

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ

**MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGETICA Y ENERGÍAS
RENOVABLES**

**“Estudio numérico de la transferencia de
calor para el uso eficiente de la energía en
cavidades que simulan viviendas”**

**Tesis que para obtener el grado de maestro en
Eficiencia Energética y Energías Renovables**

PRESENTA:

Rogelio Enrique Lilly Velázquez

Director:

Dr. Guillermo E. Ovando Chacón

Co-Director:

Dr. Abelardo Rodríguez León

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han ayudado y apoyado a lo largo de estos años de duro trabajo y estudio en el Instituto Tecnológico de Veracruz.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por la beca con número de solicitud 2018-000068-02NACF-15002 otorgada para la realización de esta maestría.

A los integrantes del comité de revisión y jurado, Dr. Guillermo Efren Ovando Chacon, Dr Juan Carlos Prince Avelino, Dr. Abelardo Rodriguez Leon, MC. Arturo Mendoza Sosa, Dr. Mario Diaz González, gracias por la dedicación que me brindaron durante mi etapa como estudiante de posgrado, gracias por la paciencia, por sus consejos, por el café y por las enseñanzas que me aportaron, en especial a mi director de tesis el Dr. Guillermo Ovando Chacon, por su profesionalismo y apoyo en todo momento, son personas ejemplares y admirables que me motivan crecer cada día más, personal y profesionalmente.

A mis amigos de la universidad, integrantes del laboratorio de computo intensivo, gracias por brindarme su apoyo siempre que los necesité, gracias por las experiencias vividas, por las carnes asadas y por su amistad.

A mis amigos, entrenadores y ciclistas de los grupos “Dinos MTB” y “Chatos Bike Veracruz” gracias por los consejos, los kilómetros recorridos y por apoyarme a ser mejor persona y deportista.

Al Instituto Tecnológico de Veracruz, por enseñarme los valores y conocimientos los cuales fui adquiriendo a lo largo de mi carrera universitaria para poder desempeñarme en el mundo laboral de manera profesional.

Dedicatoria

A mis padres, por darme las herramientas necesarias para terminar mis estudios de posgrado, así como el apoyo moral e incondicional que me brindaron y me impulsaron a salir adelante, para ser mejor cada día, por sus sacrificios, y todo el esfuerzo que han puesto para poder concluir mis estudios satisfactoriamente.

GRACIAS POR SER MI MOTIVACIÓN EN CADA DÍA.

A mi familia, que siempre han estado a mi lado apoyándome desde el inicio de mis estudios y que siempre me han sabido inyectar moral en mis peores momentos, no solo vividos a causa de mis estudios sino como consecuencia de la vida, gracias por ser ejemplo de vida y permitirme ser ejemplo de vida para ustedes. A mi tío Efrén, gracias por el apoyo y respaldo, gracias por creer en mí, sin usted esto no hubiera sido posible.

Resumen

En este trabajo se caracteriza el comportamiento del flujo de calor por convección dentro de una habitación ventilada en un clima cálido húmedo en la costa del golfo de México. Fueron usados valores experimentales de radiación solar, temperatura ambiente, temperatura interior y exterior en una superficie, tomados de la zona sur sureste del país. En base a esto fueron diseñados diferentes escenarios con valores de propiedades reales de los materiales de construcción y medidas de una habitación real. Se simuló numéricamente diferentes casos para múltiples horas del día, las simulaciones fueron realizadas mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales, la habitación cuya construcción es típica en la zona está compuesta por un techo de concreto, dos entradas de aire y una salida, el flujo de aire entra por un ventanal corredizo y una puerta. La ventana fue abierta parcialmente para realizar análisis comparativos. Se obtuvieron los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura, coeficientes de transferencia de calor, números de Nusselt, entropía y Bejan. El efecto de la apertura de la ventana solo tiene efecto importante hasta la parte media de la habitación. La configuración del ventanal abierto $\frac{1}{4}$ es la que genera menor irreversibilidad. Por otra parte, también se simuló una capa de pintura impermeable con propiedades reales de tipo comercial sobre la geometría de la habitación presentada. Adicionalmente se analizaron los efectos de disminución de temperatura en un modelo geométrico de techo verde, para analizar el comportamiento de la temperatura interior y sus efectos como método de climatización pasiva.

Abstract

This work characterizes the behavior of convection heat flow inside a ventilated room in a humid warm climate on the coast of the Gulf of Mexico. Experimental values of solar radiation, ambient temperature, indoor and outdoor temperature were used on a surface, taken from the southeastern part of the country. Based on this, different scenarios were designed with values of real properties of building materials and measurements of a real room. Numerically simulated different cases for multiple hours of the day, the simulations were carried out using techniques of dynamics of computational fluids, the room whose construction is typical in the area is composed by a concrete ceiling, two air inlets and an exit, the air flow enters through a sliding window and a door. The window was partially opened for comparative analysis. These were obtained from temperature fields, current lines, temperature profiles, heat transfer coefficients, Nusselt numbers, entropy and Bejan. The effect of the window opening only has a significant effect on the middle part of the room. The configuration of the open window is the one that generates the least irreversibility. On the other hand, a layer of impermeable paint with real properties of commercial type on the geometry of the presented room was also simulated. In addition, the effects of temperature decrease in a geometric model of green ceiling were analyzed to analyze the behavior of the interior temperature and its effects as a method of passive air conditioning.

Índice General

| | |
|---|-----------|
| 1. Marco Metodológico | 11 |
| 1.1 Introducción | 12 |
| 1.2 Planteamiento | 13 |
| 1.3 Objetivos | 13 |
| 1.4 Justificación | 13 |
| 2. Marco Teórico | 15 |
| 2.1 Confort Térmico | 17 |
| 2.2 Condiciones termohigrométricas reglamentarias | 19 |
| 2.3 Técnicas de climatización pasiva | 20 |
| 2.4 Características de las azoteas verdes | 21 |
| 2.5 Metodología | 22 |
| 3. Estado del arte | 25 |
| 4. Modelo matemático del sistema | 32 |
| 4.1 Descripción geométrica del problema | 33 |
| 4.2 Condiciones de frontera | 35 |
| 4.3 Propiedades físicas de los materiales | 36 |
| 4.4 Ecuaciones de conservación | 36 |
| 5. Método numérico | 40 |
| 5.1 Método de elemento finito | 41 |
| 5.2 Elementos triangulares | 42 |
| 5.3 Formulación débil del problema | 42 |
| 5.4 Solución del problema de difusión | 43 |
| 5.5 Integración de elemento finito | 46 |
| 5.6 Convergencia | 47 |
| 6. Resultados | 48 |
| 6.1 Simulaciones de la habitación con techo de concreta ventana de ventilación completamente abierta. | 49 |
| 6.1.2 Vórtices de la habitación con techo de concreto para las 13:30 hrs y ventana abierta. | 57 |
| 6.1.3 Numeros de Nusselt (Nu), Entropia (S) y Bejan (Be) | 60 |
| 6.2 Capa Impermeabilizante | 62 |
| 6.2.1 Condiciones de frontera | 62 |
| 6.2.2 Propiedades físicas de los materiales impermeabilizantes | 63 |
| 6.2.3 Resultado de simulación para el caso con impermeabilizante | 63 |
| 6.3 Capa Techo Verde | 65 |
| 6.3.1 Condiciones de Frontera | 66 |
| 6.3.2 Propiedades de los materiales | 66 |
| 6.3.3 Resultado de simulación | 66 |
| Conclusiones | 70 |
| Anexo A. Publicaciones derivadas del proyecto de investigación | 75 |
| A.I “Simulación tridimensional del comportamiento térmico en una habitación ventilada” | 76 |

| | |
|---|-----------|
| A.II “Aplicación de Técnicas computacionales para el Estudio del Flujo de Energía en Forma de Calor en Habitaciones” | 77 |
| Referencias | 72 |
| Índice de Figuras | 08 |
| Índice de Tablas | 10 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| 2.1 Medidores de Temperatura | 18 |
| 2.2 Higrómetro | 18 |
| 2.3 Anemómetro | 19 |
| 2.4 Capas de una azotea verde | 22 |
| 4.1 Ubicación de la vivienda en la costa del Golfo de México | 33 |
| 4.2 Modelo 3D de la vivienda | 33 |
| 4.3 Detalles de la vivienda simulada | 34 |
| 4.4 Ubicación de las entradas y salidas | 34 |
| 4.5 Ejemplo de condiciones de fronteras para las 13:30 h | 36 |
| 5.1 Mapa lineal desde un elemento triangular Ω_e a un elemento maestro Ω_r y un mapa inverso. | 41 |
| 5.2 Malla de presión gruesa y malla de velocidad fina. | 42 |
| 5.3 Análisis de convergencia de los perfiles de temperatura cavidad con tres diferentes tamaños de malla para las 13:30 h en $x=1\text{m}$, $y=1.55\text{m}$. | 47 |
| 6.1. Representación transversal de los escenarios propuestos y simulados tridimensionalmente | 49 |
| 6.2 Campos de temperatura en tres diferentes planos de la habitación con techo de concreto para las 8:00 h y ventana abierta. | 50 |
| 6.3 Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 8:00 h y ventana abierta. | 50 |
| 6.4 Campos de temperatura en tres diferentes planos de la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta. | 51 |
| 6.5 Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 13:50 h y ventana abierta | 51 |
| 6.6 Campos de temperatura en tres diferentes planos de la habitación con techo de concreto para las 18:00 h y ventana abierta | 52 |
| 6.7 Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 18:00 h y ventana abierta | 52 |
| 6.8 Perfiles de temperatura a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:50 h y ventana abierta. | 53 |
| 6.9 Perfiles de velocidad a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". | 54 |
| 6.10 Perfil de temperatura en dirección del eje "x" de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5)$ para cinco diferentes horas del día. | 55 |
| 6.11 Perfil de temperatura en dirección del eje "x" de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5)$ para todas las horas del día. Habitación con techo de concreto y ventana abierta. | 55 |
| 6.12 Campos de temperatura para los plano "xz" y "yz" de la habitación con techo de concreto y la ventana abierta. | 56 |
| 6.13 Campos de temperatura para los plano "xz" y "yz" de la habitación con techo de concreto y la ventana abierta. | 57 |
| 6.14 Vórtices de la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y | |

| | |
|--|----|
| ventana abierta. | 58 |
| 6.15 Líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 h ventana abierta, ventana abierta $\frac{1}{2}$ y ventana abierta $\frac{1}{4}$. | 58 |
| 6.16 Perfiles de temperatura a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 h ventana abierta, ventana abierta $\frac{1}{2}$ y ventana abierta $\frac{1}{4}$. | 59 |
| 6.17 Perfiles de velocidad a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 horas ventana abierta, ventana abierta $\frac{1}{2}$ y ventana abierta $\frac{1}{4}$. | 60 |
| 6.18 Numero de Nusselt; Numero de entropia; Número de Bejan, desde las 6:00 hasta las 18:00 horas. | 61 |
| 6.19 Detalles de la vivienda simulada. | 62 |
| 6.20 Impermeabilizantes comerciales | 63 |
| 6.21 Campos de temperatura en el plano "xz", "yz" de la habitación con techo de concreto y capa impermeabilizante la ventana abierta. Para las 13:30 horas. | 63 |
| 6.22 Línea de $(x_1= 1.4, y_1=1.4, z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4, z_2=2.70)$ en la habitación con techo de concreto y recubrimiento a prueba de agua. | 64 |
| 6.23 Perfiles de temperatura de la habitación con techo de concreto y capa impermeabilizante con la ventana abierta para las 13:30 horas. Línea de $(x_1= 1.4, y_1=1.4, z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4, z_2=2.70)$. | 64 |
| 6.24 Techo verde de tipo extensivo presentada por Quezada. | 65 |
| 6.25 Detalles de la vivienda simulada. | 65 |
| 6.26 Campos de temperatura en el plano "yz" la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y la ventana abierta y con capa verde. | 67 |
| 6.27 Perfiles de temperatura dentro de la habitación con techo de concreto y techo verde para las 13:30 h y la ventana abierta y con capa verde. | 67 |
| 6.28 Perfiles de temperatura de la habitación con techo de concreto y capa de techo verde con la ventana abierta para las 13:30 h. Línea de $(x_1= 1.4, y_1=1.4, z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4, z_2=2.70)$. | 68 |
| 6.29 Perfiles de temperatura de la habitación con techo de concreto, techo de concreto con capa impermeabilizante, techo de concreto con capa de techo verde. | 69 |
| 6.30 Vista interior de techo de concreto de la habitación, techo de concreto con capa impermeabilizante, techo de concreto con capa de techo verde, con la ventana abierta para las 13:30 h a) Cara interior del techo de concreto. | 67 |

Índice de Tablas

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 4.1 | Datos experimentales | 35 |
| Tabla 4.2 | Características de los equipos usados | 38 |
| Tabla 4.3 | Propiedades de los materiales utilizados en el modelo matemático | 39 |
| Tabla 4.4 | Propiedades del impermeabilizante utilizado en el modelo matemático. | 39 |
| Tabla 6.1 | Comparativa de coeficientes de transferencia de calor por convección a diferentes horas del día. | 60 |
| Tabla 6.2 | Números de entropía y Bejan para tres diferentes configuraciones de la apertura del ventanal. | 62 |
| Tabla 6.3 | Tabla de datos experimentales tomados como condiciones de frontera para el caso con impermeabilizante. | 62 |
| Tabla 6.4 | Propiedades de vegetación y sustrato. | 66 |

Capítulo 1

Marco Metodológico

1.1 Introducción

La falta de estudios relacionadas al confort térmico dentro de una vivienda y los altos porcentajes de humedad en diversos estados costeros del país hacen importante generar conocimiento acerca de las configuraciones adecuadas para lograr un ambiente térmico confortable y un eventual ahorro de energía.

Las altas temperaturas en los meses de verano conllevan a un importante uso de los aires acondicionados dentro de las viviendas y son la primera opción de climatización eléctrica.

Los altos costos de las diferentes alternativas de producción de energía eléctrica para autoconsumo a través de energías renovables para sitios residenciales hacen indispensable encontrar alternativas de confort térmico dentro de una vivienda.

Pocas soluciones que propongan y apoyen el enfriamiento pasivo han sido encontradas para las zonas costeras, la mayor parte de los análisis de carga térmica en el país han sido realizados para los estados del norte la cual estadísticamente tiene un mayor índice de riqueza. Para la zona sur-sureste donde las condiciones climáticas y su condición de menor índice de riqueza hacen indispensable contar con métodos de enfriamiento pasivo. Algunos métodos desarrollados son basados en la construcción de modelos físicos que las hacen poco viables y caras. Una alternativa es la solución basada en simulación computacional cuya función además de obtener la configuración óptima resulta en menor costo de diseño y análisis y arroja valores cercanos a la realidad.

Este trabajo busca investigar y analizar computacionalmente el efecto térmico dentro de una vivienda con el uso de diferentes tipos de recubrimientos y aislantes tanto naturales como sintéticos para techos ofrecidos por la industria. Con lo cual se busca una disminución de temperatura, aplicando una técnica de climatización pasiva que permite reducir la sensación térmica interior hasta llegar a una temperatura óptima. Una configuración y diseño adecuado de una habitación, vivienda o espacio evitará el uso frecuente de sistemas de enfriamiento interior, generando un ahorro energético, económico y ayudará al medio ambiente.

En el capítulo 1 se señalan los objetivos y se justifica el trabajo. En el capítulo 2 se hace referencia a los conceptos básicos de confort térmico. En el capítulo 3 se describe el estado del arte. En el capítulo 4 se hace la descripción del problema y el modelado matemático del sistema. En el capítulo 5 se describe el método numérico para la discretización de las ecuaciones de conservación. En el capítulo 6 se hace la presentación y discusión de los resultados numéricos de las simulaciones realizadas durante el estudio.

1.2 Planteamiento

La necesidad de ahorro de energía en las viviendas derivado del alto consumo de energía eléctrica, es de gran relevancia para el desarrollo de nuestro país. En México en el año 2016, el consumo nacional de energía eléctrica alcanzó 263,393 GWh, 1% mayor que el año 2015. Específicamente en la zona sur-sureste esta región ocupa el segundo lugar en ritmo de crecimiento anual en el periodo 2002 al 2012, con 3.51% y 15.0% en la participación de consumo nacional de electricidad. Esto fue equivalente de acuerdo a la Secretaria de Energía a 31,123 GWh en el año 2012. El desarrollo de diversas industrias como la siderúrgica, cementera, papel, vidrio, azucarera y cervecera en Veracruz, han posicionado al estado de Veracruz como eje de esta región, cuyo consumo alcanzaron los 11,374 GWh, 36.5% del total regional, así como el 5 % del total nacional [1]. Por ello resulta indispensable encontrar mecanismos de mejora de la eficiencia energética y el confort térmico en los espacios dentro de una vivienda en la zona sur sureste. En este trabajo se plantea el estudio mediante simulaciones numéricas de la transferencia de calor en viviendas lo cual permitirá determinar la configuración que permita el mayor ahorro de energía y al mismo tiempo mantener el confort térmico en su interior.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Caracterizar el comportamiento térmico en una vivienda mediante simulación computacional aplicado a un modelo simple de vivienda promedio en la zona cálida del golfo de México

Objetivos Específicos

- Analizar numéricamente los diferentes mecanismos de transferencia de calor que ocurren en una vivienda.
- Estudiar los efectos de la convección natural en el interior de una vivienda.
- Aplicar al modelo condiciones de frontera reales propias de climas cálidos.
- Obtener los campos de temperatura, velocidad, coeficientes de transferencia de calor e irreversibilidades en el interior de la vivienda.

1.4 Justificación

La presente investigación se enfoca en realizar simulaciones numéricas de transferencia de calor en viviendas considerando datos climáticos reales del sur-sureste de México y propiedades físicas reales de los materiales de edificación para determinar la configuración óptima con la cual la carga térmica en una vivienda es la mínima. Esto garantiza que las personas que habitan la vivienda alcancen o se aproximen a las condiciones de confort térmico. Por otro lado, en caso de climatizar la vivienda este estudio garantizaría los mínimos consumos de energía contribuyendo de

esta manera a la conservación del medio ambiente debido al ahorro energético.

Capítulo 2

Marco Teórico

Una vivienda con una buena eficiencia energética permite ahorrar un 30% en demanda de energía [2] la cual depende de la conductividad térmica y el espesor de los materiales que forman los elementos perimetrales que en su conjunto arman el perfil de muros, suelo y techo, lo anterior es de vital importancia para el ahorro de energía y el confort térmico, ya que es a través de ellos que se generan las pérdidas de calor hacia el exterior en las estaciones frías, y las ganancias térmicas hacia el interior en épocas de verano.

Los enfoques de modelado de energía han seguido avanzando en los últimos años para atender los nuevos conceptos de diseño emergentes hacia soluciones más verdes que optimizan el consumo de energía en los edificios mientras se mantiene confort térmico, así como un entorno saludable. En vez de enfoques convencionales que se basan únicamente en el sistema mecánico para proporcionar las condiciones térmicas deseadas, actualmente se ha aumentado la atención a los sistemas pasivos y mixtos de la construcción. A pesar de los avances en el modelado de sistemas, todavía hay limitaciones en la capacidad de representar el medio ambiente real, así como el comportamiento térmico con diferentes configuraciones espaciales de construcción. La suposición subyacente para el modelo nodal es la uniformidad de la temperatura ambiente, que puede aplicar a la mayoría de las zonas de construcción con un tamaño de habitación moderado. Otras limitaciones también surgen con dicho enfoque nodal debido al uso del conocimiento empírico a través de diversos coeficientes que se utilizan como datos de entrada del modelo, entre ellos el coeficiente de presión del viento, el coeficiente de transferencia de calor, factores de pérdida, factores de fricción, etc. Por otra parte, en el modelo son difíciles de representar los efectos de los patrones de flujo térmico y de aire introducidos en la construcción a través de las configuraciones espaciales.

Las técnicas de enfriamiento natural se han utilizado a lo largo de los siglos y la introducción del aire acondicionado mecánico en las recientes décadas, aunque proporcionan un gran confort térmico, tienen que lidiar con una gran cantidad de gasto de energía. Los beneficios del sistema de enfriamiento natural de techo verde no solo han demostrado un gran potencial en la reducción consumo de energía del edificio, sino también ha sido un contribuyente en la mitigación del efecto isla de calor urbano. El follaje protege los edificios de la radiación solar, controla la temperatura y la humedad del ambiente interior de la construcción. Las plantas por sus funciones biológicas, como la fotosíntesis, la respiración, La transpiración y la evaporación absorben una porción significativa de la radiación solar [2].

En transferencia de calor existen tres mecanismos con los cuales se gana o disipa calor y de los cuales depende la temperatura del interior de una vivienda. La convección se refiere a la transferencia de calor entre una superficie y un fluido en movimiento o inmóvil que tiene una diferente temperatura. La conducción consiste a la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo que se encuentran a diferente temperatura sin que se produzca transferencia de materia entre ellos. La radiación térmica representa el intercambio neto de energía entre superficies a diferentes

temperaturas por ondas electromagnéticas independientes de cualquier medio que exista entre ellas. Para esto, las tasas de transferencia de calor dependen de las propiedades de transporte de las sustancias, los parámetros geométricos y las temperaturas. Muchas aplicaciones involucran más de uno de estos modos de transferencia de calor como en el caso del flujo en el interior de viviendas, a lo cual se llama multimodo de transferencia de calor [3].

Durante una simulación el dominio de cálculo debe ser lo suficientemente grande para poder resolver las zonas de recirculación y para poder tomar en cuenta las condiciones de frontera. Los datos de las condiciones climáticas (temperatura ambiente, radiación solar, viento, humedad) proporcionan las condiciones de frontera del modelo. Para la ventilación natural, la predicción del entorno interior depende de las condiciones al aire libre en gran medida, así como de la transferencia de calor y la dinámica de fluidos. Las simulaciones tridimensionales de la envolvente en edificios, así como sus condiciones climáticas (eólica, solar) requieren de una gran capacidad de computo. El tamaño de malla para simular una habitación ventilada debe ser lo suficientemente pequeña como para describir con precisión el perfil del entorno interior; requiriéndose tamaño de malla más pequeño para resolver las ecuaciones de transferencia de calor entre las paredes multicapa. Los requisitos de tamaños de malla muy pequeños complican las tareas de predicción en la simulación de Dinámica de fluidos computacionales (CFD), el cual incrementa el tiempo de cálculo. Todo esto indica que la simulación DFC por si sola es difícil de lograr para la predicción del entorno térmico en edificios con ventilación natural.

2.1 Confort Térmico

Existe confort térmico cuando las personas no experimentan sensación de calor ni de frío; es decir, cuando las condiciones de temperatura, humedad y movimientos del aire son favorables a la actividad que desarrollan [4]. Evaluar el confort térmico es una tarea compleja, ya que valorar sensaciones conlleva siempre una importante carga subjetiva; no obstante, existen unas variables modificables que influyen en los intercambios térmicos entre el individuo y el medio ambiente y que contribuyen a la sensación de confort, éstas son: la temperatura del aire, la temperatura de las paredes y objetos que nos rodean, la humedad del aire, la actividad física, la clase de vestido y la velocidad del aire. A continuación, se hace un resumen de dichas variables.

