

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ESTADO DE MORELOS  
INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL



IMPLEMENTACIÓN DEL SCHLIEREN SINTÉTICO  
PARA EL ESTUDIO DE LA VENTILACIÓN NATURAL  
EN EDIFICACIONES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

PRESENTA :

EDGAR DANIEL PERALTA VÉLEZ

DIRECTOR DE TESIS : DR. RAMÓN TOVAR OLVERA  
TUTOR INTERNO : DRA. HARUMI MORENO GARCÍA

JUNIO 2015 — JIUTEPEC, MORELOS

EDGAR DANIEL PERALTA VÉLEZ: IMPLEMENTACIÓN DEL  
SCHLIEREN SINTÉTICO PARA EL ESTUDIO DE LA VENTILA-  
CIÓN NATURAL EN EDIFICACIONES, © JUNIO 2015

## DEDICATORIA

---

*A mi familia*

Por darme todo y formarme como persona.

*A mi padre*

Por darme un buen ejemplo a seguir.

*A mi madre*

Gracias por el apoyo incondicional durante todo este tiempo.

## AGRADECIMIENTOS

---

Al Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, por recibirme como institución y facilitarme los medios necesarios para realizar este trabajo.

A la DGAPA-UNAM por la beca otorgada a través del proyecto PAPIIT IN114314.

A mi director de tesis el Dr. Ramón Tovar, quien se convirtió en mi tutor, por el apoyo y la confianza brindada durante todo el trabajo realizado.

Al M. José Antonio Castillo Torres, por su amable disposición su tiempo otorgado, y sus observaciones y comentarios durante la investigación realizada y el desarrollo de esta tesis.

Al personal y compañeros del laboratorio de termociencias, Ing. Guillermo Hernández Cruz y Luis Abraham Morales Fuentes por su apoyo oportuno en detalles de la implementación del arreglo experimental.

Al personal de la unidad de computo, Ing. Héctor Daniel Cortés González y Lic. Margarita Pedraza Vargas por su ayuda y orientación con problemas informáticos.

Al personal del taller mecánico a cargo del Ing. Jaime Villalobos Gómez por su asistencia técnica en los ajustes al sistema experimental.

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se reporta la implementación de la técnica óptica de schlieren sintético y los resultados obtenidos de la visualización y el análisis de flujos de ventilación natural por efectos térmicos. Se utilizó un modelo a escala de laboratorio para reproducir experimentalmente la ventilación que se produce en una habitación con una fuente de calor interna. El modelo de la habitación tiene una ventana en la pared frontal y seis ventilas en la pared trasera; tres ubicadas en la parte superior y tres en la parte inferior. Se utilizó agua como fluido de trabajo y un calefactor eléctrico como fuente de calor interna para crear las diferencias de temperatura. Las imágenes schlieren obtenidas se complementaron con un sistema de medición de temperaturas con termopares para ampliar la descripción de los flujos generados.

Se consideró como caso base la habitación cuando únicamente tiene la ventana abierta. Se estudió el efecto que se tiene al abrir alguna de las ventilas de la pared posterior, variando su ubicación vertical en dos posiciones respecto a la ventana así como variando en dos valores su área de sección transversal. Se observó que existe una tendencia del flujo del caso base a transitar de ventilación por mezclado a ventilación por desplazamiento cuando se abre alguna de las ventilas traseras y se aumenta su área. De esta manera con una ventila superior abierta la ventana funge como entrada de fluido ambiente por estar ubicada a menor altura y, en cambio, con una ventila inferior abierta la ventana funge como salida de fluido por estar a una altura mayor.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>i</b>	<b>INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1	Antecedentes	2
1.1.1	Técnicas de visualización de flujos	2
1.1.2	Ventilación	3
1.1.3	Ventilación natural	3
1.1.4	Ventilación en edificaciones	4
1.2	Problemática	4
1.3	Justificación	4
1.4	Objetivo	5
1.4.1	Objetivos específicos	5
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1	Fundamentos ópticos	6
2.1.1	Ley de la refracción	7
2.2	Schlieren clásico	9
2.3	Schlieren sintético	10
2.4	Fundamentos de la ventilación natural	11
<b>ii</b>	<b>TRABAJO EXPERIMENTAL</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>14</b>
3.1	Modelo experimental	14
3.2	Schlieren sintético implementado	16
3.2.1	Observaciones y recomendaciones	18
3.3	Medición de temperaturas	21
3.3.1	Calibración de termopares	21
3.4	Medición de la potencia del calefactor	22
3.5	Casos de estudio	23
3.6	Experimentación	24
3.6.1	Previo a los experimentos	24
3.6.2	Puesta en marcha de los experimentos	26
3.7	Procesamiento de las imágenes schlieren	26
3.7.1	Visualización cualitativa	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>30</b>
4.1	Cuarto cerrado	30
4.2	Ventana frontal abierta	34
4.3	Ventana frontal y ventila central superior trasera abiertas	38

4.4	Ventana frontal y ventila central inferior trasera abiertas	41
4.5	Ventana frontal y ventilas superiores traseras abier- tas	43
4.6	Ventana frontal y ventilas inferiores traseras abier- tas	46
5	CONCLUSIONES	50
iii	APÉNDICES	53
A	APÉNDICE A	54
	BIBLIOGRAFÍA	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1	Espectro electromagnético. [38]	6
Figura 2	Propagación de ondas electromagnéticas. [36]	7
Figura 3	Refracción de la luz a través de dos medios. [37]	8
Figura 4	Arreglo típico para la técnica de schlieren clásico (tipo Z). Tomado de: Thomas et al. [31].	9
Figura 5	Arreglo típico para la técnica de schlieren sintético. Tomado de: Thomas et al. [31].	11
Figura 6	Diagrama de la configuración de ventanas completo del modelo experimental.	15
Figura 7	Esquema de corte transversal del arreglo experimental utilizado para la visualización con el schlieren sintético implementado.	18
Figura 8	Potencia $Q$ y temperaturas resitradas por la operación el calefactor.	24
Figura 9	Diagramas de las configuraciones de ventilas abiertas en el modelo experimental para los diferentes casos de estudio realizados.	25
Figura 10	Ejemplo de la ventana para crear la imagen 0 desde <i>Digiflow</i> .	27
Figura 11	Ejemplo de la ventana para seleccionar las imágenes para la visualización previa desde <i>Digiflow</i> .	28
Figura 12	Ejemplo de la ventana de controles para la visualización previa de shclieren sintético desde <i>Digiflow</i> .	29



- Figura 13 Imágenes schlieren del calentamiento de un cuarto cerrado. A los 20 s y 30 s se muestra respectivamente el nacimiento y crecimiento de la pluma térmica después de encender el calefactor. El proceso de llenado de caja ocurre entre 30 s y 300 s. A partir de los 300 s inicia el estado cuasi-estacionario. 31
- Figura 14 Evolución de la temperatura a diferentes alturas dentro del cuarto cerrado con la fuente de calor interna. 33
- Figura 15 Evolución de la temperatura promedio en el caso de un cuarto cerrado con fuente de calor interna. La línea azul la temperatura promedio interior y la línea roja el ajuste numérico para el coeficiente global de transferencia ( $U_L = 25.9 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). 34
- Figura 16 Imágenes schlieren para el caso A1 con la ventana frontal abierta. 35
- Figura 17 Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A1. 36
- Figura 18 Imágenes schlieren para el caso A2 con la ventana frontal y la ventila superior de enmedio de la parte trasera abiertas. 39
- Figura 19 Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A2. 40
- Figura 20 Imágenes schlieren para el caso A3 con la ventana frontal y la ventila inferior de enmedio de la parte trasera abiertas. 41
- Figura 21 Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A3. 42
- Figura 22 Imágenes schlieren para el caso A4 con la ventana frontal y las tres ventilas superiores de la parte trasera abiertas. 44
- Figura 23 Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A4. 45

- Figura 24 Imágenes schlieren para el caso A5 con la ventana frontal y las tres ventilas inferiores de la parte trasera abiertas. 47
- Figura 25 Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A5. 48
- Figura 26 Diferencia entre la mayor temperatura promedio alcanzada en el estado permanente y la temperatura promedio inicial de cada caso de estudio. 51

## ÍNDICE DE CUADROS

---

Cuadro 1	Coeficientes $m$ y $b$ de regresión lineal simple para cada termopar.	22
----------	---	----

Parte I

INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 ANTECEDENTES

#### 1.1.1 *Técnicas de visualización de flujos*

Los estudios para la visualización de la dinámica de los fluidos han existido desde hace mucho tiempo y tienen aplicaciones en diversas ramas de la ciencia e ingeniería. En especial los estudios de las técnicas ópticas basadas en la relación existente entre la densidad y el índice de refracción han sido utilizadas para entender la dinámica y el comportamiento de fenómenos naturales. Las técnicas ópticas más comunes en la observación de flujos son: interferometría, shadowgraph y schlieren [40]. Dichas técnicas han sido óptimas gracias a que no son intrusivas con la zona de estudio [16], es decir, que no alteran las condiciones del medio, por lo que no modifican el fenómeno a estudiar. La interferometría permite inferir la diferencia de desplazamiento entre trayectorias luminosas al comparar un haz de luz que atraviesa un fluido con cambios de densidad o índice de refracción contra un haz de referencia. Los cambios en la densidad del fluido se manifiestan en los patrones de franjas de interferencia que se obtienen en imágenes fotográficas [12], [17]. La técnica shadowgraph puede definir, además del desplazamiento, la desviación de un haz de luz que atraviesa un fluido con perturbaciones en el índice de refracción, lo cual provoca cambios en la distribución de la intensidad de luz con respecto a la intensidad original [24]. Por su parte, con la técnica schlieren es posible determinar de manera cualitativa y cuantitativa las deflexiones angulares de un haz de luz que pasa a través de un fluido no homogéneo [40]. Se han desarrollado diversas variantes de esta técnica de medición y visualización que van desde schlieren clásico, schlieren a color y schlieren sintético [3]; siendo la primera la base fundamental de todas las demás. La elección de cualquiera de estas técnicas ópticas debe hacerse tomando en cuenta la sensibilidad, resolución, alcance del trabajo, así como los costos económicos [12].

### 1.1.2 Ventilación

La ventilación es el proceso de hacer llegar aire nuevo a un espacio específico, en otras palabras, hacer circular el aire del interior y/o intercambiarlo por aire fresco del exterior ya sea de manera forzada o natural [11]. Existen varios sistemas para ventilación, estos pueden clasificarse en activos, pasivos e híbridos. Los sistemas activos requieren el uso de energía externa para su funcionamiento, generalmente energía eléctrica producida por la quema de combustibles fósiles; los pasivos en cambio, no requieren ningún tipo de energía externa y los híbridos solo requieren pequeñas proporciones de esta energía. La ventilación forzada o mecánica es aquella en la que se hace uso de máquinas como ventiladores, extractores o equipos de aire acondicionado, para impulsar masas de aire de un punto a otro [39].

### 1.1.3 Ventilación natural

A diferencia de la ventilación forzada, la ventilación natural es aquella que aprovecha los fenómenos naturales que producen el movimiento del aire para generar la circulación y renovación del mismo aire en el interior de un espacio sin consumir energía eléctrica externa [39]. Dichos efectos son el efecto térmico y el flujo de viento, y son provocados por diferencias de temperatura y de presión respectivamente [39]. Ambos efectos, por lo general, se presentan de manera conjunta y en algunos casos de forma independiente. La magnitud y dirección de la ventilación se fundamentan en el equilibrio de presiones, donde se tiende siempre a nivelar y distribuir la presión, desplazando el aire de una zona de alta presión a otra de baja presión [28]. Esta estrategia de ventilación se logra mediante la ubicación acertada de las aberturas que comunican al interior con el exterior como ventanas, puertas, intercambiadores de vientos, etc. [11]. La infiltración es una forma de ventilación natural pero no es controlada ya que se refiere a la penetración y escape de aire en pocas cantidades, y en ocasiones despreciables, a través de fisuras, grietas o pequeños espacios abiertos no intencionales [23].

#### 1.1.4 Ventilación en edificaciones

La ventilación en las edificaciones es necesaria para mantener una buena calidad del aire al interior, es decir, con oxígeno suficiente y libre de contaminantes (gases en aerosol, partículas suspendidas, compuestos orgánicos volátiles 'COV's', olores, etc.) [1]. También es importante para mantener y controlar de forma óptima las condiciones de temperatura y humedad del aire, consiguiendo un ambiente confortable para los ocupantes de los edificios [6].

### 1.2 PROBLEMÁTICA

En la actualidad el incremento de la demanda de energía y las dificultades que existen para satisfacerla con las fuentes de energía disponibles, en su mayoría derivadas de combustibles fósiles, están generando un escenario de crisis energética local y global [20]. Además, la producción de energía esta teniendo consecuencias ambientales importantes como la generación de gases de efecto invernadero, causantes a su vez, del cambio climático [19], [20]. Dentro de este contexto, los sectores residencial, comercial y público (sectores con edificaciones) representan un alto gasto energético a nivel mundial de alrededor del 40 % [35] del consumo anual de la energía, lo que genera hasta un 21 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) [35]. Se ocupa la mitad de este consumo para sistemas de calefacción y enfriamiento de espacios. En nuestro país el porcentaje de consumo para estos sectores es del 19 % [29] del total de energía. Esto representa un 5.7 % de las emisiones GEI totales, lo que equivale a 26 millones de toneladas CO<sub>2</sub> [29].

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

La ventilación natural constituye una manera económica, eficiente y ambientalmente sostenible de mantener una buena calidad de aire y temperatura al interior de las edificaciones disminuyendo el uso de sistemas electromecánicos de ventilación. De acuerdo con la problemática planteada, este trabajo de investigación está encaminado a implementar la técnica de visualización de schlieren sintético para el estudio de diferentes configuraciones de ventilación planteadas como posibles estrategias de bajo consumo en edificaciones que reduzcan el gasto energético y ayuden a contrarrestar el impacto negativo en el ambiente.

## 1.4 OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es implementar la técnica de schlieren sintético como un sistema de visualización y análisis de flujos de ventilación natural por efectos térmicos. La finalidad de las investigaciones sobre ventilación natural es desarrollar conocimientos básicos para su aplicación en el diseño de edificios de bajo consumo de energía y de esta manera contribuir en la disminución del gasto energético local y global, teniendo consecuencias favorables para la conservación del ambiente.

### 1.4.1 *Objetivos específicos*

1. Instalar y poner en funcionamiento los elementos que conforman la técnica de schlieren sintético.
2. Ajustar y calibrar los elementos del sistema óptico hasta optimizarlo para la experimentación.
3. Realizar campañas experimentales para la observación y descripción de flujos de ventilación natural en un modelo a escala de una habitación.
4. Complementar la información visual obtenida mediante el schlieren sintético con mediciones simultáneas de temperatura.
5. Vincular las imágenes schlieren con las temperaturas medidas para describir de los flujos de ventilación.



## MARCO TEÓRICO

### 2.1 FUNDAMENTOS ÓPTICOS

La luz es una forma de energía radiante que ocupa la parte visible por el ojo humano del espectro electromagnético (Figura 1), la cual presenta una naturaleza de propagación con comportamiento ondulatorio [22].



Figura 1: Espectro electromagnético. [38]

La radiación electromagnética se produce por el movimiento ondulatorio de las cargas electrónicas de los átomos y moléculas en el espacio (principalmente electrones) [26]. Esta forma de energía se propaga en campos que oscilan en direcciones perpendiculares entre sí mismos y entre su propia dirección de propagación (Figura 2) [18].

Cualquier onda electromagnética se propaga en el vacío a una velocidad  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , constante conocida como la velocidad de la luz en el vacío [26]. En cambio, cuando la propagación ocurre en cualquier otro medio (agua, aire, vidrio, etc.), ésta velocidad  $v$  es diferente, y siempre es menor que  $c$ .

Al relacionar las dos velocidades anteriores para un medio específico cual sea, podemos obtener el índice de refracción  $\eta$  de dicho medio:

$$\eta = \frac{c}{v}$$

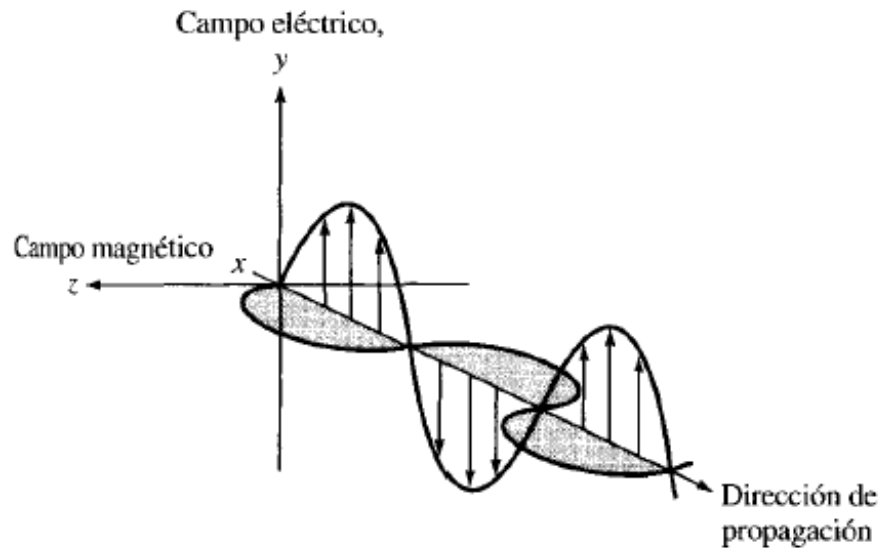


Figura 2: Propagación de ondas electromagnéticas. [36]

La transmisión de la luz en un medio uniforme (homogéneo) es un proceso continuo y repetitivo de dispersión y redispersión [10] en donde el índice de refracción es constante para una determinada longitud de onda. Esto permite representar las trayectorias luminosas mediante trazos rectos (rayos), los cuales no interfieren entre sí y son perpendiculares al frente de onda, correspondiendo así a la dirección de un flujo de energía radiante (luz) en el espacio [18].

### 2.1.1 Ley de la refracción

La refracción es el efecto de una desviación en la trayectoria luminosa que se produce cuando la luz cambia de un medio de propagación a otro con índice de refracción diferente [22]. Este cambio de dirección es debido a que al momento en que la luz atraviesa la frontera entre dos medios diferentes, el frente de onda (rayo) es doblado por el cambio de velocidad que experimenta en el nuevo medio, generando un frente de onda refractado [10]. En lugar de seguir la misma trayectoria del rayo incidente, a medida que este penetra adquiere un ángulo  $\theta$  más cercano o alejado a la línea normal dependiendo del índice de refracción de los medios. Dicha línea normal es referenciada perpendicularmente a la horizontal de la superficie de interfase o frontera entre ambos medios [18], [10], [22].

