuaciones dentro de un sistema de ecuaciones algebraicas y finalmente resolver dichas ecuaciones usando un método iterativo.

iii. Post Procesado

Graficar los resultados son un componente importante en el análisis de datos. Líneas, vectores, contornos, movimiento de partículas y animaciones son elementos que se pueden obtener en ANSYS Fluent.

3.3.1 Ecuaciones Gobernantes

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se basa en el método de volúmenes de control para resolver los fenómenos físicos que gobiernan la dinámica de fluidos, lo que conlleva a resolver las ecuaciones correspondientes al transporte de masa, momentum y energía en todas las direcciones. Para esto se toma un dominio de cálculo y se divide en múltiples volúmenes de control tal que cada volumen rodea a un punto de la malla.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido Newtoniano compresible son las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía. La ecuación de conservación de masa es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.13)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, $\vec{u} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ es el vector de velocidad y ∇ es la divergencia.

$$\nabla(\rho u) = \text{div}(\rho u) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \quad (3.14)$$

La ecuación de continuidad establece que la tasa o cambio de masa en el tiempo en un elemento de fluido es igual a la tasa neta o flujo másico dentro o fuera del elemento.

La ecuación de momento está basado en la segunda ley de Newton, el cual establece que la tasa de cambio en un elemento de fluido es igual a la suma de las fuerzas sobre el elemento;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = \sum F_x \quad (3.15)$$

Donde F_x es la fuerza por unidad de volumen en la dirección x y D es la derivada total. Estas fuerzas pueden ser debido a la presión, gravedad o fuerzas de corte debido a los efectos viscosos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, en x, y, z están descritas como;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (3.18)$$

Donde p es la presión, μ es la viscosidad del fluido, $\nabla u \nabla v \nabla w$ son los vectores gradiente y $S_{Mx} S_{My} S_{Mz}$ con los términos de generación de momentum para cada dirección.

La ecuación de energía está basada en la primera ley de la termodinámica, la cual establece que el cambio de la tasa de energía para un elemento de fluido es igual al calor neto agregado al elemento más el trabajo hecho sobre el elemento. La energía total E es:

$$E = i + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (3.19)$$

En otras palabras, se puede escribir como;

$$\left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{incremento} \\ \text{de la energía} \\ \text{en un elemento} \\ \text{de fluido} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{tasa de trabajo} \\ \text{hecho por} \\ \text{superficie} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{tasa de calor} \\ \text{agregado debido} \\ \text{a la conducción} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{tasa de calor} \\ \text{perdido debido} \\ \text{a la disipación} \\ \text{viscosa} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{generación} \\ \text{de calor interna} \end{array} \right)$$

3.4 Turbulencia

Un fluido con flujo laminar es aerodinámico y ordenado. Las líneas de flujo son paralelas entre sí sin interrupción entre ellas en forma de mezcla o remolinos. El número de Reynolds es un número adimensional utilizado como criterio para distinguir un flujo laminar de uno turbulento;

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3.20)$$

Donde v y L son la velocidad y longitud respectivamente, μ es la viscosidad dinámica y ρ es la densidad del fluido. El número de Reynolds es la relación entre la fuerza de inercia y las fuerzas viscosas, por tanto, flujos con bajos números de Reynolds son altamente viscosos, y números altos de Reynolds son turbulentos.

Para flujos entre superficies paralelas, la dimensión característica es el doble de la distancia entre superficies, y el flujo es laminar para $Re < 1400$. Para convección natural en edificios donde las velocidades de aire son bajas ($v \approx 0.1 \frac{m}{sg}$) y distancias largas ($L > 1 \text{ mt}$), se espera que el flujo sea transicional o completamente turbulento debido a la baja viscosidad del aire ($\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$).

Un flujo turbulento es caracterizado por un movimiento caótico y aleatorio de un fluido, además este tipo de flujos pueden contener remolinos turbulento. Los remolinos causan que las regiones separadas por una gran distancia se unan, permitiendo que el calor, la masa y el momento sean transferidos eficazmente. Esencialmente, hay un alto grado de mezcla en los flujos turbulentos.

La velocidad v se descompone en un tiempo promediado U y el componente de fluctuación u' . Este es llamado la descomposición de Reynolds;

$$u = U + u' \quad (3.21)$$

Donde por definición, el tiempo promedio de u' , \bar{u}' es cero.

$$\bar{u}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u'(t) dt \equiv 0 \quad (3.22)$$

La descomposición de Reynolds es aplicado para todo cantidad de transporte escalar ϕ . Sustituyendo la nueva expresión por la velocidad en las ecuaciones instantáneas de momento (Navier Stokes) se obtiene el promedio de las ecuaciones de Navier Stokes [39], llamado RANS³. La ecuación de momento turbulento en la dirección x es;

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \Delta U) - \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (3.23)$$

La densidad y presión también con fluctuantes debido a la turbulencia de p en ρ en la ecuación RANS. La ecuación de transporte escalar para flujos turbulentos es;

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla(\rho \phi U) = -\nabla(\Gamma_\phi \Delta U) - \left[\frac{\partial(-\rho \overline{\phi' u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \overline{\phi' v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \overline{\phi' w'})}{\partial z} \right] + S_\phi \quad (3.24)$$

Donde Γ_ϕ es el coeficiente de difusión para ϕ .

3.5 Modelos de Turbulencia

Para elegir un modelo de turbulencia depende de gran medida de la aplicación y el recurso computacional disponible. La aplicación más común y extensamente utilizada está basada en la ecuación RANS. La ecuación RANS permite que las fluctuaciones sean promediadas en el tiempo de manera que cada pequeña fluctuación de alta frecuencia no se resuelva directamente. La ecuación RANS se basa en las ecuaciones instantáneas de Navier Stokes con términos adicionales donde incluyen los componentes fluctuantes. Estas variables adicionales requieren un modelo de turbulencia para ser resueltas.

3.5.1 Modelo Estándar $k - \epsilon$

El modelo estándar $k - \epsilon$ es el modelo de turbulencia más utilizado y verificado para simulaciones prácticas en ingeniería. Este es un modelo semi empírico que utiliza 2 ecuaciones

³ Reynolds Averaged Navier Stokes, por sus siglas en ingles.

que envuelven la ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación de turbulencia ϵ . El modelo es válido solo para flujos totalmente turbulentos. La energía cinética turbulenta por unidad de masa está definida como;

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.25)$$

Entonces la energía cinética instantánea por unidad de masa en un flujo turbulento es;

$$k(t) = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) + \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.26)$$

La ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta sigue la misma forma que las ecuaciones de transporte para la energía;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho k U) = \nabla \left(\frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \nabla \phi \right) + 2\mu_\tau S_{ij} - \rho \epsilon \quad (3.27)$$

Donde S_{ij} es la velocidad de deformación del fluido y μ_τ es la viscosidad turbulenta que se refiere a la constante de difusión turbulenta $\Gamma_t = \frac{\mu_\tau}{\sigma_k}$. Los dos últimos términos representan la tasa de producción y disipación de k respectivamente

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.28)$$

La tasa de disipación de turbulencia por unidad de masa es;

$$\epsilon = 2 \frac{\mu}{\rho} \overline{s'_{ij}} \quad (3.29)$$

Donde;

$$s'_{ij} = \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.30)$$

El término k y ϵ son relacionados a través de la viscosidad turbulenta μ_τ ;

$$\mu_\tau = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.31)$$

La hipótesis de Boussinesq es usada en los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$ para relacionar los esfuerzos de Reynolds con los gradientes de velocidad (velocidades de deformación) como;

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_\tau \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.32)$$

Se sabe que el modelo $k - \epsilon$ estándar es pobre modelando flujos con grandes deformaciones.

3.5.2 Modelo RNG $k - \epsilon$

El modelo RNG $k - \epsilon$ es una modificación del modelo $k - \epsilon$ utilizando la teoría de grupos de normalización. Una ventaja particular del modelo RNG $k - \epsilon$ es que incluye una fórmula diferencial para la viscosidad que refleja los efectos de números de Reynolds bajos. Sin embargo, esta opción requiere que la región de la pared se resuelva, por lo tanto no tiene mucha ventaja en mallas gruesas que requieren un análisis especialmente en paredes.

El modelo RNG $k - \epsilon$ requiere un 10% a 15% más de tiempo computacional debido a un mayor grado de no linealidad y otras complejidades con las ecuaciones gobernantes [39].

3.5.3 Modelo $k - \omega$ Estándar

El modelo $k - \omega$ estándar está basado en 2 ecuaciones de transporte de energía para la energía cinética turbulenta k y la tasa específica de disipación ω , representada aproximadamente por la relación de k y ϵ . La ecuación de transporte para ω es muy similar a la ecuación de transporte para ϵ , excepto que tiene una forma diferente a la tasa de producción y las ecuaciones de términos de disipación y constantes diferentes.

Este modelo es empírico que incluye una corrección de número de Reynolds baja cuando se usa con una malla fina. En ANSYS Fluent, el modelo $k - \omega$ utiliza funciones mejoradas de pared como el tratamiento de pared cercana. Este modelo es similar en tiempo computacional al modelo $k - \epsilon$ estándar. Tanto este modelo con el anterior son capaces de modelar mallas gruesas y tienen solución con números de Reynolds bajos. Por lo tanto, ambos modelos son adecuados para mallas gruesas y finas.

3.5.4 Efectos de la Flotabilidad en los Modelos de Turbulencia

Cuando la gravedad y el gradiente de temperatura están presentes simultáneamente, los modelos $k - \epsilon$ representan la generación de k y ϵ debido a la flotabilidad. La generación de turbulencia debido a la flotabilidad es:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.33)$$

Donde Pr_t es el número de Prandtl turbulento y g_i es el componente del vector gravitatorio en la i -ésima dirección. El coeficiente de expansión térmica β está definido como:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.34)$$

Para gases ideales, la ecuación (3.33) queda de la siguiente forma:

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3.35)$$

A partir de las ecuaciones de transporte para k , la energía cinética turbulenta tiende a aumentar ($G_b < 0$). En ANSYS Fluent, los efectos de la flotabilidad en la generación de k se incluyen cuando se tiene un campo de gravedad y temperatura (o densidad) distinto de cero y en el caso de ϵ se ajusta G_b a cero en la ecuación de transporte.

3.6 Modelos de Radiación

El aire es transparente a la radiación infrarroja y no participa en el intercambio radiativo de calor, por lo tanto, solo se considerara la radiación entre superficies. En general, la transferencia de calor radiativo es importante en una simulación con un flujo de calor grande en comparación con el flujo de calor debido a la convección o conducción. Normalmente esto ocurre cuando las temperaturas superficiales son altas debido a la dependencia del cuarto orden de la temperatura. En la convección natural, los flujos de calor radiativos son bajos pero comparables en tamaño a los flujos de calor convectivos, ya que el flujo impulsado por la flotabilidad tiene bajas velocidades. Por tanto se espera que la radiación entre superficies de los edificios, especialmente entre las superficies acristaladas y las superficies internas (donde existen grandes diferencias de temperatura) sea significativa.

El poder de emisión E ($\frac{W}{m^2}$) a una superficie en la temperatura absoluta T (K) esta dado por;

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (3.36)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann's , $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ($\frac{W}{m^2 K^4}$), y la emisividad de superficie $\epsilon < 1$.

La fracción de radiación incidente sobre la superficie que es reflejada, absorbida o transmitida se denota por al reflectancia ρ^* , absorcion α^* y transmision τ^* , respectivamente, donde;

$$\rho^* + \alpha^* + \tau^* = 1 \quad (3.37)$$

En general, la emisividad depende de la longitud de onda de la radiación. Para superficies opacas ($\tau^* = 0$) a una temperatura constante, la cantidad de radiación que será absorbida y emitida es igual. En este caso al igual que las superficies grises, la absorptividad es igual a la emisividad;

$$\varepsilon = \alpha^* \quad (3.38)$$

ANSYS Fluent ofrece una selección de modelos de radiación, p1, S2S, y DO entre otros, describiremos 2 modelos los cuales se ha demostrado que representa mejor la radiación con superficies semitransparentes [39].

3.6.1 Modelo P1

El modelo P1 asume la radiación como gris. También asume que todas las superficies son difusas lo que significa que la radiación incidente se refleja igualmente en todas las direcciones (isotrópicas). El modelo P1 es uno de los menos costosos computacionalmente para representar la radiación pero no es válido para espesores ópticos inferiores a uno; solo los modelos DTRM y DO son apropiados para ese tipo de casos. Además solo el modelo DO puede modelar paredes interiores y exteriores transparentes como el vidrio. Por lo tanto solo se describirá el modelo DO.

3.6.2 Modelo DO

La ecuación gobernante para la transferencia de calor por radiación se denomina *la ecuación de transferencia radiativa (RTE)*. La RTE contiene integrales de intensidad sobre una geometría esférica. El modelo DO (*Discrete Ordenates*) resuelve la RTE sobre un número finito de ángulos sólidos discretos cuya solución depende de la intensidad de radiación incidente en una superficie, que no es inicialmente conocida. Por lo tanto, es necesario un enfoque iterativo donde las condiciones de contorno se actualicen continuamente. En general, no existe acoplamiento entre la radiación y el campo de flujo, ya que el intercambio de radiación térmica es efectivamente instantáneo en comparación con la tasa de intercambio de calor debido a la conducción o convección. En este caso, las ecuaciones de energía y radiación se resuelven por separado de forma iterativa. El modelo DO tiene una opción para acoplar radiación y energía, por lo que las ecuaciones de energía y radiación se resuelven simultáneamente. Sin embargo, el método acoplado no es adecuado para aplicaciones en las que el espesor óptico sea inferior a diez [39].

El modelo DO se puede utilizar para toda la gama de espesores ópticos. Puede resolver problemas de radiación de superficie a superficie, así como aquellos con medios participantes. Para problemas con medios no participantes, la radiación influye indirectamente en el campo de flujo cambiando las condiciones de contorno en las superficies. El modelo DO puede usarse para modelar radiación gris y no gris utilizando un modelo discretizado de banda gris, el cual divide

esencialmente el espectro de radiación en N bandas de longitud de ondas iguales. Cada banda se supone gris.

3.7 Solar Load Model

ANSYS Fluent proporciona un modelo de carga solar (Solar Load Model) con un algoritmo de trazado de rayos solares para calcular las cargas en un dominio. Está disponible solo para casos en 3 dimensiones y puede utilizarse para simulaciones transientes. La herramienta utiliza el vector de dirección del rayo solar basado en el tiempo dado del día, la fecha, longitud y latitud [39]. El modelo de carga solar no modela la emisión de las superficies, por lo que debe ir acompañado de un modelo de radiación (por ejemplo DO).

El algoritmo que se ocupa para el vector de rayos solares es uno que es capaz de trazar un camino a través del dominio hasta que alcance una superficie opaca. Realiza un análisis de sombreado para determinar con precisión que superficies serán sombreadas de la radiación incidente. La radiación incidente en una superficie opaca externa es completamente ignorada; ósea no contribuye a ninguna ganancia de calor. La radiación incidente que pasa a través de una pared semitransparente será atenuada y la capacidad de absorción y transmisividad de una pared semitransparente se especifican basándose en el modelo de dos bandas. El flujo de calor se calcula entonces en cada superficie adyacente a la zona del fluido, hay que tener en cuenta que las superficies que participan en la carga solar pueden especificarse individualmente. El flujo de calor se aplica a través de un término fuente en la ecuación de energía para una celda computacional.

Debido a que el modelo de rayos solares en sí mismo no es un modelo de radiación completo, el componente reflejado de la radiación incidente primario sobre una superficie dentro del dominio se distribuye igualmente en todas las superficies que participan en el modelo. En otras palabras, el componente reflejado no se traza directamente a otras superficies. Para un dominio que es altamente acristalado, una parte significativa del componente reflejado de una superficie opaca interna se perderá a través del acristalamiento. En este caso, la fracción de dispersión, es decir, la fracción de la radiación reflejada es distribuida uniformemente entre todas las superficies participantes menores que el valor predeterminado (el cual es 1).

3.8 Tratamiento Cerca de las Paredes

La región en la pared cercana es la región más crítica para un modelo preciso. Es la región donde el momento y la energía cambian más rápidamente. En convección natural, la pared cercana es la región donde ocurre la transferencia de calor, y donde las fuerzas de flotación impulsan el flujo. Se sabe que el flujo es generalmente turbulento [40]. Los modelos turbulentos pueden modelar con precisión el flujo medio lejos de la pared donde el flujo es totalmente turbulento. Sin embargo, en la región de la pared cercana se requiere un modelo diferente.

La región de la pared cercana puede dividirse en la capa interna y la capa exterior. La propia capa interior contiene tres regiones importantes; la subcapa viscosa, la capa amortiguadora y la capa turbulenta. La capa interna constituye el 10 – 20% del espesor total de la región de la pared próxima. La capa externa está libre de efectos viscosos. En la capa interna, la superficie de la pared existe la condición de no deslizamiento donde la velocidad de flujo es cero. Debido a la interacción, el flujo muy próximo a la pared es altamente viscoso y casi laminar. Esta capa se denomina subcapa viscosa. Existen 2 métodos para modelar la región de pared cercana. En el primer método, la región de pared próxima a la viscosidad afectada no se resuelve y en su lugar se usan las funciones de pared empíricas para modelar la región sin embargo, estas funciones de pared pueden no ser exactas para los flujos impulsados por la flotación con bajos números de Reynolds. El segundo método es usar un modelo de dos capas para resolver completamente la región de la pared cercana con una malla fina en las paredes. Esto requiere sustancialmente más recursos computacionales.

3.9 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde que están disponibles para la transferencia de energía dentro y fuera del dominio son cinco;

- Flujo de calor fija
- Temperatura fija
- Transferencia de calor por convección
- Transferencia externa de calor por radiación
- Transferencia combinada externa de radiación y convección

La conducción de las paredes puede manejarse de dos maneras, en primer lugar, se puede mallar la pared sólida permitiendo que las ecuaciones de difusión (conducción) se resuelvan en el dominio sólido con una condición de límite térmico definida en la superficie externa de la pared sólida. Alternativamente, se puede modelar una pared delgada mediante la cual la pared es modelada como una superficie única con un espesor definido. A continuación se utiliza una ecuación de conducción estable en una dimensión (1D) para calcular la conducción a través de la pared. La Figura 3.1 muestra un esquema de una pared delgada con un grosor especificado Δx ;

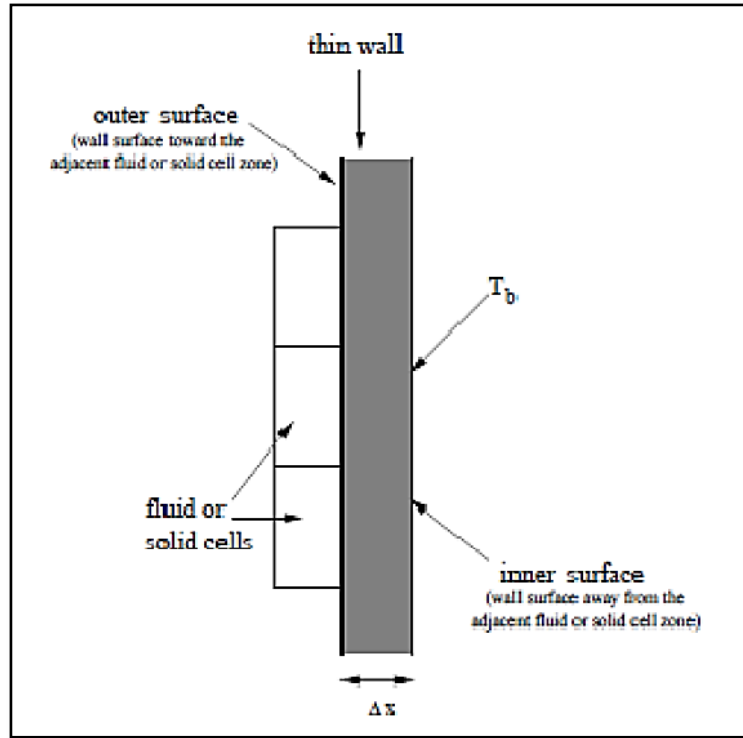


Figura 3.1: Esquema de pared delgada. [39]

El modelo de pared delgada también tiene una opción llamada “Shell Conduction” que calcula la conducción de calor dentro de la pared (a lo largo de la superficie), así como a través de la pared.

La temperatura en la condición de borde se calcula como el flujo de calor basado en una temperatura fija;

$$Q_w = h_f(T_w - T_f) + Q_{rad} \quad (3.39)$$

Donde h_f es el coeficiente de transferencia de calor local en el fluido y la condición de borde T_w es la temperatura del muro, T_f es la temperatura del fluido cercana a la pared y por último Q_{rad} es el flujo de calor radiativo sobre la cara interna de la pared. El coeficiente de transferencia de calor local h_f es calculado por ANSYS Fluent basado en las condiciones de flujo (turbulencia, velocidad, temperatura) en la pared cercana.

La condición de borde para la transferencia de calor por convección calcula el flujo de calor de la pared basado en el coeficiente de transferencia de calor externo h_{ext} ;

$$Q_w = h_{ext}(T_{ext} - T_w) = h_f(T_w - T_f) + Q_{rad} \quad (3.40)$$

En términos prácticos, significa que el coeficiente de transferencia de calor externo es realmente el coeficiente de transferencia de calor efectivo que tiene en cuenta tanto la convección como la

radiación. La condición de borde para la radiación externa determina el flujo de calor basado en la emisividad de la pared externa ε_{ext} y la temperatura del entorno T_{ent} ;

$$Q_w = \varepsilon_{ext}\sigma(T_{ent}^4 - T_w^4) = h_f(T_w - T_f) + Q_{rad} \quad (3.41)$$

La condición de borde combinada para la radiación y convección es simplemente la combinación de ambas condiciones;

$$Q_w = h_{ext}(T_{ext} - T_w) + \varepsilon_{ext}\sigma(T_{ent}^4 - T_w^4) = h_f(T_w - T_f) + Q_{rad} \quad (3.42)$$

En este caso, el coeficiente de transferencia de calor externo h_{ext} considera la convección solo porque la radiación está determinada explícitamente.

3.10 Métodos de Resolución

3.10.1 Acoplamiento de Presión Velocidad

Una gran dificultad en el modelamiento descrito en el punto anterior es como modelar el acoplamiento entre presión y velocidad. En el caso donde el gradiente de presión es conocido, el método se puede realizar sin problemas, pero en la mayoría de los casos de relevancia en ingeniería, la presión es una incógnita que se busca encontrar, al igual que la velocidad y temperatura. Por lo tanto, se hace necesario introducir un modelo que permita acoplar el cálculo de la presión con la velocidad.

En ANSYS Fluent, tanto el algoritmo SIMPLE⁴ estándar como el algoritmo SIMPLEC⁵ están disponibles [39]. Estos modelos consisten en un método iterativo donde se asume un campo de presiones y se procede a resolver las ecuaciones discretizadas de Navier Stokes, posteriormente corrigiendo el campo de presiones inicial hasta llegar a una convergencia. SIMPLE es el valor por defecto, pero muchos problemas se beneficiarán del uso de SIMPLEC, particularmente debido al aumento de la sub-relajación que puede aplicarse, como se describe a continuación.

Para problemas relativamente no complicados (flujos laminares sin modelos adicionales habilitados) en los que la convergencia está limitada por el acoplamiento presión-velocidad, a menudo se puede obtener una solución convergente más rápidamente usando SIMPLEC. Con SIMPLEC, el factor de sub-relajación de la corrección de presión se fija generalmente en 1,0, lo que ayuda en la aceleración de la convergencia. En algunos problemas, sin embargo, el aumento de la corrección de la presión bajo la relajación a 1,0 puede conducir a la inestabilidad debido a la asimetría de malla alta. Para estos casos, necesitará usar uno o más esquemas de corrección de asimetría, usar un valor ligeramente más conservador de sub-relajación (hasta 0.7), o utilizar el algoritmo SIMPLE. Para flujos complicados que implican turbulencia y/o modelos físicos

⁴ Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations.

⁵ SIMPLE-Consistent.

adicionales, SIMPLEC mejorará la convergencia sólo si está limitada por el acoplamiento presión-velocidad. A menudo será uno de los parámetros de modelados adicionales que limita la convergencia; En este caso SIMPLE y SIMPLEC darán tasas de convergencia similares

3.10.2 Algoritmo SIMPLE

El algoritmo SIMPLE para las ecuaciones derivadas de la presión, es un algoritmo iterativo basado en el cálculo del campo de presión en una celda. El proceso se inicia con una suposición en el campo de presión p^* ;

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.43)$$

Donde p es el campo de presión y α_p es el coeficiente de relajación para la presión.

Las ecuaciones discretas del momento se resuelven usando p^* para determinar las velocidades u^* , v^* y w^* . Estas velocidades se utilizan para resolver p^* , donde el término de corrección de presión se utiliza para corregir la presión y las velocidades. Los términos de corrección pueden inducir a la divergencia en la solución si no se tiene unos parámetros de relajación adecuados. Un factor de relajación debe estar dentro del rango de 0 a 1 y debe ser cuidadosamente elegido. Si α es demasiado bajo, la solución puede converger muy lentamente, si α es demasiado alto, la solución puede oscilar o incluso divergir.

3.10.3 Algoritmo SIMPLEC

El algoritmo SIMPLEC es una modificación del algoritmo SIMPLE el cual no se ha demostrado que sean más exactos o que logre una convergencia más rápida [39]

3.10.4 Algoritmo PISO

El algoritmo PISO⁶ es parte de la familia del algoritmo SIMPLE con la principal diferencia que posee un paso de corrección adicional en el algoritmo. Para problemas estacionarios, el algoritmo PISO no ha demostrado ninguna ventaja significativa sobre el algoritmo SIMPLE o SIMPLEC cuando los factores de relajación se eligen correctamente. Para problemas transientes, el algoritmo PISO puede aumentar la convergencia con un nivel mucho más bajo de iteraciones. Así el algoritmo PISO es adecuado para problemas transientes especialmente con largos pasos de tiempo.

⁶ Pressure Implicit with Splitting of Operators.

3.10.5 Algoritmo COUPLED

El algoritmo COUPLED resuelve el momentum y presión basado en la ecuación de continuidad simultáneamente o de forma acoplada. Como resultado de este acoplamiento, la convergencia se alcanza más rápido que otros algoritmos, pero requiere de 1.5 - 2 veces más de memoria durante el proceso de solución. El algoritmo COUPLED es también adecuado para cálculos transientes, en particular cuando los pasos de tiempo son largos y las mallas son gruesas.

3.11 Discretización Espacial

Cantidades de transporte escalares, como la temperatura, energía, energía cinética turbulenta, etc. son determinadas para cada nodo o celda en un espacio discretizado. La solución en el nodo o cada celda es calculada por interpolación basada en la resolución de las ecuaciones de flujo en cada cara de la celda. El esquema de discretización determina la función de interpolación utilizada que puede ser de orden lineal o superior.

Los esquemas de discretización deben poseer propiedades fundamentales para asegurar que es físicamente realista, estas son; conservación, limitación y transporte. Conservación se refiere a los flujos convectivos y radiativos de una propiedad de transporte general Φ fuera de una cara de una celda igual a la siguiente cara de la celda adyacente. Limitación y transporte también deben satisfacerse. Limitación se refiere a que la solución en un nodo está limitada por los valores en cada una de sus caras (condición de borde). Transporte se refiere al transporte de las propiedades debido a la convección relativa a la difusión se contabiliza correctamente.

En ANSYS Fluent, poseen los siguientes esquemas de discretización; *The First Order Upwind*, *Second Order Upwind*, *Power Law*, *Quick and Third Order MUSCL*. Seleccionar el esquema de discretización apropiado es especialmente importante cuando las mallas son más gruesas y por tanto, existen gradientes mayores a través de las celdas en el volumen de control.

El esquema *Upwind* es uno de los más simples y más usados en la discretizaciónes. Es más estable y logra mejor convergencia que métodos de orden superior. Por lo tanto, cuando el flujo no está alineado con las líneas de la malla, puede ser inexacto. Esta falsa difusión en los valores de transporte ha demostrado ser lo suficientemente grande como para dar resultados no físicos. Por lo tanto para mallas triangulares/tetraédricas, donde el flujo nunca está alineado paralelamente a la malla, el uso de *Second-Order Upwind* provee resultados más precisos.

El esquema *Quick*⁷ utiliza una interpolación cuadrática entre los nodos de las celdas y caras. Este esquema minimiza la falsa difusión pero es menos estable computacionalmente y requiere más recursos computacionales. Por último, este esquema puede ser más preciso para flujos rotativos.

⁷ Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics.

3.12 Simulaciones Transientes

En las simulaciones en estado estacionario, el término de la dependencia del tiempo en la ecuación gobernante es cero. En las simulaciones transientes, las ecuaciones gobernantes son discretizadas tanto en el espacio como en el tiempo. La discretización espacial es idéntica a la del caso estacionario. La discretización temporal está basada en el tiempo, el cual implica integrar las ecuaciones gobernantes a lo largo de un paso de tiempo Δt .

En general, una propiedad escalar $\varphi(t)$ puede usarse para evaluar la propiedad $\varphi(t + \Delta t)$ usando una discretización temporal de primer orden. En una discretización temporal de segundo orden, $\varphi(t)$ y $\varphi(t - \Delta t)$ son usadas para evaluar las propiedades en el siguiente paso de tiempo.

Existen 2 métodos, el implícito y explícito. En el método explícito, el valor desconocido en cada celda $\varphi(t + \Delta t)$ es determinado basándose en el valor existente en el paso de tiempo anterior $\varphi(t)$ y los valores existentes en las celdas colindantes. La discretización de primer orden está dada por:

$$\varphi(t + \Delta t) = \varphi(t) + \Delta t \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} \quad (3.44)$$

En el método explícito, el valor desconocido depende solo de valores conocidos, por lo que los valores desconocidos en cada uno de estos pueden ser resueltos secuencialmente. Debido a la naturaleza de la discretización explícita, se establece un límite superior estricto para el tamaño de paso de tiempo. Esta es una limitación importante en el método explícito y no es recomendable generalmente para problemas transientes. El método explícito es generalmente usado para problemas relacionados con choques y solo está disponible con el método de resolución basado en la densidad.

En el método implícito, el valor desconocido en cada celda $\varphi(t + \Delta t)$ es determinado basándose en el valor existente en el paso de tiempo previo $\varphi(t)$ y valores desconocidos en las celdas colindantes.

$$\varphi(t + \Delta t) = \varphi(t) + \Delta t \frac{\partial \varphi(t + \Delta t)}{\partial t} \quad (3.45)$$

El método implícito es incondicionalmente estable para cualquier tamaño de paso de tiempo, por lo tanto, pequeños pasos de tiempos son necesarios para obtener resultados precisos. El método más general para resolver problemas transientes utiliza el esquema de avance de tiempo iterativo. En cada paso de tiempo, el solucionador se ejecuta para múltiples iteraciones hasta el criterio de convergencia se cumpla. El problema está cuando se avanza al siguiente paso de tiempo y se resuelve nuevamente. En ANSYS Fluent, el paso de tiempo debe ser elegido de modo que el número de iteraciones por paso de tiempo este entre 5 y 10. Incrementar el paso de tiempo requiere más iteraciones por paso de tiempo mientras que disminuir el paso de tiempo requiere menos.

3.13 Aproximación de Boussinesq

La aproximación de Boussinesq indica que la variación de densidad solo es importante en el término de la flotabilidad (ρg) y puede ser relegada en el resto de la ecuación, donde la ecuación de Navier Stokes queda de la siguiente manera:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) \mathbf{I} \right) + \rho g \quad (3.46)$$

Donde u es la velocidad, p es la presión y ρ es la densidad del fluido. μ es la viscosidad dinámica del fluido, \mathbf{I} es la matriz identidad y g es la aceleración debido a la gravedad. La temperatura y la densidad dependiente de la presión han sido reemplazadas por una densidad constante ρ_0 , excepto en el término de la fuerza en el cuerpo que representa la fuerza de flotación. Por otra parte, la ecuación de continuidad:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot u = 0 \quad (3.47)$$

Se reduce a la forma incompresible, $\nabla \cdot u = 0$, porque la magnitud de $\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt}$ es pequeña con respecto a los gradientes de velocidad $\nabla \cdot u$. De lo anterior, el término $-\frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) \mathbf{I}$ en la ecuación de Navier Stokes es igual a cero. También se supone que la viscosidad μ es constante. El término difusión $\nabla \cdot (\mu (\nabla u + (\nabla u)^T))$ puede reescribirse como $\mu \nabla^2 u$, de donde tenemos que:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (3.48)$$

El término de flotabilidad u puede ser reescrito como $(\rho_0 + \Delta\rho)g$, donde $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ representa la variación de densidad con respecto a la densidad de referencia ρ_0 . Por tanto tenemos que:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + (\rho_0 + \Delta\rho)g \quad (3.49)$$

Para evitar tener que evaluar la densidad del fluido en base a la temperatura local, el término de flotabilidad $\Delta\rho g = (\rho - \rho_0)g$ puede reescribirse como $(\rho - \rho_0)g = -\rho_0 \beta (T - T_0)g$, donde β es el coeficiente de expansión térmica. Para gases ideales, $\beta = 1/T_0$ y $-\rho_0 \beta (T - T_0)g$ se convierten en $-\rho_0 (T - T_0)/T_0 g$. Una vez más, esto solo es válido cuando la temperatura y, por lo tanto, las variaciones de densidad son pequeñas:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho_0 g - \frac{\rho_0 (T - T_0)}{T_0 g} \quad (3.50)$$

3.14 Análisis Matemático

Los problemas de transferencia de calor en flujo de aire interior, convección y radiación son gobernados por las ecuaciones de conservación para masa, momentum en cada dirección del flujo y energía. El flujo de aire es considerado predominantemente turbulento [40].