Temperatura: La temperatura seca del aire es la temperatura a la que se encuentra el aire que rodea al individuo, una forma de medirlo es con un termopar (Fig. 2.1 a). La diferencia entre esta temperatura y la de la piel de las personas determina el intercambio de calor entre el individuo y el aire, a este intercambio se le denomina intercambio de calor por convección. También existe el intercambio de calor por radiación entre unas y otras superficies del ambiente (piel, máquinas, cristales, paredes, techos, etc), la cual puede ser medida con un termómetro (Fig. 2.1 b) que hace que, por ejemplo, pueda ser agradable estar en una casa en la que la temperatura es de 15° C, pero sus paredes están a 22° C. Si la temperatura de la piel es mayor que la temperatura radiante media, el cuerpo cede calor por radiación al ambiente; si es al revés, el organismo recibe calor del medio.

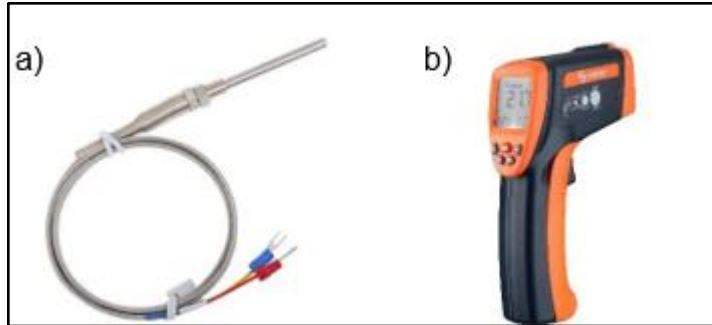


Figura 2.1 Medidores de Temperatura: a) Termopar b) Termómetro

Humedad: La humedad es el contenido de vapor de agua que tiene el aire. El mecanismo por el cual se elimina calor del organismo es a través de la transpiración. Cuanta más humedad haya, menor será la transpiración; por eso es más agradable un calor seco que un calor húmedo. Un valor importante relacionado con la humedad es el de la humedad relativa, que es el porcentaje de humedad que tiene el aire respecto al máximo que admitiría y se mide con un higrómetro (Fig. 2.2). El confort térmico depende del calor producido por el cuerpo y de los intercambios entre éste y el medio ambiente.



Figura. 2.2 Higrómetro

Velocidad :La velocidad del aire interviene de forma directa en el balance térmico y en la sensación térmica, ya que, según sea la velocidad la cual podemos medirlo con un anemómetro (Fig. 2.3), variará la capa de aire que nos aísla y aumentará la evaporación del sudor. La capa limite térmica es la región donde los gradientes de temperatura están presentes en el flujo, estos gradientes de temperatura resultan de un proceso de intercambio de calor entre la superficie y el fluido.



Figura 2.3 Anemómetro

La actividad del trabajo: Independientemente de las condiciones ambientales, realizar una actividad intensa nos da una mayor sensación de calor. Nuestro cuerpo transforma en trabajo útil menos del 10% de la energía consumida. El resto se transforma en calor que debe eliminarse para evitar que la temperatura del organismo se eleve hasta niveles peligrosos.

El vestido: El tipo de vestido es una variable que influye de manera importante en nuestra sensación de confort; cuanto mayor es la resistencia térmica de las prendas de vestir, más difícil es para el organismo desprenderse del calor generado y cederlo al ambiente. El confort térmico se alcanza cuando se produce cierto equilibrio entre el calor generado por el organismo como consecuencia de la demanda energética y el que es capaz de ceder o recibir del ambiente [5].

2.2 Condiciones termohigrométricas reglamentarias

La Norma Oficial Mexicana NOM-081-SCFI-1994 establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo indicando las condiciones mínimas ambientales que deben reunir los lugares de trabajo [6]. Como principio general se establece que el ambiente de trabajo no debe suponer un riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores y, en la medida de lo posible, se debe evitar que constituya una fuente de incomodidad o molestia.

Mediante un sistema adecuado de climatización del aire (a través de electricidad, agua caliente, vapor, agua fría o líquidos refrigerantes) se debe crear un clima interior confortable para la mayoría de los ocupantes de un espacio, de manera que se pueda calentar el aire en la estación fría y refrigerar durante la cálida. También es importante capacitar al trabajador sobre el empleo adecuado de la ropa de trabajo y concienciarles respecto a que trabajar exponiéndose a altas o bajas temperaturas puede entrañar riesgos. Igualmente, se debe concientizar a los trabajadores sobre la detección de los síntomas y signos de la exposición a temperaturas extremas de determinados trabajos.

Para lograr condiciones termohigrométricas hay que identificar el apantallamiento de los focos de calor radiante (hornos, motores, etc.), utilizando en cada caso las medidas más adecuadas, además es importante dotar al local de una ventilación general que

evite el calentamiento del aire, aumentando, si fuese preciso, la velocidad de este. Esta ventilación puede ser de tipo natural o forzada por medio de ventiladores-extractores, Por otra parte, las condiciones termohigrométricas se puede lograr al utilizar sistemas de extracción en lugares donde se realicen actividades en que se genere vapor de agua, con el fin de evitar el aumento de la humedad del aire y en el caso de temperaturas frías se pueden utilizar chorros de aire caliente, aparatos de calefacción por radiación o placas de contacto calientes. La insatisfacción térmica suele tener origen en las corrientes de aire, suelos demasiado calientes o fríos, diferencias notables en la temperatura del aire a la altura de las distintas partes del cuerpo, así como en las diferencias elevadas de la temperatura radiante o asimetría de radiación entre paredes opuestas, por un lado, entre el suelo y el techo de las edificaciones [7].

2.3 Técnicas de climatización pasiva

Existen acciones como el uso de block hueco para paredes, incremento de la altura del techo, aplicación de aislante en techos, orientación de la vivienda, doble acristalamiento en ventanas, azoteas verdes que permiten la climatización pasiva al interior de una vivienda. Todas estas técnicas se usan de una u otra manera en diferentes partes del mundo, sin embargo, existen muy pocos trabajos realizados y aplicados a viviendas típicas de nuestro país y de esos pocos estudios la mayoría se ha realizado para la zona centro del país donde el clima es templado. Por lo tanto, hace falta realizar estudios del impacto de estas técnicas pasivas de climatización en la zona sursureste de nuestro país donde el clima es cálido-húmedo como en el caso de Veracruz. A continuación, se muestran algunas de los disipadores ambientales más comunes.

Aire exterior: Es la transferencia de calor producida por el aire principalmente por convección a través de aberturas como lo son las puertas y ventanas.

Agua: Es la transferencia de calor producida por la evaporación del agua dentro y / o fuera del del edificio como la acumulación de agua de lluvia en los techos, así como las tuberías internas usadas como calefacción.

El cielo nocturno: Es la transferencia de calor producida por radiación de onda larga a través del techo u otra superficie adyacente a un edificio durante la noche la cual disminuye la temperatura del techo con el efecto sombra.

Tierra: Es la transferencia de calor producida por la conducción a través de los cimientos del edificio, esta será mayor o menor de acuerdo a donde el edificio este edificado.

Sombreado solar: Se ha observado que el sombreado con árboles reduce la temperatura ambiente cerca de la pared exterior entre 2°C y 2.5°C en un techo común con una pendiente de 6°.

Sombreado por voladizos, persianas y toldos, etc.: Dispositivos de sombreado y control solar bien diseñados, ya sea como partes de un edificio o por separado una fachada de edificio puede reducir drásticamente los requisitos de aumento de calor y

enfriamiento de la construcción y mejorar la calidad de iluminación natural de los interiores del edificio. El diseño de dispositivos de sombreado efectivos depende de la orientación solar de la fachada de un edificio en particular.

Sombreado del techo: Sombrear el techo es un método muy importante para reducir el aumento de calor. Los techos se pueden sombreado proporcionando una cubierta con plantas o lienzos, etc. El sombreado provisto por medios externos no debe interferir con el enfriamiento nocturno. Una cubierta sobre el techo, hecha de hormigón o galvanizado con planchas de hierro, proporciona protección contra la radiación directa. La desventaja de este sistema es que no permite escapar el calor hacia el cielo durante la noche.

Sombreado por árboles y vegetación: El paisajismo adecuado puede ser uno de los factores importantes para la conservación de la energía en los edificios. Vegetación y árboles en particular proporcionan una sombra muy efectiva y ayudan a reducir el aumento de calor. Los árboles pueden ser utilizados con ventaja para sombreado techos, paredes y ventanas. El sombreado y evapotranspiración (el proceso en el cual una planta libera activamente vapor de agua) de los árboles puede reducir las temperaturas del aire circundante tanto como 5 ° C.

Aislamiento: El efecto del aislamiento es reducir la ganancia de calor y la pérdida de calor. A mayor aislamiento sobre el exterior de un edificio, menos calor se transfiere dentro o fuera del edificio debido a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior [8].

2.4 Características de las azoteas verdes

El uso de azoteas verdes se remonta a varios siglos atrás. El primer antecedente del que se tiene registro son los jardines colgantes de Babilonia, creados en los siglos VII y VIII a.C; el arquitecto suizo nacionalizado francés Charles Édouard JeanneretGrisb mejor conocido como Le Corbusier, fue el primero en incluir el concepto de azotea verde en Europa Occidental de manera sistemática. A partir de 1920 incluyó la naturación en edificios para sus clientes con alto poder adquisitivo.

La naturación de la era moderna comienza en Alemania en la década de los sesenta al desarrollar la técnica de las azoteas verdes, la cual se difundió posteriormente a lo largo de toda Europa. Un ejemplo de esto es la ciudad de Stuttgart en Alemania, la cual fue una de las primeras en otorgar beneficios fiscales por y para la implantación de azoteas verdes en la década de los ochenta. En la ciudad de Berlín se adoptaron medidas similares a finales de la década de los ochenta, estableciéndose la condicionante de que toda nueva edificación tuviera un área considerable debería tener instalada una azotea verde como requisito, esto para obtener el derecho de construcción de la misma. En la actualidad se calcula que alrededor del 40% de las ciudades alemanas ofrecen algún tipo de incentivo para la instalación de azoteas verdes en sus edificaciones, se tiene contabilizado que en Alemania al menos el 10% de los techos son techos verdes [9].

Una vez instalada una azotea verde, se debe de garantizar el funcionamiento correcto,

para así obtener el mayor tiempo de vida útil, es importante realizar las tareas de operación y mantenimiento de forma adecuada para todos los elementos que la conforman. Para llevar a cabo la operación y mantenimiento de una azotea verde se recomienda:

- Revisión y limpieza de los elementos de desalojo de agua (drenaje).
- Revisión visual de todas las capas y elementos de la azotea verde, principalmente la capa anti-raíz y la impermeabilización.
- Mantenimiento de la vegetación. Se deberá podar al menos 2 veces por año.
- Riego. Se tiene que considerar el tipo de riego ya sea por goteo, regadera de jardinería, aspersión, y en ocasiones, con la captación de aguas pluviales después de un tratamiento, considerando la época del año.
- Abono. Se deberá suministrar el abono pertinente para cada tipo de naturación.

La azotea verde es un sistema integral conformado por varias capas de diferentes materiales, dispuestos para proteger el inmueble contra daños por la exposición al medio ambiente y a su vez promover el crecimiento de vegetación. El instalar una azotea verde se reemplaza cualquier acabado que pudiera tener la azotea [10]. La instalación de debe de iniciar con la determinación de la factibilidad estructural y terminar con la instalación de la vegetación, contando con un diseño especial para cada edificación. También se debe tener en cuenta el tipo de región donde se encuentra la edificación. Durante el proceso de instalación se coloca primero el sistema de desalojo de agua y se continua de manera ascendente como se muestra en la Fig. 2.4

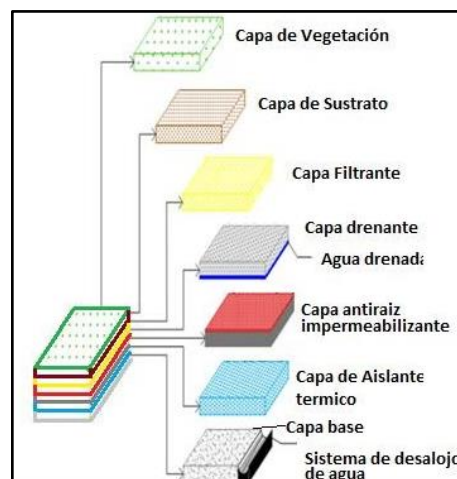


Figura 2.4 Capas de una Azotea Verde

2.5 Metodología

En este trabajo se utilizará el método de elemento finito para resolver las ecuaciones de conservación que gobiernan la dinámica de fluidos en el interior de una vivienda. El método del elemento finito (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales, utilizado en diversos problemas de

ingeniería y física. El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos [11].

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla. Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas), la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos en dos o tres dimensiones.

Etapas para solucionar problemas mediante MEF

Las siguientes etapas comprenden los pasos básicos para formular problemas mediante el método del elemento finito.

Fase de preproceso

- Crear y discretizar la solución dominio en elementos finitos, esto es, subdividir el problema en nodos y elementos.
- Asumir una función para representar el comportamiento físico de un elemento, es decir una función continua que aproxima la solución del elemento.
- Desarrollar las ecuaciones para el elemento
- Armar los elementos del problema completo para construir la matriz global de rigidez.
- Aplicar condiciones de frontera y condiciones iniciales.

Fase de solución

- Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneas para obtener resultados globales; tal como valores de velocidad y temperaturas en diferentes nodos.

Fase de postproceso

- Con base en los resultados globales obtenidos, en el proceso de solución que permite conocer los valores de las variables locales en los diversos nodos se obtienen parámetros secundarios tales como vorticidad, gradientes de flujo de calor, coeficientes de transferencia de calor y número de Nusselt [11].

Capítulo 3

Estado del arte

Debido al cambio climático y a la destrucción del planeta por la contaminación por el uso de combustibles fósiles, resulta de gran trascendencia analizar técnicas que permitan el ahorro de energía en las viviendas, en este sentido diversos esfuerzos se han realizado, sin embargo, la mayoría de los estudios se han realizados para zona templadas o frías. Por lo tanto, hace falta realizar análisis de confort térmico en climas cálidos y húmedos como los que se presentan en la región costera del golfo de México. A continuación, se citan algunos trabajos relacionados con la presente investigación.

En la convección natural el fenómeno de interés es la transferencia de calor entre la capa límite térmica y el núcleo del vortice. Abourida et al. [12] estudiaron la convección natural dentro una cavidad cuadrada donde la temperatura de las paredes horizontales interiores variaba con el tiempo. Ellos investigaron tres condiciones de frontera de temperatura. En el primer modo únicamente se varió la temperatura de la pared caliente. En el segundo y tercer modo las temperaturas caliente y fría se desfasaron 0° y 180° . En este trabajo se consideró un modelo bidimensional con flujo laminar donde el fluido de trabajo fue aire. Todas las propiedades del fluido se consideraron constantes excepto en el término de flotación donde se incluyó la aproximación de Boussinesq. Las ecuaciones de conservación se resolvieron con el método de diferencias finitas. Los resultados indicaron que la transferencia de calor puede mejorarse o reducirse mediante el periodo de la temperatura y también variando el número de Rayleigh (Ra) ya que a medida que incrementa Ra existe un incremento en la Temperatura inicial.

Ayachi et al. [13] estudiaron numéricamente la transferencia de calor por convección natural en una cavidad cuadrada llena de aire, sometida a una condición de frontera térmica dependiente del tiempo. En este trabajo se consideraron para los comportamientos dinámicos y térmicos los efectos del número de Ra, la emisividad de las paredes, y los parámetros relacionados con la temperatura variable periódica (amplitud y periodo). Se cuantifica la contribución de la convección y la radiación a la transferencia total de calor el establecer una variable de temperatura de calentamiento. Esta investigación consiste en un recinto cuadrado bidimensional con paredes horizontales adiabáticas y paredes verticales térmicamente activas. Específicamente, la pared vertical izquierda del recinto se calienta con una temperatura que varía sinusoidalmente en el tiempo, mientras que la pared vertical derecha se enfría a una temperatura constante. La tercera dimensión de la cavidad (la dirección normal al plano se asume lo suficientemente grande para que el movimiento del fluido se pueda considerar bidimensional. El flujo se concibe como laminar e incompresible, con una disipación viscosa despreciable. Se supone que todas las propiedades termofísicas del fluido son constantes excepto la densidad en el término de flotación, que se supone varía linealmente con temperatura (aproximación Boussinesq); tal variación da lugar a la flotabilidad efectiva. En la práctica, es muy difícil obtener revestimientos superficiales que tengan emisividad igual a 0 y 1 por lo tanto ellos establecieron que el uso de la hoja de aluminio altamente pulida y una pintura negra corresponden a emisividades de 0.05 y 0.85, respectivamente, de tal manera que la transferencia de calor podría ser significativamente mejorada con la elección adecuada de los parámetros relacionados con la temperatura periódica y la emisividad de las paredes.

Kwak y Hyun et al [14] estudiaron el efecto de la resonancia en la convección natural en una cavidad cuadrada con una temperatura de pared lateral variable en el tiempo de tipo sinusoidal. El objetivo de la investigación era mejorar la transferencia de calor en la dirección vertical mediante una oscilación impuesta mecánicamente de la tapa superior. Ellos observaron que cuando no se aplicaba la oscilación mecánica se presentaba una transferencia de calor estable por conducción en un fluido inmóvil estratificado. El fluido de trabajo dentro de la cavidad se consideró incompresible, se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes y se aplicó la aproximación de Boussinesq. Las simulaciones se realizaron con el método de volumen finito. Los cálculos numéricos mostraron resonancia a ciertas frecuencias al monitorear los máximos valores de las fluctuaciones de la transferencia de calor. El fenómeno de la resonancia y la amplificación del número de Nusselt fue mayor al incrementar el número de Raleigh para números de Prandtl de aproximadamente 1.

Bae et al. [15] estudiaron el efecto del bloqueo hidrodinámico de un deflector horizontal en la convección natural al interior de una cavidad para los casos con pared derecha a temperatura constante y temperatura periódica. Ellos observaron que a temperatura constante el efecto del deflector es insignificante, sin embargo, para el caso con temperatura periódica el efecto del deflector es de gran importancia. El comportamiento anterior se debe a que el deflector horizontal destruye la estratificación del fluido local y reduce la transferencia de calor convectiva flotante en todo el sistema. La mayoría de los estudios de convección natural se han abordado considerando un estado estacionario dentro de cavidades cerradas con diferencial de temperatura en las paredes, sin embargo el flujo de transición o periódico con condiciones de frontera complejas se produce en muchas aplicaciones, las aplicaciones específicas de lo anterior son el enfriamiento intermitente de aparatos electrónicos, tanques de fusión de vidrio y diseño térmico del edificio expuesto a la temperatura y variación por la luz del sol y las sombras que rodean el medio ambiente.

Zhang et al. [16] presentaron una plataforma para acoplar el modelo de nodos usado en EnergyPlus con el modelo de dinámica de fluidos computacionales usado en Fluent. Ellos compararon los coeficientes de transferencia de calor calculados por el modelo de dinámica de fluidos acoplado y los obtenidos con EnergyPlus. Además, se compararon las velocidades del flujo de aire a través de la abertura. En ese trabajo se simuló tridimensionalmente la ventilación natural de un edificio en Filadelfia debido a su importancia para el diseño de edificios eficientemente energético. La simulación de dinámica de fluidos se realizó considerando un modelo de turbulencia k-E y funciones de pared estándar. Las condiciones de frontera para el viento y la temperatura superficial del edificio se actualizaron dinámicamente. En EnergyPlus se usó el método de Newton para calcular la presión del aire en los nodos siguiendo un proceso iterativo que terminaba cuando el balance de masa de cada nodo se aproxima a cero. Las diferencias porcentuales de las velocidades de flujo de aire entre Energy Plus y Fluent fueron de hasta 700% en algunas zonas debido a que Energy Plus basa sus cálculos en ecuaciones empíricas. EnergyPlus calculó valores de coeficientes de transferencia de calor más altos que los obtenidos con el modelo de dinámica de fluidos

computacionales para las superficies exteriores con variaciones porcentuales de 7 % a 188%. En el caso de las superficies interiores las diferencias entre los softwares fueron de 10% al 80%.

J. Xamán et al. [17] investigaron la obtención de un tipo de configuración que disminuyese el flujo de calor hacia el interior de la cavidad. La cavidad cuadrada de estudio consistió en una pared inferior horizontal aislada, una pared superior horizontal opaca con y sin revestimiento repelente al agua. Se asumió la aproximación de Boussinesq y las ecuaciones para la convección y conducción. Los modelos descritos anteriormente se resolvieron usando el método de volumen finito. El efecto conductor de la pared superior y el patrón de flujo de la habitación tuvieron una relación directa con el tipo de recubrimiento utilizado. Del análisis con diferentes recubrimientos se determinó que, con el revestimiento negro se presenta el calor máximo en el interior de la cavidad y con la capa blanca los flujos de calor más bajos. La diferencia en la temperatura media del aire entre los recubrimientos fue de 4.22° C. La configuración de la pared superior con el grosor de 20 cm de material compuesto (poliestireno expandido en hormigón) mostró flujos de calor mínimos al interior de la cavidad. El recubrimiento blanco aplicado sobre un grosor de 20 cm de pared de material compuesto es el apropiado para lograr la mayor reducción de ganancias térmicas a dentro de la cavidad.

M. Gijón-Rivera et al [18] analizaron la habitación de un edificio en la ciudad de México, representado como una habitación alargada en forma de cubo la cual es la zona con la mayor área expuesta a la radiación solar, la geometría de la habitación es un rectángulo de 4x4x12 m³. Las condiciones de frontera son adiabáticas para las superficies este, oeste y piso, y las superficies restantes (sur, norte y techo) estuvieron expuestas al ambiente exterior. Las propiedades del aire se supusieron constantes de acuerdo con la aproximación de Boussinesq. El sistema de ecuaciones diferenciales para la convección y modelos conductivos se resolvieron numéricamente mediante el uso del método de volúmenes finitos. Las simulaciones se llevaron a cabo en un modo de convección natural para un horario comercial de 9:00 a 18:00 h, de lunes a viernes para mantener las temperaturas de confort oscilando entre 20 y 24 °C. Finalmente, se realizó el análisis para dos días de diseño en invierno y verano con el objetivo de comparar soluciones (acopladas y desacopladas); también se consideró el período de todo el año para hacer un pronóstico de las cargas de energía y costos de electricidad. La solución se llevó a cabo mediante el acoplamiento de los modelos de CFD y BES. El proceso de verificación fue una comparación entre los resultados de los programas computacionales ESP-r y TRNSYS. Las cargas de energía de enfriamiento en verano mostraron mayores requerimientos de energía, aproximadamente 250 veces más que para la calefacción. Durante el invierno, las cargas fueron alrededor de 25 veces más que cargas de calefacción.

