



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

REMOCIÓN DE MICROORGANISMOS Y ZONAS DE ESTANCAMIENTO EN EDIFICIOS NATURALMENTE VENTILADOS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO

PRESENTA:

ARTURO MONTERO JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. RAMÓN TOVAR OLVERA

ASESOR INTERNO: ING. ALEJANDRO JOSUÉ PERALES AVILA

CIUDAD DE MÉXICO - 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

*Dedicado a
Mi familia y a la memoria de mi abuelito, Lalo y Niko*

Agradecimientos

A mi director de tesis el Dr. Ramón Tovar Olvera, por el apoyo, la confianza brindada y por creer en mi a lo largo del trabajo realizado.

Al Dr. José Antonio Castillo Torres por su disposición, sus observaciones, comentarios acertados, paciencia y apoyo brindado en el desarrollo del trabajo.

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

Al Instituto de Energías Renovables por recibirme y facilitarme los medios para llevar a cabo este proyecto, a las personas que conocí en dicho instituto y me ayudaron. A Sonny que me ayudo en mi estadia en el instituto. A los técnicos Guillermo Hernandez Cruz por la asistencia en el uso del equipo. A Jaime Villalobos Gómez por la ayuda brindada en la creación del modelo experimental. A Oscar Gomez Daza por proporcionar el tubo que genero las plumas térmicas. A Jorge Hernández Gutierrez por el material brindado para el funcionamiento del sistema hidráulico. A Margarita Pedraza Vargas y Hector Daniel Gonzáles por el soporte en el equipo de computo.

A la FES Zaragoza que me instruyó a lo largo de mi carrera, la cual por cierto poco tiene que ver con mi tesis.

A mis sinodales Alejandro Perales, Armando Cervantes, Aníbal Mateos y Esther Matiana, por sus observaciones hechas en la tesis.

Resumen

La presente tesis trata sobre la ventilación natural originada por efecto térmico, la ventilación natural originada por los efectos térmico y del viento combinados además se analizan las zonas de estancamiento y de remoción de bioaerosoles en el flujo de aire.

Se utilizó un modelo de una habitación a escala de 1:20 hecho de acrílico transparente, con una ventana frontal siempre abierta y ventilas en la parte posterior que se pueden abrir o cerrar. Dicho modelo contaba con un sistema de inyección de cuatro de plumas térmicas turbulentas, un sistema de medición de temperatura, además de un sistema estereoscópico de velocimetría por imágenes de partículas. Se evaluaron cuatro casos experimentales y un caso de referencia, en ellos se variaba la posición y número de ventilas traseras; a los casos con la posición de las ventilas en la parte superior se les designó la letra "T" (*Top*) y "B" (*bottom*) para los casos inferiores, el número de ventilas fue de uno y tres, de ese modo se tenían T1, T3, B1 y B3, se nombró CR al caso de referencia con la ventana abierta y las ventilas cerradas.

Para el estudio de la ventilación por efecto térmico el modelo se introducía en un canal de agua abierto, los experimentos comenzaban con la inyección de las plumas y la adquisición de temperaturas. Cuando se alcanzaba el estado estacionario al interior del modelo se procedía a tomar 100 campos de velocidades con el sistema estereoscópico de velocimetría por imágenes de partículas (SPIV). Posterior a la adquisición de los campos de velocidades se iniciaba el flujo en el canal de agua con el fin de simular la capa límite atmosférica y al llegar a un nuevo estado estacionario se volvían a tomar otros cien campos de velocidades con el SPIV, para después finalizar el experimento.

En esta tesis se demuestra experimentalmente que la ventilación natural por efectos térmicos presenta mejores resultados con las ventilas colocadas en la parte superior, y su desempeño es mejor al incrementar el área de las ventilas. Cuando se tiene el efecto térmico combinado con el viento, los mejores resultados se observan en el caso con mayor número de ventilas en la parte superior. Se encontraron las excepciones en los casos CR y B1, en donde la temperatura incrementa con el efecto del viento con respecto a la temperatura de los casos sin viento.

En cuanto a la remoción de bioaerosoles en los experimentos por efecto térmico los mejores resultados se presentan en los casos con mayor número de ventilas, independientemente de si son superiores o inferiores, no obstante el resto de los casos presenta resultados bastante similares entre sí. Las zonas de estancamiento se suelen presentar en las esquinas y en el área entre la pluma y las paredes.

Para la remoción de bioaerosoles en los experimentos con el efecto térmico combinado con el del flujo de viento, los mejores resultados con mayor área de remoción, correspondiente a los casos con mayor número de ventilas. Las zonas de estancamiento predominantes se encuentran en las esquinas de la cara a barlovento. En cuanto a los casos con una sola ventila, estos presentan mayores áreas de estancamiento en la interfase entre la pluma y la pared a sotavento.

3. Modelo matemático de la ventilación natural y bioaerosoles	21
3.1. Modelo del llenado de caja	22
3.2. Ventilación por mezclado	24
3.3. Ventilación por desplazamiento	26
3.4. Modelos de ventilación natural por efectos térmico y del viento .	28
3.5. Movilidad de los bioaerosoles	30
3.6. Trabajos previos de ventilación natural y bioaerosoles	31
3.7. Problemática	32
3.8. Justificación	33
3.9. Hipótesis	33
3.10. Objetivos	34
4. Metodología	35
4.1. Modelo a escala de una habitación tipo con una ventana y ventilas.	36
4.2. Sistema de generación de plumas térmicas.	39
4.3. Sistema de medición de temperatura	40
4.4. Arreglo experimental en el tanque ambiental	40
4.5. Arreglo experimental en el canal de agua	41
4.6. Velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica SPIV . .	42
4.7. Generación de la capa límite atmosférica a escala de laboratorio	44
4.8. Casos de estudio	45
4.9. Metodología experimental en el tanque ambiente	46
4.10. Metodología experimental en el canal de agua	47
4.11. Fluido de trabajo	48
4.12. Similitud dinámica	48
4.13. Calibración de los termopares	51
4.14. Criterio para análisis de zonas de estancamiento en bioaerosoles	52
4.15. Llenado de caja	53
5. Resultados y discusiones	57
5.1. Efecto térmico	58
5.1.1. Caso de referencia CR	58
5.1.2. Casos con ventilas superiores T1 y T3	63
5.1.3. Casos con ventilas inferiores B1 y B3	64
5.2. Efectos térmico y del viento	69
5.2.1. Caso de referencia CR	70
5.2.2. Casos con ventilas superiores T1 y T3	73
5.2.3. Casos con ventilas inferiores B1 y B3	74

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
5.3. Discusiones	78
6. Conclusiones	83
7. Anexos	87
7.1. Principales enfermedades transmitidas a través del aire	87
7.2. Recomendaciones y observaciones	89
Referencias	91

Índice de figuras

2.1. Ejemplo de la ventilación por desplazamiento. El aire frío entra por la abertura inferior y el aire caliente sale por la abertura superior y se forma un sistema de dos capas estratificadas separadas por una interfase finita.	9
2.2. Esquema de la ventilación por mezclado. En este caso las masas de aire interactúan entre sí, no se forma interfase térmica. . . .	10
2.3. Dibujo de la ventilación cruzada. El viento es direccionado de las zonas de presión positiva a las zonas de presión negativa . . .	12
2.4. Representación del efecto de la flotación asistida por el viento. El viento va de un lugar de alta presión a uno de baja presión al mismo tiempo que las densidades del aire cálido y frío juegan su papel en la ventilación del recinto. La fuente de calor puede representar a las personas en la habitación o bien los electrodomésticos.	13
2.5. Esquema del aparato respiratorio y riesgo por aerosoles. Las partículas pequeñas entran al aparato respiratorio y las más diminutas son capaces de entrar a los alveolos. Adaptado de toxipedia.org (http://www.toxipedia.org/display/FOC/Emissions+and+Health)12/12/2015.	15
2.6. Comparación de algunos bioaerosoles. Obtenido de (http://aerosol.ees.ufl.edu/Bioaerosol/section02.html)05/01/2016	16
3.1. Adaptación de uno de los esquemas de Patridge y Linden 2013, en el esquema se muestra de manera gráfica las escalas espaciales y sus medidas.	28

3.2.	Esquema de Hunt y Linden (2001) donde se muestra el desplazamiento del flujo en el recinto; la abertura superior está al sotavento, la abertura inferior al barlovento, se tiene una fuente puntual de flujo de flotación flotación.	29
4.1.	Representación 3D del modelo realizado. El modelo tiene 3 ventilas superiores y 3 inferiores de 3.0 cm x 1.0 cm en la pared trasera y en la pared frontal una ventana de 4.0 cm x 4.0 cm ubicada al centro. El techo tiene un orificio por donde se introduce una varilla con termopares, todas las paredes tienen un grosor de 6 mm, excepto la pared trasera y el piso que tienen un grosor de 9 mm debido a un orificio donde se introduce un tubo de vidrio por el cual se le inyecta el agua caliente.	37
4.2.	Esquema de la vista posterior, lateral y frontal del modelo con sus respectivas medidas en mm. La otra vista lateral tiene las mismas medidas pero sin el orificio, se omiten el piso y el techo del modelo.	38
4.3.	Esquema del tubo de vidrio. El tubo de vidrio tiene 5 orificios, pero una de ellas está tapada por un termopar, por los otros 4 fluye el agua sin problema, el tubo de vidrio esta fijado en su base al conector de PVC roscado, mediante silicón de alta temperatura.	39
4.4.	Fotografía de uno de los experimentos realizados en el tanque ambiente con el modelo dentro.	41
4.5.	Fotografía del canal de agua y del sistema SPIV. 1) Entrada de agua, 2) Canal de agua, 3) Zona de estudio, 4) Lente cilíndrico, 5) Espejo plano rectangular inclinado, 6) Tubería de recirculación, 7) Espejo; a) Láser, b) Sistema de enfriamiento láser, c) Cámaras, d) Equipo de cómputo.	42
4.6.	Fotografía de la zona de estudio. Se aprecia el cilindro que actúa como lente y las partículas alumbradas por el plano de luz láser.	43
4.7.	Fotografía de los obstáculos colocados para simular la capa límite atmosférica	45
4.8.	Representación de las diferentes configuraciones que presenta el modelo.	46
4.9.	Perfiles de velocidad obtenidos en el canal de agua a la altura h_m se tiene la velocidad de referencia U_w	50