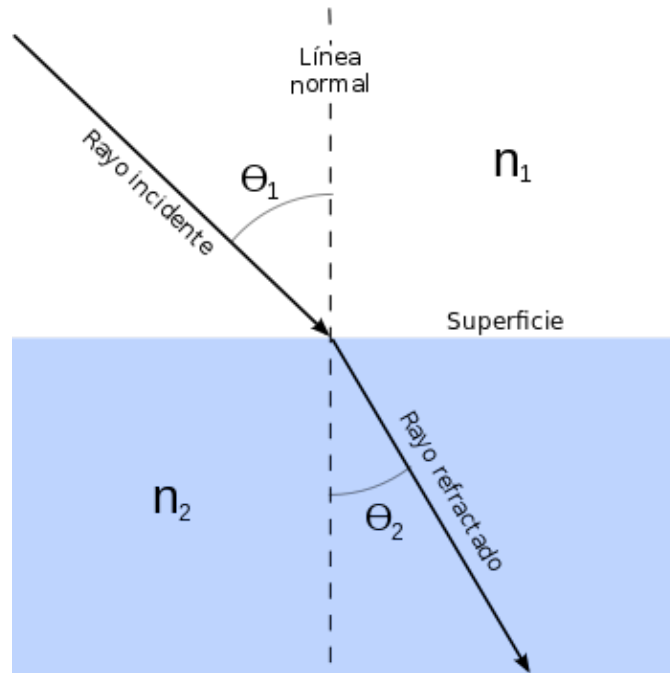


Figura 3: Refracción de la luz a través de dos medios. [37]

Con base en lo anterior y de acuerdo con la [Figura 3](#) cuando la luz pasa de un medio a otro de mayor índice ( $n_1 < n_2$ ) el rayo refractado se acerca a la normal, entonces ( $\theta_1 > \theta_2$ ). En caso contrario, si ( $n_1 > n_2$ ), el rayo refractado se alejará de la normal y ( $\theta_1 < \theta_2$ ) [18].

Al cruzar la parte del frente de onda avanzada en el segundo medio se disminuye la velocidad y la parte que todavía está en el primer medio se transmite más rápido, doblando la onda hacia la normal [10], [22]. A éste fenómeno se le conoce como ley de refracción o ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del primer y segundo medio respectivamente,  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia y  $\theta_2$  es el ángulo de refracción, ambos medidos respecto a la línea normal en el punto de incidencia.

## 2.2 SCHLIEREN CLÁSICO

El schlieren clásico ha sido utilizado desde el siglo XIX, siendo August Toepler (1864) el primero con reconocimiento oficial de la técnica [27], [25]. Se han registrado numerosos estudios experimentales de visualización de flujos y de campos de ondas internas usando schlieren, como los mencionados por Sutherland [30]. Sin embargo, esta técnica también es usada a menudo para el estudio del campo de temperaturas al relacionar ésta propiedad con la densidad de los fluidos. Se han reportado avances en la visualización del campo de gradientes de densidad en flujos en medios estratificados [30].

Esta técnica se fundamenta en el principio de la ley de Snell o ley de la refracción en donde un medio no homogéneo puede provocar desviaciones angulares en los rayos de luz cuando estos pasan a través de él. Dicho medio puede ser un fluido transparente como agua o aire con cambios en su densidad y por consiguiente en el índice de refracción [16]. Un sistema básico de schlieren clásico emplea una fuente de luz, dos espejos parabólicos, una chuchilla y una pantalla o sensor fotográfico [5]. El sistema tiene una configuración en forma de "Z", estando en el centro la zona de prueba como se muestra en la Figura 4.

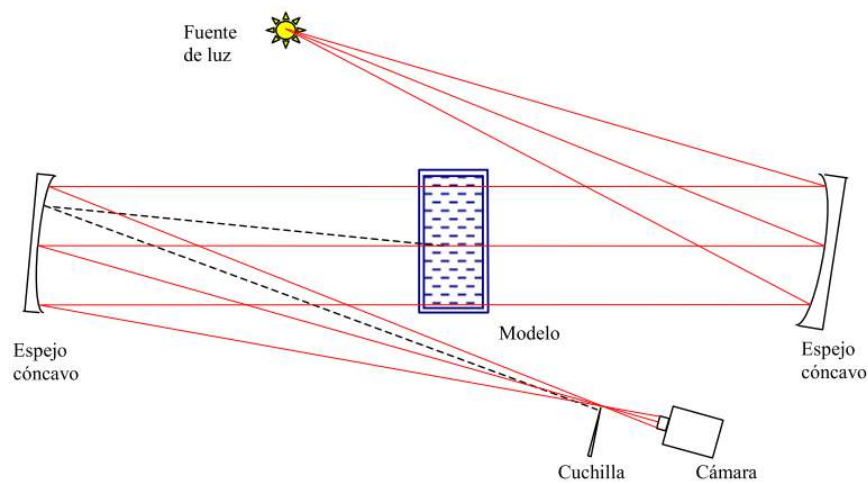


Figura 4: Arreglo típico para la técnica de schlieren clásico (tipo Z). Tomado de: Thomas et al. [31].

Este arreglo permite que la luz viaje desde la fuente hasta el primer espejo, siendo reflejada en frentes de onda planos hacia

el segundo espejo atravesando la zona de prueba en donde se encuentra el objeto o fluido a observar. Al interactuar con fluido homogéneo en la zona de prueba, se forma la imagen inicial, la cual es de nuevo reflejada por el segundo espejo en dirección a la pantalla o cámara. Sin embargo, antes de llegar a su destino, la luz pasa por el filo de la cuchilla, la cual sólo deja pasar una parte de la luz, oscureciendo de manera uniforme la imagen inicial. Una vez que se generan cambios de índice de refracción en el fluido de la zona de prueba algunos de los rayos que son desviados por gradientes en el índice de refracción son detenidos por la cuchilla, mientras que otros continúan su trayectoria luminosa hasta formar una imagen de contrastes, en donde se pueden observar los patrones de flujo generados. Además es posible encontrar información como la primera derivada del índice de refracción [31].

### 2.3 SCHLIEREN SINTÉTICO

La técnica de schlieren sintético está basada en los fundamentos teóricos del schlieren clásico pero utiliza el procesamiento digital de imágenes en lugar de un procesamiento óptico [7] para obtener los gradientes de campos como la temperatura o la densidad. El arreglo experimental es un poco más sencillo y resuelve a su vez algunas dificultades existentes de la técnica clásica como la alineación del sistema, en especial de los espejos y de la cuchilla. Los espejos representan también un problema económico y técnico, ya que presentan elevados costos de acuerdo a su tamaño, lo cual condiciona a su vez el área de estudio efectiva.

En general para montar un sistema de schlieren sintético sólo es necesario contar con una fuente de iluminación, una máscara especial como referencia, una cámara fotográfica digital, así como equipo y software para procesamiento de imágenes. El arreglo del sistema es simple ya que todo debe ser puesto en dirección al campo focal de la cámara como se muestra en la [Figura 5](#). Entonces, es la cámara la que se ajusta para obtener ya sea una mayor sensibilidad, enfocándola al área de estudio o una mejor definición y nitidez de imagen al enfocarla directamente a la máscara. La máscara, que es colocada detrás del fluido, da textura a las imágenes formadas durante los experimentos.

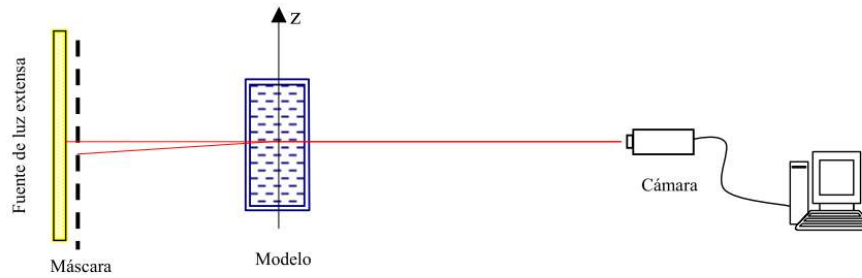


Figura 5: Arreglo típico para la técnica de schlieren sintético. Tomado de: [Thomas et al. \[31\]](#).

La máscara es un acetato que tiene impreso un patrón con pequeños puntos transparentes dispuestos en un fondo negro por los que atraviesa la luz al ser iluminados por detrás de manera uniforme por la fuente. La máscara permite observar y cuantificar las variaciones de densidad respecto de un estado inicial sin perturbaciones, capturado en una primera imagen (imagen 0) conteniendo un patrón de referencia. Al cambiar la temperatura o densidad del fluido en la zona de prueba se ocasionan desviaciones en la dirección de los rayos de luz, distorsionando el patrón de referencia. Las imágenes producidas son comparadas contra la imagen inicial quedando resaltadas las estructuras no homogéneas provocadas por gradientes locales del índice de refracción en el medio [9].

#### 2.4 FUNDAMENTOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL

La ventilación natural por flotación térmica se ha clasificado en ventilación por desplazamiento y ventilación por mezclado [14]. La ventilación por desplazamiento es por ejemplo cuando se tienen aberturas en la parte superior e inferior en una habitación a mayor temperatura que el ambiente. En este caso el fluido cálido tiende a salir por las aberturas superiores mientras que fluido del ambiente a menor temperatura entra por las aberturas inferiores [13]. Entonces se forma un sistema de dos capas separadas por una interfase bien definida. Durante el proceso de ventilación la capa inferior se va engrosando con el tiempo y la superior se adelgaza a medida que todo el fluido cálido abandona la habitación. Cuando se tiene una fuente de calor en la habitación se produce un sistema de dos capas estratificadas en estado permanente [14]. La ventilación por mezclado se produce cuando solo se tienen ventilas superiores en

la habitación a mayor temperatura. En este caso aire cálido sale por las ventilas mientras que aire frío entra por las mismas [13]. El aire que ingresa forma plumas que al descender por la habitación se mezclan con el aire del interior hasta que se alcanza un equilibrio térmico con el ambiente [14].

La convección natural en un cuarto cerrado con una fuente de calor es un caso que ha sido fundamental para estudios de ventilación por flotación térmica ( Tovar et al. 2007 y los ahí mencionados [34], [21]). La evolución del flujo interno producido por la fuente se describe teóricamente en el corto plazo mediante el modelo de llenado de caja o *filling box* [4], [14], [2]. En el largo plazo el calentamiento se puede describir mediante un balance global de flujos de energía por conducción y convección [4]\*. Existe un sinnúmero de posibles configuraciones entre la ubicación y el tamaño de las aberturas para la ventilación. En este trabajo se estudia el efecto de adicionar ventilas traseras en una habitación que tiene una ventana frontal.

Parte II

TRABAJO EXPERIMENTAL



## METODOLOGÍA

---

En este capítulo se explica de manera detallada la metodología experimental empleada durante este trabajo. El arreglo experimental que se implementó es el conjunto de varias técnicas necesarias para esta investigación.

Como base fundamental se utilizó la metodología de modelado de pequeña escala para representar a nivel de laboratorio la ventilación natural en una habitación. Además se instaló y se ocupó la técnica de schlieren sintético como herramienta de visualización de fluidos en movimiento. Adicionalmente se emplearon termopares como método para la medición de temperaturas. El análisis de los resultados obtenidos se efectuó con programas especializados de procesamiento de imágenes y graficación de datos. En las siguientes secciones son descritos cada uno de estos puntos, así como los casos de estudios realizados.

### 3.1 MODELO EXPERIMENTAL

Debido a que los experimentos fueron realizados a escala de laboratorio, fue necesario considerar la importancia de la semejanza geométrica entre una habitación real y el modelo a escala a utilizar. De igual manera se tomó en cuenta la semejanza dinámica de los fenómenos de interés haciendo uso de agua en lugar de aire como fluido de trabajo [15]. El modelado de pequeña escala permite aplicar técnicas de visualización y medición como el schlieren sintético de forma sencilla dando resultados coherentes con los fenómenos de escala natural [32]. El modelo a escala representó a una habitación de sección cuadrada en su base, se construyó con placas de acrílico transparente de 6 y 9 mm de espesor y con medidas internas de 15 cm  $\times$  15 cm en su base y 12 cm de altura. La escala utilizada para el modelo fue de 1:20 con respecto a la escala real.

El modelo cuenta con diversas aberturas que pueden actuar de manera individual o combinada para producir distintas configuraciones de ventilación. Las configuraciones se discuten en la [Sección 3.5](#). Como se puede observar en la [Figura 6](#) el mode-

lo tenía una ventana con medidas de 4 cm  $\times$  4 cm ubicada en el centro de la pared frontal. También tenía una ventila de 4 cm  $\times$  1 cm ubicada en la parte inferior de la pared frontal con un espacio de 2.5 cm de la ventana. Mientras que en la pared trasera estaban ubicadas en la parte superior tres ventilas de 3 cm  $\times$  1 cm con separaciones de 2 cm entre ellas y de 1 cm con las esquinas de la pared. De igual manera estaban ubicadas otras tres ventilas en la parte inferior de la misma pared, contando con las mismas medidas y la misma distribución mencionadas.

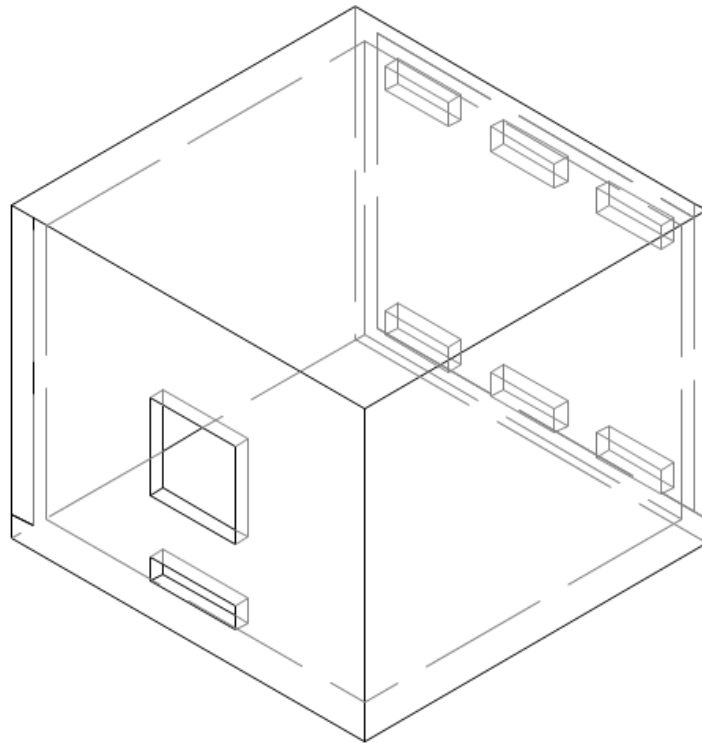


Figura 6: Diagrama de la configuración de ventanas completo del modelo experimental.

Dentro del modelo se colocaba un calefactor eléctrico con potencia nominal de 100 W marca GAL aquarium modelo ThermoMINI de 11 cm de largo y 1.5 cm de diámetro. El calefactor se introducía horizontalmente a través de una perforación roscada en la parte inferior de una de las paredes. Este calefactor simbolizaba ganancias de calor interna generadas por actividades cotidianas de personas en la habitación como limpiar, ejercitarse, etc. o por utilizar aparatos electrodomésticos como

televisores, ordenadores, lavadoras, estufas, etc. El modelo se sumergía dentro de un tanque rectangular lleno de agua, fabricado con placas de acrílico transparente de 2.54 cm de espesor y con medidas de 1.17 m por lado y 1.20 m de altura. El tanque cuenta con una capacidad aproximada de 1640 litros, con lo cual se simula el ambiente que rodea al modelo (fluido a temperatura constante).

### 3.2 SCHLIEREN SINTÉTICO IMPLEMENTADO

El sistema de schlieren sintético implementado permitió visualizar el movimiento de los flujos convectivos dentro del modelo experimental mediante la detección de variaciones en el índice de refracción causados por gradientes térmicos. Como se puede observar en la [Figura 7](#) en ésta técnica se usó un arreglo óptico compuesto por:

- A. Una lámpara hecha con una tira de 5 m con 300 focos led de luz blanca marca CeLed modelo SMD5050 IP65. La tira fue distribuida en forma de un serpentín plano sobre una placa plana de acero inoxidable, que servía para obtener luz de manera uniforme.

La placa con los leds se montó sobre una estructura metálica que le permitía sostenerse verticalmente detrás de la máscara. La lámpara se conectó a una fuente de poder marca Gwinstek modelo GPS-3303 para poder controlar las condiciones de voltaje y corriente constantes a 12.0V y 1.6A respectivamente.

- B. Un atenuador de luz hecho de varias hojas de papel albano colocadas entre dos placas delgadas de acrílico transparente para obtener luz difusa, el cual se colocó entre la lámpara y la máscara.
- C. Una máscara con un patrón de pequeños puntos transparentes aleatorios en un fondo negro. La máscara fue generada digitalmente e impresa en una hoja de acetato transparente de 0.90 m × 1.20 m [4], la cual fue adherida sobre la pared trasera del tanque ambiental.

La máscara sólo permite pasar luz a través de los puntos transparentes (espacios libres de tinta negra), los cuales son de un mismo tamaño y sirven como patrón de referencia.

- D. Una cámara fotográfica digital marca Basler modelo A102k de 8 bits adaptada con un lente marca Nikon de 60 mm y un teleconvertidor 2x marca Tamron MC.

La cámara fue dispuesta sobre una placa metálica de aluminio, y ésta a su vez fijada a un riel de metal sujetado sobre una mesa de madera. La mesa se colocó en un bloque de piso aislado de vibraciones del mismo laboratorio. Lo anterior para evitar ligeros movimientos de la cámara durante la toma de imágenes.

- E. Un tanque ambiental lleno de agua que funcionó como zona de prueba al quedar colocado entre la máscara y la cámara fotográfica. La distancia entre el lente de la cámara y la pared trasera del tanque (donde estaba adherida la máscara) era de  $\approx 3.85$  m.

Dentro del tanque se sumergía el modelo experimental, el cual se fijaba con grasa silicón a una base colgante hecha de placas de acrílico. El modelo se colocaba de tal manera que las paredes con ventanas quedaran orientadas perpendicularmente al eje principal del schlieren, sirviendo así las paredes laterales para realizar la visualización a través del modelo. La distancia entre la máscara y la pared lateral del modelo (en donde se acoplaba el calefactor) era de  $\approx 30$  cm.

Se utilizó una computadora de escritorio en donde se conectó la cámara fotográfica y se instaló el software necesario para la adquisición y procesamiento de las imágenes obtenidas en los experimentos. La computadora contaba con una tarjeta madre Gigabyte GZ87MD3H 1150, procesador Intel I7 4770 4-CORE, memoria DDR3 8 GB, Windows 8 OEM y Office Profesional.

