



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

**MODELO DE UN SISTEMA TIPO MURO TROMBE PARA
CALEFACCIÓN SOLAR**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO**

FELIPE EDUARDO ACUÑA ZAPATA

**PROFESOR GUÍA:
RAMÓN FREDERICK GONZALEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROBERTO ROMÁN LATORRE
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ**

**SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2012**

Agradecimientos

En primer término, a mis padres: este triunfo es, tanto de ustedes, como mío. Muchísimas gracias por el esfuerzo realizado a lo largo de todos estos años.

Al Señor Ramón Frederick, por su constante ayuda y motivación a lo largo de este trabajo. Ha sido un verdadero guía y sin usted, esto difícilmente hubiera salido adelante. Gracias!

A la Escuela de Ingeniería, lugar singular y que me permitió vivir mis mejores momentos. Fue ahí en donde nació el mítico grupo Chanchomen.

Por último, a quien ya no está, pero que su recuerdo me acompaña siempre.

Resumen

El sistema muro Trombe se compone de un canal de colección -con un vidrio para colección de radiación solar-, un muro acumulador de calor con rendijas en sus partes superior e inferior, y un espacio habitable. El aire se calienta por contacto con el muro, que constituye la fuente térmica, y recircula entre el colector y el espacio habitable. En esta memoria se desarrolla un modelo bidimensional transiente del sistema muro Trombe, con dimensiones cercanas a las de una realización real de este concepto, considerando como fenómenos principales la acumulación térmica del muro y el efecto del empuje térmico.

Para realizar el modelo se eligió el software Comsol 3.5a, un software multi-físico presente en los computadores del departamento. Para plantear los modelos, se adquirió un computador especial, dados los exigentes requisitos de las simulaciones, en cuanto a memoria se refiere.

Con el propósito de obtener familiarización con Comsol y además, para estudiar el comportamiento de las variables involucradas, se desarrolló inicialmente un modelo a escala reducida. El aire se consideró como gas ideal y el movimiento de éste vendría dado por una fuerza de empuje. El muro, de ladrillo, tiene aplicado un flujo de calor constante de $500 [W/m^2]$ en la cara que da hacia el canal de colección. Para evitar colapsos del sistema computacional, se fue guardando archivos con intervalos de $10.800 [s]$.

Para validar el modelo se estudió el alcance del régimen permanente, un balance de calor, la eliminación de las pérdidas por radiación y un refinamiento de la malla. Los resultados del ensayo fueron satisfactorios, pues claramente se cumple el ciclo de circulación del aire, se alcanzó el régimen permanente y se determinó que el aporte de la radiación fue nulo, por lo cual se decidió simplificar el modelo.

En el modelo a escala real, se usaron las dimensiones habituales en la construcción de viviendas. Los parámetros y condiciones de borde fueron los mismos utilizados en el modelo pequeño, pero las simulaciones fueron realizadas en intervalos de 1.800 y $3.600 [s]$. El modelo no alcanzó el régimen permanente y presentaba oscilaciones en la temperatura desde los $12.500 [s]$ aproximadamente. Al refinar la malla, los resultados mejoraron. Antes de analizar los resultados se decidió estudiar 2 nuevos modelos con un flujo de calor constante de $250 [W/m^2]$ con y sin rendijas -en este último el muro tiene un alto equivalente al del espacio habitable-.

En simulaciones de varias horas de tiempo real se obtuvieron las tasas de circulación a través de las rendijas, las pérdidas a través de los vidrios y el aporte de la transferencia de calor por convección y conducción al espacio habitable, todas ellas en función del tiempo. La transferencia de calor al espacio habitable se realiza principalmente por conducción a través del muro, especialmente para tiempos largos. La circulación del aire pierde importancia gradualmente como aporte de calor a ese espacio, aunque es un medio efectivo de control de pérdidas de calor por el colector en el muro con rendijas.

Índice general

1. Introducción	2
2. Objetivos	3
2.1. Generales	3
2.2. Específicos	3
2.3. Alcances	3
3. Antecedentes	4
3.1. Energía Solar	4
3.2. Sistemas de Captación Solar	5
3.2.1. Sistemas Activos	5
3.2.2. Sistemas Pasivos	5
3.2.3. Clasificación de la Energía Intercambiada	6
3.2.3.1. Forzada	6
3.2.3.2. Natural	6
3.2.4. Efecto Invernadero	6
3.3. Mecanismos de Liberación de Energía	7
3.3.1. Calentamiento Directo	7
3.3.2. Calentamiento Indirecto	7
3.3.3. Calentamiento Aislado	7
3.4. Muro Trombe	7
3.4.1. Muro Trombe Clásico	8
3.4.2. Muro Trombe-Michel	9
3.4.3. Principio de Funcionamiento	10
3.5. Principios de Fluidodinámica presente en el Modelo	11
3.5.0.1. Elemento Infinitesimal de Fluido	11
3.5.0.2. Volumen de Control	11
3.5.0.3. Derivada Sustancial	12
3.5.1. Ecuaciones a Utilizar	13
3.6. Experiencias Preliminares	14
4. Metodología	16
5. Desarrollo de Modelo a Escala	18
5.1. Definición	18
5.2. Resultados	20
5.2.1. Temperatura	21
5.2.2. Contorno de Temperatura	21
5.2.3. Contorno del Campo de Velocidad	22
5.2.4. Vectores del Campo de Velocidad	23
5.2.5. Distribución de Temperaturas en el Vidrio	23
5.2.6. Distribución de Temperaturas en la Cara Interior del Muro	24
5.2.7. Distribución de Temperaturas en la Cara Exterior del Muro	24
5.2.8. Distribución de Velocidades	25
5.2.9. Validación del Modelo	25

5.2.9.1. Alcance del Régimen Permanente	25
5.2.9.2. Balance de Calor	26
5.2.9.3. Supresión de Radiación	29
5.3. Conclusiones Generales del Ensayo	31
6. Desarrollo de Modelo a Escala Real	33
6.1. Definición	33
6.2. Resultados	36
6.2.1. Evolución de Temperatura	36
6.2.2. Contornos de Temperatura	41
6.2.3. Contornos del Campo de Velocidad	46
6.2.4. Vectores del Campo de Velocidad	51
6.3. Validación del Modelo	55
6.4. Refinamiento de la Malla	56
7. Análisis de Resultados	58
7.1. Caso 2: $Q = 250 [W/m^2]$	58
7.1.1. Evolución de Temperatura	58
7.1.2. Contornos de Temperatura	60
7.1.3. Contorno del Campo de Velocidad	61
7.1.4. Vectores del Campo de Velocidad	63
7.2. Caso 3: $Q = 250 [W/m^2]$ Sin Comunicación Entre Los Espacios.	64
7.2.1. Evolución de Temperatura	66
7.2.2. Contornos de Temperatura	68
7.2.3. Contorno del Campo de Velocidad	70
7.2.4. Vectores del Campo de Velocidad	72
7.3. Calor Transferido hacia el Espacio Habitable y Calor Perdido a Través de la Fuente Fría.	74
7.4. Calor Transferido por Convección.	78
7.5. Descripción de los Fenómenos	84
7.5.1. Temperatura	84
7.5.2. Caudales	85
7.5.3. Establecimiento de una circulación	85
7.5.4. Flujos de calor	85
8. Conclusiones y Recomendaciones	87
8.1. Conclusiones	87
8.2. Recomendaciones	88
Bibliografía	89
A. Criterios de Diseño	91
A.1. Muro	91
A.2. Dimensión de los Orificios	92
A.3. Vidrio	92
A.4. Cánal de Aire	92

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día, a nivel nacional existen diversos hechos que han planteado un debate acerca de las formas de energía: cortes de gas desde países vecinos, fenómenos naturales que dificultan la instalación de plantas nucleares, etc.

A raíz de los hechos señalados en el párrafo anterior, las energías renovables o limpias han ido tomando fuerza. Esto porque sus instalaciones no son fuente de potenciales desastres, no emanan CO_2 a la atmósfera y principalmente, porque dependen del sol -en su mayoría- y este es un recurso ilimitado.

Según datos aportados por los investigadores J. Onishi, H. Soeda y M. Mizuno[1], cerca del 35,3% de la demanda total de energía es consumida por el sector domiciliario. A este porcentaje de energía aportan en gran medida los sistemas de calefacción y refrigeración, cuyo uso o instalación dependen mayoritariamente del clima de algún lugar en específico.

En cuanto a los sistemas de calefacción solares, estos están diseñados para recolectar y almacenar el flujo de calor que proviene del sol y, al mismo tiempo, retener el calor presente al interior de un recinto determinado.

Dentro de los sistemas de calentamiento solares se puede distinguir dos tipos: activos y pasivos. La diferencia radica en que en el primer tipo se requiere de un colector solar para entregar energía a un fluido, mientras que los pasivos están relacionados con el diseño del espacio habitable de un recinto.

De aquí en adelante, solo se hará referencia a los sistemas pasivos con especial énfasis en el Muro Trombe.

Básicamente, la principal característica de este sistema de calefacción es que se trata de un muro sólido con una superficie acristalada por su cara exterior y donde entre ambas superficies circula un canal de aire, es decir, es un sistema compuesto por 3 componentes. En capítulos posteriores se ejemplificará esto a través de Figuras.

La pared maciza absorbe y almacena la energía solar que atraviesa la superficie acristalada.

El sistema descrito puede ser estudiado experimentalmente para conocer su desempeño térmico. Sin embargo, la experimentación es, normalmente, de alto costo. Una alternativa que se ha hecho viable en los últimos años es la modelación numérica mediante softwares comerciales. El presente trabajo consiste en crear y probar un modelo del sistema Muro Trombe que sea lo suficientemente realista.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Generales

- Crear un modelo termo-fluidodinámico para el flujo de aire al interior del canal de colección de energía, así como también en el espacio habitable de un sistema Tipo Muro Trombe convencional..

2.2. Especificos

- Formular el problema (ecuaciones y condiciones de borde para cada uno de los 3 elementos que componen el sistema)
- Realizar un modelo bidimensional transiente para el estudio del Muro Trombe en un software multifísica
- Incorporar el efecto acumulador del muro
- Aprovechando la tecnología disponible para el estudio, considerar un ciclo completo, es decir, un día ($24 [h]$) ó una porción significativa de éste.
- Modelar la circulación del aire bajo régimen transiente y estacionario.
- Realizar un estudio desde el punto de vista del rendimiento energético, colocando énfasis en modalidades de funcionamiento, variables constructivas y de operación.

2.3. Alcances

- Se tomará una aproximación bidimensional para el modelo.
- Se tratará de mantener el régimen laminar durante las simulaciones.
- Sólo se considerará radiación solar (no se consideran otras fuentes de calor).
- Este trabajo no incluye construcción del sistema.

Capítulo 3

Antecedentes

A continuación se presenta un resumen de los antecedentes:

3.1. Energía Solar

La energía solar es la energía producida por el Sol. Esta es recibida en la tierra de forma constante, las 24 horas del día y los 365 días del año y llega a la Tierra por radiación, generando el espectro que se aprecia en la Figura 3.1:

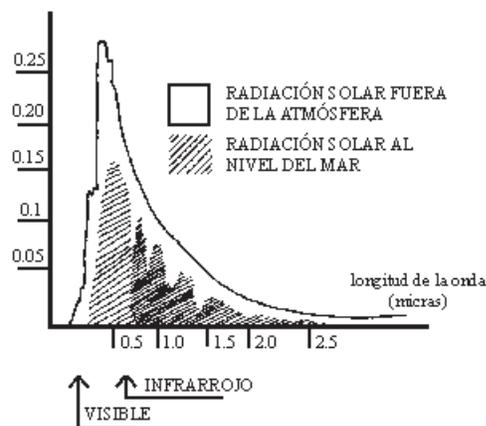


Figura 3.1: Espectro Solar. La curva corresponde a la radiación de cuerpo negro a aproximadamente $6000 [K]$.

Si se desglosa[4] el Espectro Solar, se tiene lo siguiente: fuera de la atmósfera, la radiación solar está constituida por 7% de rayos ultravioleta, 47% de radiación visible y 46% de rayos infrarrojos. Por otro lado, en la superficie, en condiciones ideales (cielo despejado y a nivel del mar) los porcentajes son: 4% de ultravioleta, 46% de visible y 50% de infrarroja.

La energía que llega a la Tierra, por unidad de área, en el exterior de la atmósfera es constante y asciende a $1353 [W/m^2]$. A este valor se le denomina *constante solar*.

En la superficie de la Tierra, es decir, al interior de la atmósfera se tiene *Radiación Global*, que se descompone como:

- **Radiación Directa:** Es la luz directa del Sol que depende de la claridad atmosférica y está acotada por la constante solar.
- **Radiación Difusa:** Es la radiación que emiten los cuerpos circundantes debido a su temperatura. Se le considera difusa porque proviene de todas direcciones.

- **Radiación Reflejada:** Es la radiación que no es absorbida por los cuerpos y, por lo tanto, reflejada a la atmósfera.

3.2. Sistemas de Captación Solar

Los sistemas de captación solar se pueden definir como elementos que utilizan la energía solar para distintos fines, como por ejemplo, calefacción y ventilación. Se debe señalar el hecho de que no se requiere del empleo de electricidad en su funcionamiento, así como tampoco requieren de elementos para el movimiento mecánico de fluidos

3.2.1. Sistemas Activos

Se define como sistema solar activo al principio de captación solar, almacenamiento y distribución que necesita para su funcionamiento el aporte de energía externa.

Un sistema solar activo requiere de la energía solar para su funcionamiento y permite la captación y acumulación de calor, la generación de electricidad mediante la conversión fotovoltaica o mediante la generación eólica. En la captación de la energía del sol se utilizan paneles solares, que pueden transferir dicha energía a fluidos como el aire, el agua, u otros.

En la Figura 3.2 se aprecia un ejemplo de un colector solar plano, que constituye un sistema activo.



Figura 3.2: Colector Solar Plano

3.2.2. Sistemas Pasivos

Tal como se mencionó en el primer capítulo, el muro Trombe es un sistema de calentamiento pasivo, es decir, que se relaciona con el espacio habitable y da origen a la *arquitectura pasiva*[5]. En este estilo arquitectónico, se busca captar energía usando la propia estructura -en términos de ventanas, paredes y suelos-. Los únicos elementos conductivos son los elementos constructivos. En cuanto a los métodos de captación de energía, son principalmente dos: característica de la apertura de captación y mecanismos de liberación de energía.

Uno de los aspectos mas importantes a considerar a la hora de diseñar es la trayectoria que sigue el sol. Esta describe un arco en el cielo que nace en el este y finaliza en el oeste. La diferencia entre las estaciones es que en invierno, la trayectoria del sol es noreste-noroeste, mientras que en verano es sureste-suroeste, tal como lo ilustra la Figura 3.3.

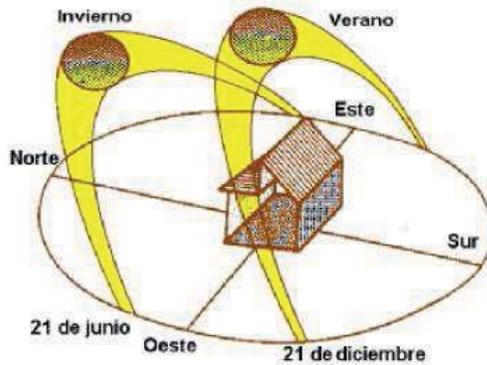


Figura 3.3: Trayectorias solares en invierno y verano

Las diferencias a través del año para una ventana orientada al noreste se aprecian en la Figura 3.4 y se puede inferir que en verano el sol deja entrar el calor mínimo necesario.

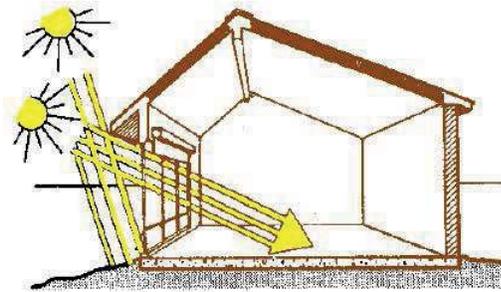


Figura 3.4: Efecto del sol en verano e invierno sobre una ventana

3.2.3. Clasificación de la Energía Intercambiada

3.2.3.1. Forzada

Para que exista un régimen forzado, se hace necesario el uso de bombas, ventiladores o elementos mecánicos.

Si se da el caso en que los intercambios energéticos de un sistema de calentamiento solar se realizan bajo régimen forzado, entonces el sistema se denomina activo.

3.2.3.2. Natural

Su principal característica es que el intercambio energético se realiza principalmente por radiación, conducción y convección libre.

Si se da el caso en que los intercambios energéticos de un sistema de calentamiento solar se realizan bajo régimen natural, entonces el sistema se denomina pasivo.

También puede darse que los intercambios significativos entre los principales elementos sean mediante un régimen forzado y que el sistema, además, incorpore elementos mecánicos para mover el fluido. Esto se denomina un sistema híbrido.

3.2.4. Efecto Invernadero

Los vidrios presentes en las ventanas actúan como una trampa de calor dado que dejan pasar la luz solar, mientras que impiden el paso de la radiación que emiten objetos. Esta viene a ser la definición del efecto invernadero

y se ilustra en la Figura 3.5.

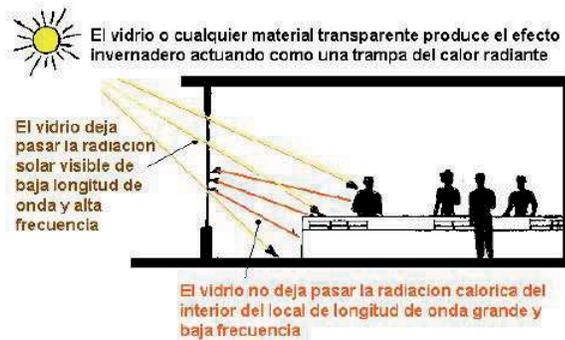


Figura 3.5: Efecto Invernadero

Este efecto es beneficioso en invierno, en donde se pretende calefaccionar los espacios. Sin embargo, en verano lo que se persigue es proteger las ventanas de la acción solar y aprovechar el máximo de la ventilación natural durante las noches.

3.3. Mecanismos de Liberación de Energía

La forma de traspasar la energía al espacio acondicionado posee un gran impacto sobre la uniformidad térmica que se pueda alcanzar. Dentro de los mecanismos de liberación de energía existen dos tipos: directo e indirecto[7].

3.3.1. Calentamiento Directo

Durante el calentamiento directo los rayos solares atraviesan transversalmente el espacio habitable y son convertidos en calor por la absorción que da a lugar en las superficies interiores expuestas directamente a la luz solar.

3.3.2. Calentamiento Indirecto

Se diferencia del anterior porque durante el calentamiento indirecto los rayos solares son convertidos en calor por la absorción que da a lugar en la superficie externa del espacio habitable que actúa como masa acumuladora y es la encargada de transferir calor al espacio habitable.

3.3.3. Calentamiento Aislado

Durante el calentamiento aislado los rayos solares son convertidos en calor por la absorción que da a lugar sobre una superficie externa al espacio habitable (este último no está expuesto a calentamiento directo o indirecto).

3.4. Muro Trombe

El muro Trombe es un sistema de calefacción creado en Francia[8] en el año 1957 por Felix Trombe y Jacques Michel.

De acuerdo a lo visto en secciones anteriores, el muro Trombe se puede definir como un sistema pasivo de calentamiento indirecto que provee un alto rendimiento al sistema, posee pequeñas fluctuaciones térmicas y además, los mecanismos de control son simples.

En la Figura 3.6 se aprecia una vivienda equipada con un sistema de muro Trombe en la que el muro está orientado hacia el norte y se encuentra paralelo a una superficie acristalada situada por la cara exterior del muro.

Los elementos señalados en el párrafo anterior son los que convierten al muro Trombe en un buen captador, acumulador y regulador de calor.



Figura 3.6: Vivienda equipada con un muro Trombe

A continuación se entrega un detalle de 2 variantes del muro Trombe: clásico y Michel.

3.4.1. Muro Trombe Clásico

El muro Trombe Clásico está compuesto por una pared maciza situada a una distancia pequeña de la superficie acristalada. En el caso de la termocirculación, la pared maciza absorbe el flujo radiativo que atraviesa el vidrio. La pared transfiere una parte del flujo hacia el interior por conducción. El calentamiento del aire que entra en contacto con la pared da lugar a convección natural, que entra por el ducto inferior de ventilación y vuelve al espacio habitable tras pasar por el ducto superior de ventilación, tal como se aprecia en la Figura 3.7:

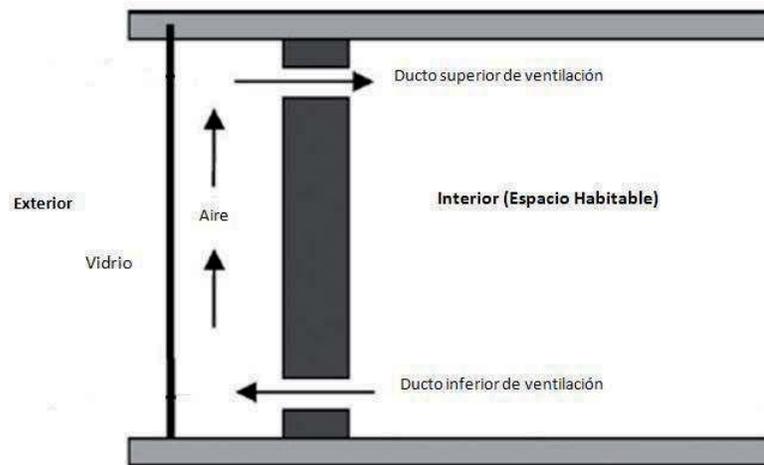


Figura 3.7: Muro Trombe Clásico

El diseño Clásico del muro Trombe presenta dificultades con las que se debe lidiar[2, 9]:

- Baja resistencia térmica: cuando una pequeña cantidad de la energía solar es absorbida por la pared, por ejemplo, durante la noche o prolongados períodos nublados, provoca que algunos flujos de calor se transfieren desde el interior hacia el exterior. Lo anterior trae como consecuencia la pérdida de calor excesivo del edificio.
- Fenómenos inversos termosifón se producen durante el invierno, en la noche o en días nublados. Cuando la pared está más fría que la temperatura interior, la circulación de aire se produce de manera inversa, es decir,

desde el ducto de ventilación superior hacia el ducto de ventilación inferior. La consecuencia es que el aire se enfría y, por lo tanto, disminuye la temperatura ambiente en el recinto a calefaccionar.

- La incertidumbre de la transferencia de calor debido al movimiento del aire en recintos cerrados calentados por energía solar. La intensidad solar no es constante y periódica. Entonces, cualquier cambio en la intensidad solar podría causar fluctuaciones de la temperatura de la pared.
- La influencia del ancho del canal y las dimensiones de la entrada y las aberturas de salida afectan el proceso de convección y por lo tanto, afectan al rendimiento global de calentamiento.
- Bajo valor estético.

Existen estudios que han sido llevados a cabo pensando en mejorar el muro Trombe en tres aspectos: control de entrada y salida del aire, diseños de aislamiento térmico y diseños del canal de aire.

A modo de ejemplo, un par de modificaciones que se le puede hacer al diseño es la instalación de visagras regulables en el cristal y respiraderos ajustables en la pared, Figura 3.8. Esto puede ser beneficioso para calefacción en invierno y refrigeración en verano[9].

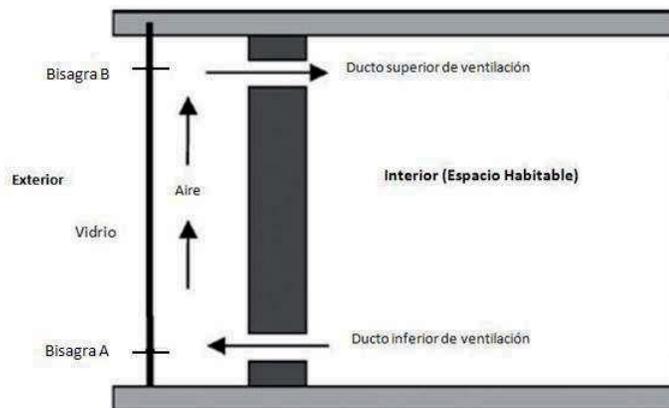


Figura 3.8: Muro Trombe Clásico con modificaciones

Obviamente, en invierno las bisagras permanecen cerradas. Sin embargo, en verano tanto el ducto de ventilación superior y la bisagra A se cierran, pensando en refrigerar. La fuerza de empuje generada por el calentamiento solar de aire entre la pared maciza y el vidrio extrae el aire caliente que proviene del ducto de ventilación inferior y lo expulsa al exterior a través de la bisagra B.

3.4.2. Muro Trombe-Michel

El funcionamiento de un muro Trombe-Michel es similar al del muro Trombe Clásico. La diferencia radica en que el segundo induce a importantes pérdidas de calor debido a la baja resistencia térmica de la pared maciza[9].

Se puede remediar esto usando una pared compuesta, que actúa como aislador si se sitúa detrás de la pared maciza. La energía térmica puede ser transferida desde el exterior hacia el interior por conducción a través de la pared maciza. Luego, se produce convección natural y el aire comienza a circular por termocirculación entre la pared maciza y la pared aislante.

En los días nublados o en invierno, los ductos de la pared aislante se pueden cerrar y por lo tanto, debido a una mayor resistencia térmica que presenta este diseño, el flujo térmico (pérdidas) desde el interior hacia el exterior se reduce.

En la Figura 3.9 se ilustra esquemáticamente un muro Trombe-Michel.

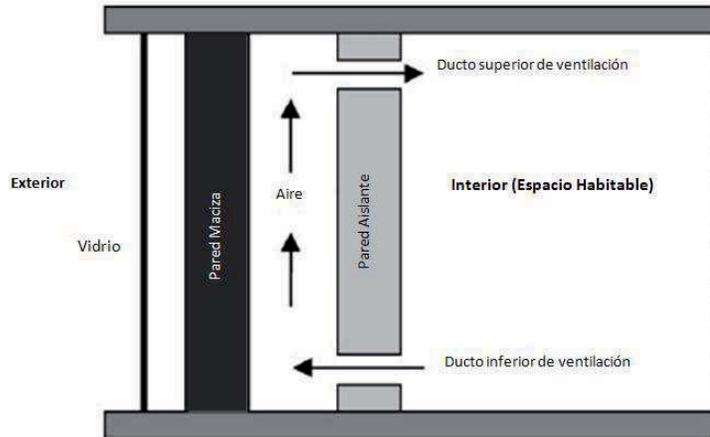


Figura 3.9: Muro Trombe-Michel

3.4.3. Principio de Funcionamiento

Los rayos solares que penetran a través del vidrio lo hacen con un rango de longitudes de onda correspondiente al intervalo $0,3 - 3 [\mu m]$. Considerando el espectro electromagnético, se infiere que se está dentro de la luz visible, con un pequeño rango dentro del espectro ultravioleta y otra parte dentro del espectro infrarrojo. La Figura 3.10 muestra como se divide el espectro electromagnético[10]

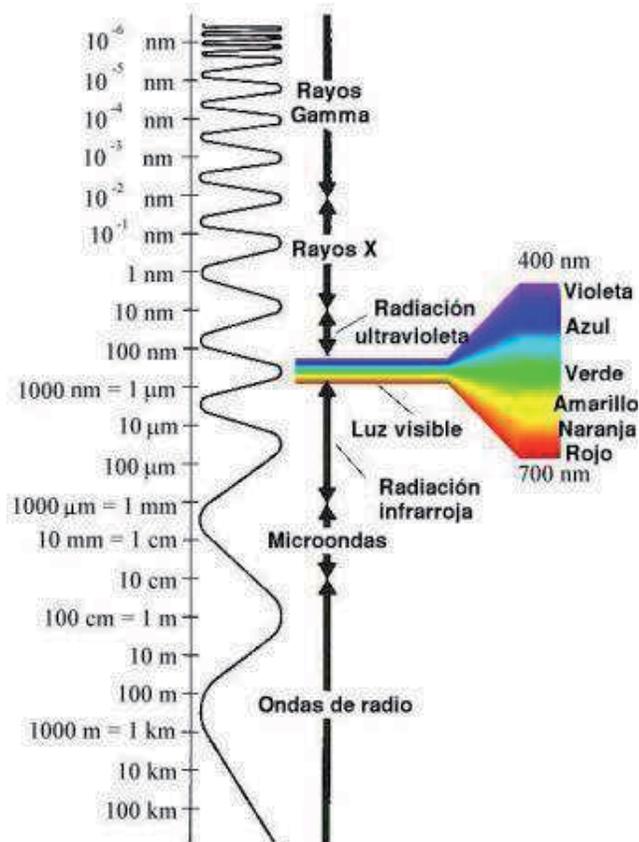


Figura 3.10: Espectro Electromagnético

Luego de atravesar el vidrio, los rayos solares son absorbidos por el muro sólido, que al estar caliente emite radiación electromagnética con longitudes de onda en el intervalo $4 - 30 [\mu m]$. Tal como se hizo anteriormente,

se emplea la Figura 3.11 y se puede comprobar que tal intervalo de longitudes de onda corresponde al infrarrojo, muy alejado del espectro visible.

Para las longitudes de onda mencionadas en el párrafo anterior, se tiene que el vidrio es totalmente opaco y por lo tanto la absorbe en su totalidad, de modo que el aire del colector se calienta y se produce termocirculación, pues al elevar la temperatura el aire se hace menos denso.

3.5. Principios de Fluidodinámica presente en el Modelo

El estudio de la dinámica de fluidos ofrece una estructura sistemática para su estudio, basándose en leyes que envuelven a las propiedades de los fluidos: temperatura, presión, densidad y velocidad, y también funciones de espacio y tiempo.

Los principales axiomas de la fluidodinámica son: la ley de la conservación de la masa, ley de la conservación del momento lineal (también conocida como segunda ley de Newton) y la ley de la conservación de la energía (también conocida como primera ley de la termodinámica).

En la fluidodinámica se supone que los fluidos obedecen a la hipótesis de continuidad, a pesar de que los fluidos están compuestos por moléculas que chocan entre si y con objetos sólidos. Por consiguiente, las propiedades como la densidad, presión, temperatura y velocidad son vistas como propiedades que contienen puntos infinitesimalmente pequeños que varían de un punto a otro.

3.5.0.1. Elemento Infinitesimal de Fluido

Cuando se considera un flujo, éste puede ser considerado mediante líneas de corriente, tal como se esquematiza en la Figura 3.12. Además, es posible definir un elemento infinitesimal de volumen dV dentro de algún flujo de fluido. El elemento infinitesimal puede estar fijo o moviéndose, Figura 3.11 a). En el segundo caso, lo haría con una velocidad \vec{V} , que sería la misma a la que se mueve el fluido, Figura 3.11 b)

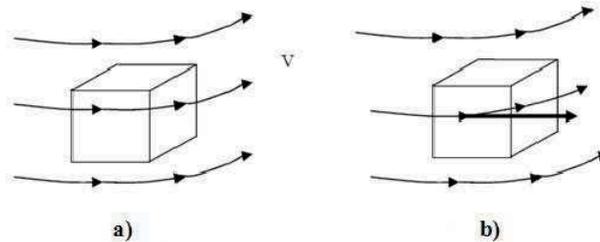


Figura 3.11: Elemento infinitesimal de un fluido

3.5.0.2. Volumen de Control

Si se considera un campo de flujo representado por líneas de corriente, es posible representar un volumen cerrado dentro de una región finita de flujo, tal como se esquematiza en la Figura 3.13. Además del volumen de control, V , se define una superficie de control, denotada por S que encierra a V .

El volumen de control puede estar fijo en el espacio (Figura 3.12 a)), o moviéndose junto al fluido (Figura 3.12 b)).

Los principios fundamentales de la mecánica de fluidos se aplican al interior del volumen de control y también al fluido que cruza la superficie de control (considerando al volumen de control fijo en el espacio). Así, es posible limitarse sólo al volumen de control en vez de hacerlo con todo el campo de flujo.

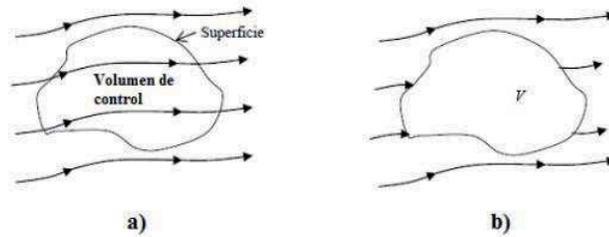


Figura 3.12: Volumen de control

3.5.0.3. Derivada Sustancial

Al analizar el flujo de un fluido, es posible colocar un sistema de ejes que se mueva junto al elemento de volumen del fluido o colocar un sistema de ejes fijos, tal como se esquematiza en la Figura 3.13.