Ecuación de conservación de masa para flujos de aires en 3D:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.51)$$

Donde ρ ($\frac{kg}{m^3}$) es la densidad del aire, y u, v, w son los componentes de velocidad en las direcciones x, y, z respectivamente. Para un flujo de aire incompresible, la densidad del aire es constante, entonces la ecuación (4.1) puede reescribirse como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.52)$$

La ecuación de Navier Stokes para flujos incompresibles en 3D con viscosidad constante es:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + X \quad (3.53)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + Y \quad (3.54)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + Z \quad (3.55)$$

Donde X ($X = 0$), Y ($Y = -\rho g$) y Z ($Z = 0$) son proyecciones de la fuerza del cuerpo F en las direcciones x, y, z respectivamente, por ultimo, P es la presión.

La ecuación de conservación de energía es aplicada para el aire, y dado como promedio es de la siguiente forma [40]:

$$\frac{\partial \rho \bar{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{h}_s}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) = -\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho (\bar{u}_i \bar{h}_s - \bar{u}_i \bar{h}_s)] \quad (3.56)$$

Donde los componentes de la velocidad en t es temperatura, h_s es la entalpia y λ es la conductividad térmica.

Debido a la turbulencia natural del flujo de aire, es necesario introducir la descomposición de Reynolds dentro de la ecuación de continuidad:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.57)$$

Donde \bar{u}_i es el promedio del conjunto de velocidad para flujos estacionarios y u_i' es la fluctuación de velocidad.

Las ecuaciones gobernantes para flujos turbulentos son:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.58)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \bar{F}_i \quad (3.59)$$

Donde τ_{ij} es el esfuerzo de viscosidad:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.60)$$

De (3.57) y (3.60) obtenemos la ecuación para flujos turbulentos, *Reynolds-averaged Navier Stokes equation* (RANS), por sus siglas en inglés:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial (2\mu s_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} + \rho \bar{F}_i \quad (3.61)$$

Donde $\rho \overline{u_i' u_j'}$ es el tensor de esfuerzo de Reynolds.

Se utilizó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ el donde las ecuaciones de transportes son resueltas para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación ε .

Por último, hay que tener en cuenta la ecuación de difusión de calor, la cual puede expresarse de la siguiente manera [40]:

$$\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[k(T) \text{grad}(T)] \quad (3.62)$$

Donde utiliza solo la temperatura como única variable dependiente.

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se definirán los parámetros del problema, dimensiones, características de geometría y mallado, condiciones de borde entre otras cosas más. Se especificaran los modelos y métodos de solución que se usaran en la simulación y por último, definir el procedimiento necesario para la validación de resultados.

4.1 Planteamiento del Problema

Tal como ya se ha señalado, en este trabajo se propone construir un modelo de muro Trombe tipo “escalonado” para satisfacer las necesidades de calefacción en el norte de Chile. Para esto, se realizan simulaciones fluidodinámicas con distintos tipos de dimensiones para determinar la eficiencia térmica en la vivienda, obteniendo la distribución de temperaturas y velocidades. Por último se analizará la eficacia de la masa térmica en un día completo.

Para realizar las simulaciones se utilizará el software ANSYS Fluent 17.1 el cual utiliza el método de volúmenes finitos [39]. Las dimensiones exteriores se mantendrán fijas. Se variarán las dimensiones interiores del muro y el espacio de aire entre ellos.

4.2 Ubicación Geográfica de la Vivienda

La vivienda a modelar, será en la comuna de Putre (Latitud: $18^{\circ}11'49.17''S$ - Longitud: $69^{\circ}33'35.02''O$), región de Arica y Parinacota. Posee una radiación promedio anual de $900 \left(\frac{w}{m^2}\right)$. La ubicación geográfica y día a analizar es necesario para obtener el vector posición del sol y el ángulo de incidencia de este. Esto se obtiene indirectamente aplicando el modelo de carga solar que proporciona ANSYS Fluent 17.1.

Debido a la latitud de la zona geográfica, la idea de un muro Trombe “Escalonado” cobra importancia debido a la posición del sol en este sector (ángulo de incidencia), la cual en invierno es alrededor de 45° . En cambio para el solsticio de verano llega a 87° aproximadamente. Este diseño proporcionaría una mejor captación solar, y por ende, mejor rendimiento respecto a la calefacción de la vivienda.

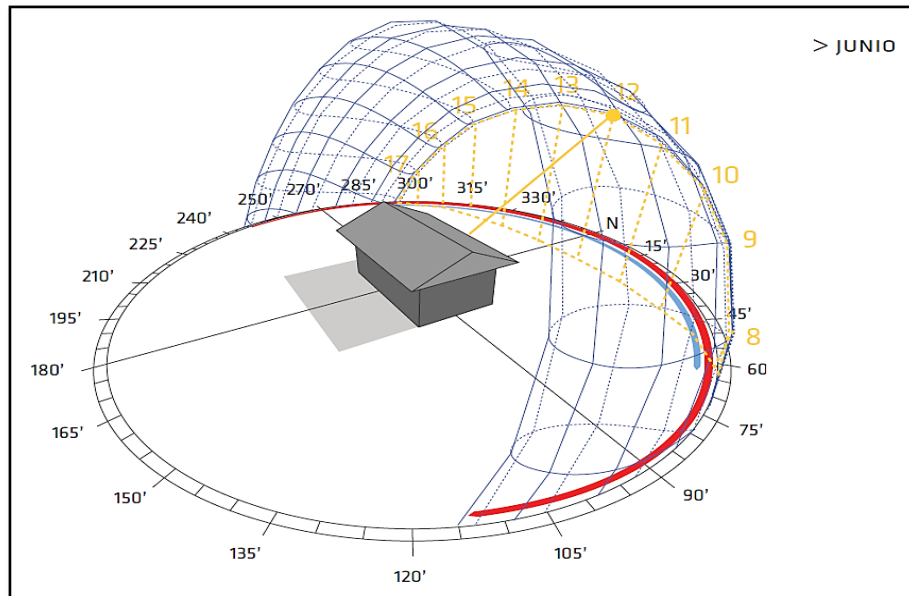


Figura 4.1: Posición del sol en el solsticio de invierno para una latitud de 20° . [15]

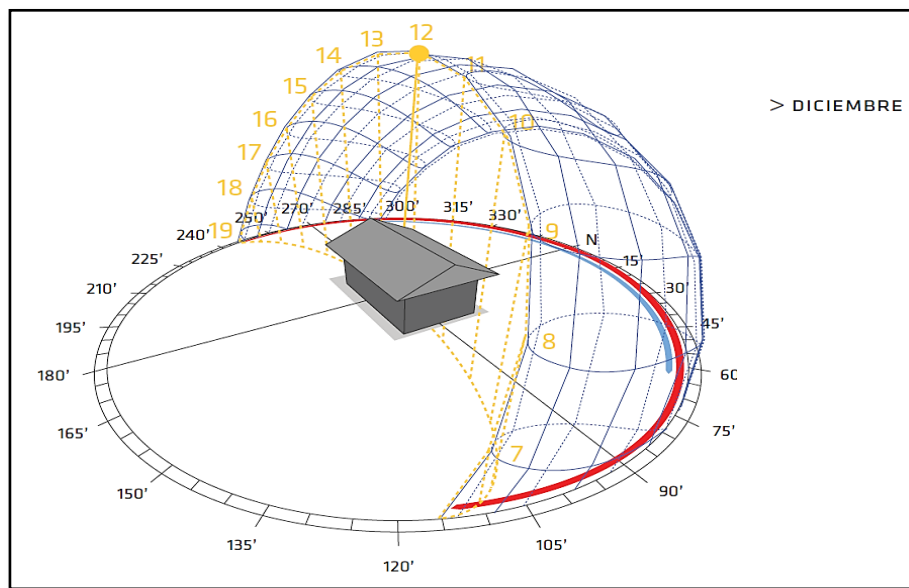


Figura 4.2: Posición del sol en el solsticio de verano para una latitud de 20° . [15]

Por otro lado, la localidad de Putre posee solo un 15% de nubosidad promedio mensual para el mes de diciembre y solo un 5% para el mes de julio⁸, lo cual es beneficioso para la captación de radiación solar sobre el sistema.

⁸ Según el Explorador Solar. <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>

4.3 Geometría

El muro Trombe Escalonado es la propuesta que se desarrollara en este trabajo. Se caracteriza por tener una geometría que abarque la mayor captación de energía solar. A diferencia de un muro Trombe tradicional, este tipo de muro Trombe posee varios muros verticales acompañados de un espacio de aire que permitiría una mejor recirculación hacia la vivienda (Figura 4.3). Posee una inclinación de 45° respecto a su horizontal para optimizar el área y la captación solar.

Las dimensiones exteriores se mantendrán constantes y solo se variaran las dimensiones interiores.

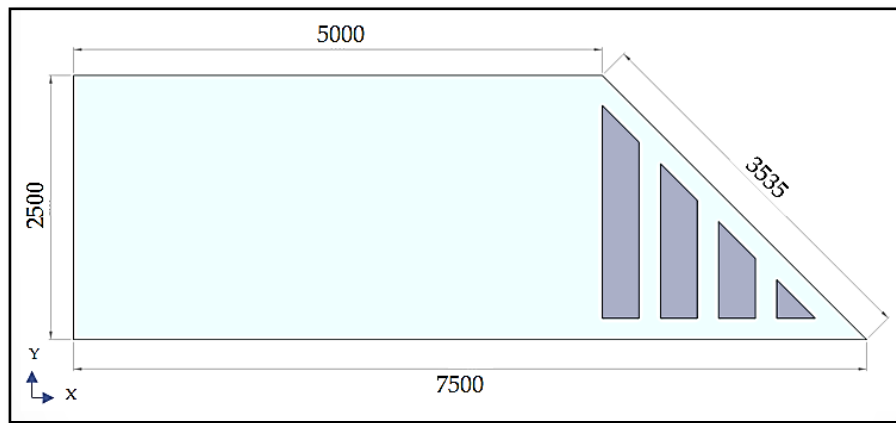


Figura 4.3: Geometría de un muro Trombe Escalonado, Caso N° 9. Medidas en milímetros.

Cabe mencionar que todas las geometrías tendrán 20 (cm) de profundidad en el eje z, para así utilizar el modelo de carga solar en ANSYS Fluent [39].

Como se mencionó anteriormente, se analizan 18 casos, 9 de invierno y 9 de verano, con distintas dimensiones de muro y cavidad de aire, lo cual queda descrito en la siguiente Tabla:

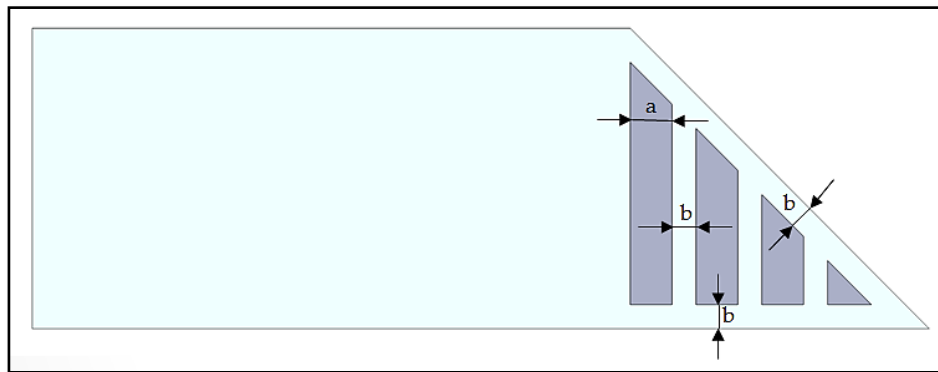


Figura 4.4: Variación de parámetros a considerar.

Tabla 4.1: Casos a analizar para distintas geometrías. Medidas en Milímetros.

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	250	250	250	300	300	300	350	350	350
b	100	150	200	100	150	200	100	150	200

4.4 Condiciones de Borde

Para determinar la distribución de temperatura en la habitación se tendrán dos condiciones de bordes diferentes para cada día a analizar. Se impondrán dos condiciones de bordes transientes en el exterior de la vivienda para simular los cambios de temperatura a lo largo del día a analizar. Los valores fueron obtenidos desde el explorador solar, tomando un día típico de enero y junio. Mediante interpolación se obtuvo la ecuación característica de la variación de la temperatura en cada día. Por último, estas funciones fueron realizadas en el lenguaje de programación C y compilada hacia ANSYS Fluent 17.1.

A continuación, la Tabla 4.2 muestra las condiciones impuestas al modelo:

Tabla 4.2: Condiciones de contorno usadas en el modelo.

	Espesor del Muro [mm]	Coefficiente Total de Transferencia de Calor [$\frac{W}{m^2 K}$]	Temperatura [$^{\circ}C$]	Emisividad externa	Emisividad interna	Tipo de radiación
Suelo	200	0.2	<i>Adiabatico</i>	0.9	0.3	opaco
Techo	200	0.25	$T_{Exterior}$	0.9	0.3	opaco
Muro izquierdo	300	0.50	$T_{Exterior}$	0.9	0.3	opaco
Vidrio	5	0.75	$T_{Exterior}$	1	1	Semi-transparente

						te
--	--	--	--	--	--	----

Los valores del coeficiente de transferencia de calor sobre las superficies fueron obtenidos desde las exigencias térmicas a elementos envolventes de la vivienda [15]. Para corroborar estos valores, se utilizaron correlaciones empíricas obtenidas desde la literatura. Más detalles en la sección anexos.

Como se mencionó anteriormente, los valores de la Tabla 4.3 se obtuvieron del explorador solar:

Tabla 4.3: Valores promedio de las temperaturas exteriores.

	7 [hr]	11 [hr]	14 [hr]	17 [hr]	19 [hr]
Enero	5	13	17	14	5
Junio	-3	5	11	6	-2

Las propiedades de los materiales a utilizar se desglosan a continuación⁹:

Tabla 4.4: Propiedades de los materiales

Material	Densidad [kg/m ³]	Calor Específico [$\frac{J}{kgK}$]	Conductividad Térmica [$\frac{W}{mK}$]	Coefficiente de Absorción [m ⁻¹]	Índice de Refracción
Aire	Gas ideal	1006,43	0,0242	0	1
Concreto	2000	960	1,5	1,7	0
Vidrio	2500	840	0,81	200	1,5
Madera	700	2300	0,173	0,4	0

4.5 Mallado

Se utilizara una malla con elementos tetraédricos. El mayor fenómeno físico se produce con la incidencia del sol sobre la pared inclinada, donde los gradientes de temperaturas son mayores. Se escogen tamaños de celdas más pequeños en esa zona de interés, dado el recurso computacional disponible.

⁹ Obtenidos desde: *The Engineering Toolbox*.

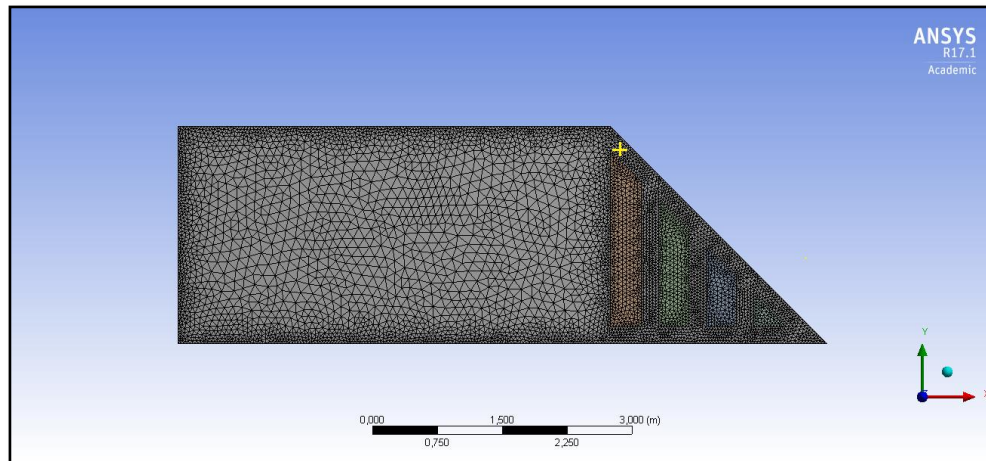


Figura 4.5: Geometría del caso N° 9 en el punto $x = 5.1$, $y = 2.4$, $z = 0.1$. Medidas en metros.

La guía de usuario de ANSYS Fluent [39] sugiere que algunas métricas cumplan ciertos requisitos para asegurar la calidad de la malla. Se recomienda que el máximo para la métrica *Skewness* sea menos a 0.8 y que la calidad ortogonal tenga un mínimo mayor a 0.2.

Con lo anterior, se realizara un estudio de sensibilidad del mallado. Para esto se llevaran a cabo simulaciones del caso N° 9 con diferentes resoluciones mediante la variación de la tasa de crecimiento de los elementos. Para cada una de estas simulaciones, se medirá la temperatura en un punto de la pared inclinada, luego se escogerá una tasa de crecimiento que genere una mayor resolución y donde los resultados de la temperatura en el punto a analizar sean independientes de los cambios de malla.

4.6 Configuración en ANSYS Fluent

Todas las simulaciones fueron realizadas en tres dimensiones, utilizando la opción doble precisión y el solucionador basado en la presión. La opción doble precisión reduce el error por redondeo, ya que utiliza dígitos más significativos. Por otra parte, ANSYS Fluent posee la opción de procesamiento paralelo, el cual permite resolver múltiples nodos en variados procesos simultáneamente lo cual incrementa la rapidez computacional y es esencial en modelos transientes. Todas las simulaciones fueron resueltas con 6 procesos paralelos.

4.6.1 Convección Natural

El modelado en convección natural en un dominio cerrado requiere que la masa de aire total sea constante. Si se utiliza un gas ideal, la densidad cambiara en función de la temperatura y la masa

no se conservara. Por otra parte, si se especifica una densidad constante para el aire, ninguna fuerza de flotación actuara sobre el flujo debido a la nula variación de densidad. La aproximación de Boussinesq permite variaciones de densidad y conserva la masa adecuadamente. Esta aproximación es válida siempre y cuando las diferencias de temperatura sean pequeñas.

4.6.2 Modelo Turbulencia y Tratamiento en paredes

En convección natural el fluido es predominantemente turbulento [40]. Se utilizó el modelo $k - \epsilon$ estándar el cual es capaz de captar los fenómenos de bajos números de Reynolds. Por otra parte, en el tratamiento en la pared cercana se utilizó la opción de pared no equilibrada, el cual se acopla mejor con mallas no estructuradas y Reynolds altos. Por último, se utilizó los efectos de la flotabilidad, la cual explica esencialmente los efectos de flotación en la disipación de energía cinética turbulenta.

4.6.3 Modelo de Radiación

El modelo DO es el único modelo de radiación con la capacidad de modelar superficies semitransparentes y por lo tanto fue seleccionado para cada simulación. Por simplicidad, todas las superficies incluyendo el vidrio se asumieron difusas, lo que significa que la radiación se refleja por igual en todas las direcciones. Por otra parte, el modelo DO utiliza el coeficiente de absorción α de la superficie semi transparente para determinar que radiación se transmite y absorbe. Se utilizó un modelo de 2 bandas que representa la banda visible $\lambda \leq 700 [nm]$ y la banda infrarroja $\lambda > 700 [nm]$.

4.6.4 Discretizaciones

La Tabla 4.5 resume los métodos de solución usados en las respectivas simulaciones. Para más detalles, consulte la sección de teoría de ANSYS 17.1 para una descripción completa de las aplicaciones.

Tabla 4.5: Métodos de solución

Propiedades	Scheme
Pressure-velocity coupling	Coupled
Gradient	Green-Gauss Node Based
Pressure	Body Force Weighted
Energy	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind

Turbulent Dissipation rate	Second Order Upwind
Discrete Ordinates	Second Order Upwind
Transient Formulation	First Order Implicit

La Tabla 4.6 resume los factores de relajación utilizados para la convergencia de la solución. Como se mencionó anteriormente, se utilizó el método COUPLED, el cual se caracteriza por su capacidad para alcanzar la convergencia más rápidamente resolviendo las ecuaciones de flujo simultáneamente.

Tabla 4.6: Factores de relajación

Propiedades	Valores
Courant Number	200
Explicit Relaxation Factor Pressure	0.75
Explicit Relaxation Factor Momentum	0.75
Density	1
Body Forces	1
K	0.8
ε	0.8
Turbulent Viscosity	1
Energy	1
Discrete Ordinates	1

4.7 Validación

Para la validación se replicará el trabajo de T. Bajc *et al.* [40], el cual es un modelamiento de una vivienda en la localidad de Serbia. Se compara la curva de temperatura en la habitación para el caso transiente. Además se obtendrán los contornos de velocidades en la habitación.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones computacionales llevadas a cabo en el software computacional ANSYS Fluent 17.1. Se explican los procesos de independización de la malla, validación del modelo y se describe el comportamiento de la temperatura en la habitación, los contornos de velocidad y la masa térmica para cada día analizado.

5.1 Mallado y Análisis de Sensibilidad

El mallado fue realizado con el módulo “*ANSYS Meshing*” incluido en ANSYS 17.1. La malla no es estructurada y contiene solamente elementos tetraédricos. En la Figura 5.1 y 5.2 se muestra una captura del mallado del dominio completo.

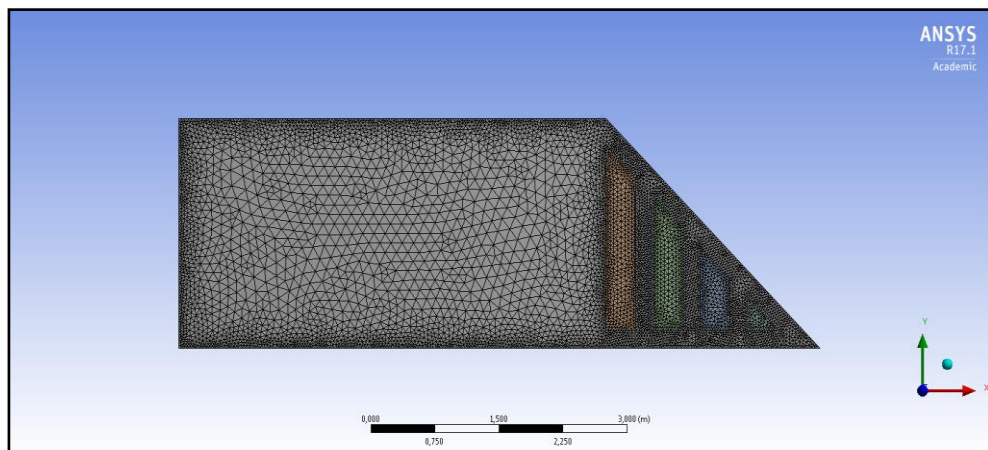


Figura 5.1: Mallado del dominio.

Como se mencionó anteriormente, se refino en las zonas donde se produce el mayor fenómeno físico, especialmente en la pared inclinada donde incide el sol. Por otra parte, como se aprecia en la imagen, la geometría es en tres dimensiones pero el modelo es bidimensional, considerando un ancho de 20 (cm). A continuación se muestran en las Figuras 5.3 y 5.4 un corte transversal a la geometría mencionada para así observar la distribución de nodos.

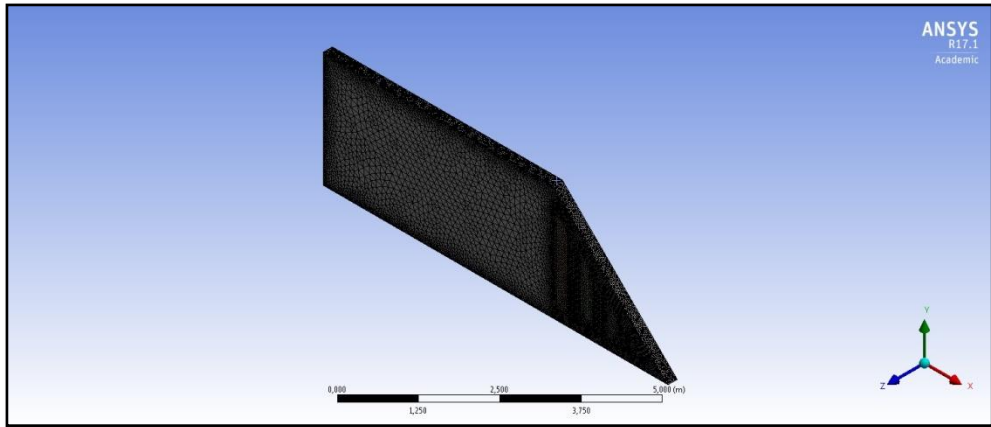


Figura 5.2: Mallado del dominio en 3 dimensiones.

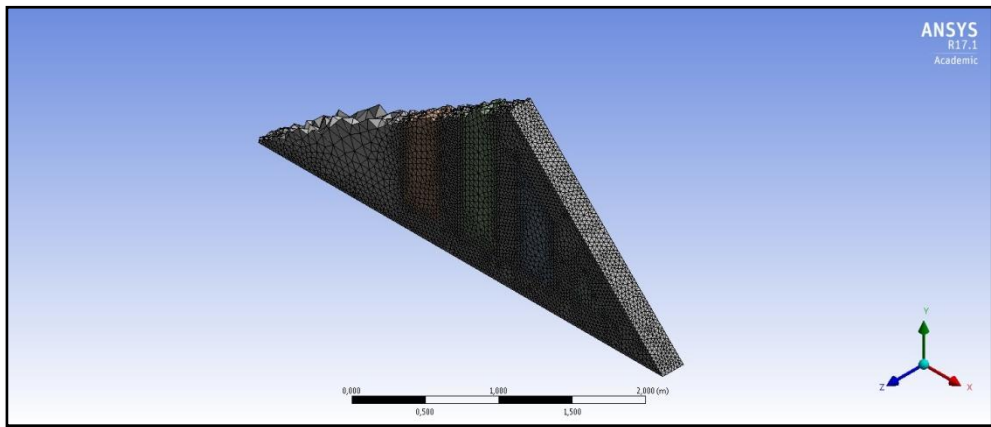


Figura 5.3: Corte transversal.

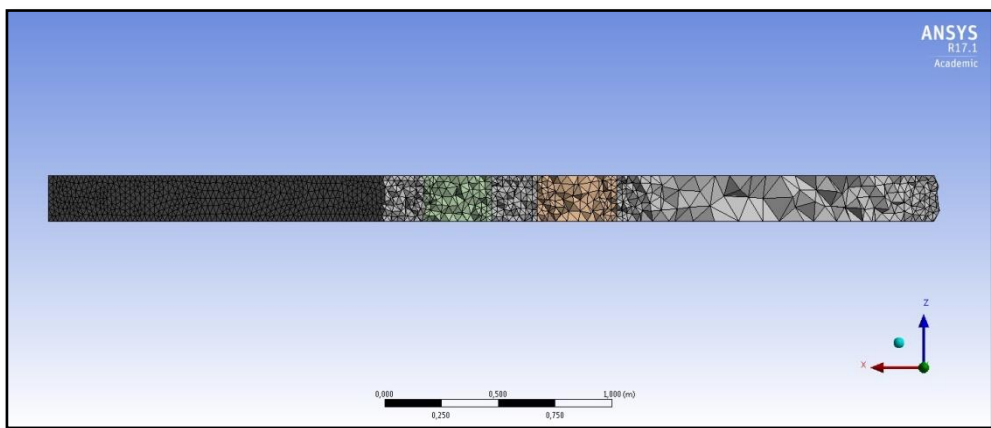


Figura 5.4: Vista Isométrica.

Se observa que los nodos no poseen dobles ramificaciones o puntos discontinuos. Esto es importante para la convergencia y la no duplicidad.

En la Tabla 5.1 se muestra el número de elementos, número de nodos y las métricas de malla más importantes. Según la guía de usuario de ANSYS [39], las métricas de Skewness no deben superar 0.8, mientras que la calidad ortogonal no debe ser menor a 0.2.

Tabla 5.1: Estadísticas de la malla.

Métrica	Valor
Elementos	181751
Nodos	32639
Skewness (máxima)	0.69881
Skewness (promedio)	0.13417
Calidad Ortogonal (mínima)	0.28161
Calidad Ortogonal (promedio)	0.85408

Como se observa en la tabla anterior, ambos criterios son cumplidos, por lo que se puede decir que la malla es de buena calidad.

En la Figura 5.5 se presentan los resultados para el análisis de sensibilidad de malla. Se aprecia claramente que sobre los 180.000 elementos, la resolución de la malla tiene muy poca influencia sobre el comportamiento de la temperatura y por tanto se justifica trabajar con una malla de 180.000 elementos.

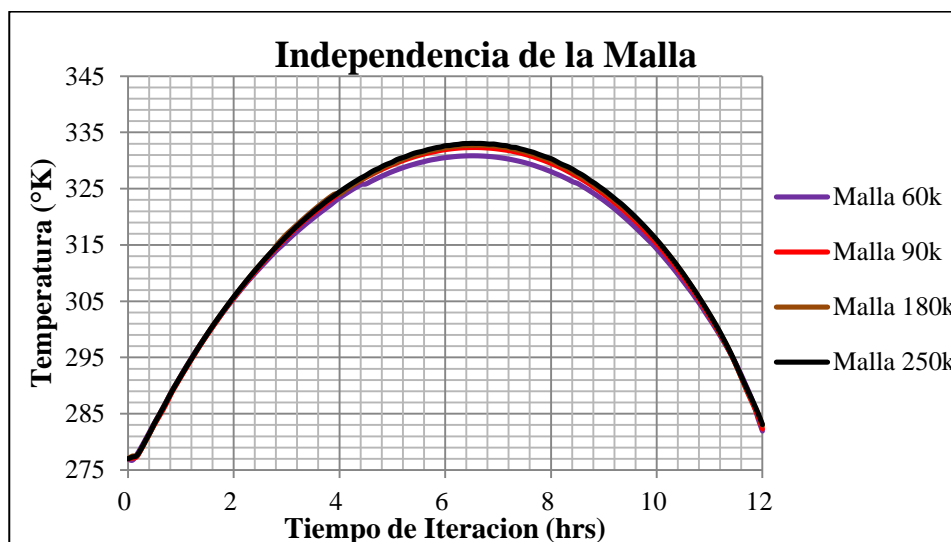


Figura 5.5: Grafico de temperatura medida en un punto fijo versus el número de elementos en los diferentes mallados. La prueba fue hecha para el caso 9. Día de verano.

5.2 Validación de resultados

Para validar los resultados del modelo CFD, se replicó el trabajo de T.Bajc *et al.* , la cual es una modelación computacional de una vivienda con muro Trombe en la localidad de Belgrade, Serbia. Se comparan la temperatura promedio en la vivienda y en el muro Trombe para el caso transiente. Además se muestra la distribución de velocidad en la habitación. La configuración de esta simulación fue similar a la utilizada en este trabajo.

En el trabajo de T. Bajc *et al.* [40] la simulación se realizó en un día típico de invierno, desde las 9 [hr] hasta las 20 [hr]. y las ventilas se mantuvieron abiertas en todo momento. El punto que se analizó para la obtención de las curvas fue en el centro de la habitación y el espacio de aire entre el muro y el vidrio.

En la Figura 5.6 se observan las curvas obtenidas mediante el modelo CFD. Existe una leve diferencia entre las curvas obtenidas, esto se puede justificar debido a que el modelo de T.Bajc *et al.* no especifica detalles, tales como el mallado utilizado, método de convergencia, bandas utilizadas en el modelo de radiación DO, entre otras. Por otra parte, desde la versión de ANSYS Fluent 13.0 se tiene que el modelo de carga solar posee errores asociados al modelo en sí.

El flujo de aire en la vivienda es impulsado por la estratificación de densidades causada por la diferencias de temperaturas en función de la altura. Después de pasar la cubierta de vidrio, la energía solar es absorbida por la masa térmica, donde parte de esta energía es transferida por conducción y el resto ingresa por las ventilas superiores por convección. Se produce un efecto “chimenea” que impulsa el aire desde el fondo hasta la parte superior del canal de aire que se encuentra entre la masa térmica y la pared vidriada. La Figura 5.7 reporta el comportamiento de las velocidades al interior de la vivienda. Se observa que los mayores gradientes de velocidad se ubican en canales superiores por donde ingresa el aire y permite la recirculación hacia la vivienda, alcanzando un valor de $0.5 \left(\frac{m}{s}\right)$.