La adquisición de las fotografías se logró con un programa específico, realizado con el software *Lab View* versión 11.0 de National Instruments que es una actualización y adaptación del presentado por Cedillo Rocel en 2001 [5]. El programa permite hacer la captura, almacenamiento y temporizado de las imágenes de manera automática ([Apéndice A](#)).

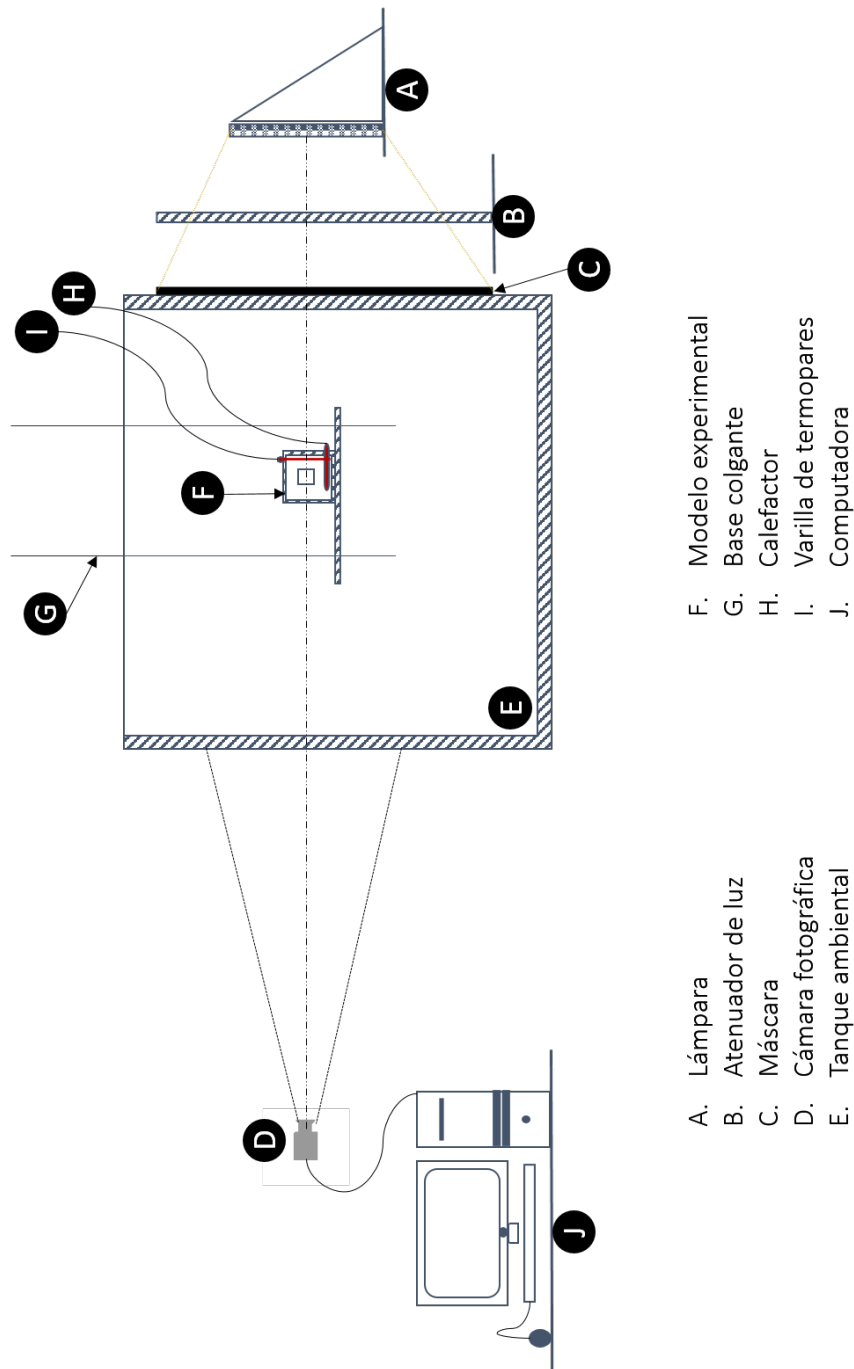


Figura 7: Esquema de corte transversal del arreglo experimental utilizado para la visualización con el schlieren sintético implementado.

### 3.2.1 Observaciones y recomendaciones

Durante el montaje del schlieren sintético y la puesta en marcha de las campañas experimentales se encontraron mejoras y adaptaciones al sistema que pueden ser de ayuda para futuros

trabajos, por lo que es importante mencionarlas en esta sección.

Dado que el schlieren sintético se trata de una técnica con alta sensibilidad hay aspectos a cuidar durante su montaje y funcionamiento. Se debe poner especial atención en detectar y solucionar problemas con la contaminación luminosa y vibratoria por lo que se recomienda:

- Realizar los experimentos en un lugar aislado de luces, vibraciones y polvo externos que pueden afectar el funcionamiento de la cámara o que puedan contaminar el área de experimentación.
- Evitar abrir puertas o ventanas una vez empezado el experimento para no generar corrientes de aire hacia el área de experimentación.
- Fijar la cámara en un lugar lo suficientemente pesado para impedir pequeños desplazamientos de posición.
- Evitar hacer movimientos bruscos o muy fuertes cerca de la zona de estudio cuando el sistema se encuentra montado, incluso cuando no se esté realizando experimentación para prevenir posibles movimientos de la cámara.
- Aislar el área entre la cámara y la zona de pruebas debido a que la temperatura ambiente del laboratorio influye en la visualización.
- Evitar tener fuentes de calor o de movimiento cercanas al área de experimentación. Inclusive es necesario desalojar a las personas del laboratorio desde antes de iniciar los experimentos.
- Verificar que la intensidad de la lámpara se mantenga constante durante el experimento, así como encenderla con antelación a la puesta en marcha.
- Verificar que la temperatura del laboratorio sea lo más homogénea posible para prevenir plumas térmicas ajenas al experimento que interfieran en la visualización.
- Mantener constante la temperatura de la zona de prueba (tanque ambiental y modelo) para impedir que haya estratificación inicial en el medio a observar.

- Proteger el área de prueba (tanque ambiental) de cualquier contaminación externa que genere perturbaciones en el medio manteniéndolo cubierto.
- Conservar el tanque ambiental y el modelo limpios, libres de cualquier mancha que impida pasar los rayos de luz a través de ellos o afecte su trayectoria.
- Retirar del modelo cualquier burbuja que se genere dentro o fuera de él, a su alrededor o en el cuerpo del calefactor ya que afectan en la visualización y medición de temperatura.
- Sellar los bordes de las paredes, piso y techo del modelo para evitar fugas durante la experimentación.
- Mantener fijo el modelo a una base, marcando su ubicación para prevenir movimientos internos en la zona de prueba.
- Apretar cualquier tapón o tuerca en donde se puedan producir fugas desde el interior del modelo hacia el ambiente exterior.
- Filtrar el agua del tanque ambiental para recoger cualquier partícula flotante al interior.
- Clorar el agua del tanque cuando presente una apariencia turbia y mezclarla para homogenizarla.
- Dejar reposar el agua el tiempo suficiente después de hacer alguna operación o movimiento en el tanque para prevenir ondas internas o estratificación térmica.
- Pegar perfectamente la máscara a la pared trasera del tanque ambiental evitando dejar cualquier burbuja de aire.
- Enfocar bien el lente de la cámara ya sea al modelo o a la máscara.
- Procurar tener automatizado las operaciones de los experimentos para evitar realizar movimientos excesivos en la puesta en marcha.
- Verificar y cronometrar los tiempos de arranque tanto de la cámara como de adquirentes de datos y puesta en operación del calefactor.

### 3.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS

Para medir la temperatura en varios puntos del sistema se utilizó un arreglo de 20 termopares tipo T (cobre-constantán) marca Omega, calibre 30 de 2.3 m de largo. Los termopares fueron conectados a una tarjeta multiplexora de 20 canales marca Agilent modelo 34901A, conectada a su vez a un adquisidor de datos marca Agilent modelo 34972A. El adquisidor Agilent se instaló y conectó a una computadora con el programa *BenchLink Data Logger 3* versión 4.3 de Agilent Technologies. Mediante una configuración específica del sistema se realizaron las mediciones de temperaturas de manera automatizada a intervalos de tiempo definidos. También fue posible predeterminedar la hora de arranque y finalizado de la toma de datos, así como almacenar los archivos con los datos.

Se ocupó una varilla delgada hecha a partir de una aguja de metal cortada a  $\approx 12$  cm de largo para sostener a los primeros once termopares dentro del modelo. La varilla fue fijada a un tapón de bronce roscado con un orificio por donde se introdujo el conjunto de termopares. Éstos se colocaron de manera vertical con una separación de  $\approx 1.2$  cm entre sus puntas. La varilla de termopares se introducía a través de un pequeño orificio de 10 mm ubicado en el techo cerca de una de las esquinas del modelo, en el cual se roscaba el tapón. Los termopares fueron ubicados de esta manera con la finalidad de monitorear la evolución de la temperatura al interior del modelo.

Complementariamente fueron colocados tres termopares en el cuerpo cilíndrico del calefactor para monitorizar su temperatura en diferentes puntos. Estos termopares se distribuyeron a distancias de  $1/4$ ,  $1/2$  y  $3/4$  de su longitud y a ángulos de  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  respectivamente. También se usó un termopar para medir la temperatura del tanque ambiental y otro para la del laboratorio, con el fin de registrar ambas condiciones ambientales y eventualmente identificar su influencia en los resultados. Los cuatro termopares restantes quedaron como repuesto.

#### 3.3.1 Calibración de termopares

Se realizó una calibración previa de los termopares utilizando un calibrador marca Ametek modelo Jofra PTC-155 B. El



rango de temperaturas de calibración se varió desde 0°C hasta 100°C con incrementos de 10°C. Mediante regresiones lineales se consiguieron los parámetros de ajuste ( $m$  y  $b$ ) para cada uno de los termopares, los cuales se presentan en el Cuadro 1. Estos valores se usaron para corregir las mediciones obtenidas en los experimentos.

Cuadro 1: Coeficientes  $m$  y  $b$  de regresión lineal simple para cada termopar.

TERMOPAR	M	B
101	0,9974	0,7574
102	0,9973	0,7387
103	0,9973	0,7282
104	0,9974	0,7247
105	0,9970	0,7336
106	0,9973	0,7090
107	0,9975	0,6899
108	0,9970	0,7064
109	0,9967	0,7219
110	0,9997	0,6756
111	0,9975	0,6279
112	0,9970	0,6979
113	0,9970	0,7100
114	0,9971	0,7146
115	0,9968	0,7356
116	0,9975	0,7501
117	0,9975	0,7003
118	0,9971	0,7600
119	0,9979	0,7624
120	0,9980	0,7757

### 3.4 MEDICIÓN DE LA POTENCIA DEL CALEFACTOR

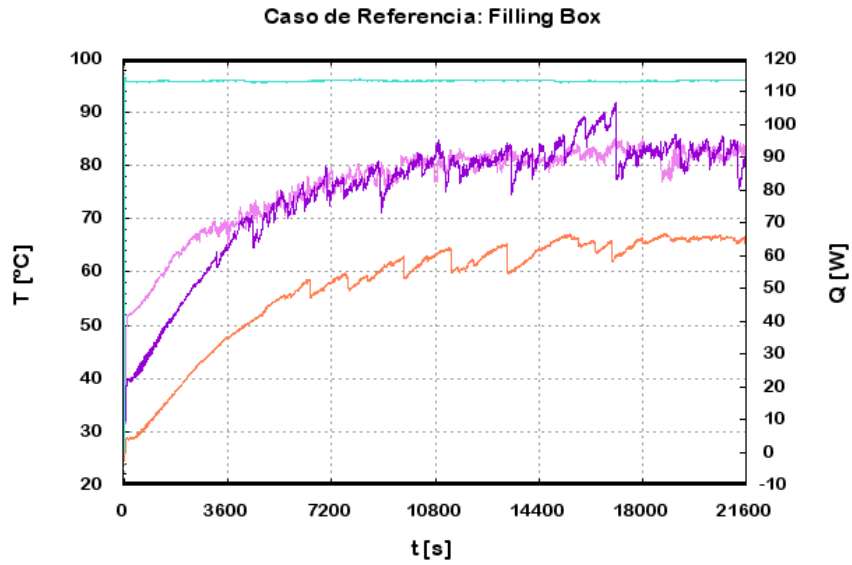
Para poder detectar posibles fluctuaciones en el suministro de la tensión eléctrica durante los experimentos, se llevó a cabo el monitoreo de la corriente consumida por el calefactor. Las

mediciones de intensidad de corriente se obtuvieron de manera automática cada 2 segundos utilizando un multímetro marca HP modelo 34401A y el programa *Agilent Digital Multimeter Connectivity Utility* versión 1.0.2.0 de Agilent Technologies. La caída de voltaje solo se midió al inicio y al final de los experimentos utilizando un multímetro manual marca Steren modelo MUL-600.

En la [Figura 8](#) se ilustran dos ejemplos de gráficas del comportamiento del consumo de potencia ( $Q$ ) y la evolución de las temperaturas registradas para un caso de referencia *filling box* ([Figura 8a](#)) y para el primer caso de ventilación natural estudiado ([Figura 8b](#)). Como se observa en ambas gráficas las fluctuaciones de la potencia del calefactor son despreciables comparadas con el valor promedio. Sin embargo, sí se observan fluctuaciones en la temperatura medida en los tres puntos del calefactor las cuales son originadas por la dinámica desarrollada por el fluido dentro del modelo, así como por la producción intermitente de burbujas en el cuerpo del calefactor.

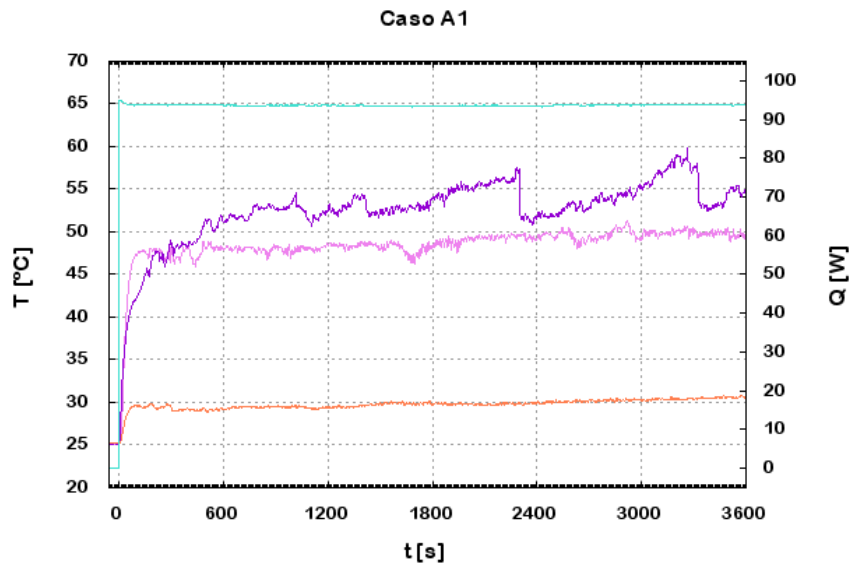
### 3.5 CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio experimentales planteados para realizarse en este trabajo se muestran en la [Figura 9](#). En los diagramas se ilustra las ventanas que se dejaron abiertas en cada caso. Para todos los casos de la familia A se mantuvo abierta la ventana grande de la pared frontal del modelo. De acuerdo con los diagramas, en el primer caso A1 ([Figura 9a](#)) sólo se dejó abierta dicha ventana. Para el caso A2 ([Figura 9b](#)), se abrió además la ventila superior central trasera y para el caso A3 ([Figura 9c](#)) la inferior central trasera. En el caso A4 ([Figura 9d](#)) se dejó abierta la ventana grande frontal y las tres ventilas superiores traseras y en el caso A5 ([Figura 9e](#)) las tres ventilas inferiores traseras. Adicionalmente se realizó un caso antes estudiado y conocido como el modelo de llenado de caja o "*filling box*" [4] [33], en el cual se mantiene todo el modelo cerrado con una fuente de calor encendida.



Termopar				
117	118	119	Q	

(a)



Termopar				
117	118	119	Q	

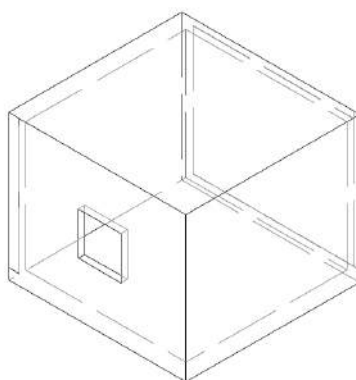
(b)

Figura 8: Potencia  $Q$  y temperaturas resitradas por la operación el calefactor.

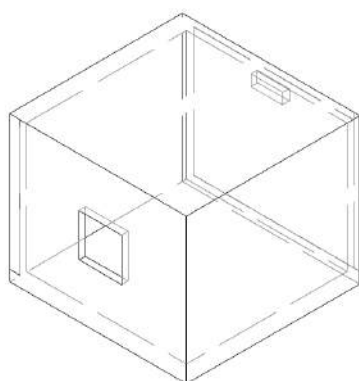
### 3.6 EXPERIMENTACIÓN

#### 3.6.1 Previo a los experimentos

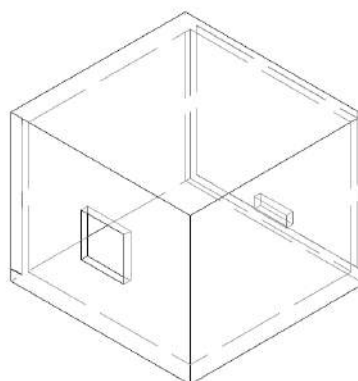
Antes de poner en marcha un experimento con alguno de los casos de estudio, se preparaba al modelo con la configura-



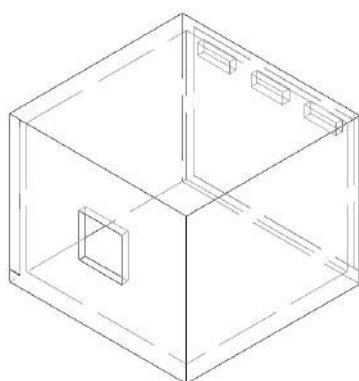
(a) A1



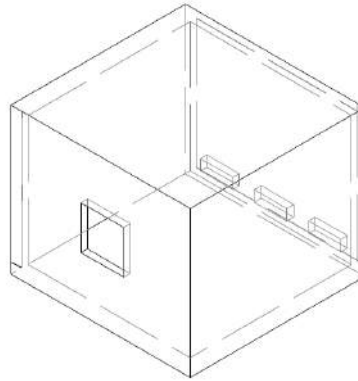
(b) A2



(c) A3



(d) A4



(e) A5

Figura 9: Diagramas de las configuraciones de ventilas abiertas en el modelo experimental para los diferentes casos de estudio realizados.

ción de ventilación planeada, y después de estar bien limpio y preparado con la varilla de termopares y el calefactor bien colocados, era sumergido dentro del tanque ambiental y fijado con

grasa de silicón a la base colgante. Se dejaba reposar el tiempo suficiente para mitigar los movimientos del agua y durante ese tiempo se encendía la lámpara led para estabilizar su intensidad. También se ponía en funcionamiento por un corto tiempo el equipo de aire acondicionado del laboratorio para homogeneizar la temperatura. Después de un tiempo de haber apagado el aire acondicionado se cubría el espacio entre la cámara y el tanque ambiental, para impedir el paso de plumas térmicas en el aire externas al experimento que interfirieran en ésta técnica de visualización.