4.10. Descenso del frente térmico en el llenado de caja. Se muestra el tiempo que tarda el frente térmico en llegar a cada uno de los termopares. En la línea continua se observa la tendencia teórica ajustada a los tiempos experimentales con una constante de $C=0.113$, de acuerdo a la ecuación (3.2). Las cruces en la gráfica muestran los valores experimentales. 54

4.11. Aumento de temperatura de los termopares al interior del modelo el corto plazo para el llenado de caja. Los termopares 101-111 marcan la altura del frente térmico, el termopar 116 mide al fluido inyectado, el 113 al agua ambiente, el 114 al aire y el 115 la superficie del tubo de vidrio 55

4.12. Aumento de temperatura de los termopares al interior del modelo en un largo plazo para el llenado de caja. Los termopares 101-111 marcan la altura, el termopar 116 al fluido inyectado, el 113 al agua ambiente, el 114 al aire y el 115 la superficie del tubo de vidrio 56

5.1. Temperatura al interior del modelo. El cambio radical de temperatura marca el final del efecto térmico y el inicio del efecto térmico combinado con el viento para el caso de referencia. . . . 60

5.2. Perfil de la temperatura para el efecto térmico sin viento en el caso de referencia para el estado estacionario. En el estrato superior se observa cierto decremento de la temperatura probablemente asociado a una pérdida de calor por el conector metálico donde se sujeta la columna de termopares. 60

5.3. Interfase teórica y experimental del caso de referencia CR, sin viento. En este caso se utilizó la altura del centro de la ventana con respecto al piso $h_w = 6$ para normalizar las variables. 61

5.4. Campos vectoriales de velocidades y zonas de estancamiento para el caso de referencia CR. 62

5.5. Evolución de la temperatura para los casos de estudio 65

5.6. Estratificación térmica para los casos del efecto térmico sin viento tomados a partir de los 900 y hasta los 1200s. 66

5.7. Altura de interfase experimental y teórica 67

5.8. Campos de velocidad con efecto térmico sin viento, en zonas de remoción y estancamiento para los casos con ventilas superiores T1 y T3. 68

5.9. Campos de velocidad con efecto térmico sin viento, en zonas de remoción y estancamiento para los casos con ventilas superiores B1 y B3.	69
5.10. Perfil de la temperatura para el caso de referencia CR, efectos térmico y del viento.	71
5.11. Caso de referencia CR para campos vectoriales de velocidad y zonas de estancamiento en el efecto térmico y flujo de viento para el caso de referencia CR.	72
5.12. Frentes térmicos para los casos del efecto térmico y del viento tomados a partir de los 1800 y hasta los 2400s.	76
5.13. Campos vectoriales de velocidad y zonas de estancamiento en los bioaerosoles para los casos con ventilas superiores con los efectos térmico y del viento.	77
5.14. Campos vectoriales de velocidades y zonas de estancamiento en los bioaerosoles para los casos con ventilas inferiores con los efectos térmico y del viento.	78
5.15. Diferencias de temperaturas promedio en el modelo con respecto a la temperatura ambiente	80

Índice de cuadros

1.1. Problemas ambientales de la generación de energía. Modificado de Bordehore 2001.	4
4.1. Propiedades del agua y del aire a 1 atm. Tomado de (Mott, Robert L., 1996)	48
4.2. Valor de los números adimensionales obtenidos al interior de la pluma con $\Delta T = 45^{\circ}C$ y $\Delta T = 1,0^{\circ}C$ para las condiciones de laboratorio y reales respectivamente.	50
4.3. Condiciones al exterior del modelo, para aplicar el criterio de similitud dinámica. La tabla muestra la altura H para altura en el modelo, H_r para altura en escala real, la velocidad U, la viscosidad cinemática ν y el número de Reynolds Re . Los subíndices w y a denotan agua (water) y aire (air) para escala de laboratorio y real respectivamente. Obtenidos a partir de los experimentos.	51
4.4. Valores de pendiente y ordenada al origen en las regresiones lineales para la calibración de termopares.	52
5.1. Comparación entre los casos de estudio con el efecto térmico. . .	79
5.2. Comparación entre los casos de estudio con el efecto térmico combinado con el viento.	81
7.1. Tabla de enfermedades bacterianas adaptado de De La Rosa 2002.	87
7.2. Tabla de principales enfermedades fúngicas adaptado de De La Rosa 2002.	88
7.3. Tabla de principales enfermedades víricas adaptado de De La Rosa 2002.	88

Introducción

*No se puede cambiar al
mundo solo con bellas
palabras.
Lelouch VI Britannia.*

En los últimos 30 años la ecología ha tomado mayor trascendencia, las causas se deben a las consecuencias que se han tenido sobre el medio ambiente y a la necesidad de soluciones ante las problemáticas ambientales.

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas a resolver, dado que, la concentración de moléculas provenientes de contaminantes gaseosos ayuda a determinar la temperatura promedio cerca de la superficie terrestre (Starr, C. and Taggart, R., 2008). La producción de estas moléculas es natural y ayuda a mantener la temperatura promedio global, a este proceso se le conoce como efecto invernadero. A pesar de que se produce de manera natural, las actividades humanas, principalmente derivadas de la quema de combustibles fósiles, han contribuido al incremento de gases como: dióxido de carbono, vapor de agua, óxido nitroso, metano, monóxido de carbono y clorofluorocarbonos; ocasionando que dichas partículas actúen como cristales en un invernadero, impidiendo la salida de calor hacia el espacio y de ese modo

incrementando la temperatura global.

Para contrarrestar algunos problemas ambientales como contaminación, declive de recursos, eutrofización de sistemas acuáticos, erosión del suelo, se hace necesario un desarrollo sustentable donde se encuentren íntegramente asociados el factor social, económico y ambiental, dicho de otra forma, un desarrollo que sea capaz de satisfacer las necesidades actuales de los seres humanos, sin comprometer los recursos para las generaciones futuras. Uno de los principales problemas es el suministro energético, dado que el daño ocasionado dependerá de la fuente de energía utilizada y la tecnología que se use para producirla. En general todas ocasionan daño ambiental, cuadro 1.1, tan solo la energía producida por plantas hidroeléctricas genera daño al ecosistema por emisiones de gas metano, cambio en el ciclo hidrológico, disminución de la calidad de agua, incremento en la tasa de erosión y sedimentación, destrucción y fragmentación del hábitat (Bordehore, 2001).

Otra forma de mitigar el daño ambiental es por medio de los productos o servicios, para tales casos es común hablar del diseño ecológico, el cual consiste en reducir al máximo el impacto ambiental que se pueda tener a lo largo del ciclo de vida de un producto o durante el tiempo en que se efectúe un servicio. Esto quiere decir que se intentará reducir el impacto negativo sobre el ecosistema en el consumo energético, las emisiones contaminantes, la adquisición de materiales y su evolución hasta el fin de su vida útil (Urika, I. and Urika, S., 2003).

Dentro del diseño ecológico se puede destacar la arquitectura ecológica y la bioclimática, si bien, no son términos que signifiquen lo mismo, ambos están íntimamente relacionados con el desarrollo sustentable. Arquitectura ecológica se refiere a las estructuras y/o procesos de construcción responsables con el medio ambiente a lo largo de toda su vida. Arquitectura bioclimática, consiste en el diseño de edificios o viviendas, teniendo en cuenta las condiciones bioclimáticas y los recursos naturales (flora, sol, lluvia, vientos), para reducir su impacto sobre el ambiente y el consumo energético (Urika, I. and Urika, S., 2003).

La arquitectura bioclimática siempre buscará brindar un confort a los ocupantes, es decir, dar una sensación de bienestar. En la búsqueda del confort se deben de tomar en cuenta aspectos biofísicos como: acústicos, lumínicos y

climático-térmicos. Los aspectos acústicos a resaltar son: reverberación (persistencia de un sonido después de haber cesado su emisión) y niveles de ruido externos e internos. Los lumínicos; la cantidad de la luz, el color de la luz, el ciclo diurno y estacional. Y finalmente los aspectos climático-térmicos; **confort térmico**, fuentes y sumideros energéticos, humedad y **ventilación** (López, 2003).

Cuadro 1.1: Problemas ambientales de la generación de energía. Modificado de Bordehore 2001.

Fuente de energía	Aire	Agua	Suelo	Ecosistema
Combustibles fósiles	Partículas. Gases (95 %): SO ₄ , H ₂ S, NO _x . Baja calidad	Aumento de temperatura. Contaminación por crudo y subproductos de la combustión. Eutrofización	Minería: destrucción del suelo. Deposición de contaminantes	Ocupación del territorio: perturbación de hábitats naturales. Lluvia ácida, contaminación e impacto sobre flora y fauna
Energía nuclear	Riesgo de accidentes: emisiones de radionúclidos. Contaminación térmica	Procesado de uranio: contaminación. Aumento de temperatura. Riesgo de accidentes: contaminación radioactiva	Accidentes: deposición de elementos radioactivos. Depósitos de basura radioactiva	Minería: destrucción de ecosistemas. Accidentes: contaminación radioactiva de organismos.
Energía hidroeléctrica	Emisión de metano en embalses: efecto invernadero	Disminución de calidad del agua. Cambio del ciclo hidrológico	Presas: destrucción irreversible del suelo. Aumento en la sedimentación y erosión	Destrucción de hábitats fluviales y de ribera. Fragmentación del ecosistema.
Renovables: eólica, geotermal, mareas, biomasa, solar	Inapreciable o pequeña	Inapreciable	Ocupación de territorio	Alteración de hábitats frágiles. Eólica: aves

2.1. Ventilación

La ventilación es un proceso en el cual se hace llegar aire de un espacio a otro, dicho de otra forma, se recircula el aire y se intercambia por aire proveniente del exterior. Su finalidad es aumentar el confort al interior en términos de calidad de aire y obtener una temperatura más agradable para los ocupantes, que a su vez repercutirá en una calidad de vida para aquellos que residen en el edificio, (Ghiabaklou, 2010), (Lied and Ahmed, 2011).