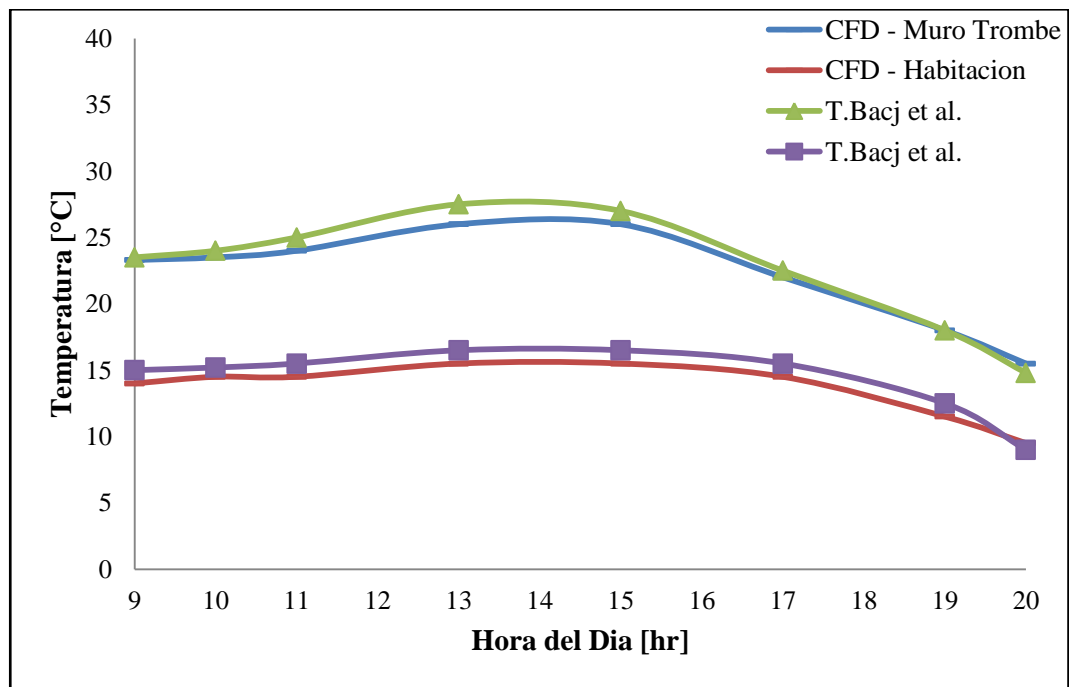


Figura 5.6: Curva obtenida por el modelo CFD, junto con la T. Bacj *et al.* [40]

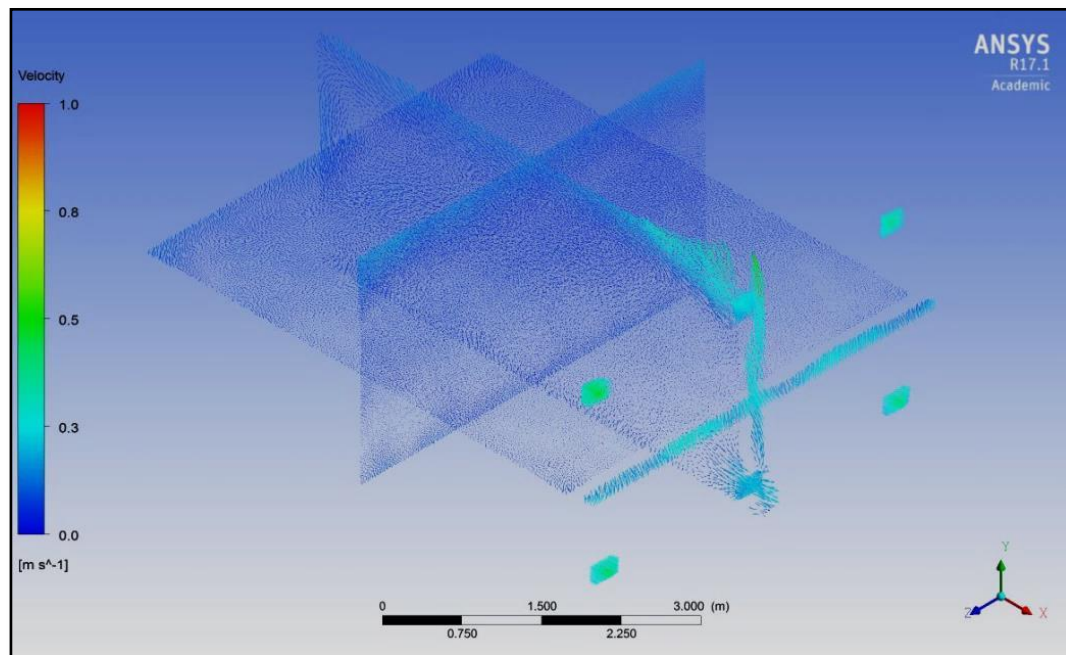


Figura 5.7: Distribución de los vectores de velocidad [m/s].

Por último, como las temperaturas al interior de la habitación junto con las velocidades son similares y poseen un bajo error, se dan por validadas las simulaciones.

5.3 Resultados invierno; Comportamiento de las temperaturas, velocidades y masa térmica

En esta sección se explicitan los resultados de las simulaciones obtenidas para un día típico de invierno en la localidad de Putre. Para evitar redundancias, se presentan las figuras más relevantes en este capítulo. Sin embargo, el resto de las figuras se encontraran al final de este trabajo, en la sección Anexos.

5.3.1 Casos N° 1, 2, 3: Muros 25-10; 25-15; 25-20

En la Figura 5.8 se observa la distribución de la temperatura al interior de la habitación, la cual es de 18 [°C] en el centro de esta. Para el caso N° 3, Figuras 5.10, 5.11 y 5.12, se aprecia la variación de temperaturas a lo largo del día. La temperatura promedio en la habitación se produce a las 14 [hr] llegando a los 20 [°C] en el centro de esta. Por otra parte, se visualiza en la Figura 5.12 una disminución de la temperatura en la habitación debido a la poca incidencia del sol y las condiciones exteriores. Por último, se aprecia claramente un aumento en la temperatura de los muros interiores, debido a la conducción de la energía ingresada al sistema, que luego va decreciendo a medida que los muros disminuyen su tamaño.

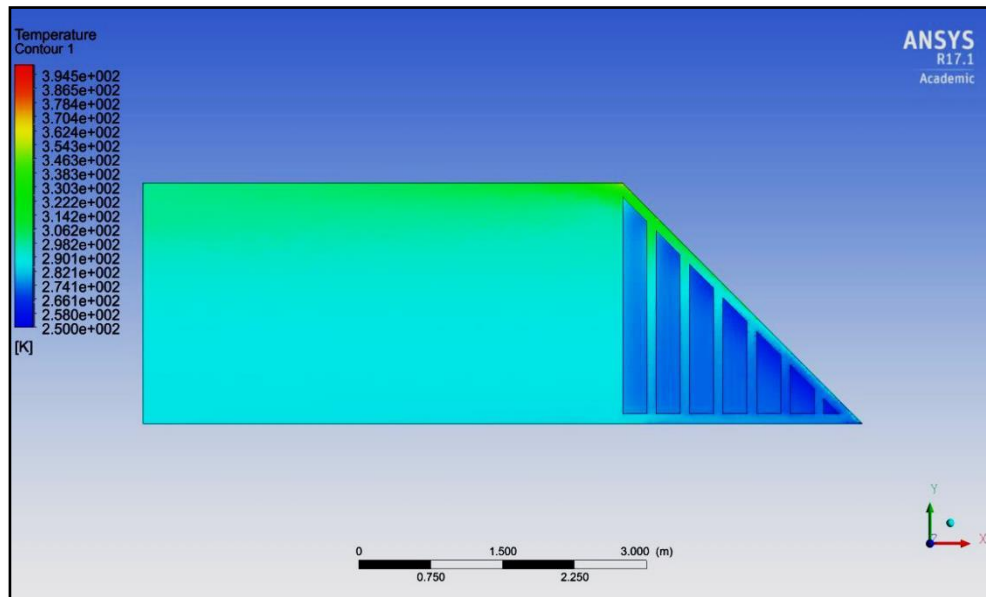


Figura 5.8: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°1.

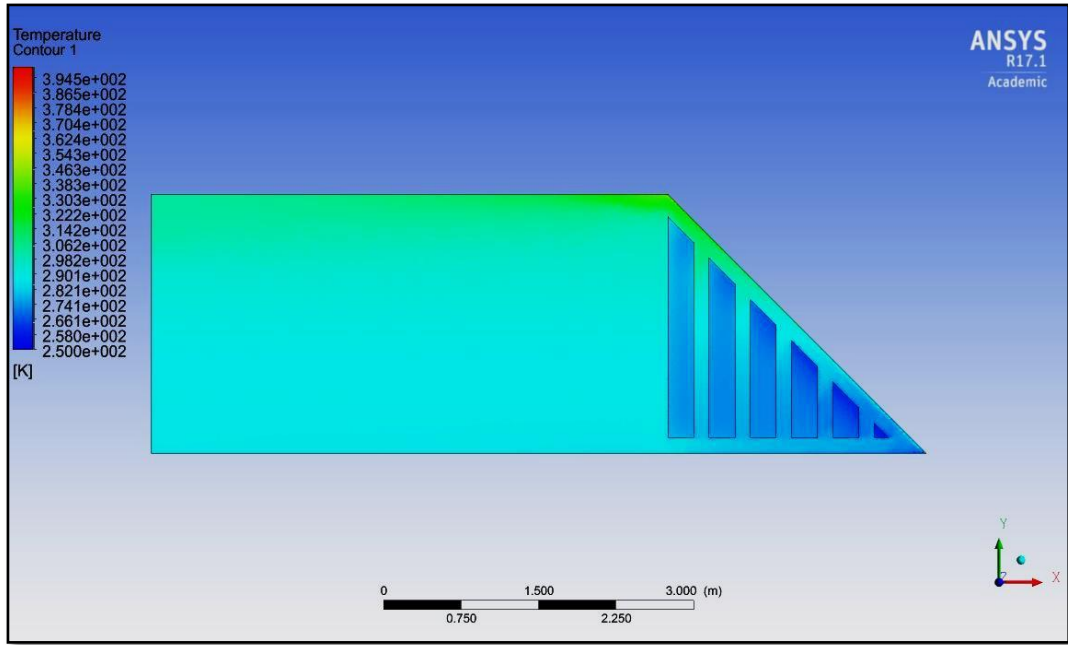


Figura 5.9: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°2.

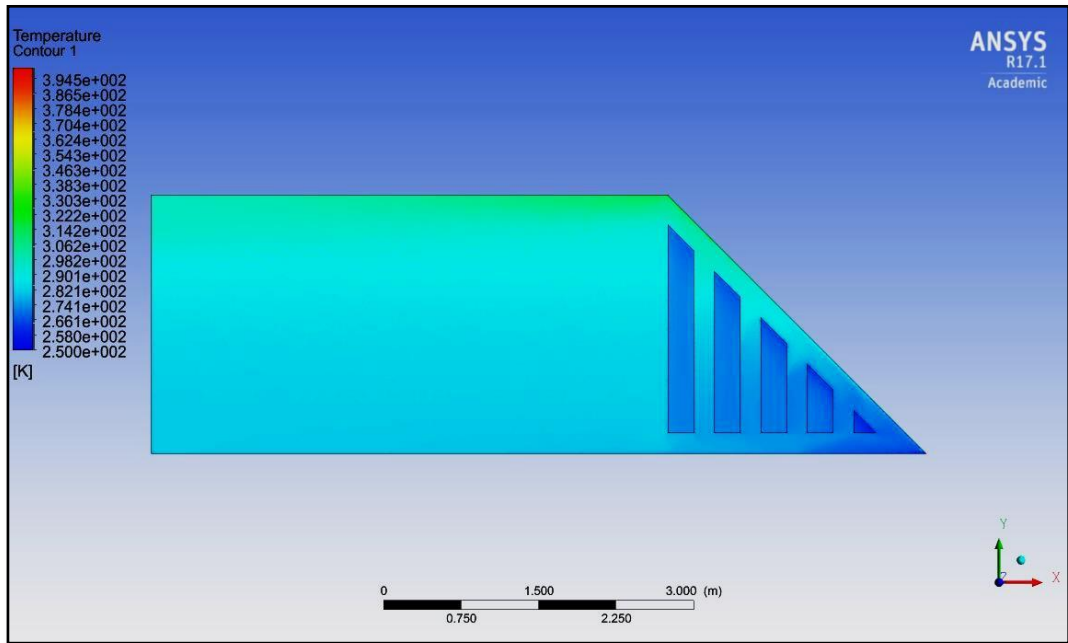


Figura 5.10: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°3.

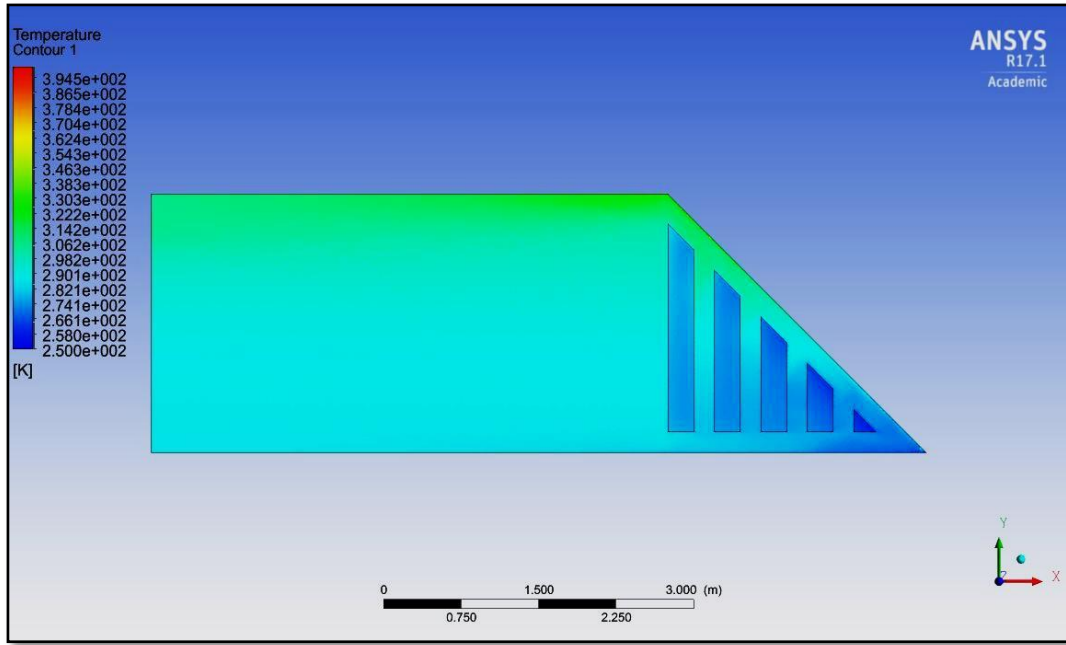


Figura 5.11: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°3.

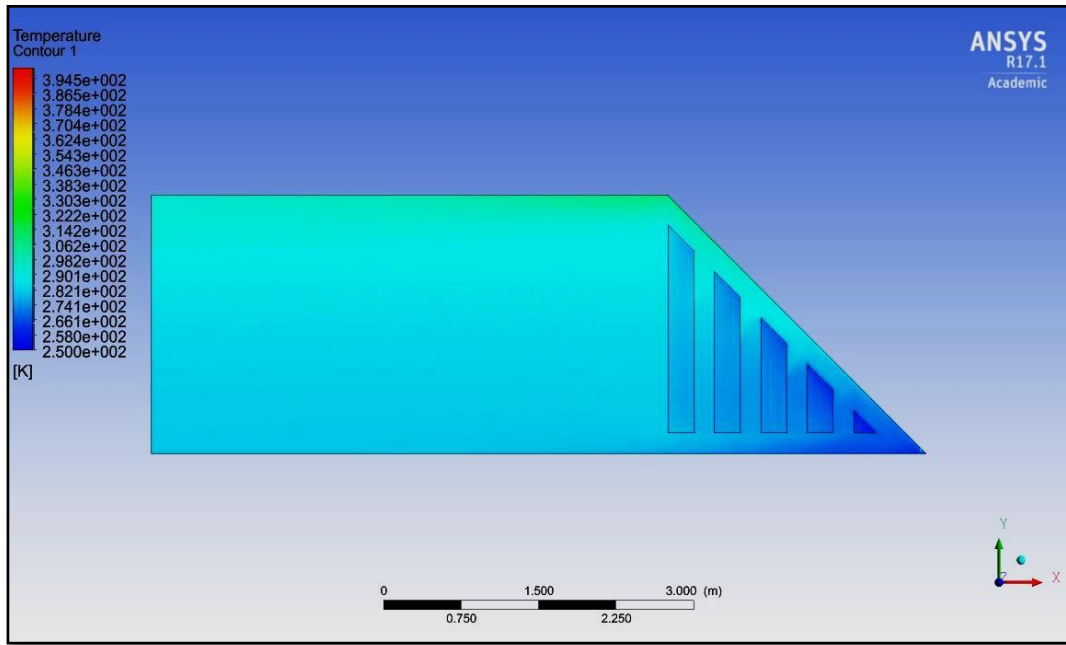


Figura 5.12: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°3.

5.3.2 Casos N° 4, 5, 6: Muros 30-10; 30-15; 30-20

En la Figura 5.13 se observa un leve incremento en la temperatura respecto al caso N°1, obteniendo una temperatura de 20 [°C] en el centro de la habitación. En las Figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se observa un aumento sostenido en la temperatura de la masa térmica debido a la conducción de calor a través de los muros, pero no lo logra un aumento significativo respecto a los casos anteriores. La Figura 5.17 muestra una temperatura similar a la Figura 5.15, lo que conlleva a la nula influencia en el aumento del espacio de aire entre los muros y vidrio.

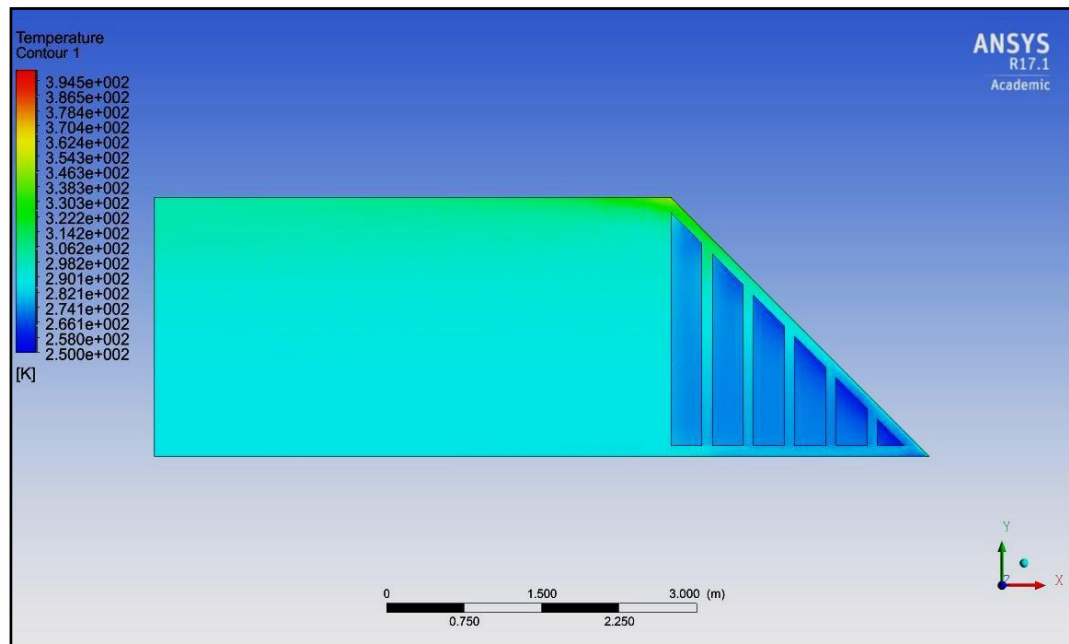


Figura 5.13: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°4.

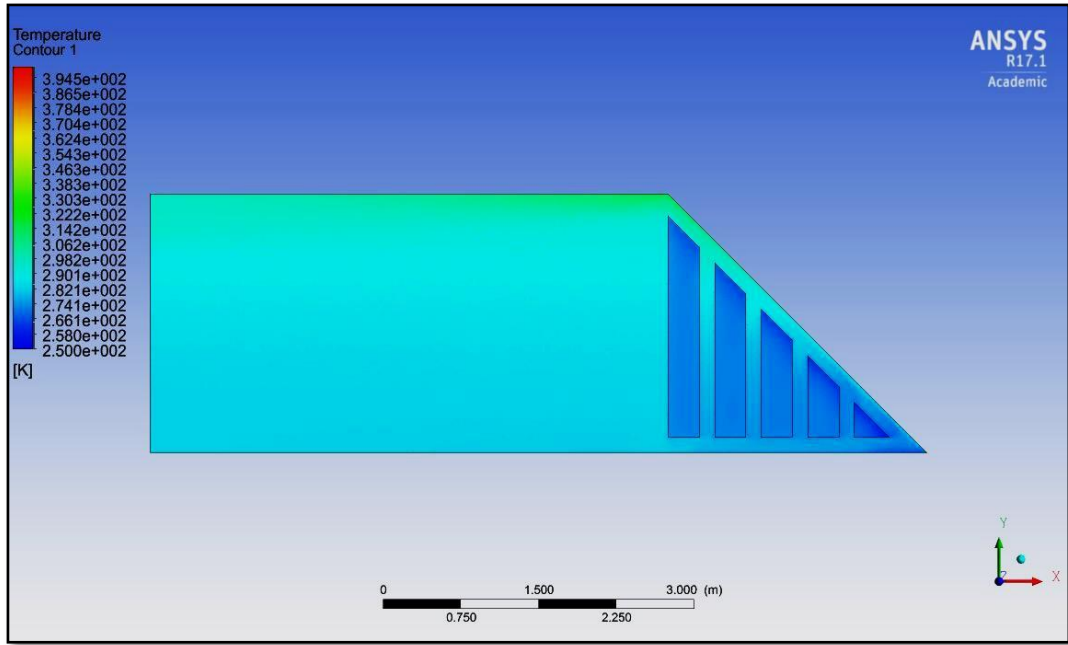


Figura 5.14: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°5.

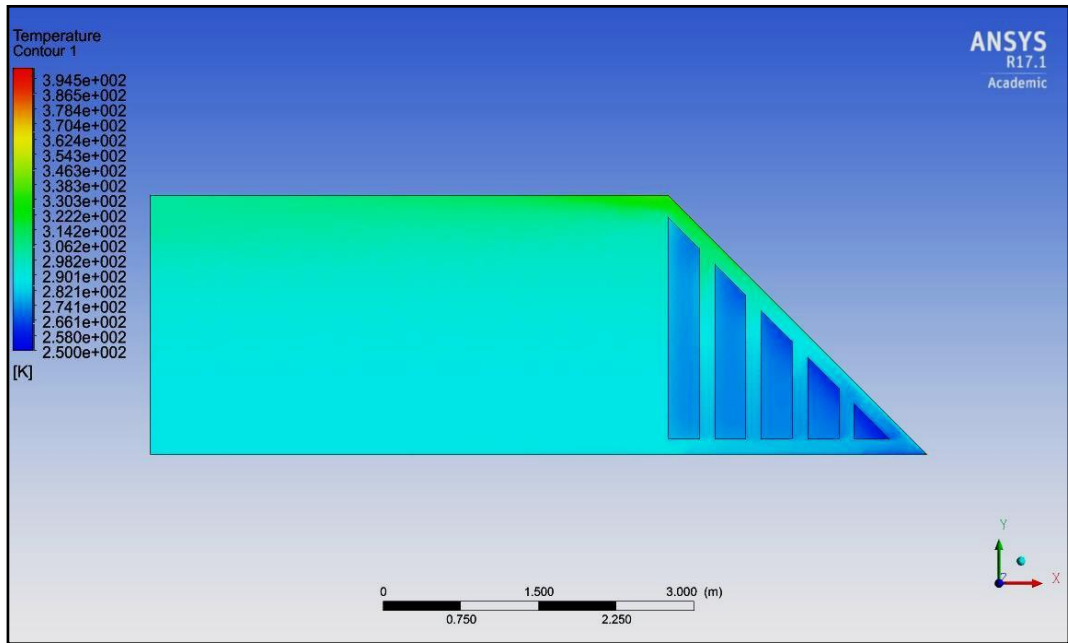


Figura 5.15: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°5.

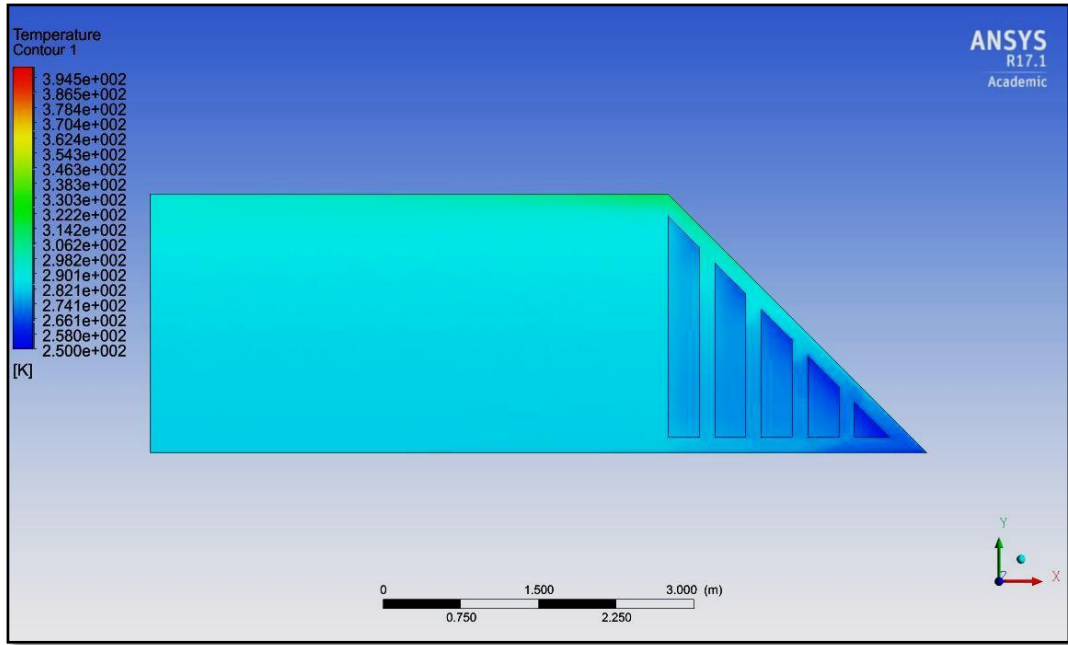


Figura 5.16: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°5.

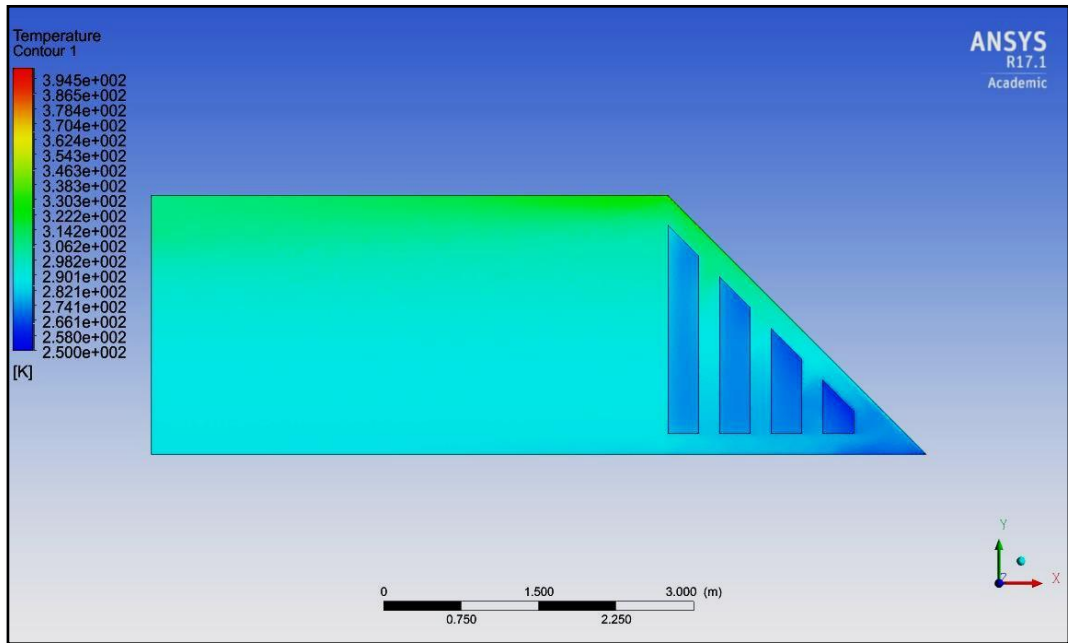


Figura 5.17: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°6.

5.3.3 Casos N° 7, 8, 9: Muros 35-10; 35-15; 35-20

En las Figuras 5.18 y 5.19 se observa que la masa térmica es levemente mayor para para el caso N° 8 y su temperatura promedio en el centro de la habitación es cercana a los 20 [°C]. En el caso N° 9, Figuras 5.20, 5.21 y 5.22 se producen los mayores gradientes de temperaturas pero no se alejan mucho de los casos anteriores. En la Figura 5.20 se observa, al igual que los casos anteriores, una leve disminución en el ingreso de flujo de aire hacia la vivienda debido al poco espacio entre los muros y la pared inclinada (vidrio). Por último, la absorción de energía en la masa térmica es similar a los casos anteriores y decrece a medida que disminuye su tamaño.

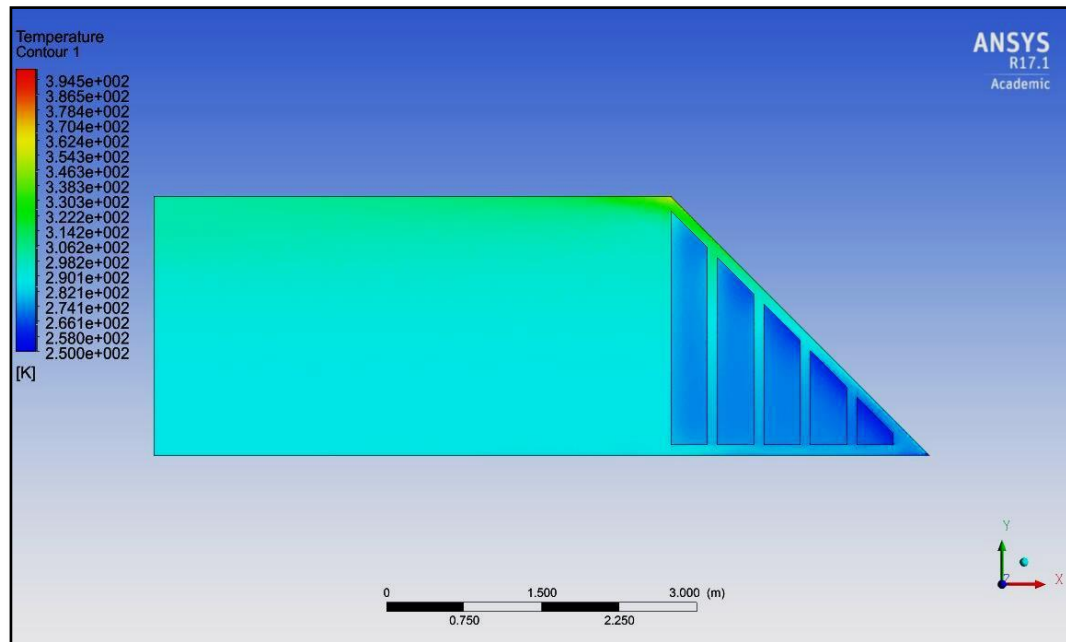


Figura 5.18: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°7.

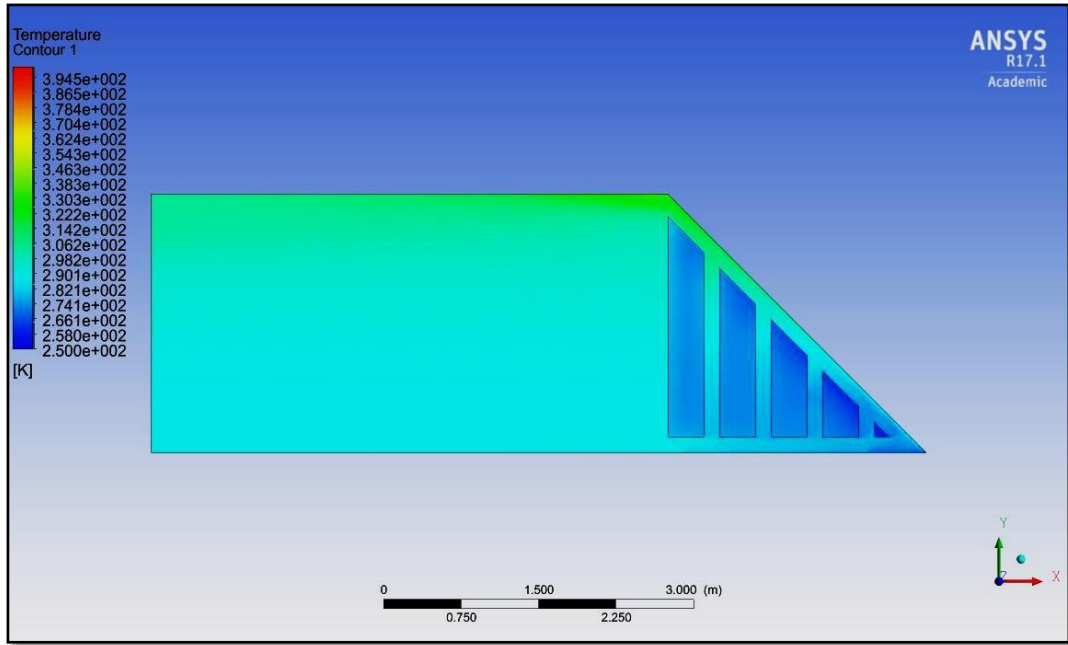


Figura 5.19: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°8.

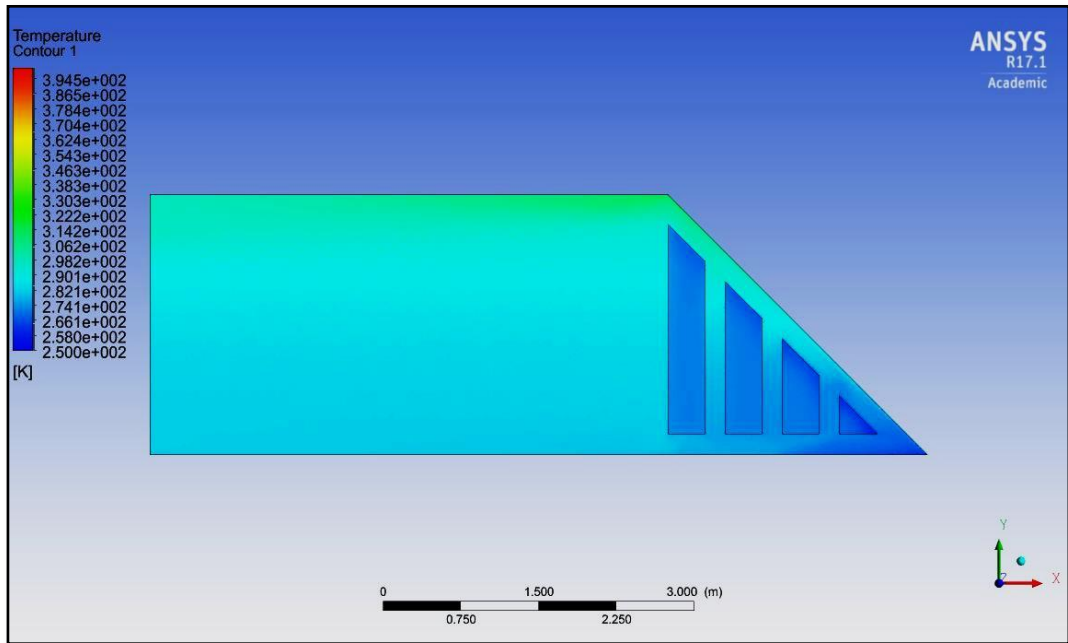


Figura 5.20: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°9.