Rodríguez et al. [19] estudiaron la transferencia de calor por convección mixta la cual se llevó cabo en una cavidad alargada ventilada. La cavidad ventilada tenía una altura de 2 m y un ancho de 0.1 m. El sistema consistió en dos paredes verticales, la pared izquierda recibe del exterior un flujo de calor uniforme y constante, mientras que la derecha se mantiene a una temperatura uniforme y constante de 298K, las dos paredes

horizontales se consideran adiabáticas. Las paredes están separadas por un espacio de aire y tienen dos aberturas iguales a 0.1 m para permitir la circulación de aire proveniente del exterior, para la convección mixta de un flujo bidimensional en estado permanente fue considerada la aproximación de Boussinesq. La obtención de los resultados se llevó a cabo utilizando el software comercial Fluent 6.3, las ecuaciones se resolvieron sobre una malla desplazada. Para la condición de frontera en la entrada, se consideró que el aire entra perpendicular al plano de la apertura con valores constantes de temperatura y velocidad, y en la salida se asumió que el flujo es completamente desarrollado y que el transporte difusivo de energía es despreciable. Los valores de la relación entre el calor recibido en la pared izquierda y el calor transferido por la pared derecha se encuentran entre 0.83 y 0.88 cuando la temperatura de entrada del aire es de 298 K, lo que indica que la ventilación de aire extrae de la cavidad entre 17% y 12 % del calor recibido en la pared izquierda. Al aumentar la temperatura de entrada del fluido, la relación entre el calor recibido y el transferido se encuentran entre los intervalos: 1.47-1.93 para una temperatura de entrada 308 K y 1.51-2.10 para una temperatura de entrada igual a 318 K, por lo que ahora la corriente de aire que entra a la cavidad incrementa entre 47 % y 110 % el calor que se transfiere por la pared isotérmica.

J. Serrano-Arellano et al. [20] presentaron un análisis numérico de un invernadero en Amazcala, municipio de El Márquez, Queretaro, México. La región tiene un clima semiseco con temperaturas máximas y mínimas en verano de 38 ° C y 6.2 ° C respectivamente. El invernadero se tomó como bidimensional, represento una cavidad ventilada, la con una entrada de flujo en la parte superior de la vertical izquierda pared y una salida de flujo centrada en la sección media de la pared vertical derecha, se consideró la pared horizontal inferior adiabática. Las paredes restantes son isoterms con diferentes temperaturas en sus superficies, la pared con la temperatura más alta se considera la pared caliente y actúa como una fuente de calor. El fluido dentro del invernadero tiende a convectarse hacia la salida, llevando consigo el exceso de energía en el sistema así es como podemos bajar las temperaturas dentro del invernadero. El tamaño del invernadero era de 9.0 m de largo, 3.0 m de alto; La altura de la abertura de entrada de aire. y la abertura de salida es de 0.5 m y 1.0 m, respectivamente, las temperaturas de las paredes isotérmicas fueron 40 °C, 30 °C. y 25 °C, las paredes son de 60 °C, 40 °C y 35 °C. Las propiedades termofísicas del aire se consideraron constantes y el modelo matemático se expresa a través de los RANS, cuando la entrada de flujo de aire coincide con la ubicación de la pared caliente este arreglo tiende a aumentar el movimiento del flujo de aire dentro del invernadero, favoreciendo la distribución de las temperaturas en su interior. Después de alcanzar una cifra óptima de velocidad, aumentando el flujo de aire la velocidad ya no beneficia al ambiente térmico interno y resulta en un mayor consumo de electricidad. El modelo que representa un día marcado por el calor extremo reveló que el aire debe ser enfriado antes de introducirlo en el invernadero para que alcance una temperatura agradable.

F. Noh-Pat et al. [21] analizaron la influencia de la irradiación solar y la temperatura del aire exterior en la transferencia de calor conjugado en una cavidad cuadrada 2D con una pared semitransparente (vidrio) con y sin película de control. La geometría

representa una habitación real modelada como una cavidad cuadrada con un tamaño de 4,0 m de longitud y altura, la cavidad estaba formada por dos muros adiabáticos horizontales, una pared isotérmica vertical a 294.0 K (izquierda) y una pared semitransparente vertical con control solar. La cavidad tiene aire en su interior, inicialmente con una temperatura uniforme. En la pared vertical semitransparente una radiación solar variable entrante. Las paredes son consideradas como grises, difusas, reflectantes y emisor de radiación térmica y el componente de la radiación solar afecta directamente el equilibrio térmico del muro semitransparente y de ahí toda la cavidad. Cuando se utiliza la película de control solar en la pared semitransparente, el flujo de calor a el interior de la cavidad es más bajo que el flujo de la caja sin película. Esto ocurre porque la cantidad de energía directamente transmitida es menor cuando se utiliza la película de control solar; la película permite el 15% de la radiación solar incidente ingresa directamente, mientras que un 78% se transmite cuando no se utiliza la película de control solar, sin embargo, el uso de la película de control solar aumenta la temperatura del aire en el interior la cavidad hasta 10° C por encima de la temperatura del aire cuando la película no está utilizada. Este efecto sobre la temperatura del aire es una consecuencia de la cantidad efectiva de energía los restos en la cavidad.

R. De Masi et al. [22] analizaron diferentes tipos de pinturas impermeabilizantes en los meses de verano en la ciudad de Benevento, Italia. Fue caracterizada una habitación de 6 x 6 m con un techo compuesto de aislantes. La cual fue pintada con 4 tipos de impermeabilizantes con características distintas cada uno, llegando a la conclusión de que la pintura impermeabilizante de tipo acrílica fue la que se encontró que reduce la temperatura superficial de un techo en un rango de 1-2 °C.

S. Quezada [23] planteó en su tesis doctoral la transferencia de energía a través de los sistemas de techos verdes analizando la aplicación de ecuaciones para medios heterogéneos pudiendo describir la transferencia de calor a través de las capas que componen los techos verdes; como la capa verde compuesta de plantas y el aire, así como la capa de sustrato compuesto de tierra y agua. Se realizó un análisis de la influencia de las variables de entrada sobre la temperatura de la capa verde y la temperatura dentro del edificio. Este análisis de sensibilidad mostró en el estudio que el parámetro de entrada que mayor influencia tiene sobre la temperatura de la capa verde y la temperatura en el interior del edificio es la temperatura ambiente seguida de la radiación solar y la tasa de evapotranspiración, mientras que la velocidad del viento es el parámetro con menor impacto. Llegando a la conclusión que las variables que mayor influencia tienen en la temperatura de la capa verde y en la temperatura en el interior del edificio es la radiación solar.

F. Yeomans et al. [24] investigaron los efectos de techos verde en viviendas de interés social en el municipio de El Carmen, Nuevo León. Las temperaturas dentro de las viviendas fueron medidas con sensores de temperatura ubicados en las diferentes habitaciones de las viviendas. Orientadas al sur y sin ningún tipo de obstrucción que influyesen en el resultado, las temperaturas fueron tomadas cada 5 minutos. Los techos verdes fueron de tipo extensivo llegando a la conclusión de que la máxima disminución de temperatura registrada fue de 10°C en la superficie de la losa de concreto.

Señalando que estos resultados pueden ser mejorados dependiendo del mantenimiento de los techos verdes.

Capítulo 4

Modelado matemático del sistema

4.1 Descripción geométrica del problema

En esta tesis se realizó el análisis de carga térmica para los meses de verano de una habitación de la planta alta en una vivienda de la ciudad de Veracruz, México ubicada en las coordenadas $19^{\circ}09'31.2''N$ $96^{\circ}06'43.2''W$ (19.158664 , -96.112012) (Fig. 4.1). La ciudad de Veracruz está situada a la orilla del Golfo de México y presenta un clima cálido húmedo con porcentajes de humedad entre el 80 y 90% casi todo el año y temperaturas promedio en los meses de verano superiores a $35^{\circ}C$ con sensaciones térmicas alrededor de los $40 - 45^{\circ}C$.



Figura 4.1: Ubicación de la vivienda en la costa del Golfo de México. a) Vista aérea en donde se encuentra la vivienda. b) Posición de la vivienda en la geografía urbana.

En la Fig. 4.2, se presenta el modelo 3D de la vivienda. La simulación numérica se realizó para la geometría y características de la habitación en color amarillo.

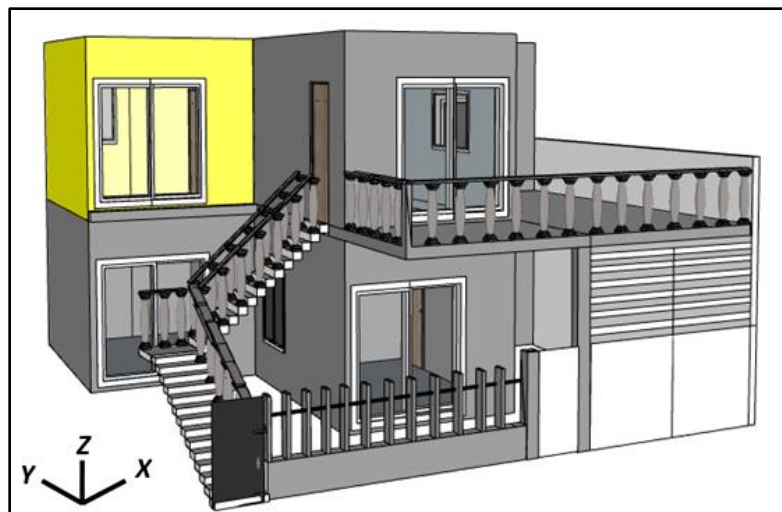


Figura 4.2 Modelo 3D de la vivienda

En la presente tesis se analizó la carga térmica en una habitación real con techo de concreto y paredes de ladrillo rojo, como se muestra en la Fig. 4.3. Las dimensiones son 4.27 m de largo (L), 3.12 m de ancho (A), 2.96 m de alto (H) y 0.16 m de espesor de pared (E) y corresponden a una habitación real.

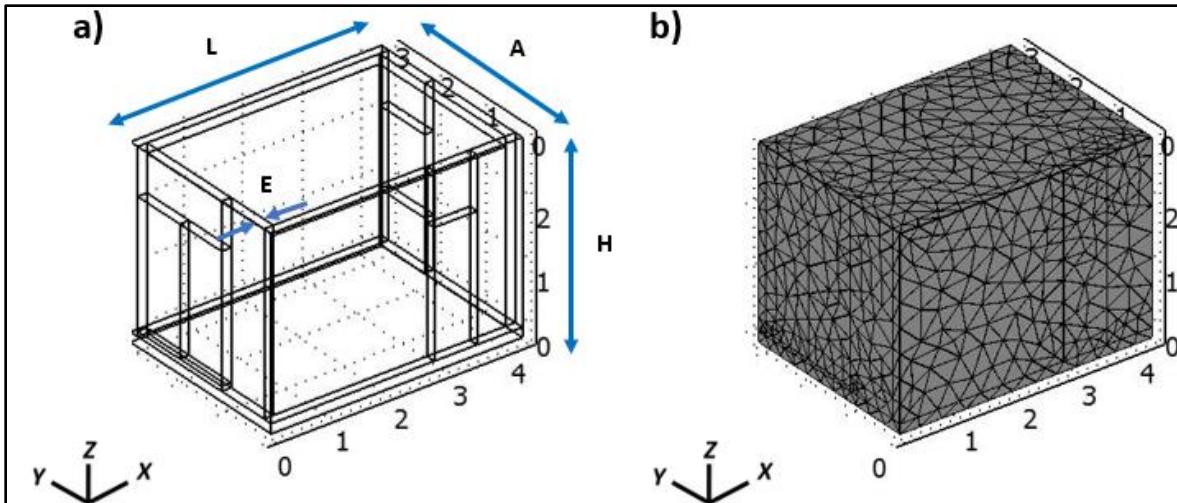


Figura 4.3 Detalles de la vivienda simulada. a) Geometría de la habitación analizada. b) Malla de la habitación

La habitación está compuesta de 2 entradas (Fig. 4.4 a) y 1 salida (Fig. 4.4 b) de aire, la entrada 1 es un ventanal doble. La mitad del ventanal es fijo el cual se considera como cristal sólido. La otra mitad es móvil. Las dimensiones de todo el ventanal son 1.86 m x 2.10 m. La entrada 2 es la puerta de la habitación con medidas de 2.08 m x 0.73 m, la salida es una ventana de 1 m x 1.30 m ubicada en la parte lateral de la habitación opuesta a la entrada 1.

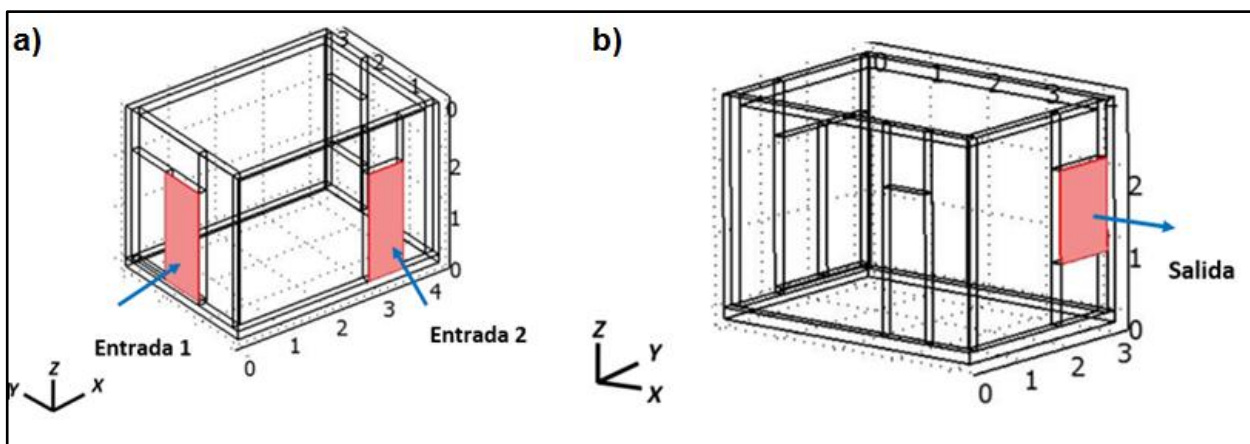


Figura 4.4 Ubicación de las entradas y salidas a) Entradas 1 y 2 de la habitación b) Ubicación de la ventana en la parte posterior de salida de aire de la habitación.

4.2 Condiciones de frontera

En la Tabla 4.1 se presentan los datos experimentales registrados, los cuales sirvieron como datos de entrada o condiciones de frontera impuestas en la vivienda simulada. Estos datos corresponden a una de las épocas más calurosas de la Cd. de Veracruz, específicamente al día 15 de junio de 2016.

Tabla 4.1 Datos experimentales

| hora | Tamb (°C) | Ts-C (°C) | Tb-C (°C) | Ti-C (°C) | Tp-ext (°C) | Tp-int (°C) | Rad Solar (W/m ²) |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| 6.00 | 27.459 | 30.482 | 30.088 | 29.55 | 21.368 | 23.165 | 75.132 |
| 6.30 | 27.921 | 30.848 | 30.513 | 30.323 | 21.463 | 23.576 | 79.362 |
| 7.00 | 28.196 | 30.463 | 29.981 | 29.319 | 22.456 | 23.649 | 159.791 |
| 7.30 | 28.293 | 31.482 | 31.023 | 30.892 | 23.908 | 24.112 | 174.607 |
| 8.00 | 30.144 | 35.307 | 33.971 | 33.548 | 24.34 | 24.351 | 269.075 |
| 8.30 | 29.735 | 36.968 | 36.17 | 35.27 | 24.72 | 24.815 | 240.171 |
| 9.00 | 31.676 | 42.576 | 39.309 | 37.922 | 28.549 | 24.787 | 607.899 |
| 9.30 | 31.126 | 45.087 | 42.096 | 39.733 | 28.707 | 24.216 | 657.76 |
| 10.00 | 36.53 | 49.351 | 44.122 | 41.145 | 30.325 | 24.322 | 761.608 |
| 10.30 | 32.628 | 50.173 | 46.669 | 43.173 | 31.129 | 24.393 | 717.674 |
| 11.00 | 34.048 | 48.289 | 46.206 | 42.459 | 31.788 | 25.128 | 564.278 |
| 11.30 | 34.142 | 50.978 | 46.231 | 42.591 | 33.039 | 26.144 | 844.933 |
| 12.00 | 35.814 | 55.31 | 50.497 | 46.027 | 35.016 | 26.545 | 834.059 |
| 12.30 | 36.537 | 55.737 | 51.999 | 46.984 | 36.747 | 27.042 | 801.867 |
| 13.00 | 39.891 | 58.431 | 51.918 | 46.368 | 37.418 | 27.431 | 875.69 |
| 13.30 | 41.965 | 58.798 | 51.853 | 46.478 | 41.099 | 27.387 | 877.815 |
| 14.00 | 39.421 | 56.975 | 51.598 | 46.059 | 41.156 | 28.536 | 841.567 |
| 14.30 | 41.073 | 56.635 | 50.71 | 45.09 | 40.167 | 29.353 | 763.791 |
| 15.00 | 40.008 | 53.743 | 49.702 | 44.207 | 40.344 | 30.076 | 680.732 |
| 15.30 | 40.146 | 52.33 | 47.974 | 43.09 | 41.825 | 30.996 | 644.993 |
| 16.00 | 40.631 | 51.386 | 46.32 | 42.275 | 40.346 | 32.587 | 536.255 |
| 16.30 | 39.997 | 43.877 | 43.298 | 40.346 | 39.128 | 33.045 | 378.92 |
| 17.00 | 37.416 | 40.667 | 40.622 | 38.419 | 40.202 | 33.895 | 181.81 |
| 17.30 | 34.226 | 36.861 | 37.763 | 35.929 | 41.502 | 34.258 | 81.079 |
| 18.00 | 33.744 | 35.262 | 35.196 | 33.976 | 38.825 | 34.184 | 96.957 |

En la Tabla 4.2 se definen las características técnicas de las herramientas de medición usadas.

Las simulaciones se realizan para diferentes horas del día, desde las 6:00 h hasta las 18:00 h. Como condición de frontera de temperatura se impone la radiación solar en el techo de la vivienda, así como la temperatura ambiente y temperatura de las paredes. El piso se considera adiabático. Como condiciones de frontera de velocidad se imponen las velocidades de entrada de aire en la ventana lateral (entrada 1) y en la puerta (entrada 2) con un valor de 0.75 m/s. En la ventana el aire

se mueve en la dirección x y en la puerta el aire se mueve en la dirección y. En la ventana lateral opuesta a la entrada 1, se impone una condición de salida abierta a la atmosfera, es decir $P=0$ Pa. En la Fig. 4.5 se muestra un ejemplo de condiciones de frontera correspondiente a las 13:30 h.

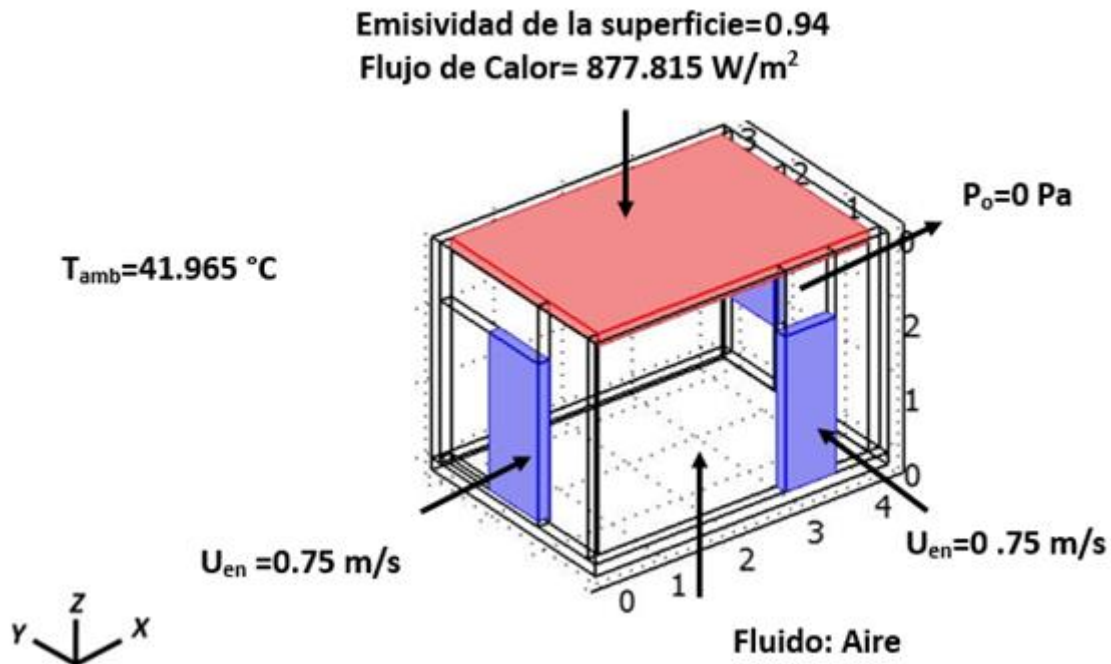


Figura 4.5 Ejemplo de condiciones de fronteras para las 13:30 h.

Para estudiar el efecto de la velocidad del aire en el comportamiento térmico de la vivienda, se realizaron simulaciones para las 13:30 h considerando tres posiciones de la parte móvil del ventanal: ventana abierta, semiabierta ($\frac{1}{2}$) y casi cerrada ($\frac{1}{4}$). La entrada 2 y la salida 1 se mantienen abiertas en todas las simulaciones. Adicionalmente se realizaron simulaciones para la vivienda con una capa de impermeabilizante y con una capa de techo verde para la hora de mayor radiación solar.

4.3 Propiedades físicas de los materiales

Para este estudio se tomaron propiedades reales de los materiales: aire, ladrillo, concreto, ver Tabla 4.3. Para los casos del techo con impermeabilizante y la cubierta verde las propiedades se muestran en la Tabla 4.4.

4.4 Ecuaciones de Conservación

Las simulaciones numéricas fueron realizadas para una habitación en un dominio tridimensional Ω en el cual se analizó el comportamiento de la dinámica de fluidos y la transferencia de calor. Para ello, se resolvieron las ecuaciones de conservación que describen el problema de un flujo turbulento, incompresible y Newtoniano en el

interior de una habitación, las cuales son la ecuación de cantidad de movimiento, la ecuación de continuidad y la ecuación de energía:

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho U_i U_j \right] + B_T \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial}{\partial x_j} - \rho \overline{U_j T} \right] \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores P representa la presión, ρ es la densidad, U es la componente de velocidad, μ es la viscosidad dinámica, B_T es la fuerza de cuerpo, T es la temperatura y Pr es el número de Prandtl. En la ec. 2, se aplica la aproximación de Boussinesq:

$$B_T = -\rho_{ref} g_i \beta (T - T_{ref}) \quad (4)$$

En la expresión anterior β es el coeficiente de expansión volumétrica. De acuerdo con el modelo de viscosidad de remolino a través de la hipótesis de Boussinesq, el tensor de esfuerzos de Reynolds y el flujo de calor turbulento se aproximan como:

$$\rho \overline{U_i' U_j'} = -\mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\rho \overline{U_j' T'} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (6)$$

Donde Pr_t es el número de Prandtl turbulento y μ_t es la viscosidad turbulenta dada por:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

La energía cinética turbulenta k y la rapidez de disipación de energía cinética turbulenta ε , se calculan resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + G_k) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

En las ecuaciones anteriores P_k es la rapidez de producción de energía cinética turbulenta y G_k es la generación o destrucción de turbulencia debido a las fluctuaciones de las fuerzas de cuerpo.