La mala ventilación puede ocasionar cierto daño a los ocupantes, de hecho es uno de los factores que contribuyen al síndrome del edificio enfermo, donde los ocupantes presentan malestares que se atribuyen por estar en el edificio y en donde los síntomas desaparecen en la mayoría de los casos al abandonar dicho edificio. Los síntomas más presentados son dolor de cabeza, mareo, náuseas, irritación nasal, fatiga, alergias, dificultad para concentrarse, frío, sensibilidad a olores, voz ronca y cambios de personalidad, (Joshi, 2008).

La ventilación puede ser mecánica, híbrida o natural, y cada una de ellas será inducida de manera distinta. Se puede inducir por medio de tres sistemas: activos, híbridos y pasivos. En el caso de los sistemas activos requieren el uso de energía externa para su funcionamiento, por ejemplo electricidad, a estos sistemas corresponde la ventilación mecánica que suele tener un costo de mantenimiento elevado. Los sistemas pasivos no requieren de una fuente de energía externa ya que en ellos se aprovechan fenómenos físicos para su funcionamiento, a estos sistemas corresponde la ventilación natural. En el caso de los sistemas híbridos solo se requiere de una pequeña cantidad de energía externa para su funcionamiento, que sería una combinación entre ambos.

2.1.1. Ventilación mecánica

La ventilación mecánica se induce por un sistema activo en donde se desplazan masas de aire de un sitio a otro por medio de un artefacto electromagnético, ejemplos de este tipo de ventilación son: aire acondicionado, calefacción, extractores mecánicos, ventiladores, entre otros.

De acuerdo con (Atkinson et al., 2010), si un sistema de ventilación mecáni-

ca está bien instalado y goza de un buen mantenimiento tendrá los siguientes beneficios:

- Son de fiar en cuanto al suministro de flujo, independientemente de la variación de la temperatura, flujo y dirección del viento, y se puede regular la temperatura al interior.
- Se pueden integrar sistemas de filtración para eliminar malos olores, microorganismos, gases, vapores nocivos y partículas.
- Se puede guiar el aire al interior con mayor facilidad.
- La ventilación puede funcionar en donde sea siempre y cuando el sistema se encuentre bien y se cuente con electricidad o alguna fuente que le brinde energía.

Asimismo tendrá las desventajas referidas a continuación:

- Los sistemas de ventilación mecánica llegan a tener numerosas fallas que no estaban previstas durante su planeación, como fallos técnicos por mantenimiento inadecuado o simplemente interrupción de la corriente eléctrica o la fuente de energía.
- Elevados costos de instalación y de mantenimiento.

Si no se cuenta con el presupuesto suficiente para un mantenimiento adecuado el sistema tendrá fallos, lo que ocasionará un incremento en la probabilidad de contagios de enfermedades infecciosas, por la deficiencia en la remoción de microorganismos, contaminantes y partículas, en vez de ayudar a evitarlas..

2.1.2. Ventilación híbrida

Es el tipo de ventilación producida por sistemas activos y sistemas pasivos, no necesita tanto suministro energético como la ventilación mecánica, y su costo es mucho menor a está. Tiene las ventajas de la ventilación mecánica y natural, sin embargo también cuenta con las desventajas de ambas.

2.1.3. Ventilación natural

La ventilación natural es el intercambio intencional de aire que se da mediante sistemas pasivos que son esencialmente las aberturas o conductos de las edificaciones, (Oropeza, 2008). Ejemplos de estos sistemas de ventilación son: ventanas, puertas, chimeneas, torres de viento, captadores de viento, extractores de viento, intercambiadores de viento, entre otros. Estos sistemas no requieren el uso de energía eléctrica o de algún equipamiento mecánico para generar las corrientes de aire.

En la ventilación natural se aprovechan las fuerzas naturales para desplazar aire al interior del recinto. Estas fuerzas naturales pueden agruparse en dos: flotación térmica, ocasionada por diferencias en las temperaturas; y las fuerzas producidas por el viento, ocasionadas por la diferencia en las presiones. Dichas fuerzas pueden actuar de manera independiente o conjuntamente, teniendo mayor eficiencia para el caso de la ventilación asistida por el viento (Hunt and Linden, 2001).

En la ventilación natural se deben de evaluar los factores ambientales que pueden afectar la tasa de ventilación como por ejemplo la ubicación de las aberturas con respecto a los vientos dominantes, la humedad, la radiación solar, la precipitación. Así mismo se debe prestar atención a la configuración del edificio como número de aberturas, pasillos, área efectiva y forma, (Ghiabaklou, 2010) (Economidou and Hunt, 2010).

2.1.3.1. Ventilación por efecto térmico.

Esta ventilación se origina por las diferencias entre las temperaturas exterior e interior. Las dos masas de aire (exterior e interior) tienen distinta temperatura y por tanto existe una diferencia en las densidades, en donde la masa más densa buscará la parte inferior del recinto, generándose una estratificación térmica. Además por conservación en el volumen, estará entrando el volumen de aire que sea retirado.

Ventilación por desplazamiento: Se tienen aberturas en la parte inferior y superior. Si la temperatura exterior es mayor a la temperatura interior, el

aire entrará por las aberturas inferiores del recinto y saldrá por las superiores. En este sistema se forma una interfase bien definida que separa la capa más densa y fría en la parte inferior y la capa menos densa y caliente en el estrato superior, a medida que avanza el tiempo la capa menos densa y caliente tiende a adelgazar y la capa fría tiende a engrosarse conforme el fluido caliente vaya dejando el recinto, (Linden et al., 1990). Cuando hay una fuente de calor al interior, el aire caliente irá a la parte superior debido a su densidad, hasta llegar a un estado estacionario donde el aire frío entrante igualara al aire caliente saliente, figura 2.1.

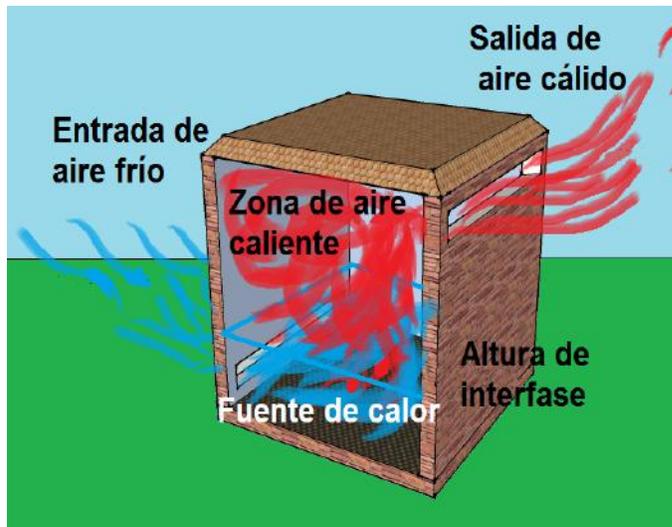


Figura 2.1: Ejemplo de la ventilación por desplazamiento. El aire frío entra por la abertura inferior y el aire caliente sale por la abertura superior y se forma un sistema de dos capas estratificadas separadas por una interfase finita.

Ventilación por mezclado: Es originada cuando solamente se tiene una abertura, el aire frío entra por la ventila y el aire caliente sale por la misma ventila al descender, el aire entrante se mezcla con el interior, figura 2.2. En general este tipo de ventilación no es tan bueno como por desplazamiento, dependiendo de la altura a la cual sea colocada la ventana será la eficiencia en la tasa de ventilación, mientras más abajo se encuentre la abertura la ventilación será peor. Cabe destacar que para que se produzca un enfriamiento



Figura 2.2: Esquema de la ventilación por mezclado. En este caso las masas de aire interactúan entre sí, no se forma interfase térmica.

en la habitación la temperatura del exterior debe de ser menor a la del interior.

2.1.3.2. Ventilación por efecto del viento

El hecho de que se produzca un movimiento de la masa de aire se debe a la inercia ocasionada por las diferencias de presiones, de manera general se tiene una presión positiva en la parte del edificio donde llega el aire o mejor dicho, la cara del edificio a barlovento, y de manera contraria se tiene una presión negativa en la parte del edificio donde el aire no está incidiendo, o sotavento. Por tal motivo el posicionamiento del edificio con respecto a los vientos dominantes es esencial para tener una buena ventilación. Otros de los factores de importancia son el número de aberturas, el tamaño de las aberturas y la rugosidad del terreno. El número y tamaño de las aberturas están íntimamente relacionados pues ambos se relacionan con el área efectiva para entrada o salida de aire. En el caso de la rugosidad del terreno la variación se debe a los obstáculos que se tienen en los distintos escenarios, por ejemplo en una zona urbana se tendrán construcciones obstruyendo hasta cierta medida el viento, mientras que en la rural o cercana a la costa el efecto será menor, por eso los coeficientes de fricción tienen distintos valores, (Cruz-Salas et al., 2014),

(Linden, 1999).

Al igual que en la ventilación por efecto térmico, la ventilación por efecto del viento puede darse con una sola abertura, sin embargo no será una ventilación óptima, mejores resultados causados por el viento se obtienen con la ventilación cruzada.

Ventilación cruzada: Es originada por el viento, aunque puede actuar de manera conjunta con la flotación térmica. Cuando las aberturas no se encuentran en la misma pared, el aire entra por una o varias aberturas y sale por una o varias aberturas ubicadas en una pared distinta. Dicho de otra forma, depende del acomodo de los orificios en los edificios ubicados en zonas de alta presión y de baja presión, figura 2.3.