### 3.6.2 *Puesta en marcha de los experimentos*

Una vez preparado el arreglo experimental para iniciar los experimentos se apagaban las luces del laboratorio y se cerraban las puertas. Enseguida se registraban la corriente y el voltaje en la lámpara led con fines de control y monitoreo de la misma. Diez minutos antes de encender el calefactor se iniciaba la captura de imágenes, las cuales se tomaban cada 10 s. Luego, cinco minutos antes de encenderlo se daba comienzo a la medición de temperaturas y de intensidad de corriente eléctrica consumida por el calefactor. Estas mediciones se registraban automáticamente cada 2 s. Entonces se ponía en funcionamiento el calefactor para generar el efecto de la fuente de calor interna y arrancar el experimento. Al momento de conectar el calefactor se le consideraba como el tiempo 0. La conexión del calefactor se realizaba en un contacto desde afuera del laboratorio para evitar perturbar el ambiente del mismo. Al conectar el calefactor también se registraba el voltaje suministrado para su funcionamiento. Los experimentos se detenían al desconectar el calefactor. La duración de los experimentos era de aproximadamente 12 h. Ya detenido el experimento se volvía a registrar el voltaje proveído al calefactor así como la intensidad y el voltaje de la lámpara de leds. Posteriormente se procedía al procesamiento de las imágenes tomadas así como al análisis de las mediciones de temperatura.

## 3.7 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SCHLIEREN

El procesamiento de las imágenes obtenidas en los experimentos se llevó a cabo utilizando el software especializado *DigiFlow* versión 3.6.0 de Dalziel Research Partners, el cual ofrece una gama de funciones diseñadas específicamente para el

análisis de flujos de fluidos [8]. Para el análisis de imágenes schlieren, *Digiflow* provee varias alternativas de procesamiento de las cuales la opción de visualización cualitativa o *Qualitative preview* fue la que se empleó en este trabajo.

### 3.7.1 Visualización cualitativa

La visualización de los flujos convectivos se consiguió procesando las series de las imágenes capturadas en los experimentos. Las series contenían alrededor de 4400 imágenes. Primero se escogía un número pequeño y representativo de las imágenes iniciales en las que no existía ninguna perturbación para hacer una sola imagen de referencia inicial promedio (imagen 0). Ésto se realizaba desde el menú *Analyse* seleccionando la opción *Ensemble* y después la opción *Mean*. En la [Figura 10](#) se muestra la ventana emergente que permitía seleccionar las imágenes que se agregaban para conformar la imagen 0, así como elegir en donde se guardaba y el tipo de archivo de la imagen resultante. La ventana contiene además los controles para el tratamiento estadístico que se le daba al conjunto de imágenes elegidas.

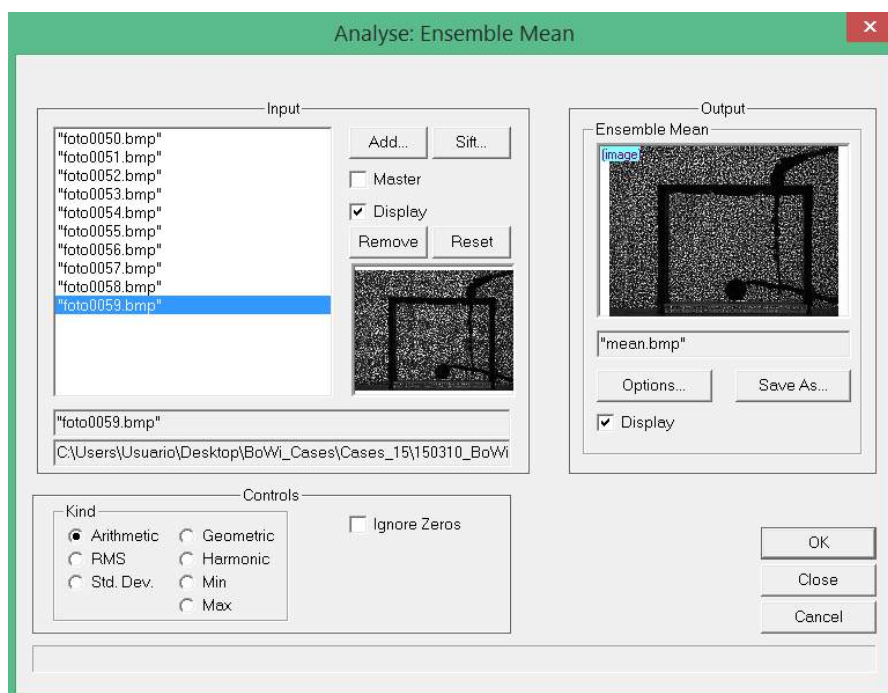


Figura 10: Ejemplo de la ventana para crear la imagen 0 desde *Digiflow*.

Una vez generada la imagen 0, se procedía a generar las imágenes schlieren de visualización. Desde el menú *Analyse* se seleccionaba la opción *Synthetic Schlieren* y de ahí la opción *Qualitative Preview*. Al seguir estos pasos se desplegaba una ventana donde se seleccionaban en el lado izquierdo las imágenes del experimento completo para colocarlas en el apartado de *Experiment*, y en el lado derecho la imagen de referencia antes creada (imagen 0) para colocarla en el apartado de *Background Image* (Figura 11).

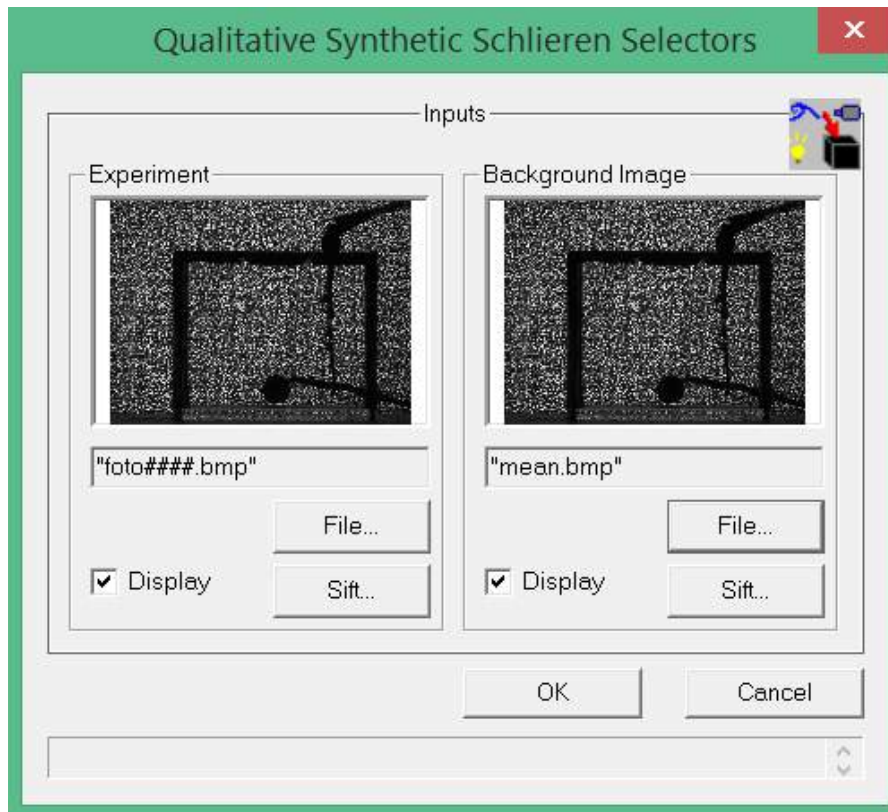


Figura 11: Ejemplo de la ventana para seleccionar las imágenes para la visualización previa desde *Digiflow*.

Al realizar lo anterior, se abrían dos ventanas nuevas, la de visualización y la de controles. En la ventana de visualización se mostraban directamente las imágenes schlieren procesadas. Y en la otra ventana, los controles con los que se manipulaba la reproducción de la serie de imágenes schlieren cambiando parámetros como la velocidad de reproducción, el tipo de procesamiento o la ganancia o aumento en la intensidad del efecto sobre la visualización (Figura 12). Cabe señalar que *Digiflow* tiene predeterminado un procesamiento por diferencias y con

una ganancia de 10. Con éste procesamiento las imágenes son comparadas contra la imagen 0 para determinar los cambios en el índice de refracción y poner de manifiesto las estructuras formadas en el interior del modelo. El valor absoluto de la diferencia con la imagen 0 por defecto es amplificado  $\times 10$  en cada uno de los pixeles (gain).

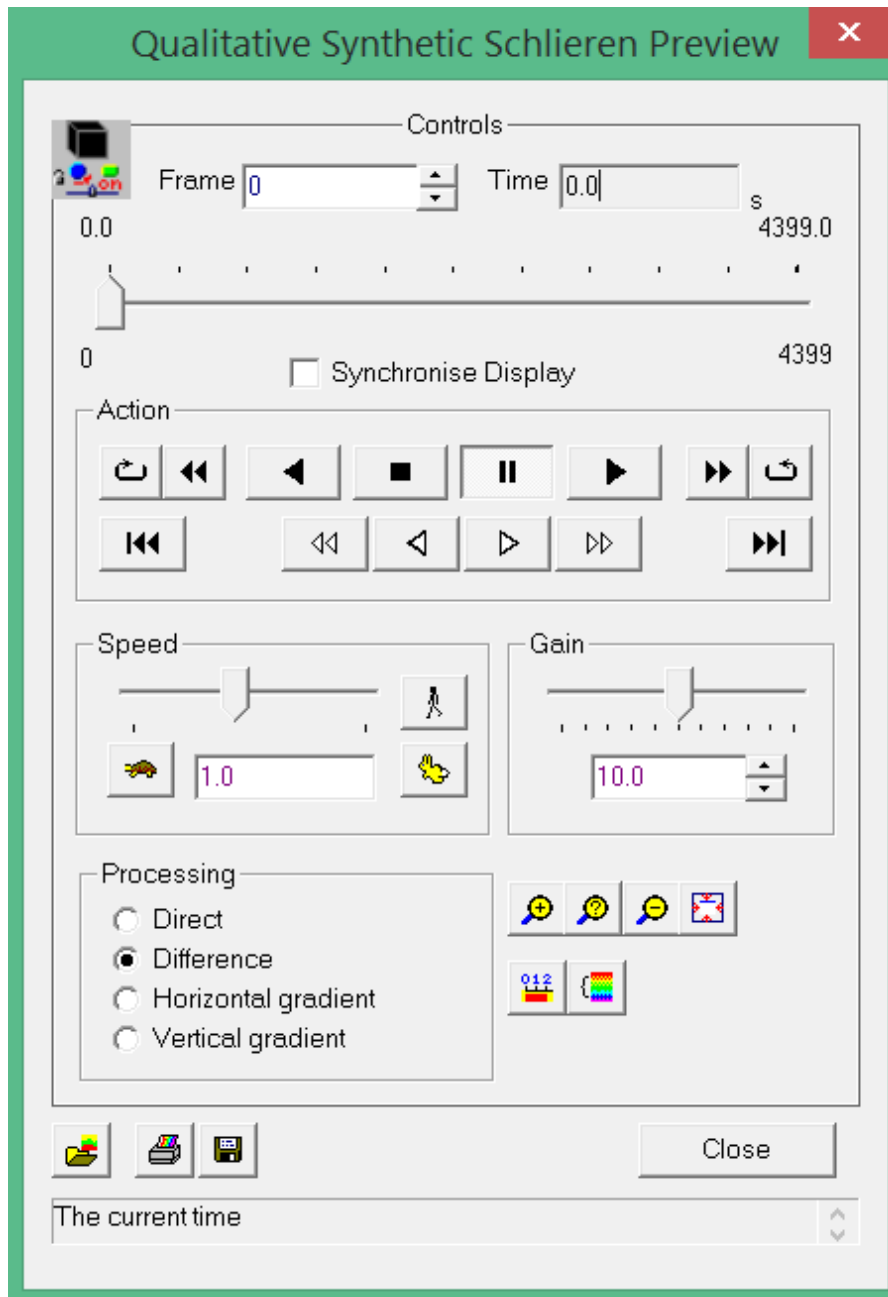


Figura 12: Ejemplo de la ventana de controles para la visualización previa de shclieren sintético desde *Digiflow*.



## RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de los experimentos realizados en el modelo de habitación utilizando la metodología de pequeña escala. Los resultados comprenden imágenes de los flujos obtenidas con la técnica de schlieren sintético y mediciones de temperatura adquiridas con el sistema de termopares. A partir de la visualización de los flujos desarrollados mediante las imágenes schlieren se describe de manera cualitativa su evolución. Adicionalmente las mediciones de temperatura son relacionadas con los eventos observados para los diferentes casos de estudio.

### 4.1 CUARTO CERRADO

En este trabajo se reprodujo experimentalmente el proceso de llenado de caja como caso de referencia para los casos de estudio de esta tesis así como para obtener el coeficiente global de transferencia de calor entre el modelo y el ambiente [33] [4]. Para este caso los experimentos se llevaron a cabo sin ventilación, con la ventana y las ventilas cerradas encendiendo el calefactor. El proceso del calentamiento de la habitación bajo estas condiciones se puede dividir en dos etapas: el corto plazo representado por el modelo teórico del llenado de caja o *filling box* y el largo plazo representado por un estado cuasi-estacionario hasta llegar al estado permanente.

En las imágenes de la [Figura 13](#), se muestra el desarrollo del llenado de caja el cual es un proceso rápido que constituye una fase bien definida dentro del calentamiento de la habitación. Inicialmente en la [Figura 13a](#) y [Figura 13b](#) se observa, previo al llenado de caja, el nacimiento y crecimiento de la pluma térmica. A los 20 segundos de haber conectado el calefactor la cabeza de la pluma se está formando y, dada la geometría cilíndrica de la fuente, se infiere que tiene una estructura bidimensional. A los 30 segundos se ha conformado además de la cabeza, el tallo de la pluma que se puede describir como una cortina de fluido cálido ascendente que durante su desarrollo incorpora a sí

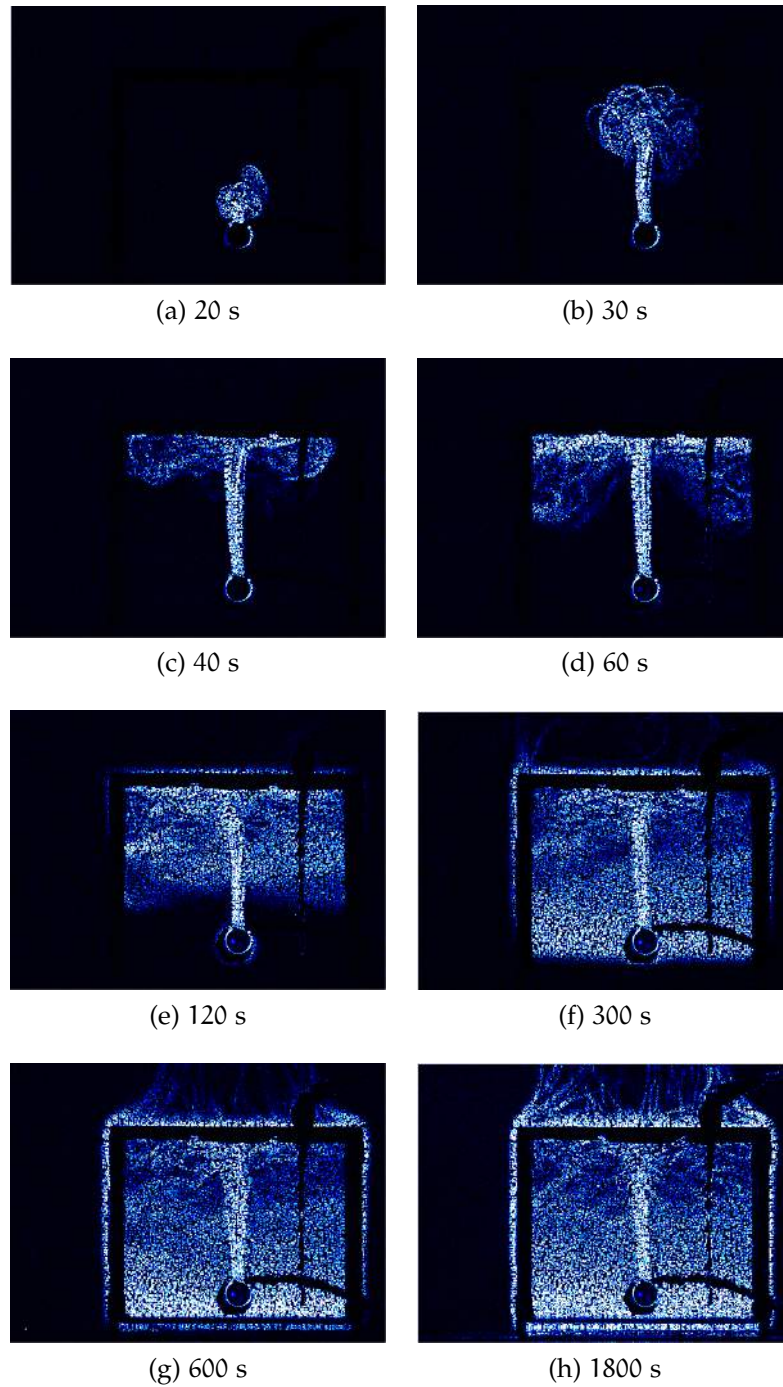


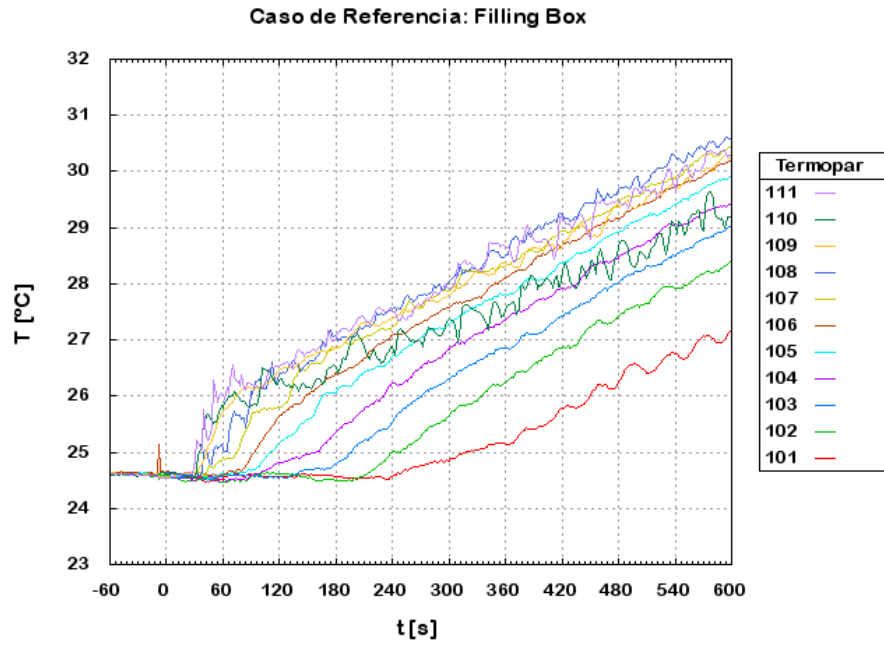
Figura 13: Imágenes schlieren del calentamiento de un cuarto cerrado. A los 20 s y 30 s se muestra respectivamente el nacimiento y crecimiento de la pluma térmica después de encender el calefactor. El proceso de llenado de caja ocurre entre 30 s y 300 s. A partir de los 300 s inicia el estado cuasi-estacionario.

misma fluido de sus alrededores. A este arrastre e integración de fluido se le conoce como *entrainment*. Ambas estructuras son inestables y adoptan un régimen turbulento. A este tiempo la pluma ha alcanzado el techo de la habitación y es entonces cuando se considera que inicia el llenado de caja.