Tabla 4.2 Características de los equipos usados

| Nombre | Fotografía | Características | Marca |
|--|---|--|----------------------|
| <p>Medidor de potencia solar digital (Piranómetro)</p> |  | <ul style="list-style-type: none"> • Rango de medición: 0 a 2000 W/m² o 0 a 634 Btu/(ft² x h). • Precisión de medición: ±10 W/m² (±3 Btu/(ft² x h)) o ±5% de lectura. • Resolución de medición: 0.1 W/m² o Btu/ (ft² x h). • Rango espectral: 400 a 1000nm. • Rango de muestreo: 4x por segundo. • Auto apagado: Después de 10 minutos de inactividad. • Temperatura de operación: 32° a 122°F (0° a 50 °C) a <80% HR. • Peso: 5.6 oz. (158g). • Fuente de poder: 4 baterías "AA". | <p>General Tools</p> |
| <p>Termómetro infrarrojo digital tipo pistola (Pirómetro)</p> |  | <ul style="list-style-type: none"> • Rango de medición: -32 °C a 350°C (-26°F a 662 °F) • Distancia máxima para medición: 12 m. • Unidades de medición: °C y °F. • Función de retención de datos: 10 s | <p>Steren</p> |

Tabla 4.3 Propiedades de los materiales utilizados en el modelo matemático.

| Parámetro | Valor | Descripción |
|---------------|------------------------|---|
| ρ_a | 1.23 Kg/m ³ | Densidad del aire |
| ρ_{LR} | 1920 kg/m ³ | Densidad del Ladrillo rojo |
| $C_{P LR}$ | 835 [J/(kg*K)] | Calor específico del Ladrillo rojo |
| K_{LR} | 0.72 [W/(m*K)] | Conductividad térmica del Ladrillo rojo |
| C_{Pa} | 1007 [J/(kg*K)] | Calor específico del aire |
| K_a | .02514 [W/(m*K)] | Conductividad térmica del aire |
| K_C | 1.4 [W/(m*K)] | Conductividad térmica del concreto |
| ρ_C | 2300 Kg/m ³ | Densidad del concreto |
| C_{PC} | 880 [J/(kg*K)] | Calor específico del concreto |
| ρ_V | 2500 kg/m ³ | Densidad del Vidrio |
| C_{PV} | 750 [J/(kg*K)] | Calor específico del Vidrio |
| K_V | 1.4 [W/(m*K)] | Conductividad térmica del Vidrio |
| ε | 0.94 | Emisividad del concreto |

Tabla 4.4 Propiedades del impermeabilizante utilizado en el modelo matemático.

| Parámetro | Valor | Descripción |
|---------------|------------------------|---|
| ρ_i | 1290 kg/m ³ | Densidad del Impermeabilizante |
| K_i | 0.1233 [W/(m*K)] | Conductividad térmica del Impermeabilizante |
| C_{Pi} | 480.923[J/(kg*K)] | Calor específico del Impermeabilizante |
| ε | 0.90 | Emisividad del impermeabilizante |

Capítulo 5

Método numérico

5.1. Método de elemento finito

Inicialmente el método de elemento finito se enfocó a problemas de análisis estructural. Su uso en problemas de flujos es más reciente. El método se aplicó primero a problemas de flujo potencial a finales de los 60's. Actualmente se ha extendido, hasta incluir flujos más generales, ver [25]. El método de elemento finito es una técnica para resolver ecuaciones diferenciales parciales. El método requiere dividir el dominio de solución en un número finito de subdominios simples, llamados elementos, los cuales forman una malla, la cual no tiene que ser estructurada, es decir, los elementos que forman la malla no tienen que tener una forma regular, por lo que pueden manejarse fácilmente geometrías complejas. Usando conceptos variacionales se construye la aproximación de la solución sobre el conjunto de elementos finitos, de tal manera que este método no busca directamente una solución de la ecuación diferencial parcial, sino busca la solución de alguna forma integral de la ecuación. La formulación variacional consiste en considerar que la solución del problema discreto tiene una forma preestablecida y en reformular el problema de valor de frontera para que admita condiciones débiles en la solución y sus derivadas, lo cual implica que se tiene que encontrar una función de aproximación tal que la ecuación diferencial y las condiciones de frontera sean satisfechas en la forma de integrales de promedios ponderados con una función de prueba, esta formulación permite incorporar de manera natural condiciones de frontera de tipo diferencial. Las funciones de aproximación y de prueba deben ser lo suficientemente suaves de tal manera que sus primeras derivadas al cuadrado sean integrables. El método de elementos finitos proporciona una técnica general y sistemática para construir funciones base para aproximar el problema.

La idea principal es que las funciones base pueden ser definidas localmente parte por parte sobre subregiones del dominio llamados elementos finitos y que sobre cualquier subdominio la funciones base pueden ser funciones muy simples, tales como polinomios de orden bajo. La función base en un punto particular de una malla se obtiene combinando las funciones de forma definidas sobre los elementos conectados al nodo. Para poder definir localmente las funciones base se emplea un elemento de referencia donde se introducen los índices de los nodos locales y un sistema coordenado local, como se muestra en la Fig. 5.1. Las funciones de forma son aquellas que se definen en cada uno de los nodos de un elemento de referencia en términos de coordenadas locales. La función de forma de un nodo tiene un valor unitario en ese nodo y cero en los otros dos nodos.

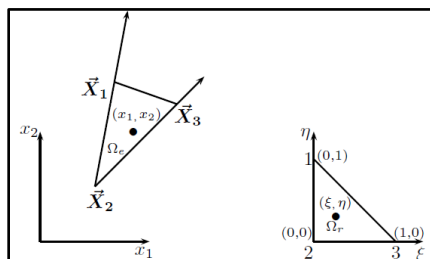


Figura 5. 1 Mapa lineal desde un elemento triangular Ω_e a un elemento maestro Ω_r y un mapa inverso.

5.2 Elementos triangulares

El triángulo es el polígono bidimensional más simple en el sentido de que tiene el menor número de lados y vértices, lo cual hace fácil elegir nodos lo suficientemente exactos para definir las funciones de forma, las cuales son polinomios completos de algún grado específico. El estudio de elementos finitos triangulares se comienza considerando el caso de triángulos arbitrarios generalizados Ω_e , como los que se tendrían en cualquier malla de elementos finitos y un triángulo de referencia Ω_r isósceles recto, con lo que el mapeo de un triángulo a otro y la formulación con elemento finito se simplifican considerablemente. Una simple transformación lineal mapea el triángulo generalizado Ω_e en el triángulo de referencia isósceles-recto Ω_r , como se muestra en la Fig. 5.1. Las líneas coordenadas generalizadas 2-1 y 2-3 del elemento Ω_e corresponden a las coordenadas del elemento de referencia $\xi = 0$ y $\eta = 0$, es decir la transformación lineal describe el mapa desde un sistema generalizado a un sistema de referencia, ya que el mapa es lineal e invertible, el mapa inverso desde Ω_r a Ω_e existe y es también lineal. Esta linealidad implica también que una base polinomial en el plano x , y será transformado a una base polinomial en el plano ξ y η y viceversa. La transformación lineal desde Ω_e a Ω_r puede derivarse directamente haciendo que los lados generalizados mapeen los lados rectos de Ω_r . Las tres funciones de forma lineal para el elemento de referencia isósceles recto Ω_r puede escribirse por inspección, ya que cada uno debe tener el valor unitario en el correspondiente vértice y cero en el lado opuesto a ese vértice, obteniéndose:

$$\psi_1(\xi, \eta) = \eta \quad \psi_2(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta \quad \psi_3(\xi, \eta) = \xi \quad (3.1)$$

En general el método de elemento finito requiere el uso de dos mallas, una malla gruesa donde se calcula la presión y una malla fina donde se calcula la velocidad, ver Fig. 5.2.

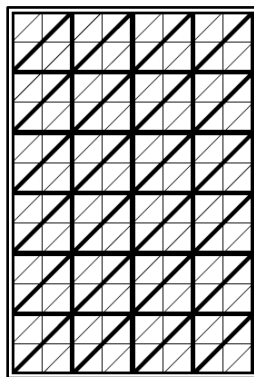


Figura 5. 2 Malla de presión gruesa y malla de velocidad fina.

5.3 Formulación débil del problema

La simulación numérica se llevó a cabo usando el método de elemento finito, con este fin, se definieron el paso de la discretización espacial, \tilde{h} , la triangulación de

elementos finitos τ_h del dominio poligonal $\bar{\Omega}$, el área polinomial P_1 en dos variables de grado menor o igual a uno, y el área de funciones continuas $C^0(\bar{\Omega})$ definida en $\bar{\Omega}$. Después se definió otro elemento finito de triangulación $\tau_{h/2}$ de $\bar{\Omega}$ que es dos veces más fino que τ_h , para subdividir cada triángulo de τ_h en cuatro subtriángulos similares de punto medio por cara. Los espacios funcionales se aproximan por los siguientes espacios de dimensión finita:

$$L_{0h} = \{q_h \in L_h \mid \int_{\Omega} q_h d\vec{X} = 0\} \text{ Con } L_h = \{q_h \mid q_h \in C^0(\bar{\Omega}), q_h|_{\tau} \in P_1, \forall \tau \in \tau_h\},$$

$$V_{0h} = \{\vec{v}_h \in V_h \mid \vec{v}_h = 0 \text{ on } \Gamma_1\} \text{ Con } V_h = \{\vec{v}_h \mid \vec{v}_h \in (C^0(\bar{\Omega}))^2, \vec{v}_h|_{\tau} \in P_1 \times P_1, \forall \tau \in \tau_{h/2}\},$$

$$W_{0h} = \{\theta_h \in W_h \mid \theta_h = 0 \text{ on } \Gamma_3\} \text{ Con } W_h = \{\theta_h \mid \theta_h \in C(\bar{\Omega}), \theta_h|_{\tau} \in P_1, \forall \tau \in \tau_{h/2}\},$$

Usando el anterior espacio de dimensión finita se obtiene la siguiente aproximación de las ecuaciones en su forma variacional (2.1-2.3), para más detalle ver referencia [18]-[19]. Para $t > 0$, encontramos $\vec{u}_h(t) \in V_h$ con $\vec{u}_h(t) = \vec{g}_{1h}(t)$ sobre Γ_1 , $p_h(t) \in L_h$ y $T_h(t) \in W_h = g_{3h}(t)$ sobre Γ_3 , tal que:

$$\int_{\Omega} [(\vec{u}_h \cdot \nabla) \vec{u}_h \cdot \vec{v}] d\vec{X} + V \int_{\Omega} \nabla \vec{u}_h : \nabla \vec{v} d\vec{X} - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot \vec{v} d\vec{X} = \int_{\Omega} \vec{f} \cdot \vec{v} d\vec{X} \quad \forall \vec{v} \in V_{0h} \quad (3.2)$$

$$\int_{\Omega} q \nabla \cdot \vec{u}_h d\vec{X} = 0, \quad \forall q \in L_{0h}, \quad (3.3)$$

$$\int_{\Omega} [\rho C_p (\vec{u}_h \cdot \nabla) T_h \theta] d\vec{X} + k \int_{\Omega} \nabla T_h : \nabla \theta d\vec{X} = \int_{\Omega} Q \theta d\vec{X} \quad \forall \theta \in W_{0h}, \quad (3.4)$$

$$\vec{u}_h(\vec{X}, 0) = \vec{u}_{0h}(\vec{X}), \quad T_h(\vec{X}, 0) = T_{0h}(\vec{X}). \quad (3.5)$$

Por otro lado Γ_1 y Γ_3 son las condiciones de frontera de velocidad y temperatura tipo Dirichlet, respectivamente; \vec{g}_{1h} y g_{3h} son las aproximaciones de elemento finito de la velocidad y temperatura para las funciones \vec{g}_1 y g_3 , respectivamente. Similarmente, \vec{u}_{0h} y T_{0h} son aproximaciones de elemento finito de la condición inicial de las funciones \vec{u}_0 y T_0 , respectivamente.

5.4 Solución del problema de difusión

El problema de difusión consiste en una ecuación elíptica, una ecuación típica de este tipo para una componente u , se puede escribir como:

$$\bar{a}u - \nabla \cdot (V \nabla u) = f, \quad (3.6)$$

Al aplicar la formulación variacional a la ecuación anterior, la cual consiste en

multiplicar por una función de prueba v e integrar sobre el dominio, se tiene:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}u - \nabla \cdot (V\nabla u))v d\vec{x} = \int_{\Omega} fvd\vec{x}, \quad (3.7)$$

Desarrollando el primer miembro, se tiene:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}uv - v\nabla \cdot (V\nabla u))d\vec{x} = \int_{\Omega} fvd\vec{x}, \quad (3.8)$$

Por la regla del producto para la diferencia, se obtiene:

$$v\nabla \cdot (V\nabla u) = \nabla \cdot (vV\nabla u) - V\nabla u \cdot \nabla v, \quad (3.9)$$

Así, la ecuación (3.8) se puede escribir como:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}uv - \nabla \cdot (vV\nabla u) + V\nabla u \cdot \nabla v)d\vec{x} = \int_{\Omega} fvd\vec{x}, \quad (3.10)$$

Aplicando el teorema de la divergencia, se obtiene:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot (vV\nabla u) d\vec{x} = \int_{\partial\Omega} (vV\nabla u) \cdot \vec{n}d(\partial\Omega), \quad (3.11)$$

Así, la ecuación (3.10), se puede escribir como:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}uv + V\nabla u \cdot \nabla v)d\vec{x} - \int_{\partial\Omega} (vV\nabla u) \cdot \vec{n}d(\partial\Omega) = \int_{\Omega} fvd\vec{x}, \quad (3.12)$$

Pero

$$\nabla u \cdot \vec{n} = \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \quad (3.13)$$

Por lo tanto:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}uv + V\nabla u \cdot \nabla v)d\vec{x} - \int_{\partial\Omega} uV \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} d(\partial\Omega) = \int_{\Omega} fvd\vec{x}, \quad (3.14)$$

Reordenando términos, se obtiene:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}uv + V\nabla u \cdot \nabla v) d\vec{x} = \int_{\Omega} fvd\vec{x} + \int_{\partial\Omega} V \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} vd(\partial\Omega), \quad (3.15)$$

Sustituyendo

$$v = \sum_{i=1}^{nn} v_i \psi_i \quad (3.16)$$

Donde nn es el número de nodos, se tiene:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left(\bar{a}u \left(\sum_{i=1}^{nn} v_i \psi_i \right) + V\nabla u \cdot \nabla \left(\sum_{i=1}^{nn} v_i \psi_i \right) \right) d\vec{x} \\ &= \int_{\Omega} f \left(\sum_{i=1}^{nn} v_i \psi_i \right) d\vec{x} + \int_{\partial\Omega} V \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \left(\sum_{i=1}^{nn} v_i \psi_i \right) d(\partial\Omega), \end{aligned} \quad (3.17)$$

Factorizando, se obtiene:

$$\sum_{i=1}^{nn} v_i \left[\int_{\Omega} (\bar{a}u\psi_i + V\nabla u \cdot \nabla \psi_i) d\vec{x} = \int_{\Omega} f\psi_i d\vec{x} + \int_{\partial\Omega} V \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \psi_i d(\partial\Omega) \right], \quad (3.18)$$

Lo cual es equivalente a escribir:

$$\int_{\Omega} (\bar{a}u\psi_i + V\nabla u \cdot \nabla \psi_i) d\vec{x} = \int_{\Omega} f\psi_i d\vec{x} + \int_{\partial\Omega} V \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \psi_i d(\partial\Omega) \quad i = 1, \dots, nn, \quad (3.19)$$

Empleando la aproximación:

$$u = \sum_{j=1}^{nn} v_j \psi_j \quad (3.20)$$

Y reordenando se tiene:

$$\sum_{j=1}^{nn} \left[\int_{\Omega} (\bar{a}\psi_i \psi_j + V\nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j) d\vec{x} \right] u_j = \int_{\Omega} f\psi_i d\vec{x} + \int_{\partial\Omega} V \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \psi_i d(\partial\Omega) \quad i = 1, \dots, nn, \quad (3.21)$$

Obteniéndose un sistema de ecuaciones lineales, de la forma:

$$\sum_{j=1}^{nn} k_{ij}u_j = f_i \quad i = 1, \dots, nn, \quad (3.22)$$

Donde

$$k_{ij} = \int_{\Omega} (\bar{a}\psi_i\psi_j + v\nabla\psi_i \cdot \nabla\psi_j) d\vec{x}, \quad (3.23)$$

Y

$$f_i = \int_{\Omega} f\psi_i d\vec{x} + \int_{\partial\Omega} V \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} \psi_i d(\partial\Omega) \quad (3.24)$$

5.5 Integración de elemento finito

El cálculo de las entradas locales de las matrices y vectores definidos por las ecuaciones (3.23) a (3.24), se realiza, mediante integración de elemento finito. Un término muy utilizado en estos cálculos para cada uno de los elementos finitos en que se divide el dominio es el determinante de la matriz Jacobiana, el cual está dado por:

$$Je = x_1(3,2)x_2(1,2) - x_1(1,2)x_2(3,2) \quad (3.25)$$

Así como la inversa de la matriz Jacobiana:

$$[Je^{-1}] = \frac{1}{Je} \begin{bmatrix} x_2(1,2) & -x_1(1,2) \\ -x_2(3,2) & x_1(1,2) \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

Donde:

$$x_1(1,2) = x_1(1) - x_1(2), \quad (3.27)$$

$$x_1(3,2) = x_1(3) - x_1(2), \quad (3.28)$$

$$x_2(1,2) = x_2(1) - x_2(2), \quad (3.29)$$

$$x_2(3,2) = x_2(3) - x_2(2), \quad (3.30)$$

La matriz definida por las entradas locales de la ecuación (3.23) se calculan como:

$$k_{ij}^e = \bar{a}Je \int \psi_i\psi_j d\vec{\xi} + \frac{VJe}{2} [\nabla\psi_i][Je^{-1}][Je^{-1}]^t [\nabla\psi_i]^t, \quad (3.31)$$

Donde

$$\int \psi_i \psi_j d\vec{\xi} = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.32)$$

$$\nabla \psi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

Suponiendo $\frac{\partial u}{\partial \vec{n}} = 0$, el vector definido por las entradas locales de la ecuación (3.24), se calcula como:

$$f_i^e = \frac{J}{24} \begin{bmatrix} 2f^{g(e,1)} + f^{g(e,2)} + f^{g(e,3)} \\ f^{g(e,1)} + 2f^{g(e,2)} + f^{g(e,3)} \\ f^{g(e,1)} + f^{g(e,2)} + 2f^{g(e,3)} \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

5.6 Convergencia

Las simulaciones se realizaron con una malla adaptable para todos los casos, con el fin de garantizar la independencia del mallado en la solución. La Fig. 5.3, muestra el análisis de convergencia mediante los perfiles de temperatura como función de la coordenada axial y para tres diferentes tamaños de malla: 15820, 18990 y 20150 elementos. La validación del código numérico se hizo considerando un canal con un escalón en expansión para el cual se calcularon los puntos de reencuentro los cuales coincidieron con una diferencia menor al 5% con los resultados presentados por Armaly *et al.* [26] Obteniéndose para $Re=100$ un punto de reencuentro en 2.82 (con el código utilizado en este trabajo) y 2.95 (Armaly *et al.* [26]) y para $Re=600$ se obtuvieron valores de 10.48 (con el código utilizado en este trabajo) y 11.0 (Armaly *et al.*[26]).

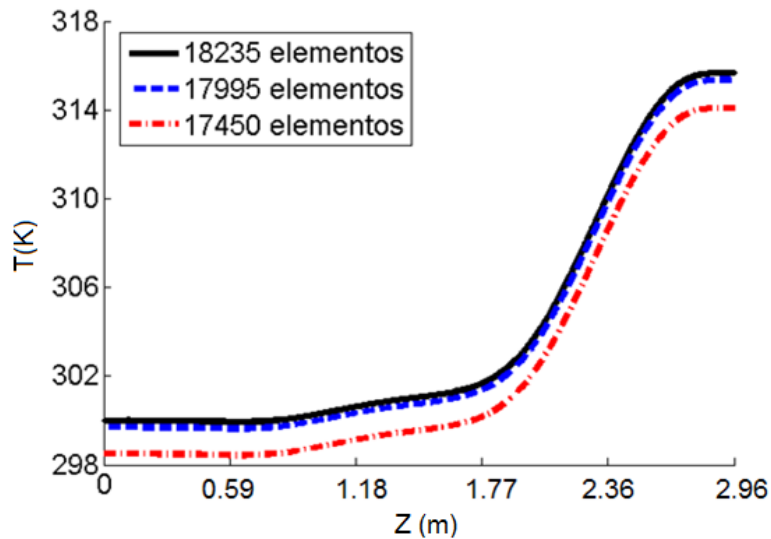


Figura 5.3. Análisis de convergencia de los perfiles de temperatura en la cavidad con tres diferentes tamaños de malla para las 13:30 horas en $x=1\text{m}$, $y=1.55\text{ m}$.

Capítulo 6

Resultados

En esta tesis se caracteriza el comportamiento térmico y de dinámica de fluidos del flujo de aire en el interior de una habitación ubicada en la ciudad de Veracruz con diferentes propuestas de climatización pasiva. Primero se simuló la habitación sin ningún medio de climatización, es decir se consideró como cubierta superior un techo de concreto, posteriormente se simuló la misma habitación con una capa de impermeabilizante. Adicionalmente se analizó numéricamente la habitación con techo verde, ver Fig. 6.1. Los resultados se presentan en términos de los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura, perfiles de velocidad, coeficientes de transferencia de calor, número de Nusselt, generación de entropía promedio y número de Bejan. Con el análisis de estos parámetros es posible caracterizar la transferencia de calor, la ventilación y la configuración óptima con el mínimo consumo de energía que garantizan el confort térmico.

6.1 Simulaciones de la habitación con techo de concreto con ventana de ventilación completamente abierta.

Se simularon 3 escenarios para comparar la transferencia de calor en la habitación para las 08:00 h, 13:30 h y 18:00 h. Para 08:00 h (Fig. 6.2) se muestra una temperatura máxima de 35.703 °C, al ser un escenario matutino la temperatura interior de la habitación se mantiene en promedio fresco mostrando un incremento paulatino de la temperatura. En las Fig. 6.3, 6.5. y 6.7 se visualizan los diferentes vórtices generados en el interior de la habitación para las 08:00 h, 13:30 h y 18:00 h a través de líneas de corriente derivadas del ingreso de aire a una velocidad determinada. Estas líneas de corriente representan de manera general como se mueve el flujo de fluido en el interior de la cavidad notándose una clara tendencia del fluido de ir a hacia la izquierda debido a la influencia del fluido de entrada en la puerta y a la posición de la ventana de salida. Para 13:30 h (Fig. 6.4) se muestra una temperatura máxima de 58.61 °C, al ser un escenario vespertino esta es la máxima temperatura superficial del techo presentada en el estudio, la temperatura interior de la habitación para este punto del día se ha incrementado. Para 18:00 h (Fig. 6.6) se muestra una temperatura máxima de superficie de 34.865 °C, al ser un escenario vespertino más cercano a un horario nocturno la temperatura interior de la habitación ha logrado una disminución respecto a las 13:30 h mostrando una cercanía en cuanto a temperatura máxima se refiere con el horario de las 08:00 h.