No todos están de acuerdo con esta definición pues consideran que la ventilación cruzada no es exclusiva del efecto del viento, entre quienes opinan así se encuentra (Awbi, 2003), que considera esta ventilación como el desplazamiento de una masa de aire de una pared a otra, por lo tanto en ella también incluye el efecto térmico que puede actuar solo o acompañado del viento. Sin embargo, para efectos de esta tesis a la ventilación por efecto térmico se considera ventilación por desplazamiento y por mezclado.

2.1.3.3. Efecto térmico y del viento

La ventilación puede ser producida por el viento o por el efecto térmico, sin embargo no se encuentran separadas, sino más bien trabajan conjuntamente. Teniendo esto en cuenta, el flujo de ventilación puede mejorarse significativamente si se acoplan de manera adecuada ambos efectos. Para que trabajen de manera adecuada, las ventanas inferiores deben ubicarse a barlovento y las superiores a sotavento, (Hunt and Linden, 2001), de este modo se tiene una ventilación por desplazamiento y una ventilación cruzada debida al viento, sin que se oponga una interfiera con la otra, figura 2.4. No obstante hay ocasiones en que una fuerza pueda ser despreciable ante la otra, esto llega a ocurrir más frecuentemente cuando la configuración de las aberturas no es la idónea, por ejemplo que la ventana ubicada a barlovento se encuentra a un nivel superior. Si ese fuera el caso se podrían tener tres posibles configuraciones dependiendo de la magnitud de las fuerzas; si la fuerza del viento es muy fuerte solo habrá

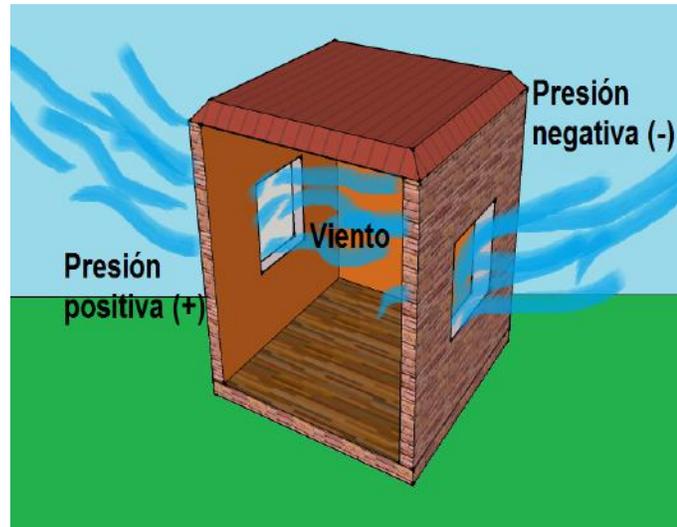


Figura 2.3: Dibujo de la ventilación cruzada. El viento es direccionado de las zonas de presión positiva a las zonas de presión negativa

ventilación cruzada y la flotación térmica puede ser eliminada pues no hay entrada de aire en la abertura inferior, o bien que la flotación sea más fuerte que la fuerza del viento, y en el mejor de los casos un estado intermedio en donde el viento actúe conjuntamente con la flotación, (Lishman and Woods, 2006), (Lishman and Woods, 2009b).

Independientemente de si la configuración de las aberturas sea la adecuada o no, una fuerza suele dominar sobre la otra. Una forma de saber que tipo de régimen se presenta es el número de Froude, (Hunt and Linden, 2001), este número adimensional sirve como parametro para saber la dominancia del regimen en el medio. Si $Fr < 1$, o si $Fr > 1$, para el primer caso las fuerzas de flotación estarán dominando y para el segundo caso las fuerzas del viento serán las dominantes, (Hunt and Linden, 2001).

2.2. Ventajas de la ventilación natural

Un ambiente ventilado tiene ventajas sobre los ambientes no ventilados, destacando en estos beneficios el confort y la sanidad. Si los ambientes no están bien ventilados puede ocasionarse un incremento en microorganismos



Figura 2.4: Representación del efecto de la flotación asistida por el viento. El viento va de un lugar de alta presión a uno de baja presión al mismo tiempo que las densidades del aire cálido y frío juegan su papel en la ventilación del recinto. La fuente de calor puede representar a las personas en la habitación o bien los electrodomésticos.

dañinos para el ser humano. Sin importar que sistema de ventilación se tenga, gozará de los beneficios anteriores, sin embargo los sistemas activos pueden ocasionar un efecto contraproducente si no funcionan adecuadamente, además de generar un gasto económico de importancia.

De acuerdo con (Givoni, 1992), las funciones básicas de la ventilación natural son:

- a. **Control en la calidad del aire**, debido a la entrada de aire nuevo que diluye la contaminación en el interior, siempre y cuando el aire exterior sea más limpio que el interior.
- b. **Enfriamiento convectivo**, los edificios se enfrían con la remoción del aire caliente o con la dilución del aire frío proveniente del exterior, en lugares cálidos.
- c. **Confort térmico**, el aire fresco exterior al rozar con la piel provoca un flujo de calor por convección.

- d. **Menor contaminación por ruido**, al no depender de un sistema mecánico no se produce ruido, exceptuando el que proviene del exterior.
- e. **Menor costo energético y monetario**, son relativamente económicos y reducen el consumo energético.

La ventilación natural no cuenta con algunas de las ventajas de la ventilación mecánica en cuanto al confort y la disposición, además no se cuenta con un concepto psicológico relacionado con las expectativas del usuario como lo es en la ventilación mecánica.

2.3. Aerosoles

Existe una gran cantidad de contaminantes en el medio aéreo, muchos de estos se pueden encontrar dentro de los edificios. De manera general podemos dividir los contaminantes aéreos en dos grandes grupos: los gaseosos y las partículas o aerosoles, (Bolster and Linden, 2007). Los aerosoles son materia finamente dividida que se encuentra en suspensión en el aire u otro gas del medio ambiente, su composición puede ser muy variada a pesar de estar en el mismo entorno, (Cox and Wathes, 1995). El daño que el aerosol pueda causar a la salud dependerá del compuesto proveniente de la fuente de emisión y del propio organismo afectado.

Cuando se trata de reglamentaciones o normas de salubridad se suele referir a esta clase de contaminante como partículas en suspensión totales (TPS) o simplemente como material particulado, en donde hay dos grupos principales PM 10 y PM 2.5 (materia particulada de 10 y 2.5 μm respectivamente). El primero se refiere a partículas que pueden causar alguna afección a las vías respiratorias superiores con diámetro de hasta 10 μm , y el segundo es un subgrupo de partículas que pueden penetrar en las vías respiratorias inferiores, como pulmones e incluso con las partículas más pequeñas causar un daño alveolar, figura 2.5, su diámetro es menor o igual a 2.5 μm . Las cantidades que se tengan en cada uno de estos grupos presenta un nivel de riesgo para la población, como se indica en los valores de AQI *Air Quality Index*, (Mintz, 2006), o en México el IMECA Índice Metropolitano de la Calidad de Aire, (NADF-009-aire, 2006). El origen del material particulado puede ser muy variado, va desde un origen natural como las propias cenizas volcánicas, los microorganismos o

fuentes de origen antropogénico como sería la quema de combustibles. Cualquiera que sea la fuente de origen debe de tenerse cuidado y regular los índices en la contaminación para la mejora del medio ambiente y por consiguiente de la salud humana, (Gob.Morelos-SEMARNAT-CEAMA, 2009).

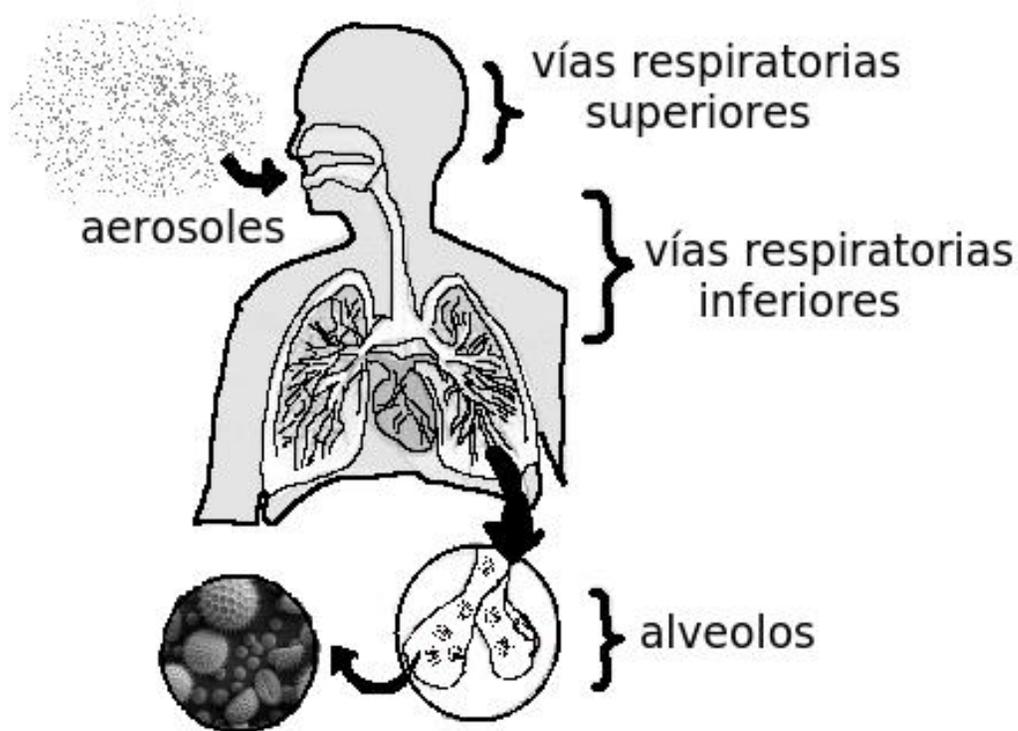


Figura 2.5: Esquema del aparato respiratorio y riesgo por aerosoles. Las partículas pequeñas entran al aparato respiratorio y las más diminutas son capaces de entrar a los alveolos. Adaptado de toxipedia.org(<http://www.toxipedia.org/display/FOC/Emissions+and+Health>)12/12/2015.