Si los ejes son móviles, entonces se tiene en cuenta el movimiento de traslación. Al considerar el punto de vista de *Lagrange*, los elementos del fluido van describiendo trayectorias.

En caso contrario, si los ejes son fijos, la traslación se incluye dentro de los posibles movimientos. Si se considera el punto de vista de *Euler*, entonces se analizan distribuciones instantáneas de v . Así, se obtienen líneas de corriente al trazar las tangentes a los vectores de velocidad para un instante dado. Por la forma en que se define una línea de corriente, un elemento de fluido no puede atravesarla.

Las líneas de corriente cambian en el tiempo cuando el flujo es transitorio, mientras que en estado estacionario se mantienen fijas y coinciden con las trayectorias, pues elemento de volumen posterior circula por el mismo lugar que el anterior.

Los dos puntos de vista: *Lagrange* y *Euler* se vinculan a través del concepto de derivada sustancial.

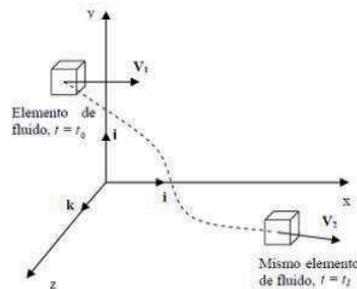


Figura 3.13: Derivada sustancial

Supongamos que analizamos una magnitud escalar, que puede ser, por ejemplo, la densidad ρ del fluido. Al utilizar coordenadas cartesianas y un sistema de ejes fijos, la variación que puede experimentar ρ se puede expresar a través de la función $\rho(t)$.

Si se toma el otro caso, es decir, nos movemos con el elemento de volumen y medimos ρ continuamente, al cabo de un cierto tiempo dt el elemento de volumen se habrá desplazado una cierta distancia, que es posible expresar a través de (dx, dy, dz) en el sistema de ejes fijos. De esta forma, la variación de ρ en el elemento de volumen se puede representar por el diferencial total:

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial x} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y} dy + \frac{\partial \rho}{\partial z} dz + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \quad (3.1)$$

Dividiendo por dt :

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\rho}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\rho}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (3.2)$$

donde:

$$\frac{D\rho}{Dt} := \frac{d\rho}{dt} \quad (3.3)$$

es la expresión para denotar a la *derivada sustancial*, que expresa la velocidad de cambio que puede experimentar ρ en un elemento de volumen de fluido que se mueve aguas abajo.

De modo más general, la derivada sustancial puede expresarse como:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial y} v + \frac{\partial}{\partial z} w + \frac{\partial}{\partial t} \quad (3.4)$$

Donde (u, v, w) son las velocidades en los ejes (x, y, z) , respectivamente.

La ecuación 3.3 se puede escribir de forma vectorial como:

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla\rho \quad (3.5)$$

Donde el gradiente ∇ fue definido como:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \quad (3.6)$$

El mismo procedimiento podría hacerse para otras magnitudes, como por ejemplo, la velocidad:

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v \quad (3.7)$$

Por lo tanto, la derivada parcial representa la variación de una magnitud en un elemento de volumen fijo en el espacio y la derivada sustancial expresa la variación de la misma magnitud, pero cuando se sigue un elemento de volumen aguas abajo.

3.5.1. Ecuaciones a Utilizar

En esta sección se exponen las principales ecuaciones utilizadas en fluidodinámica.

Las ecuaciones se expresarán de forma adimensional porque es de esta forma como trabajan los softwares computacionales y dependiendo de las condiciones de borde, hay términos que desaparecen:

■ Continuidad:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.8)$$

■ Movimiento (Navier-Stokes):

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \eta \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right) - \left(\frac{2\eta}{3} - k_{dv} \right) (\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} \right] + \vec{F} \quad (3.9)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido [kg/m^3]

u : campo de velocidades [m/s]

η : viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$]

F : fuerzas actuando sobre un volumen de control [N]

■ **Ecuación de Calor:**

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q - \rho C_p u \nabla T \quad (3.10)$$

Donde:

k : coeficiente de conductividad térmica [W/mK]

ρ : densidad [kg/m^3]

C_p : calor específico [$J/kg \cdot K$]

Q : fuente de calor (nulas para este caso) [W/m]

T : temperatura [K]

■ **Muro (conducción pura):**

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = 0 \quad (3.11)$$

Donde:

k : coeficiente de conductividad térmica [W/mK]

ρ : densidad [kg/m^3]

C_p : calor específico [$J/kg \cdot K$]

Q : fuente de calor (nulas para este caso) [W/m]

T : temperatura [K]

3.6. Experiencias Preliminares

Esta memoria constituye una continuación de tema. Es necesario señalar esto porque ayuda al cuerpo docente para establecer diferencias con el Predecesor.

El alumno Pablo Hidalgo centró su modelación en el canal de colección con 3 modelos:

- Una cavidad vertical cerrada con aire en su interior.
- Una cavidad vertical con 2 aperturas para entrada y salida de aire.
- Un espacio de colección comunicado con un recinto a calefaccionar (separados por un muro masivo).

En la Figura 3.14 se aprecian las geometrías de los 3 modelos:

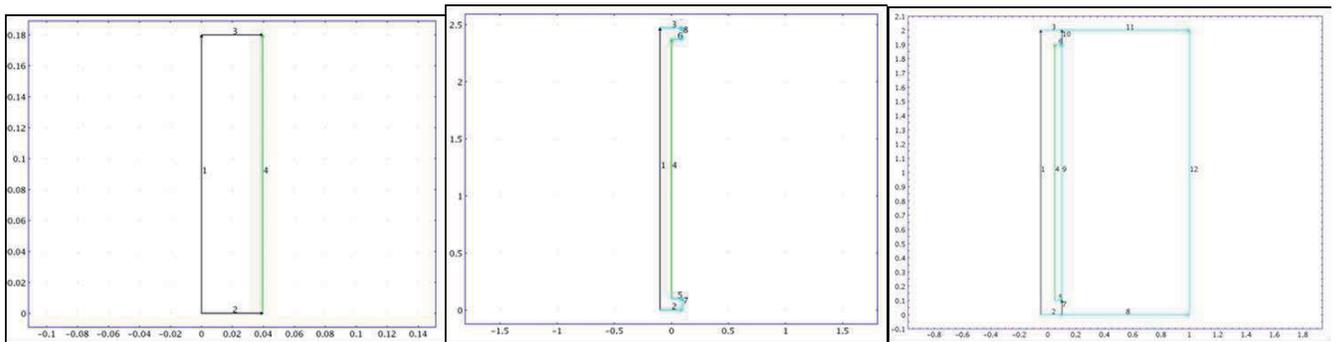


Figura 3.14: Modelos simulados preliminarmente

Dentro de las simplificaciones tomadas por el alumno, junto con limitaciones presentes se encuentra:

- Se ignoraron los intercambios radiativos entre las diferentes paredes sólidas, así como son la conducción y la acumulación de calor en el muro masivo que separa los 2 espacios (canal de colección y espacio habitable).

- Se consideró el vidrio a una temperatura uniforme de $10\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ y se simplificó el rol del muro masivo, representándolo como una superficie que entrega un flujo de calor por unidad de área en el espacio de colección.
- Se realizaron simulaciones breves por falta de equipos computacionales y se consideró en todo momento régimen transiente.

Capítulo 4

Metodología

Tal como ya se ha señalado, en este trabajo se propone construir un modelo fluidodinámico para un muro Trombe. La plataforma utilizada para la creación, construcción y simulación del modelo será COMSOL, cuyo método utilizado para la resolución de problemas es el de Elementos Finitos (FEM). El módulo utilizado será *Heat Transfer* y los sub-módulos, *General Heat Transfer* y *Weakly Compressible Navier-Stokes*.

Como situación inicial, se tiene un muro (compuesto de ladrillos) y un vidrio fríos. El fluido al interior del canal de colección y del espacio habitable es aire (gas ideal) y se encuentra en reposo a una temperatura inicial de $283 [K]$, al igual que el muro, el vidrio y el ambiente exterior.

Cuando la radiación solar comienza a incidir, el muro y el fluido inician un proceso de calentamiento. La circulación de aire se debe a las diferencias de temperatura en el canal de colección.

Como primera aproximación, se construirá un modelo a escala, cuyo fin será una familiarización con el software. Además, se busca una representación físicamente realista del fenómeno a estudiar. Se sabe que los softwares comerciales tienen dificultades para representar con exactitud un problema formulado. Es por esto que un modelo reducido es relativamente rápido de correr y por ello es posible ajustar los criterios, parámetros, ecuaciones y condiciones, de modo que representen el fenómeno a estudiar. En todo minuto se mantendrá un régimen laminar.

El término usado de aquí en adelante para dar movimiento (empuje) al fluido es el siguiente:

$$F_y = -\frac{gp}{RT} \quad (4.1)$$

Donde:

- g : aceleración de gravedad ($g = 9,81 [m/s^2]$)
- p : presión
- R : constante específica del aire ($R = 286,9 [Nm/KgK]$).
- T : temperatura [K]

El sentido de la fuerza se debe a que se espera que el aire más caliente circule hacia la parte superior del espacio habitable. Al inicio se considera presión atmosférica, es decir, $p(t=0) = 101325 [Pa]$ y se hace referencia al fluido como un gas ideal para el intercambio convectivo. El hecho de considerar una presión no nula al inicio es importante, ya que en caso contrario, el fluido no se mueve y por lo tanto, el único intercambio térmico presente sería radiación.

Por otro lado, las propiedades para el muro, vidrio y el aire a considerar serán las siguientes:

	Densidad [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]
Aire	1,177	0,025	1006
Ladrillo común	1922	0,72	840

Cuadro 4.1: Propiedades del muro, vidrio y aire

Cuadro 4.2: Propiedades de materiales usados en la construcción de viviendas[6]

Material	Densidad [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]
Ladrillo común	1922	0,72	840
Ladrillo para fachada	2082	1,3	-
Ladrillo de arcilla refractaria	1920	0,9	790
Concretos	1920	1,1	840

Para el aire se considerará una viscosidad dinámica $\eta = 0,0000187 [Pa \cdot s]$ y el campo de velocidades $U = U(u, v)$ se considerará variable y dependiente de las velocidades en los ejes vertical y horizontal. En cuanto a la opacidad, el vidrio y el espacio habitable se consideran como transparentes, mientras que el muro como opaco.

En el mallado, se elegirá una malla compuesta por triángulos, cuyo refinamiento será mayor en la zona del canal de colección. Como se dispone de resultados de simulaciones para el sistema Trombe plasmados en papers, se refinará la malla hasta que los resultados sean concordantes.

Cuando los resultados del modelo a escala sean satisfactorios, se procederá a construir un modelo a escala real, cuya altura está pensada en $2,4 [m]$. El canal de colección se fijará en $10 [cm]$, el ancho del muro en $15 [cm]$. La anchura del espacio habitable será $2 [m]$ y el vidrio será considerado con espesor despreciable.

Las simulaciones se harán por intervalos de $10.000 [s]$ y se irán guardando en archivos separados para evitar una saturación de la memoria del equipo computacional. Se completará un ciclo cuando se hayan alcanzado un régimen permanente.

Los resultados serán extraídos desde el post-procesado, incluyendo gráficos y datos, por ejemplo, para la temperatura en la superficie del muro. En caso de ser necesario, los datos pueden ser exportados en formato *ascii*, para su posterior uso en una planilla de cálculo.

Se estudiará la geometría del recinto a calefaccionar y la inclusión de fuentes frías (ventanas) construyendo un modelo geométrico que represente los 3 elementos presentes en un sistema muro Trombe y se realizará un balance térmico global de calor sobre el recinto que considere los intercambios térmicos entre vidrio y muro (convección y conducción) y también, intercambio por termocirculación.

Dentro de las características del equipo computacional se tienen un procesador de 8 núcleos, 16 gb de memoria ram, 500 gb de disco duro y Windows7 como sistema operativo.

Capítulo 5

Desarrollo de Modelo a Escala

5.1. Definición

La primera parte del trabajo consiste en realizar un modelo a escala. Las dimensiones escogidas son:

- Alto (h): 0,12 [m]
- Ancho (w): 0,132 [m]
- Ancho muro (w_m): 0,017 [m]
- Alto muro (h_m): 0,1 [m]
- Ancho canal de colección (w_c): 0,0135 [m]
- Alto fuente fría (h_v): 0,11 [m]

En la Figura 5.1 se aprecia la geometría:

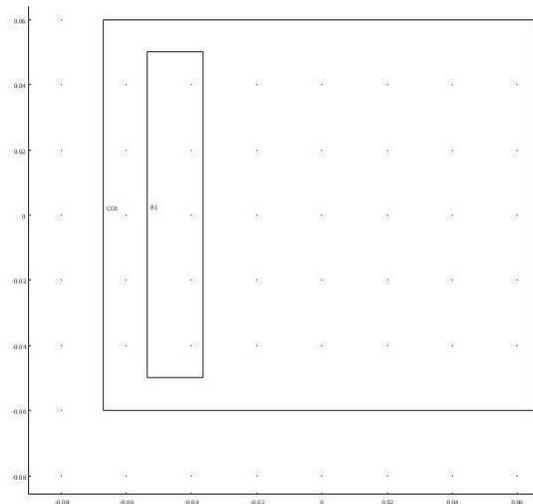


Figura 5.1: Geometría del modelo a escala

En el caso de Weakly Compressible, las condiciones de borde para cada sección son las que entrega el sistema por defecto, es decir, *Wall - No slip*.

Por otro lado, en General Heat Transfer las condiciones de borde utilizadas se encuentran en la Tabla 5.1:

Cuadro 5.1: Condiciones de borde utilizadas en General Heat Transfer

Sección	1	2,3,8,10	4	5,6,7	9
Condición	Heat Flux	Convective flux	Heat source	Continuity	Temperature
T_0					283 [K]
q_0	0		500 [W/m ²]		
Tipo de Radiación	SA		SS		SA
Emisividad (ϵ)	0,05		0,9		0,05
T_{amb}	T		T		T

En la fila de radiación, SA significa Surface-ambient y SS significa Surface-surface. En la Figura 5.2 se aprecia un esquema de la geometría indicando cada sección:

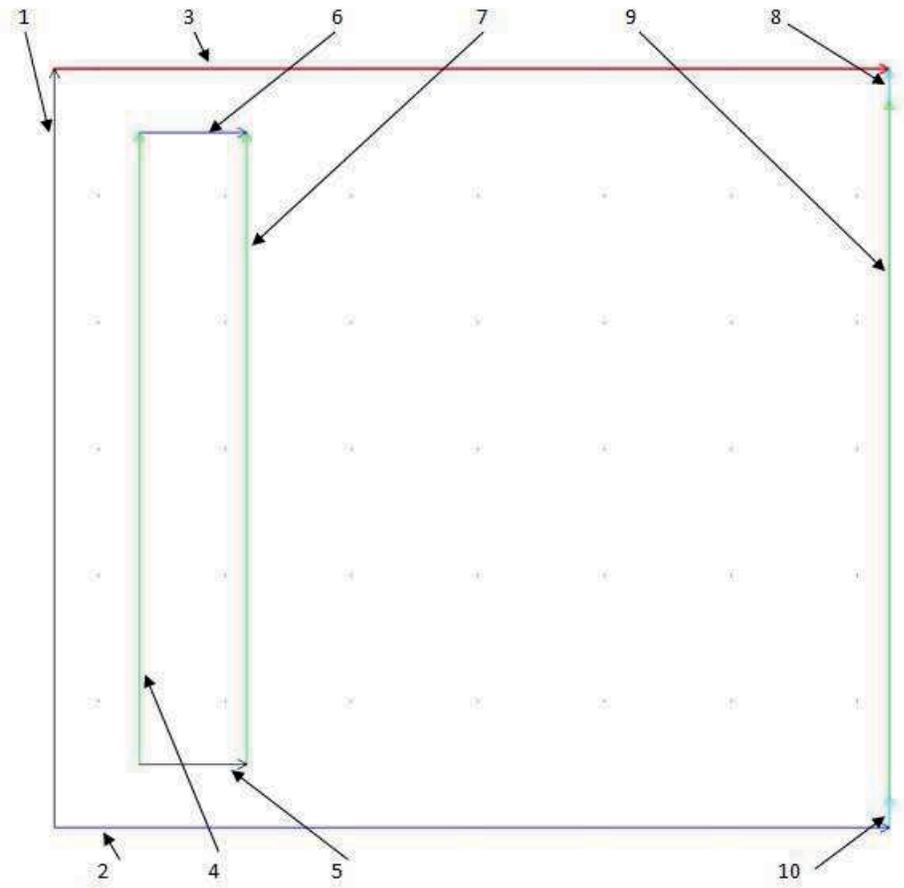


Figura 5.2: Secciones

Antes de proceder a realizar la simulación, se debe mallar la geometría. Se partirá con la malla por defecto, tal como se ve en la Figura 5.3. El número de elementos dispuestos tras el mallado es 608 y se eligió elementos triangulares.

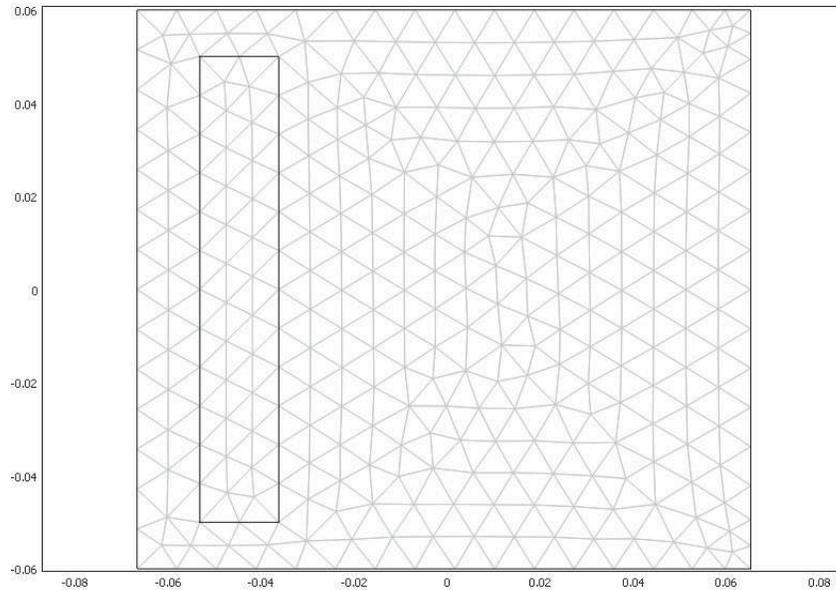


Figura 5.3: Mallado

La etapa siguiente es la simulación misma. Tal como se comentó en el capítulo anterior, se simulará en períodos de $10.000 [s]$ y se guardan los archivos por separado. Desde el segundo intervalo de tiempo, la condición que se debe aplicar para dar inicio a la simulación es que parta desde el “*resultado actual*”.

Se escoge un *Solver* dependiente del tiempo (régimen transiente), en donde las variables dependientes son los campos de velocidad (uv), la temperatura (T), la presión (P) y la radiosidad (J).

El enfoque de solución es transiente para el modulo del campo de flujo (Weakly compressible Navier Stokes) y también para el módulo General Heat Transfer.

Estos módulos están doblemente acoplados, ya que el campo de velocidades se usa como input en el módulo General Heat Transfer y en el módulo Weakly compressible Navier Stokes el término de empuje se evalúa usando los campos de temperatura y presión.

Las medidas de estabilización de las ecuaciones del flujo de fluidos y la transferencia de calor son las impuestas por defecto al seleccionar las físicas.

En caso de querer graficar un parámetro en un intervalo, se selecciona la importación de datos ASCII para generar un archivo de texto que puede ser leído en una planilla de cálculos (EXCEL).

5.2. Resultados

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a las simulaciones para temperatura, contorno de temperatura, contorno de velocidad y vectores de velocidad. Se presentan para intervalos de $5.000 [s]$, comenzando en $10.000 [s]$. El paso de tiempo utilizado son $10 [s]$:

5.2.1. Temperatura

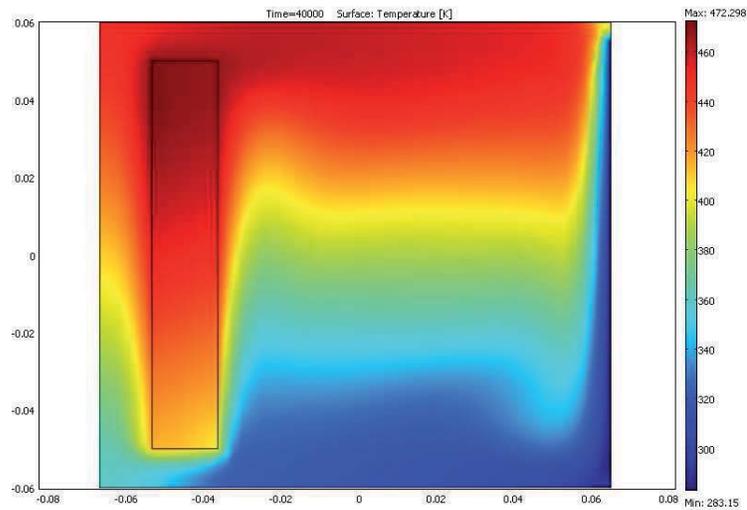


Figura 5.4: 40.000 [s]

- $T_{max} = 472,298 [K]$

Se aprecia que las mayores temperaturas se encuentran en el vértice superior izquierdo del muro (la cara que da al canal de colección).

5.2.2. Contorno de Temperatura

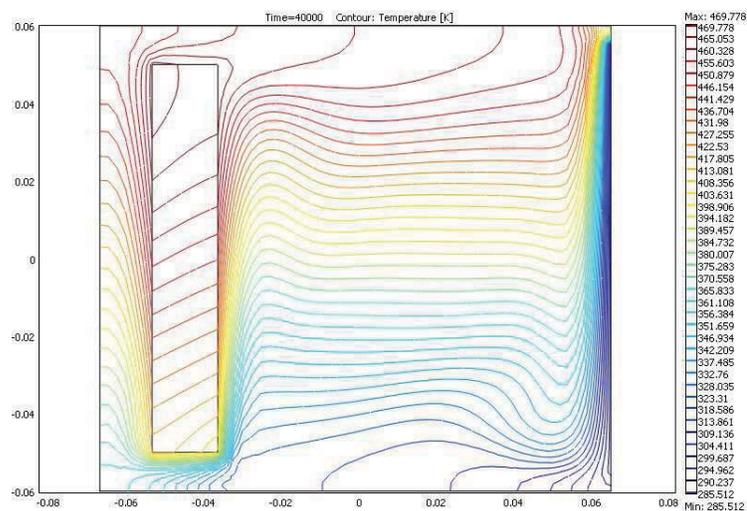


Figura 5.5: 40.000 [s]

- $T_{isot-min} = 285,512 [K]$
- $T_{isot-max} = 469,778 [K]$

Las isothermas correspondientes a las menores temperatura se encuentran en la fuente fría y están expresadas por el color azul. Las isothermas correspondientes a las mayores temperaturas se encuentran representadas por el color rojo.

5.2.3. Contorno del Campo de Velocidad

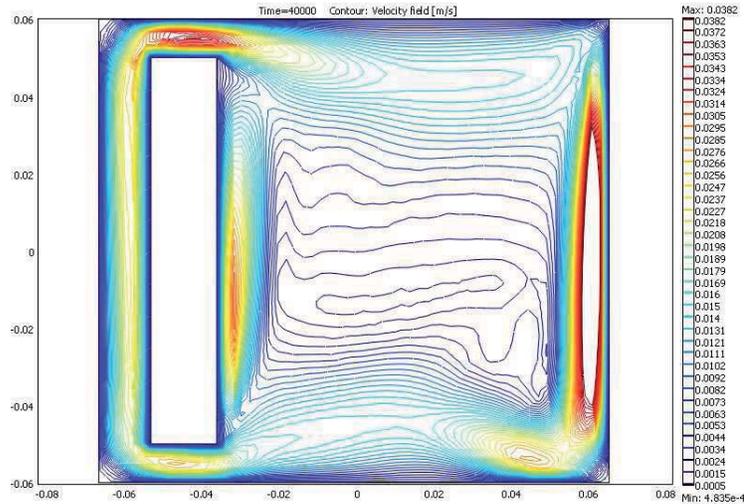


Figura 5.6: 40.000 [s]

■ $V_{max} = 0,0514 \text{ [m/s]}$

Los máximos se dan en la fuente fría, el canal superior de ventilación y la cara del muro que da al espacio habitable. En este caso, los máximos corresponden a una componente de la velocidad (u, v) o bien, corresponden al módulo del vector velocidad. Llama la atención que el máximo sea inicialmente alto y luego, con el tiempo disminuya.

Este comportamiento coincide con lo esperado, por lo cual se concluye que la simulación de la circulación en un muro Trombe es factible.

5.2.4. Vectores del Campo de Velocidad

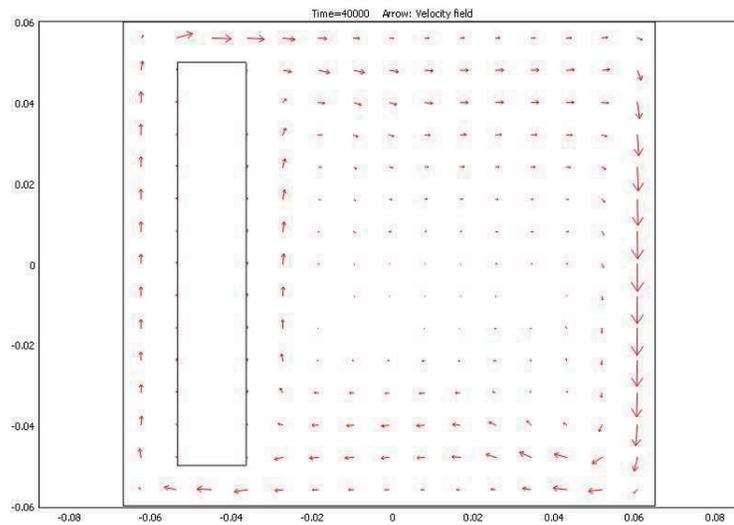


Figura 5.7: 40.000 [s]

El movimiento es ascendente en el canal de colección, así como también en la cara exterior del muro. En el otro extremo, es descendente en la fuente fría (pared vertical de la habitación), y se genera una circulación casi cerrada en ese espacio. Un cierto caudal que es levantado por el espacio de colección se transfiere a la habitación por la apertura superior y vuelve al espacio de colección por la inferior completando un circuito.

5.2.5. Distribución de Temperaturas en el Vidrio

En la Figura 5.8 se aprecia la distribución de temperaturas (con respecto a la coordenada vertical) en el vidrio para diferentes instantes:

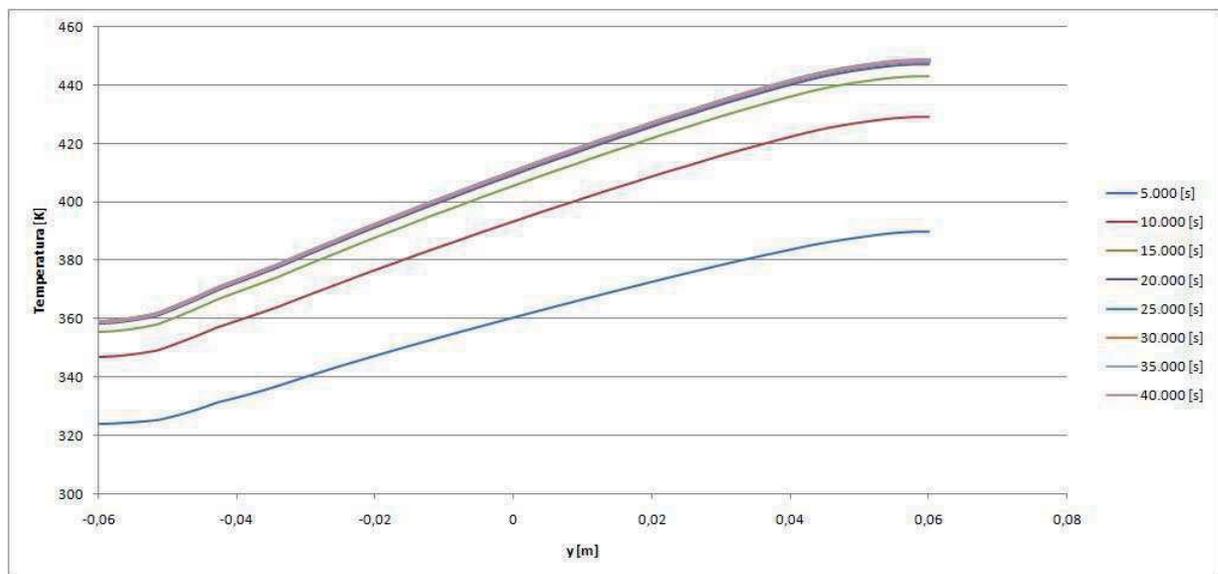


Figura 5.8: Curvas de temperatura para el vidrio en distintos instantes

5.2.6. Distribución de Temperaturas en la Cara Interior del Muro¹

En la Figura 5.9 se aprecia la distribución de temperaturas (con respecto a la coordenada vertical) en la cara interior del muro para diferentes instantes:

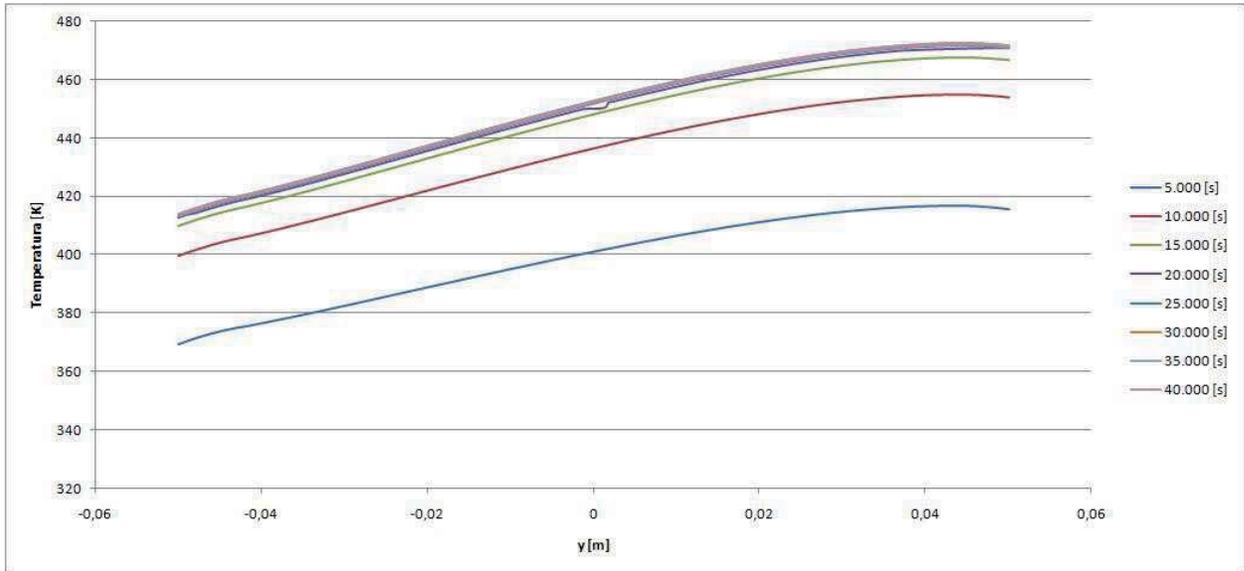


Figura 5.9: Curvas de temperatura para la cara interior del muro en distintos instantes

5.2.7. Distribución de Temperaturas en la Cara Exterior del Muro²

En la Figura 5.10 se aprecia la distribución de temperaturas (con respecto a la coordenada vertical) en la cara exterior del muro para diferentes instantes:

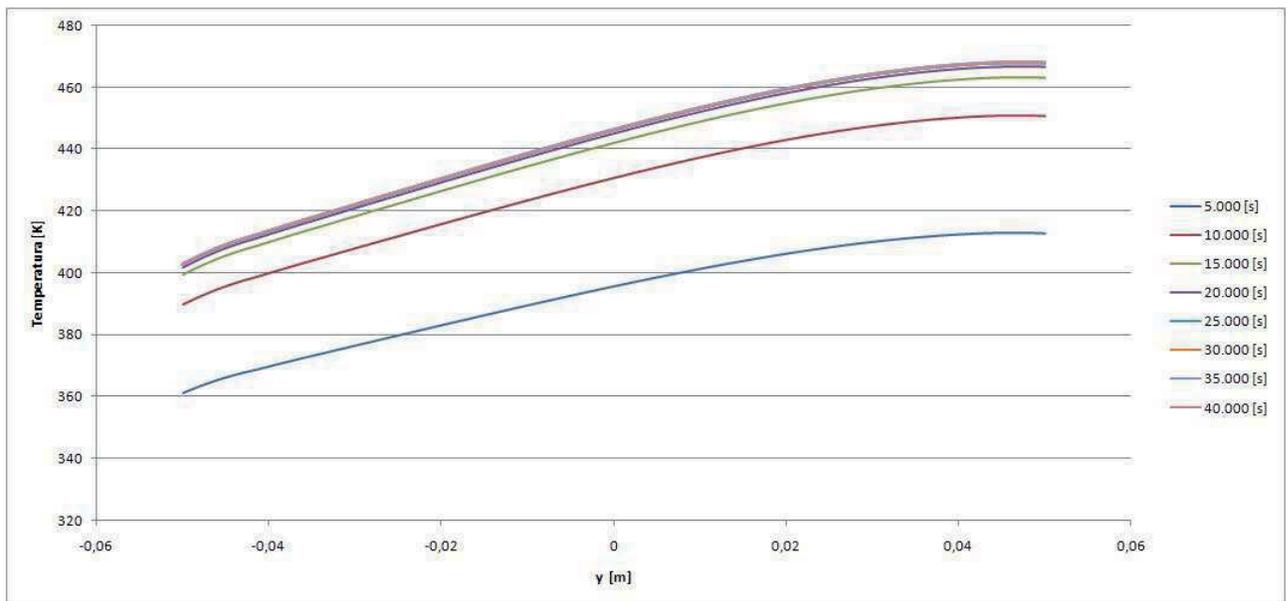


Figura 5.10: Curvas de temperatura para la cara exterior del muro en distintos instantes

¹Por cara interior se entiende aquella que da al canal de colección

²Por cara exterior se entiende aquella que da al espacio habitable

5.2.8. Distribución de Velocidades

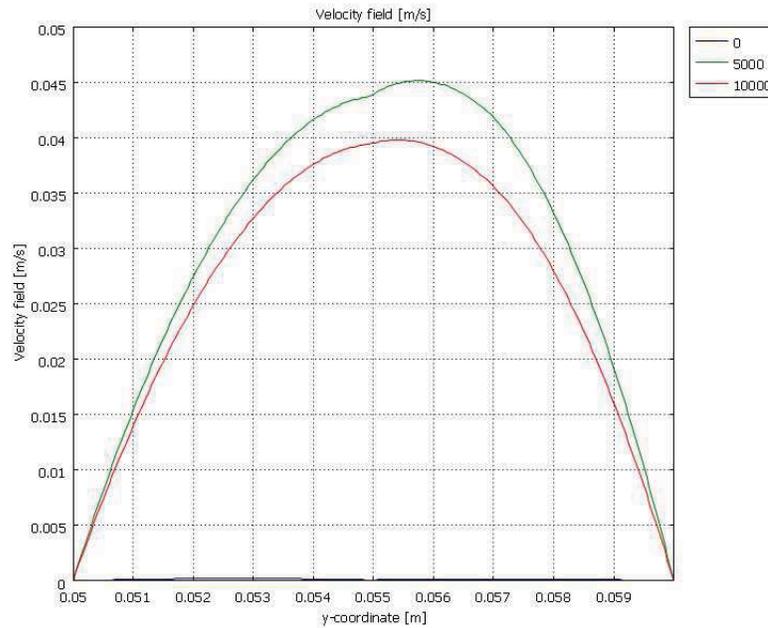


Figura 5.11: Velocidad en la apertura superior del muro para 3 instantes

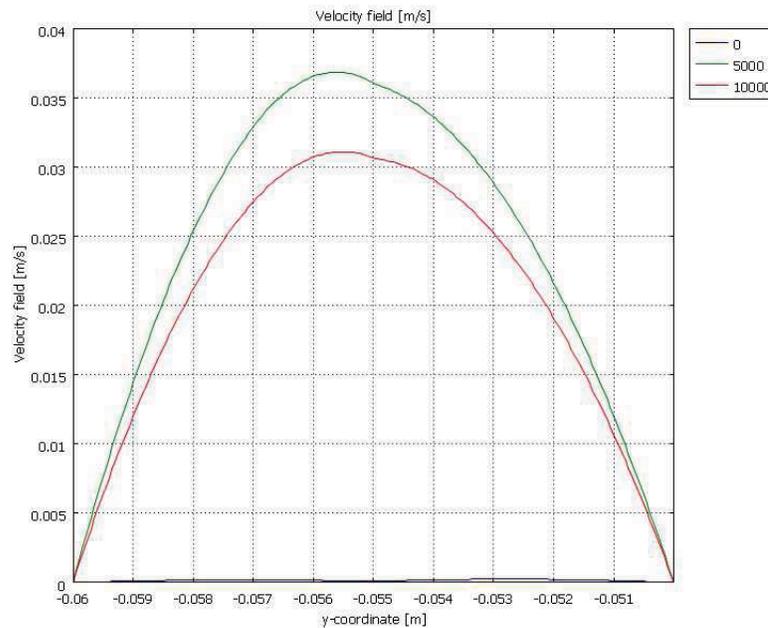


Figura 5.12: Velocidad en la apertura inferior del muro para 3 instantes

5.2.9. Validación del Modelo

5.2.9.1. Alcance del Régimen Permanente

En primer lugar, se partirá validando el alcance del régimen permanente conforme avanza el tiempo. La Figura 5.13 muestra un gráfico desde el tiempo $t = 0$ para la temperatura:

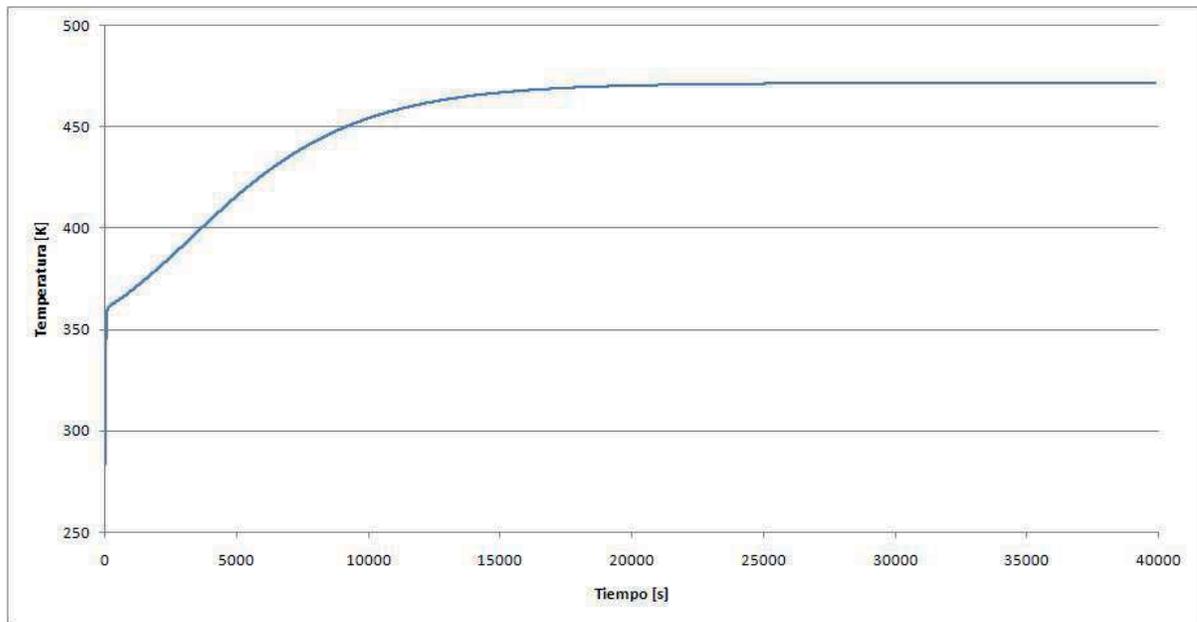


Figura 5.13: Temperatura en función del tiempo

Como referencia se tomó el vértice superior derecho del muro macizo (es un punto de referencia).

5.2.9.2. Balance de Calor

La segunda validación corresponde a un balance de calor. Se sabe que el flujo de calor impuesto sobre la cara del muro que da al canal de colección es:

$$Q_4 = 500 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Luego, se tiene que:

$$q_4 = H_{muro} \cdot Q_1 \tag{5.1}$$

Donde H_{muro} es la altura del muro. Entonces:

$$q_4 = 0,1 [m] \cdot 500 \left[\frac{W}{m^2} \right] = 50 \left[\frac{W}{m} \right]$$

Para el instante final, en Comsol vamos al menú *Post-processing* y elegimos la opción *Boundary Integration*. Los resultados se resumen en la Tabla 5.2:

Cuadro 5.2: Flujo de calor por cada superficie perimetral de la geometría para la malla inicial

Sección	$q [W/m]$
1	-1,124
2	-0,981
3	-0,338
8	0,102
9	54,022
10	1,623

El signo negativo indica que el flujo de calor apunta “hacia” la superficie (entra), mientras que el positivo indica que el flujo apunta “afuera” (sale) de la superficie. Esto viene porque la integración considera un vector n que es normal a la superficie:

$$q = \iint Q \cdot n \, dA$$

En base a lo anterior, se tiene que para la superficie 9, el flujo de calor entra por la cara y escapa hacia el exterior.

Sumando:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_8 + q_9 + q_{10} = 54,304 \left[\frac{W}{m} \right]$$

Lo que da un error de 8,61 %, considerado aceptable. Sin embargo, para reducir el error se refinó la malla y se corrió una simulación desde los 30.000 [s], que es cuando el sistema ya mostraba un régimen permanente. El resultado se aprecia en la Figura 5.14:

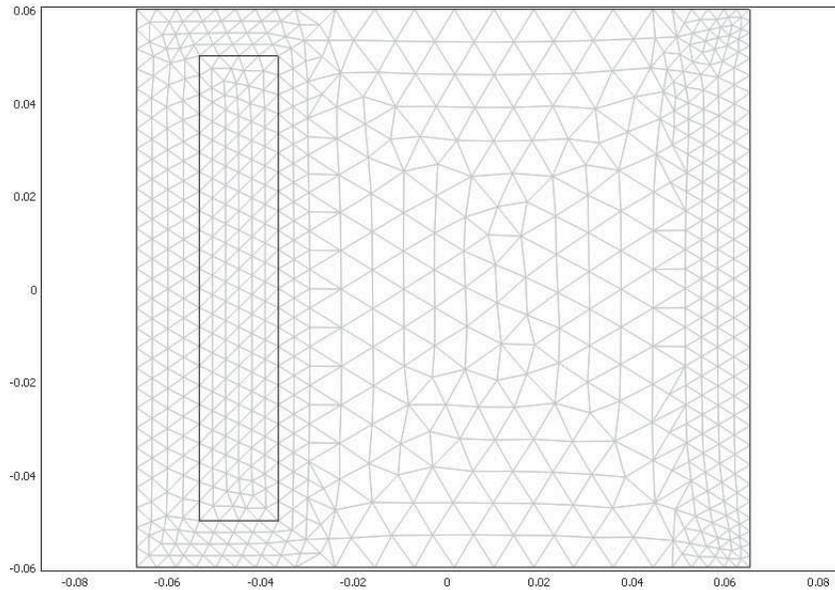


Figura 5.14: Modelo con malla refinada

Se efectúa nuevamente el balance de calor y los resultados son los siguientes:

Cuadro 5.3: Flujo de calor por cada superficie perimetral de la geometría para la malla refinada

Sección	q [W/m]
1	-0,294
2	-0,370
3	-0,015
8	0,060
9	51,033
10	1,001

Sumando:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_8 + q_9 + q_{10} = 51,415 \left[\frac{W}{m} \right]$$

Lo que supone un error de 2,83%. Un valor que muestra que el sistema presenta un comportamiento acorde a lo que se espera de él teóricamente. Además, señala que los resultados dependen directamente de la malla escogida.

A continuación se presentan las distribuciones de temperatura y velocidades, Figura 5.15, Figura 5.16 y Figura 5.17:

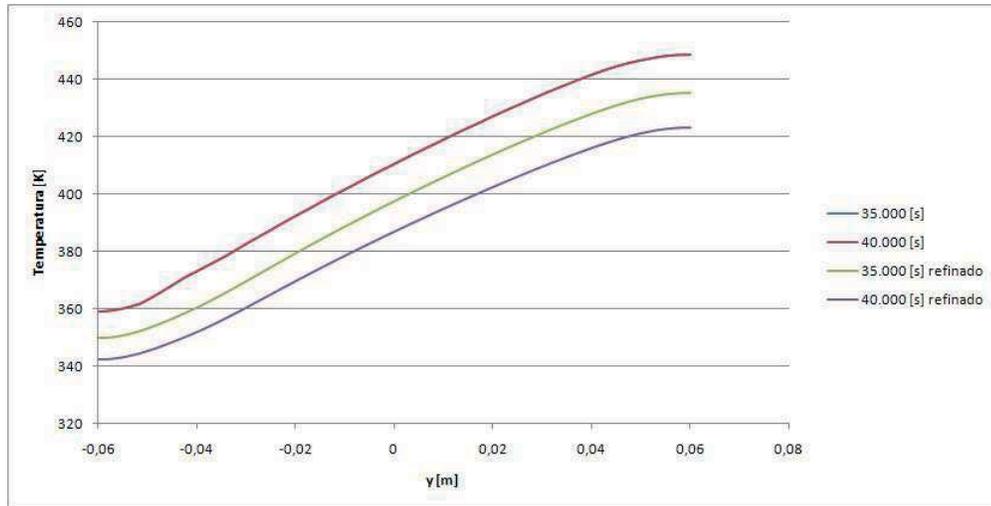


Figura 5.15: Curvas de temperatura comparativas para el vidrio

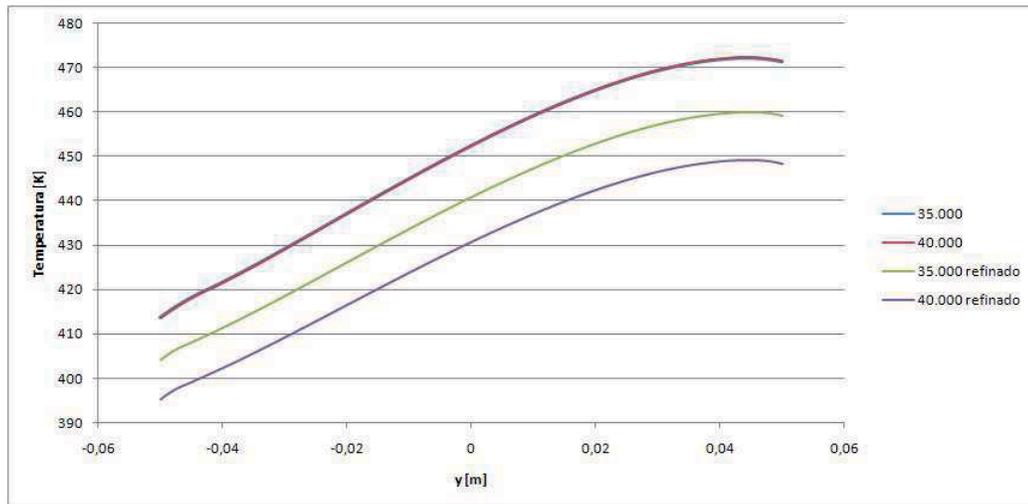


Figura 5.16: Curvas de temperatura comparativas para la cara interior del muro

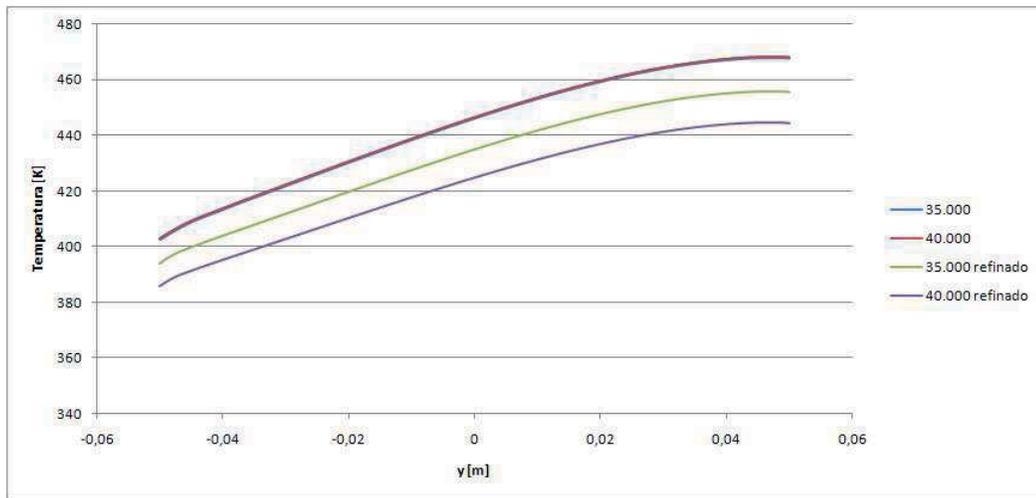


Figura 5.17: Curvas de temperatura comparativas para la cara exterior del muro

5.2.9.3. Supresión de Radiación

La tercera validación fue suprimir la radiación y ver como se comportaba el modelo. A continuación se aprecian gráficos para el instante final del modelo:

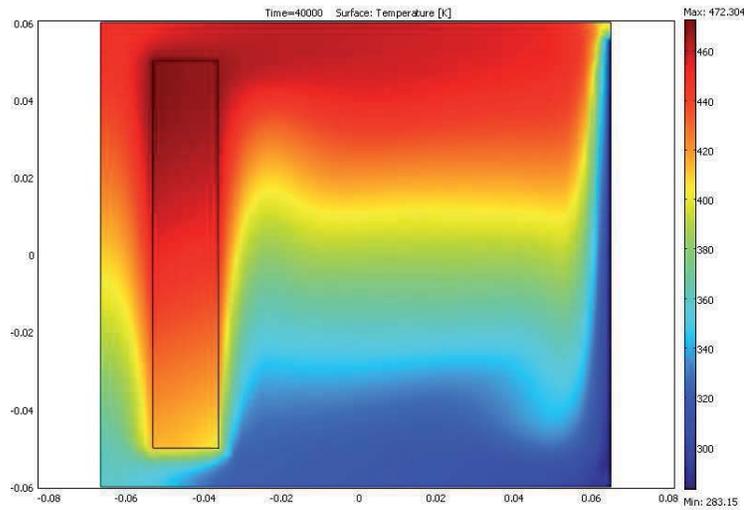


Figura 5.18: Temperatura

- $T_{max} = 472,304 [K]$

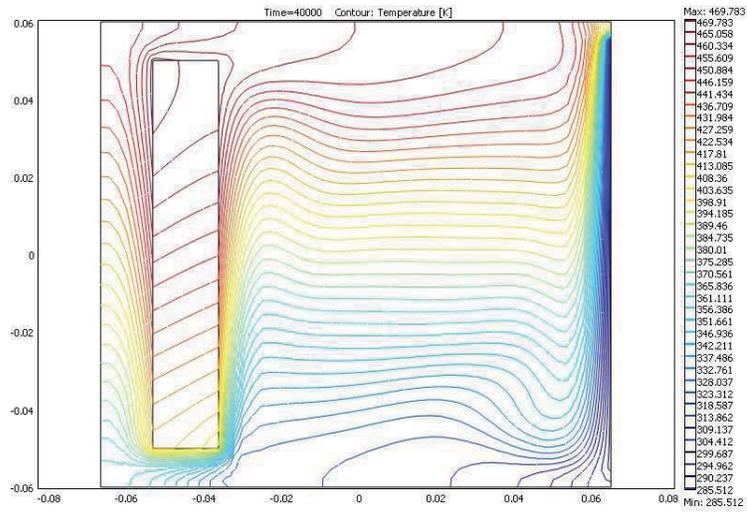


Figura 5.19: Contorno de Temperatura

- $T_{isot-min} = 285,512 [K]$
- $T_{isot-max} = 469,783 [K]$

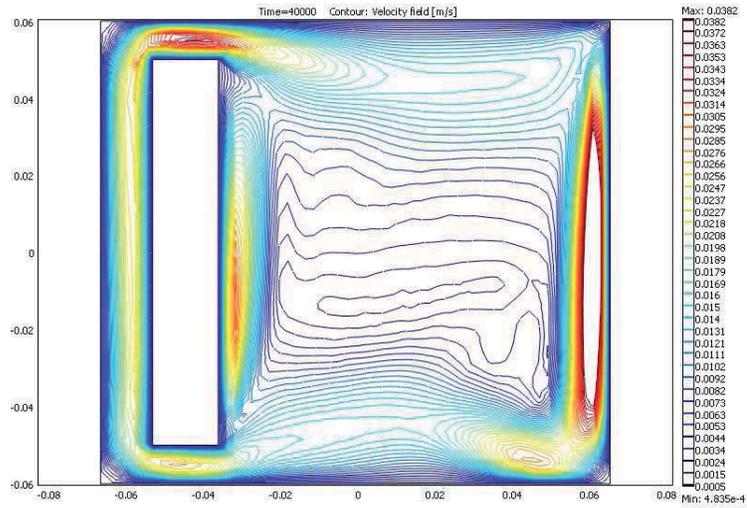


Figura 5.20: Contorno del campo de velocidad

- $V_{isot-max} = 0,0382$
- $V_{max} = 0,0513$

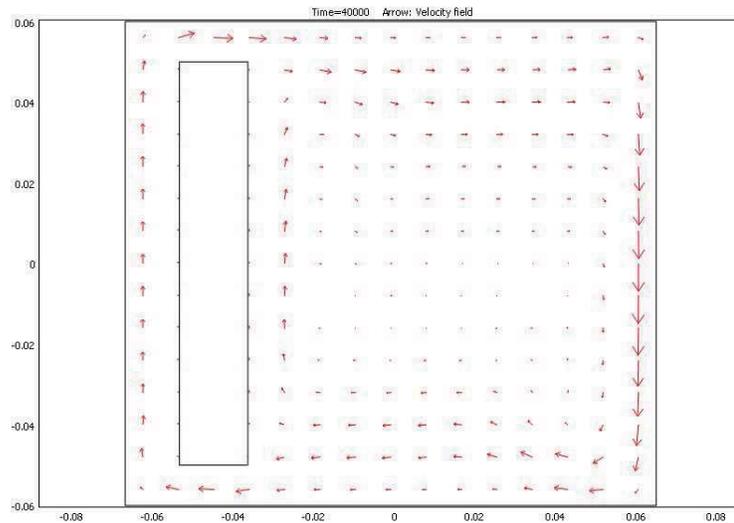


Figura 5.21: Vector del campo de velocidad

Realizando un balance de calor y considerando que el flujo impuesto nuevamente es de $q_4 = 50W/m$:

Cuadro 5.4: Flujo de calor por cada superficie perimetral de la geometría con supresión de radiación

Sección	$q [W/m]$
1	-1,122
2	-0,981
3	-0,338
8	0,102
9	54,021
10	1,623

Se aprecia que el resultado es idéntico al obtenido en la primera validación del modelo.

En cuanto a la temperatura máxima, para el modelo con radiación y sin refinar al final del intervalo de tiempo fue de $T_{max} = 472,298 [K]$. Entonces, suprimiendo la radiación se tiene un incremento de $0,306 [K]$. Por lo tanto, se puede concluir que el efecto de la radiación es despreciable.

5.3. Conclusiones Generales del Ensayo

Por la baja inercia térmica del muro, se obtiene un regimen permanente en tiempos muy cortos.

Las velocidades del aire obtenidas son muy bajas, no alcanzando nunca un valor de $0,1 [m/s]$. Esto se debe a que el canal de colección es muy estrecho, por una parte, y a la pequeña altura del muro, que actúa como fuente caliente.

Concordando con la baja ventilacion que recibe el muro, se desarrollan en éste temperaturas muy altas.

La predicción de las diferentes variables es aceptable, ya que se observan bajos errores en la verificación de los balances de energía.

Los modos de circulación son concordantes con lo esperado: un flujo ascendente se genera en la cara interior del muro, ingresa al espacio habitable -a la derecha- y vuelve al canal de colección a través de la apertura inferior.

En el espacio de aire a la derecha se genera una circulación cerrada -excepto por el ingreso y salida de aire en las aperturas superior e inferior-.

La distribución de las temperaturas en ese espacio es estratificada, con las temperaturas arriba y las bajas en la parte inferior de la geometría.

Los perfiles de velocidad del aire, tanto en el canal de colección, como en las aperturas del muro están bien definidas, tendiendo a la forma parabólica característica del régimen laminar. La condición de velocidad nula en las paredes se cumple en todos los casos.

Capítulo 6

Desarrollo de Modelo a Escala Real

En el desarrollo del modelo a escala real, la mayor dificultad radica en la optimización de los recursos computacionales, a pesar de que se cuenta con un equipo computacional comprado especialmente para este tipo de simulaciones.

Para poder realizar las simulaciones, se consideró intervalos de 1800 [s]. Al tratar de correr intervalos de tiempo mayores, el software arrojaba un error señalando falta de memoria.

6.1. Definición

A continuación se presentan las dimensiones y geometría involucradas en el modelo a escala real:

- Alto (h_R) : 2,4 [m]
- Ancho (w_R) : 2 [m]
- Alto muro (h_{wR}) : 2,1 [m]
- Ancho muro (w_{wR}) : 0,15 [m]
- Ancho canal de colección (w_{cR}) : 0,1 [m]
- Altura fuente fría (h_{vR}) : 2,4 [m]

La Figura 6.1 muestra la geometría utilizada:

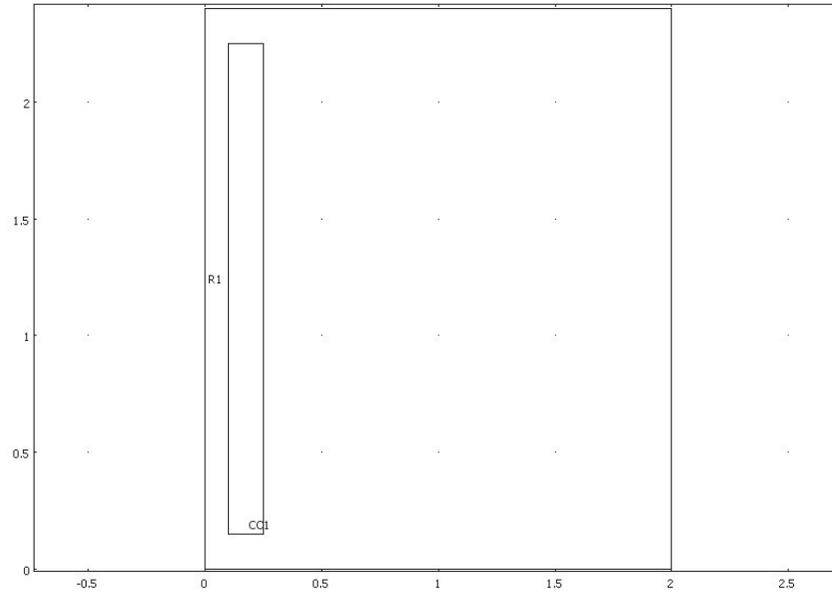


Figura 6.1: Geometría modelo a escala real

La temperatura y presión inicial en toda la geometría se definió como $283,15 [K]$ y $101325 [Pa]$, respectivamente. La fuerza de empuje impuesta es la misma que en el modelo desarrollado en el capítulo anterior.

Tal como en el modelo a escala, los módulos del software utilizados son General Heat Transfer y Weakly Compressible Navier Stokes. Para este último, la condición de borde empleada en todas las secciones es *Wall - No slip*, mientras que para el primero se presenta un cuadro resumen en la Tabla 6.1:

Cuadro 6.1: Condiciones de borde utilizadas en General Heat Transfer

Superficie	1	2, 3	4	5, 6, 7	8
Condición	Temperature	Convective flux	Heat source	Continuity	Temperature
T_0	$283 [K]$				$283 [K]$
q_0	0		$500 [W/m^2]$		
Tipo de Radiación	-		-		-
Emisividad (ε)	-		-		-
T_{amb}	-		-		-

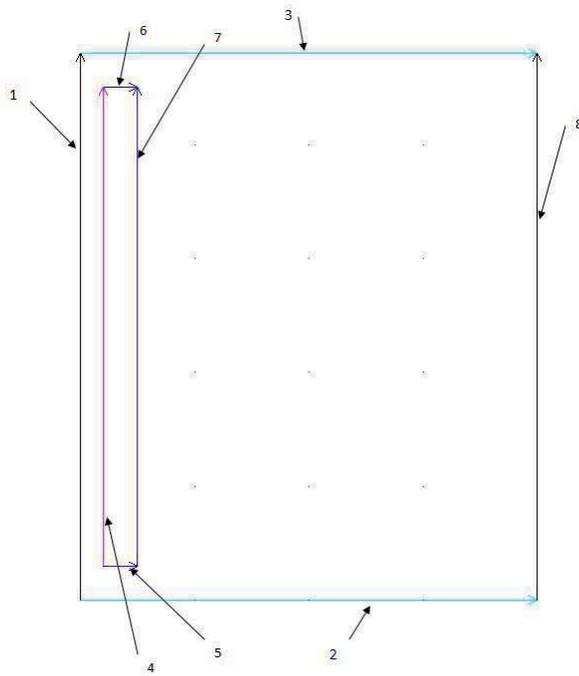


Figura 6.2: Secciones

Las condiciones iniciales son: reposo y temperatura uniforme igual a la de las fuentes frías.

A continuación se presenta la malla utilizada, Figura 6.3:

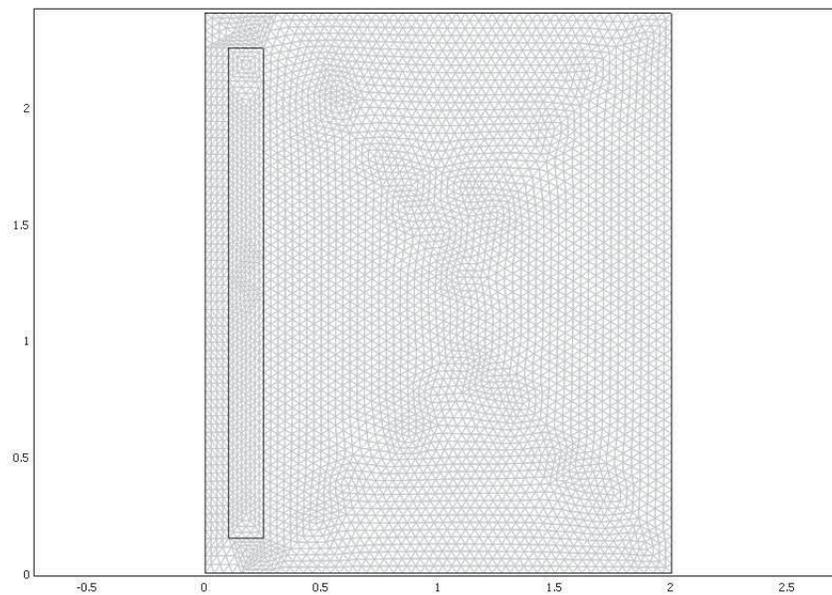


Figura 6.3: Malla utilizada

Se utilizó elementos triangulares, con un total de 9.136 elementos. Esta cantidad de elementos corresponde al tercer refinamiento desde la malla entregada por el software por defecto. La Tabla 6.2 entrega información de la malla:

Cuadro 6.2: Características de la malla utilizada

Grados de libertad	56.129
Puntos	4.687
Elementos	9.136
Elementos de borde	360

El siguiente paso consistió en pasar a las simulaciones y los resultados se presentan en la siguiente sección.