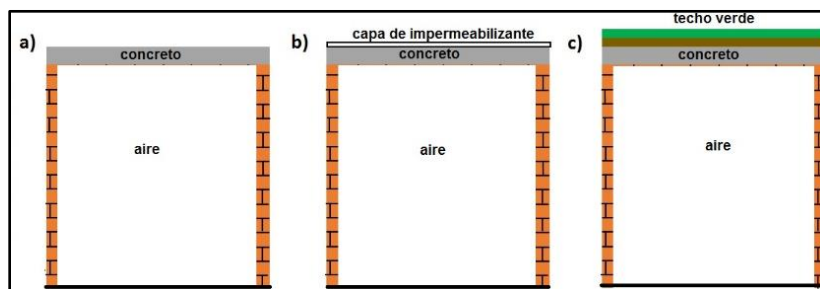


Figura 6.1. Representación transversal de los escenarios propuestos y simulados tridimensionalmente (a) Habitación tradicional con techo de concreto; (b) Habitación con capa impermeabilizante; (c) Habitación con techo verde.

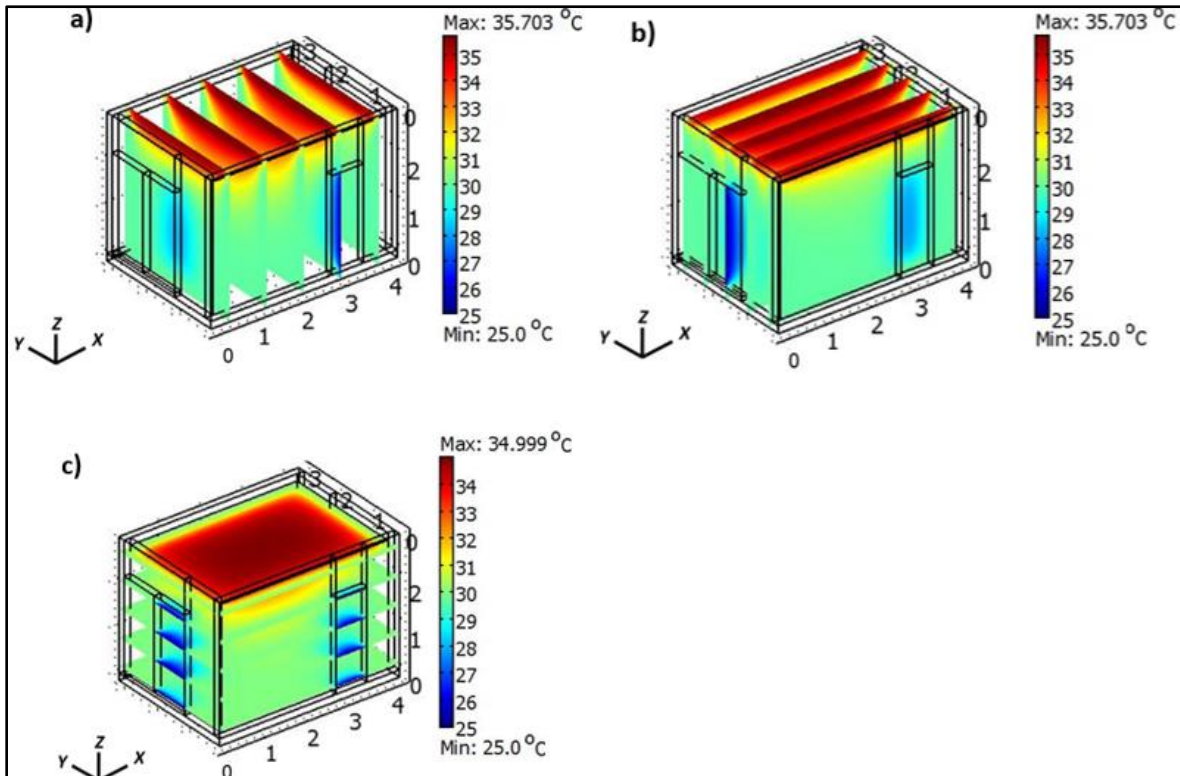


Figura 6.2 Campos de temperatura en tres diferentes planos de la habitación con techo de concreto para las 8:00 h y ventana abierta. a) Plano yz. b) Plano xz. c) Plano xy.

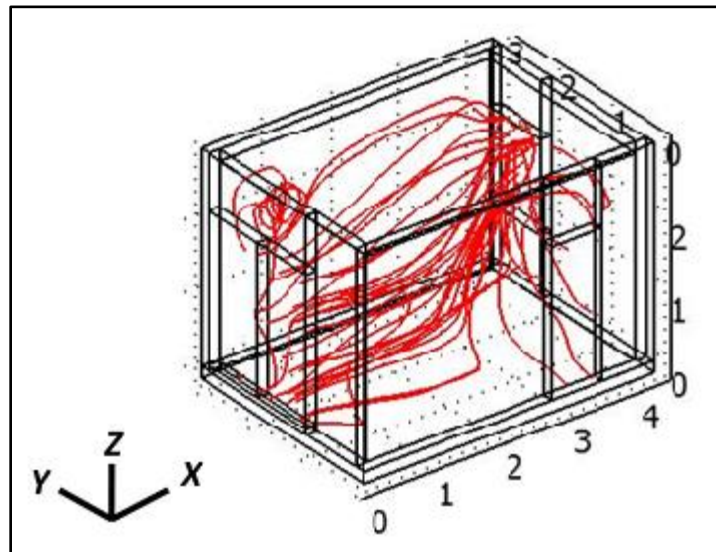


Figura 6.3 Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 8:00 h y ventana abierta.

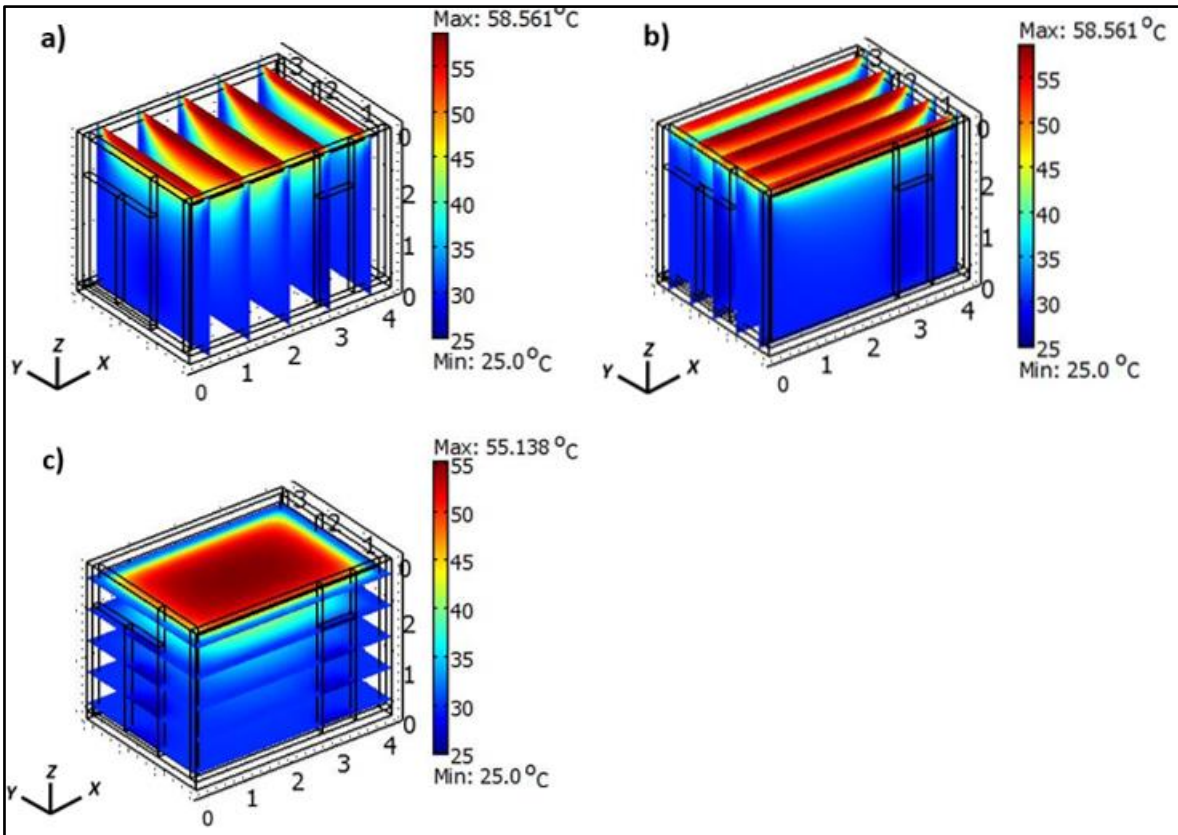


Figura 6.4 Campos de temperatura en tres diferentes planos de la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta. a) Plano yz. b) Plano xz. c) Plano xy.

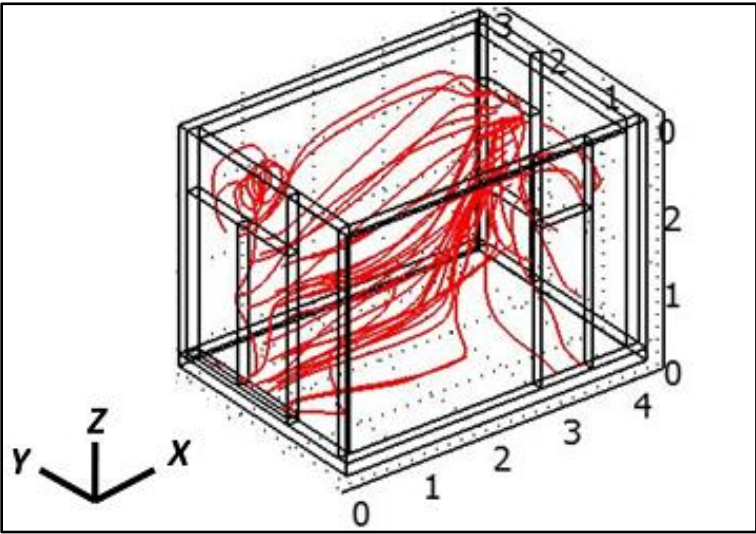


Figura 6.5 Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta

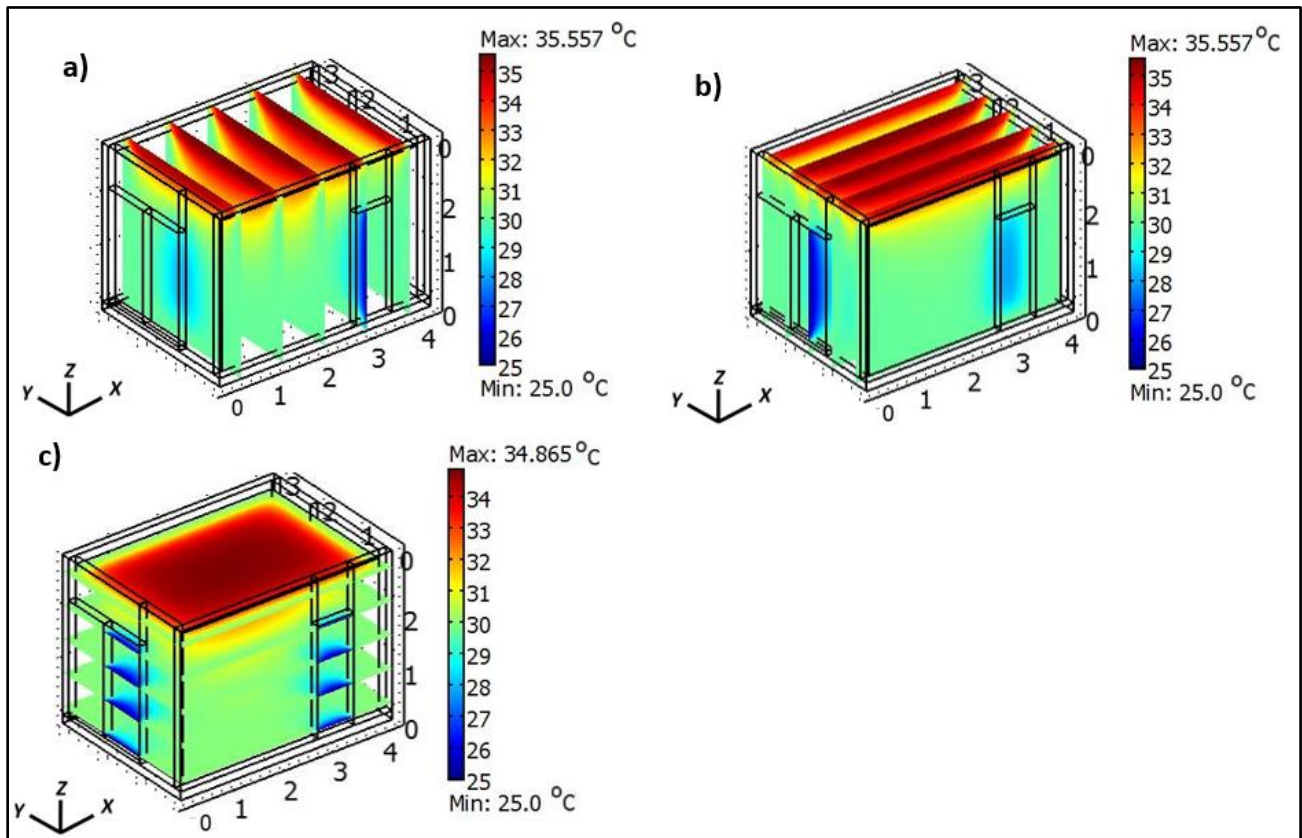


Figura 6.6 Campos de temperatura en tres diferentes planos de la habitación con techo de concreto para las 18:00 h y ventana abierta. a) Plano yz. b) Plano xz. c) Plano xy.

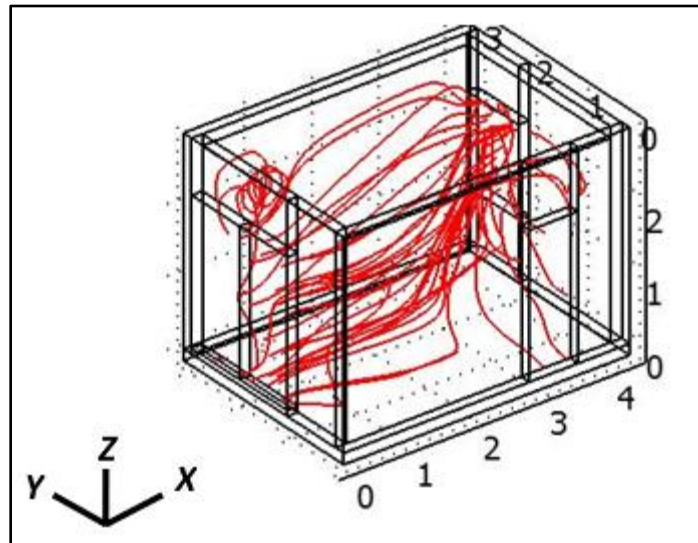


Figura 6.7 Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 18:00 h y ventana abierta.

Para caracterizar con mayor precisión el comportamiento de la temperatura en el interior de la habitación, en la Fig. 6.8 se muestran los perfiles de temperatura en la habitación con techo de concreto para la configuración con ventana abierta a las 13:30 h. La Fig. 6.8 (a) es el perfil de temperatura para la línea paralela al eje "x" trazada de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$. La Fig. 6.7 (b) es el perfil de temperatura para la línea paralela al eje "x" trazada de $(x_1=0, y_1=2.5, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=2.5, z_2=1.5)$. La Fig. 6.8 (a) muestra una temperatura baja de $25.0\text{ }^\circ\text{C}$, la cual corresponde al aire que está entrando en la ventana corrediza, a medida que el aire se mueve hacia el interior de la habitación, este se calienta hasta alcanzar $336.747783\text{ }^\circ\text{C}$ en el centro de la habitación $x=2.055\text{ m}$. Posteriormente la temperatura desciende conforme se aproxima a la pared hasta alcanzar una temperatura de $30.760122\text{ }^\circ\text{C}$. La Fig. 6.8 (b) muestra una temperatura del aire de $30.0\text{ }^\circ\text{C}$ correspondiente a la temperatura de la pared lateral del lado del ventanal, conforme el aire se mueve hacia el interior de la habitación, este se calienta hasta alcanzar $33.649731\text{ }^\circ\text{C}$ en el centro de la habitación $x=2.055\text{ m}$. Posteriormente la temperatura desciende conforme se aproxima a la ventana de salida hasta alcanzar una temperatura de $31.164618\text{ }^\circ\text{C}$.

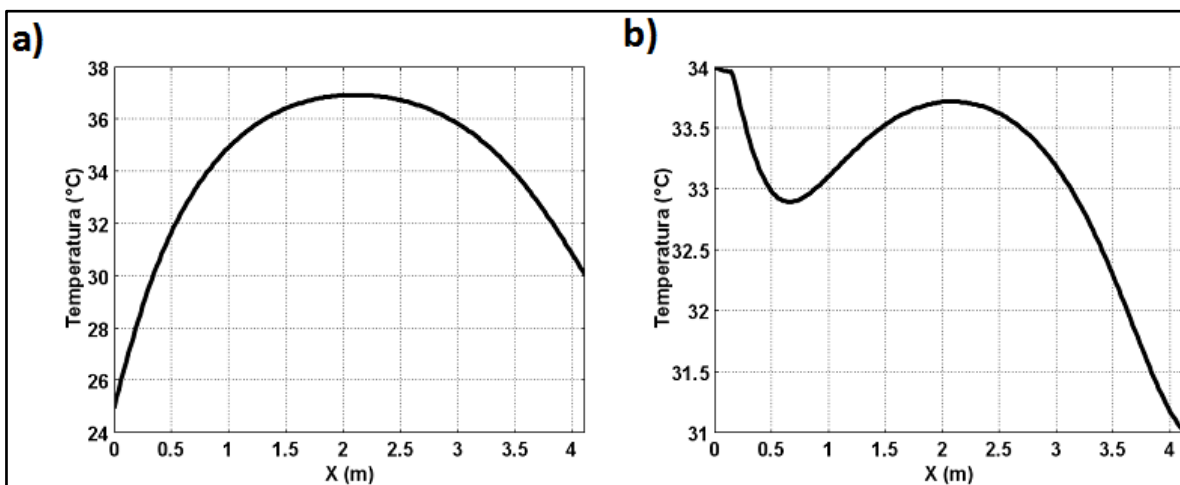


Figura 6.8 Perfiles de temperatura a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta. a) Línea de $(X=0, y=1.4, z=1.5)$ a $(x=4.11, y=1.4, z=1.5)$ b) Línea de $(X=0, y=2.5, z=1.5)$ a $(x=4.11, y=2.5, z=1.5)$.

Otro parámetro importante que impacta en el confort de una habitación es la velocidad del aire. Los perfiles de velocidad en la habitación con techo de concreto para la configuración con ventana abierta a las 13:30 h se muestran en la Fig. 6.9. La Fig. 6.9 (a) es el perfil de velocidad para la línea paralela al eje "x" trazada de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$. La Fig. 4.9 (b) es el perfil de velocidad para la línea paralela al eje "x" trazada de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$ En la Fig. 6.9 (a) se puede observar que el aire entra a 0.75 m/s , alcanza un primer máximo local y posteriormente se reduce la velocidad del aire hasta alcanzar un mínimo local de 0.3967681 m/s en $x= 2.5816584\text{ m}$, después

el aire incrementa su velocidad hasta alcanzar un segundo valor máximo local debido al efecto de la segunda entrada de aire y posteriormente el aire disminuye su velocidad hasta un valor de cero en la pared. En la Fig. 6.9 (b) se observa que la velocidad del aire es cero inicialmente debido a la pared, posteriormente se incrementa hasta alcanzar la ventana de salida de aire. El incremento de la velocidad del aire se vuelve significativo a partir de 2.75 m debido al efecto de la entrada de aire a través de la puerta.

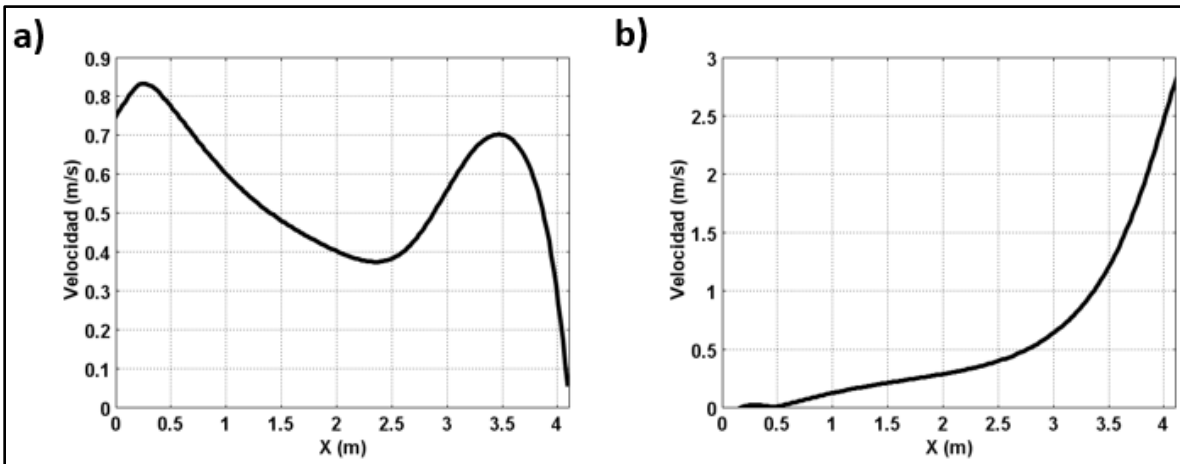


Figura 6.9 Perfiles de velocidad a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta. a) Línea de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$ b) Línea de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5)$.

En la Fig. 6.10 se comparan los perfiles de temperatura para cinco diferentes horas del día en una línea con dirección paralela al eje "x". La línea se traza de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_3=2.5)$ en el interior de la habitación de techo de concreto con el ventanal completamente abierto. En general se puede observar que la temperatura tiende a incrementarse hacia el interior de la habitación, en $x=0$ m la temperatura es de $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y corresponde a la temperatura con la que entra el aire, mientras que en $x=4$ m la temperatura es de $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y corresponde a la temperatura de la pared en el lado de la ventana de salida de aire, esto se observa para todos los casos debido a las condiciones de frontera impuestas. Inicialmente a las 06 horas de la mañana la temperatura en el interior de la habitación es la más baja, debido a que el techo no se ha calentado mucho, presentándose una temperatura promedio muy uniforme de $29.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el interior, posteriormente a las 08:00 h la temperatura se incrementa hasta alcanzar los $31.201884\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro. A las 13:30 horas del día se alcanza la máxima temperatura de $36.747783\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro de la habitación debido a que es el momento en el que el techo alcanza la máxima temperatura debido a la radiación solar. Para las 18:00 h, la temperatura se reduce a $31.157996\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro debido a que los rayos del sol ya no son tan intensos y el techo comienza a reducir su temperatura. En la Fig. 6.10 se compara los diferentes perfiles de temperaturas máximas para todos los horarios dentro de la habitación en dirección del eje "x". La línea se trazó de las coordenadas

($x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5$) a la ($x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5$). Los perfiles muestran que la temperatura máxima se concentra en el centro de la habitación.