2.3.1. Bioaerosoles

A los aerosoles que se componen por microorganismos o agentes biológicos y que son capaces de causar alguna afección a los seres vivos (enfermedad, alergia, toxicidad, entre otros) se les conoce como bioaerosoles, (Sánchez-Monedero

et al., 2006), aunque también se han llegado a citar como partículas biológicas por (Vélez-Pereira and Camargo, 2008) y en términos médicos se les ha llegado a referir como gotículas, sin embargo en este último caso debe de tener en cuenta un medio líquido similar a una pequeñísima gota que engloba a los organismos, (Atkinson et al., 2010). Los bioaerosoles son de tamaños muy pequeños, figura 2.6, como cualquier aerosol, y determinar un rango para poder considerarlos bioaerosoles es algo muy arriesgado, y mucho más temerario es incluir esas medidas dentro de una definición, sobre todo en el límite inferior. En trabajos como (Cox and Wathes, 1995), (Sánchez-Monedero et al., 2006), los colocan en un intervalo de 0.5 a 100 μm y (Vélez-Pereira and Camargo, 2008) los ubican en un rango de 0.01 a 100 μm . De los dos intervalos anteriores el segundo es más aceptable, pues uno de los principales exponentes de los bioaerosoles son los virus y su media suele rondar por debajo de los 0.5 μm . Inclusive en el mismo trabajo de (Cox and Wathes, 1995) se hace mención de los virus con tallas inferiores a las que menciona, por tal motivo en el presente trabajo las tallas de bioaerosoles son partículas con un diámetro $\leq 100\mu\text{m}$.

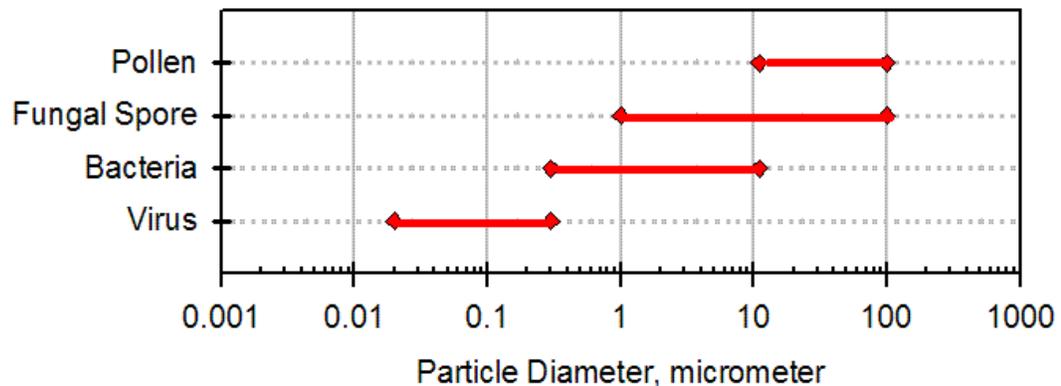


Figura 2.6: Comparación de algunos bioaerosoles. Obtenido de (<http://aerosol.ees.ufl.edu/Bioaerosol/section02.html>)05/01/2016

Los organismos que habitan el medio aéreo son muchos pero muy pocos son autóctonos de ese medio dado que las condiciones que imperan en la atmósfera no favorecen su reproducción, y su supervivencia se complica mucho, (De La Rosa et al., 2002). Pero debido a la gran dinámica que existe en el medio aéreo, se tiene una gran diversidad de organismos en este, donde los

microorganismos no cuentan con mecanismos para su locomoción y vendrían siendo como una especie de plancton aéreo. Tales organismos se ven regidos por las leyes físicas que gobiernan el ambiente, pero tienen muchas adaptaciones que les benefician al momento de la supervivencia. Los bioaerosoles se ven afectados por las fuerzas del viento, los cambios en la temperatura, las fuerzas eléctricas, la radiación térmica, la fuerza de gravedad y la humedad.

El hecho de que estas partículas sean viables y puedan ser transportadas las convierte en un riesgo para la salud, no solo de los seres humanos sino también de otros organismos como las plantas cuando algún hongo parasita las cosechas, animales domésticos, o a cualquier otro organismo que se encuentre débil y los microorganismos aprovechen, además de que pueden llegar a causar epidemias. Entonces surge la interrogante ¿Qué tanto puede propagarse el bioaerosol? Varios autores han hecho modelos de propagación, en ellos se describe una fuente que genera el bioaerosol, las ecuaciones de estos modelos por lo general toman condiciones ideales y difícilmente añaden factores como electrostática o temperatura, pero de manera general se puede decir que un bioaerosol tendrá una concentración mayor dependiendo de que tan cerca esté su fuente de emisión, (Dowd et al., 2000), (Sánchez-Monedero et al., 2006), (Dungan, 2010). Asimismo entre mayor sea el diámetro de la partícula se infiere que mayor es su peso y por tanto su sedimentación será a una mayor velocidad, donde el viento jugará un papel fundamental en la propagación.

Debido a que las condiciones del medio que dominan a los bioaerosoles, estos cambiarán sus concentraciones conforme cambien las condiciones, de este modo habrá diferentes concentraciones con las estaciones del año, la hora del día, la altitud, la humedad, etcétera.

2.3.2. Transporte de contaminantes biológicos

Los bioaerosoles son fácilmente transportados por las fuerzas que interactúan con ellos, sin embargo muchas de estas fuerzas se pueden considerar como despreciables cuando otras fuerzas actúan de forma dominante. A pesar de que son fácilmente transportables tienden a sedimentar, por lo tanto, entre más cercanos se encuentren del piso la concentración de estas partículas biológicas será mayor, por tal motivo la sedimentación juega un rol muy importante en cuanto a la mecánica de los bioaerosoles.

El tamaño de la partícula tiene que ver con su movilidad, entre más grande sea la partícula se asume que es más pesada y sedimenta más rápido que una partícula de diámetro menor. De acuerdo con (Cox and Wathes, 1995) (Sánchez-Monedero et al., 2006) (De La Rosa et al., 2002) si el tamaño de la partícula es mayor a $10\mu\text{m}$ sedimenta relativamente rápido, si presenta un tamaño menor a $0.1\mu\text{m}$ presenta un movimiento browniano, y finalmente si su tamaño se encuentra entre $0.1\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$ su comportamiento será intermedio entre estos dos. Para el primer caso de los anteriores mencionados la partícula es pesada y por eso será atraída por la fuerza de gravedad, donde su mayor concentración estará en el piso o a poca distancia de este mismo; para el segundo caso las partículas son demasiado pequeñas y la fuerza de gravedad no les afecta tanto, (Cox and Wathes, 1995), hasta se pudiera considerar totalmente despreciable por tal motivo muchos consideran el comportamiento de estas partículas similar al de los gases. Pero en sí el movimiento browniano es un movimiento que se da en partículas muy pequeñas que se encuentran dentro de un fluido y que se desplazan aleatoriamente debido a que están siendo bombardeadas por moléculas del fluido.

Retomando los bioaerosoles, por movimiento browniano pudieran tener una concentración mayor en algunas imperfecciones de las paredes debidas a diferentes rugosidades o el techo mismo. En último caso, es decir con diámetros de $0.1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$, las partículas se ven sometidas a muchas fuerzas y básicamente su movilidad estará en función de estas fuerzas, pero entre más pesen dominarán las fuerzas gravitacionales y entre menos pesen irá ganando terreno el movimiento browniano. Para todos los casos anteriores no se toma en cuenta el viento, pues de tomarse en cuenta siempre serían transportadas y su sedimentación sería función del viento mayormente.

2.3.2.1. Transporte de bioaerosoles en recintos con ventilación natural

La movilidad entre los aerosoles y los bioaerosoles es muy similar, siendo la única diferencia apreciable que unos poseen vida (en el caso de los virus se tienen características de organismos vivos, para no entrar en discusiones). Bajo esta premisa pudieramos tomar como válidos y aplicables a bioaerosoles, los modelos que desarrollaron (Bolster and Linden, 2007), donde se describe

el comportamiento de los aerosoles en habitaciones con ventilación natural. Dependiendo del tipo de ventilación que se tenga (buen mezclado o desplazamiento) el material particulado se puede mezclar con el fluido ambiente o presentar una concentración mayor en alguna interfase. Igualmente las partículas tendrán una concentración apreciable cerca del piso debido a su tasa de deposición, (Bolster and Linden, 2008b).

2.3.2.2. Riesgo de infección, viabilidad y su concentración

Pese a que los bioaerosoles se van a encontrar prácticamente en todos los lugares no se tiene el mismo riesgo de infección en diferentes situaciones, el hecho de que un ser se vea afectado por los bioaerosoles depende de dos cosas: el organismo a infectar y el bioaerosol. En el primer caso cada organismo tiene sus propios medios de defensa: mucosidad, vellosidades, sistema inmune, entre otros, que si funcionan adecuadamente las probabilidades de que sea infectado se ven reducidas considerablemente. Sin embargo si dichos sistemas de defensa no funcionan adecuadamente las probabilidades de infección aumentarán dependiendo de que tan mal se encuentre el organismo. Por la otra parte, los bioaerosoles son muy diversos y no todos son igual de dañinos, algunos solo afectan a ciertas especies en particular, de cualquier modo al ser tantos taxones los que componen los bioaerosoles hay una gran gama en cuanto se refiere al peligro que representa cada taxón, pues una población baja de un grupo muy dañino bastaría para causar estragos, del mismo modo que una población elevada de bioaerosoles no tan dañinos.

De manera similar ocurre con su viabilidad; los bioaerosoles tienen un tiempo de vida al cual se le llama viabilidad. Esta viabilidad está en función del ambiente y del organismo y estará relacionada con su capacidad que tiene de sobrevivir al ambiente. La principal razón por la que los bioaerosoles pierden su viabilidad es debido a la desecación que sufren, sin embargo algunos son capaces de entrar en un estado de latencia y salir de la misma cuando las condiciones les sean favorables.