6.2. Resultados

6.2.1. Evolución de Temperatura

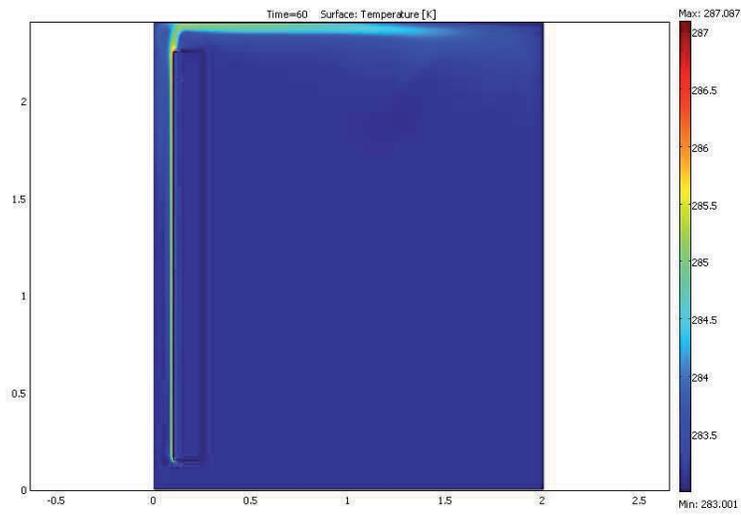


Figura 6.4: 60 [s]

- $T_{max} = 287,087 [K]$

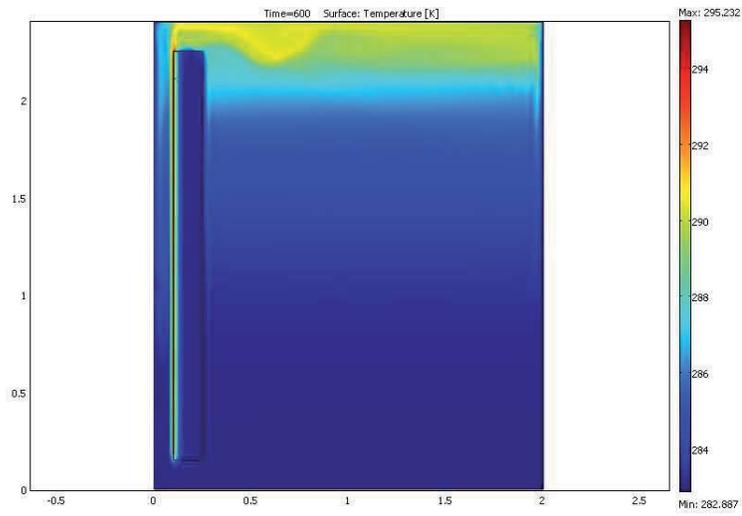


Figura 6.5: 600 [s]

- $T_{max} = 295,232 [K]$

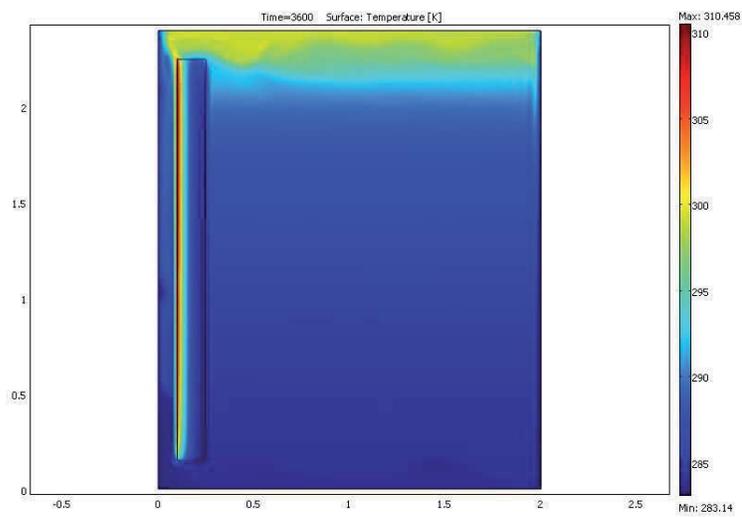


Figura 6.6: 3.600 [s]

- $T_{max} = 310,458 [K]$

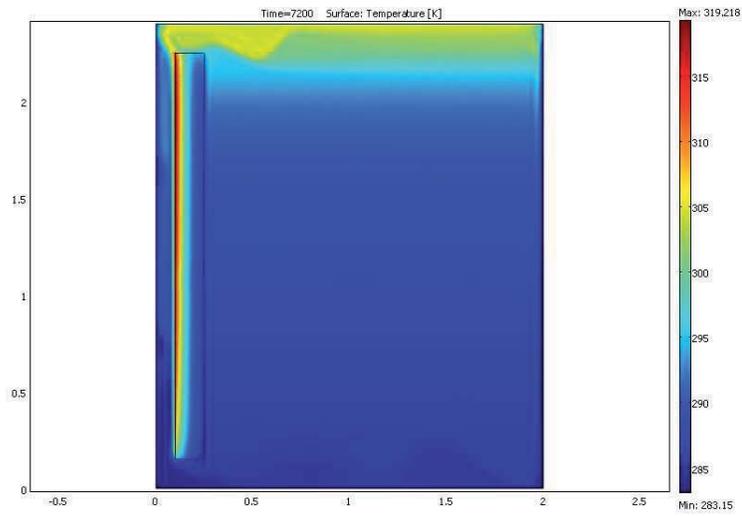


Figura 6.7: 7.200 [s]

- $T_{max} = 319,218 [K]$

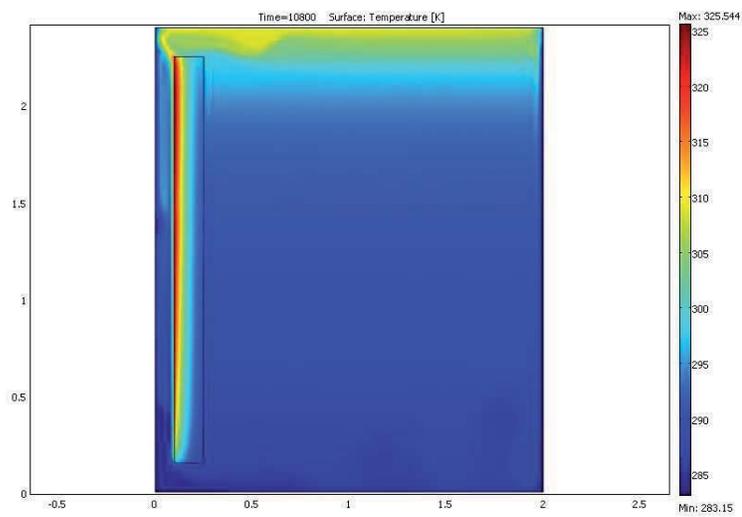


Figura 6.8: 10.800 [s]

- $T_{max} = 325,544 [K]$

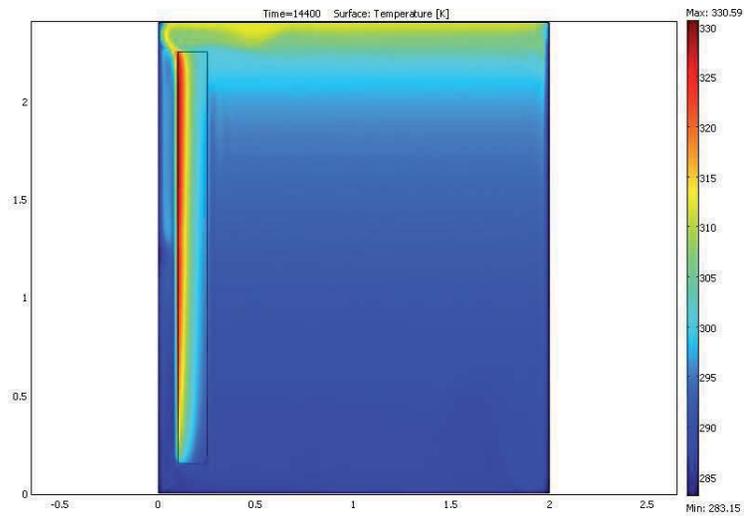


Figura 6.9: 14.400 [s]

- $T_{max} = 330,59 [K]$

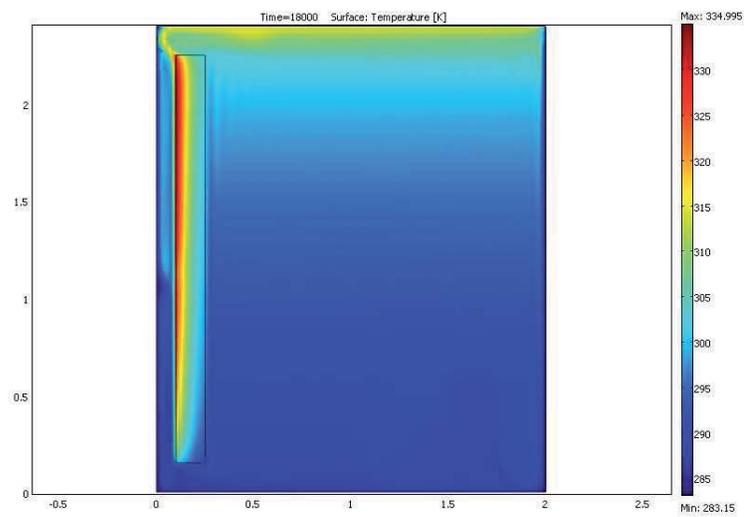


Figura 6.10: 18.000 [s]

- $T_{max} = 334,995 [K]$

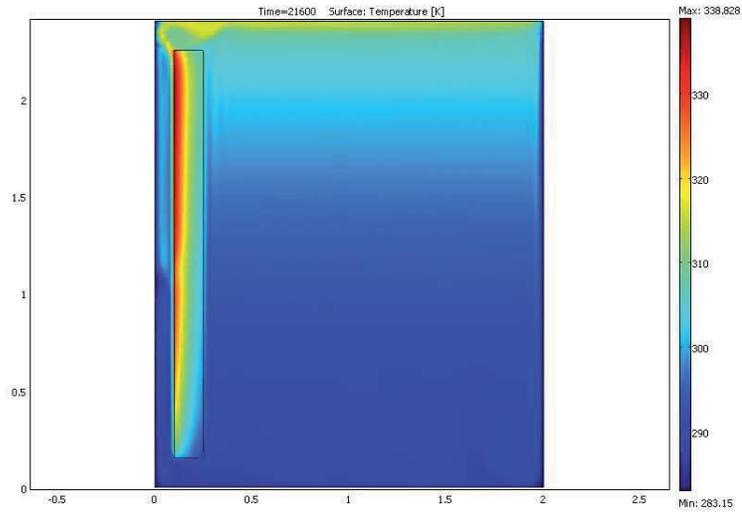


Figura 6.11: 21.600 [s]

- $T_{max} = 338,828 [K]$

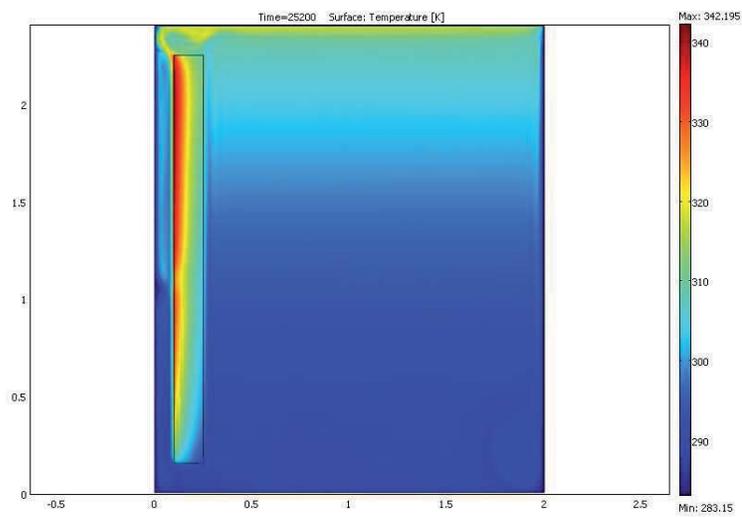


Figura 6.12: 25.200 [s]

- $T_{max} = 342,195 [K]$

En todas las imágenes se puede apreciar que el máximo se encuentra en el vértice superior izquierdo del muro (la cara que da al canal de colección), mientras que los mínimos -siempre expresados en azul- se encuentran en varias zonas, dependiendo de cada imagen.

6.2.2. Contornos de Temperatura

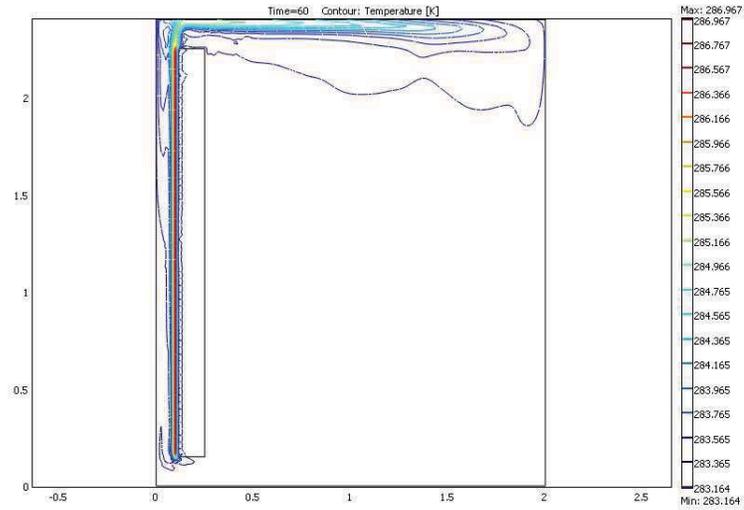


Figura 6.13: 60 [s]

- $T_{isot-min} = 283,164 [K]$
- $T_{isot-max} = 286,967 [K]$

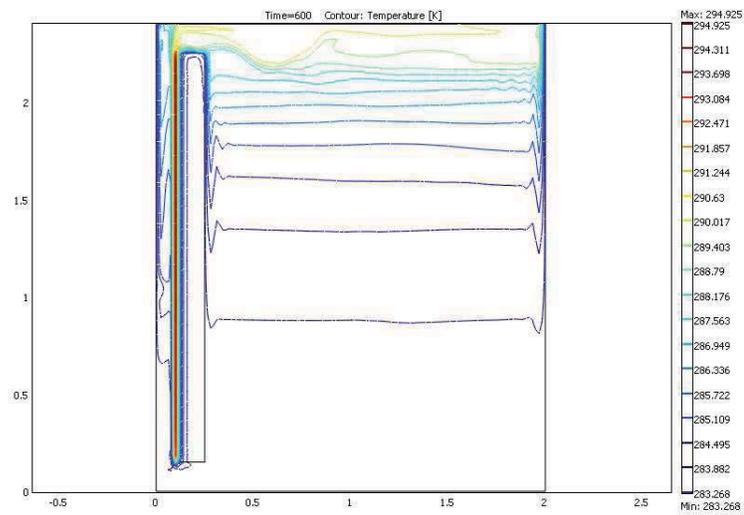


Figura 6.14: 600 [s]

- $T_{isot-min} = 283,268 [K]$
- $T_{isot-max} = 294,925 [K]$

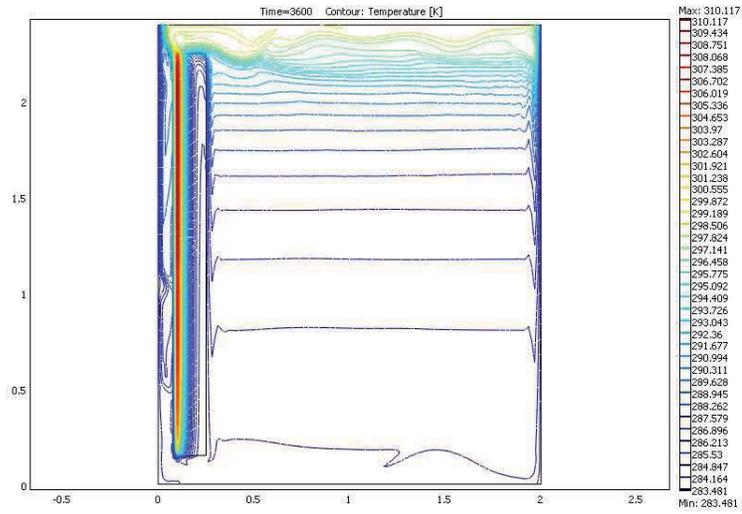


Figura 6.15: 3.600 [s]

- $T_{isot-min} = 283,481 [K]$
- $T_{isot-max} = 310,117 [K]$

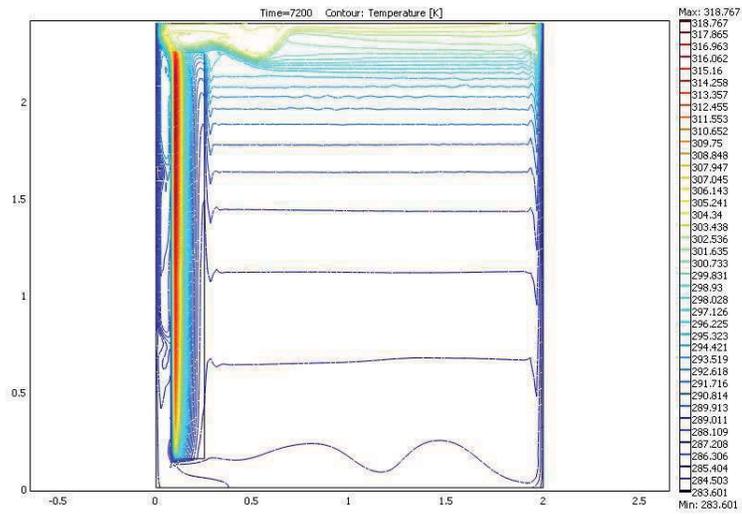


Figura 6.16: 7.200 [s]

- $T_{isot-min} = 283,601 [K]$
- $T_{isot-max} = 318,767 [K]$

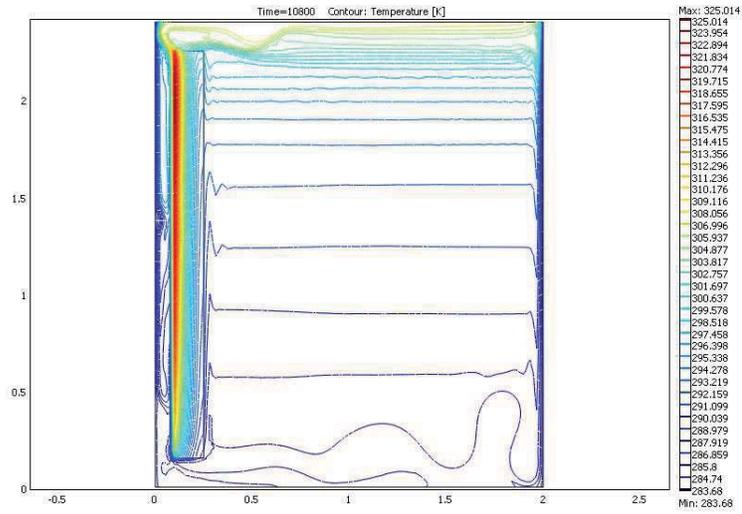


Figura 6.17: 10.800 [s]

- $T_{isot-min} = 283,68 [K]$
- $T_{isot-max} = 325,014 [K]$

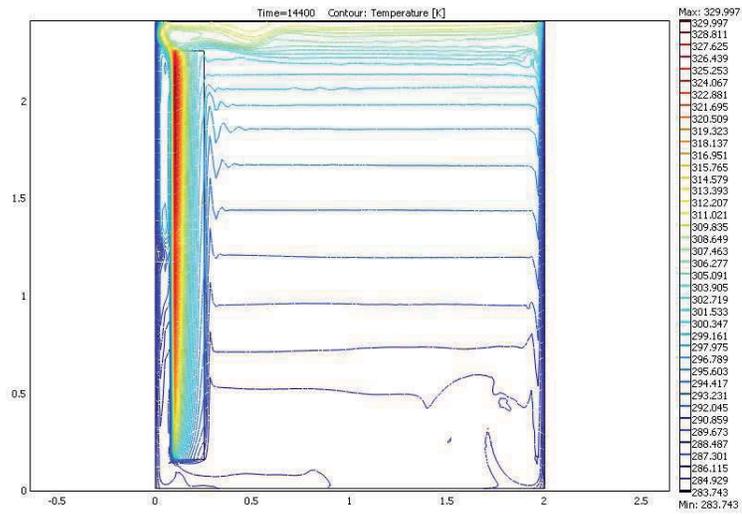


Figura 6.18: 14.400 [s]

- $T_{isot-min} = 283,743 [K]$
- $T_{isot-max} = 329,997 [K]$

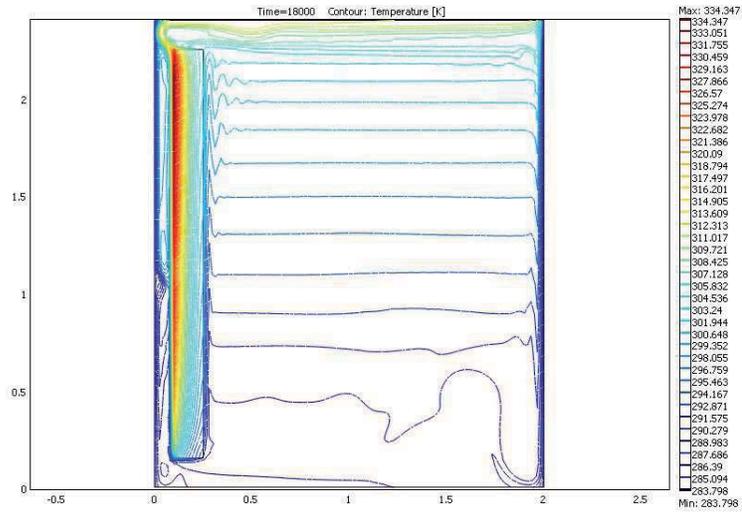


Figura 6.19: 18.000 [s]

- $T_{isot-min} = 283,798 [K]$
- $T_{isot-max} = 334,347 [K]$

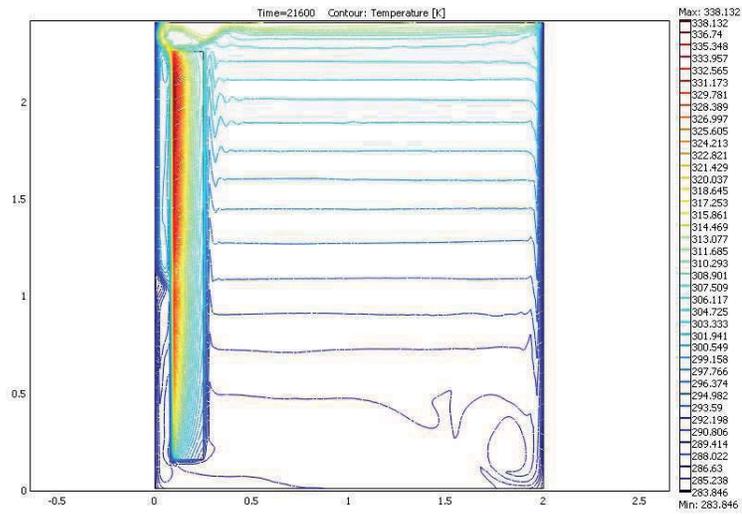


Figura 6.20: 21.600 [s]

- $T_{isot-min} = 283,846 [K]$
- $T_{isot-max} = 338,132 [K]$

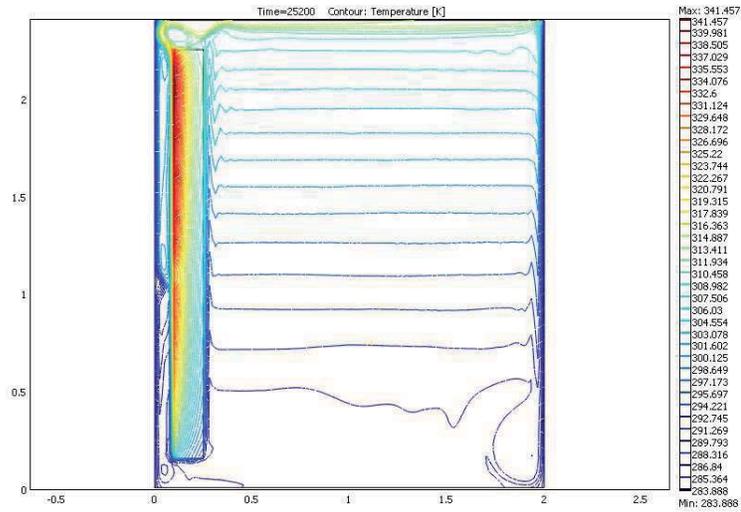


Figura 6.21: 25.200 [s]

- $T_{isot-min} = 283,888 [K]$
- $T_{isot-max} = 341,457 [K]$

En donde:

- $T_{isot-min}$ y $T_{isot-max}$ corresponden a las isotermas con menor y mayor temperatura en las Figuras, respectivamente.

Las isotermas correspondientes a las menores temperatura se encuentran en la fuente fría y están expresadas por el color azul. Las isotermas correspondientes a las mayores temperaturas se encuentran representadas por el color rojo.

Lo que se muestra en estas Figuras es la estratificación de la temperatura, los flujos ascendentes en la cara derecha del muro, los flujos descendentes en la fuente fría de la derecha y el choque de una corriente fría con el piso.

6.2.3. Contornos del Campo de Velocidad

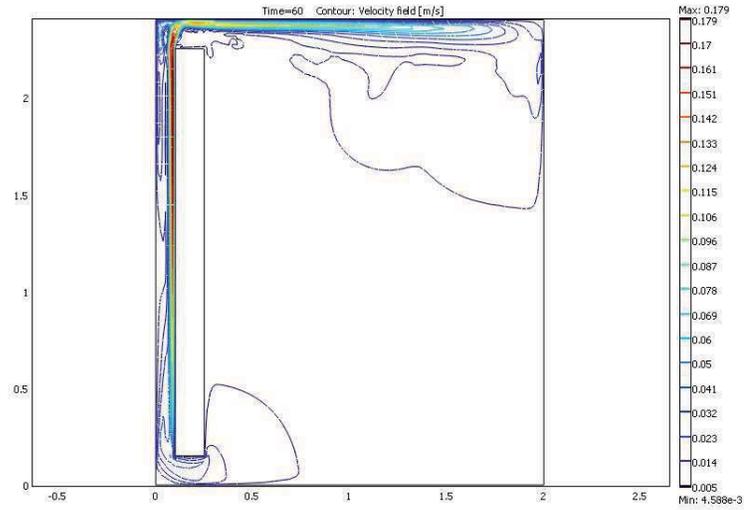


Figura 6.22: 600 [s]

- $V_{isot-min} = 4,588 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,179$ [m/s]
- $V_{max} = 0,195$ [m/s]

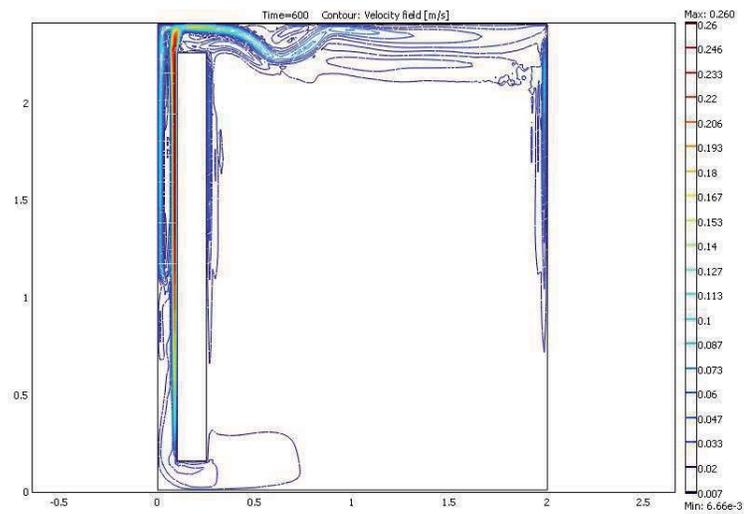


Figura 6.23: 600 [s]

- $V_{isot-min} = 6,66 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,260$ [m/s]
- $V_{max} = 0,298$ [m/s]

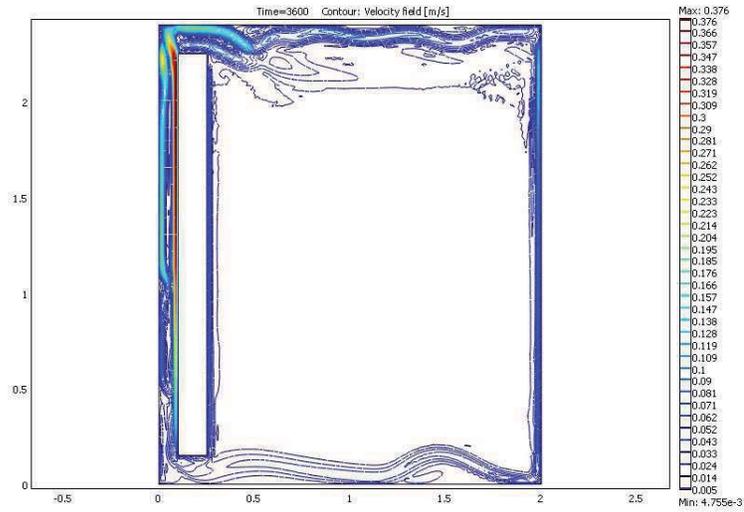


Figura 6.24: 3.600 [s]

- $V_{isot-min} = 4,755 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,376$ [m/s]
- $V_{max} = 0,439$ [m/s]



Figura 6.25: 7.200 [s]

- $V_{isot-min} = 5,283 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,417$ [m/s]
- $V_{max} = 0,510$ [m/s]

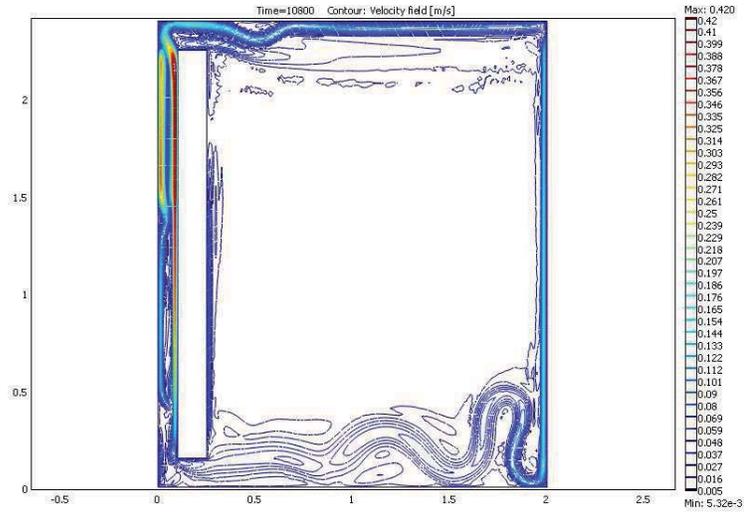


Figura 6.26: 10.800 [s]

- $V_{isot-min} = 5,32 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,420$ [m/s]
- $V_{max} = 0,525$ [m/s]

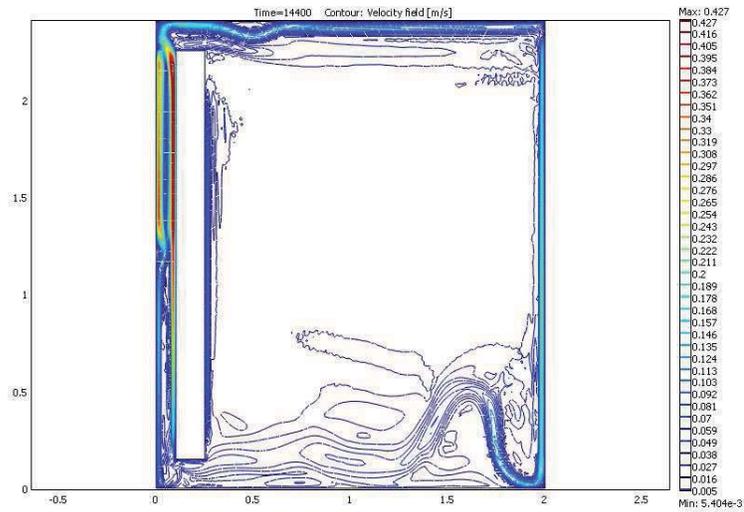


Figura 6.27: 14.400 [s]

- $V_{isot-min} = 5,404 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,427$ [m/s]
- $V_{max} = 0,536$ [m/s]

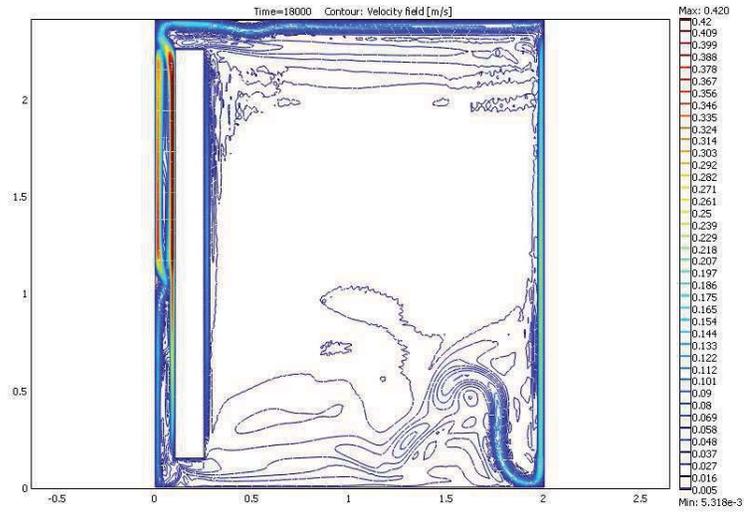


Figura 6.28: 18.000 [s]

- $V_{isot-min} = 5,318 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,420$ [m/s]
- $V_{max} = 0,536$ [m/s]

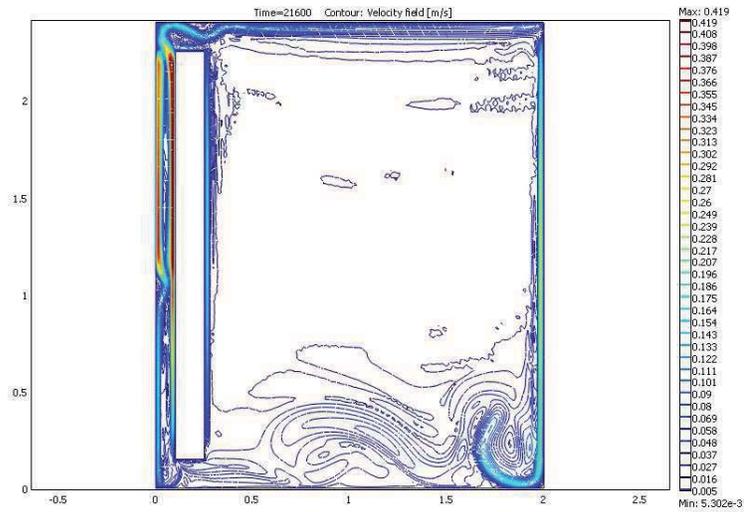


Figura 6.29: 21.600 [s]

- $V_{isot-min} = 5,302 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,419$ [m/s]
- $V_{max} = 0,542$ [m/s]

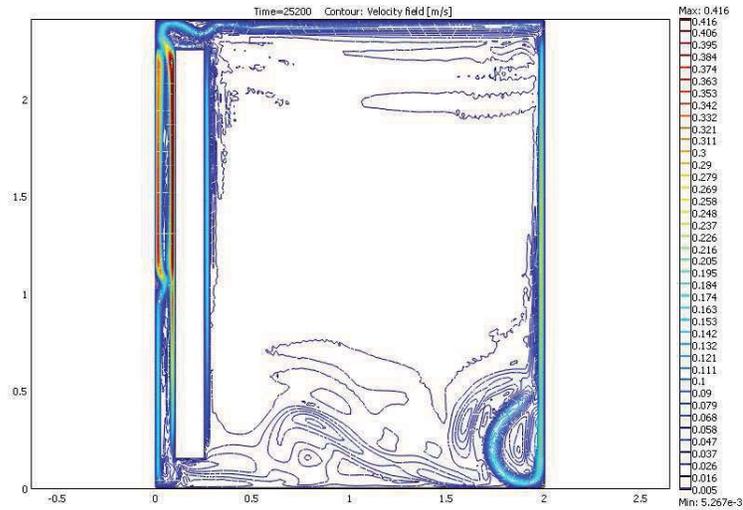


Figura 6.30: 25.200 [s]

- $V_{isot-min} = 5,267 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,416$ [m/s]
- $V_{max} = 0,533$ [m/s]

En donde:

- $V_{isot-min}$, $V_{isot-max}$ corresponden a las isotermas con menor y mayor temperatura en las Figuras, respectivamente. Por otro lado, V_{max} corresponde a la velocidad máxima absoluta.