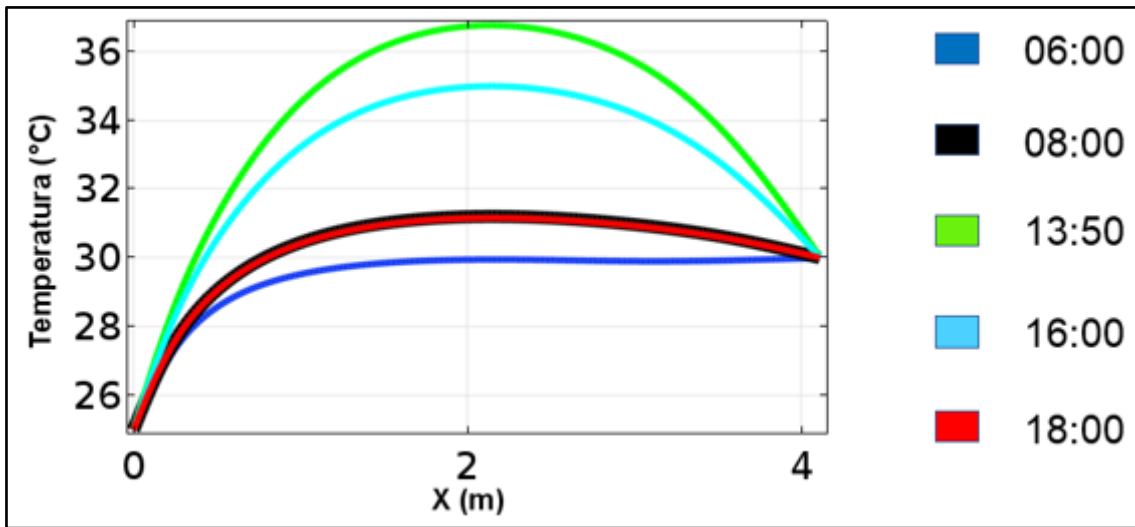


Figura 6.10 Perfil de temperatura en dirección del eje "x" de ($x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5$) a ($x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5$) para cinco diferentes horas del día. Habitación con techo de concreto y ventana abierta.

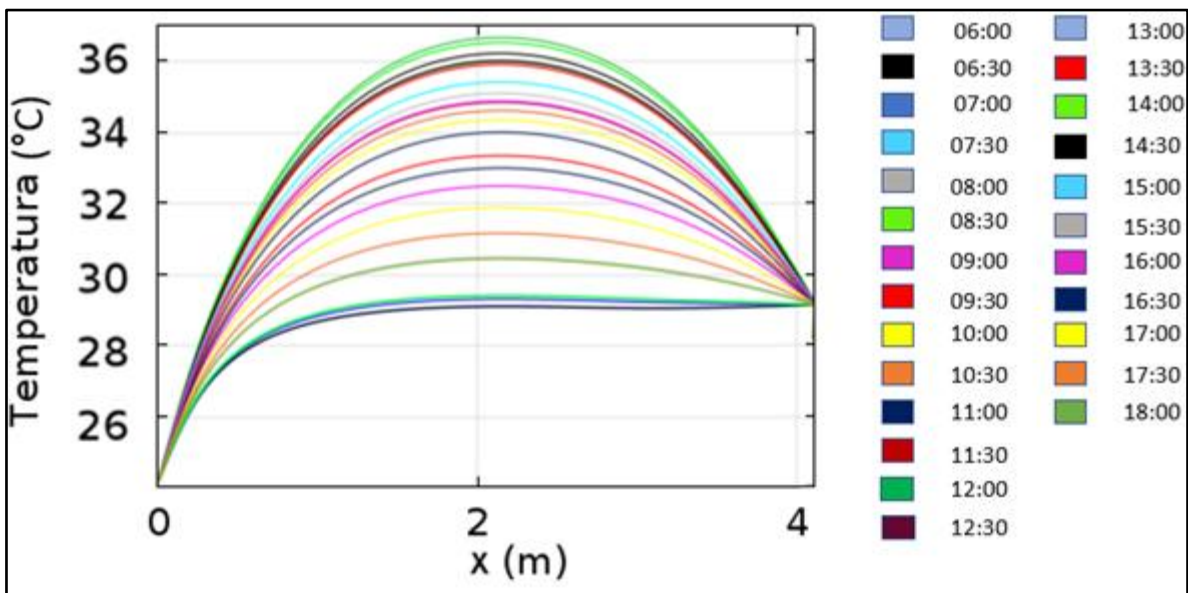


Figura 6.11 Perfil de temperatura en dirección del eje "x" de ($x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5$) a ($x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5$) para todas las horas del día. Habitación con techo de concreto y ventana abierta.

El comportamiento de la temperatura para el caso de la habitación con la ventana abierta completamente se muestra en la Fig. 6.12 para las 6:00, 7:00 y 8:00 h de la mañana. Para las 6:00 h (ver Figura 6.12 (a)) se puede observar una temperatura

en el techo de 30.556 °C, para las 7:00 h (ver Figura 6.12 (b)) la situación es muy similar observándose una temperatura de 30.715 °C, para las 8:00 h (ver Fig. 6.12 (c)) la temperatura comienza a incrementarse significativamente alcanzando 35.703 °C en la superficie exterior del techo de concreto. Los resultados indican un incremento de 0.159 °C en la temperatura exterior del techo entre las 6:00 h y las 7:00 h. Por otra parte, entre las 6:00 h y las 8:00 h se observó un incremento de 5.147 °C.

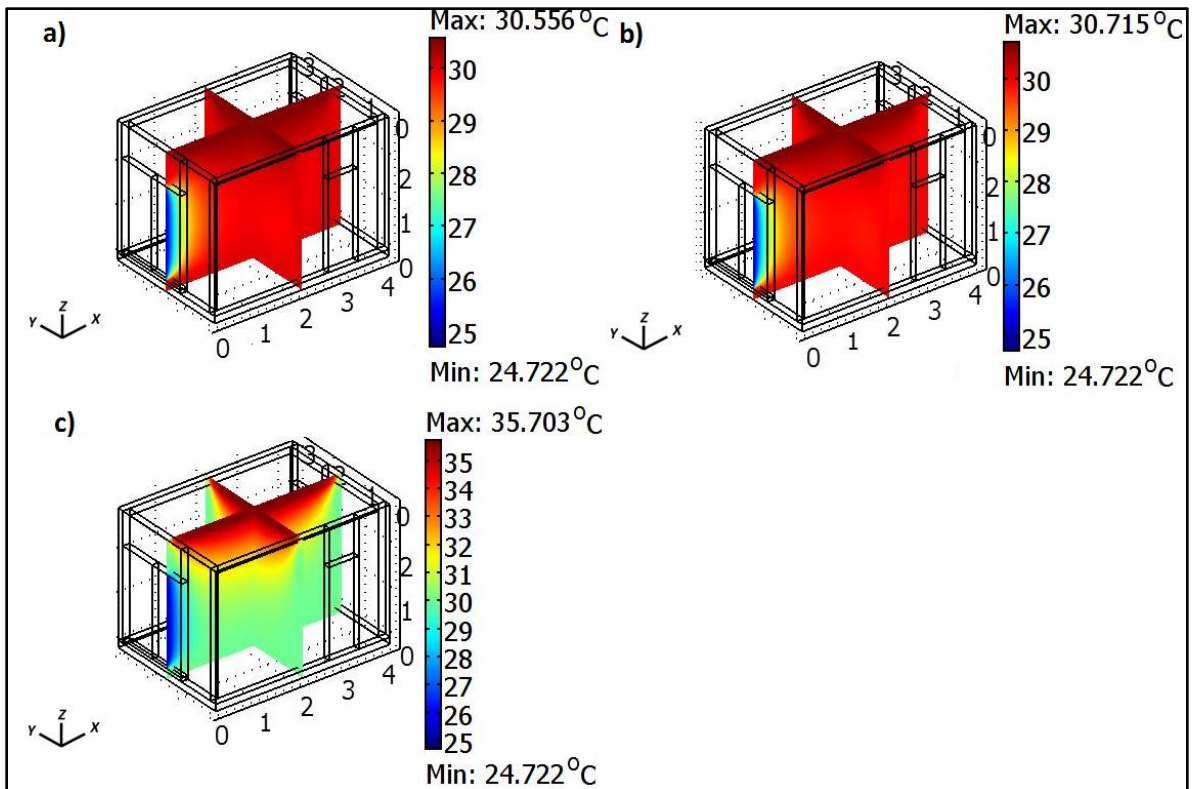


Figura 6.12. Campos de temperatura para los plano “xz” y “yz” de la habitación con techo de concreto y la ventana abierta. Para las (a) 6:00 h; (b) 7:00 h; (c) 8:00 h.

La caracterización del comportamiento de la temperatura para el caso de la habitación con la ventana completamente abierta se presenta en la Fig. 6.13 para las 16:00, 17:00 h y 18:00 h, mostrándose una disminución de la temperatura en el techo conforme se acerca a las 18:00 h. Para las 16:00 h se muestra una temperatura exterior sobre el techo de concreto de 51.307°C (ver Fig. 4.13 (a)), a las 17:00 h la temperatura máxima en el techo es notoriamente menor resultando una diferencia de 10.829 °C (ver Fig. 4.13 (b)), a las 18:00 h (ver Fig. 4.13(c)) la temperatura es menor en el interior y en el techo respecto de las 17:00 horas con una diferencia de 4.921°C.

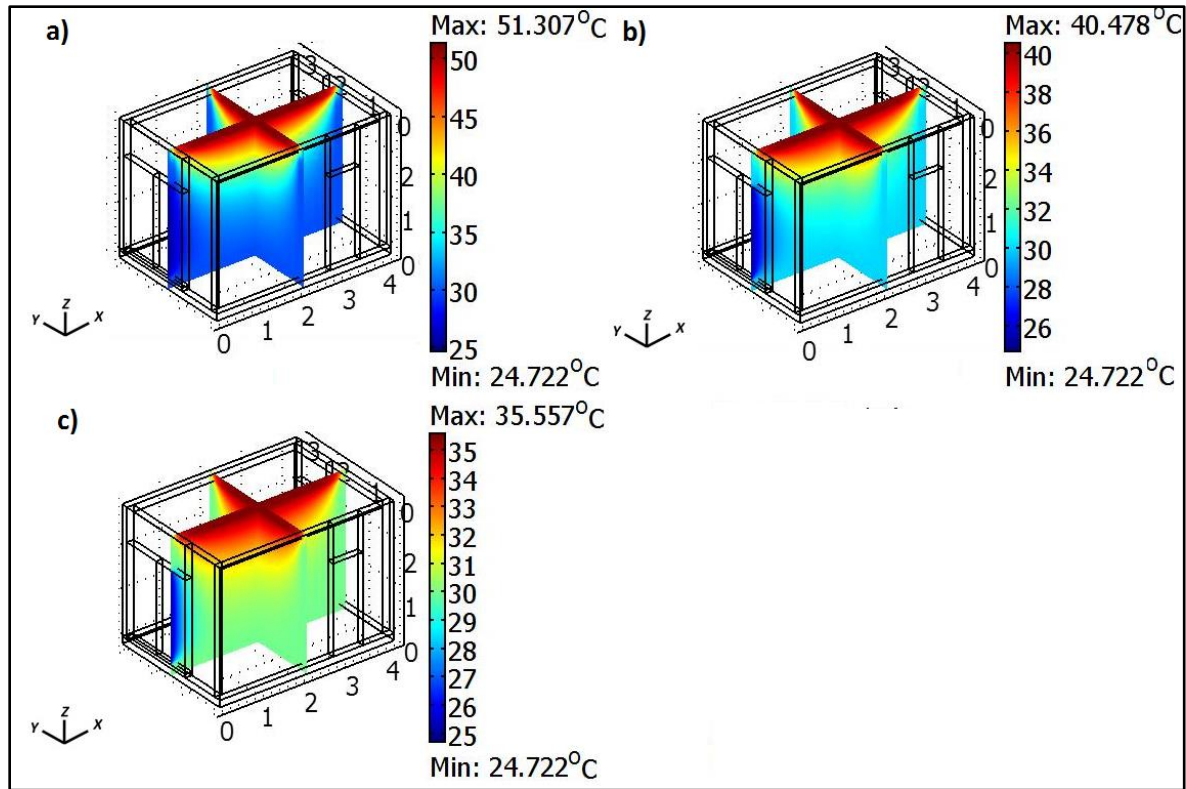


Figura 6.13. Campos de temperatura para los plano “xz” y ”yz” de la habitación con techo de concreto y la ventana abierta. Para las (a) 16:00 h; (b) 17:00 h; (c) 18:00 h.

6.1.2 Vórtices de la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta.

En la Fig. 6.14 se muestran los vórtices que se generan al entrar el aire por la ventana y la puerta, la simulación presenta vórtices asimétricos con diferentes magnitudes generados en la parte superior de la habitación, alrededor de la ventana y en la parte superior de la puerta de la habitación. La recirculación del aire genera gradientes de temperatura dentro de la habitación debido a los cambios de velocidad. En la Fig. 6.14 se observa un incremento en la velocidad de las líneas de corriente cuando estas se acercan hacia la ventana de salida, además se observó que las líneas de corriente se mueven hacia la izquierda de la habitación debido a que una de las entradas de aire es perpendicular a la entrada de aire de la ventana corrediza y a la salida.

En la Fig. 6.14 se compara las 3 diferentes casos de apertura de la ventana móvil para las 13:30 horas en una línea con dirección paralela al eje “x”. La línea se trazó de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5)$ en el interior de la habitación.

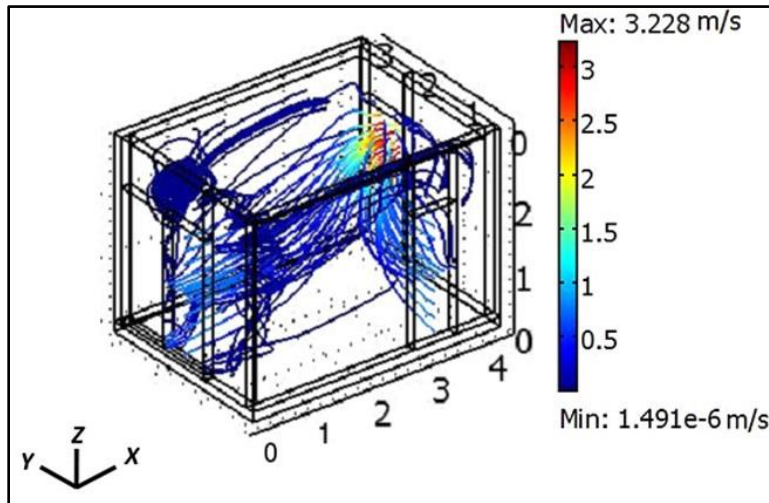


Figura 6.14. Vórtices de la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y ventana abierta.

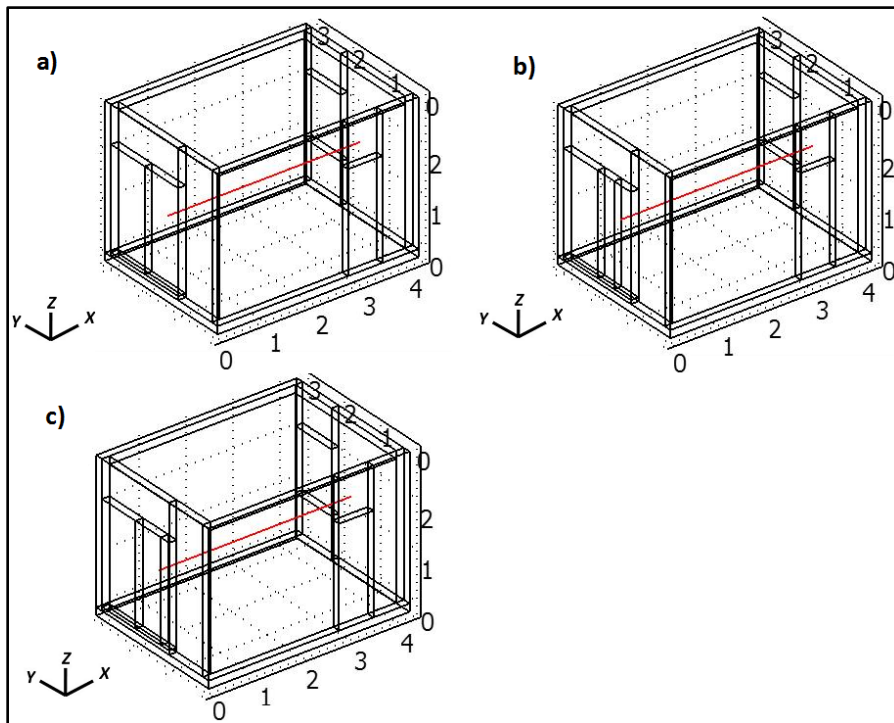


Figura 6.15. Líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x" con diferentes aperturas de las ventanas. Habitación con techo de concreto para las 13:30 h ventana abierta, ventana abierta $\frac{1}{2}$ y ventana abierta $\frac{1}{4}$. a) Línea de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$.

En la Fig. 6.16 se compara los perfiles de temperatura para 3 diferentes casos de apertura de la ventana móvil para las 13:30 h en una línea con dirección paralela al eje "x". La línea se trazó de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=2.5)$ en el interior de la habitación, observándose que la temperatura es menor cerca de la ventana móvil cuando la ventana está completamente abierta. En la mitad de la habitación en $x=2$ m las temperaturas máximas son equiparables para todos los

casos.

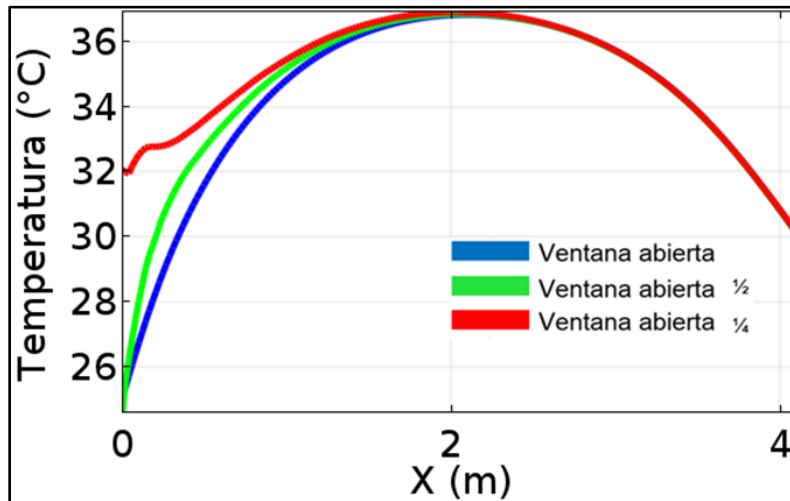


Figura 6.16. Perfiles de temperatura a lo largo de una línea trazada en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 h ventana abierta, ventana abierta $\frac{1}{2}$ y ventana abierta $\frac{1}{4}$. Línea de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$.

En la Fig. 6.17 se comparan los perfiles de velocidad para 3 diferentes casos de apertura de la ventana móvil para las 13:30 horas en una línea paralela al eje "x" con las coordenadas de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$ en el interior de la habitación, en la cual se puede observar que la velocidad es mayor con la ventana abierta completamente. En los primeros dos metros de la habitación la ventana disminuye la velocidad un 50% pasando de 0.8 m/s a 0.4 m/s después hay un incremento de 0.30 m/s en la parte posterior de la habitación debido a la entrada de aire perpendicular al eje "x" a través de la puerta, el cual ingresa a una velocidad de 0.75 m/s acelerando el fluido hasta 0.70 m/s. Finalmente en la pared la velocidad se hace cero.

Para el caso de la ventana abierta $\frac{1}{2}$ este se comporta de forma similar al anterior, pero presenta una caída en la velocidad importante al ingresar a la habitación generándose altos gradientes de velocidad. Posteriormente el aire incrementa su velocidad a los 2.61 m que es donde empieza la puerta cuyo aire de entrada empuja el fluido hacia la izquierda, el cual sale por la ventana trasera de menor tamaño.

El caso de la ventana abierta $\frac{1}{4}$ el fluido se comporta de manera diferente ya que la línea paralela trazada con las coordenadas mencionadas no pasa por la apertura de la ventana, sino que la línea trazada corresponde a la parte cerrada de la ventana, por lo tanto, en ese punto la velocidad inicial es cero. En los primeros 0.5 m se observa un incremento abrupto de la velocidad alcanzando una velocidad máxima local de 0.26 m/s en 0.371 m. Posteriormente se observa un ligero descenso, finalmente se alcanza una segunda velocidad máxima local de 0.49 m/s en 3.366 m, como ocurre con los casos anteriores.

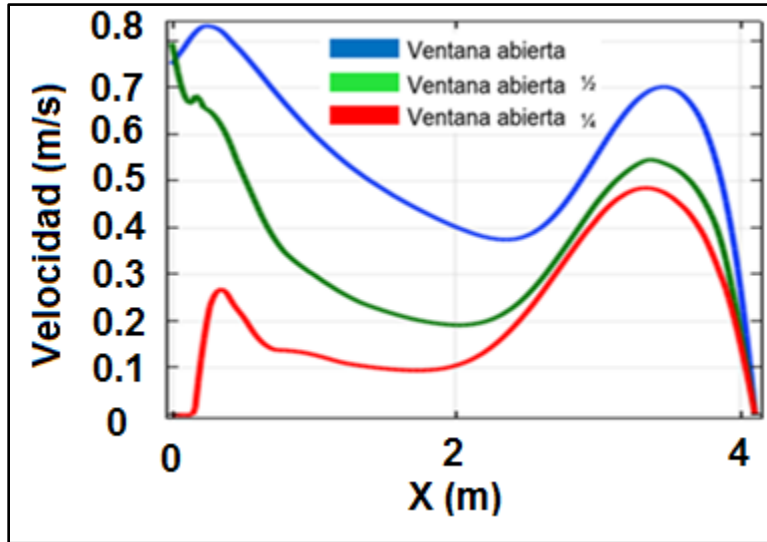


Figura 6.17. Perfiles de velocidad a lo largo de una línea trazada en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:30 h ventana abierta, ventana abierta $\frac{1}{2}$ y ventana abierta $\frac{1}{4}$. Línea de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$.

En la Tabla 6.1 se presentan diferentes coeficientes de transferencia de calor obtenidos conforme a las simulaciones numéricas realizadas para lo largo del día desde las 6:00 h hasta las 18:00 h. Estos coeficientes corresponden a la habitación con techo de concreto. El mínimo valor $h= 4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ se obtuvo para las 17:30 h siendo igual a $h= 39 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y el máximo valor se obtuvo para las 7:00 h.

TABLA 6.1 Comparativa de coeficientes de transferencia de calor por convección a diferentes horas del día.

| hora | $h(\text{w/m}^2\text{K})$ |
|-------|---------------------------|
| 6.00 | 16 |
| 7:00 | 39 |
| 8.00 | 27 |
| 9:00 | 34 |
| 10:00 | 30 |
| 13.30 | 24 |
| 15:00 | 22 |
| 16.00 | 19 |
| 17:30 | 4 |
| 18.00 | 10 |

6.1.3 Números de Nusselt (Nu), Entropía (S) y Bejan (Be)

En la Fig. 6.18 se muestran los números de Nusselt, número de Bejan y los diferentes valores del número de entropía para todas las horas del día. La figura 6.17(a) muestra la evolución temporal del Nusselt global durante las primeras horas

de la mañana siendo para las 6:00 h de 1330.1511, al atardecer (16:00 h) el número de Nusselt es igual a 1579.5544, presentándose el máximo valor a las 7:00 h. La entropía (ver Fig 6.17(b)) presenta un aumento paulatino conforme pasan las horas del día siendo el valor máximo de 22.5606 coincidiendo con la hora en la cual se presenta la temperatura máxima de la superficie del techo de concreto. El número de Bejan (ver Fig. 6.17(c)) es mayor entre las 13:00 h y las 14:00 h con un valor de 0.2537 para las 13:00 h y 0.2467 para las 14:00 h, tomando en cuenta esto el valor máximo de Bejan coincide nuevamente como en el caso anterior para las 13:30 h cuyo valor es de 0.2565.