En términos generales se puede decir que las mayores concentraciones de bioaerosoles se tendrán en zonas con alta densidad poblacional y zonas costeras, mientras que en los desiertos y los casquetes polares la población será mínima.

Modelo matemático de la ventilación natural y bioaerosoles

*Si tu lo deseas puedes volar,
solo debes de confiar mucho
en ti y seguir...
Buterfly, español latino.*

3.1. Modelo del llenado de caja	22
3.2. Ventilación por mezclado	24
3.3. Ventilación por desplazamiento	26
3.4. Modelos de ventilación natural por efectos térmico y del viento .	28
3.5. Movilidad de los bioaerosoles	30
3.6. Trabajos previos de ventilación natural y bioaerosoles	31
3.7. Problemática	32
3.8. Justificación	33
3.9. Hipótesis	33
3.10. Objetivos	34

En este capítulo se hace una descripción de los modelos fundamentales que

han sido referencia para la modelación de la ventilación natural por efectos térmicos. Además se hace una revisión bibliográfica de la modelación de efectos térmicos en conjunto con el efecto del viento, y de las partículas biológicas transportadas en un medio aéreo. Finalmente se detalla la problemática, la justificación, se presenta la hipótesis y los objetivos del trabajo de investigación.

3.1. Modelo del llenado de caja

En la ventilación natural producida por diferencias de temperatura es normal la presencia de plumas térmicas ya sea a la entrada, la salida o en el seno de las habitaciones. Estas plumas son flujos convectivos, predominantemente verticales, que se derivan de las fuerzas de flotación producidas por las diferencias de temperatura (o de densidad) en presencia de un campo gravitacional. Una manera de caracterizar a las plumas térmicas es mediante el modelo analítico de llenado de caja o *filling box* (Linden et al., 1990).

El modelo de llenado de caja considera una fuente de flotación ubicada en el piso que produce una pluma turbulenta. Durante su ascenso hacia el techo, la pluma incorpora fluido de la habitación, fenómeno conocido como *entrainment*, por lo que al alcanzar el techo tiene un gran flujo volumétrico. Este flujo alimenta una capa cálida superior que engruesa conforme al tiempo y que tiene un frente térmico descendente, produciendo una estratificación térmica estable conocida como estratificación de llenado de caja, (Partridge and Linden, 2013), (Linden and Kaye, 2006).

El descenso del frente de la capa cálida esta calculado a partir de un balance volumétrico, tomando como referencia la altura de la interfase o frente térmico en el *filling box*. Para una pluma puntual se tiene la ecuación (3.1).

$$h = \left(\frac{2CB^{1/3}t}{3s_f} + H_m^{-2/3} \right)^{-3/2} \quad (3.1)$$

Donde: h representa la altura del frente, C la constante en la ecuación, B el flujo de flotación de la pluma, H_m la altura del modelo, s_f la superficie del piso y t el tiempo transcurrido desde la llegada de la pluma al techo.

Como en esta tesis no se trabaja con una fuente puntual sino con cuatro fuentes puntuales iguales, se tiene la siguiente modificación:

$$h = \left(\frac{8CB^{1/3}t}{3s_f} + H_m^{-2/3} \right)^{-3/2} \quad (3.2)$$

$$B = \frac{\dot{m}g\beta\Delta T}{\rho} \quad (3.3)$$

En la cual:

B es flujo de cada pluma, \dot{m} el flujo másico, ΔT la diferencia de temperatura entre el fluido suministrado y el fluido del cuarto, ρ la densidad ambiente, g la aceleración de la gravedad y β el coeficiente de expansión térmica.

Para plumas puntuales se tiene que:

$$B = g'Q \quad (3.4)$$

Para la cual B representa el flujo de flotación de la fuente, Q el flujo volumétrico de la pluma y g' la gravedad reducida. Si se quisiera trabajar con más de una pluma simultáneamente basta con agregar un término igual al número de plumas y colocarlo en el denominador, para encontrar el flujo de flotación de cada pluma. Con B_s como el flujo de flotación total.

$$\frac{B_s}{n} = g'Q \quad (3.5)$$

El modelo analítico de (Morton et al., 1956) considera una constante de acreción α para una pluma con velocidad vertical y fuerzas de flotación constantes en su interior y nulas fuera de ella. Que se obtiene a partir de experimentos, con la cual se pueden cerrar las ecuaciones de conservación y obtener una descripción completa del flujo.

$$c = \frac{6\alpha}{5} \left(\frac{9\alpha\pi^2}{10} \right)^{1/3} \quad (3.6)$$

En trabajos con ventilación natural se han utilizado soluciones salinas para producir el movimiento, (Hunt and Linden, 1999), (Hunt and Linden, 2001), (Hunt and Kaye, 2006), esto es debido a la diferencia de densidad entre el fluido ambiente y el fluido de la pluma, siempre y cuando ambos estén a la misma temperatura. Sin embargo, también es posible generar flujo de calor, para ello en lugar de utilizar soluciones con diferente densidad se ocupa la

misma solución pero con una diferencia en la temperatura, para así generar una pluma térmica. El uso entre una solución salina o una fuente de calor en agua para generar la pluma no presenta una diferencia significativa, de tal modo que el uso de una u otra resulta indistinto, (Partridge and Linden, 2013).

En este trabajo el modelo de llenado de caja se utiliza para tener un marco de referencia del avance del frente térmico con relación al tiempo asumiendo que las pérdidas de calor son mínimas, también se utiliza para poder determinar el valor de la constante de acreción C en las ecuaciones.

3.2. Ventilación por mezclado

Linden et al. (1990), analizaron el drenado de una habitación que inicialmente contiene aire a mayor temperatura. Cuando se tienen aberturas en la parte superior, se origina la ventilación por mezclado que es un sistema donde aire fresco se introduce por la mitad inferior de las aberturas mientras que aire cálido sale por las mitades superiores. Al descender el aire frío en el interior se mezcla con el aire del cuarto produciendo una temperatura aproximadamente homogénea en todo el cuarto.

El flujo volumétrico de aire Q que pasa a través de la abertura depende de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de acuerdo con la ecuación (3.7). La temperatura de la habitación disminuye hacia la temperatura del exterior de acuerdo con la ecuación (3.10), donde τ es la escala de tiempo del mezclado.

$$Q = cA(g'd)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

y definiendo:

$$g' = g \frac{\Delta T}{T_a} \quad (3.8)$$

con velocidad:

$$v = (g'd)^{1/2} \quad (3.9)$$

Donde:

Q es el flujo, A es el área de la apertura, g' es la gravedad reducida, d es la altura de la abertura, c una constante para la ventana, ΔT la diferencia de temperatura y T_a la temperatura ambiente.

$$\frac{g'}{g'_0} = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-2} \quad (3.10)$$

$$\tau = \frac{2V}{CA} (g'd)^{-1/2} \quad (3.11)$$

Donde: τ es la escala de tiempo de mezclado, g'_0 es evaluada a un tiempo 0 y V el volumen.

Cuando se tienen fuentes de calor internas, se generan plumas térmicas mediante las cuales se propaga la energía primero en el interior y luego hacia el exterior, generando dos capas térmicas estratificadas cada una con temperatura aproximadamente homogénea. Se alcanza un estado permanente en donde el flujo volumétrico y la transferencia de calor a través de la ventana se iguala con la potencia térmica y los flujos volumétricos de las plumas, ecuación (3.15). Cuando se considera la transferencia de calor a través de la envolvente, se llega a estados permanentes de menor temperatura (Castillo, 2011).

$$Q_w = cA\sqrt{g'd} \quad (3.12)$$

$$Q_p = nCB^{1/3}h^{5/3} \quad (3.13)$$

$$g' = \frac{B^{2/3}}{ch^{5/3}} \quad (3.14)$$

$$\frac{cA}{nC^{3/2}H^2} = \left(\frac{\xi^5}{1-\xi}\right)^{1/2} \quad (3.15)$$

Donde g' es la gravedad reducida, c una constante, d es la altura de la abertura, Q_p el flujo de la pluma, Q_w el flujo de la ventana, H altura, h altura de la interfase y B flotación.

3.3. Ventilación por desplazamiento

Cuando se abren aberturas superiores e inferiores para drenar el cuarto se produce la ventilación por desplazamiento, en donde aire frío entra por las inferiores y el aire cálido sale por las superiores, figura 3.1. Internamente se desarrolla un sistema transitorio con una estratificación estable donde el mezclado es mínimo. La capa cálida tiene la temperatura del aire interno inicial y la capa inferior la del ambiente, (Linden et al., 1990), (Thomas et al., 2008), (Castillo, 2011). El flujo volumétrico de entrada deberá ser igual al de salida, por lo tanto se tiene:

$$Q = A^*(g'(H_m - h))^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Con

$$A^* = \sqrt{\frac{(2c_b c_t a_b^2 a_t^2)}{(c_b a_b^2 + c_t a_t^2)}} \quad (3.17)$$

En las cuales A^* es el área efectiva, a_t y a_b son el área de las aperturas superior e inferior respectivamente, g' es la gravedad reducida, h es la altura de la interfase, H_m es la altura total del recinto.

El tiempo para drenar la habitación t_E viene dado por ecuación (3.18):

$$t_E = \left(\frac{2S}{A^*}\right)\left(\frac{H}{g'}\right)^{1/2} \quad (3.18)$$

Donde: S la superficie del piso.