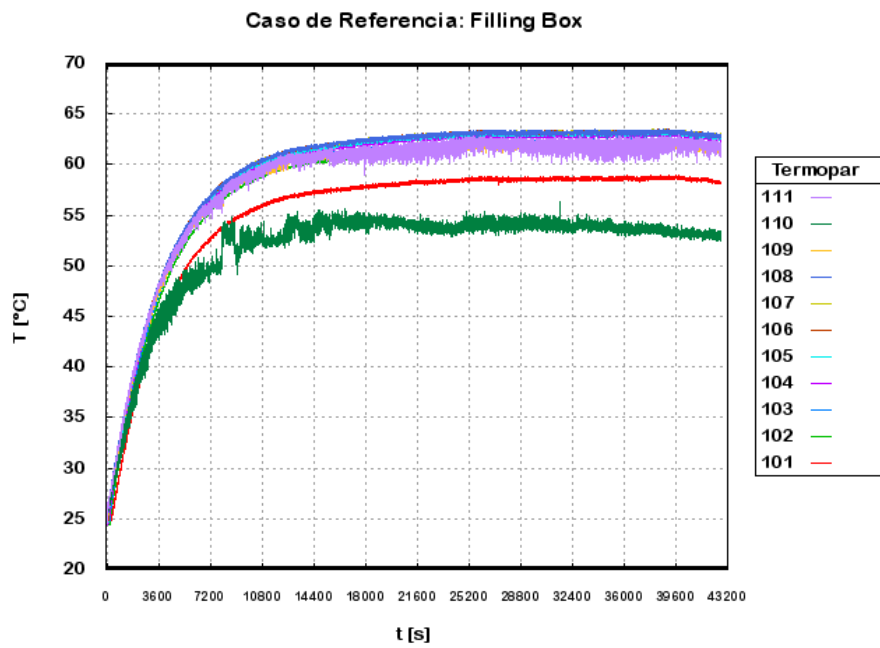
En la [Figura 13c](#) (40 s) se observa que el avance de la pluma es interceptado por el techo y el fluido cálido comienza a acumularse por debajo del mismo formando una capa que engruesa con el tiempo y cuyo frente térmico descendente es irregular. En la [Figura 13d](#) se observa que el frente térmico sigue descendiendo formando estructuras o lóbulos adyacentes a las paredes con una posición adelantada. Para los 120 segundos el avance del frente térmico ha descendido más de la mitad de la altura de la habitación y tiene una apariencia plana sin lóbulos ([Figura 13e](#)). El avance del frente descendente sigue su curso hasta llegar al piso a los 300 s ([Figura 13f](#)). A partir de este momento se da por terminado el proceso de llenado de caja y se inicia un estado cuasi-estacionario en donde el fluido de la habitación se recircula continuamente a través de la pluma. En la [Figura 13g](#) y [Figura 13h](#) se puede apreciar que hay pérdida de calor a través de la envolvente, la cual se pone de manifiesto por la presencia de capas térmicas exteriores adyacentes a las paredes y plumas que se desprenden por encima del techo.

Conjuntamente se puede dar seguimiento al avance del frente térmico utilizando las mediciones tomadas por los termopares al interior del modelo ([Figura 14](#)). Esto se logra al relacionar el tiempo en que ocurren las inflexiones en las trazas de temperatura de la [Figura 14a](#) con el momento en que el frente térmico alcanza la altura de cada termopar. Se puede inferir que el tiempo de llenado de caja es de aproximadamente 240 s, ya que es cuando se observa la última inflexión correspondiente al termopar ubicado en el piso de la habitación (101), lo cual concuerda con la descripción hecha a partir de las imágenes schlieren. Después de este momento, la temperatura en el interior de la habitación aumenta de manera asintótica en un estado cuasi-estacionario de largo plazo hasta alcanzar la temperatura del estado permanente ([Figura 14b](#)).

Se debe aclarar que la mayor temperatura es la correspondiente al termopar 108 ubicado a una altura  $y = 8.4$  cm. Las



(a) Corto plazo



(b) Largo plazo

Figura 14: Evolución de la temperatura a diferentes alturas dentro del cuarto cerrado con la fuente de calor interna.

temperaturas correspondientes a las posiciones de los termopares 109, 110 y 111 son ligeramente menores que la del 108 lo cual se atribuye a que encima de esos termopares se encontraba

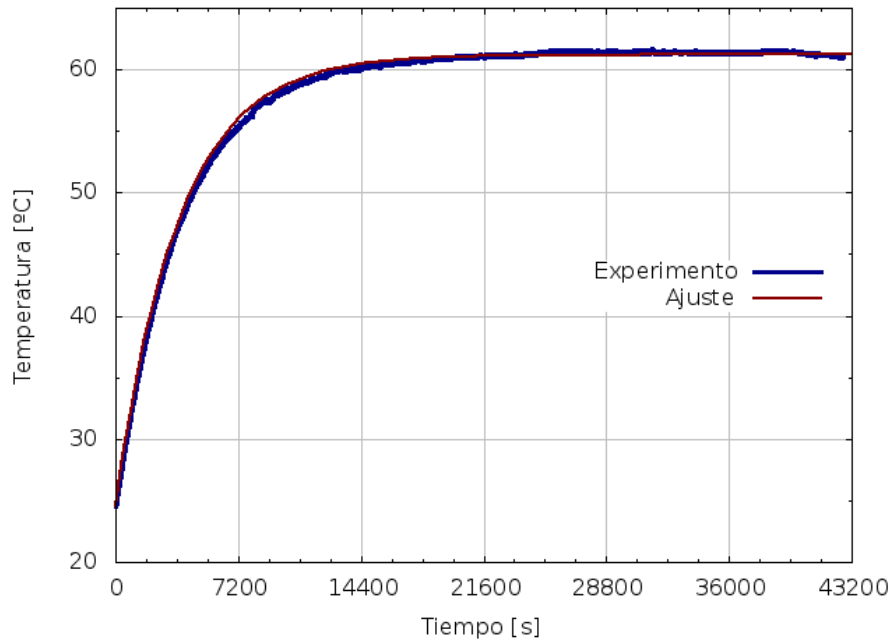


Figura 15: Evolución de la temperatura promedio en el caso de un cuarto cerrado con fuente de calor interna. La línea azul la temperatura promedio interior y la línea roja el ajuste numérico para el coeficiente global de transferencia ( $U_L = 25.9 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

colocado el tapón metálico que servía de soporte a la columna de termopares. Este tapón actuaba como puente térmico produciendo un ligero enfriamiento local en la zona de los termopares superiores.

#### 4.2 VENTANA FRONTAL ABIERTA

El primer caso que se realizó con ventilación fue el A1 el cual fungió como caso base. Este caso corresponde a tener solamente la ventana frontal abierta. En la [Figura 16](#) se muestran imágenes de la evolución del experimento. Durante los primeros segundos se tiene el mismo proceso que en el cuarto cerrado. A los 30 s ([Figura 16a](#)) se observa cuando la pluma térmica de la fuente de calor llega al techo dando inicio al llenado de caja. A los 60 s ([Figura 16b](#)) la capa térmica formada ha ocupado aproximadamente la cuarta parte superior de la habitación. En los 120 segundos el frente térmico ha descendido más de la mitad de la altura de la habitación por lo que ha alcanzado el vano superior de la ventana y entonces por ahí comenzó a salir fluido de

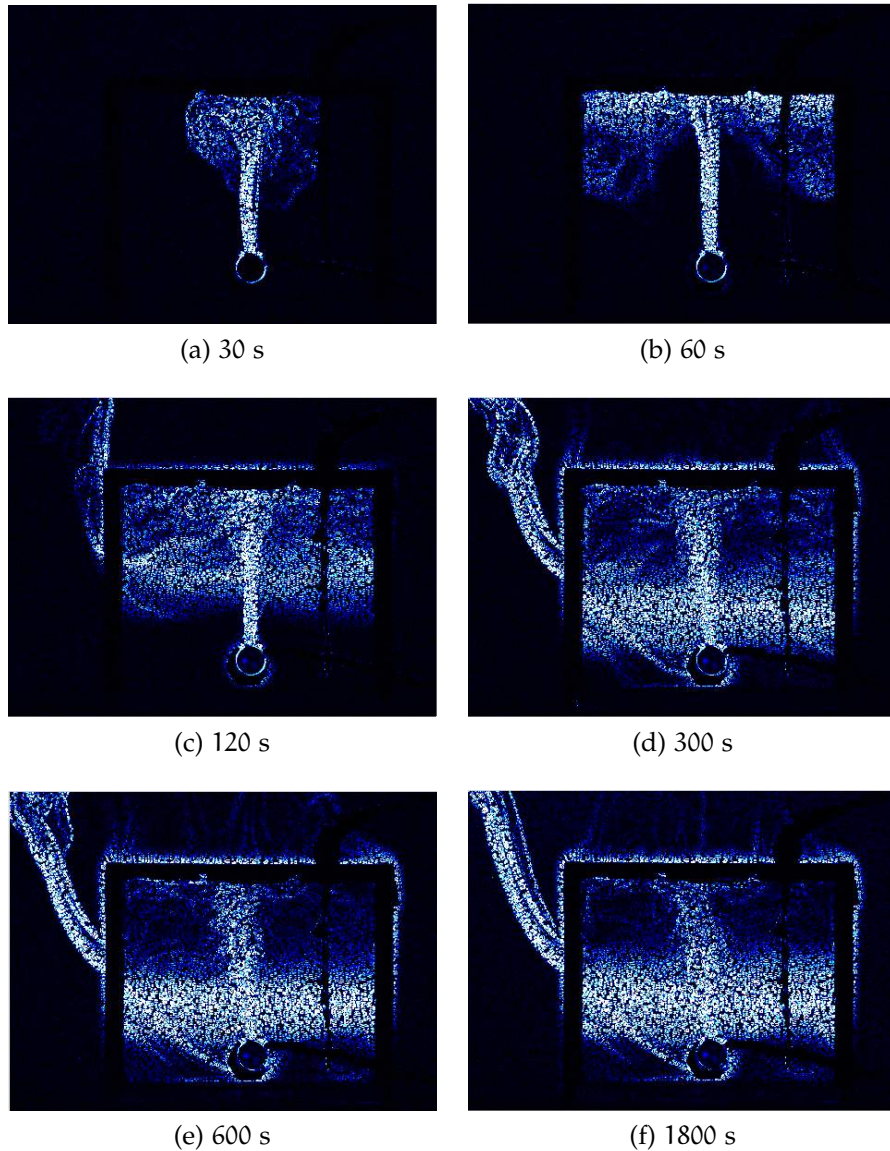
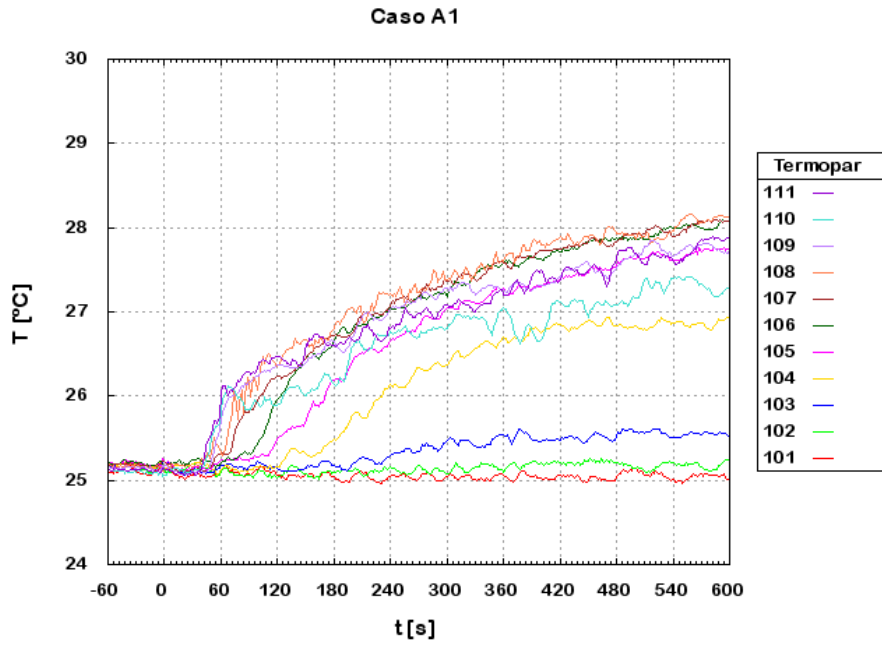
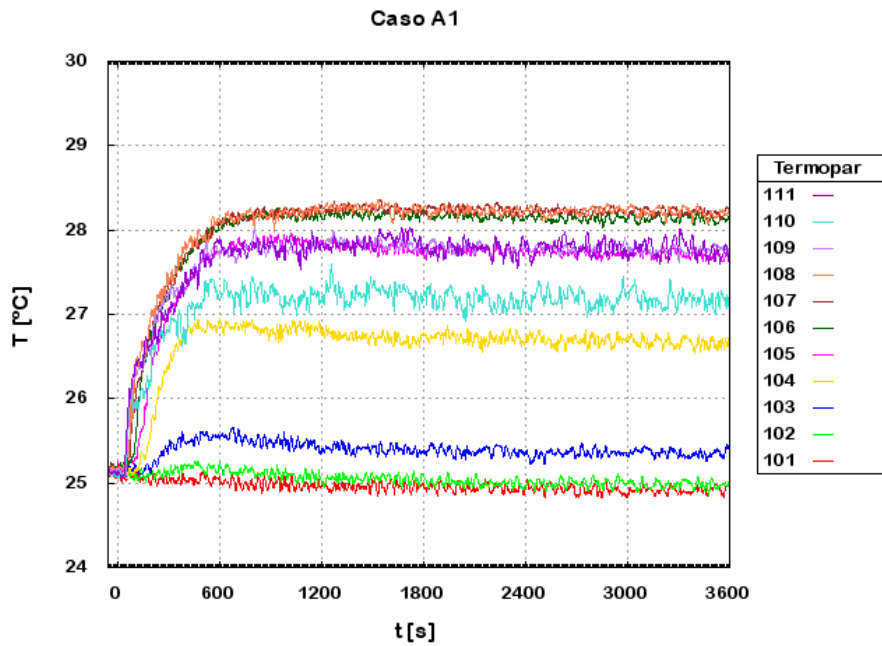


Figura 16: Imágenes schlieren para el caso A1 con la ventana frontal abierta.

mayor temperatura en forma de una pluma ascendente (Figura 16c). La presencia de la ventana y la pérdida de fluido cálido a través de ésta interrumpen el proceso normal de llenado de caja al disminuir la velocidad de descenso del frente térmico. Para el tiempo de 300 s el avance del frente térmico llega al nivel de la parte superior del calefactor (Figura 16d). Se puede observar que la pluma térmica interior se mantiene en régimen turbulento. Además es notable un mayor flujo de salida por la ventana, el cual se presenta en régimen laminar en la parte inferior volviéndose inestable a medida que asciende. El flujo a



(a) Corto plazo



(b) Largo plazo

Figura 17: Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A1.

través de la ventana es bidireccional, se conforma por un flujo cálido saliendo por la mitad superior y un fluido del ambiente entrando por la mitad inferior. Esto se infiere a partir de la línea

en diagonal que se distingue en la parte inferior izquierda de las imágenes (d), (e) y (f), la cual va del centro de la ventana al parte inferior del calefactor. De esta manera la ventana realiza su función de permitir la ventilación tipo mezclado o *'mixing'*, al actuar como área de intercambio de masa y energía entre el ambiente exterior y el interior de la habitación. Para el tiempo de 600 (Figura 16e) el avance del frente térmico se mantiene a la altura superior del calefactor, que es su altura estacionaria. El frente estacionario se puede considerar como una interfase que separa el sistema en dos capas de fluido estratificado, siendo la capa superior de mayor temperatura y la inferior de la misma temperatura que el ambiente. En el estado permanente (1800 s) se tienen flujos completamente desarrollados que producen un balance de flujo de energía en la habitación (Figura 16f). Al centro de la habitación se encuentra la pluma turbulenta por donde se suministra la energía mientras que por la ventana se encuentra el flujo de salida por el que escapa la mayor parte de la energía simultáneo al flujo entrante de menor energía. Adicionalmente se tienen las plumas exteriores adyacentes a las paredes y las plumas que se desprenden por encima del techo.