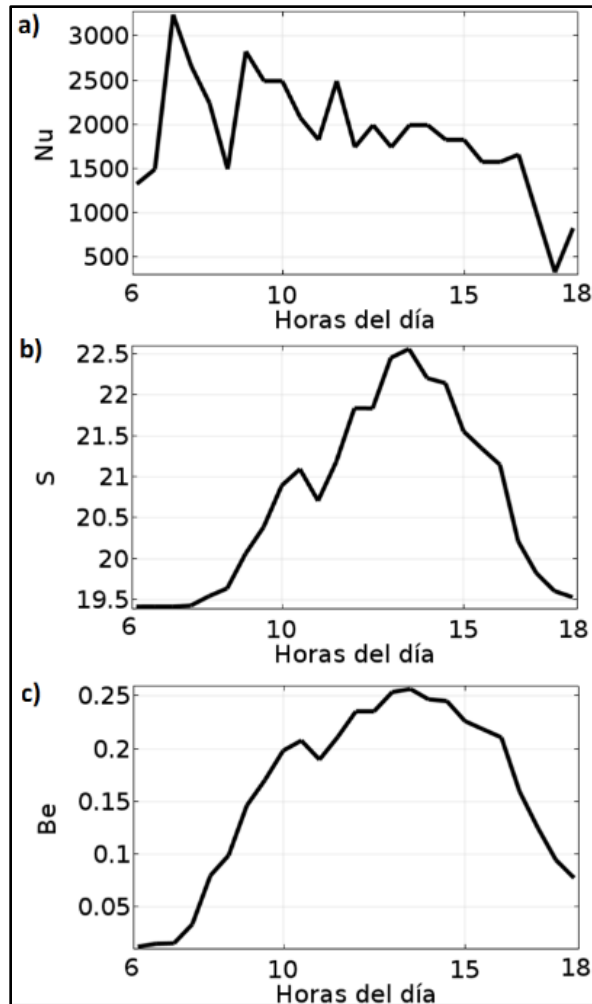


Figura 6.18 (a) Numero de Nusselt; (b) Numero de entropía; (c) Número de Bejan, desde las 6 hasta las 18:00 horas.

En la Tabla 6.2 se muestran los números de entropía y Bejan para las configuraciones de la habitación con el ventanal completamente abierto, abierto a $\frac{1}{2}$ y abierto a $\frac{1}{4}$ para 13:30 h observándose que el número de Bejan es menor que 0.5 por lo tanto las irreversibilidades por fricción son las que dominan en el interior de la habitación. El número de entropía se maximiza cuando la ventana está completamente abierta y se minimiza cuando está abierta a $\frac{1}{4}$, es decir con el ventanal completamente abierto el flujo de aire es más intenso y por lo tanto

aumenta las irreversibilidades por fricción.

TABLA 6.2 Números de entropía y Bejan para tres diferentes configuraciones de la apertura del ventanal para las 13:30 horas.

| Apertura de la ventana | S | Be |
|------------------------|-------|------|
| Completamente abierta | 22.56 | 0.25 |
| Abierta 1/2 | 11.66 | 0.34 |
| Abierta 1/4 | 8.98 | 0.43 |

6.2 Capa Impermeabilizante

Por otra parte, en esta tesis se realizó el análisis de carga térmica de la habitación con techo de concreto y paredes de ladrillo simulada anteriormente añadiéndose una capa impermeabilizante al techo de concreto, en la Fig. 6.19 se señala el espesor (E) de 0.001488 m. La malla para la capa a prueba de agua se tomó de tipo corrida debido a su espesor.

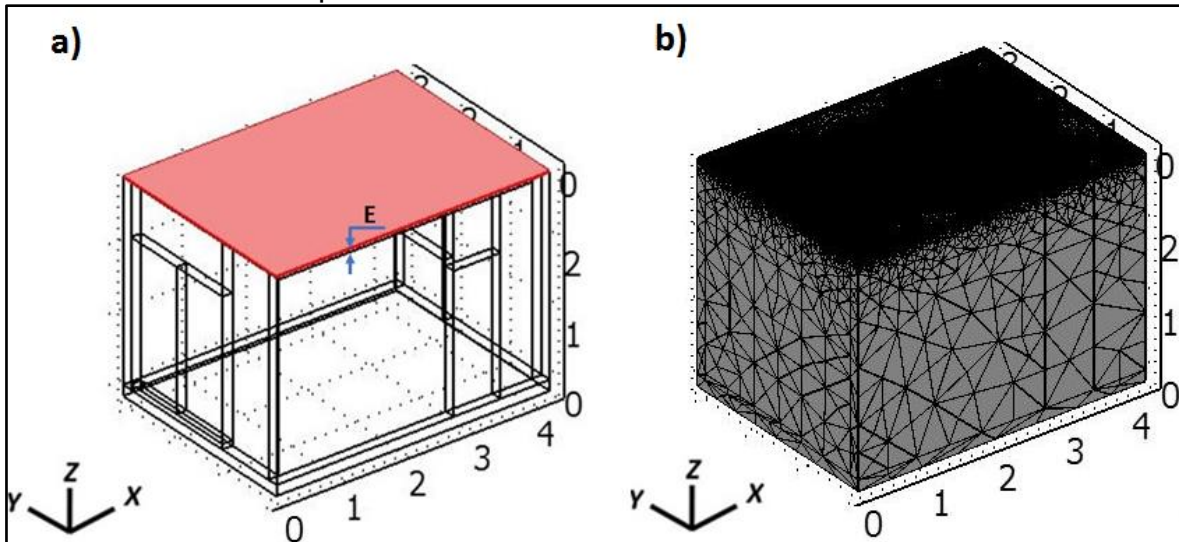


Figura 6.19 Detalles de la vivienda simulada. a) Espesor de capa a prueba de agua. b) Malla de la habitación de tipo corrida.

6.2.1 Condiciones de frontera

El caso con impermeabilizante se simuló tomando en cuenta los datos de temperatura y radiación para las 13:30 horas, ver tabla 6.3.

Tabla 6.3. Tabla de datos experimentales tomados como condiciones de frontera para el caso con impermeabilizante.

| hora | Tamb (°C) | Ts-C (°C) | Tb-C (°C) | Ti-C (°C) | Tp-ext (°C) | Tp-int (°C) | Rad Solar (W/m ²) |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------------------------|
| 13:30 | 41.965 | 58.798 | 51.853 | 46.478 | 41.099 | 27.387 | 877.815 |

Como condición de temperatura se impone la radiación solar en el techo de concreto de la vivienda con una capa de impermeabilizante para las 13:30 h, se considera el piso adiabático y se imponen las velocidades de entrada de aire en la ventana lateral y en la puerta con un valor de 0.75 m/s. En la ventana lateral opuesta a la entrada 1, se impone una condición de salida abierta a la atmosfera.

6.2.2 Propiedades físicas de los materiales impermeabilizantes

Para este caso de estudio se tomaron propiedades reales del impermeabilizante (Tabla 4.4) basados en productos comerciales de tipo acrílico de la marca “COMEX” y de la marca “PGP” (ver Fig. 6.20).

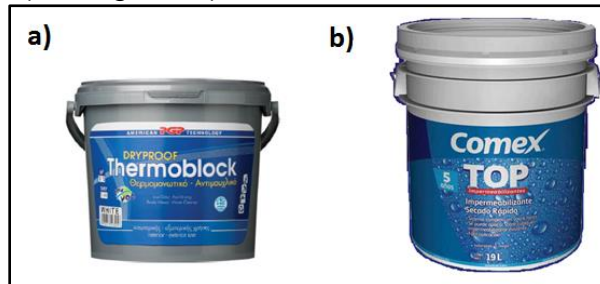


Figura 6.20 Impermeabilizantes comerciales a) Pintura a prueba de agua acrílica marca PGP, b) Pintura a prueba de agua acrílica marca COMEX.

6.2.3 Resultado de simulación para el caso con impermeabilizante

La temperatura máxima fue de 57.302 °C (Fig. 6.21), mostrando una diferencia de temperatura de 1.521°C menor respecto a un techo sin capa de pintura impermeable coincidiendo con los resultados de De Masi et al. (2018) [22] que indicaron que “Durante las horas de sol, la temperatura del techo pintado con pintura acrílica impermeabilizante presenta una disminución de 1–2 °C”. En el interior de la habitación se puede observar que la temperatura interior es cercana a los 55 °C en la parte interna del techo concentrándose mayormente en el centro de la habitación donde el flujo de aire no incide directamente como en el caso del primer metro de la habitación justo después de la ventana.

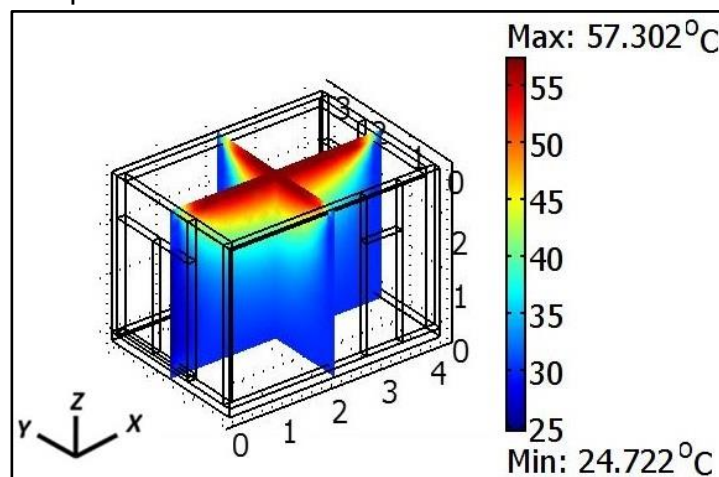


Figura 6.21 Campos de temperatura en el plano “xz”, “yz” de la habitación con techo de concreto y capa impermeabilizante la ventana abierta. Para las 13:30 horas.

Para las 13:30 h se trazó una línea con dirección paralela al eje “z” (Fig. 6.22) del punto $(x_1=1.4, y_1=1.4, z_1=0)$ al punto $(x_2= 1.4, y_2=1.4, z_2=2.70)$. En la Fig. 6.23 se compararon los perfiles de temperatura para el caso de recubrimiento en el techo y para el techo sin recubrimiento. En el centro de la habitación y a 10 cm del techo se puede observar una diferencia de temperatura de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la habitación con capa de pintura a prueba de agua.

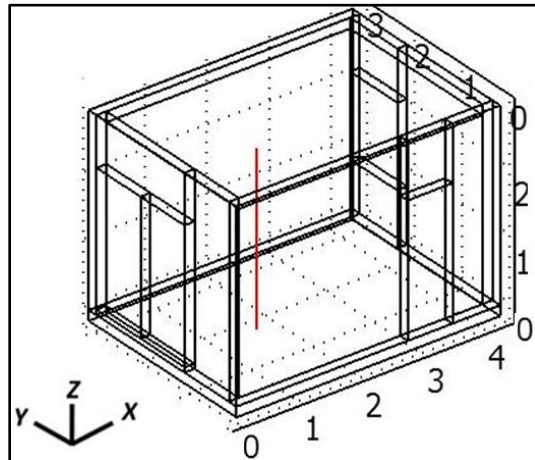


Figura 6.22 Línea de $(x_1= 1.4, y_1=1.4,z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4,z_2=2.70)$ en la habitación con techo de concreto y recubrimiento a prueba de agua.

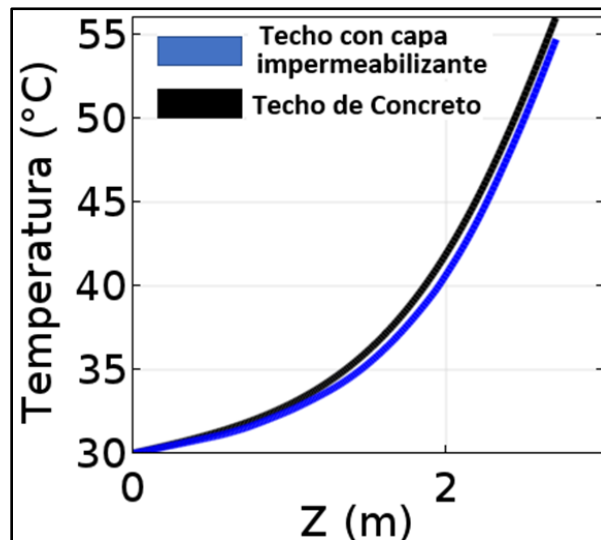


Figura 6.23 Perfiles de temperatura de la habitación con techo de concreto y capa impermeabilizante con la ventana abierta para las 13:30 horas. Línea de $(x_1= 1.4, y_1=1.4,z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4,z_2=2.70)$.

6.3 Capa Techo Verde

Los techos verdes son utilizados para generar la disminución de la temperatura en el interior de una habitación, existen diferentes configuraciones. La configuración estudiada es la presentada en la Fig. 6.24 por Quezada (2016) [23]. La cual representa un techo verde con una capa de sustrato y una capa verde de tipo extensiva.

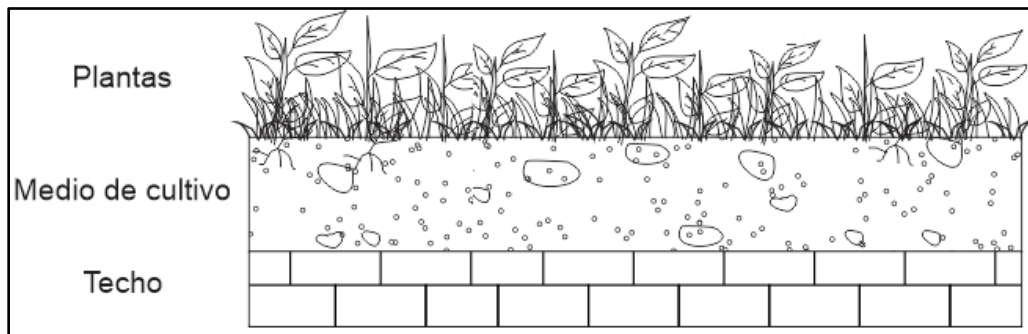


Figura 6.24 Techo verde de tipo extensivo presentada por Quezada (2016) [23].

Adicionalmente en esta tesis se realizó un análisis de carga térmica de la habitación con techo de concreto y paredes de ladrillo simulada anteriormente añadiéndose una capa de techo verde con impermeabilizante al techo de concreto, en la Fig. 6.25 se señala el espesor de la capa verde (E_v) de 0.10 m y la capa de sustrato (E_s) de espesor 0.10 m. La malla para la configuración de techo verde se tomó como malla corrida debido a su espesor.

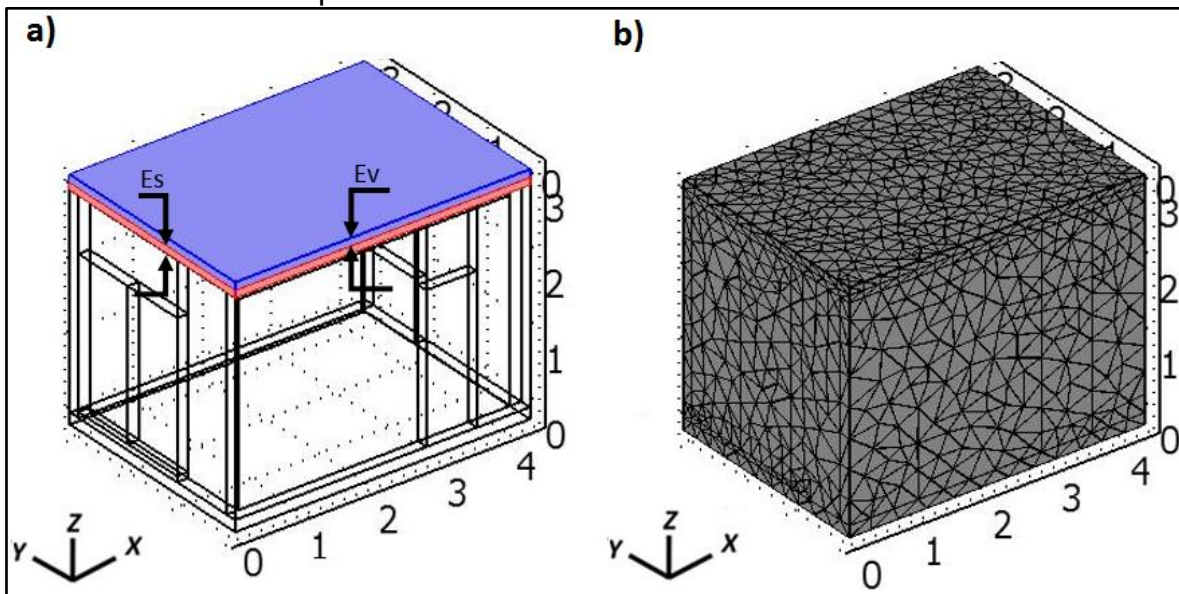


Figura 6.25 Detalles de la vivienda simulada. a) Configuración y espesores de capa sustrato y capa extensiva. b) Malla de la habitación de tipo corrida.

6.3.1 Condiciones de Frontera

Para poder comparar la simulación se tomaron en cuenta los datos usados para el caso del impermeabilizante, ver Tabla 6.3, el cual corresponde para las 13:30 h.

6.3.2 Propiedades de los materiales

Para el estudio de techo verde se tomaron propiedades (Tabla 6.4) de la capa extensiva de vegetación y de la capa de sustrato propuestas por Quezada (2016) [24] en su tesis doctoral Transporte de energía y escalamiento de sistemas de techos verdes.

Tabla 6.4 Propiedades de vegetación y sustrato.

| Parámetro | Valor | Descripción |
|--------------|------------------------|--|
| K_v | 0.5 [w/(m*k)] | Conductividad Térmica de la capa de vegetación |
| ρ_v | 582 kg/m ³ | Densidad de la capa de vegetación |
| C_{Pv} | 4800 [J/(Kg*k)] | Calor específico de la capa de vegetación |
| ϵ_v | 0.95 | Emisividad de la capa de vegetación |
| K_s | 0.98 [w/(m*k)] | Conductividad Térmica de la capa de sustrato |
| ρ_s | 1460 kg/m ³ | Densidad de la capa de sustrato |
| C_{Ps} | 880 [J/(Kg*k)] | Calor específico de la capa de sustrato |
| ϵ_s | 0.90 | Emisividad de la capa de sustrato |

6.3.3 Resultado de simulación

En la Fig. 6.26 se presentan los resultados de la simulación realizada, en la cual se muestra que el flujo de calor es retenido mayormente en la capa de sustrato presentando una temperatura más alta ya que el área de cobertura con respecto a la capa de sustrato de una capa extensiva suele variar, esto conlleva a una temperatura más fresca en el interior de la habitación. La simulación presentada fue realizada con condiciones de radiación solar de 877.815 W/m² para las 13:30 h, obteniéndose una temperatura máxima en la superficie de concreto del techo de 55.258 °C.

En la Fig. 6.27 se presenta una disminución de la temperatura superficial, con diferencia de temperatura de 3°C en la superficie de la capa verde extensiva y diferencia de 10°C en la capa de sustrato, coincidiendo con los resultados de Yeomans et al. (2013) [24], quienes establecieron que “La máxima disminución de la temperatura registrada fue de 10 °C, utilizando un techo verde tipo extensivo”.

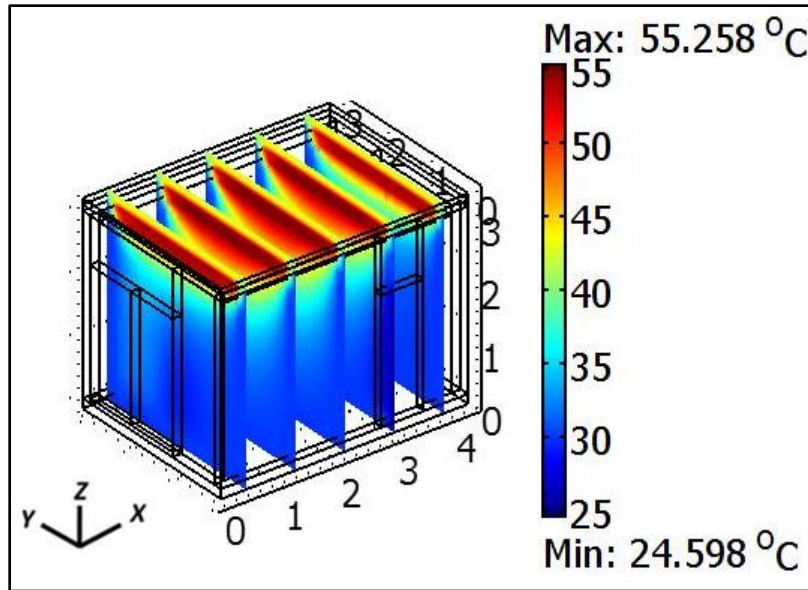


Figura 6.26 Campos de temperatura en el plano yz la habitación con techo de concreto para las 13:30 h y la ventana abierta y con capa verde.

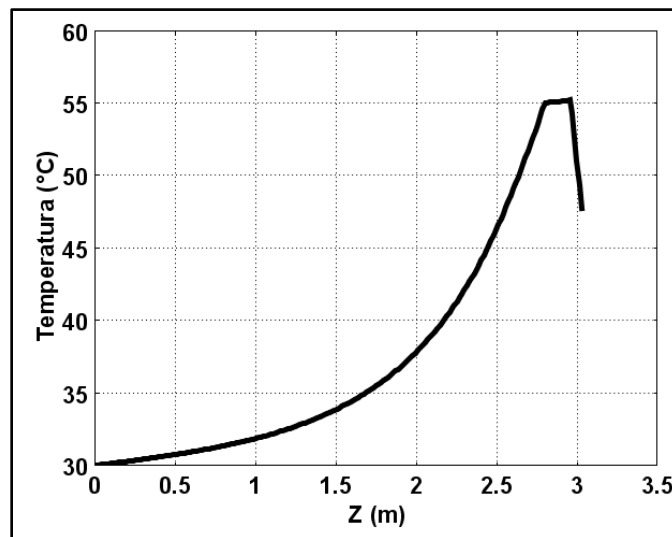


Figura 6.27 Perfiles de temperatura dentro de la habitación con techo de concreto y techo verde para las 13:30 h y la ventana abierta y con capa verde.

En la Fig. 6.28 se compararon los perfiles de temperatura para los 2 diferentes casos de techo para las 13:30 h. Se trazo una línea paralela con el eje z desde el punto $(x_1= 1.4, y_1=1.4,z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4,z_2=2.70)$ en el interior de la habitación. A una altura de 2.70 m del suelo se puede observar una diferencia de temperatura de 3°C de la habitación con techo verde respecto de la habitación con techo tradicional.