En la ventilación por desplazamiento con una fuente de calor interna se tienen dos ecuaciones básicas que son el flujo de las ventanas y el flujo producido

por la pluma, ecuación (3.19)

$$Q_v = A^* g^{1/2} (H - h_f)^{1/2} \quad Q_p = nCB^{1/3} h^{\sim 5/3} \quad (3.19)$$

Defiendo:

$$h^{\sim} = h + h_v + z_v \quad (3.20)$$

Al combinar fuentes de calor puntuales con la ventilación por desplazamiento se genera un sistema de dos capas estratificadas en estado permanente, en donde la altura de la interfase depende sólo de la geometría del espacio ecuación (3.21)

$$\frac{A^*}{nC^{3/2}H^2} = \frac{(\xi + \xi_v)^{5/2}}{(1 - \xi)^{1/2}} \quad (3.21)$$

$$\xi = \frac{h_f}{H} \quad \xi_v = \frac{h_v + z_v}{H}$$

$$h^{\sim} = h_f + h_v + z_v \quad (3.22)$$

Donde:

Q_v es el flujo volumétrico a través de la ventana, Q_p es el flujo volumétrico a la altura h^{\sim} , B es el flujo de flotación, C la constante, n el número de plumas, H la distancia entre el punto medio de la abertura inferior al punto medio de la abertura superior, h_f la distancia del punto medio de la abertura inferior a la interfase, h^{\sim} la distancia del origen virtual a la interfase, z_v la distancia del origen virtual al piso.

El flujo volumétrico de las plumas se puede calcular a la altura donde esta colocado el orificio donde se suministra fluido, y si se despeja Z_v es posible conocer el origen virtual.

$$Q_s = CB^{1/3} z_v^{3/5} \quad (3.23)$$

Siendo:

Q_s el flujo volumétrico de la fuente de flotación, C la constante y z_v un origen virtual

La razón por la que conviene utilizar un origen virtual se debe a que teóricamente la pluma no inicia del suelo o de cualquier otro lugar donde inicie el

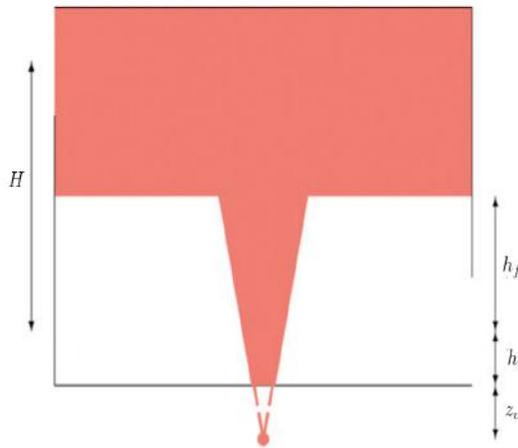


Figura 3.1: Adaptación de uno de los esquemas de Patridge y Linden 2013, en el esquema se muestra de manera gráfica las escalas espaciales y sus medidas.

flujo físicamente.

3.4. Modelos de ventilación natural por efectos térmico y del viento

Para estudiar la ventilación transitoria generada por la fuerza de flotación térmica combinada con la del viento, (Hunt and Linden, 1999), realizaron un modelo analítico y uno experimental para simular el drenado de una habitación que inicialmente contiene fluido de menor densidad que la del ambiente. Consideraron el caso en donde la habitación tiene una abertura inferior a barlovento y una abertura superior a sotavento, por lo que las fuerzas de flotación y del viento se refuerzan mutuamente. El problema lo plantearon en función de las diferencias de presión generadas a través de las aberturas por ambos efectos. Encontraron una relación pitagórica, ecuación (3.24), entre la ventilación producida por los efectos combinados de flotación térmica y el viento, y la ventilación producida por la flotación térmica y el viento actuando de manera individual.

$$U = \sqrt{U_w^2 + U_B^2} \quad (3.24)$$

Donde U es la velocidad total de ventilación, U_w la velocidad causada por el viento y U_B la velocidad causada por flotación (buoyancy).

Posteriormente para estudiar la ventilación natural en estado permanente generada por la fuerza de flotación térmica combinada con la del viento, (Hunt and Linden, 2001), consideraron el modelo de ventilación por desplazamiento de (Linden, 1999) agregándole un término que representa el efecto del viento en el balance de flujo volumétrico y de flujo de flotación, ecuación (3.25). Este modelo puede pensarse también como el modelo de drenado de (Hunt and Linden, 1999), al que se le incluye un término representando la fuente de flotación.

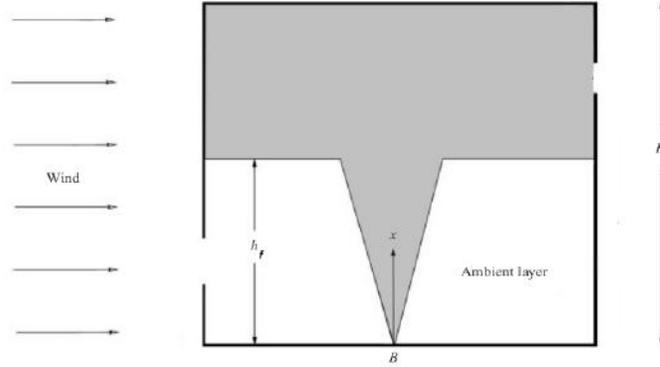


Figura 3.2: Esquema de Hunt y Linden (2001) donde se muestra el desplazamiento del flujo en el recinto; la abertura superior está al sotavento, la abertura inferior al barlovento, se tiene una fuente puntual de flujo de flotación.

$$A^*(g'(H - h_f - dc) = \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^{1/2} + CB^{1/3}h_f^{5/3} \quad (3.25)$$

$$A^* = a_w a_L \frac{2C_e C_D^2}{C_e a_w^2 + C_D^2 a_L^2} \quad (3.26)$$

En donde A^* es el área efectiva, g' es la gravedad reducida, H es la altura del modelo, h_f es la altura de la interfase, dc es la distancia vertical entre el punto medio de la abertura superior y el techo, Δ es la diferencia de presiones

en las ventanas, a_w y a_L el área de las aberturas a barlovento y sotavento respectivamente, C_e el coeficiente de expansión y C_D el coeficiente de descarga.

Cuando la ventilación natural es asistida por el viento, ésta incrementa debido a la diferencia entre la presión de barlovento y sotavento. Y a medida que aumenta la velocidad del viento la altura de la interfase asciende y la temperatura de la capa superior desciende. De manera contraria, a medida que aumenta la potencia de la fuente calor la altura de la interfase desciende y la temperatura de la capa superior aumenta.

Para estudiar el control de la ventilación por flotación térmica y viento se cuenta con los modelos propuestos por (Lishman and Woods, 2006), (Lishman and Woods, 2009b), (Lishman and Woods, 2009a), para habitaciones con dos y tres aberturas.

3.5. Movilidad de los bioaerosoles

Los bioaerosoles tienen una dinámica similar a los aerosoles, puesto que se ven influenciados por las mismas fuerzas físicas, apartado 2.3.2, además de tener influencia de efectos que resultan de su actividad biológica como por ejemplo su metabolismo y gases derivados de él o también su morfología. Por eso es común que al hablar de modelos de dispersión de bioaerosoles se maneje de manera indistinta al material particulado. Las fuerzas principales que actúan sobre ellos son: arrastre de flujo, gravedad, fuerzas eléctricas, gradientes térmicos y movimientos Brownianos (para el caso de las partículas más pequeñas).

Existe una gran cantidad de modelos para describir la mecánica de movimiento en los bioaerosoles, y es posible agruparlos en dos rubros según el tamaño de la partícula; si son partículas muy pequeñas se utilizará un modelo basado en el movimiento browniano y se despreciarán las fuerzas de gravedad. Si el tamaño de la partícula no es tan pequeño se utilizará un modelo que contemple el efecto de las fuerzas antes mencionadas, como por ejemplo los modelos descritos por (Pasquill, 1961) o (Vélez-Pereira and Camargo, 2008). La mayoría de los modelos toman en cuenta que las partículas son emitidas por una fuente a una velocidad constante, que la dirección del viento es constante, y dependiendo del tamaño de la partícula considerarán si sedimenta o no, y

uno de los puntos más importantes es que se considera un espacio abierto. Sin embargo, la gran desventaja de estos modelos es que no están planteados para espacios cerrados con ventilación, por ese motivo en esta tesis se opta por utilizar el modelo de sedimentación de partículas de (Cox and Wathes, 1995), para describir la dinámica de movimiento.

En partículas de mayor tamaño es posible expresar la velocidad de sedimentación como:

$$V_s = \frac{\rho d^2 g C}{18\eta} \quad (3.27)$$

donde V_s es la velocidad de sedimentación, ρ densidad de la partícula, d diámetro de la partícula, g la aceleración gravitacional, η viscosidad del aire y C coeficiente de corrección de Cunningham.

3.6. Trabajos previos de ventilación natural y bioaerosoles

Los trabajos sobre bioaerosoles dentro de un recinto no son muy abundantes, no obstante se sabe que habitaciones bien ventiladas reducen el riesgo de una infección causada por microorganismos aerotransportados (Mendell et al., 1996). La dispersión de los bioaerosoles tiene que ver con su tamaño, tratar con bioaerosoles que tienen tamaños cercanos a $0.1\mu\text{m}$ (en su mayoría virus) es aún más complicado, pero por la gran cantidad de trabajos previos se sabe que su dispersión es muy similar a los gases, en ese sentido resulta conveniente mencionar el trabajo de (Bolster and Linden, 2007), quienes a pesar que su investigación trataba sobre contaminantes pasivos en un cuarto con ventilación, es completamente aplicable para los bioaerosoles más diminutos, siguiendo el criterio de tamaño de (Vélez-Pereira and Camargo, 2008).

(Bolster and Linden, 2007) para sus experimentos planteaban una concentración de contaminantes pasivos inicialmente homogénea, con una pluma térmica en una habitación. La ventilación en el cuarto se daba por desplazamiento y se formaban dos capas térmicas que se separaban por una interfase, y la altura de la interfase se controló por medio de la inyección de fluido ambien-

te en la parte superior e inferior. Los resultados de sus experimentos indicaron que la concentración promedio de los contaminantes disminuye con el tiempo, sin embargo a la altura de la interfase queda una zona con una concentración relativamente alta de contaminantes. En su trabajo ellos concluyeron que la ventilación por desplazamiento es eficiente para remover el calor, pero no tan eficiente para remover los contaminantes pasivos.