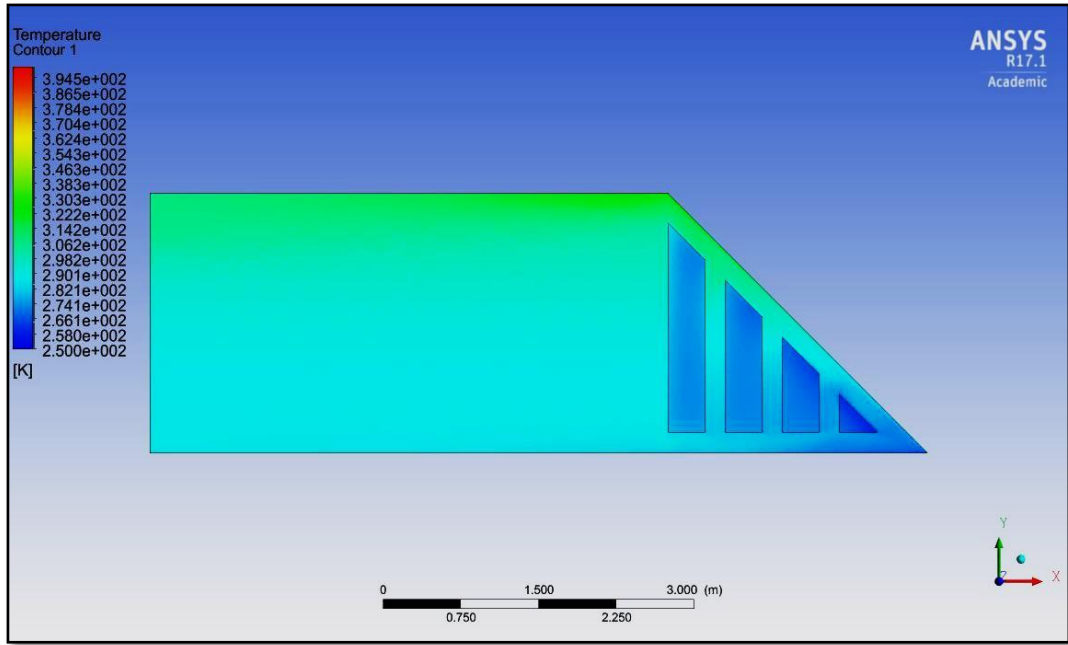


Figura 5.21: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N°9.

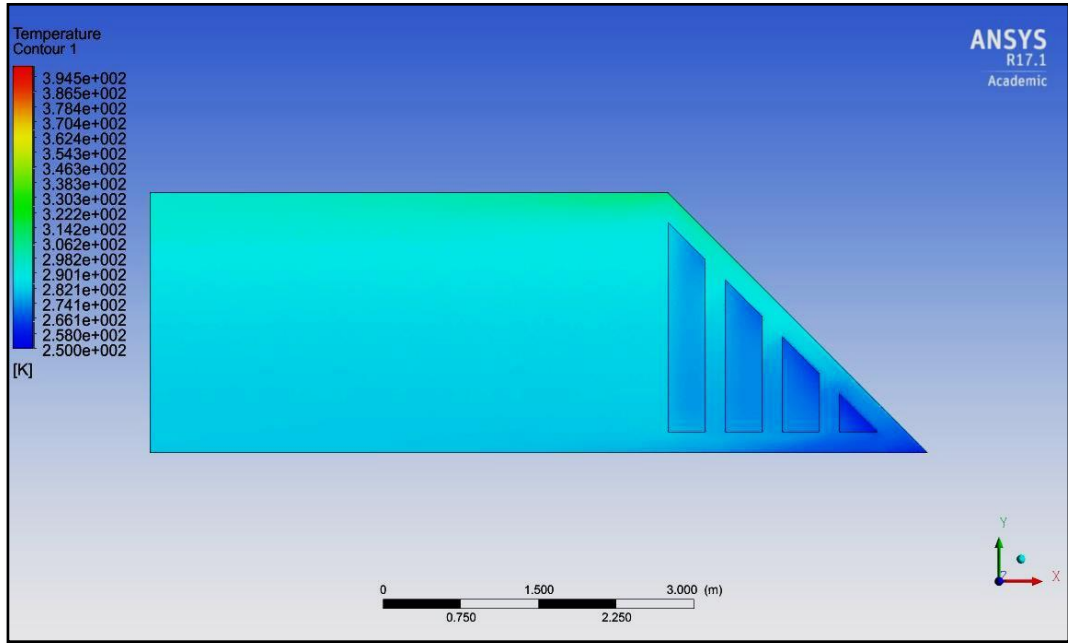


Figura 5.22: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°9.

5.3.4 Contornos de Velocidades

Cuando el fluido se calienta a medida que avanzan las horas, es impulsado por el efecto de flotación y empieza a circular a través de la pared inclinada hacia la parte superior de esta, ingresando a la habitación. La Figura 5.23 reporta que la mayor velocidad se encuentra en la pared inclinada, alcanzando los 0.3 [m/s]. Por el contrario, en la habitación, la velocidad promedio no supera los 0.05 [m/s], evitando el potencial riesgo de discomfort para los ocupantes. La Figura 5.24 muestra un reingreso de aire por la parte superior e inferior, debido a la naturaleza turbulenta del fluido y velocidades elevadas producidas por la energía ingresada al sistema. Se observa en ambas figuras el fenómeno de capa límite hidrodinámica, tanto en la pared superior como en los bordes de las columnas de concreto, cuyo espesor es de 8 [cm].

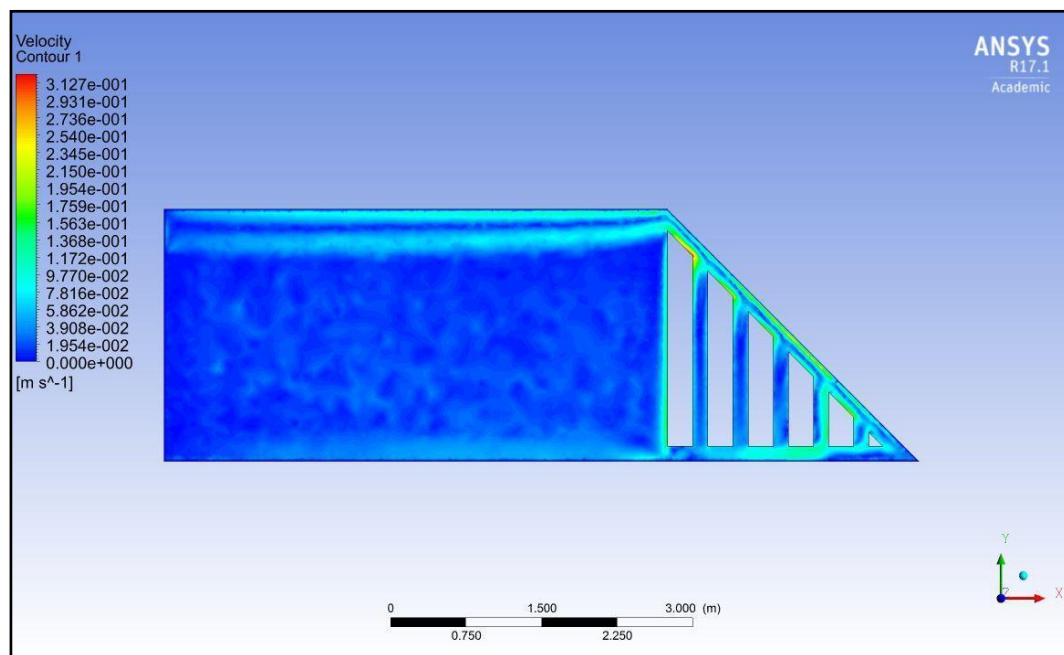


Figura 5.23: Contorno de velocidad a las 10 [hr]. Caso N° 2.

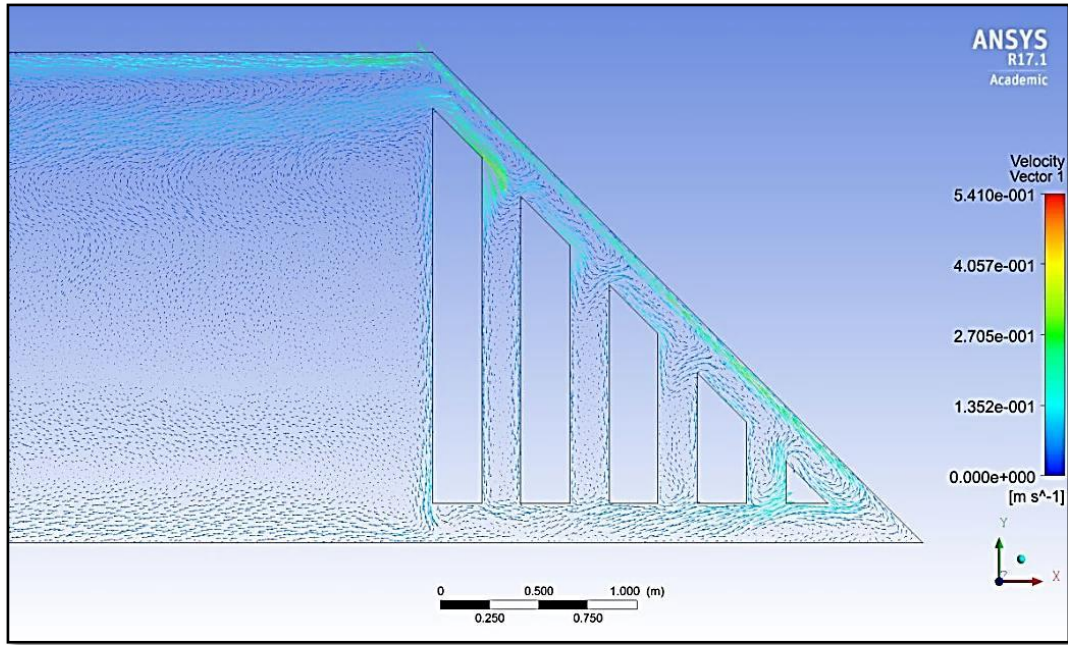


Figura 5.24: Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N° 8.

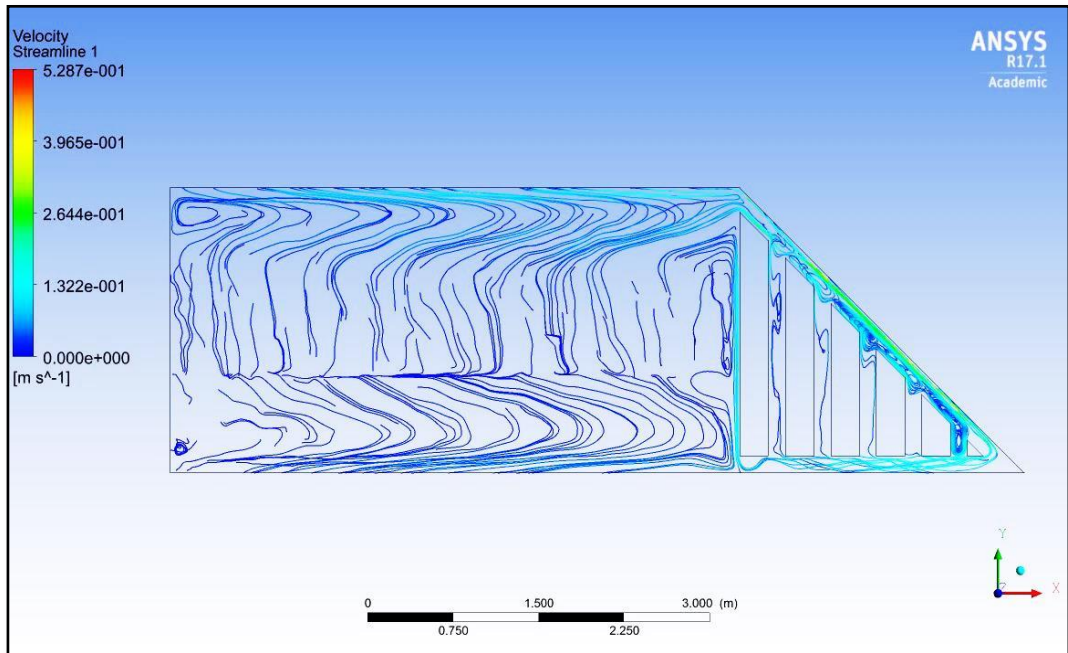


Figura 5.25: Líneas de corriente en la habitación a las 13 [hr]. Caso N° 2.

5.3.5 Temperaturas promedio al interior de la habitación y confort térmico

A continuación se presentan temperaturas medias en la habitación tomada en un punto central¹⁰, comenzando desde las 7 hasta las 19 [hr]. En la Figura 5.26 se observa que la temperatura varía muy poco entre sí, donde la mayor diferencia se obtiene en el caso N° 1 y 3, alcanzando los 3 [°C] entre las 11:30 [hr] y 15:30 [hr]. Por otra parte, la temperatura es prácticamente similar entre las 7:30 [hr] y las 11:00 [hr] para todos los casos. La Figura 5.27 muestra una tendencia similar a la figura anterior, pero posee una diferencia un poco menor entre ellos. En la Figura 5.28 se observa la temperatura mayor alcanzada en todos los casos analizados, la cual asciende a 20 [°C]. Por último, cabe destacar la poca diferencia de temperatura entre los casos analizados y es necesario analizar el comportamiento de la masa térmica, lo cual está descrito más adelante.

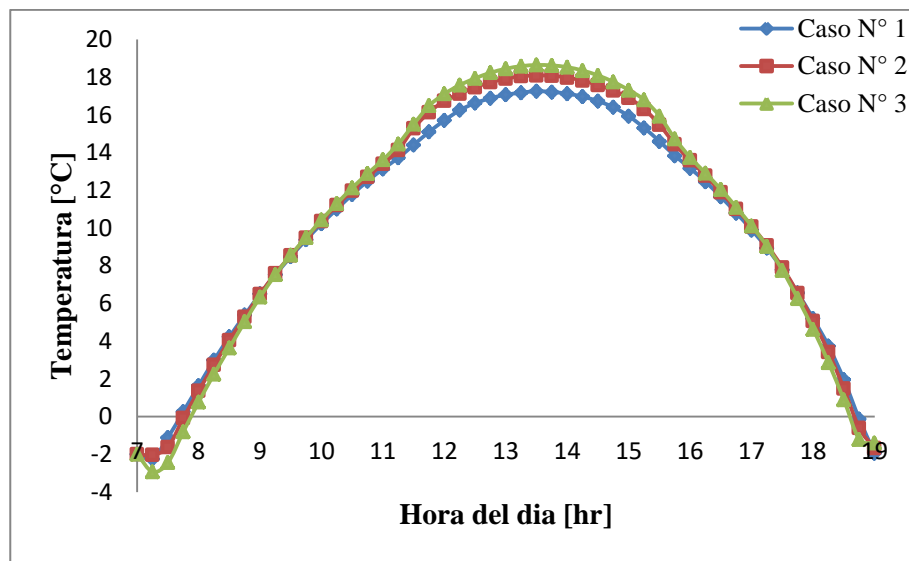


Figura 5.26: Temperatura promedio en la habitación para un muro de 25 [cm].

¹⁰ coordenadas, $x = 2.5$, $y = 1.25$, $z = 0.1$ [m]

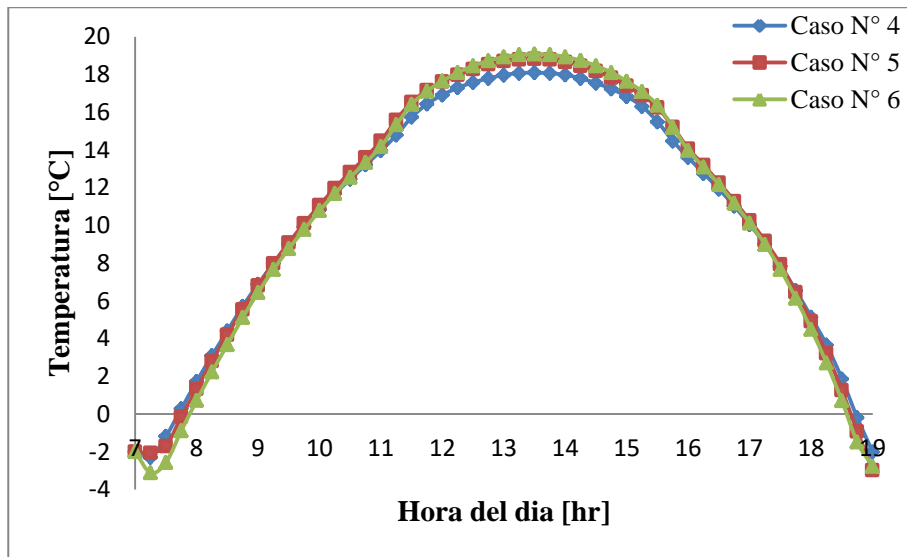


Figura 5.27: Temperatura promedio en la habitación para un muro de 30 [cm].

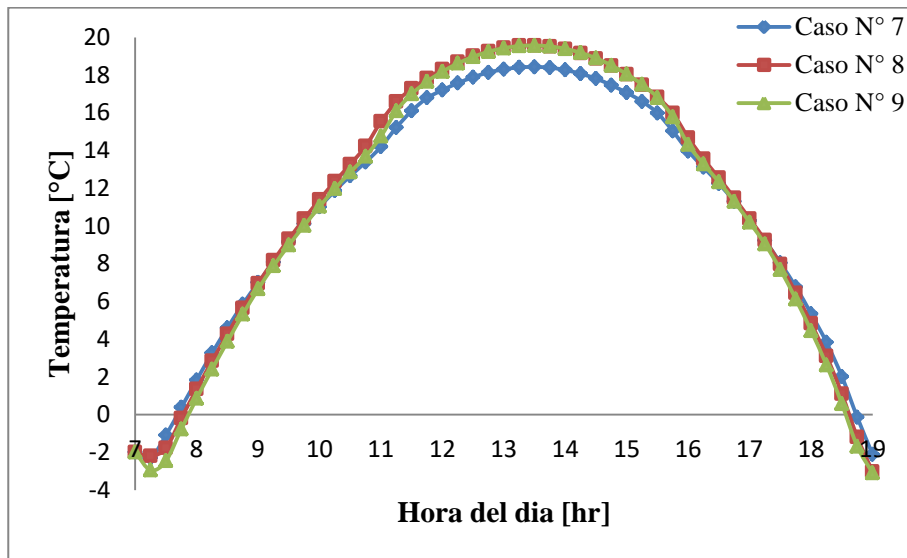


Figura 5.28: Temperatura promedio en la habitación para un muro de 35 [cm].

Según ASHRAE, el confort térmico habitacional es de al menos 23 [°C], lo cual no se cumple en ninguno de los casos antes mencionados. Para conocer el confort térmico en la habitación, se reportan los valores de las temperaturas en función de la altura “h” de la habitación. Los datos fueron obtenidos a las 13 [hr] y reportan los mayores gradientes de temperaturas. Para esto se trazaron 2 líneas verticales a 0.5 [m] de distancia de la pared izquierda y derecha respectivamente, como se muestra en la Figura 5.29.



Figura 5.29: Líneas paralelas utilizadas.

Se observa para una altura de hasta 1 [m] desde el suelo, el gradiente térmico en dirección vertical varia muy poco y su valor asciende en 1 [°C/m]. Las temperaturas máximas alcanzadas se producen en los casos donde el espacio de aire es mayor, 20 [cm]. Esto se produce debido a un mayor ingreso del aire por el canal superior y solo toma importancia a partir desde los 2 [m] hasta el techo de la habitación.

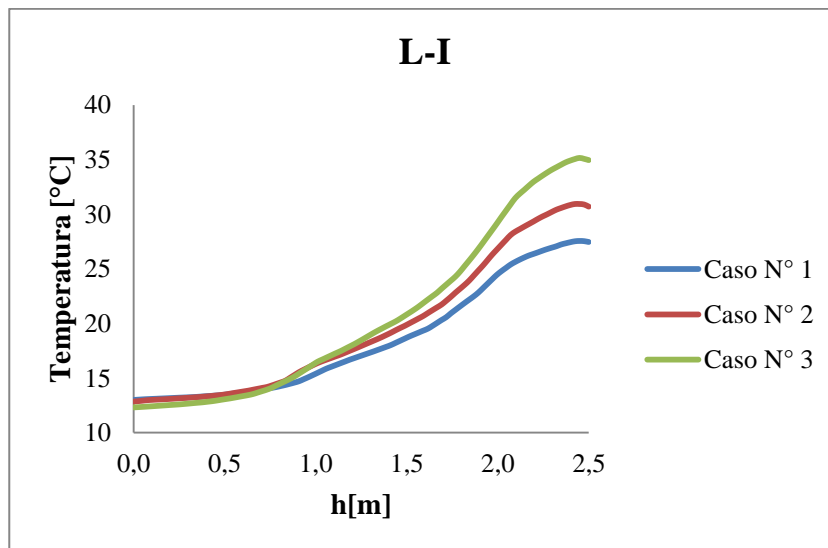


Figura 5.30: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].

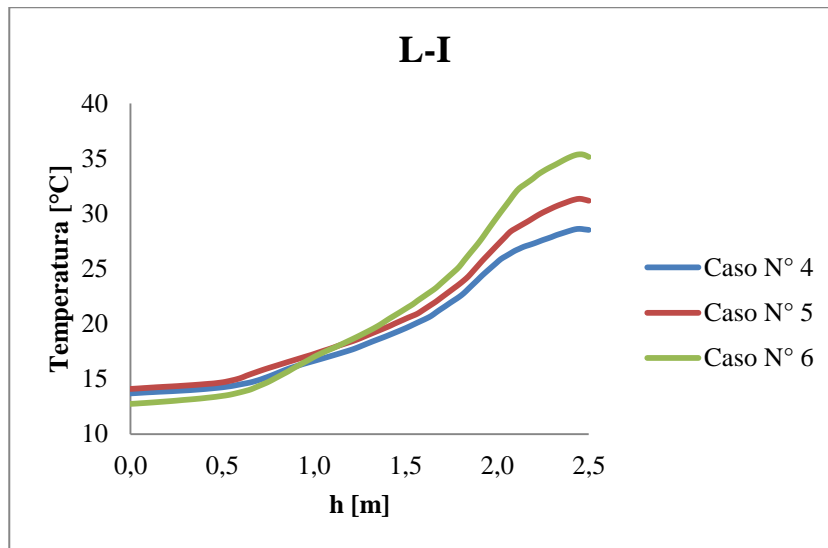


Figura 5.31: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].

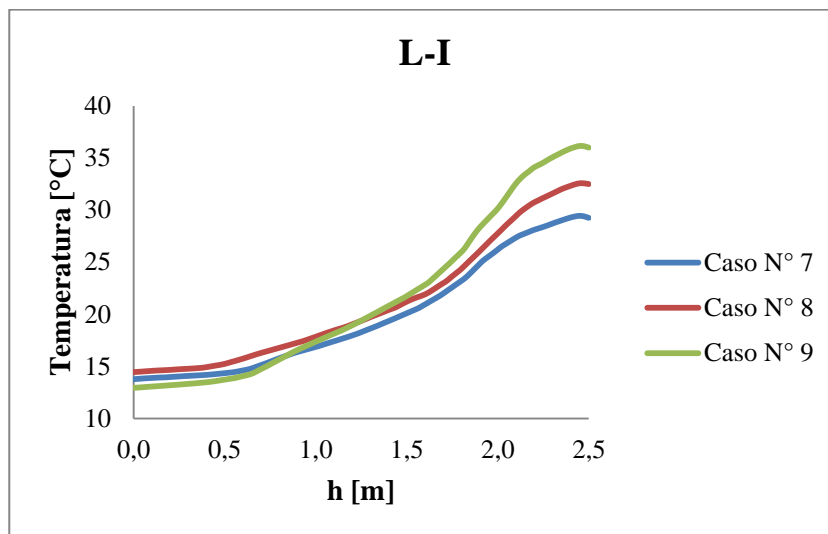


Figura 5.32: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].

Por otro parte, al estar más próximo a la entrada de aire caliente de parte del muro Trombe Escalonado, las figuras que se muestran a continuación exponen claramente una diferencia importante respecto a la pared más alejada. Se puede observar que el gradiente de temperatura vertical es casi constante hasta una altura de 1 [m] desde el suelo, y su valor es de 5 [°C/m]. Cabe destacar que a diferencia de L-I, no se observan variaciones de temperatura importantes en todos los casos analizados.

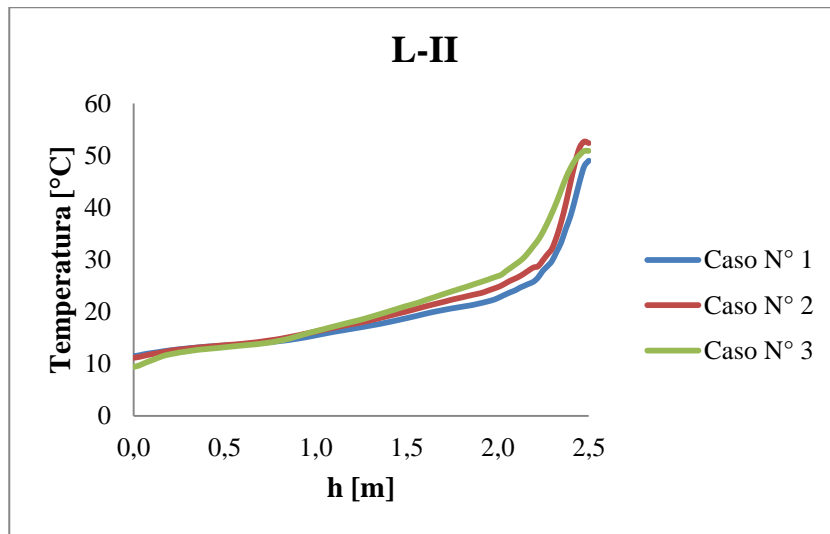


Figura 5.33: Mapa térmico de la temperatura interior de un muro de 25 [cm].

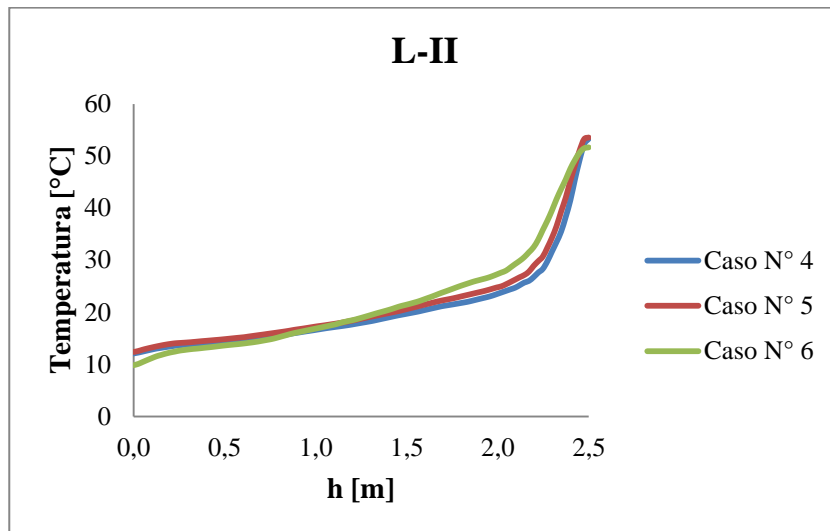


Figura 5.34: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].

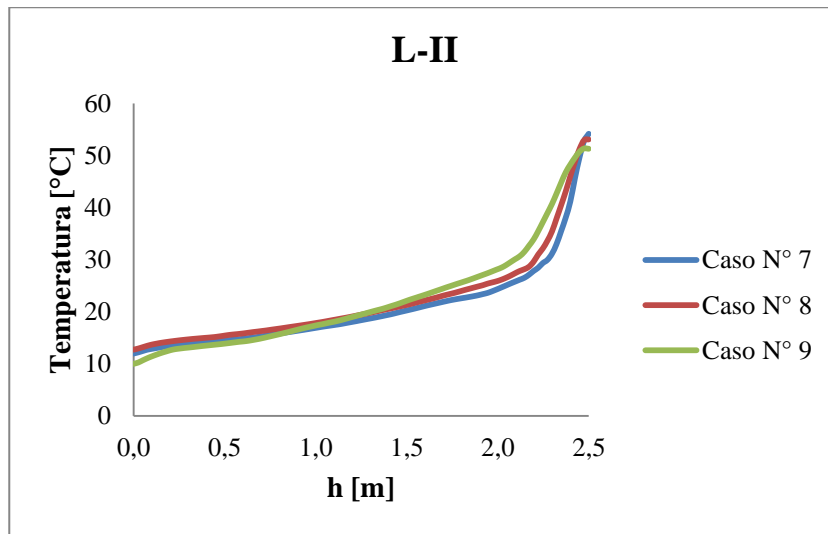


Figura 5.35: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].

Se puede concluir que el rango de confort térmico promedio para un día de invierno se encuentra entre 1.5 [m] y 2 [m] de altura respecto al suelo de la habitación.

5.4.6 Masa Térmica

El último aspecto que analizaremos es respecto a la eficacia del almacenamiento de la masa térmica. Para esto, se considera el porcentaje de concreto que se encuentra a más de 5 [°C] al final del día analizado.

Tabla 5.2: Porcentaje de volumen de concreto donde la temperatura es mayor a 5 [°C].

Casos	Concreto	Temperatura [°C]
1	28%	6
2	33%	7
3	38%	6
4	31%	6
5	36%	5
6	41%	5
7	35%	5
8	40%	6
9	45%	5

Se observa que el mayor aumento de temperatura se produce en la primera columna de concreto para todos los casos. Por otro lado, el centro de los primeros muros alcanza un nivel térmico alto, debido a la absorción de energía que acumula la masa térmica durante el día. A pesar de la gran

diferencia de la temperatura en el aire detectada en la habitación, el volumen de concreto parece casi isotérmico. Por último, la contribución de las 2 últimas columnas de concreto no aporta un beneficio considerable, ya que no alcanzan temperaturas elevadas. Hasta la tercera columna, se tiene una temperatura igual o superior a la temperatura promedio en la habitación al final del día.

5.4 Resultados verano; Comportamiento de las temperaturas, velocidades y masa térmica

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para un día típico de verano en la localidad de Putre. Al igual que lo descrito anteriormente, se muestran gráficos de temperatura en tres secciones, donde se realizara un análisis de las temperaturas máximas alcanzadas, al igual que las velocidades obtenidas, para terminar con la efectividad de la masa térmica.

5.4.1 Caso N° 1, 2, 3: Muros 25-10; 25-15; 25-20

En Figura 5.36 la temperatura promedio en la habitación alcanza los 27 [°C], donde existen mayores gradientes de temperatura en la parte superior debido a la estratificación de densidades y a la energía que ingresa por la pared inclinada. Solo el 70% del volumen de la masa térmica posee una temperatura igual o superior al promedio de la habitación. La Figura 5.37 la temperatura promedio en la habitación es similar al caso anterior. La absorción de energía debido a la conducción por la masa térmica sufre un aumento respecto al caso N° 1, debido a un mayor espacio en el canal de aire entre los muros. Las Figuras 5.38, 5.39 y 5.40 se puede observar la distribución de la temperatura a lo largo del día. Se ve claramente que la temperatura varía entre los 10 [°C] a 20 [°C] en promedio con respecto a la altura de la habitación. En la Figura 5.40 el comportamiento de la masa térmica es similar a los casos anteriores, donde la temperatura mayor se produce en la primera columna de concreto, alcanzando los 16 [°C], luego va decreciendo a medida que los muros disminuyen su tamaño.

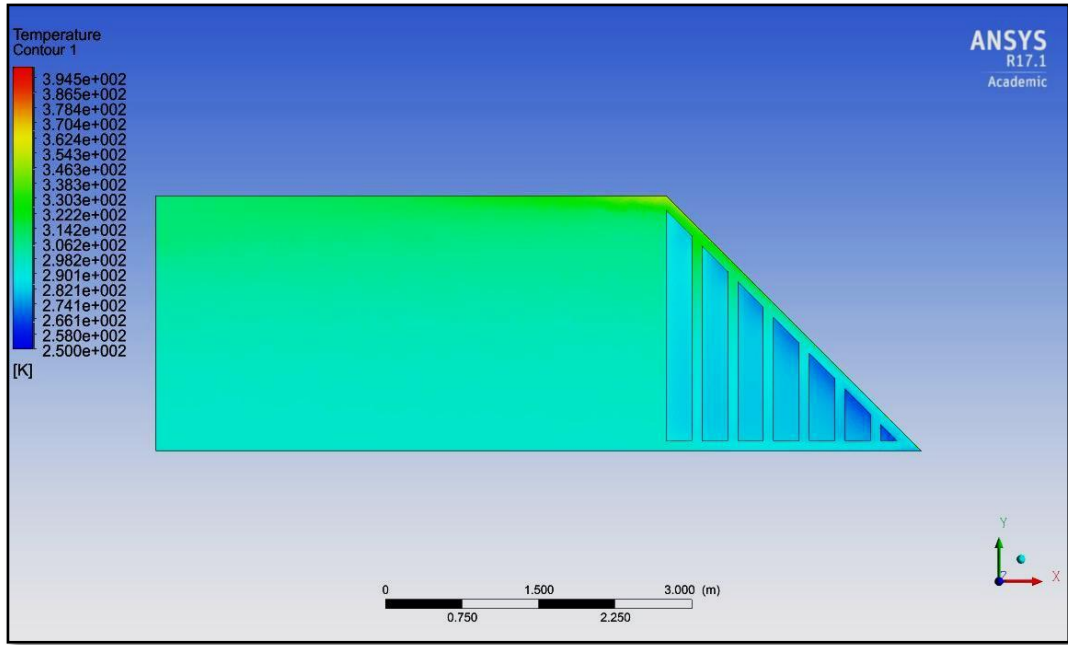


Figura 5.36: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 1.