La interpretación de los colores es la misma del modelo a escala: los máximos corresponden al color rojo. Estos se dan en la fuente fría, y en el canal de colección, principalmente. Sin embargo, también se aprecia una zona de circulación en la cara del muro que da hacia el espacio habitable.

La circulación es, principalmente, en las paredes, techo y piso del espacio habitable. El núcleo está, prácticamente, en reposo y confirma la estratificación de la temperatura.

6.2.4. Vectores del Campo de Velocidad

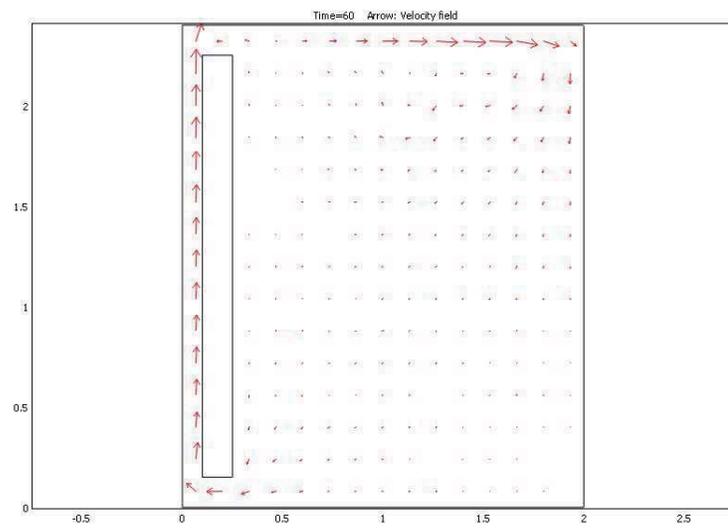


Figura 6.31: 60 [s]

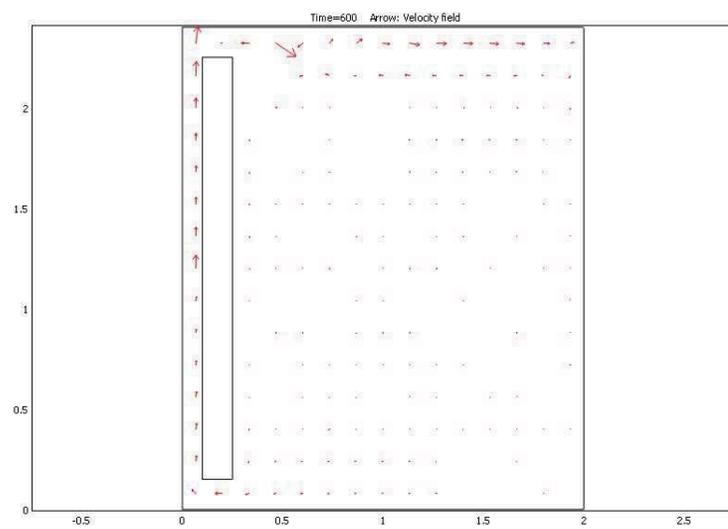


Figura 6.32: 600 [s]

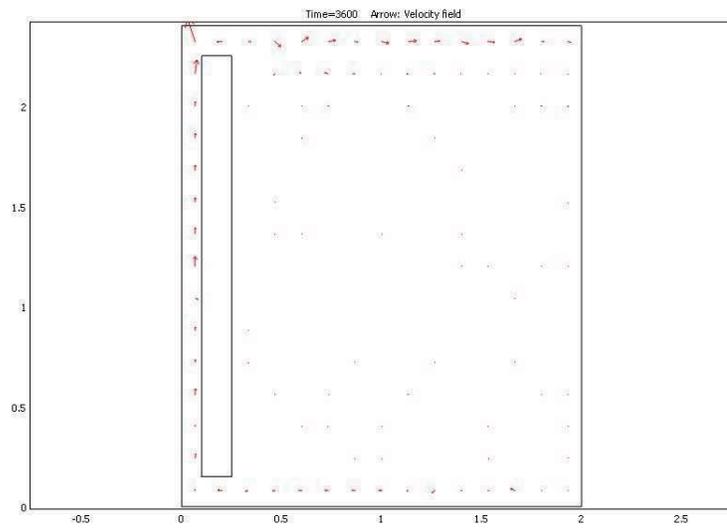


Figura 6.33: 3.600 [s]

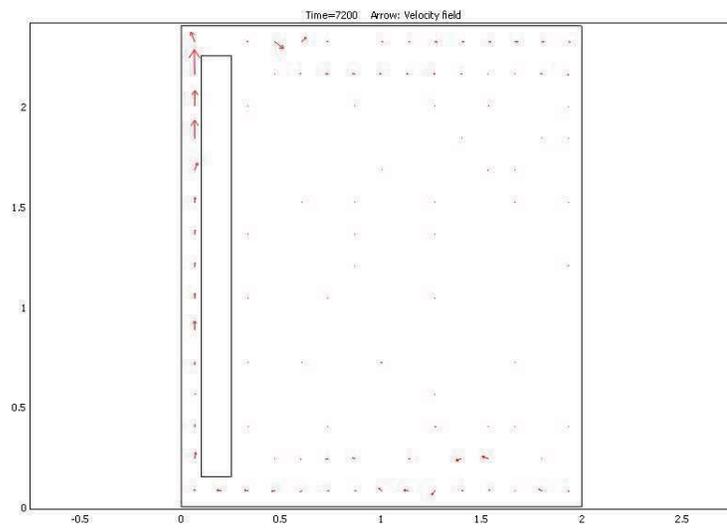


Figura 6.34: 7.200 [s]

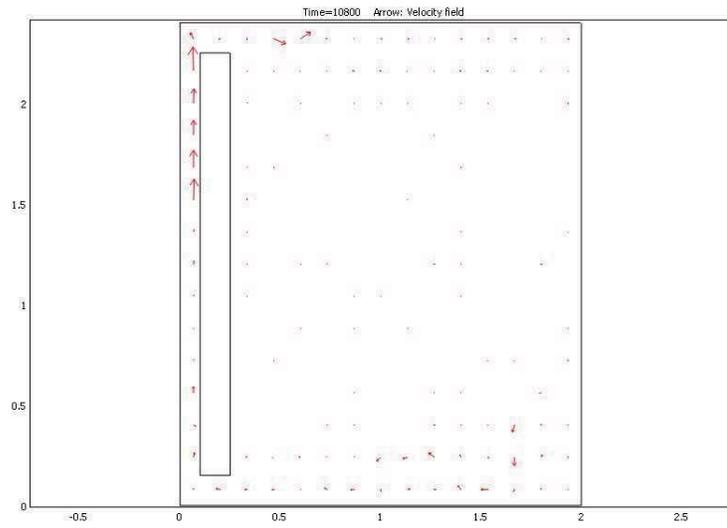


Figura 6.35: 10.800 [s]

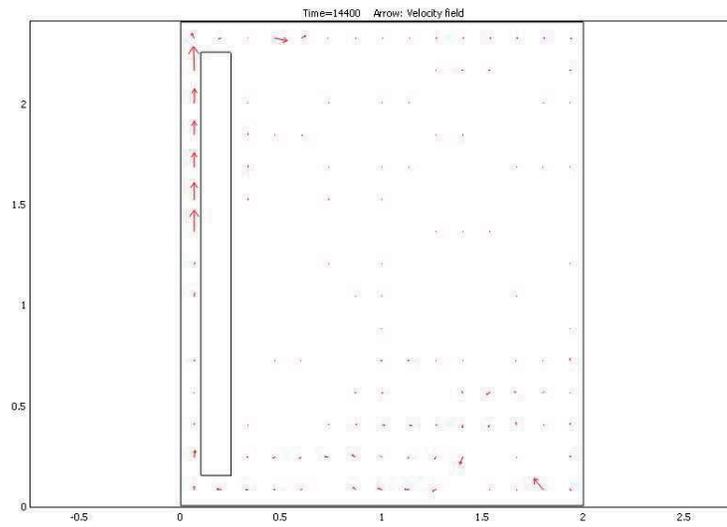


Figura 6.36: 14.400 [s]

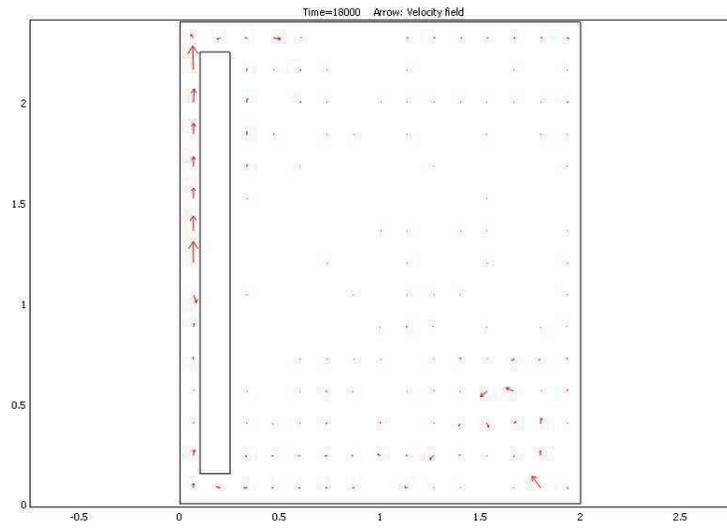


Figura 6.37: 18.000 [s]

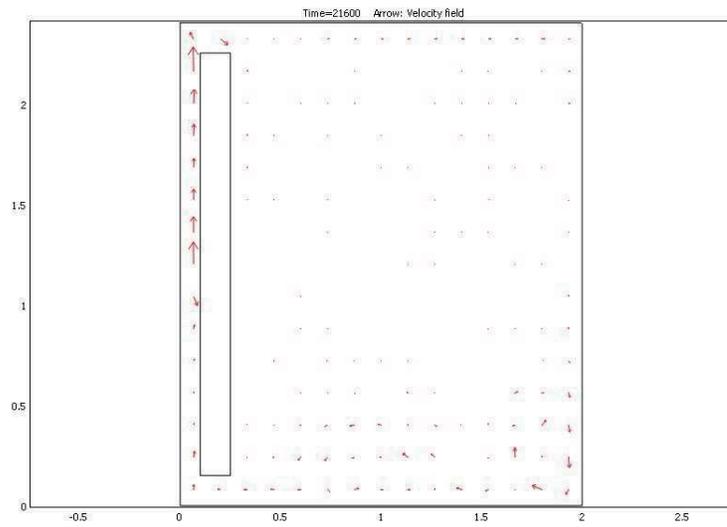


Figura 6.38: 21.600 [s]

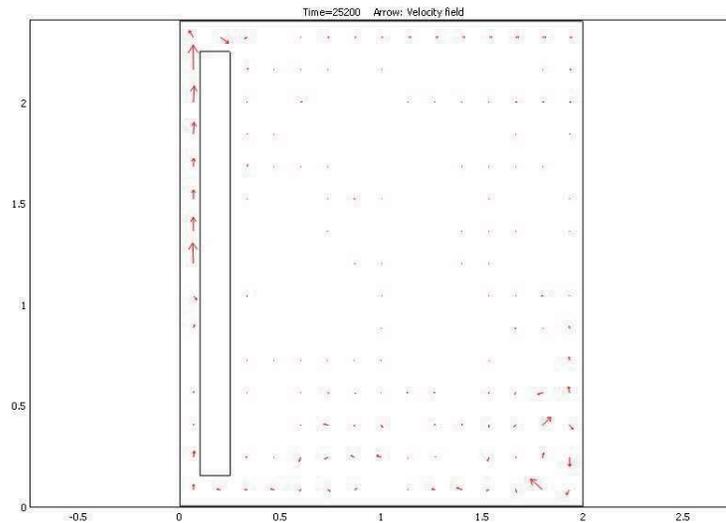


Figura 6.39: 25.200 [s]

El movimiento es ascendente en el canal de colección. En la fuente fría, no se aprecia un claro movimiento descendente, excepto en la parte baja de esta zona.

Sólo hay velocidades apreciables en la esquina inferior derecha del espacio y en la mitad superior del canal de colección.

6.3. Validación del Modelo

La Figura 6.40 corresponde a un gráfico de la temperatura en función del tiempo para un el punto correspondiente al vértice superior izquierdo del muro.

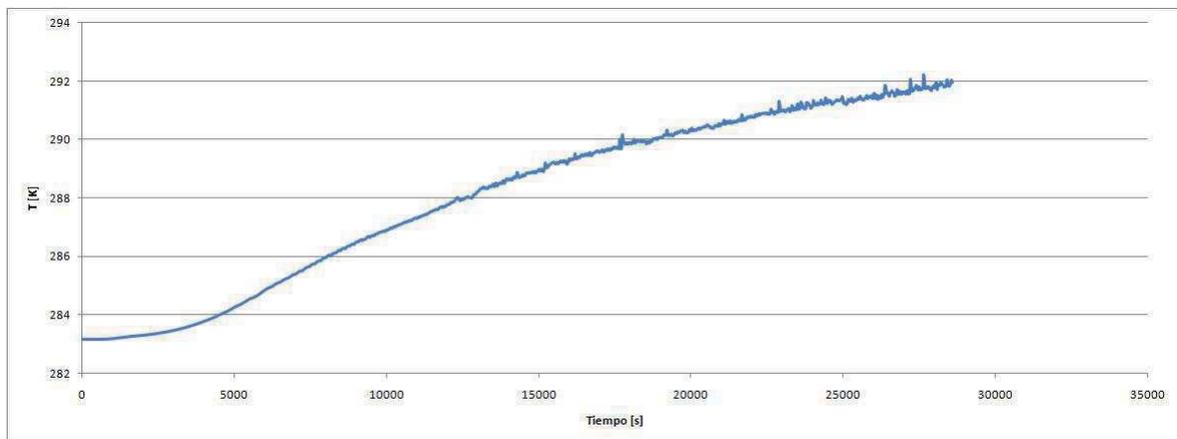


Figura 6.40: T versus t

Se aprecia una fuerte oscilación térmica y también es palpable que hasta los 28.000 [s], el modelo aún no alcanza el régimen permanente, pues la temperatura sigue aumentando.

Para estudiar el comportamiento de la curva, se propone refinar el modelo. El inconveniente de realizar esto es que se juega al límite con los recursos computacionales disponibles. Por lo tanto, antes de proceder a realizar un refinamiento, es necesario estudiar la cantidad máxima de elementos con los que es posible trabajar.

6.4. Refinamiento de la Malla

Para corroborar la validez de la curva mostrada en la sección anterior, se procedió a refinar la malla. En primera instancia se comprobó que el equipo computacional fue incapaz de trabajar con un refinamiento que abarcara la geometría en su totalidad. Por lo tanto, se procedió a realizar pruebas con un refinamiento parcial para encontrar el número máximo de elementos con los que el sistema podía trabajar normalmente.

Tal como ya se ha señalado, en primera instancia se trabajó con 9.056 elementos triangulares. A partir de esto -y tras numerosos ensayos- se determinó que el máximo número de elementos para poder trabajar son 9.666 elementos triangulares. La Tabla 6.3 muestra información de la malla utilizada.

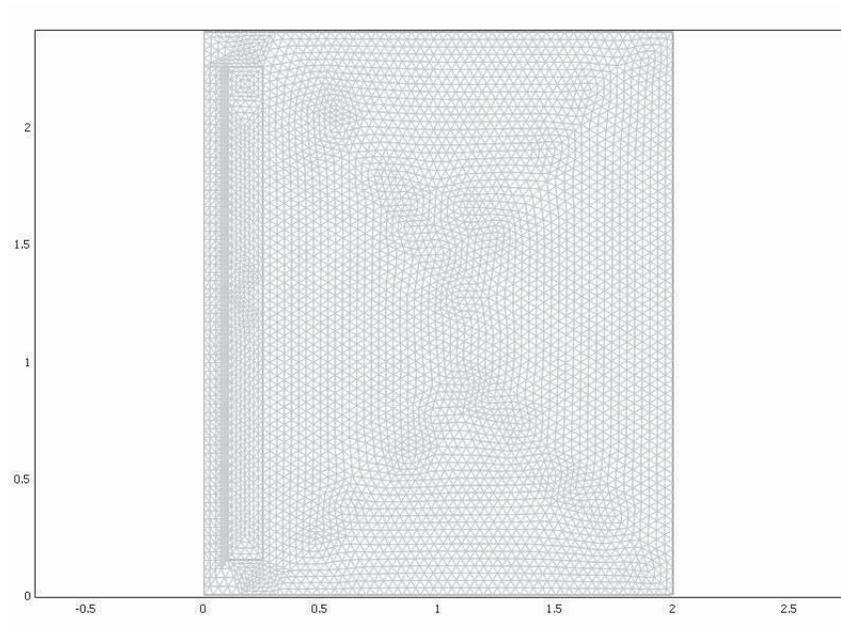


Figura 6.41: Malla Refinada

Cuadro 6.3: Características de la malla utilizada

Grados de libertad	59.440
Puntos de malla	4.950
Elementos	9.666
Elementos de borde	416

Con la malla refinada, se logró simular hasta los 21.600 [s]. De ahí en adelante, el equipo computacional no logró avanzar. Para ilustrar los efectos que acarrea un refinamiento, la Figura 6.42 compara las curvas temperatura versus tiempo con y sin refinamiento:

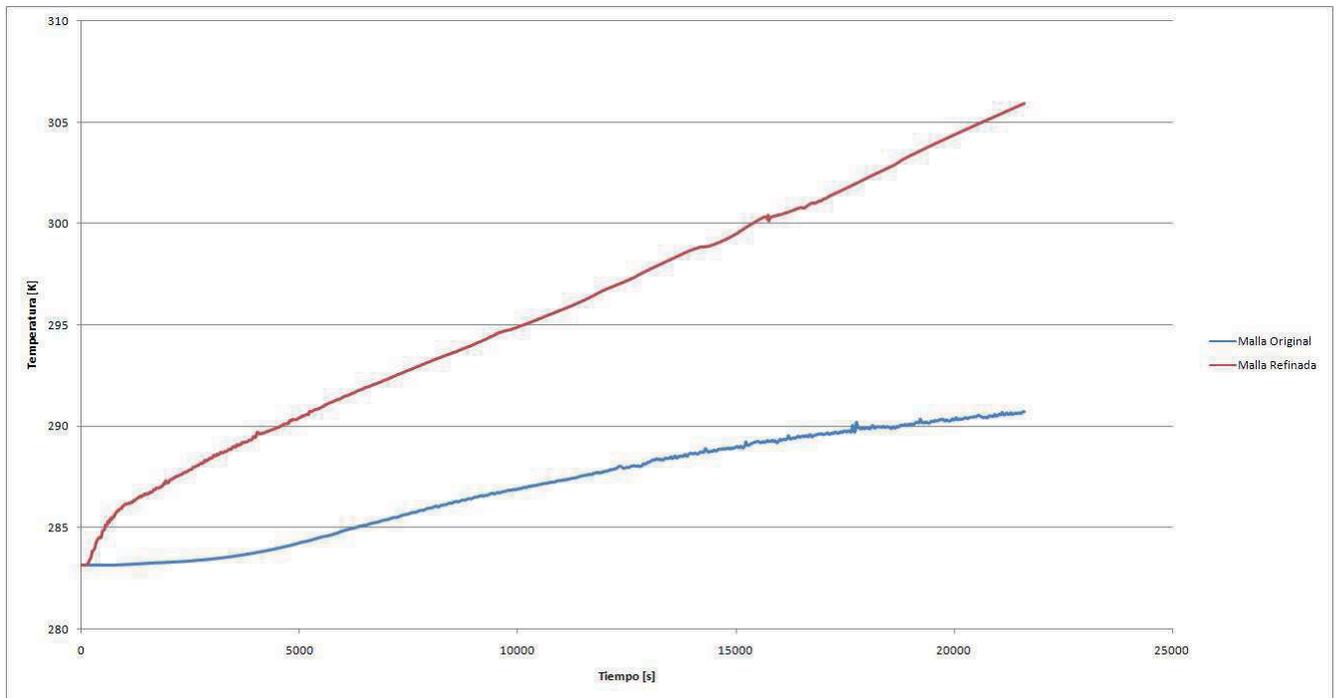


Figura 6.42: Curvas T-t

Tal como en el modelo a escala, se aprecia que los resultados dependen directamente de la malla utilizada. En el caso del modelo a estala real, los resultados que arroja un refinamiento difieren claramente, presentando mayores temperaturas.

La temperatura con la malla refinada se aparta progresivamente de la correspondiente a la malla gruesa, llegando a diferir hasta en un 5,2% a los 20.000 [s].

Capítulo 7

Análisis de Resultados

En este capítulo, lo que se busca es dar una interpretación al fenómeno estudiado y su aplicación práctica. Primero, se comenzará asegurando que las magnitudes de las variables obtenidas son razonables.

Para esto, se volvió a correr el modelo a escala real bajo 3 casos distintos:

- Caso 1: $Q = 500 \text{ [W/m}^2\text{]}$ (caso estudiado en el capítulo anterior).
- Caso 2: $Q = 250 \text{ [W/m}^2\text{]}$.
- Caso 3: $Q = 250 \text{ [W/m}^2\text{]}$ sin comunicación entre el canal de colección y el espacio habitable.

7.1. Caso 2: $Q = 250 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

La única diferencia con el caso estudiado en el capítulo anterior se encuentra en la variación del flujo de calor, que se redujo a la mitad. Desde el punto de vista de la simulación, a diferencia del caso con flujo de $500 \text{ [W/m}^2\text{]}$, ésta corrió sin problemas, incluso llegando hasta casi los 30.000 [s] . Los demás parámetros, geometría y malla se conservaron intactos.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas:

7.1.1. Evolución de Temperatura

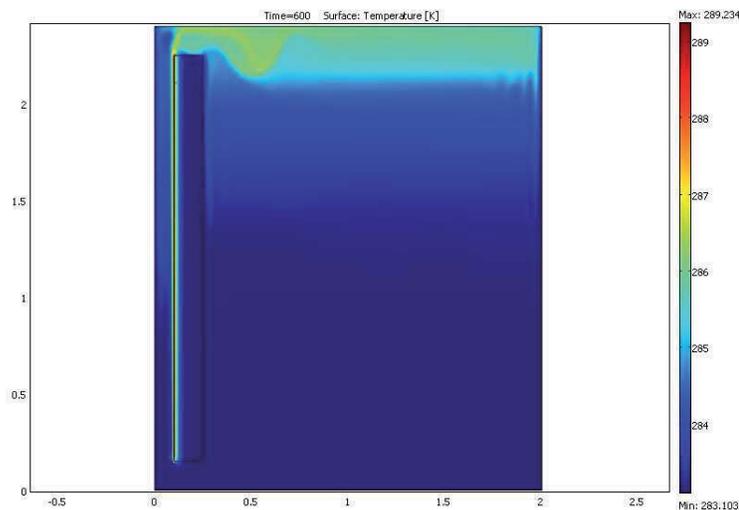


Figura 7.1: 600 [s]

■ $T_{max} = 289,234 [K]$

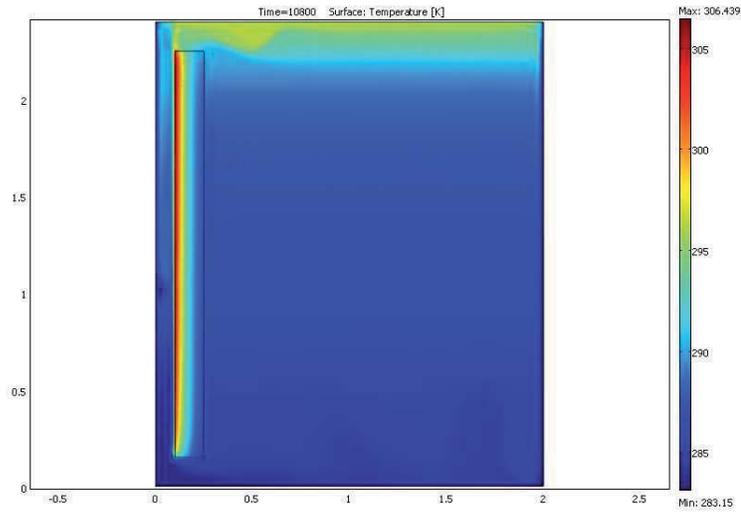


Figura 7.2: 10.800 [s]

■ $T_{max} = 306,439 [K]$

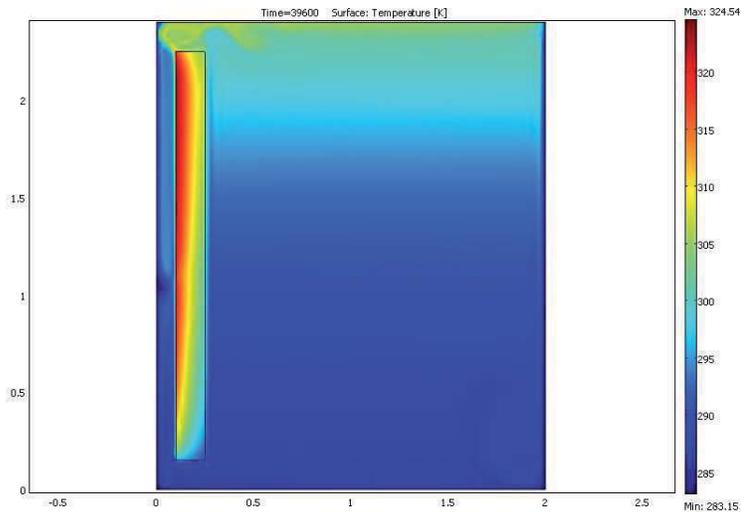


Figura 7.3: 39.600 [s]

■ $T_{max} = 324.54 [K]$

En todas las imágenes se puede apreciar que el máximo se encuentra en el vértice superior izquierdo del muro (la cara que da al canal de colección), mientras que los mínimos -siempre expresados en azul- se encuentran en varias zonas, dependiendo de cada imagen.

7.1.2. Contornos de Temperatura

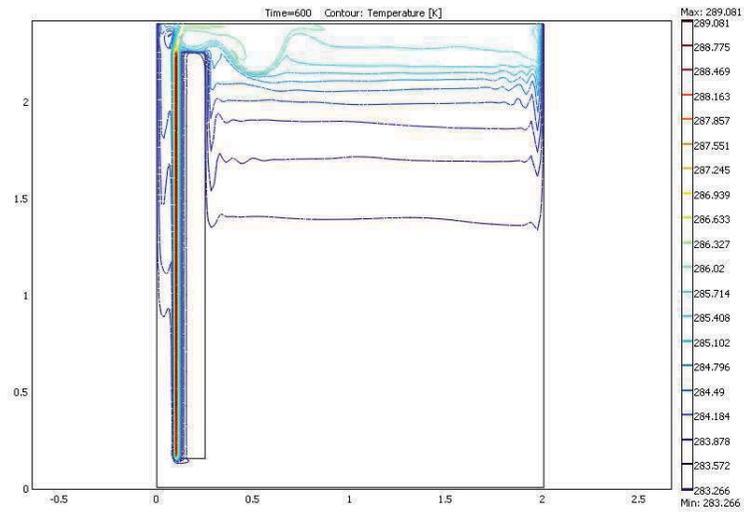


Figura 7.4: 600 [s]

- $T_{isot-min} = 283,266 [K]$
- $T_{isot-max} = 289,081 [K]$

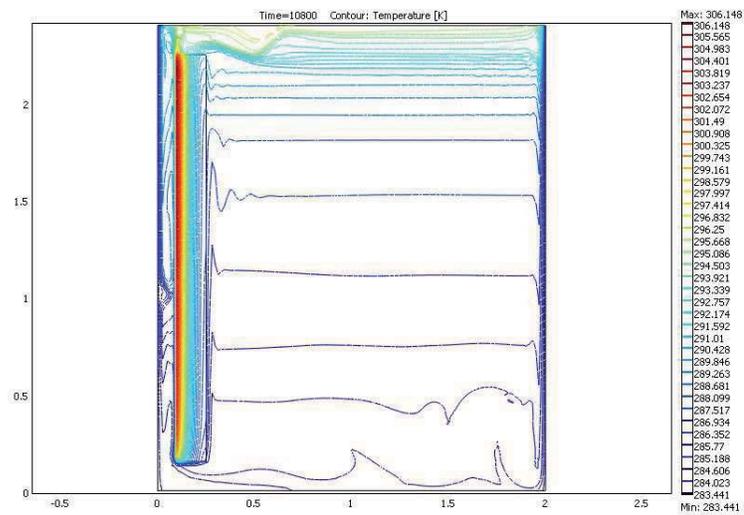


Figura 7.5: 10.800 [s]

- $T_{isot-min} = 283,441 [K]$
- $T_{isot-max} = 306,148 [K]$

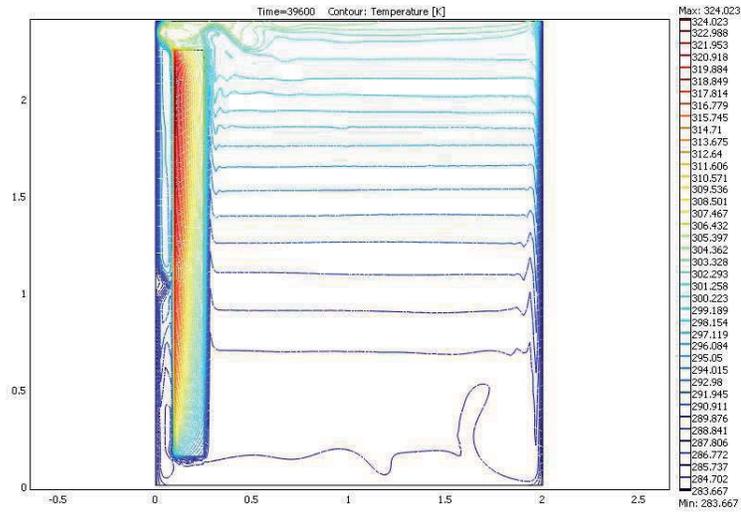


Figura 7.6: 39.600 [s]

- $T_{isot-min} = 283,667 [K]$
- $T_{isot-max} = 324,023 [K]$

Las isothermas correspondientes a las menores temperatura se encuentran en la fuente fría y están expresadas por el color azul. Las isothermas correspondientes a las mayores temperaturas se encuentran representadas por el color rojo.