Las mediciones obtenidas con los termopares del interior nuevamente nos dan información cuantitativa de la evolución de la temperatura en el experimento como se muestra en la Figura 17. Para el corto plazo (Figura 17a), a partir de las inflexiones en las señales de temperatura, se puede deducir el momento en el cual el frente térmico llega a cada nivel de la habitación. La llegada a los diferentes niveles se relaciona con el momento cuando existe un cambio abrupto de aumento en la temperatura del fluido. La finalización del descenso del frente térmico se relaciona con el aumento de  $\approx 0,5^{\circ}\text{C}$  a partir de los 240 s del termopar 103 ubicado a 2,4 cm. Se observa que el frente no llega a los dos termopares inferiores, ubicados por debajo de 2,4 cm, por lo que se considera que aproximadamente a esa altura se encuentra la interfase que divide al sistema en dos capas. Entre los 240 y los 600 s se tiene un estado cuasi-estacionario relativamente corto respecto al del cuarto cerrado. Durante este tiempo la interfase se mantiene a una altura constante pero el fluido de la capa superior se sigue calentando por el suministro de energía de la pluma térmica. La razón de aumento de temperatura decrece con el tiempo hasta volverse nulo alrededor de los 1200 s, para entonces llegar al estado permanente, lo cual coincide con las imágenes schlieren presentadas (Figura 17b).



En el estado permanente se distingue que las mediciones de temperatura se agruparon en dos niveles que corresponden a las dos capas estratificadas. La mayor diferencia de temperatura entre las capas es de  $\Delta T = 3.0^{\circ}\text{C}$  (la diferencia entre  $28.2^{\circ}$  y  $25.2^{\circ}$ ). Para este caso, el aumento de temperatura alcanzado en la habitación es muy inferior al alcanzado para el caso del cuarto cerrado ( $\Delta T = 38.5^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.3 VENTANA FRONTAL Y VENTILA CENTRAL SUPERIOR TRASERA ABIERTAS

Para el caso A2 se mantuvo abierta además de la ventana frontal la ventila superior trasera de enmedio. La imagen schlieren tomada a los 30 s ([Figura 18a](#)) muestra que la pluma térmica está a punto de tocar el techo, como en el caso A1. Al transcurrir 60 s se ha formado la capa térmica que se extiende por debajo del techo y comienza a escapar fluido cálido por la ventila abierta. En este caso también se interrumpe el proceso de llenado de caja por el escape de fluido cálido, al igual que en el caso A1 pero en un tiempo menor. Se establece de manera temporal un tipo de ventilación por desplazamiento con una fuente de calor interna, donde la pluma térmica suministra flujo a la capa térmica superior mientras que otro flujo sale por la ventila. Dado que el suministro de la pluma es mayor que la salida, la capa cálida sigue engrosando y el frente térmico descendiendo ([Figura 18b](#)). Hacia los 120 s el frente térmico ha descendido aproximadamente a la mitad de la altura de la habitación y se ha formado una incipiente pluma saliendo a través de la ventana. Además es visible un incremento en el flujo de salida por la ventila ([Figura 18c](#)). Ambos flujos de salida están bien delimitados y en régimen laminar a los 300 s ([Figura 18d](#)). También se observa la línea en diagonal originada por efecto del flujo bidireccional a través de la ventana. El frente térmico se encuentra al ras de la parte superior del calefactor. En la [Figura 18e](#) y [Figura 18f](#) se pueden apreciar las estructuras de los flujos en estado permanente. El tipo de ventilación desarrollado en esta configuración es una combinación de ventilación por mezclado a través de la ventana y ventilación por desplazamiento a través de la ventila. Esto quiere decir que una parte del fluido ambiental que entra por la ventana se mezcla con el fluido cálido del interior antes de salir por la misma. Simultáneamente otra parte del fluido ambiental entrante asciende por

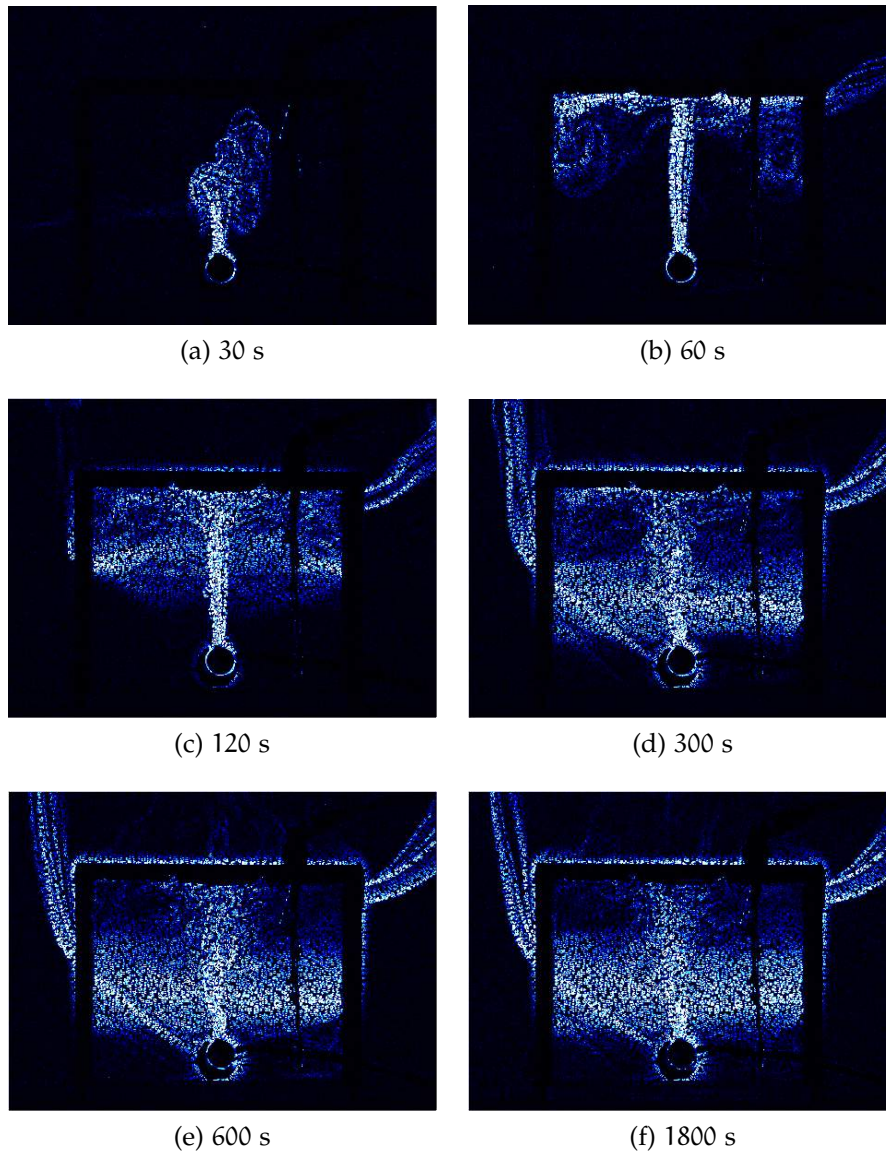


Figura 18: Imágenes schlieren para el caso A2 con la ventana frontal y la ventila superior de enmedio de la parte trasera abiertas.

la pluma y se incorpora a la capa superior para salir por la ventila.

Por su parte, en las gráficas de la evolución de la temperatura (Figura 19) se observa que el frente térmico desciende hasta la altura del termopar 104 (3.6 cm) aproximadamente a los 150 s y da inicio a una estado de calentamiento cuasi-estacionario que dura hasta aldedor de los 600 s (Figura 19a). Se puede observar que en el sistema de dos capas ahora la interfase se mantiene a mayor altura dado que el frente no alcanza a tocar

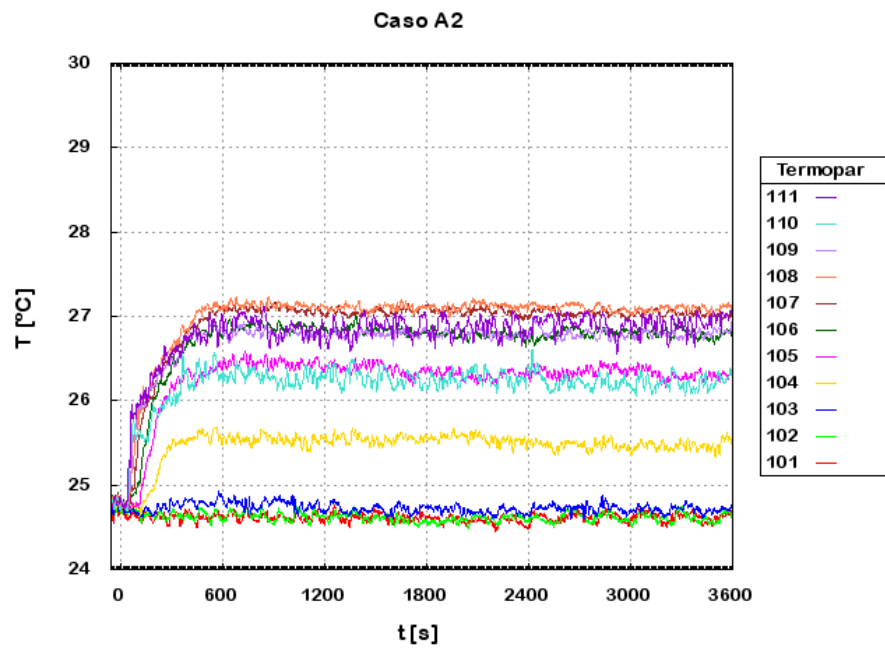
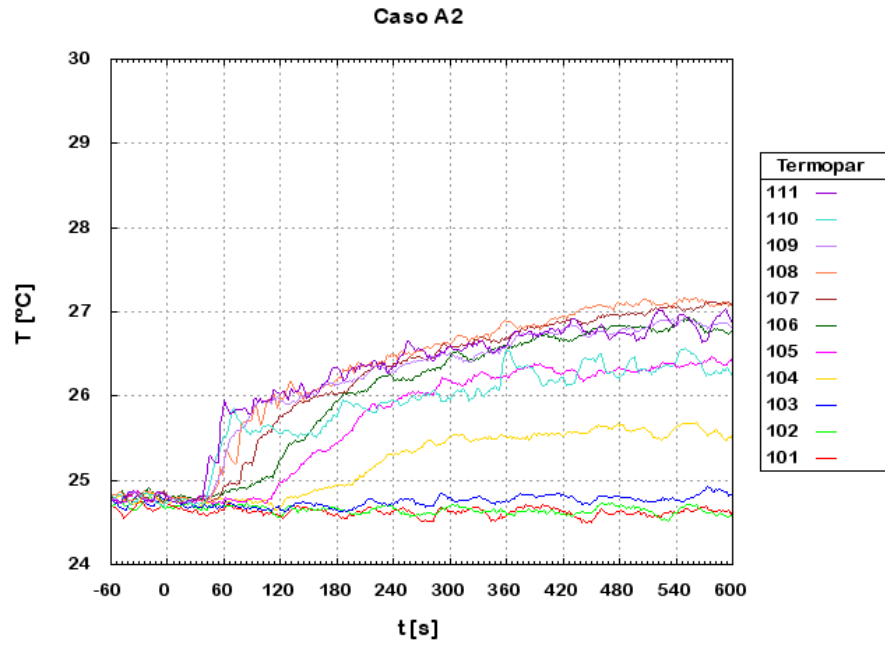


Figura 19: Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A2.

a los tres termopares inferiores. En este caso se llega al estado permanente a los 600 s. La mayor diferencia de temperaturas causada por la estratificación térmica es de  $\Delta T = 2.3^{\circ}\text{C}$ , con

el valor promedio de la temperatura más alta igual a  $27.1^{\circ}\text{C}$  correspondiente al termopar 108 y con temperatura ambiente de  $24.8^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.4 VENTANA FRONTAL Y VENTILA CENTRAL INFERIOR TRASERA ABIERTAS

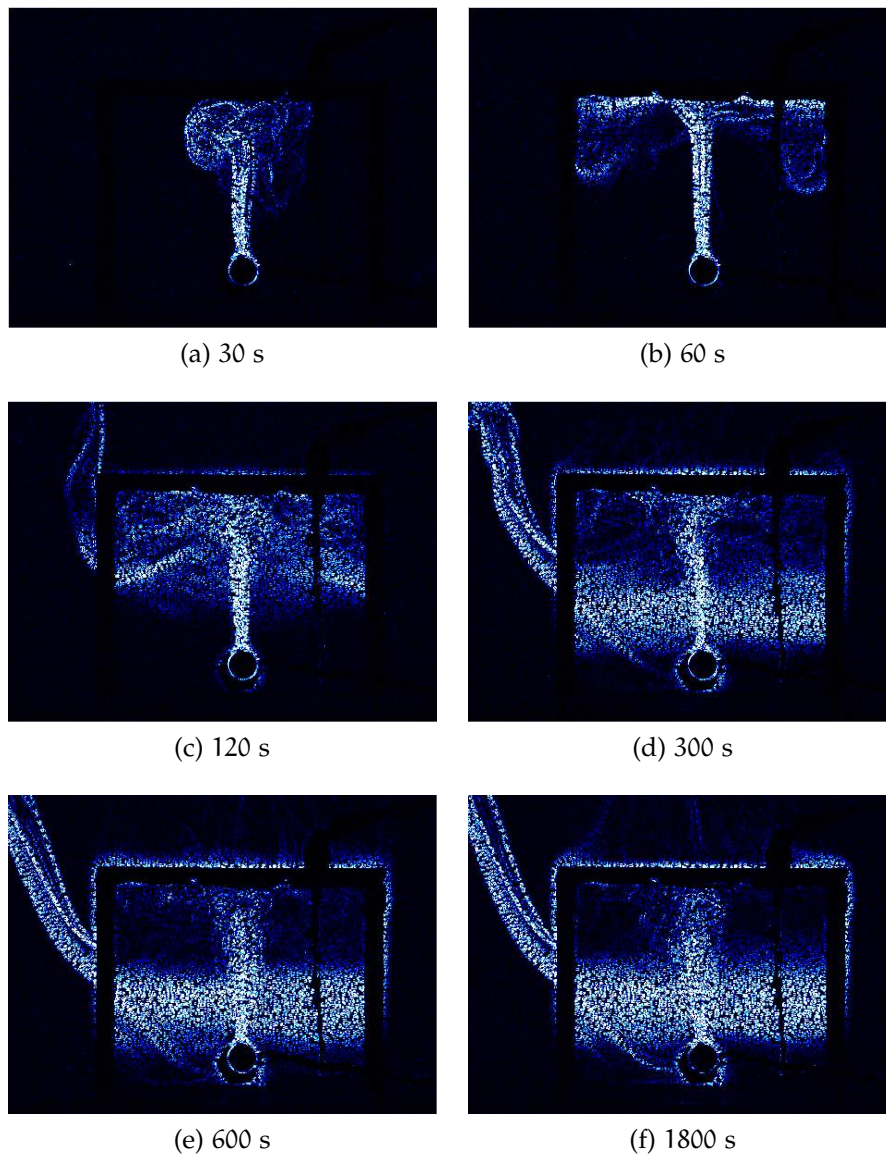
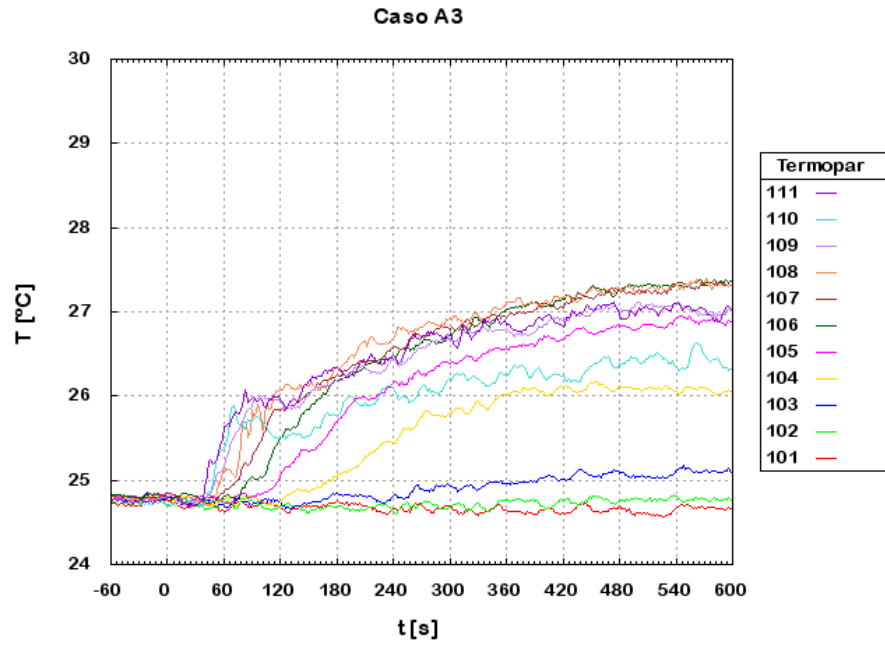
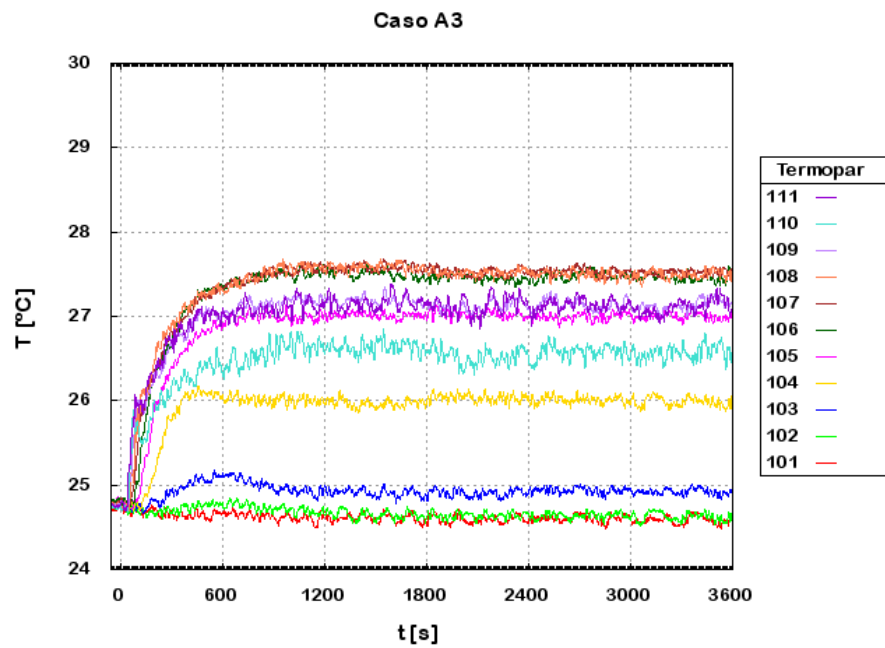


Figura 20: Imágenes schlieren para el caso A3 con la ventana frontal y la ventila inferior de enmedio de la parte trasera abiertas.