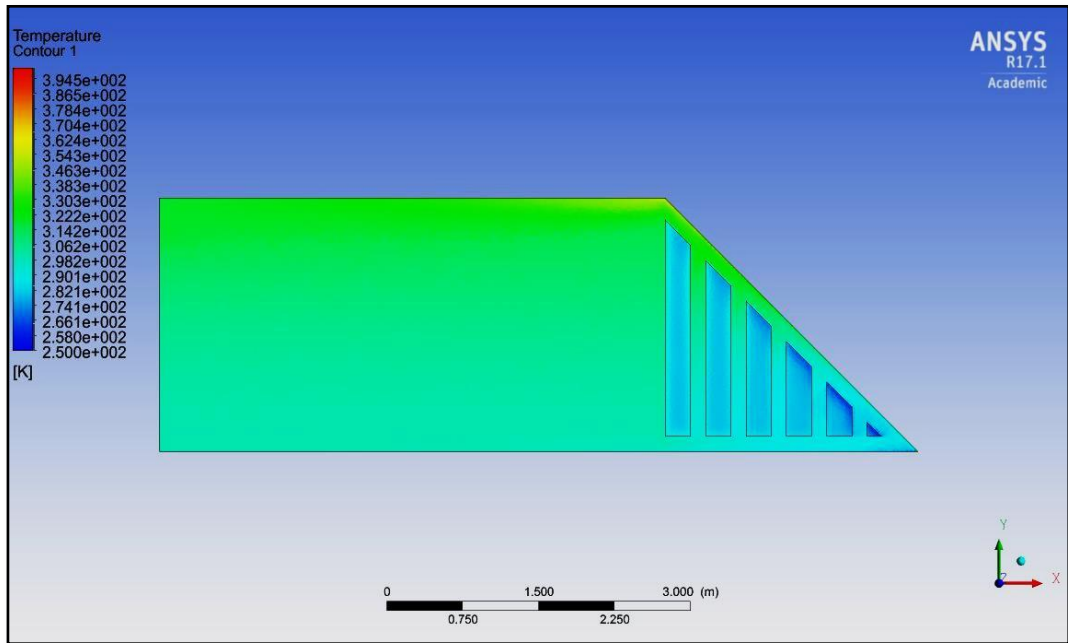


Figura 5.37: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 2.

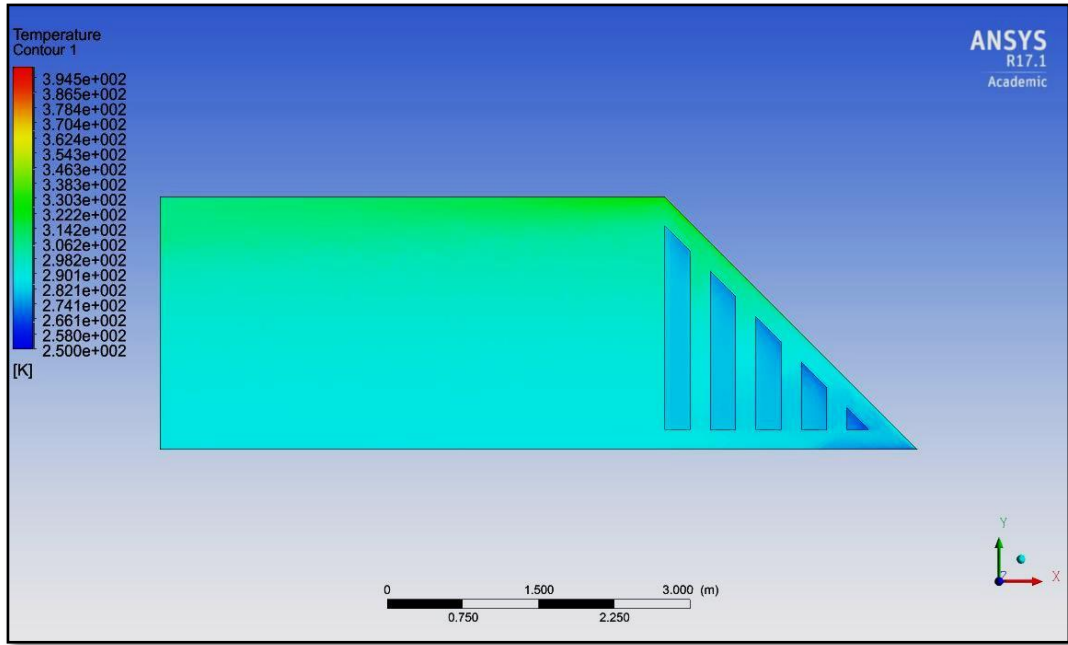


Figura 5.38: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N° 3.

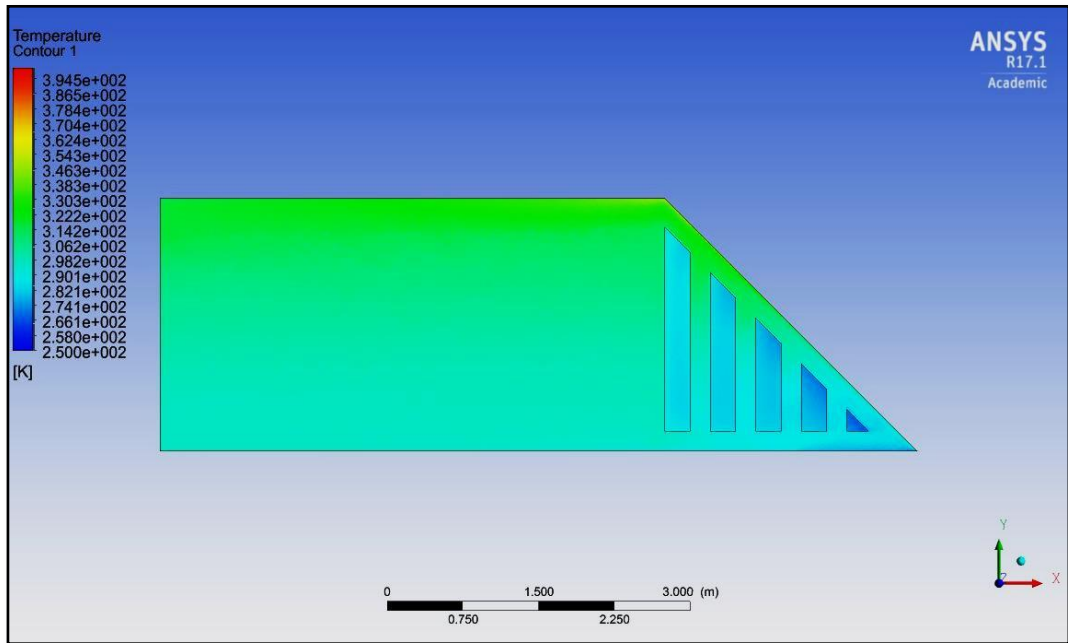


Figura 5.39: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 3.

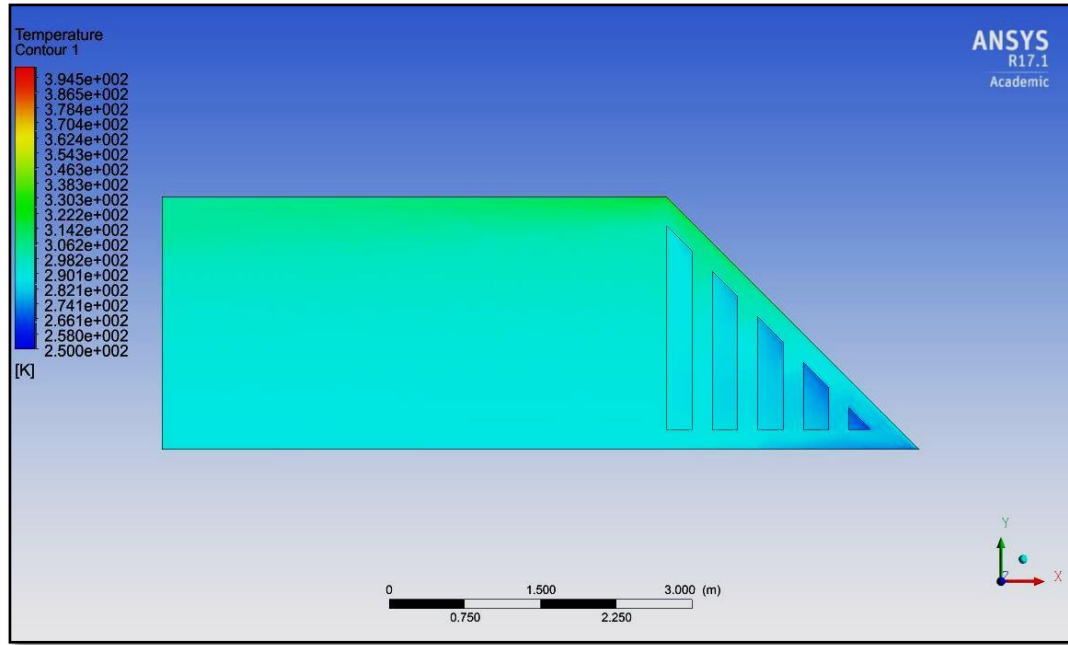


Figura 5.40: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N° 3.

5.4.2 Caso N° 4, 5, 6: Muros 30-10; 30-15; 30-20

En la Figura 5.41 se observa que la temperatura promedio de la habitación es de 28 [°C] y la masa térmica alcanza una buena absorción de energía solar debido a los mayores gradientes de temperatura, alcanzando unos 14 [°C]. Las Figuras 5.42, 5.43 y 5.44 reportan las temperaturas a lo largo del día. A primeras horas del día, la masa térmica ya alcanza los 14 [°C] y sigue aumentando a medida que avanzan las horas, lo cual es beneficio para el futuro calefaccionamiento térmico en la noche. Se observa claramente la poca absorción de energía y temperatura de los 2 ultimas columnas de concreto para todos los casos, debido a la acumulación de mayores gradientes de temperatura que aumenta en función de la altura de la habitación.

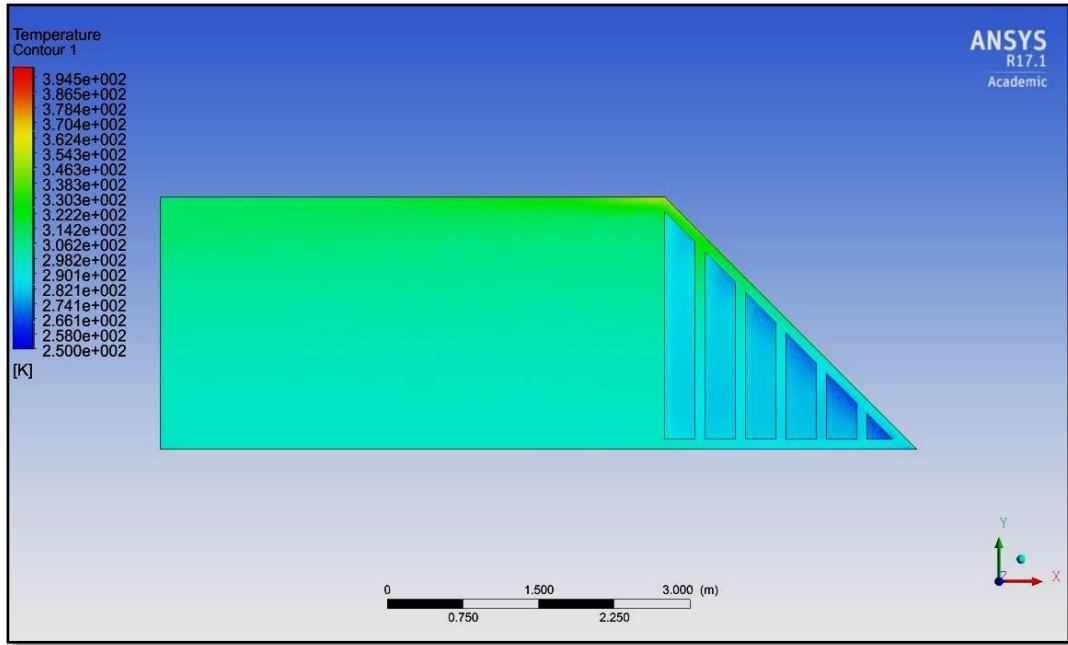


Figura 5.41: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 4.

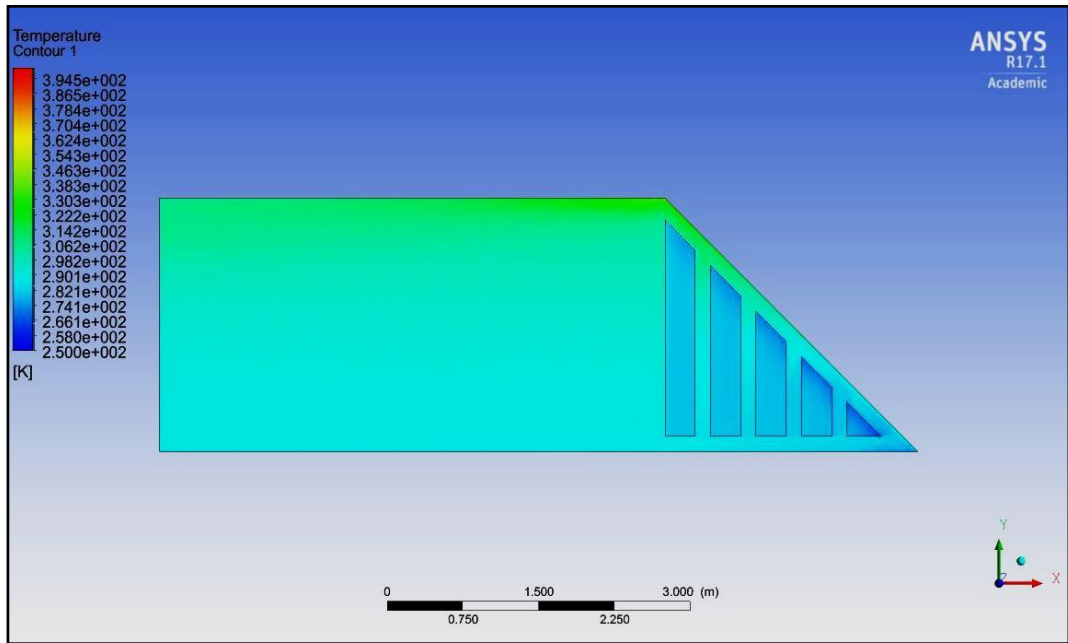


Figura 5.42: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N° 5.

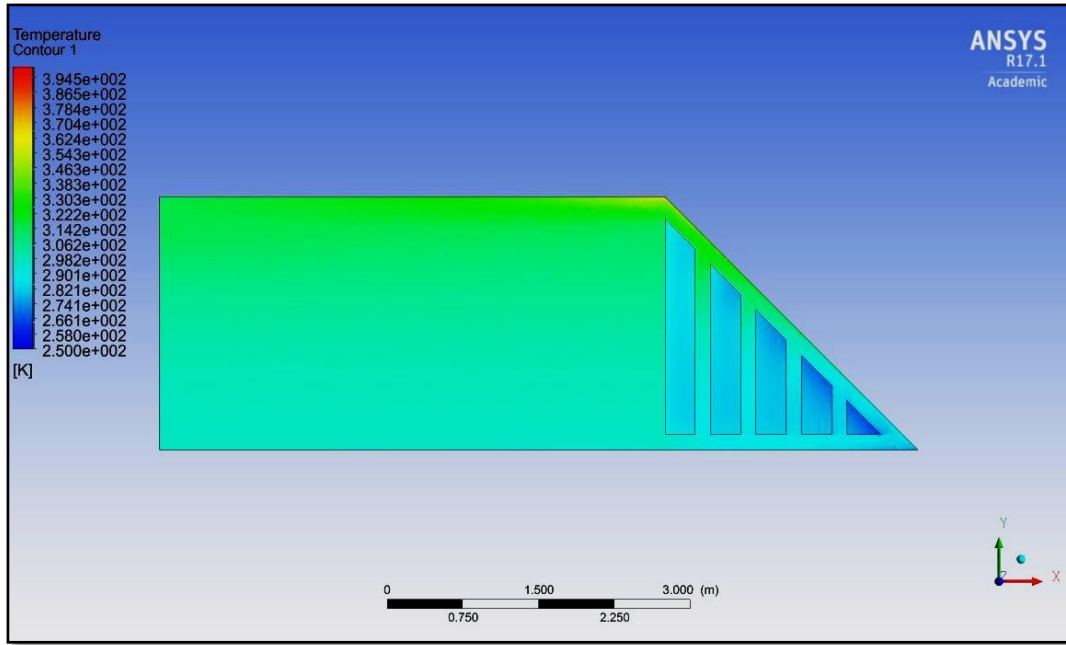


Figura 5.43: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 5.

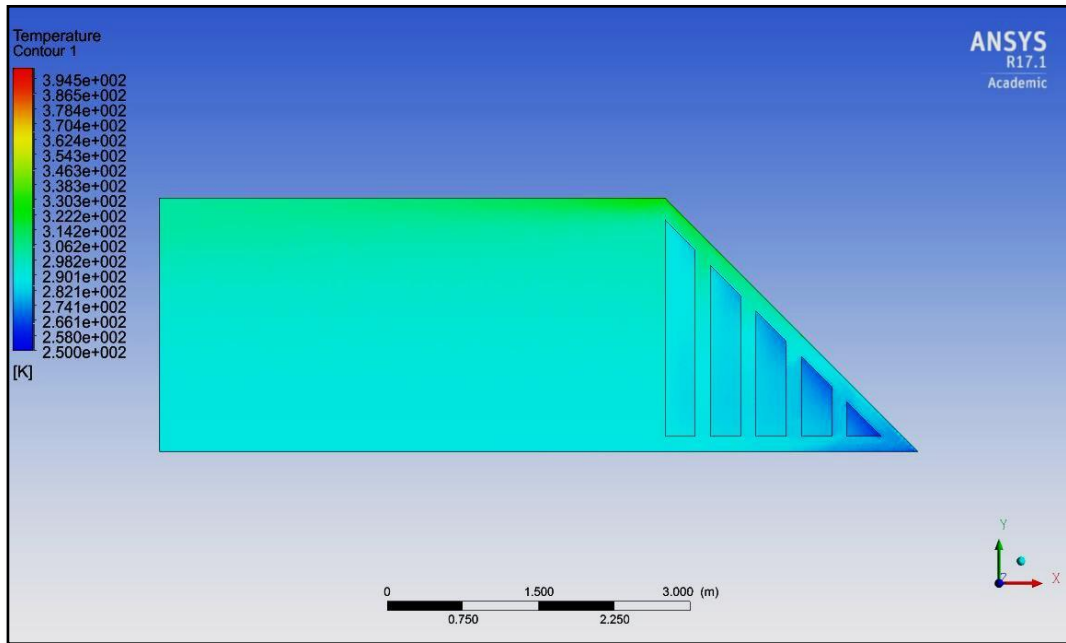


Figura 5.44: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N° 5.

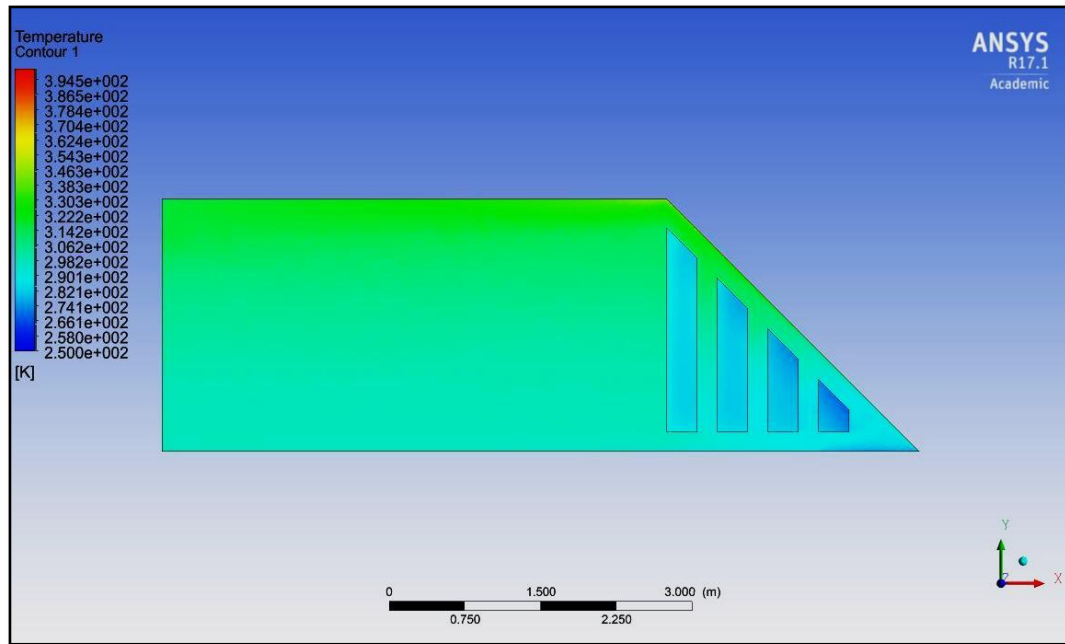


Figura 5.45: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 6.

5.4.3 Caso N° 7, 8, 9: Muros 35-10; 35-15; 35-20

La Figura 5.46 muestra mayores gradientes de temperatura en el borde superior de la pared inclinada, debido a los mayores gradientes de velocidades producidos por la incidencia del sol. Para el caso N° 8, la temperatura máxima en el centro de la habitación es de 28 [°C] y la masa térmica obtiene una buena absorción de energía por parte del sol. Hasta la tercera columna de concreto, los gradientes de temperatura son igual o mayores que el promedio de la habitación a la misma hora, al igual que los otros casos.

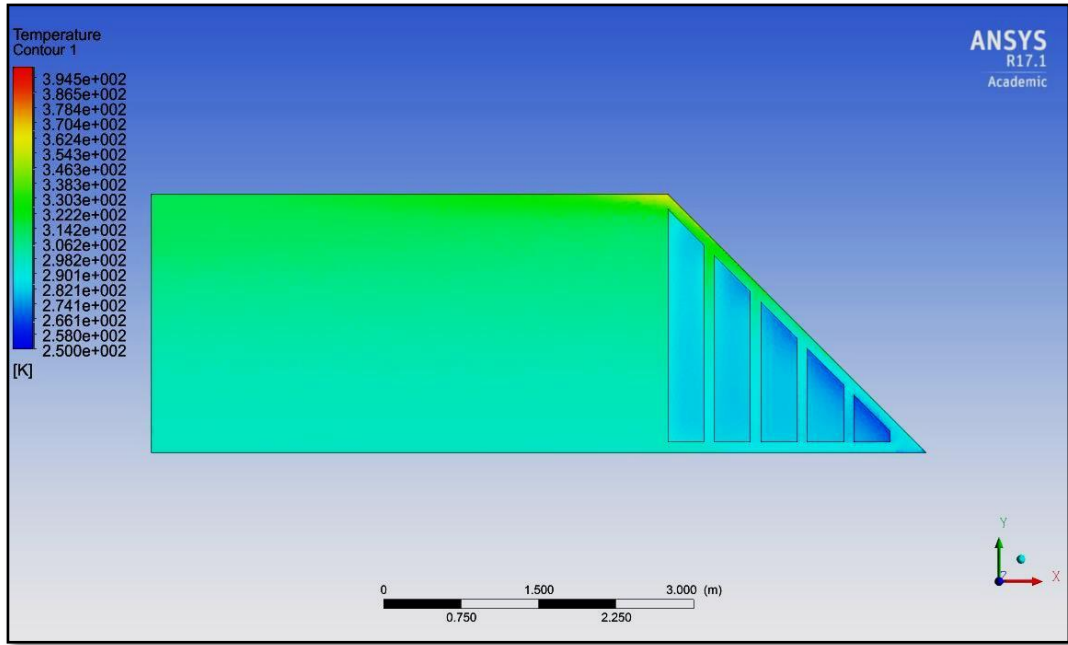


Figura 5.46: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 7.

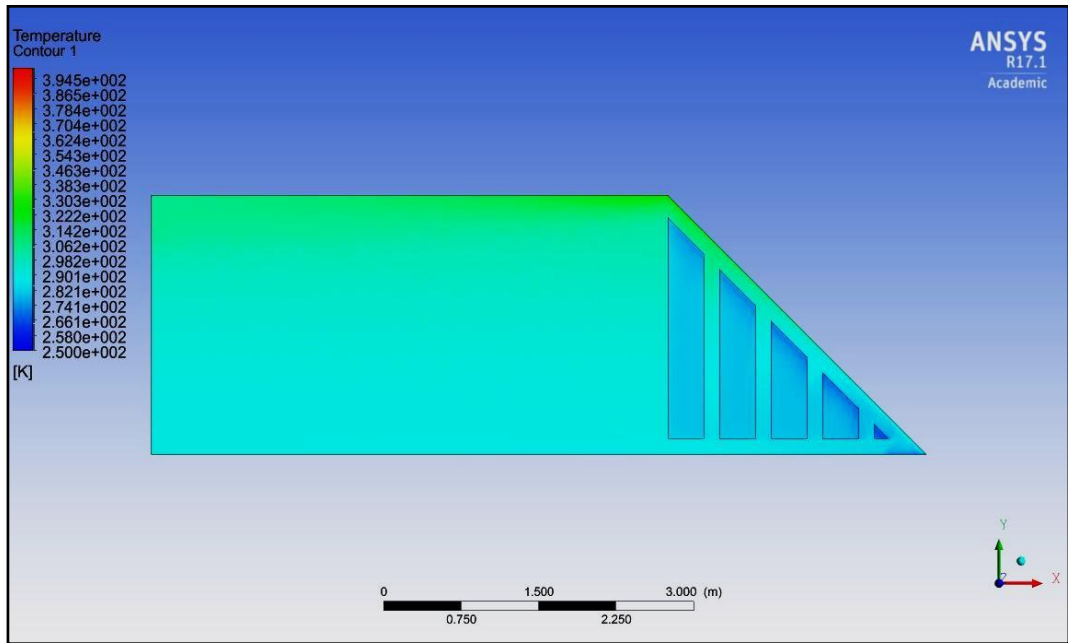


Figura 5.47: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N° 8.

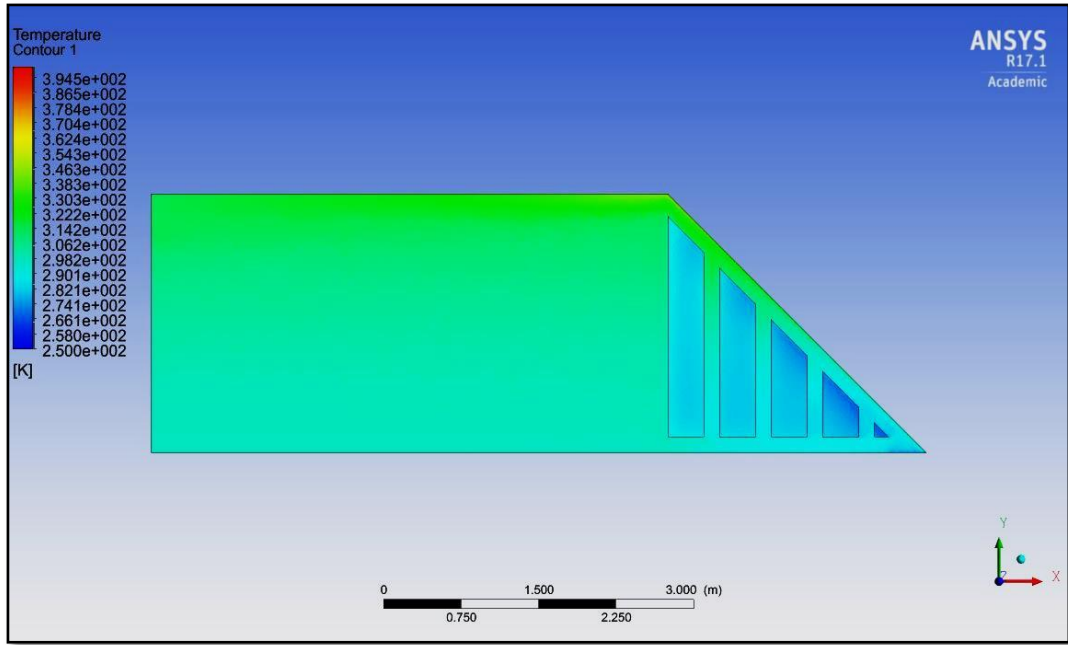


Figura 5.48: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 8.

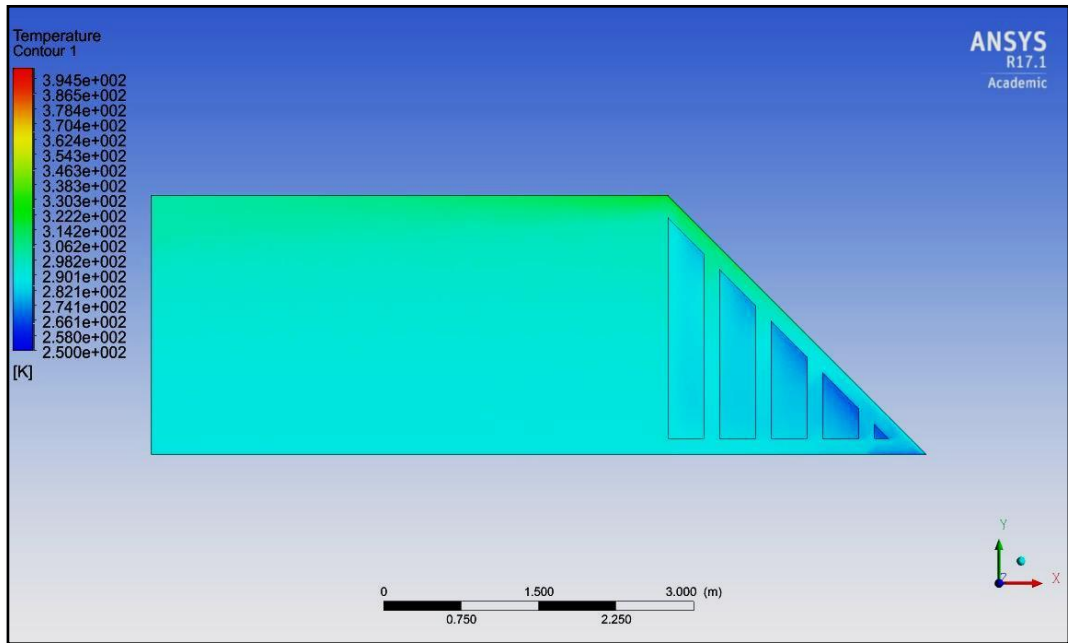


Figura 5.49: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N° 8.

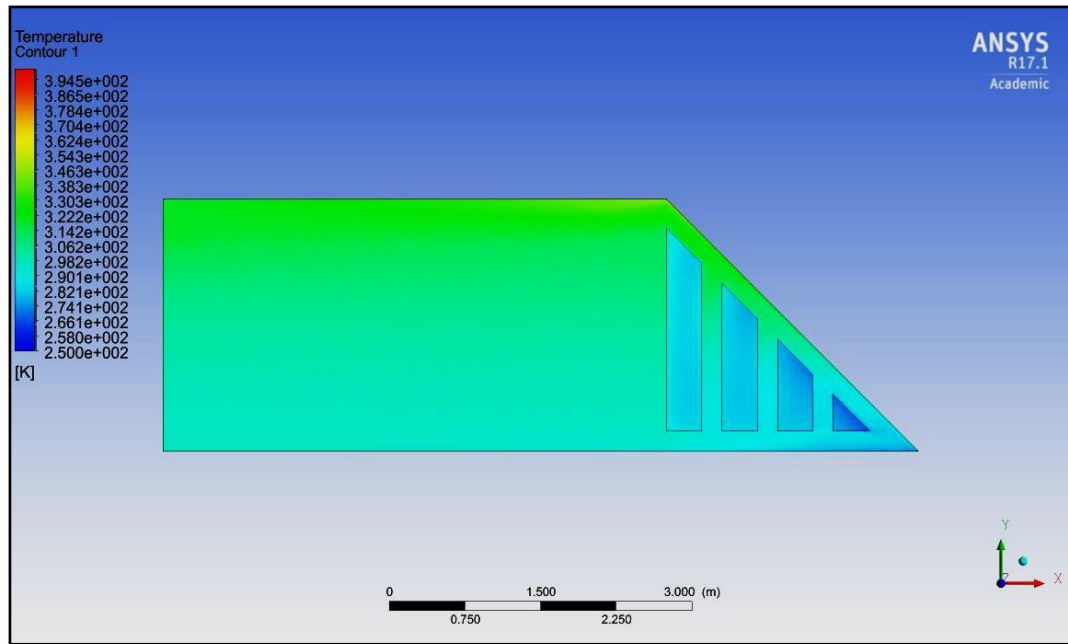


Figura 5.50: Contorno de Temperatura a las 14 [hr]. Caso N° 9.

5.4.4 Contornos de velocidades

La Figura 5.51 muestra que la velocidad máxima se encuentra en la pared inclinada, alcanzando 0.3 [m/s] y su menor valor no supera los 0.1 [m/s] en el centro de la habitación. Debido a la viscosidad del fluido y a la condición de no deslizamiento en las paredes interiores, se desarrolla en la pared superior el efecto de capa límite hidrodinámica, cuyo valor es de 0.1 [m], tal como se observa en las Figuras 5.51 y 5.52. El reingreso de aire por la parte superior hacia los canales entre las columnas de muros produce una recirculación no óptima del sistema, como se observa en la Figura 5.52. Este fenómeno ayuda a una mejor absorción de energía por parte de la masa térmica, tal como se discute más adelante.