7.1.3. Contorno del Campo de Velocidad

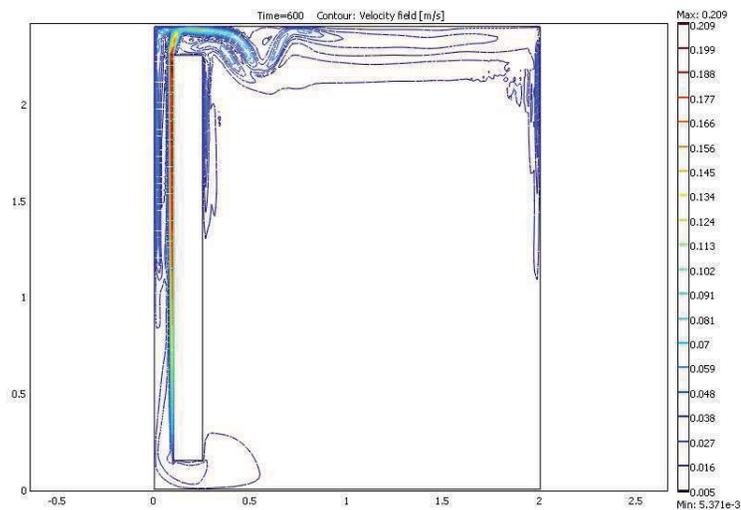


Figura 7.7: 3.600 [s]

- $V_{isot-min} = 5,371 \cdot 10^{-3} [m/s]$
- $V_{isot-max} = 0,209 [m/s]$
- $V_{max} = 0,215 [m/s]$

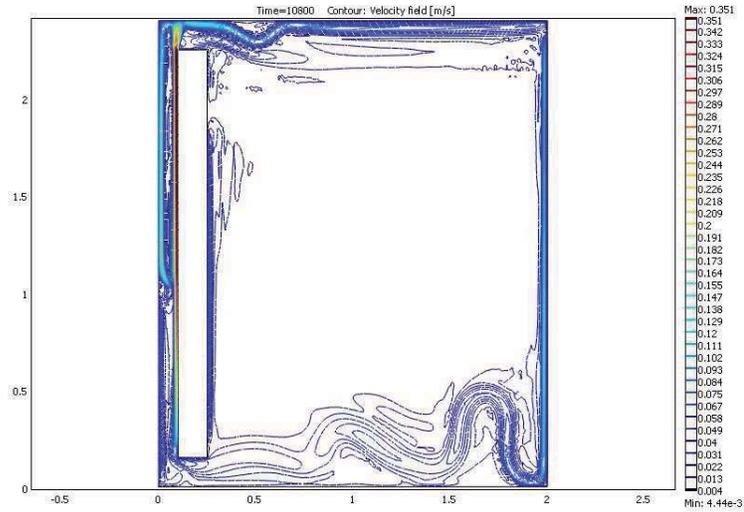


Figura 7.8: 10.800 [s]

- $V_{isot-min} = 4,44 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,351$ [m/s]
- $V_{max} = 0,392$ [m/s]

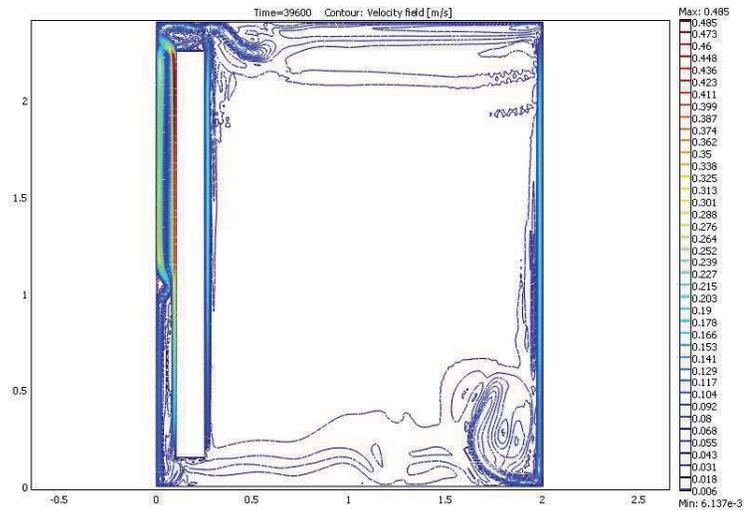


Figura 7.9: 39.600 [s]

- $V_{isot-min} = 6,137 \cdot 10^{-3}$ [m/s]
- $V_{isot-max} = 0,485$ [m/s]
- $V_{max} = 0,525$ [m/s]

La interpretación de los colores es la misma del modelo a escala: los máximos corresponden al color rojo. Estos se dan en la fuente fría, y en el canal de colección, principalmente. Sin embargo, también se aprecia una zona de circulación en la cara del muro que da hacia el espacio habitable.

7.1.4. Vectores del Campo de Velocidad

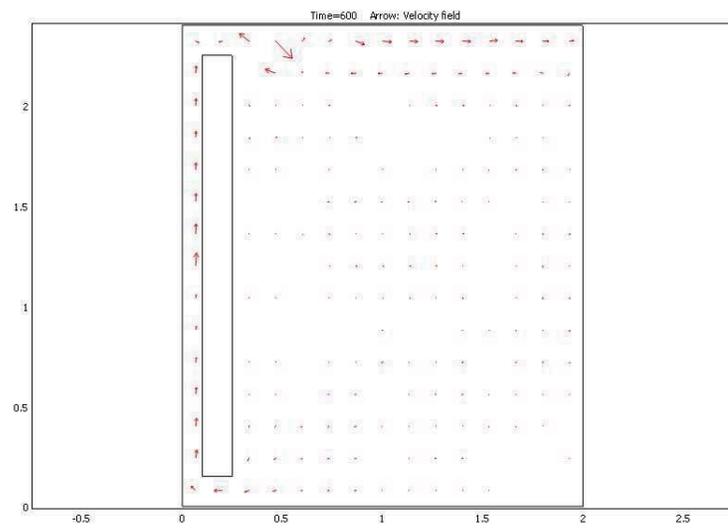


Figura 7.10: 600 [s]

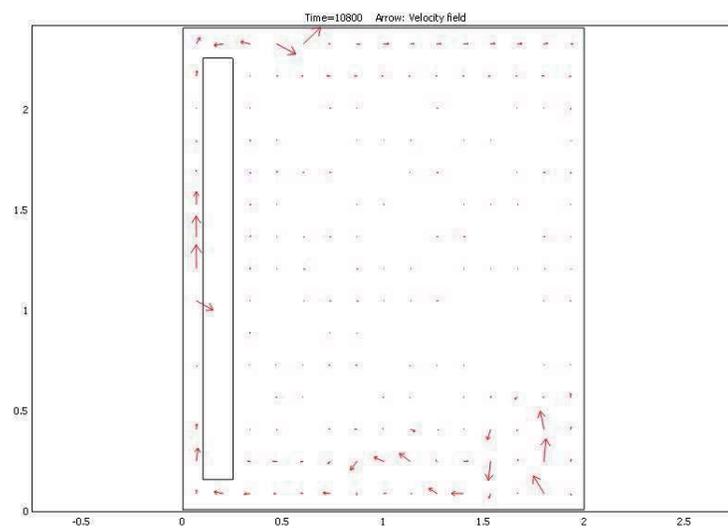


Figura 7.11: 10.800 [s]

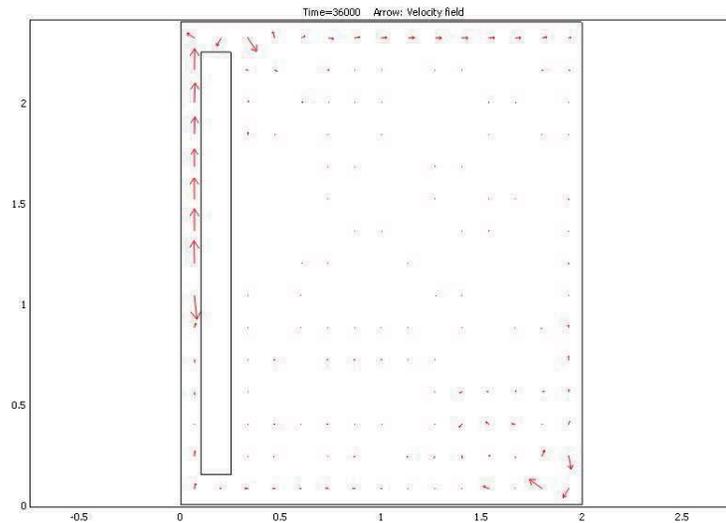


Figura 7.12: 36.000 [s]

El movimiento es ascendente en el canal de colección. En la fuente fría, no se aprecia un claro movimiento descendente, excepto en la parte baja de esta zona.

7.2. Caso 3: $Q = 250 [W/m^2]$ Sin Comunicación Entre Los Espacios.

La importancia de este caso es que permite saber si el efecto de calefacción sobre el ambiente se debe principalmente a la transferencia de calor por conducción a través del muro o si se debe a la circulación de aire entre el espacio habitable y el canal de colección.

La Figura 7.13 muestra la geometría utilizada en esta oportunidad (8.608 elementos triangulares):

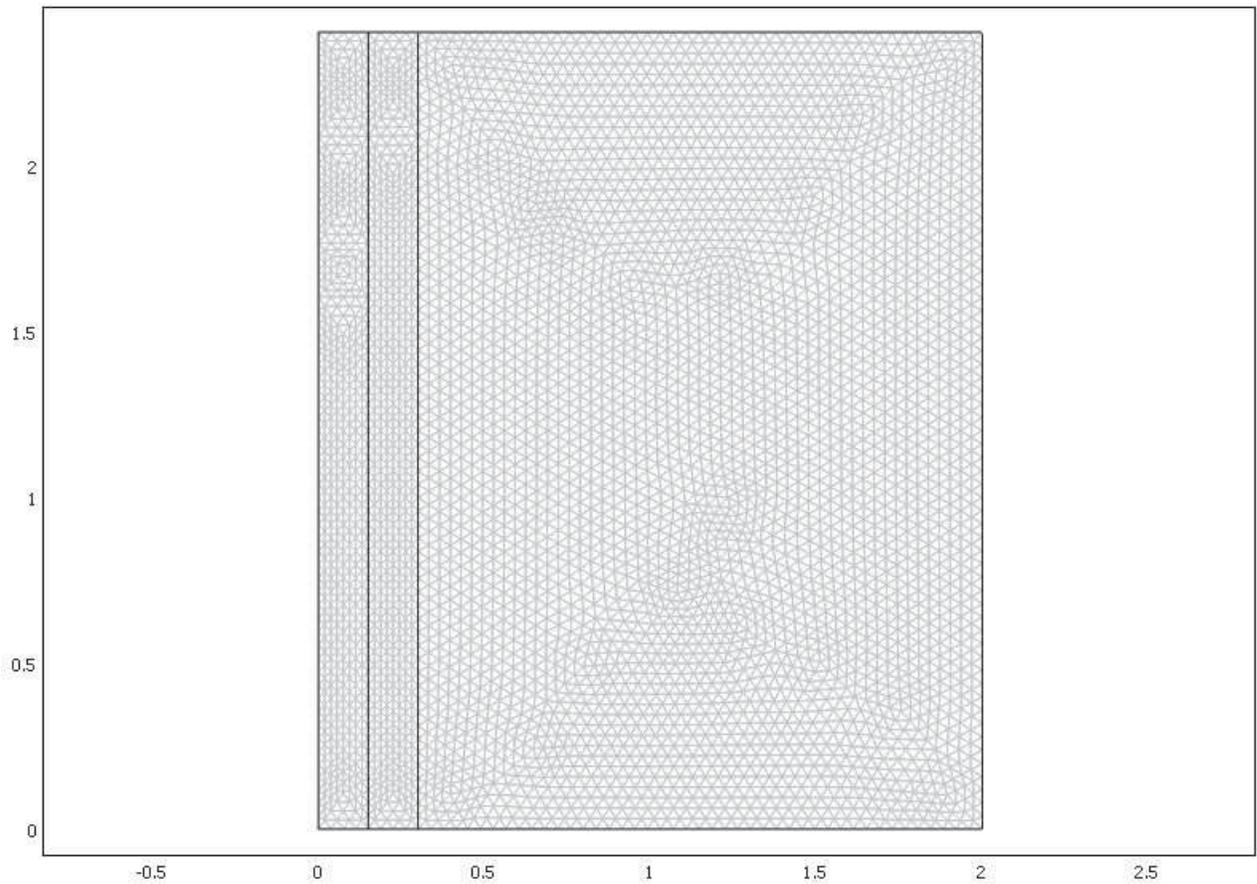


Figura 7.13: Geometría sin comunicación entre el canal de colección y el espacio habitable

La separación entre el muro de ladrillos y las paredes es infinitesimal. Esa es la razón por la que el mallado se hace mas fino en donde deberían ir los canales de circulación del aire. Una dificultad de esto es que el refinamiento de la malla se casi imposible y solo se logró simular hasta los 36.000 [s].

Tal como en los modelos anteriores, el flujo de calor se encuentra en la cara izquierda del muro acumulador y se consideraron $Q = 250 [W/m^2]$. Las condiciones de borde son las mismas usadas en los modelos anteriores. A continuación se muestran las gráficas.

7.2.1. Evolución de Temperatura

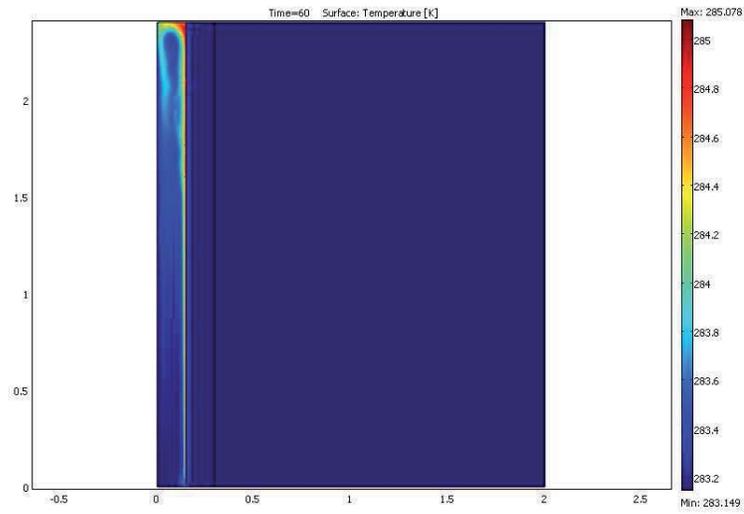


Figura 7.14: 60 [s]

- $T_{max} = 285,078 [K]$

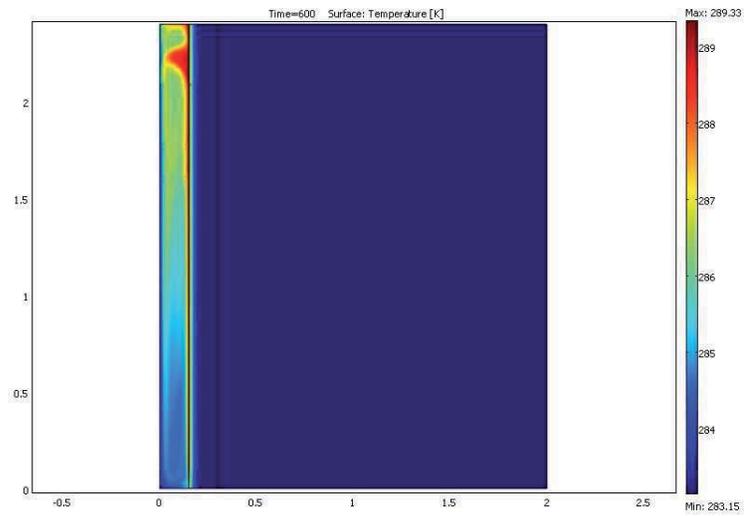


Figura 7.15: 600 [s]

- $T_{max} = 289,33 [K]$

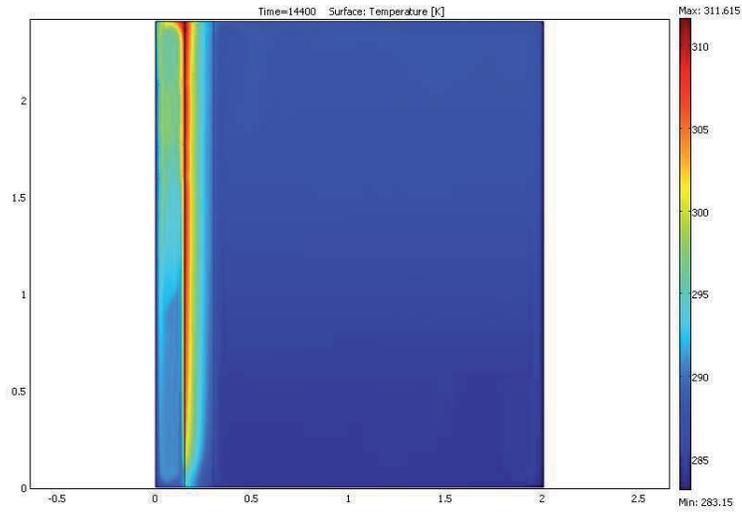


Figura 7.16: 14.400 [s]

- $T_{max} = 311,615 [K]$

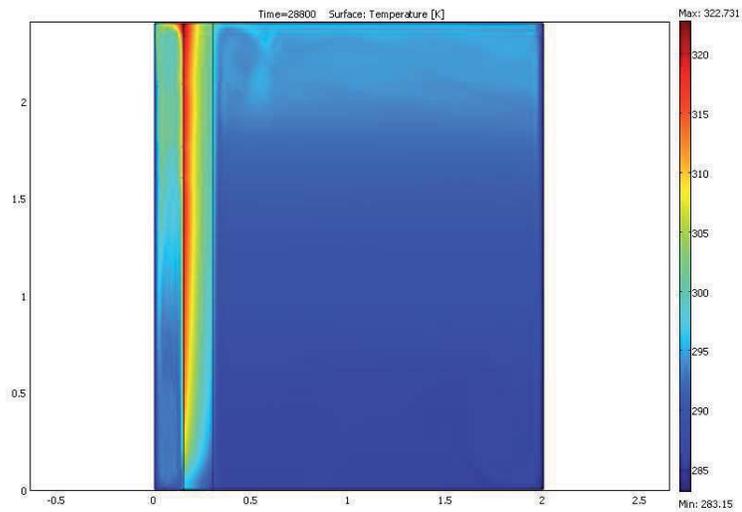


Figura 7.17: 28.800 [s]

- $T_{max} = 322,731 [K]$

La Figura 7.18 muestra una comparativa de la distribución de temperaturas en función de x para $t = 28.800 [s]$ e $y = 0 [m]$ para los 3 casos estudiados:

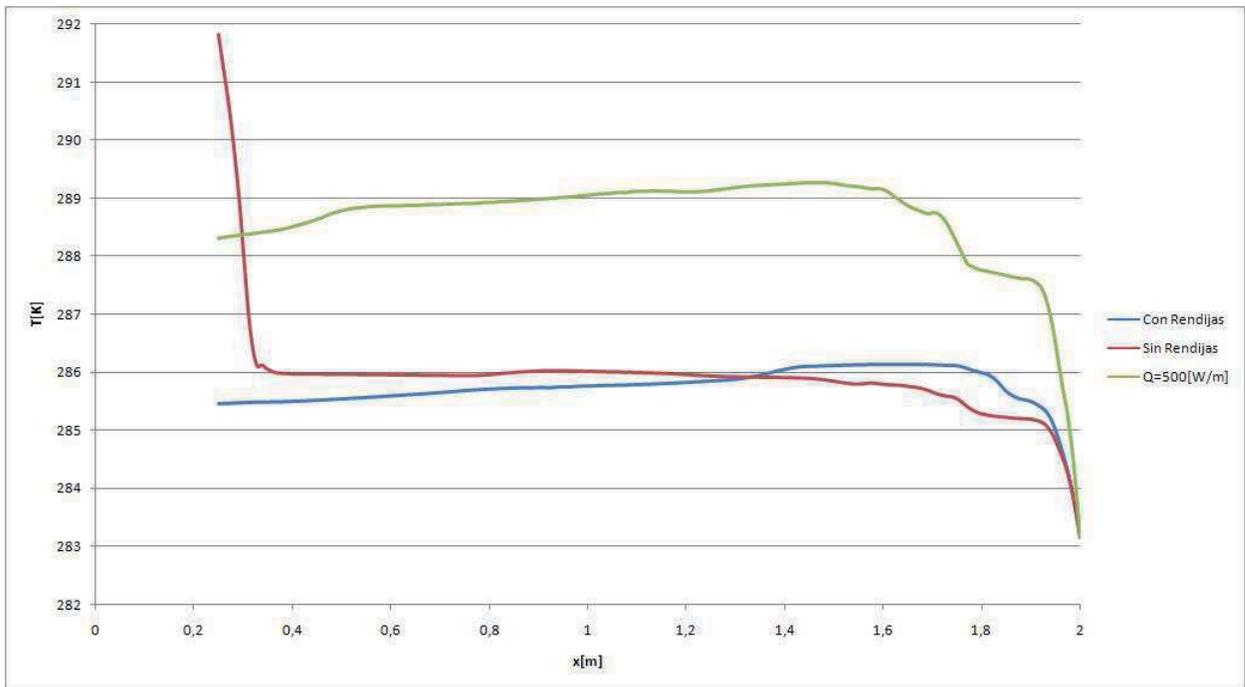


Figura 7.18: Distribución de Temperaturas en x para $t = 28.800 [s]$ e $y = 0 [m]$:

7.2.2. Contornos de Temperatura

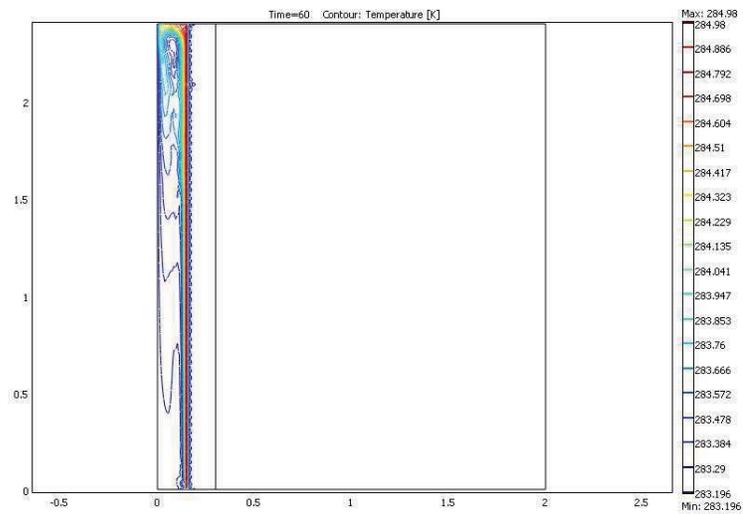


Figura 7.19: 60 [s]

- $T_{isot-min} = 283,196 [K]$
- $T_{isot-max} = 284,980 [K]$

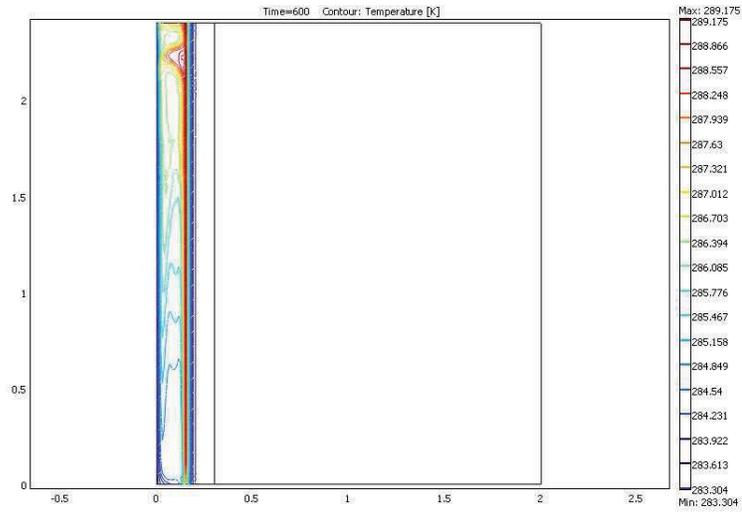


Figura 7.20: 600 [s]

- $T_{isot-min} = 283,304 [K]$
- $T_{isot-max} = 289,175 [K]$

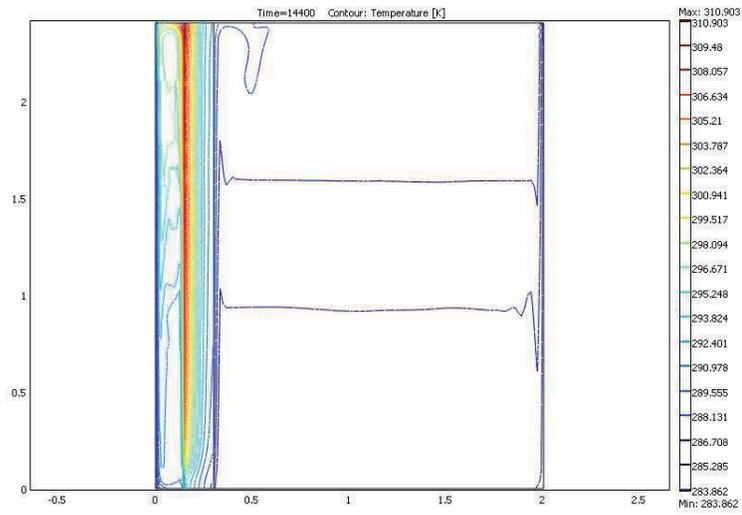


Figura 7.21: 14.400 [s]

- $T_{isot-min} = 283,862 [K]$
- $T_{isot-max} = 310,903 [K]$

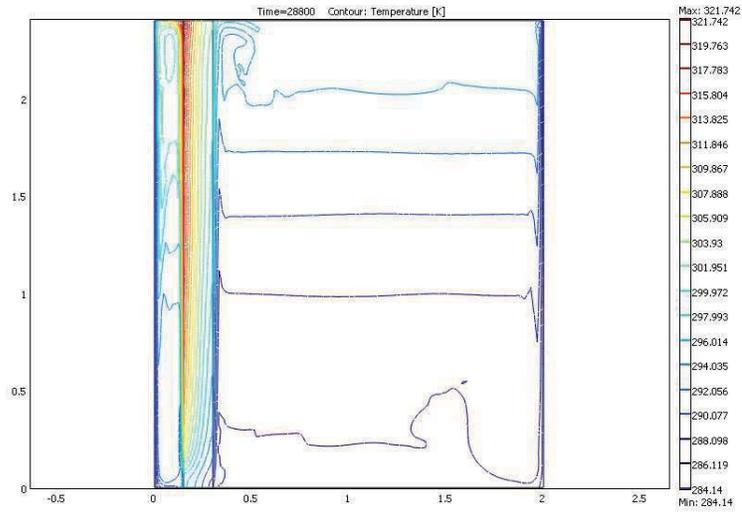


Figura 7.22: 28.800 [s]

- $T_{isot-min} = 284,140 [K]$
- $T_{isot-max} = 321,742 [K]$

7.2.3. Contorno del Campo de Velocidad

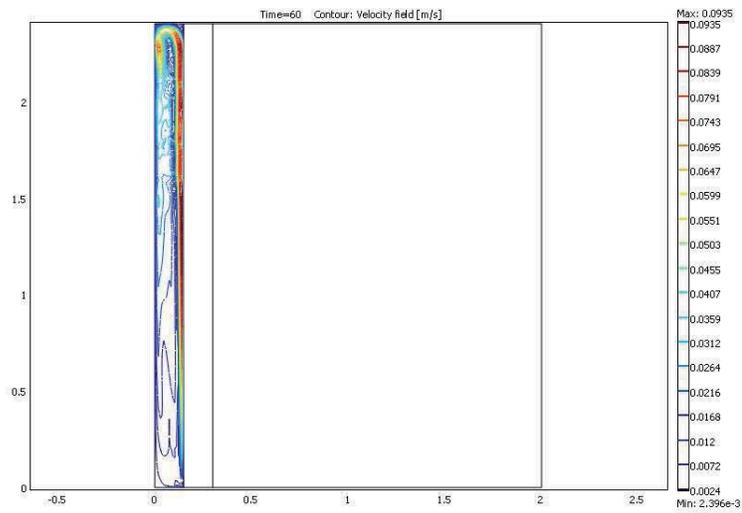


Figura 7.23: 60 [s]

- $V_{isot-min} = 2,396 \cdot 10^{-3} [m/s]$
- $V_{isot-max} = 0,0935 [m/s]$
- $V_{max} = 0,102 [m/s]$

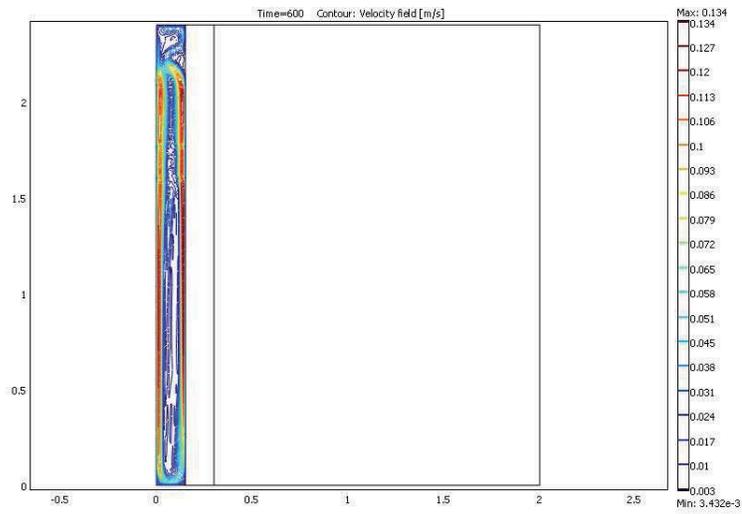


Figura 7.24: 600 [s]

- $V_{isot-min} = 2,396 \cdot 10^{-3} [m/s]$
- $V_{isot-max} = 0,0935 [m/s]$
- $V_{max} = 0,157 [m/s]$

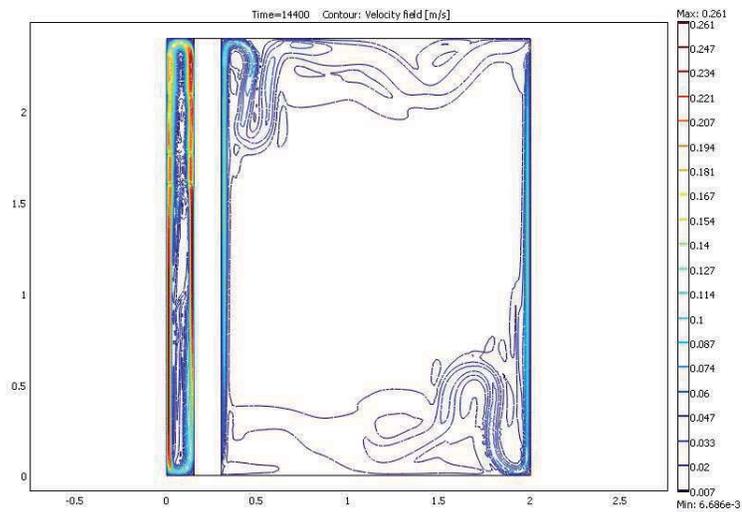


Figura 7.25: 14.400 [s]

- $V_{isot-min} = 6,686 \cdot 10^{-3} [m/s]$
- $V_{isot-max} = 0,261 [m/s]$
- $V_{max} = 0,300 [m/s]$

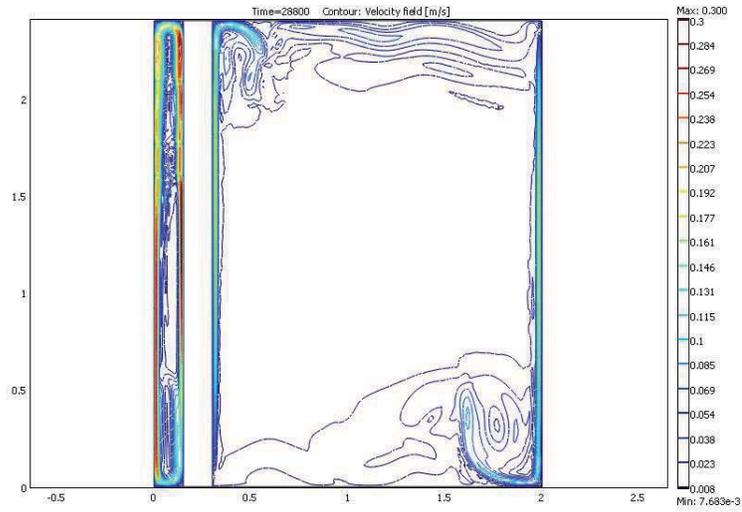


Figura 7.26: 28.800 [s]