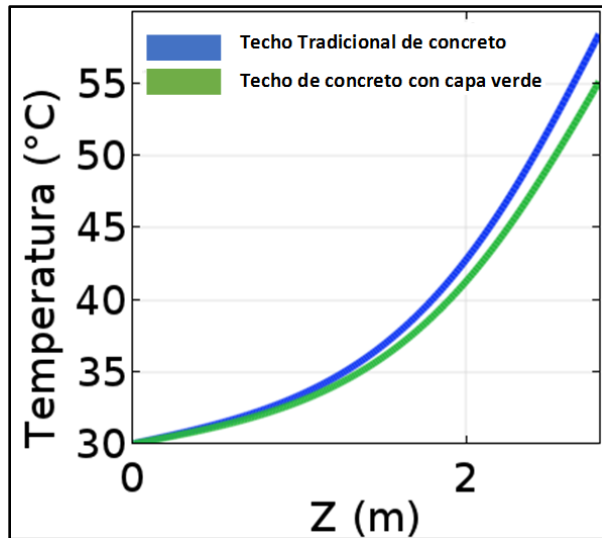


Figura 6.28 Perfiles de temperatura de la habitación con techo de concreto y capa de techo verde con la ventana abierta para las 13:30 h. Línea de $(x_1= 1.4, y_1=1.4,z_1=0)$ a $(x_2= 1.4, y_2=1.4,z_2=2.70)$.

Los resultados obtenidos de reducción de temperatura presentados pueden ser mejorados añadiendo más capas a la configuración del techo verde, un techo verde con mantenimiento preventivo resulta térmicamente más eficiente.

En la Fig. 6.29 se compararon los 3 casos presentados anteriormente (techo de concreto, techo verde, techo con pintura impermeable) para las 13:30 h, en donde se trazó una línea transversal con dirección paralela al eje "x" del punto $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ al punto $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$. Se muestran los diferentes perfiles de temperatura en los escenarios propuestos con la ventana completamente abierta, donde se puede observar que las técnicas de climatización pasiva analizadas funcionan.

La capa de techo verde e impermeable presentan comportamientos similares con respecto a la habitación con techo de concreto normal. En el centro de la habitación $(x=2.055 \text{ m})$ la diferencia de temperatura a una altura $z=1.5 \text{ m}$ entre el techo de concreto e impermeabilizante es de $0.765 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la diferencia de temperatura entre el techo de concreto y cubierta verde es de $0.83 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se presentan los resultados de las temperaturas interiores de los techos para los casos descritos anteriormente se presentan en la Fig. 6.30, mostrándose una temperatura interior más uniforme para el caso del techo con capa verde, pero con una temperatura máxima menor respecto a los otros casos. La capa de impermeabilizante al tener un mayor índice de reflectividad presenta un calentamiento mayor en la parte central del techo de la habitación. Para todos los casos la temperatura máxima se presenta en el centro de la habitación coincidiendo con los perfiles de temperatura sobre las líneas transversales analizadas.

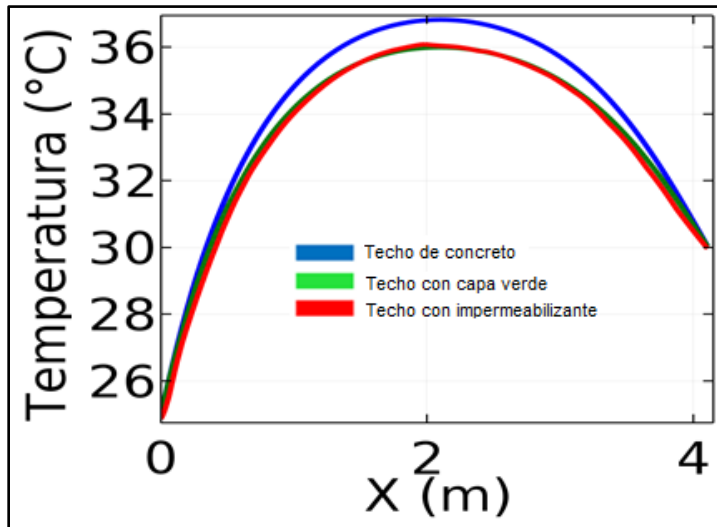


Figura 6.29 Perfiles de temperatura de la habitación con techo de concreto, techo de concreto con capa impermeabilizante, techo de concreto con capa de techo verde, con la ventana abierta para las 13:30 h. Línea de $(x_1=0, y_1=1.4, z_1=1.5)$ a $(x_2=4.11, y_2=1.4, z_2=1.5)$.

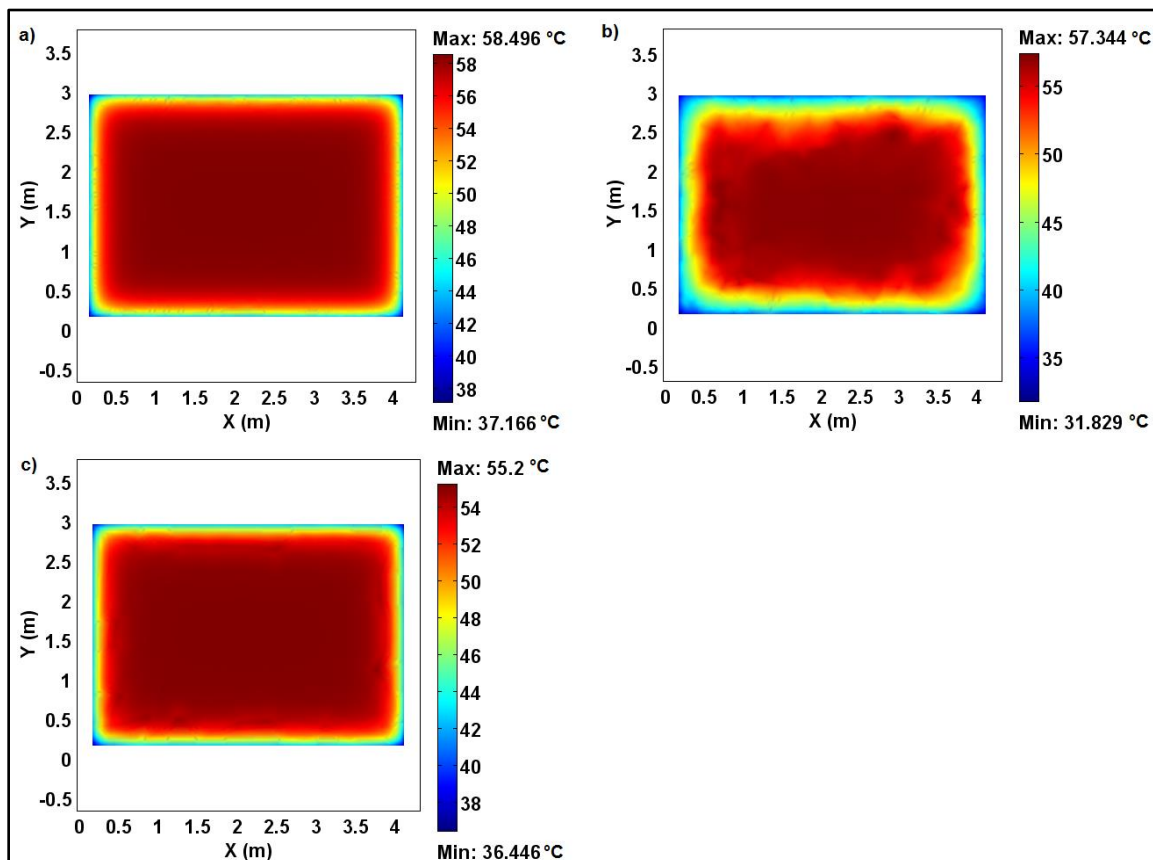


Figura 6.30 Vista interior de techo de concreto de la habitación, techo de concreto con capa impermeabilizante, techo de concreto con capa de techo verde, con la ventana abierta para las 13:30 horas. a) Cara interior del techo de concreto; b) Cara interior del techo de concreto con capa impermeable; c) Cara interior de techo de concreto con techo verde.

Conclusiones

Las simulaciones realizadas nos arrojan resultados en los que las temperaturas interiores de la habitación mostradas en las simulaciones, son determinadas por la temperatura ambiental. Se utilizó una configuración con un punto de salida (ventana) y dos puntos de entrada (ventana corrediza y puerta). En las simulaciones se varió la abertura de la ventana corrediza a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y completamente abierta. La velocidad del aire exterior se establece a 0.75 m/s. Con estos valores se encontraron los siguientes resultados en las 3 configuraciones:

- Se presentó una variación en promedio de 3 °C en las 3 configuraciones en la primera mitad de la habitación.
- En la segunda mitad tienen un comportamiento de temperatura igual hasta la salida.
- La temperatura mayor se presenta en la mitad de la habitación a 2.055 m de la ventana de ingreso de fluido.
- La velocidad está determinada por el porcentaje de la abertura de la ventana, presentándose una mayor velocidad de flujo de aire con la ventana completamente abierta resultando en una disminución de temperatura en comparación con los otros dos tipos de abertura.
- La velocidad es menor a partir de la 2 mitad de la habitación.
- La velocidad del viento se acelera en el último tercio de la habitación debido a que existe una entrada de aire a través de la puerta (la cual es la segunda entrada de aire) y decrece conforme se acerca a la ventana de salida presentando variaciones menores a 0.3 m/s.

El número de Bejan fue menor a 0.5 para las configuraciones de la habitación con el ventanal completamente abierto, $\frac{1}{2}$ y abierto a $\frac{1}{4}$ para el caso de las 13:30 horas, por lo tanto, las irreversibilidades por fricción son las que dominan en el interior de la habitación.

Otra variación fue de cubrir el techo con medios aislantes. Se realizó el análisis de la simulación con la pintura impermeable y un techo verde.

- La pintura de tipo impermeable comercial resulta una técnica de climatización pasiva eficiente pero insuficiente debido a que genera poco cambio en el interior de la habitación. La capa de pintura impermeable de tipo comercial presenta una disminución de temperatura de 1-2°C en la superficie del techo. Al interior de la habitación el cambio máximo de temperatura es menor a 2 °C.
- El techo verde seleccionado es una configuración de techo verde simple ya que, y presenta poca diferencia de temperatura interior en una vivienda a comparación con un techo normal de concreto, esta configuración puede ser

mejorada. Un techo verde tiene grandes beneficios en el confort térmico de los ocupantes, ya que la transferencia de calor por radiación desde el techo se reduce significativamente hasta en 10 °C, lo anterior presentado en la capa de sustrato. La diferencia máxima resulta de 3 °C en el interior de la habitación respecto a una habitación con techo de concreto normal.

Referencias

- [1] SENER, "Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027," 2013.
- [2] A. Ganguly, D. Chowdhury, y S. Neogi, "Performance of Building Roofs on Energy Efficiency - A Review," *Energy Procedia*, vol. 90, no. December 2015, pp. 200–208, 2015.
- [3] M. J. Moran, H. N. Shapiro, B. R. Munson, y D. P. DeWitt, "Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer," p. 576, 2003.
- [4] L. Molina, C. Veas, "Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno," pp. 27–38, 2012.
- [5] J. A. Gonzalez Gonzalez y A. de Herde, "Arquitectura bioclimtica," 1997.
- [6] C. Nacional, U. Eficiente, and D. Energía, "Las razones para el cumplimiento de la," 2016.
- [7] P. Pérez de Ciriza, "Evaluación del Bienestar térmico en locales de trabajo cerrados mediante los índices térmicos PMV y PPD .," *Inst. Nac. Secur. e Hig. en el Trab.*, pp. 1–16, 2006.
- [8] Mohammad Arif Kamal, "An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. 1, 2012.
- [9] A. Energ y S. Tipo, "Campus Monterrey ' Estudio De Confort Térmico Y Ahorro Energético En La Vivienda De Interes Social Tipo En El Norte Del Pais ',," 2011.
- [10] I. G. S. Mora, "Ciudad universitaria, México, junio 2012," p. 105, 2012.
- [11] A. Ortiz Prado, O. Ruiz Cervantes, y J. A. Ortiz Valera, "Conceptos Básicos del Método por Elemento Finito," *Model. Procesos Manuf.*, pp. 233–264, 2013.
- [12] B. Abourida, M. Hasnaoui, y S. Douamna, "Transient natural convection in a square enclosure with horizontal walls submitted to periodic temperatures," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 36, no. 7, pp. 737–750, 1999.
- [13] R. El Ayachi, A. Raji, M. Hasnaoui, y A. Bahlaoui, "Combined effect of radiation and natural convection in a square cavity differentially heated with a periodic temperature," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 53, no. 12, pp. 1339–1356, 2008.

- [14] H. S. Kwak y J. M. Hyun, "Natural convection in an enclosure having a vertical sidewall with time-varying temperature," *J. Fluid Mech.*, vol. 329, pp. 65–88, 1996.
- [15] Jun Ho Bae, Jae Min Hyun, Ho Sang K, "Buoyant Convection in a Cavity With a Baffle Under Time-Periodic Wall Temperature," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 39, no. 7, pp. 723–736, 2001.
- [16] R. Zhang, K. P. Lam, S. chune Yao, and Y. Zhang, "Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation," *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 100–113, 2013.
- [17] J. Xaman, G. Mejia, G. Alvarez, and Y. Chavez, "Analysis on the heat transfer in a square cavity with a semitransparent wall: Effect of the roof materials," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 10, pp. 1920–1932, 2010.
- [18] M. Gijón-Rivera, J. Xamán, G. Álvarez, and J. Serrano-Arellano, "Coupling CFD-BES Simulation of a glazed office with different types of windows in Mexico City," *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 22–34, 2013.
- [19] N. A. Rodríguez, J. F. Hinojosa, and J. P. Xamán, "Estudio Numérico de la Convección Mixta en una Cavidad Alargada con Ventilación," *Ing. Mec. Tecnol. y Desarro.*, vol. 3, no. 3, pp. 105–114, 2009.
- [20] J. Serrano-Arellano *et al.*, "Numerical study of thermal environment of a greenhouse dedicated to amaranth seed cultivation," *Sol. Energy*, vol. 120, pp. 536–548, 2015.
- [21] F. Noh-Pat *et al.*, "Unsteady-RANS simulation of conjugate heat transfer in a cavity with a vertical semitransparent wall," *Comput. Fluids*, vol. 117, no. AUGUST, pp. 183–195, 2015.
- [22] R. Francesca, D. Masi, S. Ruggiero, and G. Peter, "Acrylic white paint of industrial sector for cool roof application: Experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate," *Sol. Energy*, vol. 169, no. May, pp. 468–487, 2018.
- [23] Sergio Quezada Garcia, "Transporte de energía y escalamiento de sistemas de techos verdes," 2016.
- [24] F. S. Y. Reyna, "Evaluación de los Efectos de Techo Verde en el Nivel de Confort Térmico en Vivienda de Interés Social," pp. 1–10, 2013.
- [25] Carey G. F. and Oden J. T., *Finite elements, Fluid mechanics. Volume VI.* Prentice-Hall. 1986.

- [26] B. F. Armaly, F. Durst, B.Schonung., "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow," J. Fluid Mech., vol. 127, pp. 473–496, 1983.

Anexo A

Publicaciones derivadas del proyecto de investigación.

Tema A4 Termofluidos: Análisis térmico en viviendas

"Simulación tridimensional del comportamiento térmico en una habitación ventilada"

G. E. Ovando-Chacon^a, S. L. Ovando-Chacon^b, R. E. Lilly-Velázquez^a, J. C. Prince-Avelino^a, A. Rodríguez-León^a

^aDepto. Metal-Mecánica y Mecatronica, Tecnológico Nacional de Mexico, Instituto Tecnológico de Veracruz, Calzada Miguel Angel de Quevedo 2779, Veracruz, Veracruz. C.P. 91860 México.

^bDepto. Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de Mexico, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, Carretera Panamericana Km. 1080, Tuxtla Gutierrez, Chiapas, C.P. 29000 México.

*Autor de Contacto. Dirección de correo electrónico: ovachag@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se caracteriza el comportamiento del flujo de calor por convección dentro de una habitación ventilada. Se usaron valores de propiedades reales de los materiales de construcción y medidas de una habitación real. Se simuló numéricamente diferentes casos para múltiples horas del día, las simulaciones fueron realizadas mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales, la habitación está compuesta por un techo de concreto, dos entradas de aire y una salida, el flujo de aire entra por un ventanal corredizo y una puerta. La ventana fue abierta parcialmente para realizar análisis comparativos. Se obtuvieron los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura, coeficientes de transferencia de calor, números de Nusselt, entropía y Bejan. El efecto de la apertura de la ventana solo tiene efecto importante hasta la parte media de la habitación. La configuración del ventanal abierto $\frac{1}{4}$ es la que genera menor irreversibilidad.

Palabras Clave: Análisis térmico, confort térmico, climatización pasiva, ventilación natural.

ABSTRACT

In this work the thermal behavior of a heat flow by convection within a ventilated room is characterized. Values of real properties of the construction materials and sizes of an actual room were used. Different cases for multiple hours from the day were simulated numerically, the simulations were carried out by means of computational fluid dynamics techniques, the room is composed by a roof of concrete, two air intakes and one exit, the air flow enters by a sliding large window and a door. The window was opened partially to do comparative analyses. The fields of temperature, streamlines, profiles of temperature, coefficients of heat transference, Nusselts, entropy and Bejan number were obtained. The effect of the opening of the window only has important effect until the middle part of the room. The configuration of the open window $\frac{1}{4}$ is the one that generates minor irreversibility.

Keywords: Thermal analysis, thermal comfort, passive air conditioning, natural ventilation.

1. Introducción

Los techos aislantes han sido utilizados ampliamente debido a que sus propiedades térmicas favorecen el confort térmico en el interior de las viviendas, sin embargo su costo, mantenimiento y la climatización artificial con aires acondicionados han desalentado su uso y han sido desaprovechados especialmente en lugares donde el clima es cálido húmedo o seco, en México las zonas más afectadas por la alta temperatura es la zona sur-sureste debido al alto contenido de humedad en el aire que hacen necesario no solo usar techos aislantes sino también encontrar una configuración adecuada de ventilación en la vivienda para

generar un ambiente térmico favorable para las personas que habitan el interior de una vivienda.

Se pueden encontrar en la literatura diversos trabajos relacionados con sistemas para lograr el confort térmico en viviendas a continuación se citan algunos de estos trabajos.

Abourida et al. [1] estudiaron la convección natural dentro una cavidad cuadrada donde la temperatura de las paredes horizontales interiores variaba con el tiempo. Ellos investigaron tres condiciones de frontera de temperatura. En el primer modo únicamente se varió la temperatura de la pared caliente. En el segundo y tercer modo las temperaturas caliente y fría se desfasaron 0° y 180° . En este trabajo se consideró un modelo bidimensional con flujo laminar donde el fluido de trabajo fue aire. Todas las propiedades del fluido se consideraron constantes. Los resultados indicaron que la

Fig. A.1 Trabajo enviado y aceptado en el XXV Congreso Internacional de la SOMIM

Aplicación de Técnicas computacionales para el Estudio del Flujo de Energía en Forma de Calor en Habitaciones

R. E. Lilly-Velázquez^{1,a}, G. E. Ovando-Chacon^{1,b}, S. L. Ovando-Chacon^{2,c}, J. C. Prince-Avelino^{1,d}, A. Rodríguez-León^{1,e},

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Veracruz

² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

^a rogehollily@gmail.com, ^b ovachag@hotmail.com, ^c ovansandy@hotmail.com, ^d jcpa@itver.edu.mx, ^e arleon@itver.edu.mx

Resumen—Debido a la geografía de la región sureste de nuestro país y a las altas temperaturas en estas zonas es de gran relevancia encontrar técnicas de climatización pasivas para un uso eficiente de la energía en habitaciones. En este trabajo se presenta un estudio de simulación numérica mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales usando el método de elemento finito, para caracterizar el comportamiento térmico de una habitación con medidas y valores reales de las propiedades de los materiales. Como resultados se obtienen los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura y los valores de los coeficientes de transferencia de calor. El análisis se realizó para diferentes horas del día y diferentes aperturas de una ventana.

Palabras clave. Transferencia de calor, climatización pasiva, análisis térmico, ventilación.

1. Introducción

La república Mexicana se encuentra localizada en una región favorecida en recursos solares, es decir recibe diariamente una alta radiación solar durante gran parte del año. Lo anterior resulta ser una ventaja para producir energía a través de paneles solares o aprovechar el calor mediante calentadores solares. Sin embargo, al mismo tiempo representa una desventaja y un reto al momento de diseñar y construir edificaciones. La alta incidencia de radiación solar combinada con los altos porcentajes de humedad en zonas costeras del sur de México hacen necesario poner especial atención al momento de proyectar viviendas para asegurar tanto el confort como el ahorro energético, evitando ganancias de calor durante el verano.

A pesar de que en México el grueso de la población en la zona sur del país es pobre y sufre de las altas temperaturas durante gran parte del año, poco o nada se ha hecho para estudiar el comportamiento térmico en el interior de las viviendas que procuren mejorar las condiciones climáticas en la que viven sus habitantes. Algunos trabajos relacionados con el desempeño térmico en edificaciones desde el punto de vista computacional se han hecho pero para el centro del país donde las temperaturas no son tan altas. Gijón-Rivera et al. [1] simularon el comportamiento térmico de una oficina localizada en la planta alta de un edificio de la ciudad de México con tres diferentes configuraciones de ventanas. El análisis lo realizaron acoplando los enfoques de dinámica de fluido computacionales y el de simulación energética en edificios. La oficina se modeló mediante dinámica de fluidos computacionales como una cavidad cuadrada cerrada

bidimensional, obteniéndose los coeficientes de transferencia de calor que posteriormente fueron implementados en otro software para resolver el modelo de simulación energética en edificios. El edificio con vidrio reflejante fue la que presentó el menor consumo de energía. Xamán et al. [2] evaluaron computacionalmente el efecto conductivo del techo de una cavidad bidimensional cuadrada representada por una pared opaca horizontal con y sin recubrimiento con diferentes espesores y materiales. El resto de la cavidad estaba formada por un piso horizontal aislado, una pared lateral semitransparente de vidrio y una pared lateral opuesta isotérmica a 21 °C. En el techo opaco se consideró que parte de la radiación solar es absorbida y reflejada por el recubrimiento mientras el techo intercambia calor por convección y radiación con el ambiente. En la pared semitransparente de vidrio se consideró que parte de la radiación solar se refleja, se transmite y se absorbe por la pared. En el techo no se consideró transmisión de calor por radiación. El menor flujo de calor hacia el interior de la cavidad se alcanzó con un recubrimiento blanco aplicado sobre un techo compuesto de concreto y poliestireno expandido de 20 cm de espesor. Serrano-Arellano et al. [3] presentaron un análisis numérico del comportamiento térmico de un invernadero localizado en el estado de Querétaro. El invernadero se simplificó con una geometría bidimensional de una cavidad ventilada con una entrada de aire en la parte superior de la pared vertical izquierda y una salida de aire centrada en la pared vertical derecha. La simulación se realizó para números de Reynolds de $0 - 4 \times 10^4$ y diferentes valores de temperatura y configuraciones de la pared caliente. Bajo condiciones de un día típico las temperaturas óptimas en el interior del invernadero se alcanzaron para $1 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^4$. Bajo condiciones de un día extremadamente caliente los estudios indican que el aire debe enfriarse antes de introducirse al invernadero ya que en tales condiciones el flujo de aire distribuiría altas temperaturas en su interior. Noh-Pat et al. [4] analizaron la influencia de la irradiación solar y la temperatura real del aire exterior de una localidad del estado de Morelos en la transferencia de calor conjugada de una cavidad cuadrada bidimensional con una pared de vidrio semitransparente con y sin cubierta de control solar. La pared semitransparente reflejaba parte de la energía incidente sobre su superficie, otra parte era absorbida por el medio