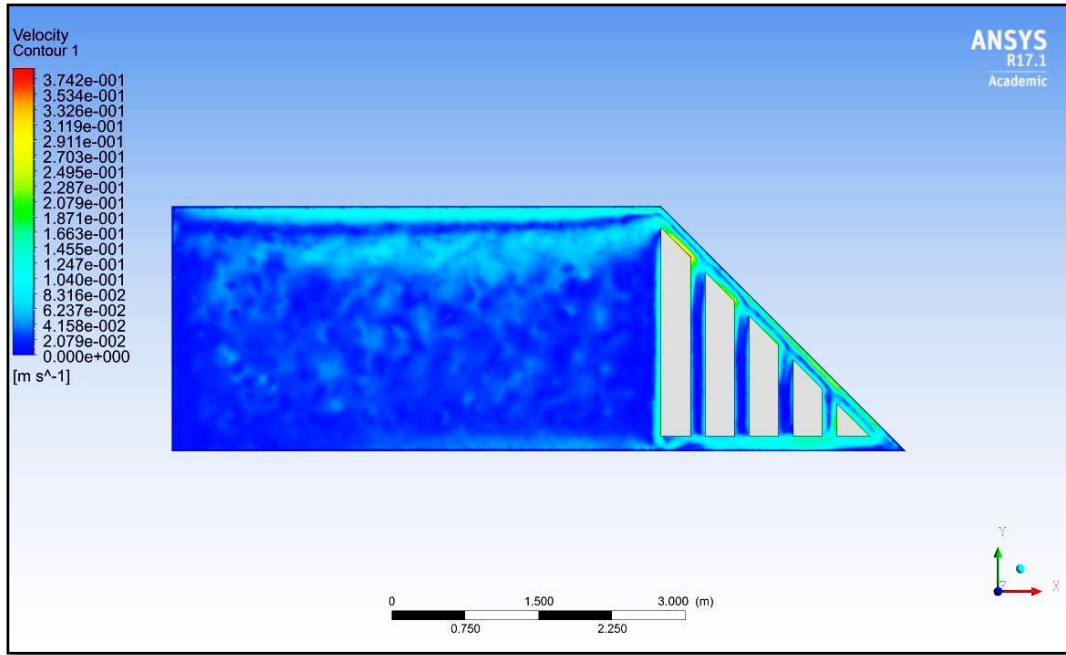


Figura 5.51: Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N° 5.

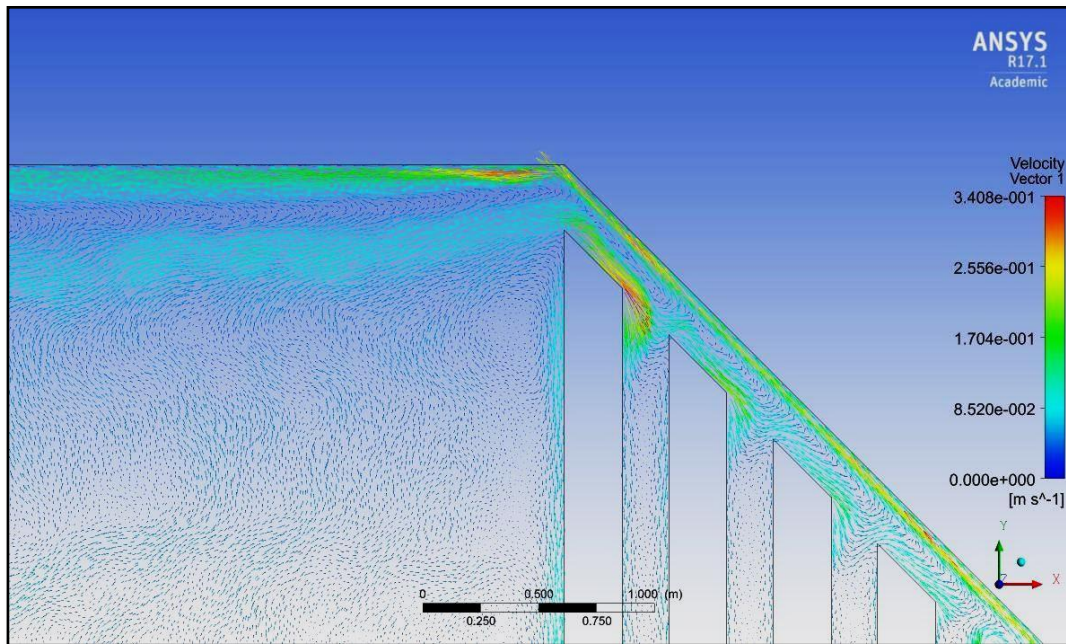


Figura 5.52: Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N° 3.

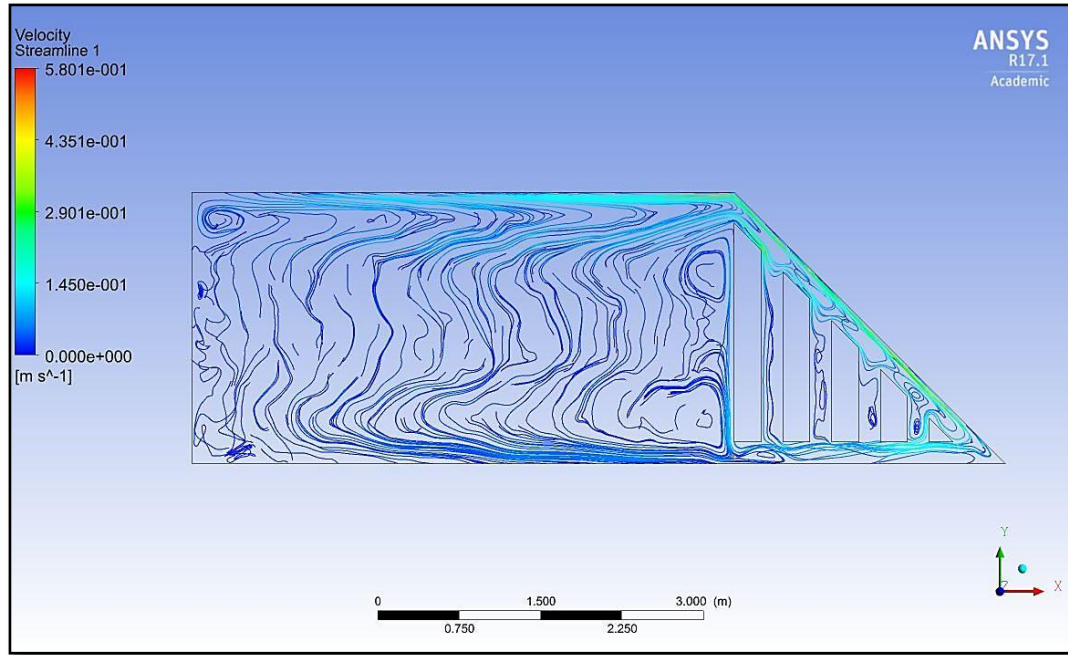


Figura 5.53: Líneas de corriente en la habitación a las 13 [hr]. Caso N° 3.

5.4.5 Temperaturas promedio al interior de la habitación y confort térmico

En las figuras a continuación se muestra la evolución de la temperatura a lo largo del día analizado. El punto analizado es el mismo que se utilizó en los casos de invierno. Se observa en la Figura 5.54 la poca diferencia de temperaturas entre casos, alcanzando su máximo a las 14 [hr] con un valor de 29 [°C]. Por otro lado, en el caso N° 4 se obtiene una menor temperatura promedio, llegando a los 26 [°C] cerca del mediodía. La Figura 5.56 reporta una uniformidad de temperaturas entre casos, llegando a un valor máximo de 30 [°C]. Esto se debe a un aumento en las temperaturas exteriores y radiación solar que ingresa al sistema. Por último, en todos los casos analizados, la temperatura al final del día es prácticamente igual para todas las geometrías, llegando a los 7 [°C] aproximadamente.

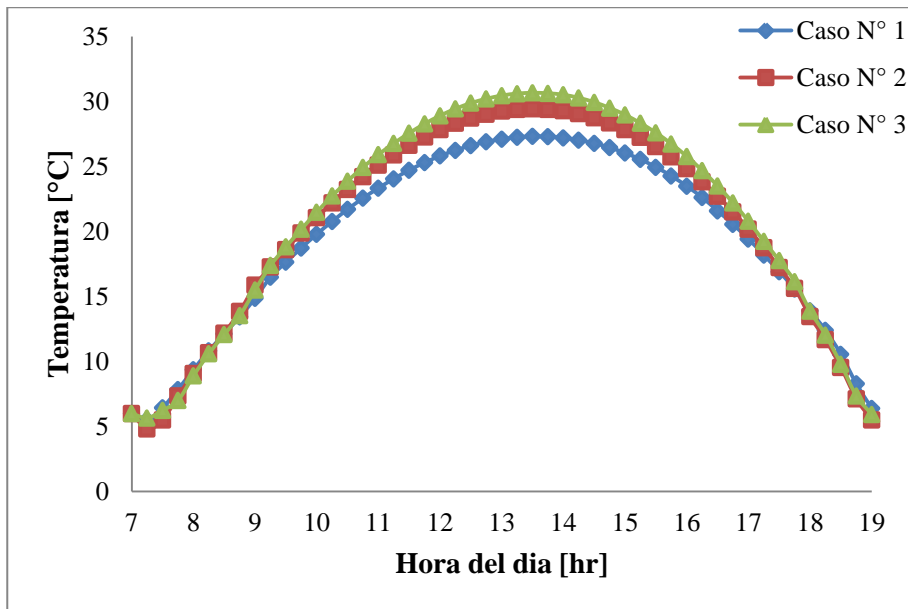


Figura 5.54: Temperatura promedio en la habitación para un muro de 25 [cm].

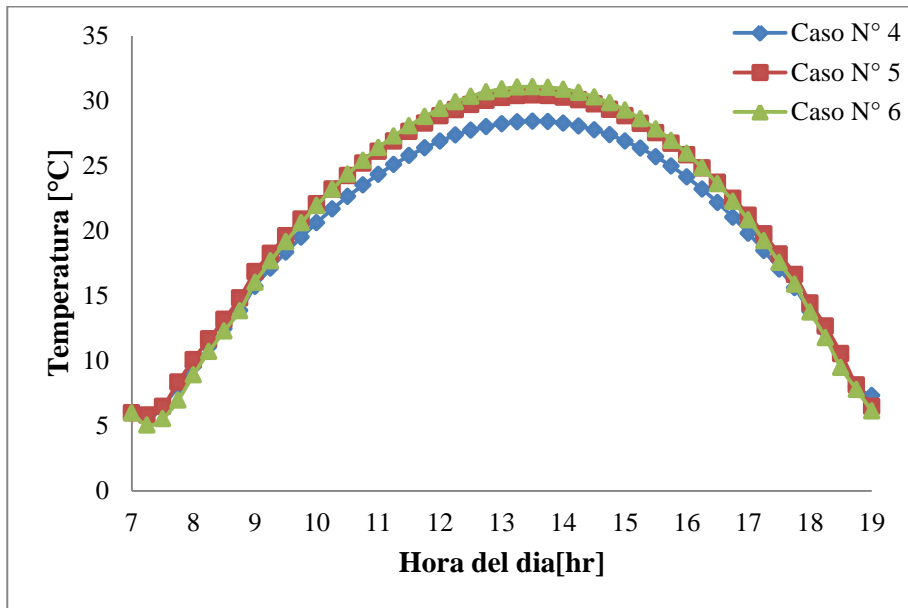


Figura 5.55: Temperatura promedio en la habitación para un muro de 30 [cm].

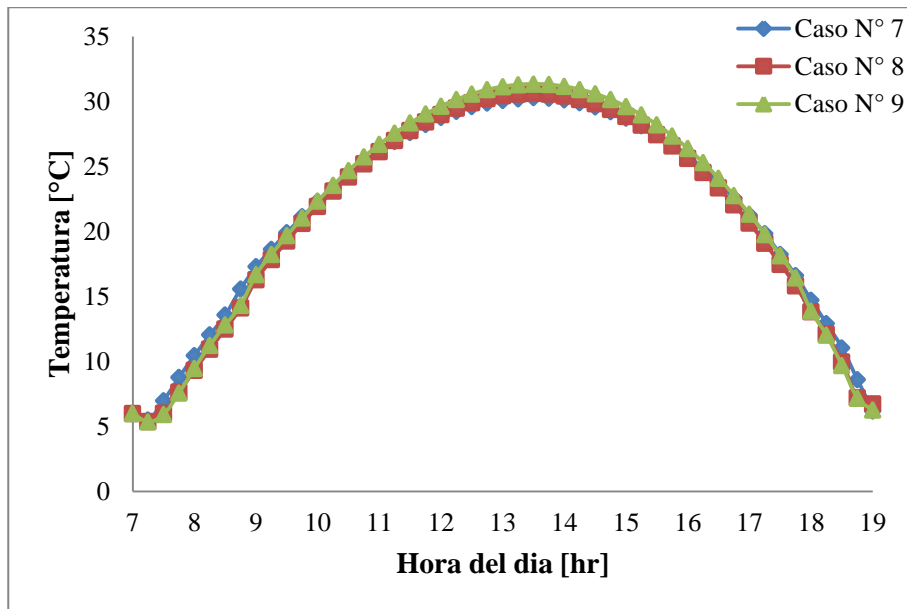


Figura 5.56: Temperatura promedio en la habitación para un muro de 35 [cm].

Al igual que el caso anterior, se analizara el rango de confort térmico en la habitación. Para esto se muestran los mayores gradientes de temperatura producidos a lo largo del día, donde se trazaron 2 líneas verticales, al igual que el caso de invierno antes descrito.

Se observa para una altura de hasta 1.25 [m] desde el suelo, el gradiente térmico en dirección vertical varia muy poco y su valor asciende en 2 [°C/m]. La temperatura máxima alcanzada se observa en la Figura 5.59, alcanzando un valor de 47 [°C] para el caso N° 9, el cual posee un ancho en el canal de aire de 20 [cm]. Por último, el rango de confort térmico se encuentra hasta una altura de 1 [m] desde el suelo para todos los casos analizados.

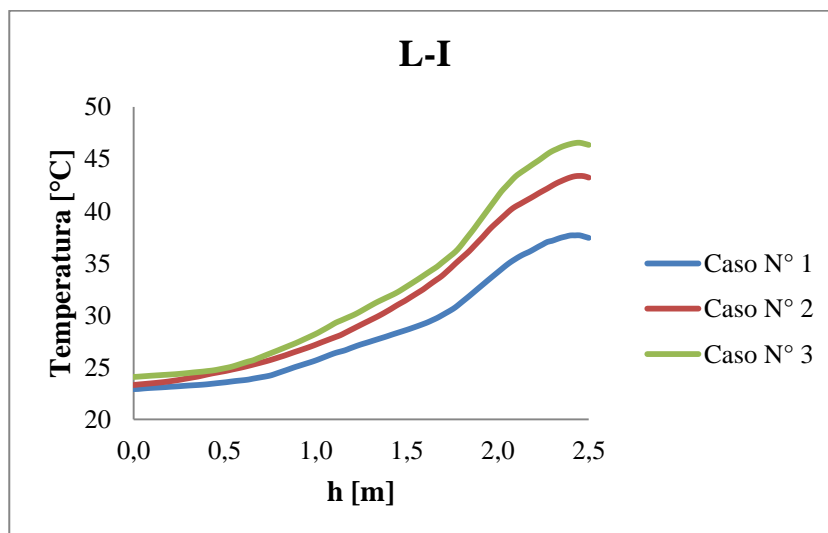


Figura 5.57: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].

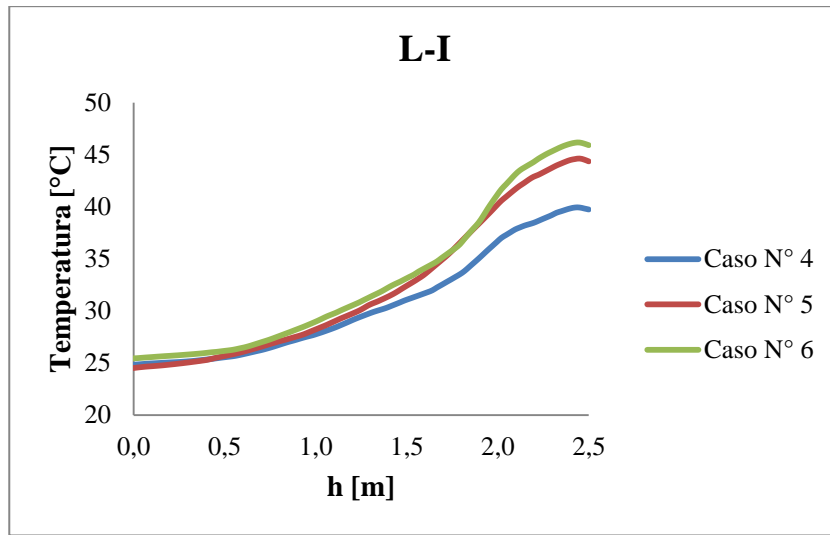


Figura 5.58: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].

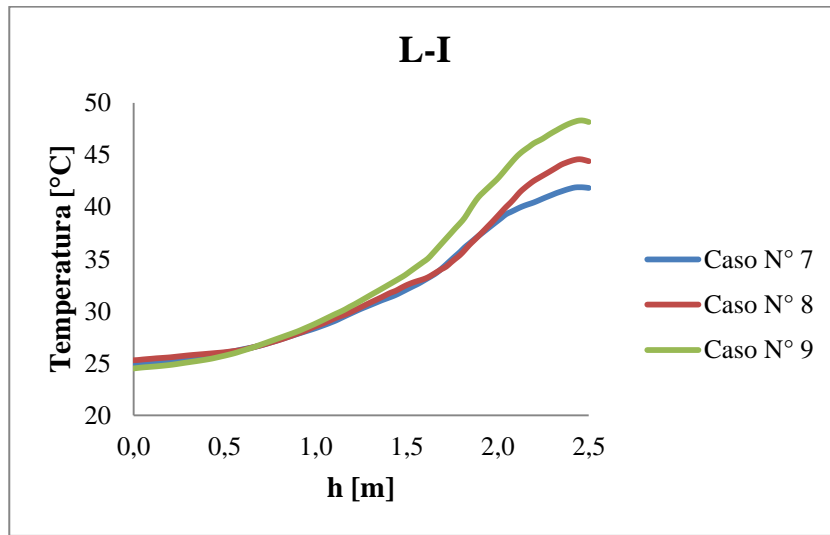


Figura 5.59: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].

Para L-II tenemos que las temperaturas alcanzadas no varían mucho entre todos los casos. El gradiente térmico de temperatura varía poco hasta una altura de 1 [m] desde el suelo, y su valor es de 6 [°C/m] en promedio. Se aprecia poca diferencia entre todos los casos analizados y donde su valor máximo alcanza los 67 [°C]. Debido al calor específico del material utilizado (madera). El confort térmico se encuentra hasta una altura de 1 [m] desde el suelo aproximadamente. Por último, a una altura de 2.3 [m] hacia el techo de la habitación, la temperatura se eleva exponencialmente, debido al ingreso de aire caliente que se produce por la incidencia del sol, lo cual puede incurrir en condiciones desconformes para los habitantes.

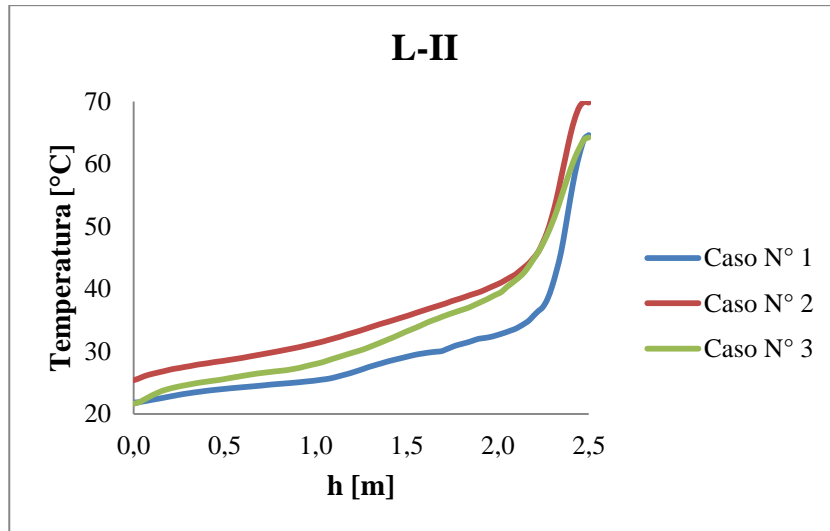


Figura 5.60: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].

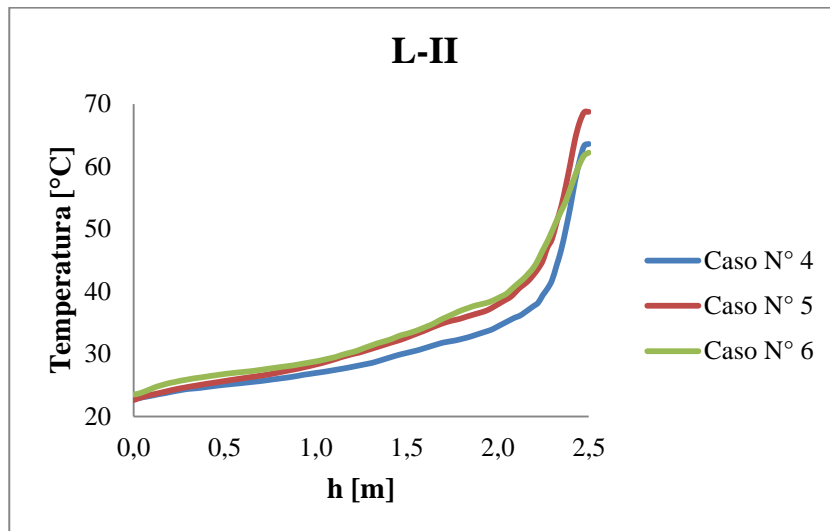


Figura 5.61: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].

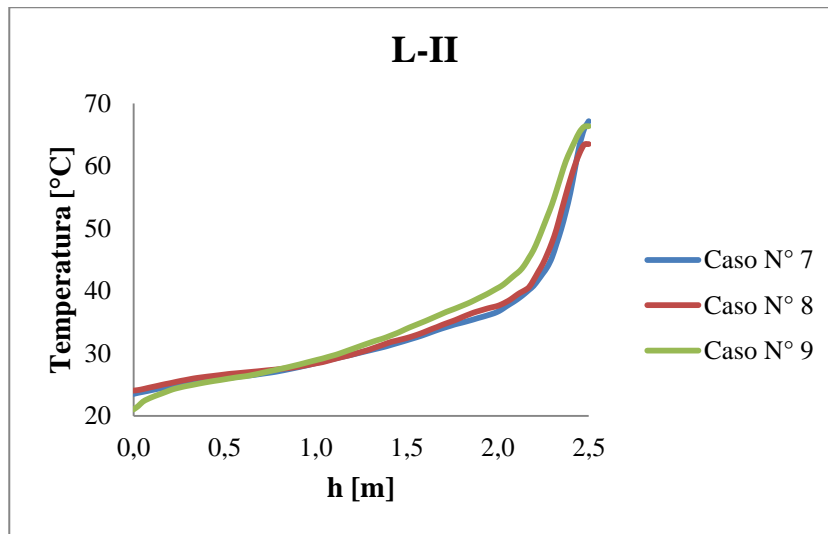


Figura 5.62: Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].

Se puede concluir que el rango de confort térmico en la habitación para un día de verano se encuentra a una altura de hasta 1 [m] desde el suelo.

5.4.6 Masa Termica

Como se analizó anteriormente para el caso de invierno, se tendrá en cuenta el porcentaje de volumen de concreto el cual se encuentra a una temperatura superior a los 10 [°C]. La Tabla a continuación revela para todos los casos analizados sus respectivos valores al final del día.

Tabla 5.3: Porcentaje de volumen de concreto donde la temperatura es mayor a 10 [°C].

Casos	Concreto	Temperatura [°C]
1	28%	14
2	33%	12
3	38%	13
4	31%	14
5	36%	14
6	41%	13
7	35%	12
8	40%	12

9	45%	12
---	-----	----

Al igual que el análisis anterior, se observa que el mayor aumento de temperatura se produce en la primera columna de concreto para todos los casos, debido a la formación de la capa límite hidrodinámica que se produce por el reingreso de aire que interactúa entre las primeras columnas de concreto y la habitación. Por otro lado, la parte superior de los primeros muros alcanza un nivel térmico alto, debido a los mayores gradientes temperatura que se producen. A pesar de la gran diferencia de la temperatura en el aire detectada en la habitación, el volumen de concreto parece casi isotérmico. Por último, la contribución de las demás columnas de concreto es superior al caso de invierno, ya que hasta la cuarta columna de concreto se alcanza una temperatura igual o superior a la habitación al final del día.

Capítulo 6

Rendimiento del Sistema

En este capítulo se seleccionara una geometría para cada día simulado, donde se analizara el promedio de temperatura vs la temperatura exterior, energía almacenada por la masa térmica, balance de energía y eficiencia del sistema.

6.1 Temperatura promedio vs Temperatura exterior

Con los datos obtenidos anteriormente, se procede a seleccionar las geometrías más representativas para cada día analizado, se seleccionó el caso N° 3, para el caso de verano e invierno respectivamente, los cuales cumplen con el calefaccionamiento en la vivienda y una temperatura mayor de la masa térmica al final del día.

Los valores promedio de temperatura que se encuentran al interior de la habitación para ambos días simulados se muestran a continuación. Para esto se tomaron las temperaturas promedio en el centro de la habitación versus la temperatura exterior de la habitación. La figura a continuación presenta los resultados para ambos días modelados.

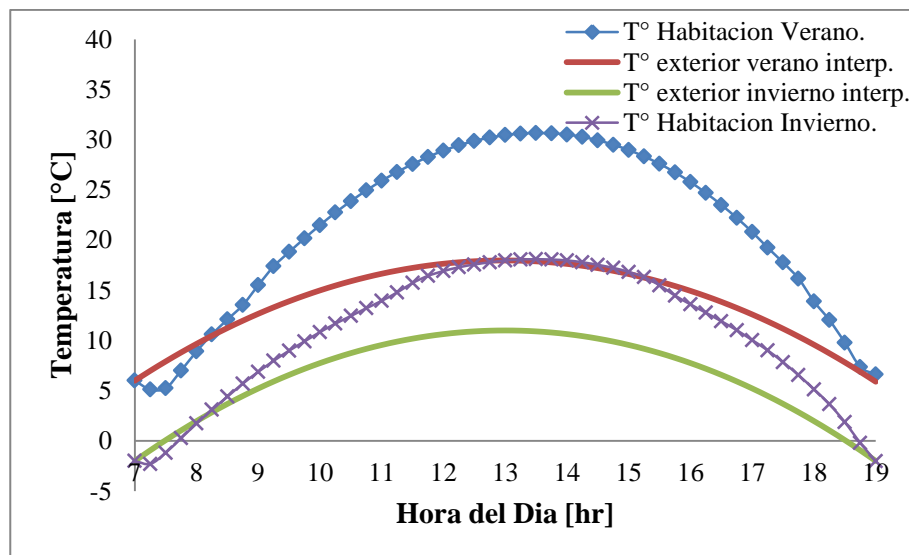


Figura 6.1: Distribución de temperatura en la habitación v/s Temperatura exterior.

Para el caso de invierno, a las 9:00 [hr] la energía solar ya calentaba la habitación por sobre la temperatura exterior, alcanzando 5 [°C]. El sistema alcanza la máxima temperatura a las 13 [hr], llegando a los 18 [°C], superando por 9 [°C] a lo alcanzando en el exterior. Después de las 14 [hr] las temperaturas decrecen moderadamente debido al comportamiento de la energía solar incidente sobre el vidrio. Durante el transcurso de un día de verano, el sistema empieza a incrementar la temperatura a las 9:00 [hr]. El aumento de la temperatura depende del comportamiento de la radiación solar incidente. A las 14 [hr] la temperatura de la habitación supera por más de 12 [°C] al exterior, lo cual decae progresivamente hasta el final del día.

Para ambos casos se observa una diferencia importante respecto a las temperaturas exteriores, donde se puede decir que para un día de invierno, la temperatura al interior de la habitación es un 60% mayor que la exterior y para el caso de verano la temperatura aumenta en un 65%, en promedio.

6.2 Energía Almacenada por el muro Trombe Escalonado

La figura a continuación presenta el comportamiento de la energía almacenada por la masa térmica durante ambos días analizados. Para un día típico de invierno el valor de la energía almacenada en las primeras horas es menor que para un día de verano. Sin embargo, después de las 10:00 [hr] la energía almacenada durante el día más caliente es mayor que la energía almacenada del día más frío. A medida que se alcanza la puesta de sol, la diferencia entre ambos días tiende a disminuir, llegando a la mínima a las 19:00 [hr]. A esta hora la energía almacenada es de 1200 [KJ] para el día de invierno y de 1700 [KJ] para verano.

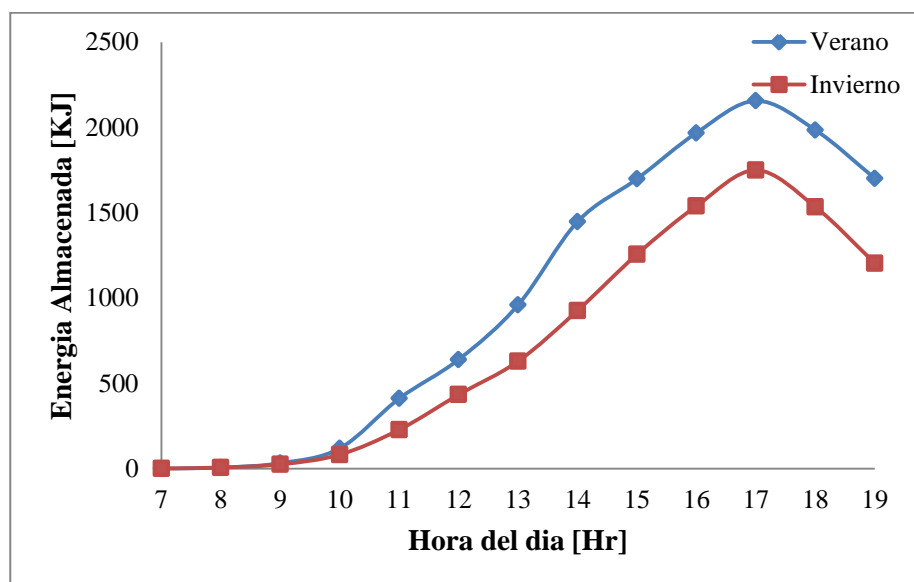


Figura 6.2: Energía almacenada por el Muro Trombe Escalonado.

La razón de esta diferencia se debe a que la radiación solar en una superficie inclinada, la cual está orientada al sur, es mayor para el solsticio de verano que para invierno. Así, debido a que la energía proporcionada por el sol es mayor, la masa térmica almacenara más energía.

Por otra parte, se observa que después de las 17:00 [hr] hay una reducción de la energía almacenada por el muro Trombe Escalonado. Esto indica que la masa térmica comienza a disipar parte de su potencial térmico. Por último, la energía máxima almacenada por el muro Trombe Escalonado en ambos días es de 2200 [KJ] y 1700 [KJ] para verano e invierno respectivamente.

Obteniendo la energía acumulada al final del día y conociendo el costo de la electricidad [Kwh], se produce un ahorro de \$5000 y \$3600 para verano e invierno respectivamente. Esto confirma el potencial uso de este sistema.

6.3 Balance de energía y Eficiencia del sistema

Un aspecto importante a analizar concierne a las pérdidas de energía en el sistema del modelo propuesto a lo largo del día. La Tabla 6.1 muestra la tasa de transferencia de calor total en cada superficie del modelo, la cual fue comparada con las pérdidas totales El signo negativo indica que el calor está fluyendo sobre el dominio y el día analizado es verano.

Tabla 6.1: Flujos de calor sobre las superficies.

Superficie	Flujo Total Entregado [W]	Energía Total Perdida [W]
Pared izquierda (concreto)	-440	-157
Pared Superior (madera)	-1099	-534
Muros Internos	-596	3685
Pared Inclinada (vidrio)	-4374	-3150
Energía neta transferida	-6519	-156
Energía solar total ingresada	6323	
Balance de Energía	98 %	

Se observa una pérdida de energía del 70% a través del vidrio. Esto se debe a la proximidad entre el vidrio y la masa térmica que se mantiene a una temperatura elevada, dando como resultado un gran intercambio de radiación.

Para obtener la eficiencia del muro Trombe Escalonado, se realizaron simulaciones de 24 [hr] para un día de verano y una habitación sin las columnas de concreto (masa térmica). Se contrastaron las temperaturas obtenidas a lo largo del día, como se muestra en la Figura 6.3. Se tomó en cuenta la caída de temperatura exterior en la habitación en la noche, la cual fue ingresada como condición de borde (al igual que los casos anteriores), La temperatura exterior cae linealmente desde los 5 [°C] hasta los 0 [°C] entre las 19:00 [hr] y 6:00 [hr].

Se observa en la Figura 6.3 que la diferencia de temperatura máxima alcanzada es 20 [°C] entre ambos y se produce a las 13:00 [hr] (6 horas de iteración). Esta diferencia se debe a que parte de la energía que ingresa al sistema es acumulada por la masa térmica en el caso de la habitación con muro Trombe Escalonado. A partir de las 18:00 [hr] del día (11 horas de iteración) la temperatura en la habitación con el sistema de muro Trombe Escalonado es mayor y se acrecienta a medida que pasan las horas, debido a que la energía acumulada en la masa térmica empieza a calefaccionar la habitación. Por último, la diferencia entre la implementación del muro Trombe Escalonado y una habitación sin este sistema es de 15 [°C] al final del día.