- $V_{isot-min} = 7,683 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s]}$
- $V_{isot-max} = 0,300 \text{ [m/s]}$
- $V_{max} = 0,327 \text{ [m/s]}$

7.2.4. Vectores del Campo de Velocidad

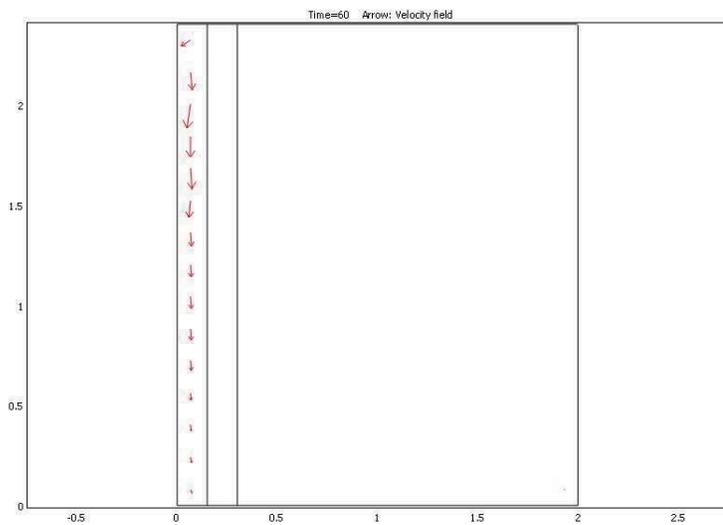


Figura 7.27: 60 [s]

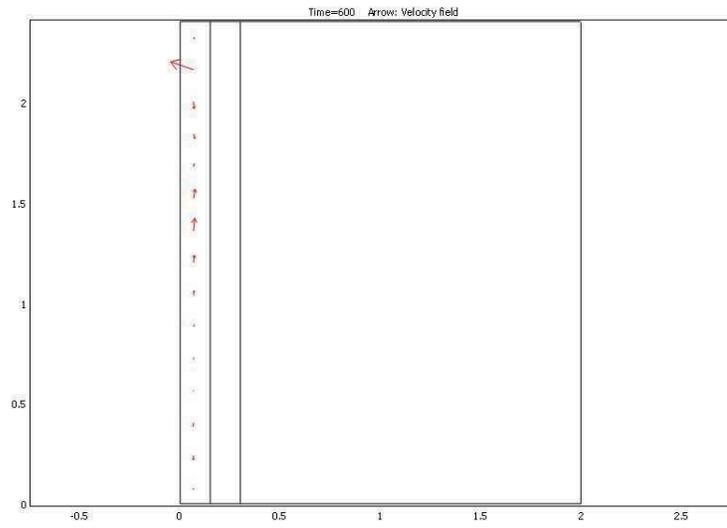


Figura 7.28: 600 [s]

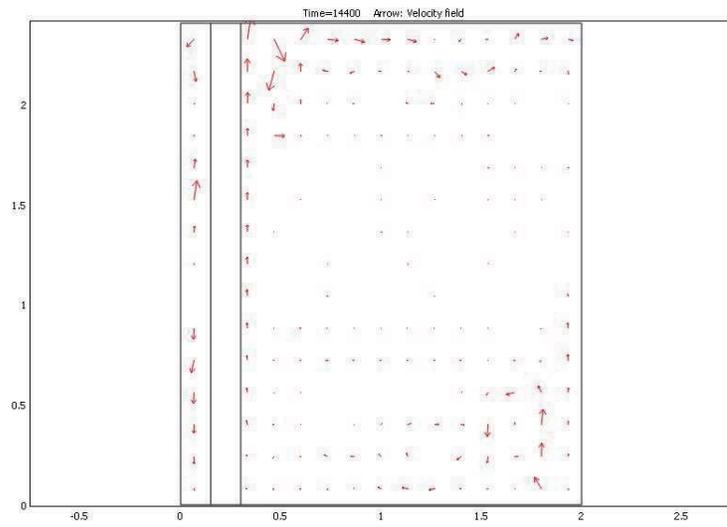


Figura 7.29: 14.400 [s]

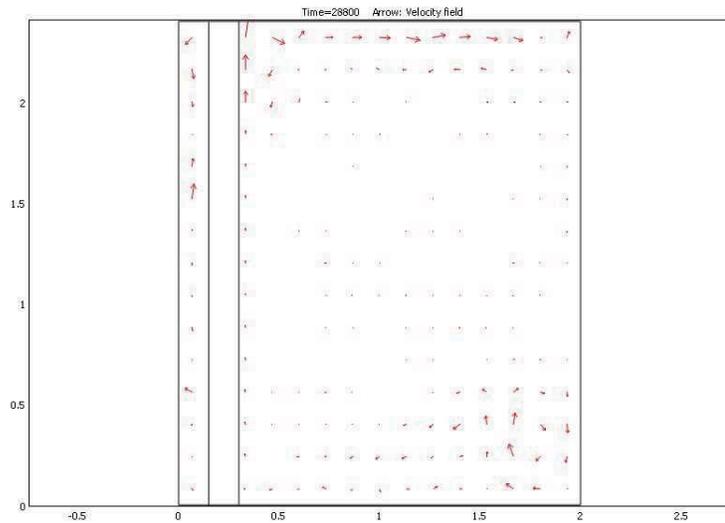


Figura 7.30: 28.800 [s]

7.3. Calor Transferido hacia el Espacio Habitable y Calor Perdido a Través de la Fuente Fría.

El flujo de calor perdido se determina como la integral Normal de calor. En terminos de Software, se debe seleccionar la opción *Boundary Integration* -seleccionado la superficie correspondiente al vidrio de la derecha, denominada con el número 8- y luego, se selecciona *Normal Total Heat Flux*. La Figuras 7.31,7.32 y 7.33 muestran las pérdidas asociadas a los 2 vidrios (fuentes frías, donde Q_1 es el flujo de calor a través del vidrio de la izquierda) para $Q = 250 [W/m]$, $Q = 250 [W/m]$ sin rendijas (acá Q_{10} representa a la pérdida asociada a la fuente fría de la derecha) y $Q = 500 [W/m]$.

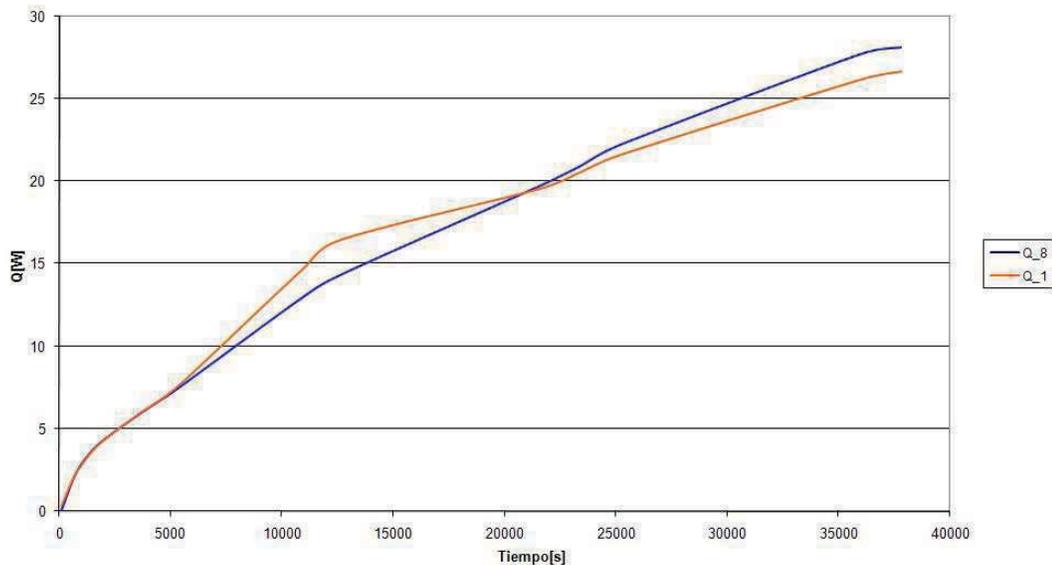


Figura 7.31: Pérdidas a través de los Vidrios para $Q = 250 [W/m]$

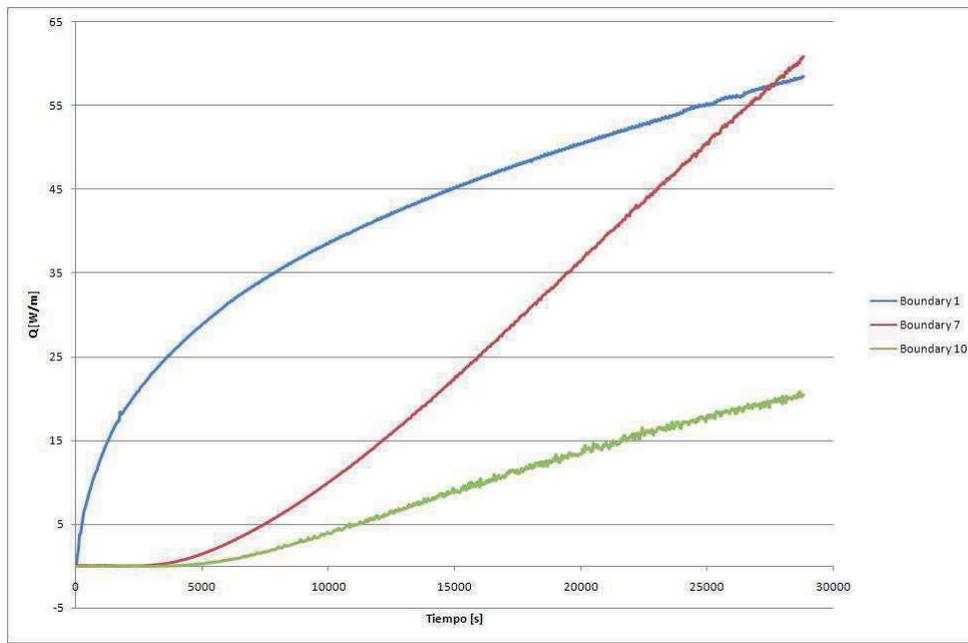


Figura 7.32: Pérdidas a través de los Vidrios para $Q = 250 [W/m]$ sin rendijas

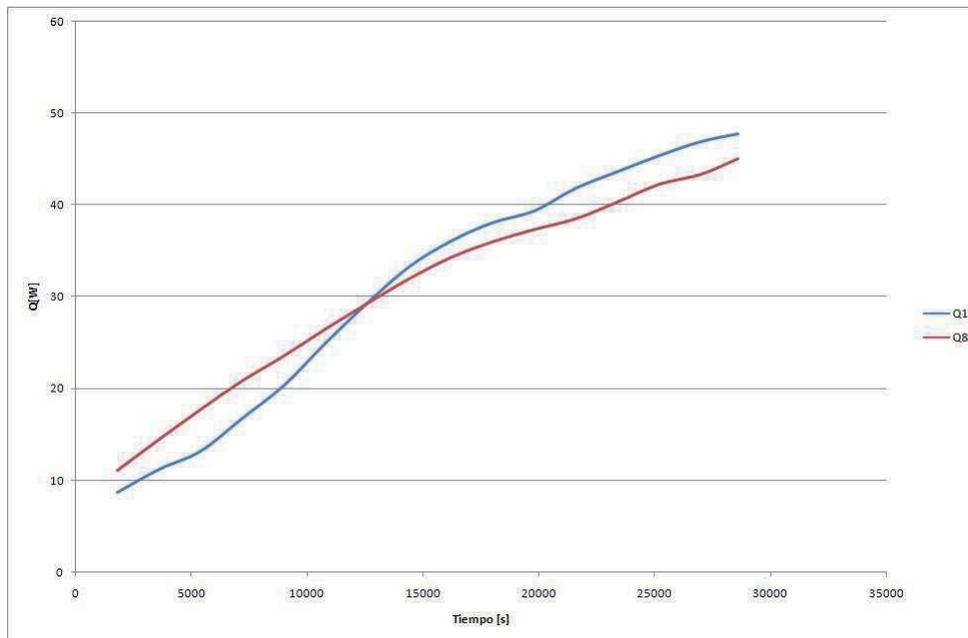


Figura 7.33: Pérdidas a través de los Vidrios para $Q = 500 [W/m]$

La Figura 7.31 muestra que las pérdidas por las ventanas son, prácticamente, iguales en todo instante. Esta situación cambia cuando se mira el gráfico correspondiente al modelo sin rendijas, Figura 7.32. La pérdida por la ventana del colector aumenta, siendo, por ejemplo, para $t = 10.000 [s]$ 3 veces la de la otra configuración al mismo flujo de calor en el muro.

Esto se debe a que en el modelo sin rendijas, el aire calentado por el muro debe girar hasta el vidrio del colector en lugar de entrar al espacio habitable. Es allí donde se genera una gran pérdida.

Por otro lado, el flujo de calor transferido lo hace por la superficie del muro que da al espacio habitable y también, se tiene un flujo de calor aportado por el flujo de aire calentado que atraviesa el canal de colección. Al igual que en flujo de calor perdido, el flujo de calor aportado por el muro acumulador se determina integrando la superficie.

Consideremos el instante $t = 37800$ [s]. Se obtiene un gráfico de velocidad u (x-velocity) versus y para $x = 0,25$ [m]. Este es el plano que coincide con la cara derecha del muro, Figura 7.34:

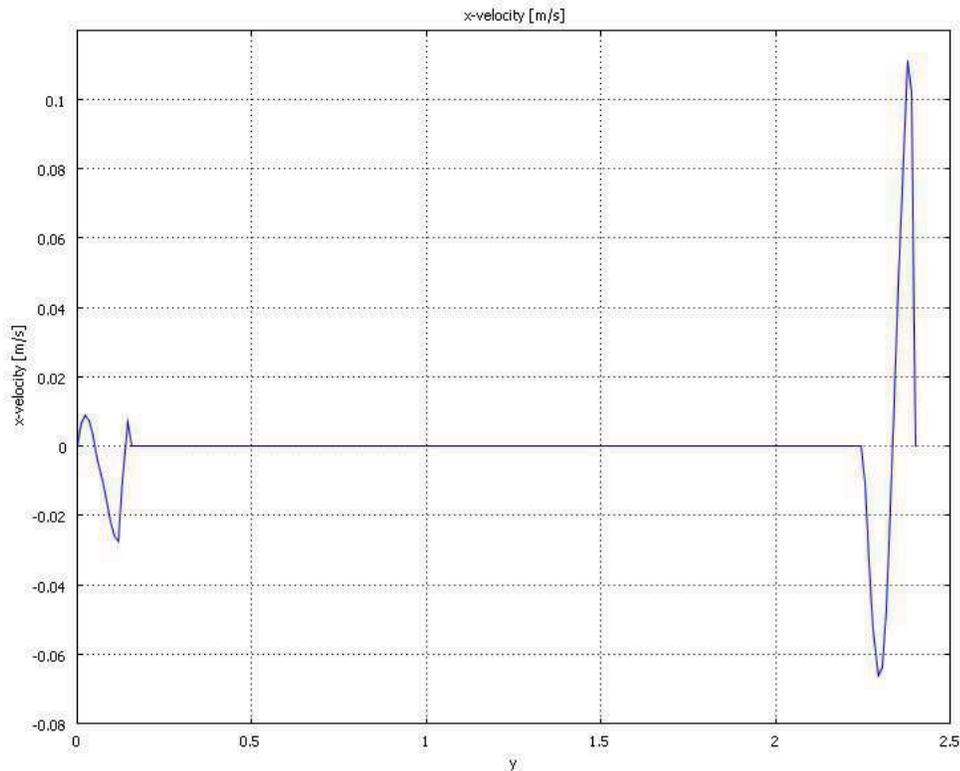


Figura 7.34: Velocidad horizontal en $x = 0,25$ para $t = 37.800$

Claramente, los puntos en donde la velocidad no es cero corresponden a las rendijas del muro. Este gráfico presenta dificultades, ya que la velocidad cambia de signo dentro del espacio de pasada de uno a otro recinto y se ve que hubo dificultades numéricas en esa zona.

Ahora obtenemos un archivo ASCII de este gráfico que puede ser trabajado en Excel. El objetivo es integrar el perfil de velocidad a través de la sección de pasada para determinar el caudal volumétrico F_v que pasa al espacio habitable:

$$F_v = \int u dy \quad (7.1)$$

Haciendo la integral, mediante la suma de las velocidades u en la apertura multiplicada por el paso espacial dy del archivo, se obtiene:

- F_{v1} en la abertura superior = $2,691$ [m^3/hr]
- F_{v2} en la abertura inferior = $-3,601$ [m^3/hr]

En realidad, el cálculo se expresa en [m^2/hr], pero debe entenderse como [m^3/hr] por cada metro de ancho. Como los caudales se ven muy pequeños expresados en [m^2/s], se han expresado en [m^3/hr]. De los signos se infiere que la abertura superior entrega caudal al espacio habitable, y la inferior lo extrae de éste.

Los dos valores son diferentes, lo cual no sería extraño considerando que es régimen transiente. Sin embargo, no se espera que el flujo que sale sea mayor que el que entra. Esto puede estar dentro del margen de error del cálculo. De todas maneras se concluye que hay una circulación que pasa del espacio de colección al espacio habitable y se devuelve al espacio de colección. El orden de magnitud de esta circulación es de $3, 15 \text{ [m}^3/\text{hr}]$ por metro de ancho (promediando ambos valores en módulo).

La Figuras 7.35 y 7.36 muestran las variaciones de F_{v1} y F_{v2} en el tiempo para $Q = 250 \text{ [W/m]}$ y $Q = 500 \text{ [W/m]}$:

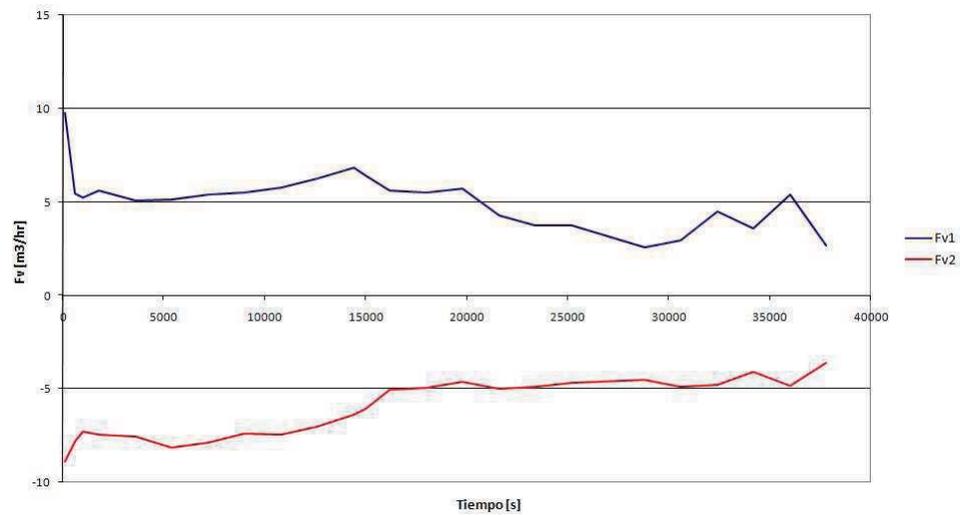


Figura 7.35: F_{v1} y F_{v2} para $Q = 250 \text{ [W/m]}$

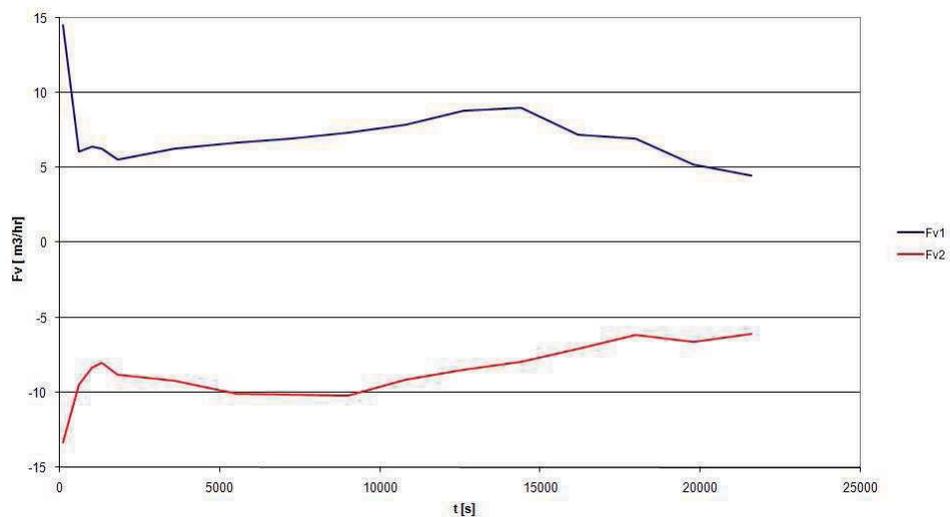


Figura 7.36: F_{v1} y F_{v2} para $Q = 500 \text{ [W/m]}$

La Tabla 7.1 muestra un resumen de los valores obtenidos para F_{v1} y F_{v2} :

Cuadro 7.1: Resumen de los caudales volumétricos que pasan al espacio habitable (F_v)

t [s]	$Q = 250$ [W/m]		$Q = 500$ [W/m]	
	F_{v1} [m ³ /hr]	F_{v2} [m ³ /hr]	F_{v1} [m ³ /hr]	F_{v2} [m ³ /hr]
100	9,778	-8,878	14,505	-13,312
600	5,473	-7,837	6,081	-9,461
1.000	5,246	-7,282	6,419	-8,308
1.800	5,620	-7,423	5,498	-8,784
3.600	5,082	-7,563	6,280	-9,216
5.400	5,176	-8,154	6,632	-10,030
10.800	5,786	-7,459	7,862	-9,147
12.600	6,257	-6,994	8,775	-8,440
21.600	4,288	-4,973	4,458	-6,080

7.4. Calor Transferido por Convección.

En $t = 37.800$ [s], para la coordenada $x = 0,25$ [m] se grafica la temperatura en función de la coordenada y , Figura 7.37:

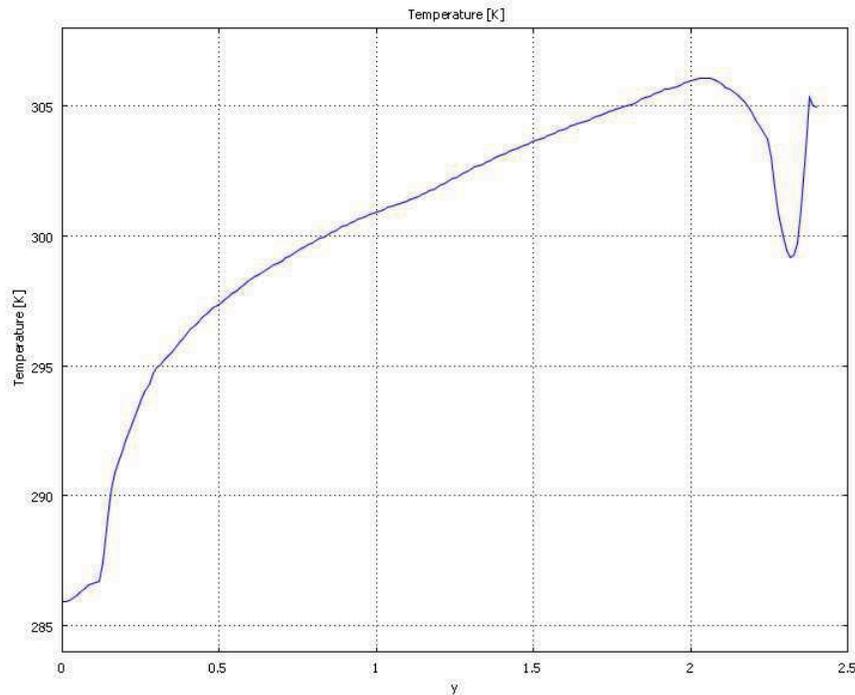


Figura 7.37: Temperatura en $x = 0,25$ para $t = 37.800$ para la cara del muro que da hacia el espacio habitable

Pasando el gráfico a ASCII para poder trabajar en Excel y llevando la columna de temperaturas a la misma planilla inicial:

- Promedio de temperatura del aire en la abertura superior: $T_1 = 301,75$ [K]
- Promedio de temperatura del aire en la abertura inferior, $T_2 = 286,63$ [K]

Ahora obtenemos los promedios de temperatura en las zonas sólida y fluida. Para esto vamos a *Postprocessing*, *Subdomain Integration*, e integramos la temperatura en cada región. La integral de temperatura será dada en $m^2 K$.

Por lo tanto, la temperatura media en cada subdominio (en el instante considerado) será la integral dividida por el área del subdominio. Por ejemplo, el área del sólido es de $0,315 [m^2]$, y el área de la zona fluida es de $4.485 [m^2]$. Las integrales para las zonas sólida y fluida son de 97.238 y $1308.98 [m^2K]$. Con las áreas indicadas las temperaturas medias de sólido y fluido en el instante son:

- $T_{ms} = 308.692 [K]$
- $T_{mf} = 272.704 [K]$ respectivamente.

Las Figuras 7.38 y 7.39 muestran las variaciones de T_{ms} y T_{mf} en el tiempo para $Q = 250 [W/m]$ y $Q = 500 [W/m]$:

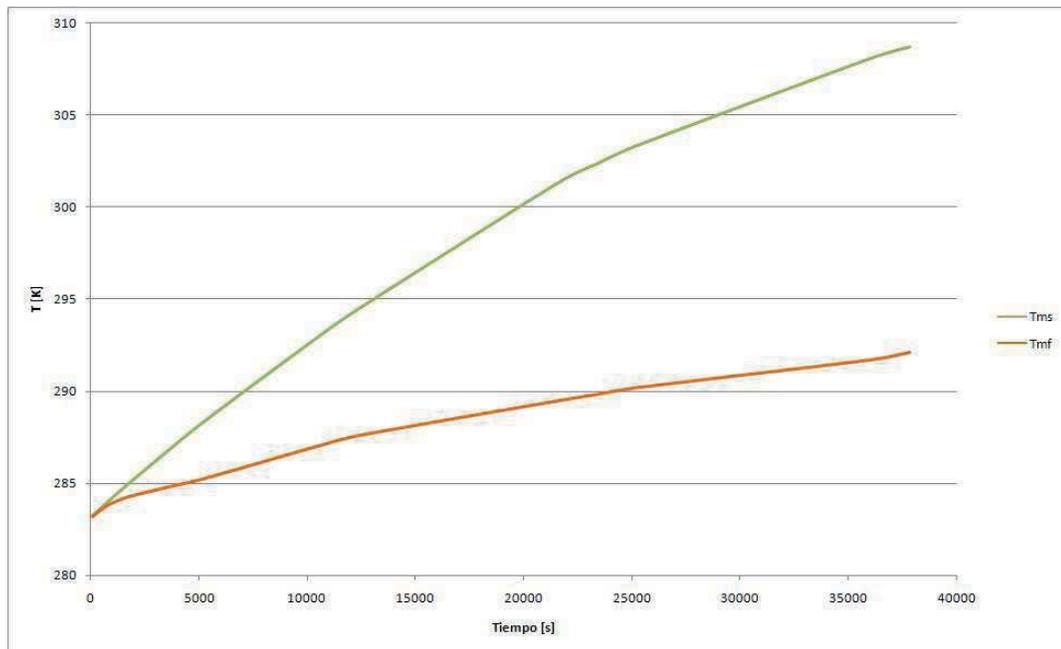


Figura 7.38: T_{ms} y T_{mf} para $Q = 250 [W/m]$

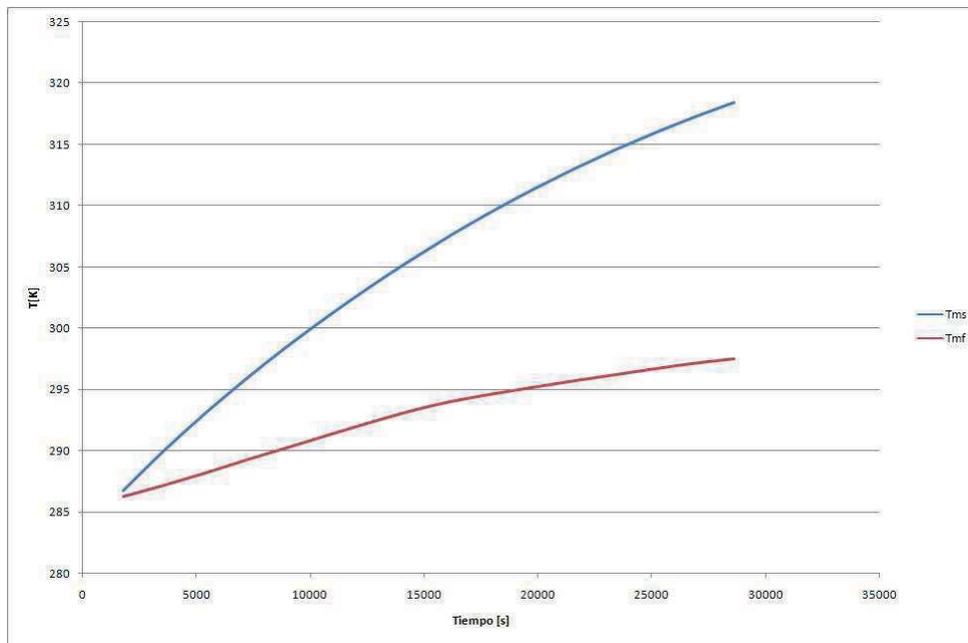


Figura 7.39: T_{ms} y T_{mf} para $Q = 500 [W/m]$

La Tabla 7.2 muestran un resumen de los valores obtenidos utilizados para elaborar los gráficos de las temperaturas medias:

Cuadro 7.2: Temperaturas medias

$t [s]$	$Q = 250 [W/m]$		$Q = 500 [W/m]$	
	$T_{ms} [K]$	$T_{mf} [K]$	$T_{ms} [K]$	$T_{mf} [K]$
100	283,260	283,201	283,385	283,295
600	283,792	283,661	284,413	284,542
1.000	284,210	283,932	285,225	284,908
1.800	285,029	284,286	286,860	285,140
3.600	286,800	284,800	290,310	286,000
5.400	288,502	285,304	293,744	286,992
10.800	293,206	287,113	302,454	290,279
12.600	294,650	287,630	305,136	291,192
21.600	301,333	289,467	316,161	293,662

Para poner en práctica el efecto acumulador del muro se corrieron los modelos con y sin rendijas aplicando $250 [W/m]$ entre los 0 y 19.800 [s]. En ese punto, se eliminó el flujo de calor y los resultados para las temperaturas medias del sólido y del fluido se muestran en las Figuras 7.40, 7.41 y 7.42:

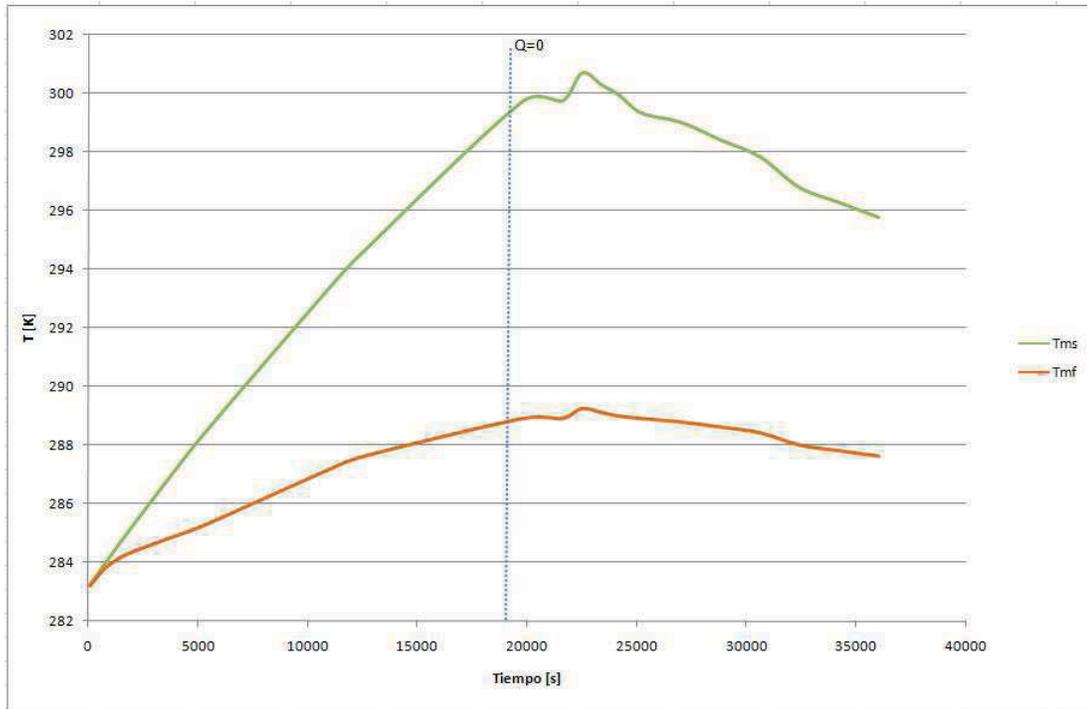


Figura 7.40: T_{ms} y T_{mf} para $Q = 250 [W/m]$ y $Q = 0 [W/m]$ desde los 19.800 [s]