En esta configuración (caso A3) se dejó abierta la ventana frontal junto con la ventila central inferior. En la secuencia de imágenes de la [Figura 20](#) se observa que el desarrollo de los



(a) Corto plazo



(b) Largo plazo

Figura 21: Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A3.

flujos de este caso es muy semejante al desarrollo del caso A1. La [Figura 20a](#) y la [Figura 20b](#) muestran la llegada de la pluma térmica al techo (30 s) y el inicio de la formación de la capa

térmica por debajo del mismo (60 s). En la [Figura 20c](#) (120 s) se observa que el frente térmico ha descendido por debajo de la mitad de la habitación, así como el comienzo de la salida de flujo cálido por la ventana. A los 300 s el frente ha descendido al nivel del calefactor y se ha formado del flujo bidireccional a través de la ventana ([Figura 20d](#)). Para el tiempo de 600 s ([Figura 20e](#) esta bien marcado un flujo turbulento en la pluma térmica así como el flujo de salida por la ventana. La interfase se ubica por encima del calefactor. Para los 1800 s ([Figura 20f](#)) se observa que los flujos han alcanzado el estado permanente. Se puede suponer que la única diferencia que se tiene con el caso A1 es que en esta configuración entra fluido del ambiente a través de la ventila inferior. Este flujo no se puede distinguir en las imágenes schlieren debido a que se encuentra a la misma temperatura de la capa inferior de la habitación. Por lo anterior, en esta zona no se producen gradientes térmicos que generen contraste en las imágenes schlieren.

En consecuencia, las mediciones de temperatura mostradas en la [Figura 21](#) son similares a las mediciones del caso A1 mostradas en la [Figura 16](#). El estado cuasi-estacionario también se extiende desde los 240 s para pasar al estado permanente a los 1200 s. En ambos casos (A1 y A3) se observa un '*overshoot*' o exceso de calentamiento en el termopar 103 (2.4 cm), el cual se puede considerar como una oscilación transitoria del descenso del frente térmico. Se obtuvo una estratificación va desde 24.8°C hasta 27.5°C entre la temperatura ambiente y el promedio de la temperatura más alta (termopar 108 a 8,4 cm). La mayor diferencia de temperaturas obtenidas con estas medidas fue de  $\Delta T = 2.7^\circ\text{C}$ . Para este caso la dinámica de ventilación se puede considerar en su mayor parte por mezclado teniendo su origen en el flujo bidireccional a través de la ventana, y en menor proporción ventilación por desplazamiento originada por el flujo entrando a través de la ventila.

#### 4.5 VENTANA FRONTAL Y VENTILAS SUPERIORES TRASERAS ABIERTAS

Con la finalidad de tener un área mayor de ventilación a una altura superior, en la configuración del caso A4 se dejaron abiertas las tres ventilas superiores traseras al igual que la ventana frontal. Como se observa en las imágenes presentadas en la

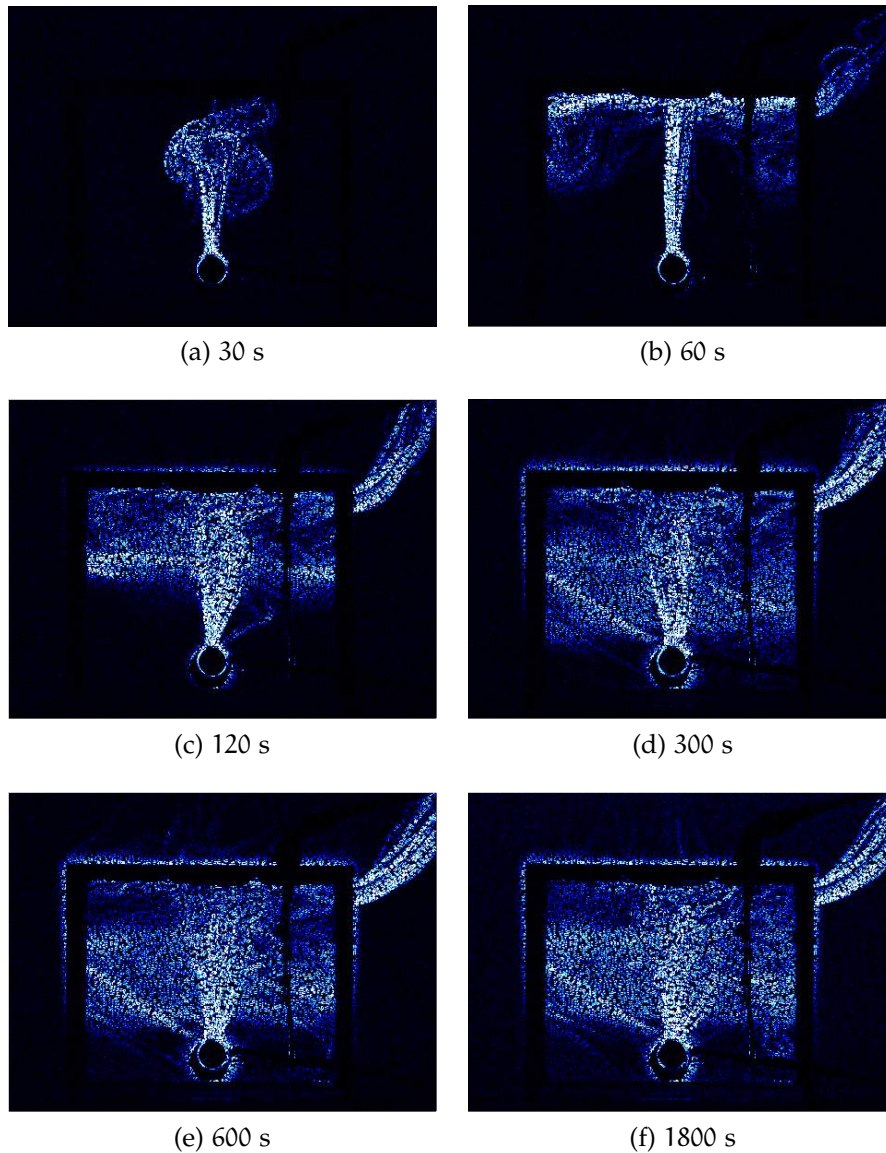
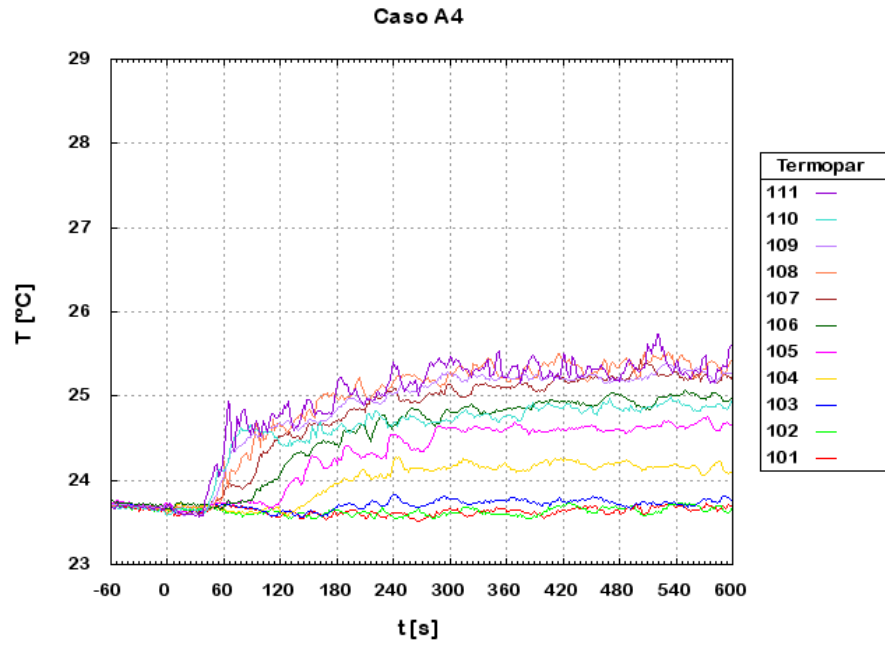
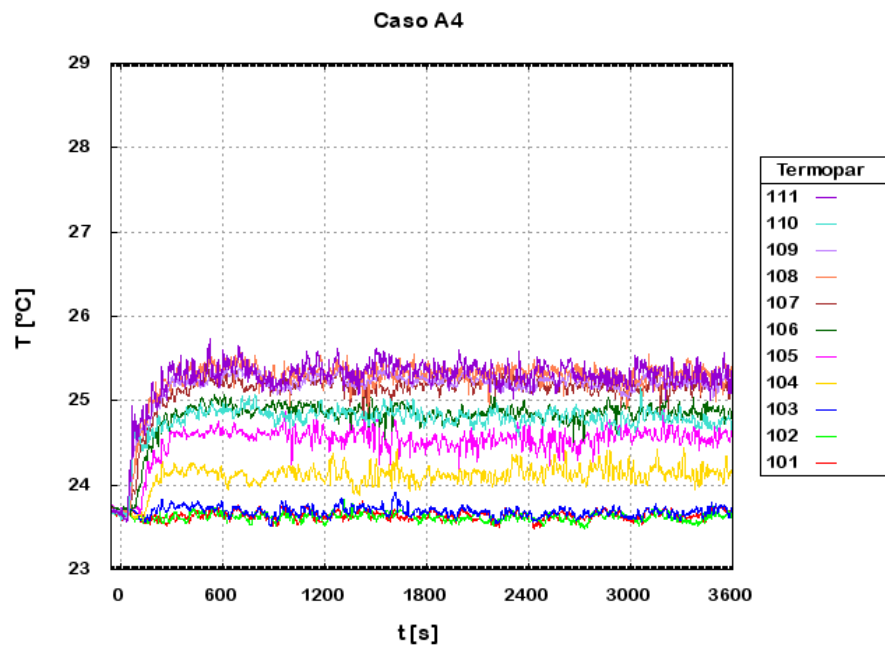


Figura 22: Imágenes schlieren para el caso A4 con la ventana frontal y las tres ventilas superiores de la parte trasera abiertas.

Figura 22 el comportamiento de la pluma al principio del experimento es similar al del caso A2 con una ventila superior abierta. La pluma térmica toca el techo a los 30 s (Figura 22a), enseguida se extiende la capa térmica por debajo del techo (Figura 22b = 60 s), simultáneamente se forma flujos de salida por la parte superior de la habitación a través de las ventilas. En los 120 s el frente térmico alcanza a cubrir la mitad superior de la habitación y el flujo que sale por las ventilas aumenta y queda bien establecido (Figura 22c). Para los 300 s (Figura 22d) el frente térmico llega por encima del calefactor y además es evidente



(a) Corto plazo



(b) Largo plazo

Figura 23: Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A4.

un flujo solo de entrada a través de la ventana. La presencia de este flujo unidireccional se deduce por la línea diagonal que se observa entre la ventana y el calefactor y la ausencia de un flujo



de salida por dicha ventana. En este caso no parece haber una interfase bien delimitada sino que hay una zona de gradiente abarcando la mayor parte de la habitación en lugar del sistema de dos capas estratificadas (Figura 22e, 600 s). En la Figura 22f (1800 s) se muestra el sistema en estado permanente.

En las gráficas de temperatura (Figura 23) se observa un descenso muy rápido del frente térmico que termina aproximadamente a los 150 s. El periodo de calentamiento cuasi-estacionario se encuentra entre los 150 y los 600 s (Figura 23a). En este caso se tiene la mínima diferencia de temperaturas entre las parte superior y la inferior, la cual es de  $\Delta T = 1.6^{\circ}\text{C}$  ( $25.3^{\circ}\text{C} - 23.7^{\circ}\text{C}$ ). Una particularidad de este caso es que se observa un *overshoot* o fluctuación de la temperatura en la capa superior estratificada. Esta fluctuación se extiende hasta los 900 s seguida por una segunda fluctuación de menor amplitud que termina aproximadamente a los 1200 s localizándose solo en la zona de los termopares superiores. En adelante, en el estado permanente, las mediciones de temperatura se mantienen constantes (Figura 23).

#### 4.6 VENTANA FRONTAL Y VENTILAS INFERIORES TRASERAS ABIERTAS

Para el último caso (A5) se utilizó una configuración con las tres ventilas inferiores traseras y la ventana frontal abiertas. El comportamiento de los flujos desarrollados es semejante al del caso A3 con una sola ventila inferior abierta. En las imágenes presentadas en la Figura 24 se observan eventos que se han descrito en los casos anteriores. La pluma térmica toca el techo a los 30 s y a los 60 s se encuentra en formación la capa térmica por debajo del techo. El frente térmico ha avanzado hasta la mitad de la altura de la habitación y fluido cálido está saliendo a través de la ventana a los 120 s. Para los 300 s el flujo de salida está bien estructurado abarcando  $3/4$  de la altura de la ventana contiguo a un flujo entrante por el espacio restante. La interfase entre las capas estratificadas llega por encima de la altura del calefactor. En los 600 s se confirma la existencia del flujo bidireccional a través de la ventana; ésto debido a la presencia de la línea diagonal brillante entre la ventana grande y el calefactor. A los 1800 s se ha alcanzado el estado permanente. Aunque no se puede distinguir en las imágenes, la apertura de las tres ven-

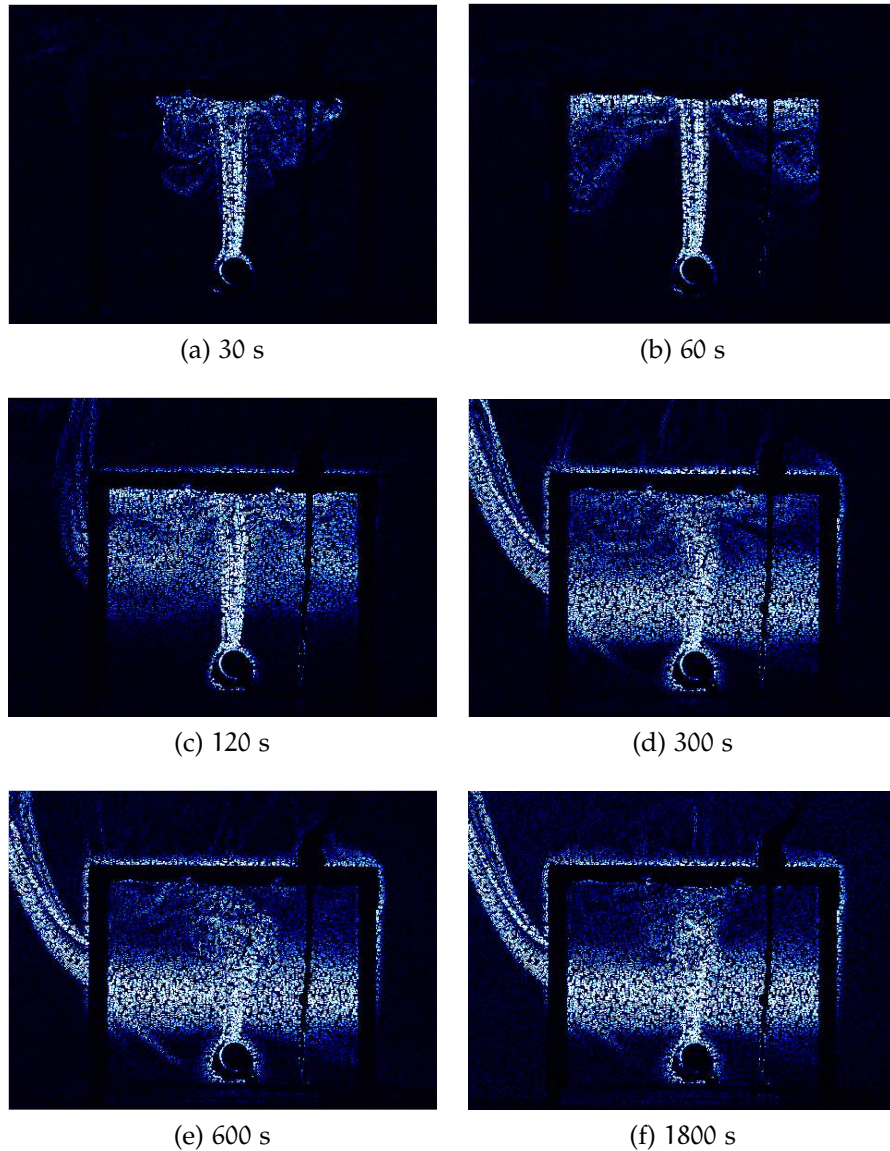
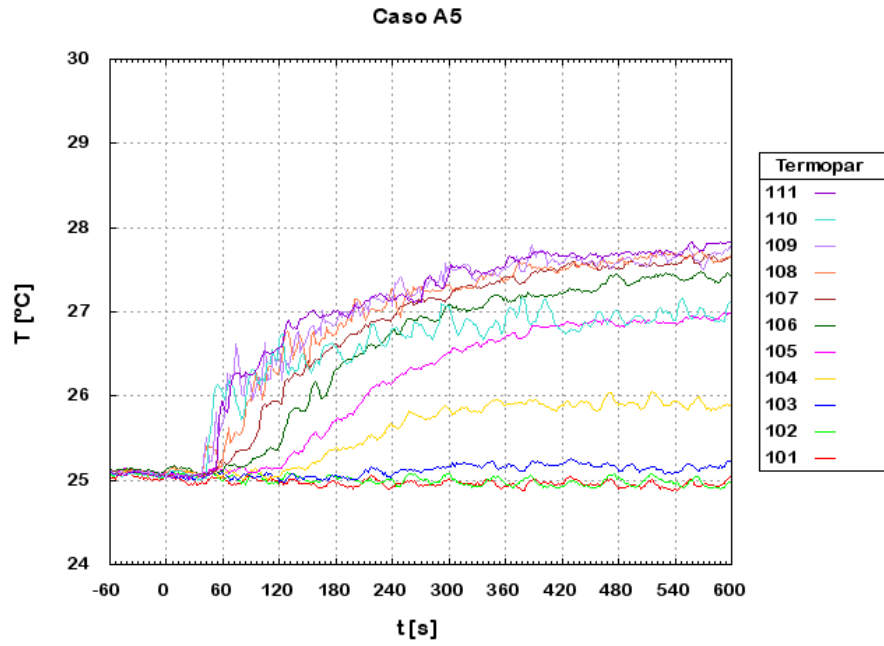


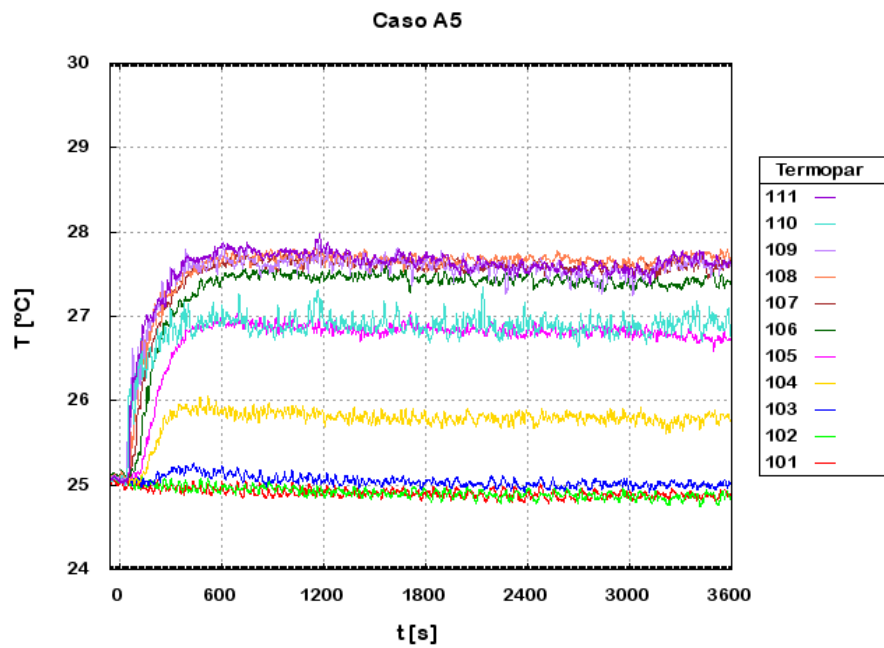
Figura 24: Imágenes schlieren para el caso A5 con la ventana frontal y las tres ventilas inferiores de la parte trasera abiertas.

tilas inferiores genera un mayor flujo de fluido ambiental hacia el interior de la habitación promoviendo una ventilación por desplazamiento. Complementario al desplazamiento, se tiene ventilación por mezclado generada por el pequeño flujo entrante a través de la ventana.