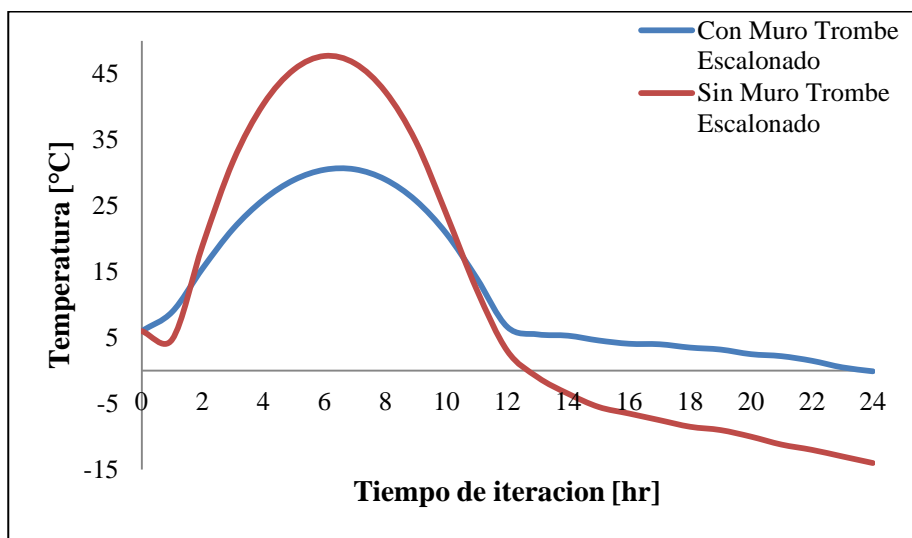


Figura 6.3: Diferencias de temperaturas entre sistemas.

La tabla a continuación resume lo descrito anteriormente y muestra la energía acumulada luego de 24 [hr] para ambos días analizados.

Tabla 6.2: Resumen del sistema implementado.

Rendimiento Sistema	Invierno	Verano
Temperatura superior al entorno	60%	65%
Energía Acumulada Masa Térmica	9610 [KJ]	13122 [KJ]
Dinero Acumulado	\$3600	\$5000
Energía Acumulada Masa Térmica (24 Hr)	1115 [KJ]	3203 [KJ]
Dinero Acumulado (24 Hr)	\$800	\$2400

Se aprecia que cerca del 88% de la energía almacenada durante el día se utiliza para calefaccionar la habitación para invierno. Esta pérdida significativa está influenciada fuertemente por la menor absorción de energía durante el periodo de insolación y la disminución de temperatura exterior, la cual desciende desde los -2 [°C] a las 19:00 [hr] hasta los -7 [°C] a las 6:00 [hr]. Por otra parte, en

verano solo el 75% de la energía es transferida hacia la vivienda en el periodo nocturno. Cabe destacar que la implementación de este sistema de muro Trombe Escalonado satisface los requerimientos de calefacción tanto en el día como en la noche y aumentaría su eficiencia a medida que pasan los días, debido a la energía residual que se produce cada día. Por último, se recomienda aislar la pared vidriada durante periodos sin insolación, para así reducir las pérdidas de energía por radiación, las cuales son significativas.

Conclusiones

Este trabajo de tesis se realizó una simulación numérica de la dinámica de fluidos y el comportamiento térmico de un sistema solar pasivo para la calefacción de viviendas llamado muro Trombe Escalonado, cuyo principio de funcionamiento es la circulación de aire mediante convección natural. Para ello, se realizó una simulación computacional utilizando el software comercial ANSYS Fluent 17.1, el cual utiliza el método de volúmenes finitos. Los objetivos específicos fueron los siguientes:

1. Determinar la distribución de temperatura en una habitación de la vivienda utilizando muro Trombe Escalonado en régimen transiente.
2. Obtener el flujo de calor transferido hacia la vivienda.
3. Determinar dimensiones de diseño del muro Trombe Escalonado para la calefacción en la habitación, según el rango de confort térmico (ASHRAE).

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- El muro Trombe Escalonado permite alcanzar temperaturas promedio en el centro de la habitación de hasta 20 [°C] y 30 [°C], para invierno y verano respectivamente.
- La temperatura al interior de la habitación es hasta 7 [°C] y 12 [°C] mayor que la temperatura exterior, para invierno y verano respectivamente.
- La energía acumulada por la masa térmica del muro Trombe Escalonado hasta las 19 [hr] es de 9610 [KJ] y 13122 [KJ], para invierno y verano respectivamente.
- Luego de 24 [hr] de funcionamiento del muro Trombe Escalonado, la energía obtenida en la masa térmica es de 1115 [KJ] y 3203 [KJ], para invierno y verano respectivamente.
- A partir de las 17 [hr], el muro Trombe Escalonado empieza a disipar la energía acumulada a la habitación.
- El rango de confort térmico se encuentra hasta 1 [m] desde el suelo para verano. Superando esta altura, se produce un leve sobrecalentamiento en la habitación. Para

invierno, el rango de confort térmico se encuentra entre 1 [m] y 1.5 [m] de altura. Se produce una leve disminución de temperatura por debajo de este rango, alcanzando los 10 [°C] y sobre 1.5 [m] de altura, la temperatura máxima asciende a 48 [°C], lo cual produce disconfort para las personas.

- El 85% de la masa térmica es útil para el calefaccionamiento nocturno.
- La diferencia de temperatura promedio en la habitación entre todos los casos analizados no supera los 5 [°C] para invierno y verano respectivamente.

En base a estas conclusiones, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros en esta área de investigación:

- Realizar simulaciones tridimensionales a escala real, para así estudiar cómo afecta la distribución de temperatura en la vivienda con la inclusión de puertas, ventanas, personas, entre otros.
- Estudiar la implementación de ventiladores en los canales de aire y aislamiento en la pared vidriada, para así evitar la recirculación de aire frío hacia la habitación, como también reducir las pérdidas de energía en periodos sin insolación.
- Diseñar un sistema para concentrar y aprovechar el excedente de aire caliente e investigar su factibilidad.
- Analizar el aumento de la absorción de energía de la masa térmica con las ventilas cerradas, para así disminuir el sobrecalentamiento en periodos de alta radiación solar.
- Considerar más parámetros en el entorno urbano, tales como edificios y casas entre otros.

Bibliografía

- [1] <http://www.energia.gob.cl/energias-renovables> Visitada el 30/01/2016
- [2] Hami, k., Draoui, B., Hami, O., The thermal performances of a solar wall. Energy 39, Hami, 11-16. (2012).
- [3] B.K. Koyunbaba, Z. Yilmaz, The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels
- [4] Koch-Nielsen, H. Stay cool: A Design Guide for the Built Environment in Hot Climates. James & James. (1982).
- [5] Thorpe, D., SolarTechnology: The earthscan expert guide to using solar energy for heating, cooling and electricity. Earthscan London. (2011).
- [6] Nahar, N.M., Sharma, P., Purohit, M.M., 2013. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. Build. Environ. 38, 109-116. (2003).
- [7] Chel, A., Nayak, J.K., Kaushil, G., Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, International Journal of Energy and Building. 40, 1643-1650. (2008).
- [8] Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C.H., Asim, N., Sulaiman, M.Y., Trombe walls: a review of opportunities and challenges in research and development. Renew. Sustain. Energy Rev. 16,6340 – 6351. (2012).
- [9] <http://www.centralenergia.cl/2011/07/25/energia-solar-en-el-norte-de-chile-enormes-posibilidades/> Visitada el 30/03/2016.
- [10] Stazi F, Mastrucci A, di Perna C. The behavior of solar walls in residential buildings with different insulations levels: an experimental and numerical study. Energy and Buildings. (2011).
- [11] Thorpe, D., Solar Technology: The earthscan expert guide to using solar energy for heating cooling and electricity. Earthscan London- (2011).
- [12] Teschner Na, Mc Donald A, Foxon TJ, Paavola J. Integrated transitions toward sustainability: the case of water and energy policies in Israel. Technological Forecasting and Social Change; 79: 457-68. (2011).
- [13] Agrawal, P.C., A review of passive systems for natural heating and cooling of buildings. Sol. Wind Technol. 6, 557-567. (1989).
- [14] IEA Solar Energy Perspectives. Solar Radiation Spectrum at the top of the atmosphere and sea level. (2011)

- [15] Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. Ministerio de Energía de Chile. (2012)
- [16] Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética, Chile. Energía solar para la generación de electricidad y calor. Ministerio de Energía. Chile. (2014).
- [17] Cengel, Ghajar. Transferencia de Calor y Masa. México. Mc Graw Hill. (2011).
- [18] <https://maps.nrel.gov/swera> Visitada el 30/05/2016.
- [19] Plan de Desarrollo comuna Arica y Parinacota. Ilustre Municipalidad de Arica. (2014)
- [20] Stazi F, Mastrucci A, di Perna C. The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: an experimental and numerical study. *Energy and buildings*. (2011).
- [21] Hatamipour MS, Abedi A. Passive cooling systems in buildings: some useful experiences from ancient architecture for natural cooling in a hot and humid region. *Energy Conversion and Management*. 49: 2317-23. (2008).
- [22] khedari J, Lertsatitthanakorn C, Pratinthong N, Hirunlabh J. The modified Trombe wall: a simple ventilation means and an efficient insulating material. *International Journal of Ambient Energy*; 19: 104-10. (1998).
- [23] Abraham Y. A Knowledge based CAAD system for passive solar architecture. *Renewable Energy*. 34: 769-79. (2009).
- [24] Balcomb JD, McFarland RD. Simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage wall type. (1978).
- [25] Ferreira J, Pinheiro M. In search of better energy performance in the Portuguese Buildings- the case of the Portuguese regulation. *Energy Policy*. 39: 7596-83. (2011).
- [26] Sebald AV, Clinton JR, Langenbacher F. Performance effects of Trombe wall control strategies. *Solar Energy*. 23: 479-87. (1979).
- [27] V. S. A. Efficient simulation of large, controlled passive solar systems: forward differencing in thermal networks. *Solar Energy*. 34: 221-30. (1985).
- [28] Jie J, Hua Y, Gang P, Bin J, Wei H. Study of PV-Trombe Wall assisted with DC fan. *Building and Environment*. 42: 3529-39. (2007).
- [29] Jaber S, Ajib S. Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region. *Solar Energy*. 85:1981-8. (2011).
- [30] Nelson V. Introduction to renewable energy. Texas Taylor and Francis. (2011).

- [31] Agrawai B, Tiwari GN. Building integrated photovoltaic thermal systems: for sustainable developments. Delhi: Royal Society of Chemistry. (2011).
- [32] Ozbalta TG, Kartal S. Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey. *Scientific Research and Essats*. 5: 2768-78. (2010).
- [33] Guohui G. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and Buildings*; 27: 37-43. (1998).
- [34] Zalewski L, Lassue S, Duthoit B, Butez M. Study of solar walls validating a simulation model. *Building and Environment*; 37: 109-21. (2002).
- [35] Hami K, Draoui B, Hami O. The thermal performances of solar wall. (2012).
- [36] Nwachukwu NP, Okonkwo WI. Effect of an absorptive coating on solar energy storage in a Trombe wall system. *Energy and Buildings*; 40:371-4. (2008).
- [37] Nwosu NO. Trombe wall redesign for a poultry chick brooding application in the equatorial region-analisis of the thermal performance of the system using the Galerkin finite elements. *International Journal of Sustainable Energy*; 29:37-47. (2010).
- [38] Richman RC, Pressnail KD. A more sustainable curtain wall system: analytical modeling of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall. *Building and Environment*; 44:1-10. (2009).
- [39] ANSYS Fluent 17.1 Theory Guide, (2016).
- [40] Bajc T, Todorovic M, Svorcan J. CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand. *Energy and Buildings*; 98:39-44. (2015).
- [41] Guía de renovación de aire eficiente en el sector residencial. Fundación de Energía de España. (2014).

Anexo

Coefficiente de Transferencia de calor

La correlación empírica del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies verticales es;

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

Dónde:

$$Ra_L = \frac{g \cos \theta \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} Pr$$

T_s y T_∞ son las temperaturas superficiales y ambiente, respectivamente. Considerando $T_s = 300$ [°K] y $T_\infty = 290$ [°K], para un día promedio y utilizando las propiedades del aire a temperatura de película, $T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2} \approx 22$ [°C], $Pr = 0.7309$, $\nu = 1.516 \times 10^{-5}$ [$\frac{m^2}{s}$], $k = 0.02514$ [$\frac{W}{mK}$] y $\beta = 1/T_p$. Reemplazando estos valores se obtiene que: $Nu \approx 320$.

El coeficiente de Transferencia de calor sobre la superficie exterior es:

$$h_e = \frac{Nu * k}{L_c} \approx 3.2 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Análogamente, para la superficie interior es tenemos que:

$$h_i = \frac{Nu * k}{L_c} \approx 1.5 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Por otra parte, el coeficiente de transferencia de calor por radiación es:

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{alred}^2) (T_s + T_{alred})$$

Donde $\varepsilon_{ext} = 0.9$, $\varepsilon_{int} = 0.3$, $T_{alred} = T_{sky} = T_{ext} = 273$ [°K], $T_{alred} = T_{amb} = T_{int} = 293$ [°K] Reemplazando tenemos que:

$$h_{rad.ext} \approx 4.4 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$h_{rad.int} \approx 1.44 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

El coeficiente de transferencia de calor total se puede escribir como:

$$UA = \frac{1}{R_{total}}$$

Donde A es el área de la superficie de la pared, $0.5 [m^2]$. Aplicando el concepto de resistencias térmicas a través de paredes, tenemos que:

$$R_{total} = R_{interior} + R_{pared} + R_{exterior}$$

$$R_{interior} = R_{conveccion} + R_{radiacion} = \frac{1}{h_i A} + \frac{1}{h_{rad.int} A}$$

$$R_{pared} = \frac{L}{kA}$$

$$R_{exterior} = R_{conveccion} + R_{radiacion} = \frac{1}{h_e A} + \frac{1}{h_{rad.ext} A}$$

De donde;

$$R_{total} = 1.35 + 1.4 + 0.725 + 0.41 \approx 3.9$$

Finalmente;

$$U_{muro\ izquierdo} \approx 0.5 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Análogamente, se obtienen los demás coeficientes para las distintas superficies antes mencionadas

$$U_{suelo} \approx 0.2 \left[\frac{W}{m^2 K} \right], \quad U_{techo} \approx 0.25 \left[\frac{W}{m^2 K} \right], \quad U_{vidrio} \approx 0.75 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Resultados para un día típico de Invierno

A continuación se muestran las figuras obtenidas en las simulaciones. Cabe destacar que estas figuras son las menos representativas, pero es importante mostrarlas para ver su comportamiento térmico.

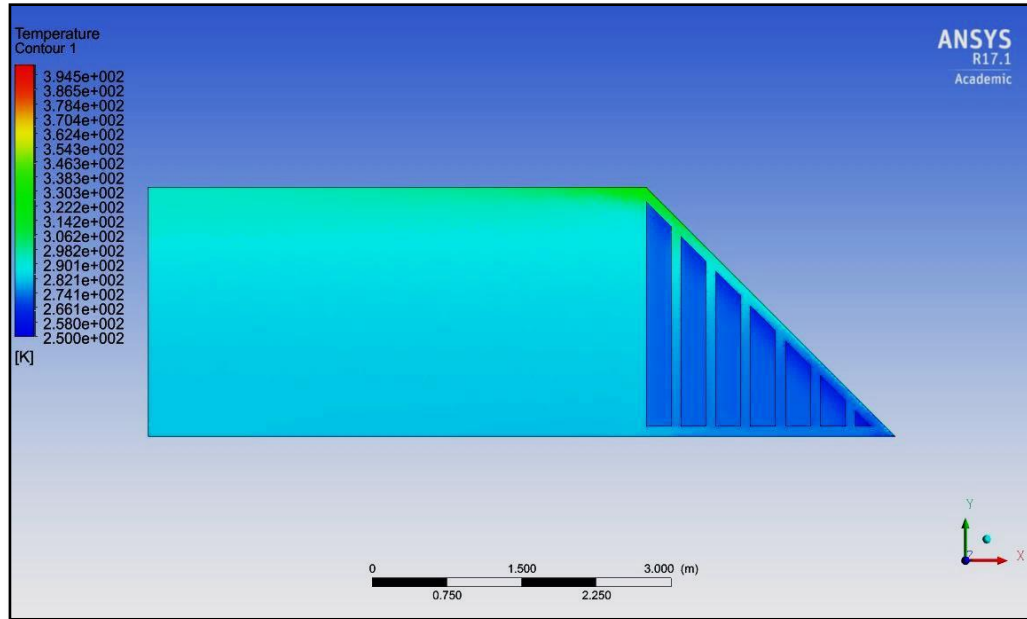


Figura 1: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°1.

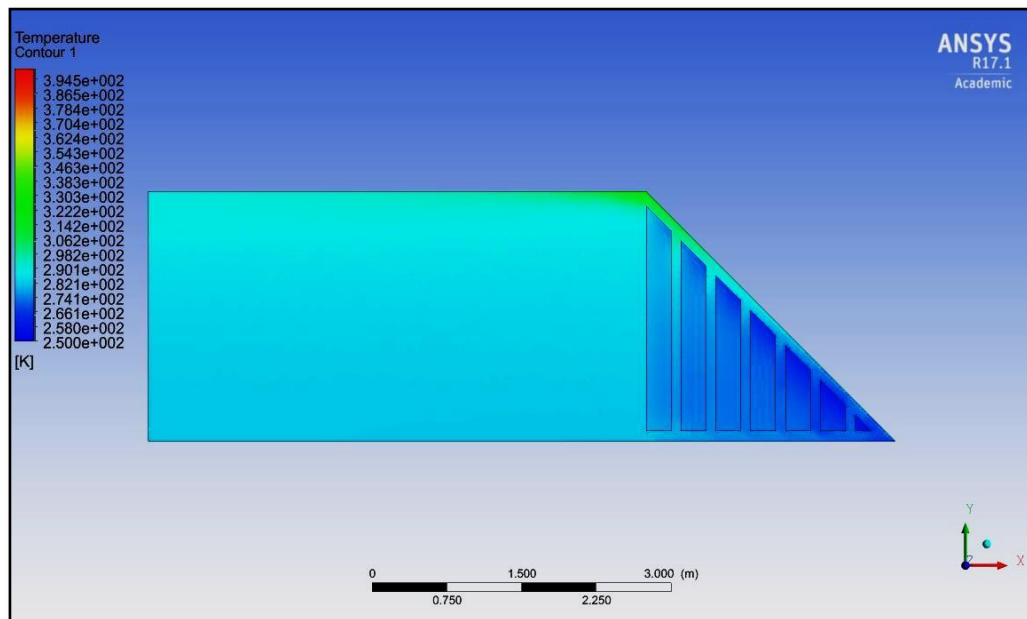


Figura 2: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°1.

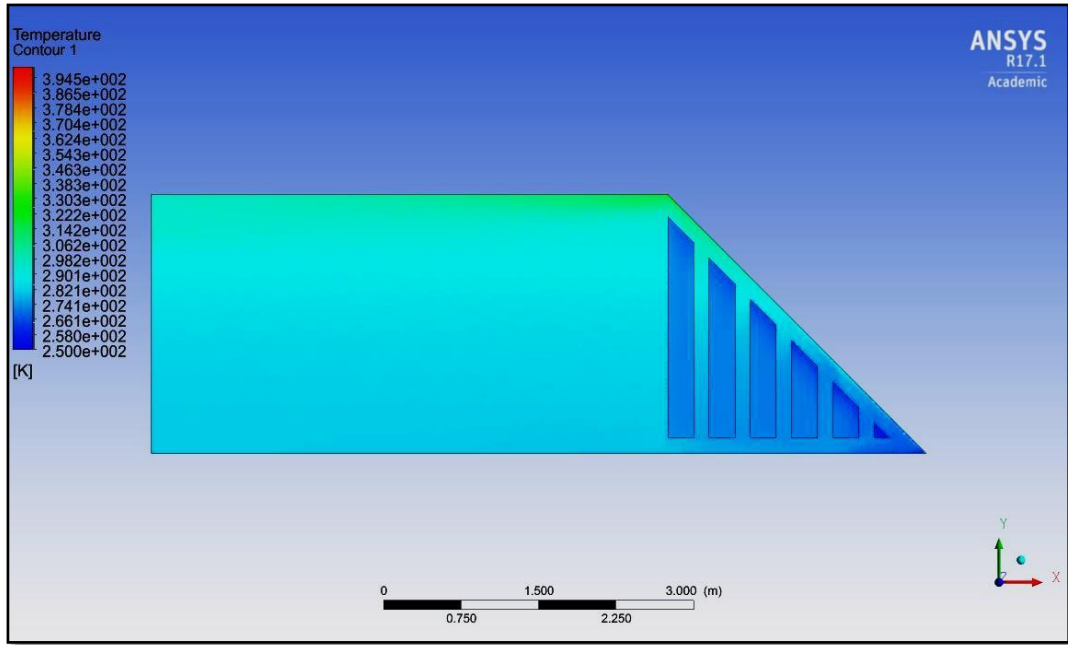


Figura 3: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°2.

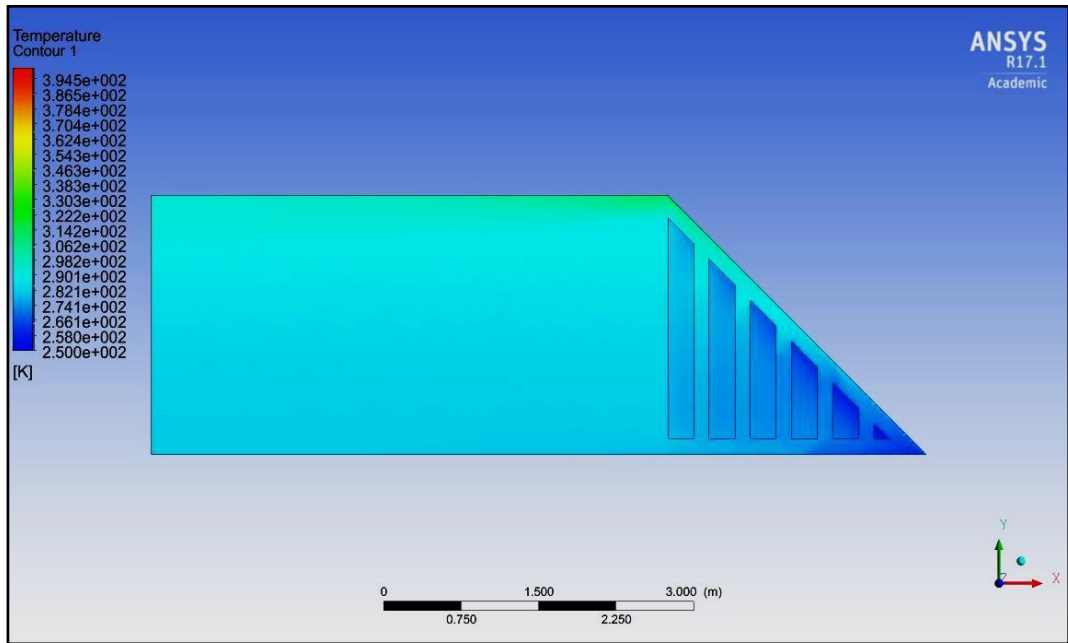


Figura 4: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°2.

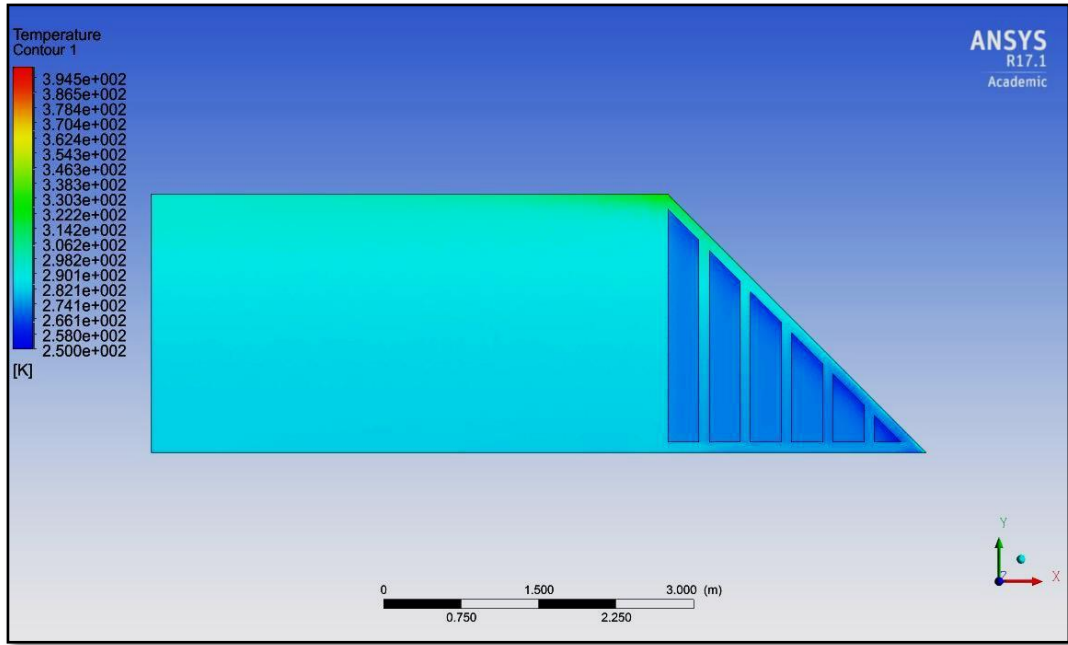


Figura 5: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°4.

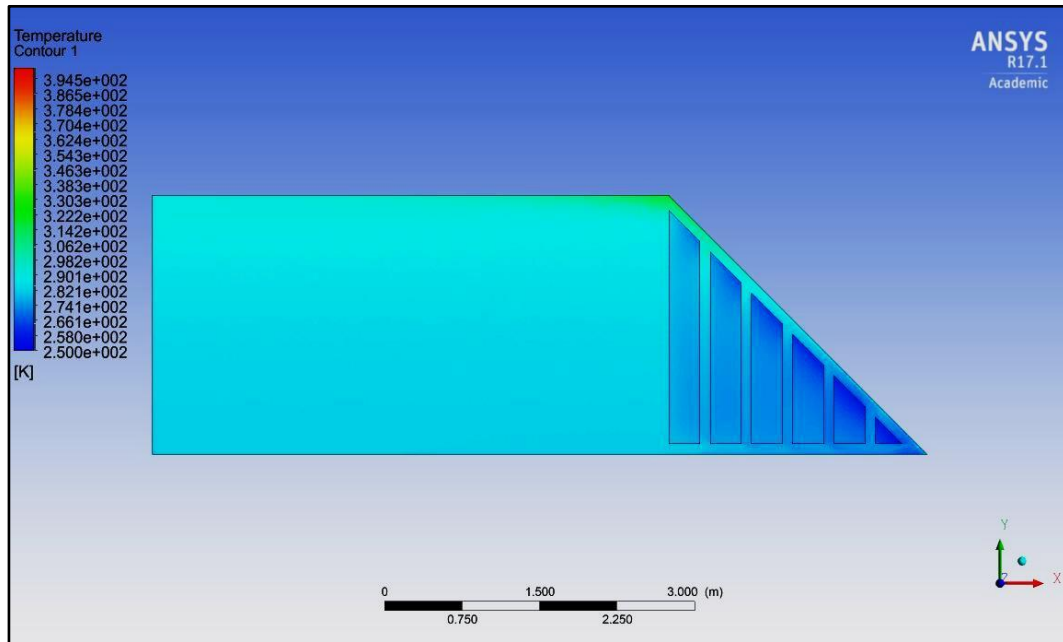


Figura 6: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°4.

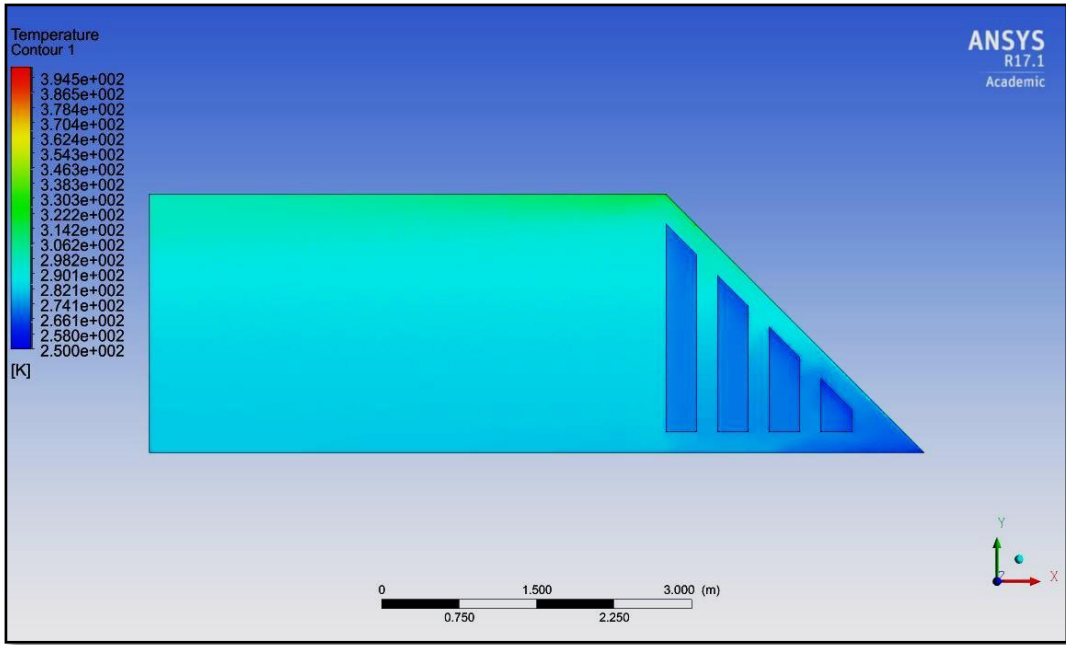


Figura 7: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°6.

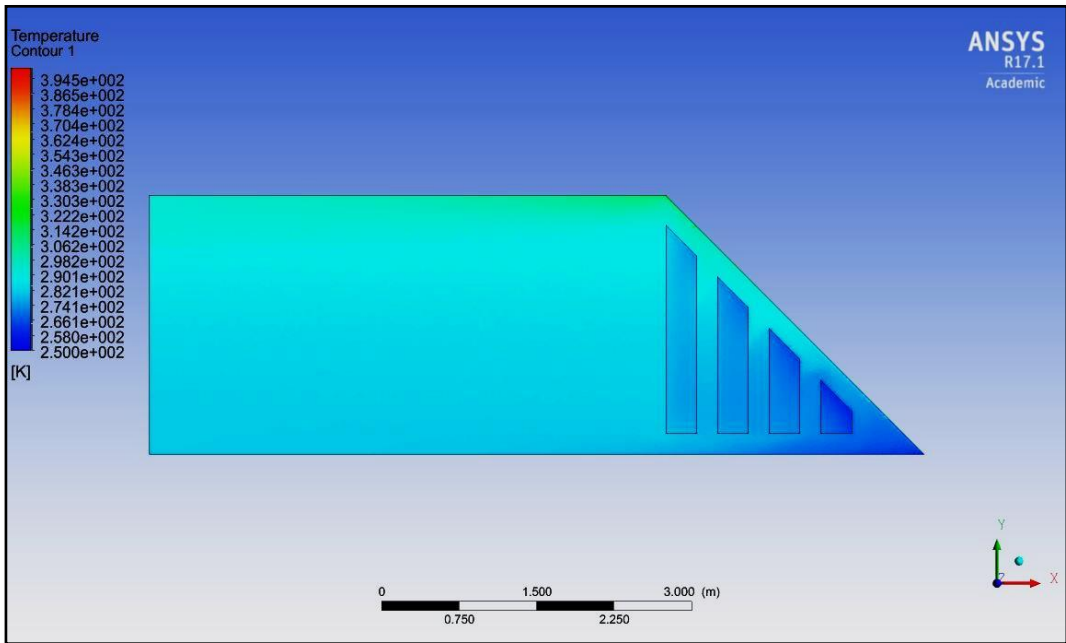


Figura 8: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°6.

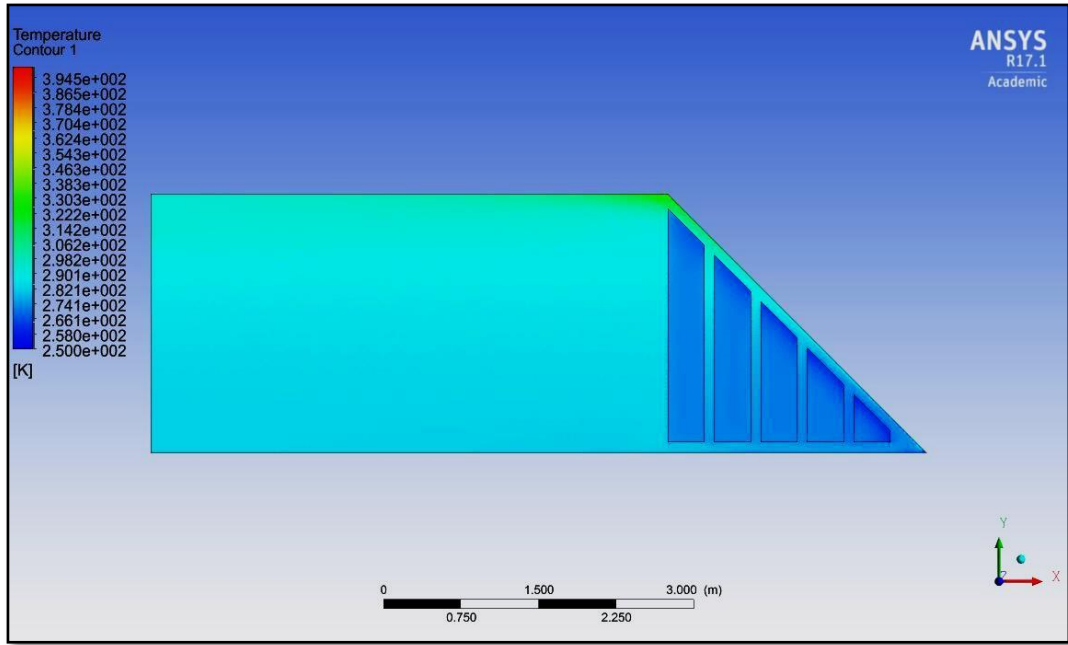


Figura 9: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°7.