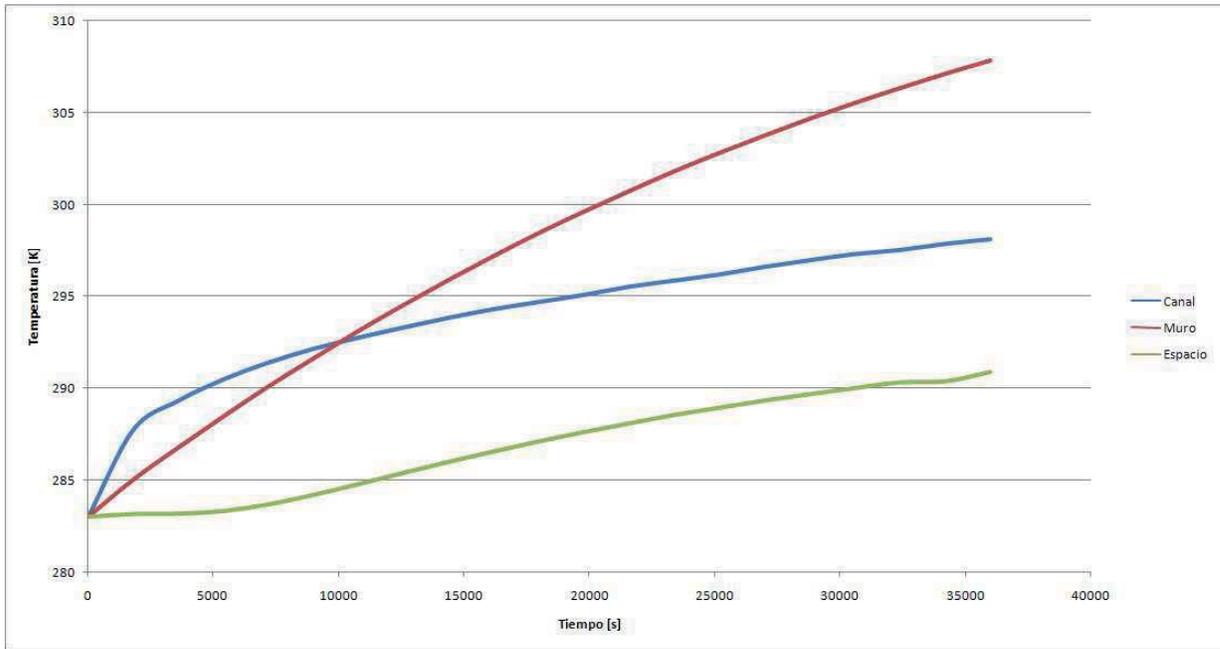


Figura 7.41: T_{ms} y T_{mf} para $Q = 250 [W/m]$

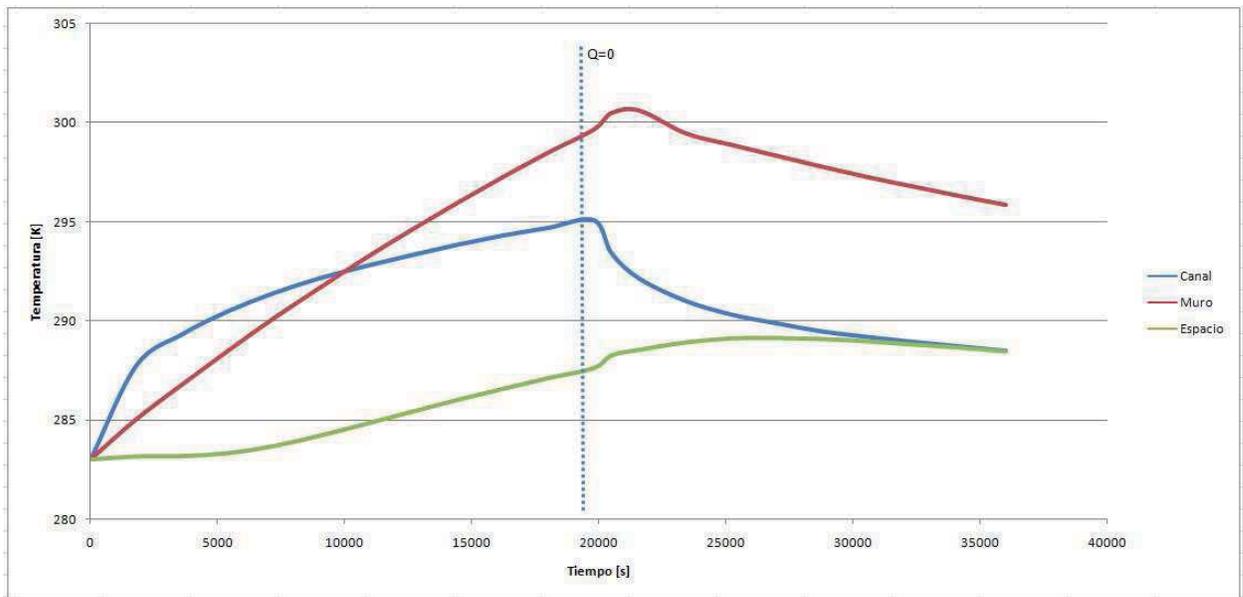


Figura 7.42: T_{ms} y T_{mf} para $Q = 250 [W/m]$ y $Q = 0 [W/m]$ desde los 19.800 [s]

Se puede ver que en ambos modelos, tras hacer nulo el flujo de calor, el calentamiento continúa por un período corto. Luego de eso, comienza el enfriamiento y tras 4,5 [h] el modelo aún no ha vuelto a la situación inicial.

El calor neto entregado al espacio habitable por cada flujo será:

$$Q_1 = \rho C_p (F_{v1} (T_1 - T_{mf})) \quad (7.2)$$

$$Q_2 = \rho C_p (F_{v2} (T_2 - T_{mf})) \quad (7.3)$$

Evaluando con los datos del problema:

- $Q_1 = 25.693 [W/m]$
- $Q_2 = -16,478 [W/m]$

Así, el calor neto instantáneo entregado por el flujo es $9.2156 [W/m]$. El calor disipado por la pared 8 en el mismo instante es $28,11 [W/m]$. En tanto, el calor entregado al espacio habitable por la pared 7 es de $72,22 [W/m]$. Por lo tanto, el aporte neto de calor al espacio habitable en el instante considerado es de:

$$Q_{neto} = 72.22 + 9.216 = 81.436 [W/m]$$

En este instante por lo menos, el aporte de calor por la pared es mayor que el del flujo.

Se entiende como flujo de calor transferido aquel que atraviesa el muro acumulador y entra al espacio habitable. Por su parte, se entiende como flujo de calor perdido aquel que atraviesa ambos vidrios (fuentes frías) y sale hacia el exterior. Las Figuras 7.43 y 7.44 ilustran esto para los modelos $Q = 250 [W/m]$ (con comunicación entre los ambientes) y $Q = 500 [W/m]$, respectivamente:

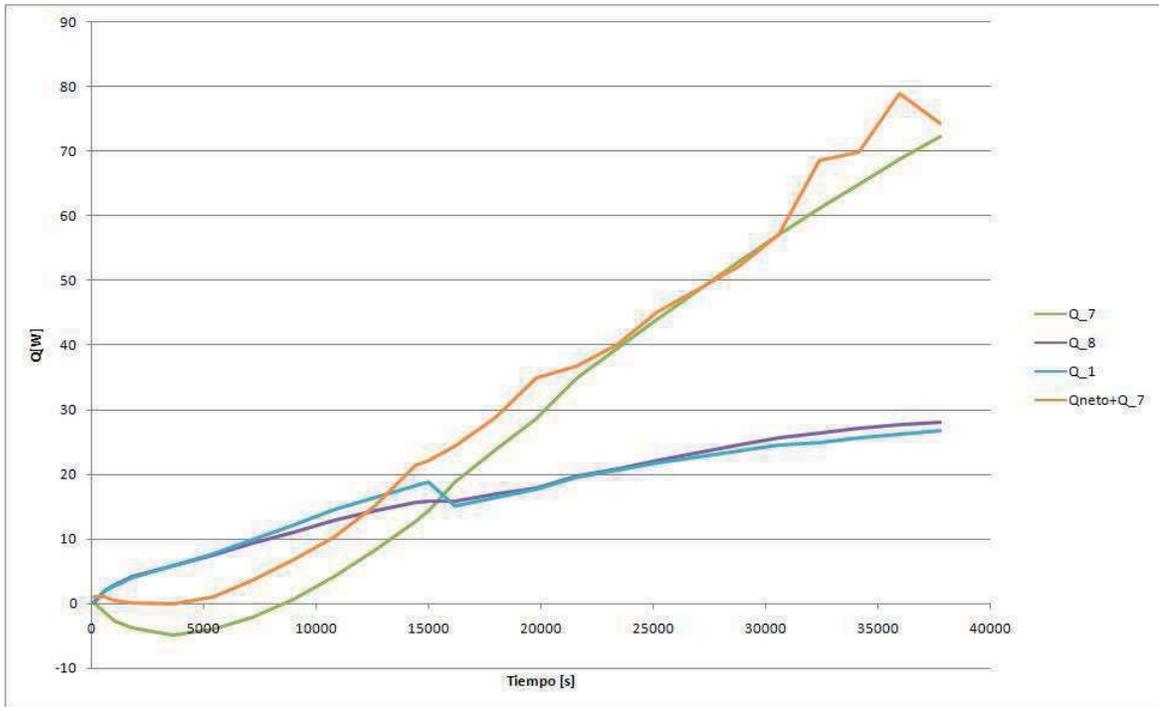


Figura 7.43: Calor aportado v/s calor perdido para $Q = 250 [W/m]$

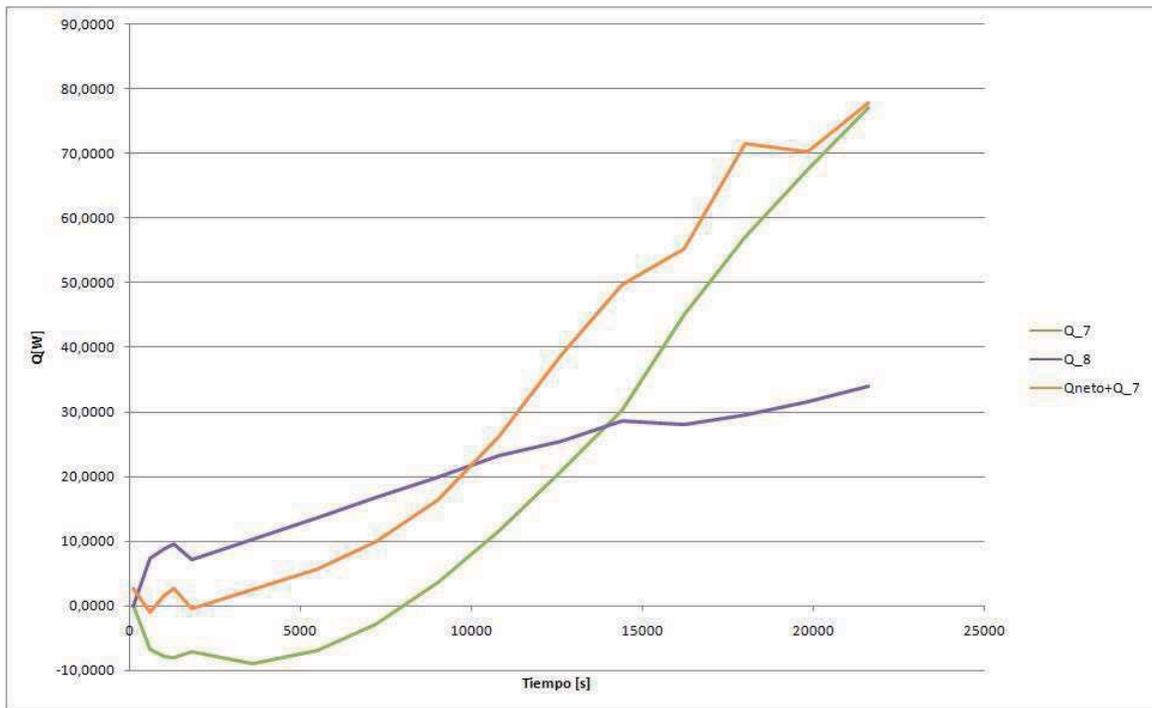


Figura 7.44: Calor aportado v/s calor perdido para $Q = 500 [W/m]$

Se puede apreciar que el calor transferido hacia el espacio habitable es variable en el tiempo, ya que en los ensayos no se alcanza un régimen permanente. Dados los tiempos ensayados, y dado el hecho de que el ciclo diario de la radiación solar tiene una duración menor que los transientes observados, un sistema muro Trombe no alcanzará nunca un régimen permanente.

En cuanto al modelo sin rendijas, la Figura 7.45 muestra la temperatura media del muro, obtenida luego de integrar el dominio sólido y considerando su área ($0,36 [m^2]$):

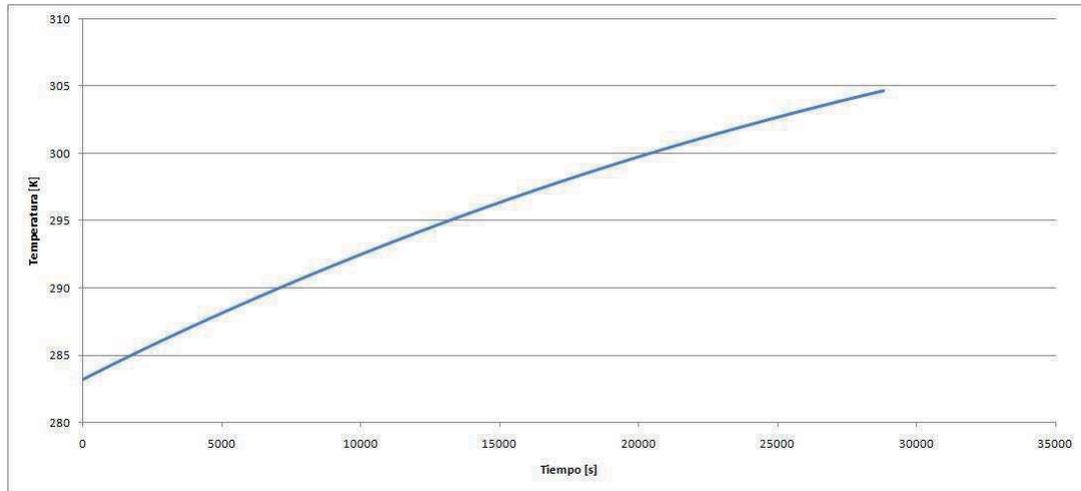


Figura 7.45: Temperatura media del muro

7.5. Descripción de los Fenómenos

7.5.1. Temperatura

El caso con $Q = 500 [W/m]$ fue el primer caso en estudio y se formuló a partir de la experiencia obtenida en el desarrollo del modelo a escala pequeño. La formulación del problema admitiría un régimen permanente, éste nunca se alcanzó en el presente estudio.

Dada la condición de borde impuesta, al inicio se tiene una temperatura uniforme en toda la geometría. Con el transcurso de la simulación, la temperatura comienza a aumentar de forma considerable. Como es lógico, el flujo de calor impuesto en la cara del muro que da hacia el canal de colección lleva a que éste tenga la concentración de mayores temperaturas. Si se pone atención en las temperaturas medias, la del muro crece más rápido que la del fluido.

Las temperaturas obtenidas al término de la simulación son muy altas y se explican por el alto flujo de calor impuesto, que lleva a pensar que si éste se suprime, el muro podría seguir entregando calor al espacio habitable por un tiempo considerable. Lo anterior se puede concluir si se considera la alta inercia térmica del muro.

Por otro lado, las isotermas son, prácticamente, verticales en el muro, excepto en la zona inferior de éste, donde adoptan un carácter diagonal. Contrariamente, en el espacio habitable las isotermas son horizontales y se encuentran fuertemente marcadas.

Los resultados obtenidos para el caso con $Q = 250 [W/m]$ pueden considerarse equivalentes a los descritos anteriormente, aunque a menor escala (hay que considerar que el flujo de calor corresponde al 50 % del impuesto en el primer caso).

Si se suprimen las rendijas, tal como ocurrió en el caso 3, se aprecia que las isotermas en el muro son completamente verticales y comienza a elevarse fuertemente la temperatura en la mitad superior del canal de colección.

En cuanto al espacio habitable, si se observan los gráficos, se puede notar que un aumento en la temperatura es perceptible a partir de las 2 horas de simulación. Esto se debe a que no existe circulación de un flujo de aire caliente desde el canal de colección. Conforme avanza la simulación, las isotermas son prácticamente horizontales, a excepción de la cara del muro y la fuente fría (que es donde se producen los flujos de circulación).

Tal como ocurrió en los modelos con rendijas, el modelo no alcanza un régimen permanente.

7.5.2. Caudales

En los 3 casos estudiados el movimiento es generado por fuerzas de empuje (convección natural). En los casos con rendijas, para tiempos de simulación largos no se observa un aumento continuo del flujo sino más bien una tendencia a la disminución. Es posible que esto se deba a una disminución de las fuerzas de empuje, causadas por el progresivo calentamiento del fluido. En cada instante se observa un flujo convectivo desde el espacio de colección hacia el espacio habitable en la rendija superior, y de vuelta al espacio de colección en la inferior. Los caudales de ambos flujos no son iguales en cada instante, dado que el sistema nunca alcanzó un régimen permanente en las simulaciones.

En cuanto al caso sin rendijas, el movimiento en el espacio habitable comienza a ser perceptible a partir de los 1.500 [s] y ya es notorio a partir de los 2.000 [s], en donde se ve un flujo ascendente en la cara derecha del muro que se diluye al alcanzar el techo.

7.5.3. Establecimiento de una circulación

En los modelos con rendijas, la circulación se establece debido a la fuerza de empuje que recibe el aire adyacente a la cara del muro que actúa como fuente térmica. Inicialmente se genera un movimiento convectivo ascendente de aire en esa zona y este aire es descargado al espacio habitable. Como este movimiento se inicia muy temprano -y con un caudal alto desde el principio-, el aire caliente atraviesa el espacio habitable por su parte superior hasta llegar a la ventana de éste.

El proceso de propagación de la masa de aire caliente en dirección vertical hacia abajo toma algún tiempo, ya que se trata de una masa de aire caliente, con poca tendencia a descender. Sin embargo se considera que para $t = 1800$ [s] se ha establecido un campo de temperatura distinto del inicial en todo el recinto habitable.

Después de cierto tiempo el flujo generado en el espacio de colección consiste en un flujo ascendente adyacente al muro y descendente cerca de la ventana, con un núcleo central prácticamente en reposo y una distribución de temperatura estratificada, con las temperaturas mayores arriba.

En tiempos cortos, sin embargo, el flujo es descendente cerca de la pared. Esto se debe a que la señal del flujo de calor impuesto, retardada por la inercia térmica del muro, no ha alcanzado a llegar a la cara derecha de éste.

Para el modelo sin rendijas, la circulación también se establece debido a la fuerza de empuje que recibe el aire adyacente a la cara del muro que actúa como fuente térmica. Inicialmente se genera un movimiento convectivo ascendente de aire en esa zona y al no poder ser descargado hacia el espacio habitable, se genera un circuito con un movimiento ascendente en la cara del muro y descendente en el vidrio izquierdo. En el espacio habitable se aprecia un movimiento ascendente en la cara del muro y descendente en el vidrio de la derecha, pero no puede hablarse de un circuito de circulación dado que los movimientos se diluyen al topar el techo y el suelo.

7.5.4. Flujos de calor

De lo expuesto, se deduce que las pérdidas de calor por las superficies vidriadas comienzan a observarse muy temprano y crecen en el tiempo, al aumentar la temperatura del fluido y su diferencia con la temperatura del ambiente exterior (que está impuesta a las superficies vidriadas y es igual a la temperatura inicial del sistema). Ambas pérdidas son esencialmente iguales durante todo el tiempo de las simulaciones para el caso de los modelos con rendijas.

El calor transferido al espacio habitable se desglosa en el entregado por la pared derecha del muro (Q_7) y lo que resulta del flujo de aire al muro, descontando la energía que retorna al espacio de colección.

Q_7 es inicialmente negativo (hacia el interior del muro) debido a que, estando la cara derecha de la pared a la temperatura inicial, la temperatura del aire adyacente a esa cara rápidamente la sobrepasa debido al movimiento convectivo. El ambiente recibe flujo de calor desde esta pared solo a partir de $t = 8660$ [s]. El calor total entregado

al ambiente ($Q_{neto} + Q_7$) aumenta en el tiempo. La contribución del flujo convectivo es inicialmente importante, pero para tiempos largos empieza a predominar la transferencia de calor a través del muro.

En cuanto al modelo sin rendijas, las pérdidas van, principalmente, por el vidrio de la izquierda. El flujo de calor conductivo hacia el espacio habitable crece sensiblemente, conforme avanza el tiempo, pues el muro comienza a elevar su temperatura. Al no haber circulación, el flujo convectivo hacia el espacio habitable es nulo en este caso. Este modelo sirve para comprobar que los intercambios térmicos son, principalmente, conductivos.

En los 3 modelos se estima que si se suprime el flujo de calor, el muro es capaz de entregar calor por un tiempo determinado, confirmando el efecto acumulador del muro.

Capítulo 8

Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

En este trabajo se construyó un modelo diferencial bidimensional transiente para obtener resultados sobre caudales de aire, transferencia de calor y campos de flujo y temperatura en un sistema muro Trombe de escala real, usando el software de simulación multifísica Comsol 3.5a.

Los modelos diferenciales son preferibles a los modelos basados en balances macroscópicos de masa y energía, debido a que entregan mayor información física aplicable al diseño.

Las hipótesis del modelo consideraron un sistema en régimen laminar, sujeto a dos efectos físicos principales: el empuje térmico sobre el aire (convección natural) y la acumulación de calor en el muro. Las dimensiones del modelo considerado fueron elegidas en base a las usuales en la construcción de viviendas (altura y profundidad). El intercambio radiativo entre las paredes que integran el sistema muro Trombe no se considera, así como tampoco las pérdidas radiativas a través de las ventanas del sistema -que se consideraron de un grosor infinitesimal-. Un flujo uniforme impuesto a la cara exterior del muro da cuenta del efecto de radiación solar.

Favorecido por los bajos valores de calor específico y masa específica del aire, se establece un flujo ascendente en el espacio de colección desde tiempos muy cortos después de la imposición del flujo de calor a la pared. Este flujo se descarga en el espacio habitable, propagando el movimiento rápidamente a toda la habitación. Se establece entonces la circulación característica del muro Trombe desde el colector hacia el espacio habitable y de vuelta al colector. Coexiste con ella un modo de circulación ascendente en la pared del muro y descendente en la ventana del espacio habitable, con una baja velocidad en el centro y con una estratificación de temperatura.

Este movimiento es típico de la convección natural en cavidades rectangulares diferencialmente calentadas. Ambos movimientos permanecen durante todo el desarrollo del fenómeno.

Debe notarse que inicialmente la alta inercia térmica del muro determina que al tomar contacto el flujo movido por el canal de colección con la cara del muro perteneciente al espacio habitable, ésta se encuentra a una temperatura menor, que es todavía la inicial. De este modo, inicialmente existe un calor entregado a la cara derecha del muro por el flujo generado en la cara izquierda. Luego de un período de 2,4 horas el muro comienza a entregar calor al espacio habitable. En los modelos con rendijas, se obtienen tasas de circulación en el rango de 5–10 [m^3/h]. Estas tasas aumentan con el input de calor, pero decaen lentamente en el tiempo al aumentar la temperatura del fluido. Esto probablemente se debe a una disminución progresiva de las fuerzas de empuje, causada a su vez por un aumento constante de la temperatura del fluido.

Por otra parte, las pérdidas del calor a través de las superficies vidriadas del espacio habitable y del colector aumentan en el tiempo, favorecidas por el aumento constante de la temperatura al interior del recinto. Las pérdidas desde ambas superficies vidriadas son muy similares en los modelos con rendijas y en el caso del modelo sin rendijas, la pérdida mayor se da en el vidrio del colector.

Debido a la inercia térmica del muro, la transferencia de calor a la habitación es causada principalmente por la

circulación del muro Trombe al inicio. Para tiempos largos, sin embargo, la mayor contribución al calentamiento de la habitación proviene de la conducción a través del muro. Esto es favorecido por la gran capacidad de acumulación de calor de éste, dados sus altos valores de masa y calor específicos.

Lo anterior no significa que la circulación característica del muro Trombe entre las dos zonas fluidas no sea importante. Las pruebas del modelo con un muro Trombe sin rendijas muestran que las pérdidas de calor desde la superficie vidriada del colector aumentaron a tres veces el valor del muro con rendijas y superaron las pérdidas por la ventana de la habitación.

El aumento de pérdidas del colector se debe a que el aire calentado por el espacio colector no puede ingresar al espacio habitable cuando no hay rendijas. Entonces, debe virar hacia el vidrio del colector, lo que origina un aumento de la pérdida de calor por contacto de este flujo caliente con la fuente fría.

Por lo tanto la circulación, aunque en tiempos largos toma una importancia secundaria en el calentamiento de la habitación, es de primera importancia en el control de pérdidas del colector.

8.2. Recomendaciones

Para trabajos futuros, en primer lugar, habría que utilizar los modelos con mallas más mucho mas finas, de entre 100.000 y 1.000.000 de elementos. Esto permitiría obtener resultados más precisos.

Se debería explorar la respuesta del fenómeno frente a variaciones sistemáticas en el espaciado del canal colector, el espesor del muro y el ancho de las rendijas.

Pensando en el contexto de aplicación de este sistema, se puede pensar en implementar una función que entregue un flujo de calor variable en el tiempo –por ejemplo una función sinusoidal que represente la distribución de radiación solar a lo largo del día. Lo anterior permitiría “medir” cualitativamente el efecto acumulador del muro. Es imprescindible en este caso, realizar simulaciones por duraciones de varios días en el tiempo del sistema, a fin de eliminar el efecto de las condiciones iniciales, que son siempre algo arbitrarias.

También, se recomienda plantear un modelo utilizando los módulos de Comsol *k-epsilon* turbulento y convection and conduction, pues entregaría resultados más realistas que los entregados por un modelo laminar.

Bibliografía

- [1] Onishi J, Soeda H, Mizuno M; Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system. *Renewable Energy* 2001; V 22:61
- [2] HIDALGO MUÑOZ, Pablo Alejandro. Creación de un Modelo Fluidodinámico del Sistema de Calentamiento Residencial llamado Muro Trombe. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2011. Memoria (Ingeniero Civil) Universidad de Chile.
- [3] DOMANCIC HERRERA, Pedro José. Diseño de un Sistema de Calefacción Solar para un Edificio Público. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008. Memoria (Ingeniero Civil) Universidad de Chile.
- [4] La Energía Solar: Datos Técnicos; http://saecsaenergiasolar.com/renovables/energia_solar/
- [5] Bienvenido a la casa solar pasiva; <http://www.benyei.org/Solar/trombe.htm>
- [6] Yunus A. Cengel, A. J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, 4ª Edición, McGraw-Hill, 2011.
- [7] Hoy-Yen Shan, Saffa B. Riffat, Jie Zhu; Review of Passive solar heating and cooling technologies; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; V 14:781-789
- [8] Principios fundamentales de paredes Trombe y Chimeneas Solares; <http://sallavor.org/resources/Muro%2Btrombe%2By%2Bchimeneas%2Bsolare.pdf>
- [9] Jibao Shen, Stéphanne Lassue, Lawrent Zalewski, Dezhong Huang; Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls; *Energy and buildings* 2007; V39:962-974
- [10] Espectro Electromagnético; http://www.unicrom.com/Tel_espectroelectromagnetico.asp
- [11] Derivada Sustancial; <http://catedras.quimica.unlp.edu.ar/ftransporte/clase3.pdf>
- [12] Comsol Multiphysics Modeling Guide; 2008

Apéndice

Apéndice A

Criterios de Diseño

El criterio más básico a la hora de diseñar un muro Trombe es que transmita suficiente energía térmica (calor) a lo largo del día. Se consideran como temperaturas de confort aquellas comprendidas en el intervalo 18 – 24 [°C] y se entiende como superficie útil a aquella encerrada por la habitación a calefaccionar. En base a lo anterior, la Tabla A.1 considera diferentes valores de áreas en función del clima¹:

Cuadro A.1: Dimensionamiento de un muro Trombe de acuerdo al clima

Temperatura media exterior en invierno [°C]	Superficie de pared necesaria por unidad de superficie útil
-10	0,72 – 1
-7	0,6 – 1
-4	0,51 – 0,93
-1	0,43 – 0,78
2	0,35 – 0,6
5	0,28 – 0,46
7	0,22 – 0,35

A pesar que el modelo fluidodinámico propuesto por el alumno es 2D, en las secciones que siguen a continuación se hablará sobre criterios de diseño para un muro Trombe. Esto, para tener una idea más acabada acerca del sistema.

A.1. Muro

Como ya se ha hecho explícito, el muro a elegir debe tener gran capacidad para absorber y guardar calor. Estos factores dependen de la capacidad térmica (C) y de la resistencia del muro (k). Se usa la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C} \quad (\text{A.1})$$

Donde α es la difusividad térmica. Algunos valores de k se encuentran tabulados en la Tabla A.2.

A raíz de lo anterior, es sumamente importante poder determinar un grosor óptimo para el muro, así como el material del que esté compuesto. Todo esto a fin de evitar un sobrecalentamiento de la pared. La Tabla A.2² muestra espesores recomendados para algunos materiales a tomar en cuenta a hora de fabricar un muro Trombe.

¹Fuente: Mazria, Baker y Wesling, Predicting the Performance of Passive Solar Heated Buildings

²Fuente: Mazria, Edward. El libro de la energía solar pasiva. Ediciones G. Gili, S.A., México 1983.

Cuadro A.2: Sugerencias para el espesor de la pared sólida en función del material

Material	$k [w/m^{\circ}C]$	Espesor recomendado $[cm]$
adobe	0,25	20 – 30
ladrillo	0,85	25 – 35
hormigón	1,5	30 – 45

A.2. Dimensión de los Orificios

No existe un parámetro especial para dimensionar los orificios del muro. Sin embargo, el área de estos deben ser la adecuada para garantizar un flujo uniforme y constante sin producir movimientos fuertes del aire circulante.

A.3. Vidrio

Cuando se habla de vidrio se hace alusión a la superficie vidriosa. Esta debe tener un buen comportamiento en invierno y en el otro extremo, no debe comprometer la refrigeración en verano. Por esta razón, en época estival se emplean persianas u otros elementos similares, de tal forma que no se produzca un sobrecalentamiento no deseado.

En cuanto al vidrio mismo, se utiliza un vidrio estándar dispuesto en posición vertical -aunque también es posible girarlo con tal de obtener el máximo de radiación incidente.

Por lo general, la superficie acristalada debe ir entre el 7 y el 12 % de la superficie de la casa.

A.4. Cánal de Aire

Al momento de decidir el ancho del canal de colección son varios los factores que deben ser tomados en cuenta. A modo de ejemplo, si se opta por un ancho de hasta 2 $[cm]$, las pérdidas de calor serán muy grandes, comprometiendo la circulación de aire. En el otro extremo, con un canal de colección cuyo ancho sea superior a 15 $[cm]$, las pérdidas de calor pueden ser grandes en las partes superior y laterales. Si el canal de aire posee un ancho superior a 1 $[m]$ se le empieza a considerar como espacio habitable.

De acuerdo a resultados arrojados por investigaciones³, el ancho del canal de colección debe estar entre 3 y 15 $[cm]$, estando el óptimo en 9 $[cm]$.

³Fuente: Mazria, Edward. El libro de la energía solar pasiva. Ediciones G. Gili, S.A., México 1983.