En la [Figura 25a](#) se observa que el descenso del frente térmico se detiene a los 150 s al provocar la inflexión en el termopar 104. A partir de este tiempo comienza un estado de calentamiento cuasi-estacionario apresurado que se extiende hasta los



(a) Corto plazo



(b) Largo plazo

Figura 25: Gráficas de la evolución de la temperatura en la varilla al interior del modelo experimental para el caso A5.

600 s. El estado permanente se alcanza desde los 600 s. En esta ocasión como en el caso A3 la distribución de las temperaturas indica que se tiene un sistema de dos capas estratificadas

divididas por una interfase que inicia a  $\approx 3,6$  cm de altura (Figura 25b). Para este caso la mayor temperatura fue de  $27.7^{\circ}\text{C}$ , teniendo una diferencia  $\Delta T = 2.6^{\circ}\text{C}$  con respecto de la temperatura ambiente de  $25.1^{\circ}\text{C}$ ).

## CONCLUSIONES

---

En este trabajo de tesis se reporta la implementación en laboratorio del *schlieren sintético* como una técnica óptica para visualización y análisis de flujos de fluido. Complementario al *schlieren* se implementó un sistema de medición de temperaturas con termopares. Se presentan resultados experimentales de la aplicación del sistema *schlieren sintético* y los termopares para el estudio de la ventilación natural originada por diferencias de temperatura en un modelo a escala de una habitación con una ventana frontal y una fuente interna de calor en el piso. Se estudió el efecto que se tiene al abrir ventilas en la pared posterior de la habitación, variando en dos ubicaciones verticales su altura respecto a la ventana así como en dos valores el área de sección transversal. En total se revisaron cuatro casos de estudio, los cuales se compararon con el caso base que solamente tiene la ventana abierta.

Una vez que se enciende la fuente de calor el desarrollo de los flujos en general se puede clasificar en tres periodos. El primero se describe con base al proceso de llenado de caja que comienza posterior al nacimiento y crecimiento de una pluma térmica turbulenta, la cual al llegar al techo da lugar a una capa térmica que engruesa y cuyo frente desciende con el tiempo hasta llenar con fluido cálido la habitación. Para cada uno de los casos este proceso es interrumpido de diferente manera dando lugar al segundo periodo que es un proceso cuasi-estacionario que desemboca por último en el estado permanente de ventilación. En este estado la pluma térmica se encuentra inmersa en un sistema de dos capas de fluido estratificado de diferentes temperaturas. Para cada caso el sistema mantiene diferentes configuraciones de flujos de ventilación.

Cuando únicamente se tiene la ventana abierta (caso A1) a través de ésta se crea un flujo bidireccional donde existe un intercambio de fluido cálido saliendo por la parte superior y fluido frío entrando por la parte inferior. Este intercambio da lugar a una ventilación por mezclado, la cual reduce considerablemente el nivel de temperatura que se alcanzaría si la habita-

ción se encontrara cerrada. Al adicionar una ventila en la parte superior de la pared trasera (caso A2) ahí se genera una salida de fluido cálido lo cual debilita al flujo de salida de la ventana. Esta situación en donde sale fluido cálido tanto por la ventila como por la ventana puede considerarse como una transición de ventilación por mezclado a ventilación por desplazamiento. Además se consigue una reducción adicional en el nivel de la temperatura interior (Figura 26). Si se aumenta el área de la ventila superior trasera (caso A4) se incrementa el flujo de salida a través de ella y se anula el flujo de salida por la ventana. De esta manera se inhibe la ventilación por mezclado dando lugar exclusivamente a ventilación por desplazamiento. En esta configuración fluido del ambiente entra por la ventana al mismo tiempo que fluido cálido del interior sale por las ventilas. En este caso se tiene la mayor reducción adicional de temperatura o dicho de otra manera la mínima diferencia de temperatura entre el interior de la habitación y el ambiente.

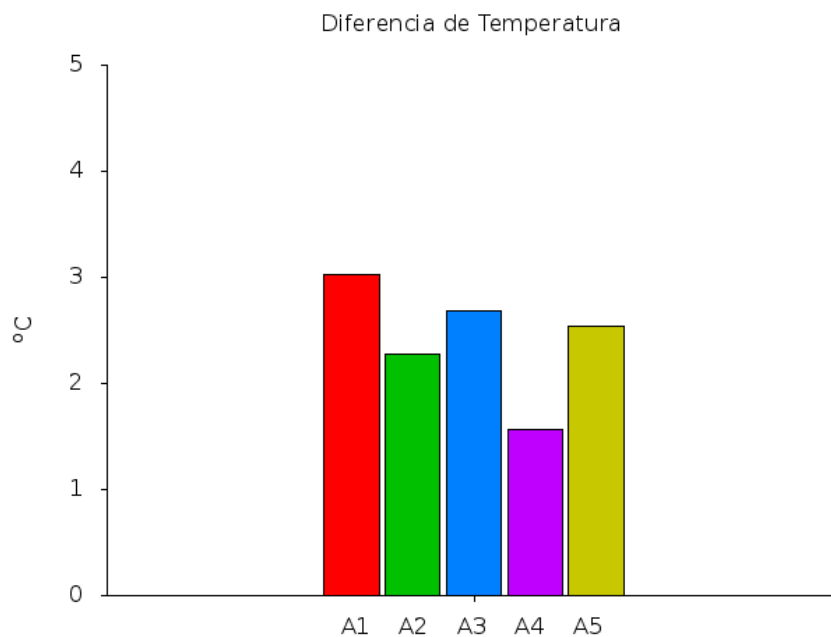


Figura 26: Diferencia entre la mayor temperatura promedio alcanzada en el estado permanente y la temperatura promedio inicial de cada caso de estudio.

Por otro lado cuando se abre una ventila en la parte inferior de la pared trasera (caso A3) fluido del ambiente ingresa a la

habitación a través de ésta y con esto se reduce el flujo que entra por la parte inferior de la ventana. Esta configuración de flujos tiende hacia la ventilación por desplazamiento en donde la ventila actúa como área de entrada y en la ventana coexisten tanto un flujo de entrada como un flujo de salida en mayor proporción. Dado lo anterior, para este caso se obtuvo una reducción muy pequeña en el nivel de temperatura. Por último al aumentar el área de la ventila inferior trasera (caso A5) se inhibe por completo el flujo de entrada por la ventana gracias al incremento en el flujo a través de la ventila. Entonces se da lugar a una ventilación por desplazamiento con una reducción en el nivel de temperatura poco considerable.

Para los casos aquí estudiados se puede decir que el tipo de ventilación se ve afectado en mayor medida por la posición vertical relativa de las ventilas respecto a la ventana y en menor grado por el área de las mismas. Por lo anterior, se concluye que la configuración original de ventilación por mezclado del caso base cambia a ventilación por desplazamiento cuando se abre alguna de las ventilas traseras y se aumenta su área. Los resultados aquí expuestos pueden servir de orientación en el diseño de sistemas de ventilación natural para edificaciones.

Parte III

APÉNDICES

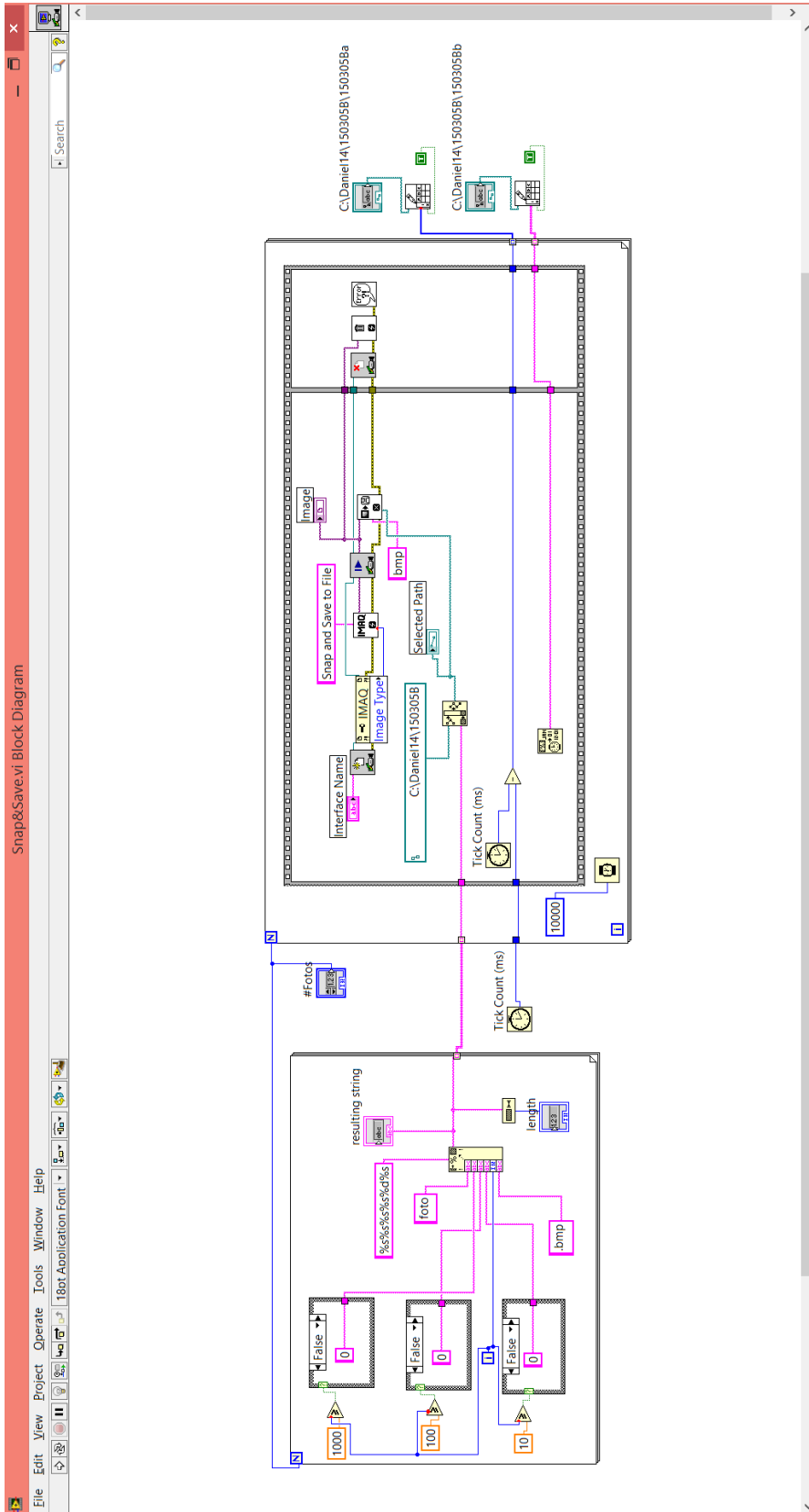




## APÉNDICE A

---

Se muestra el programa de adquisición de imágenes hecho con el software Lab View.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] J. Almeida Winfield. Ventilación natural y calidad en el ambiente interior de edificios del centro de la Ciudad de México. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [2] W. Baines and J. Turner. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region. *Journal of Fluid Mechanics*, 37:51–80, 1969. ISSN 0022-1120. doi: 10.1017/S0022112084002007.
- [3] R. Burton. *Journal of the Optical Society of America*, (11):907. ISSN 0030-3941. doi: 10.1364/JOSA.39.000907.
- [4] J. Castillo Torres. Ventilación natural en habitaciones con techo frío y generación de calor interna. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [5] M. Cedillo Rocel. Instalación, instrumentación y puesta en marcha de un sistema schlieren para el análisis de flujos de convección natural., 2001.
- [6] M. Cruz Salas. Evaluación de sistemas pasivos de ventilación. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [7] S. Dalziel. Synthetic schlieren. *Proceedings of the 8th International Symposium on Flow Visualization*, pages 1–6, 1998.
- [8] S. Dalziel and Dalziel Research Partners. DigiFlow. URL <http://www.dalzielresearch.com/digiflow/>. Disponible el: 13 de marzo 2015.
- [9] S. Dalziel, G. Hughes, and B. Sutherland. Whole-field density measurements by synthetic schlieren. *Experiments in Fluids*, 28(4):322–335, 2000.
- [10] E. Hecht. *Optics*, volume 1. Addison Wesley, 2001. ISBN 0805385665. doi: 10.1119/1.3274347.
- [11] N. Khan, Y. Su, and S. Riffat. A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8):1586–1604, 2008. ISSN 03787788. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.02.015.

- [12] H. Kleine, H. Grönig, and K. Takayama. Simultaneous shadow, schlieren and interferometric visualization of compressible flows. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(3-4): 170–189, 2006. ISSN 01438166. doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.04.009.
- [13] P. Linden. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 31:201–38, 1999. ISSN 0066-4189. doi: 10.1146/annurev.fluid.31.1.201.
- [14] P. Linden, G. Lane-Serff, and D. Smeed. *Journal of Fluid Mechanics*. ISSN 0022-1120. doi: 10.1017/S0022112090001987.
- [15] B. Marino and L. Thomas. Modelado en el laboratorio de los flujos generados por diferencias de densidad usando criterios de similitud dinámico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10:139–146, 2006.
- [16] A. Mazumdar. Principle and techniques of schlieren imaging. Technical report, Columbia University, 2013.
- [17] C. Mercer. *Optical metrology for fluids, combustion and solids*. Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 1475737777.
- [18] M. Millán García, J. Escofet Soteras, and E. Pérez Cabré. *Óptica geométrica*. Editorial Ariel, 2004. ISBN 8434480646.
- [19] T. Moreno Coronado and et. al. *Eficiencia energética*. Terracota - U.N.A.M., México, 2012.
- [20] D. Morrillón Gálvez and D. Morales. *Energía para el edificio sustentable*. Terracota - U.N.A.M., México, 2012.
- [21] B. Morton, G. Taylor, and J. Turner. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, 1956. ISSN 1364-5021.
- [22] E. Olsen. *Métodos ópticos de análisis*. Reverte, 1990. ISBN 8429143246.
- [23] I. Oropeza Pérez. Potencial estimado para el aprovechamiento de la ventilación natural para la climatización de edificios en México. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.

- [24] P. Panigrahi and K. Muralidhar. *Schlieren and shadowgraph methods in heat and mass transfer*. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 1461445353.
- [25] H. Richard and M. Raffel. Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method, 2001. ISSN 0957-0233.
- [26] J. Rodríguez García. *Fundamentos de óptica geométrica*. Universidad de Oviedo, 1997. ISBN 8483170043.
- [27] G. Settles. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*. Springer Science & Business Media, 2001. ISBN 3540661557.
- [28] M. Sosa Griffin. *Ventilación natural efectiva y cuantificable: confort térmico en climas cálidos-húmedos*. CDCH UCV, 1999. ISBN 9800012656.
- [29] Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. Balance nacional de energía 2012, 2013.
- [30] B. Sutherland. Visualization and measurement of internal waves by synthetic schlieren. Part 1. Vertically oscillating cylinder. *Journal of fluid . . .*, 390:93–126, 1999.
- [31] L. Thomas, B. Marino, R. Tovar, J. Castillo, and J. Rojas. Visualización de plumas y medición de gradientes térmicos por medio de schlieren sintético. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13:139–145, 2009.
- [32] L. Thomas, B. Marino, R. Tovar, and J. Castillo. Flujos generados por una fuente de calor en un recinto con cielorraso a temperatura constante y aberturas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15:123–129, 2011.
- [33] L. Thomas, B. Marino, R. Tovar, and J. Castillo. Modelado Analítico de la ventilación en una habitación con cielorraso enfriado y fuente de calor, conectada al exterior. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16:57–64, 2012.
- [34] R. Tovar, P. Linden, and L. Thomas. Hybrid ventilation in two interconnected rooms with a buoyancy source. *Solar Energy*, 81(5):683–691, 2007. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2006.08.009.

- [35] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Simple and cost effective solutions to increase energy efficiency in buildings. Technical report, 2013.
- [36] Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia. Espectroscopía. URL [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401539/exe-2deagosto/leccin\\_1\\_radiacin\\_electromagntica\\_y\\_su\\_interaccin\\_con\\_la\\_materia.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401539/exe-2deagosto/leccin_1_radiacin_electromagntica_y_su_interaccin_con_la_materia.html). Disponible el: 17 de marzo 2015.
- [37] Wikibooks. Física óptica, . URL [http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/%C3%93ptica/Indice\\_de\\_refracci%C3%B3n](http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/%C3%93ptica/Indice_de_refracci%C3%B3n). Disponible el: 18 de marzo 2015.
- [38] Wikibooks. Óptica geométrica y óptica física, . URL [http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/%C3%93ptica/%C3%93ptica\\_geom%C3%A9trica\\_y\\_%C3%B3ptica\\_f%C3%ADsica](http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/%C3%93ptica/%C3%93ptica_geom%C3%A9trica_y_%C3%B3ptica_f%C3%ADsica). Disponible el: 17 de marzo 2015.
- [39] E. Yarke and A. Mermet. *Ventilación natural en edificios. Fundamentos y métodos de cálculo para aplicación de ingenieros y arquitectos*. Nobuko, 2005. ISBN 987584036X.
- [40] J. Yoma Vásquez. *Visualización de flujos no isotérmicos con un dispositivo óptico schlieren*, 2007.