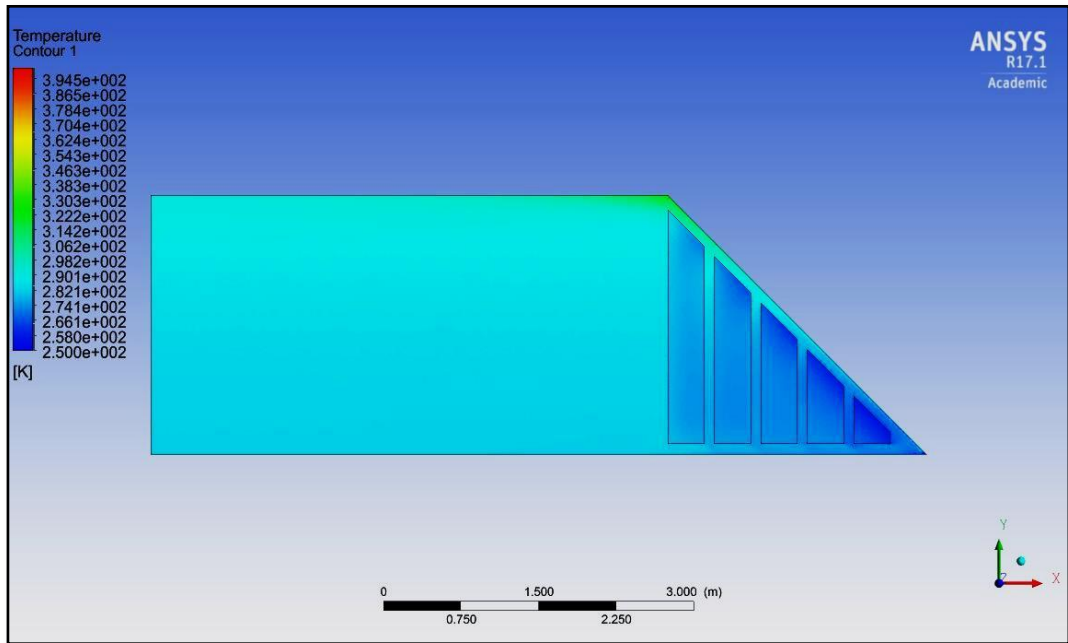


Figura 10: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°7.

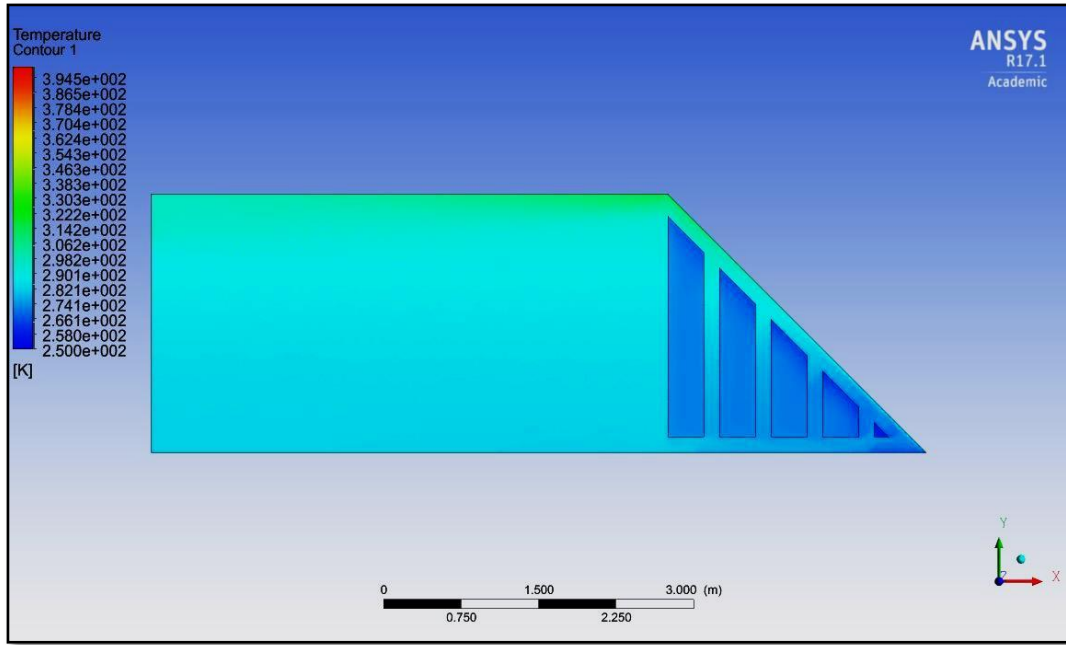


Figura 11: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°8.

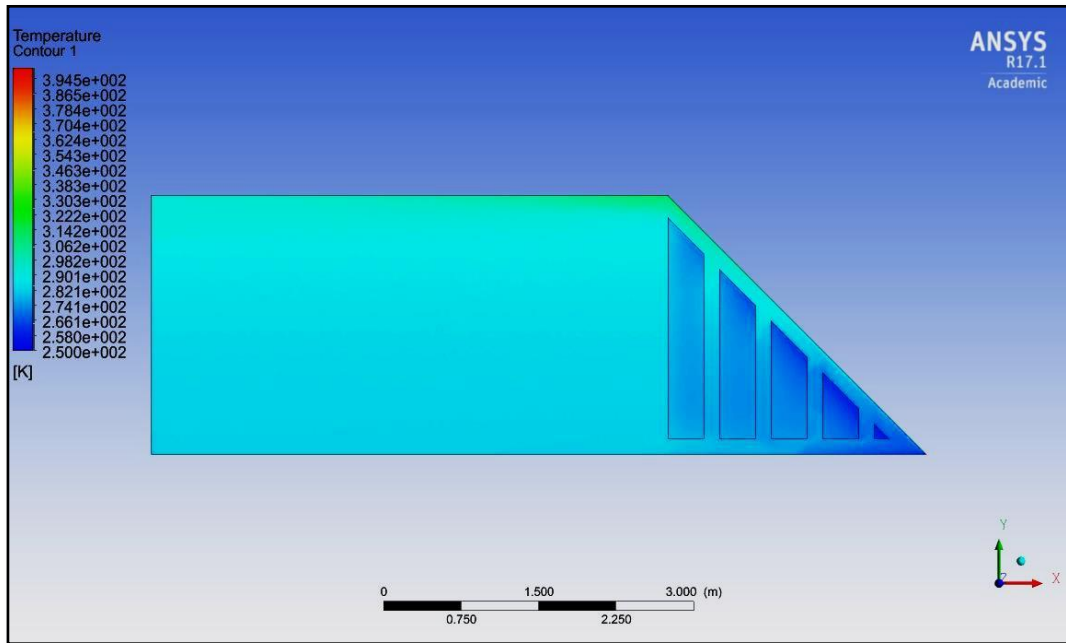


Figura 12: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°8.

Resultados para un día típico de Verano

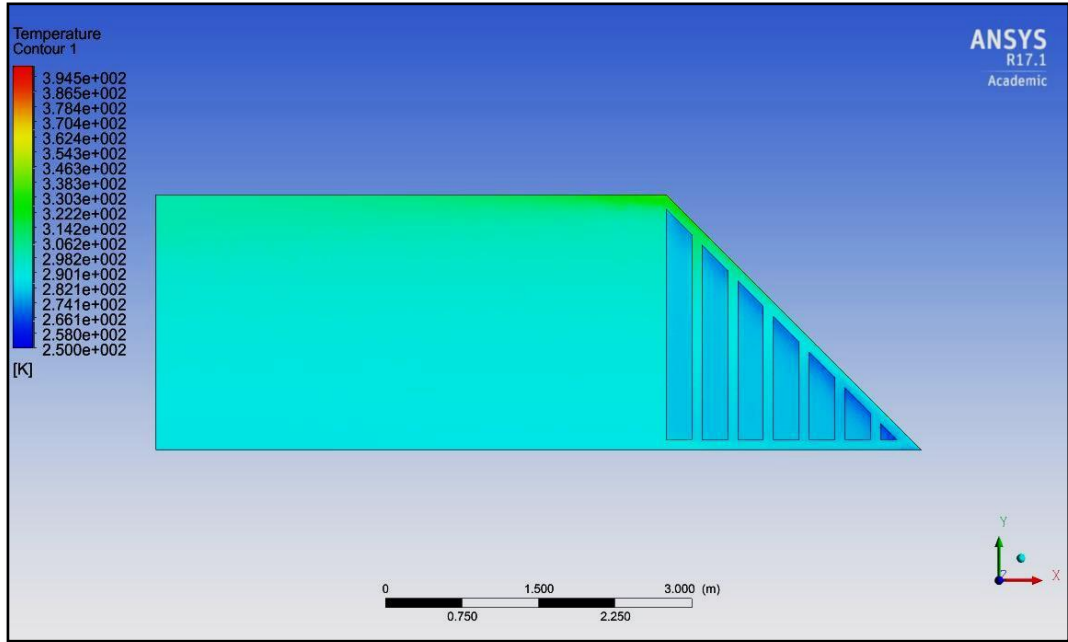


Figura 1: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°1.

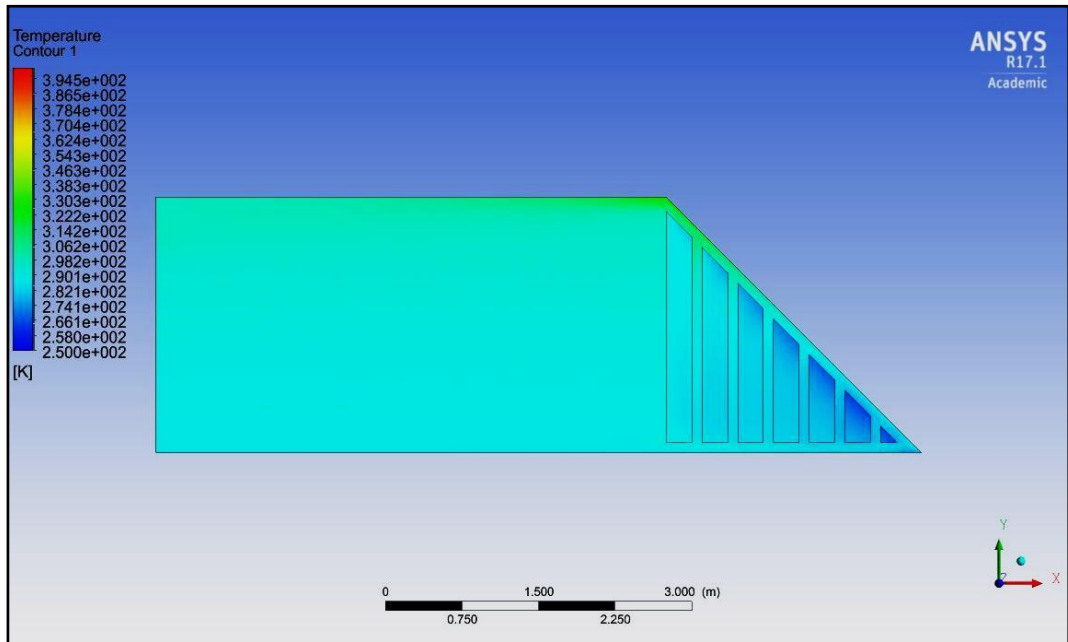


Figura 2: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°1.

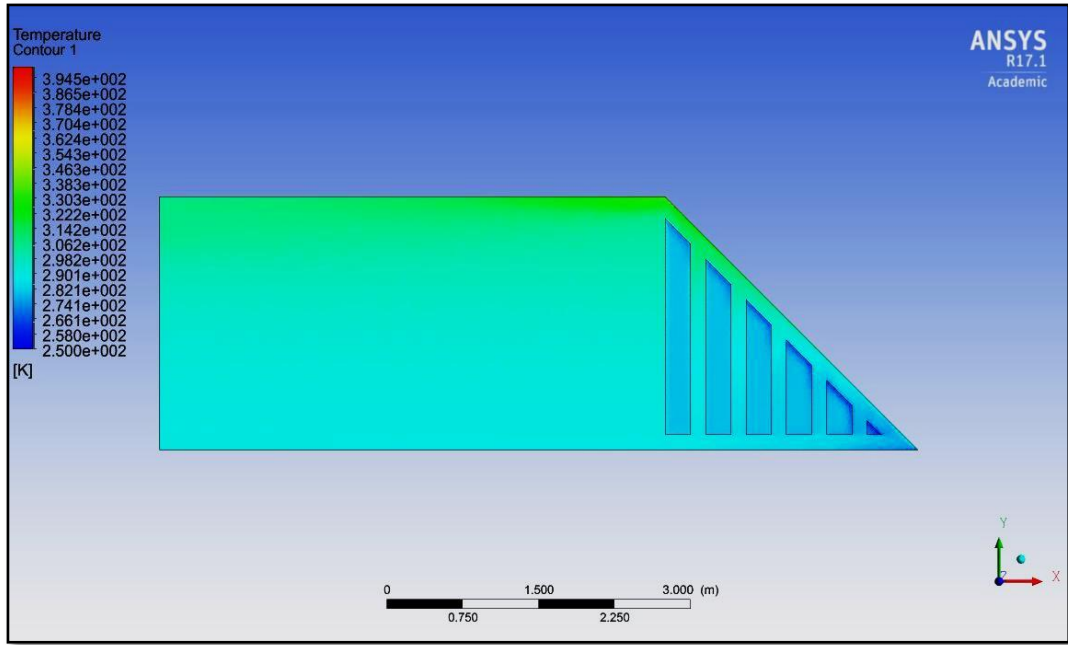


Figura 3: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°2.

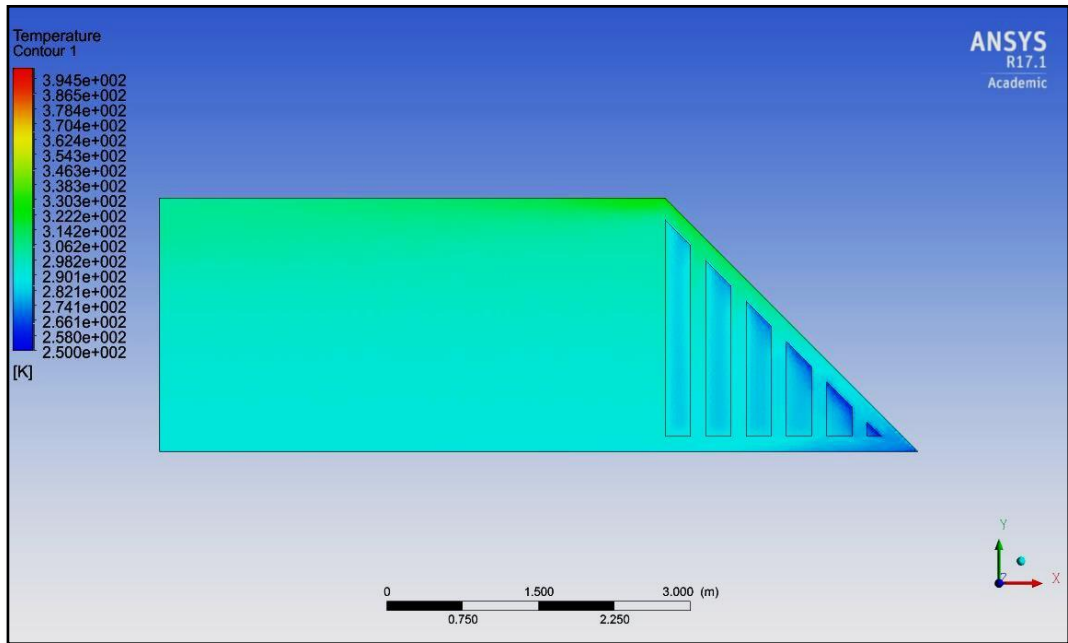


Figura 4: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°2.

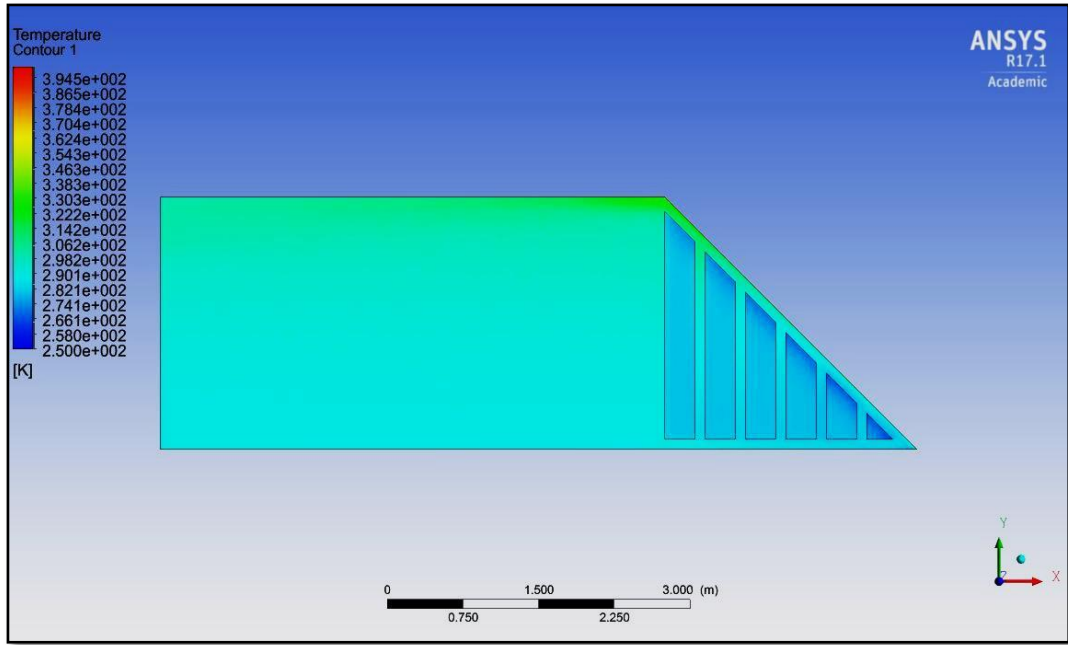


Figura 5: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°4.

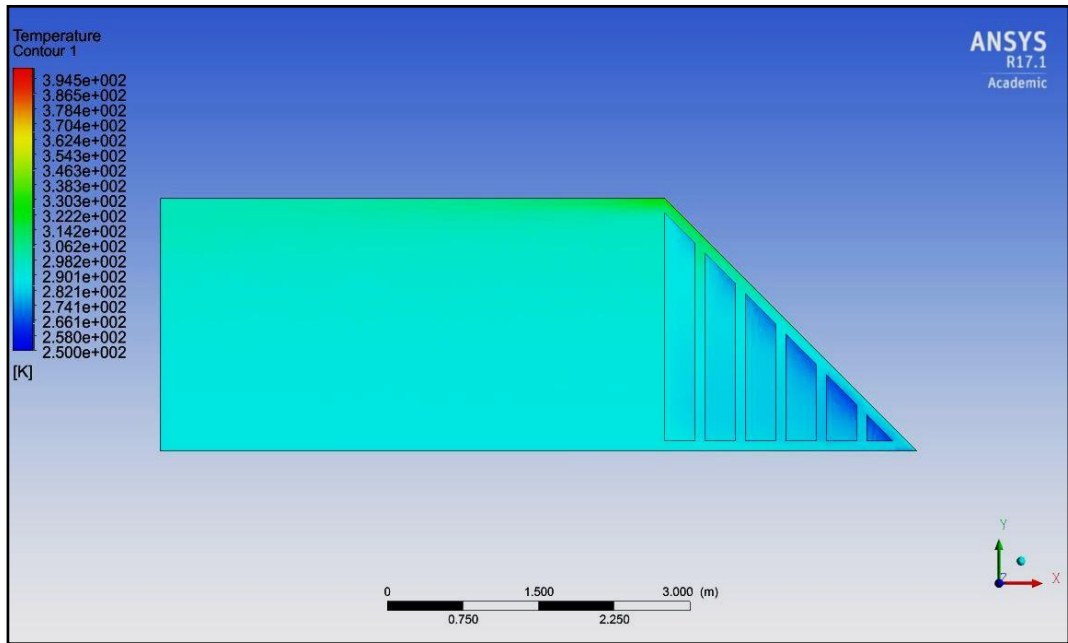


Figura 6: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°4.

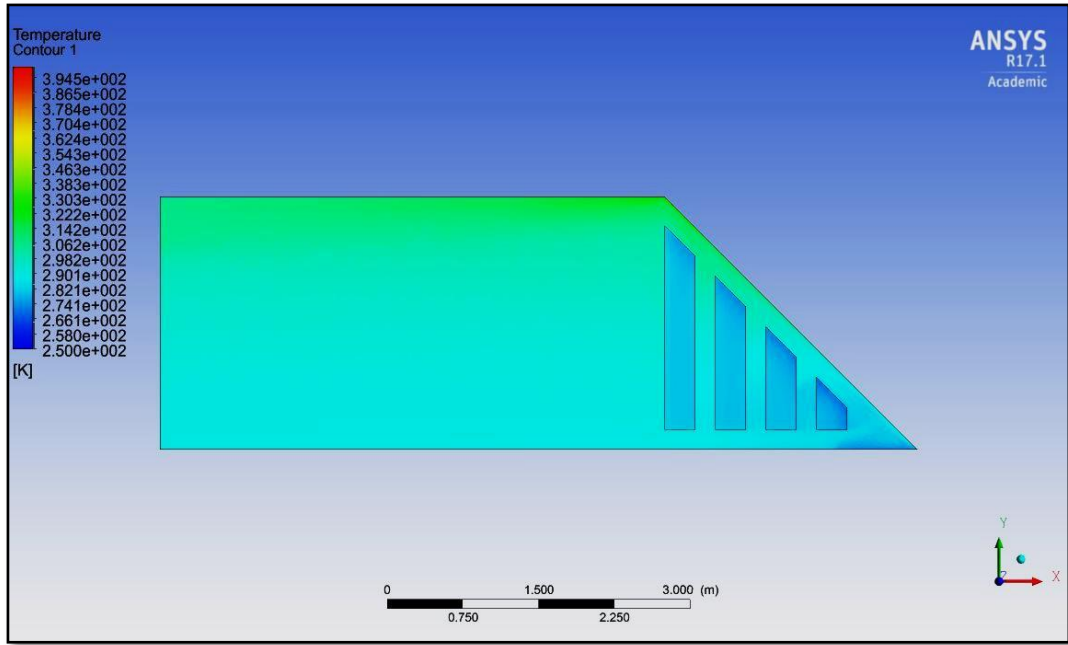


Figura 7: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°6.

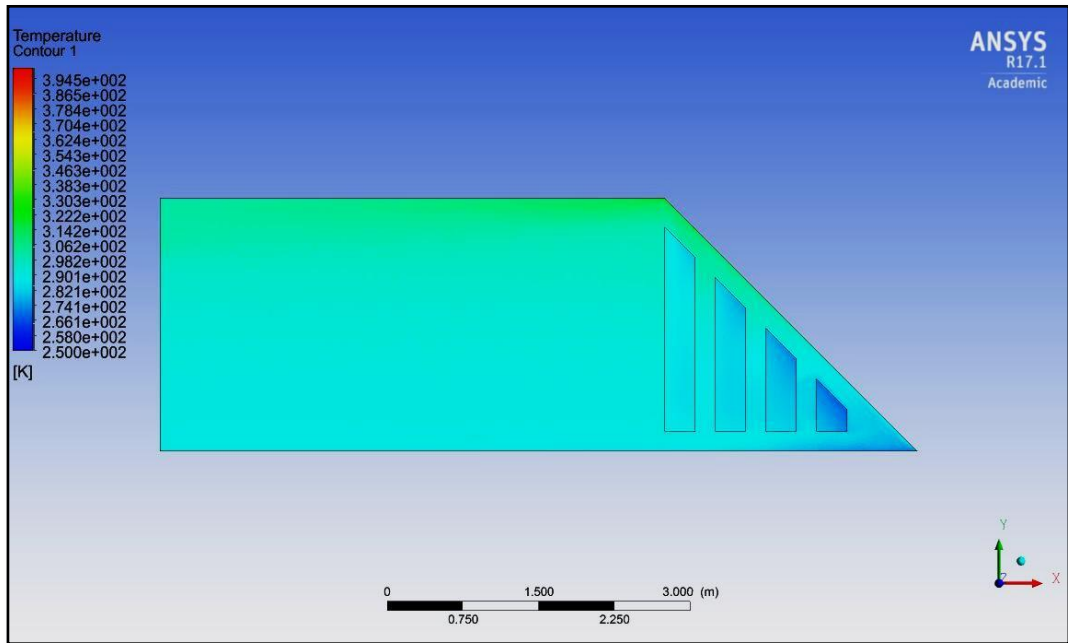


Figura 8: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°6.

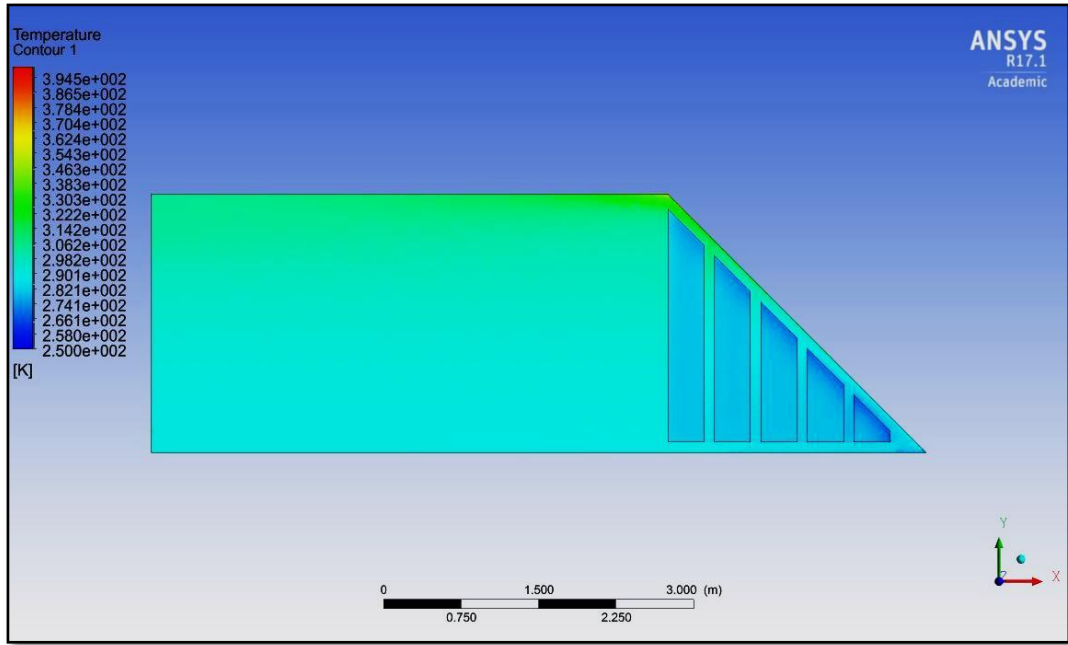


Figura 9: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°7.

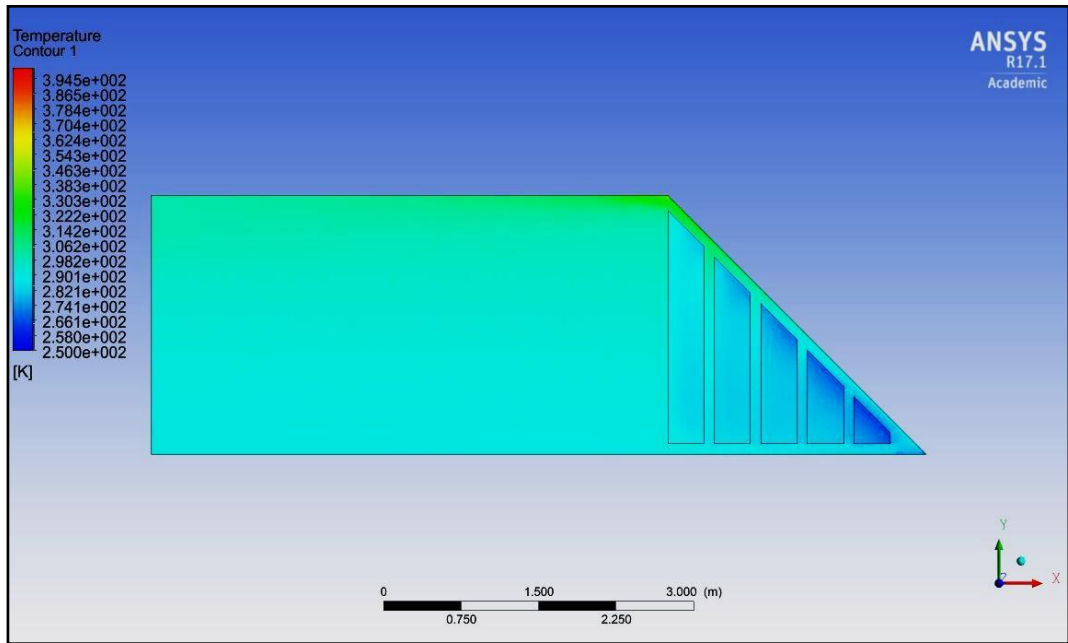


Figura 10: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°7.

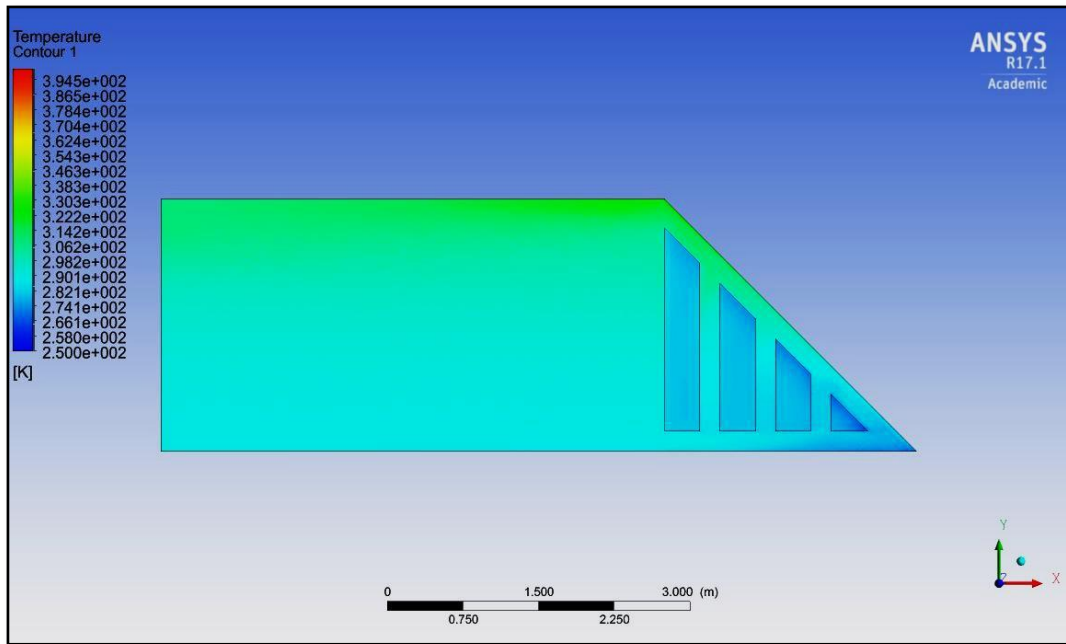


Figura 11: Contorno de Temperatura a las 10 [hr]. Caso N°9.

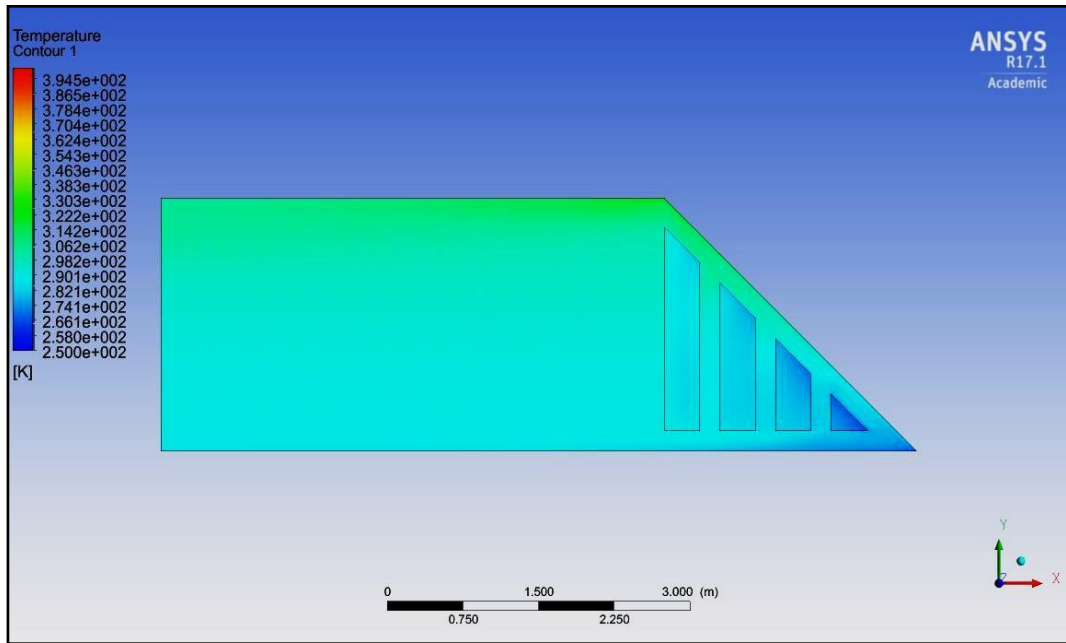


Figura 12: Contorno de Temperatura a las 17 [hr]. Caso N°9.