En cuanto a los trabajos referentes a contaminantes particulados y la ventilación natural en los edificios (Bolster and Linden, 2008a) proponen dos modelos teóricos para la distribución de contaminantes particulados en estado permanente en una habitación. El primer modelo corresponde al bien mezclado. El segundo modelo corresponde al modelo de desplazamiento, que describe una habitación ventilada por abajo y por arriba, con una fuente de flotación que produce dos capas estratificadas. Para ambos modelos el contaminante particulado se puede suministrar desde afuera por el flujo de ventilación a través de la abertura inferior, o bien puede ser suministrado desde afuera por una fuente. Para predecir la concentración de contaminantes utilizan un balance de masa donde consideran nula la fuerza del aire fuera de la pluma y finita la velocidad de sedimentación de las partículas. Para el caso de las dos capas estratificadas, el transporte del contaminante lo acoplan al movimiento de la pluma. Sus resultados los presentan mediante la comparación del nivel de concentración de los contaminantes en las capas estratificadas con respecto al nivel de contaminantes del modelo bien mezclado. Así, si el contaminante es suministrado a través del flujo de ventilación, la capa inferior contiene mayor concentración. En cambio, si el contaminante es suministrado desde la base de la pluma, la capa superior será la más contaminada dado que la pluma se encarga directamente de transportar el contaminante hacia arriba. En una extensión de su estudio (Bolster and Linden, 2008b), consideran modelos en estado transitorio, validados con experimentos, llegando a resultados semejantes.

3.7. Problemática

El actual deterioro del suelo, del agua, del aire y de la biota tiene su origen en la explotación de los recursos en aras de satisfacer las necesidades humanas. El consumo energético, confort térmico y calidad del aire son de las necesidades más importantes al interior de los edificios, principalmente en climas cálidos.

Los consumos de energía cada vez mayores provocan contaminación en el medio, el confort térmico es necesario para sentirse cómodo, además de ayudar a la salud y la calidad del aire ayuda a mejorar la calidad de vida y prevenir enfermedades respiratorias. En México, más del 70 % del territorio nacional se encuentra clasificado como clima cálido, (Marincic et al., 2011), (INEGI, 2005). En este territorio, el confort térmico y la calidad del aire se pueden obtener por medios mecánicos o mediante estrategias eficientes de ventilación natural. Además, se pueden disolver altas concentraciones de microorganismos mediante una apropiada remoción de estos, lo que repercutirá en una buena calidad de vida.

3.8. Justificación

El confort térmico y la calidad del aire, en términos de la temperatura y concentración de microorganismos se pueden lograr mediante el apropiado diseño de la ventilación natural, aprovechando las fuerzas naturales para remover el calor y los contaminantes biológicos generados al interior, de este modo se ayuda a la reducción de contaminantes así como del consumo energético. Al utilizar las fuerzas naturales, la ventilación natural ayuda a disminuir el consumo energético de un edificio con respecto a uno equipado con un sistema de ventilación mecánica, a la vez que se satisfacen las necesidades humanas. Además la ventilación natural propicia el reemplazo del aire interior contaminado y a mayor temperatura por aire del exterior limpio y a menor temperatura, lo que beneficia directamente en la salud.

3.9. Hipótesis

Se plantea que para el caso de ventilación térmica, al abrir ventilas traseras habrá un ascenso en la interfase que separa las capas térmicas estratificadas, y con ello una disminución de la temperatura del estrato superior y de la habitación en general, y aumento en la remoción de bioaerosoles. Al tener la adición del viento con la inclusión de ventilas traseras, se esperaría una disminución adicional en la temperatura de la habitación y un aumento en las zonas de remoción.

3.10. Objetivos

Objetivo general

Analizar los resultados con el propósito de generar una guía de diseño para la remoción de calor al interior y la reducción de zonas de estancamiento mediante el uso de la ventilación natural.

Objetivos particulares

- Implementar un modelo experimental a escala que reproduzca la ventilación natural por los efectos térmico y de viento.
- Estudiar la ventilación natural por efectos térmicos y por efectos térmicos combinados con flujo de viento.
- Evaluar la temperatura resultante para los diferentes casos de estudio.
- Evaluar las áreas de estancamiento de los contaminantes biológicos para los casos de estudio.

Metodología

*Incluso si el tiempo se
extiende eternamente... un
final aún existe
Rintaro Okabe.*

4.1. Modelo a escala de una habitación tipo con una ventana y ventilas.	36
4.2. Sistema de generación de plumas térmicas.	39
4.3. Sistema de medición de temperatura	40
4.4. Arreglo experimental en el tanque ambiental	40
4.5. Arreglo experimental en el canal de agua	41
4.6. Velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica SPIV . .	42
4.7. Generación de la capa límite atmosférica a escala de laboratorio	44
4.8. Casos de estudio	45
4.9. Metodología experimental en el tanque ambiente	46
4.10. Metodología experimental en el canal de agua	47
4.11. Fluido de trabajo	48
4.12. Similitud dinámica	48
4.13. Calibración de los termopares	51
4.14. Criterio para análisis de zonas de estancamiento en bioaerosoles	52
4.15. Llenado de caja	53

En este capítulo se describe el modelo de una habitación a escala de labora-

torio utilizado. El modelo tiene una ventana y varias ventilas para reproducir la ventilación natural. Se explican los sistemas y componentes incorporados al modelo así como los integrados al tanque ambiental y el canal de agua, es decir el sistema de inyección de agua caliente, el sistema de generación de plumas térmicas, el sistema de adquisición de datos, el sistema de velocimetría por imágenes de partículas y la disposición del conjunto de obstáculos empleados para generar un flujo que representa una capa límite atmosférica. Se describen los casos de estudio a partir de las combinaciones de apertura entre la ventana y las ventilas. Se explica la metodología experimental utilizada en el tanque ambiente y en el canal de agua. Se justifica el uso de agua en los experimentos como fluido de trabajo y que produce flujos con similitud dinámica a la de los flujos del cuarto a escala real. Se presentan los valores para la calibración de las mediciones con termopares. Se explica el criterio para la evaluación de las zonas de estancamiento en los bioaerosoles. Finalmente se presentan los perfiles que simulan una capa límite atmosférica para cada caso de estudio y los valores de ajuste del modelo analítico de la pluma térmica.

4.1. Modelo a escala de una habitación tipo con una ventana y ventilas.

Para los experimentos de ventilación se utilizó un modelo de una habitación tipo, a escala, con una ventana frontal, tres ventilas traseras inferiores y tres ventilas traseras superiores, figura 4.1. La escala del modelo utilizado fue de 1:20 con respecto a la escala real. El modelo se fabricó con hojas de acrílico transparente de 6 mm de espesor para las paredes frontal, posterior y lateral derecha y el techo; de 9 mm para la pared lateral izquierda y el piso. Las medidas internas del modelo son para su base 15.0 cm \times 15.0 cm y para su altura 12.0 cm, que en escala real representa un cuarto de 3 \times 3 \times 2.4 m, figura 4.2. En la pared frontal se realizó una abertura centrada de 4.0 cm \times 4.0 cm de área, que en escala real representa una ventana de 0.80 \times 0.80 m. En la pared posterior se hicieron tres aberturas superiores y tres aberturas inferiores con 1.00 cm de altura por 3.0 cm de ancho, que a escala real representa 0.20 \times 0.60 m. El techo se barrenó para enroscar un tapón de bronce tipo NPT de 1/4" que sostiene una varilla de termopares de 12.0 cm de longitud. La pared lateral izquierda se barrenó para introducir un conector de PVC

tipo NPT de 1/2" donde se instaló el sistema de generación de plumas térmicas.

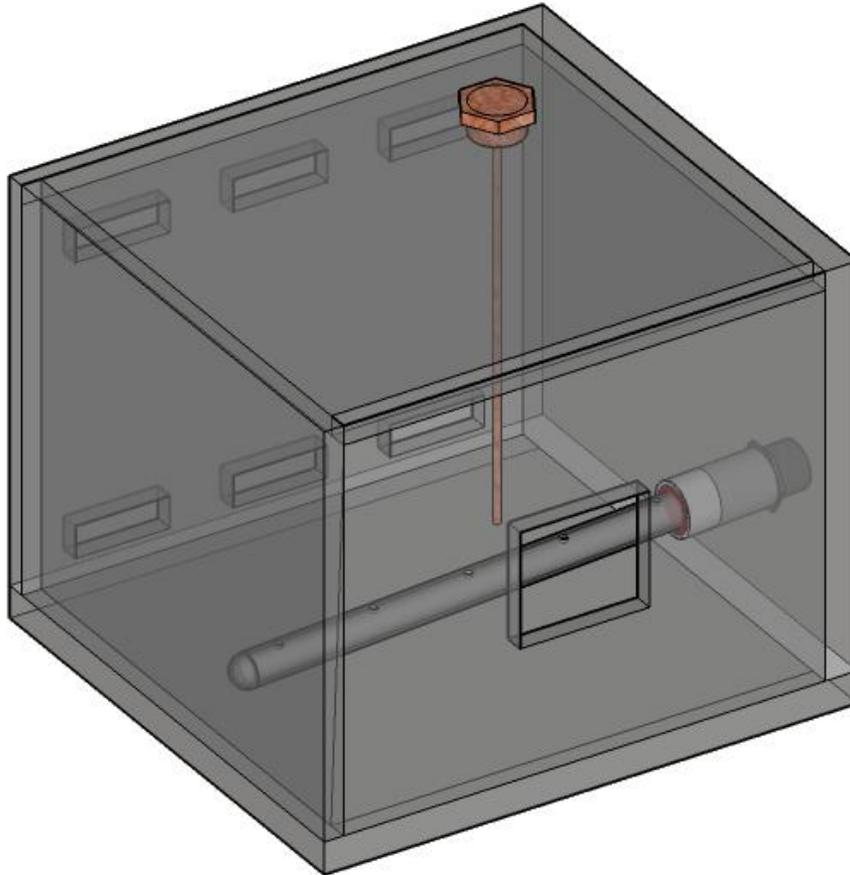
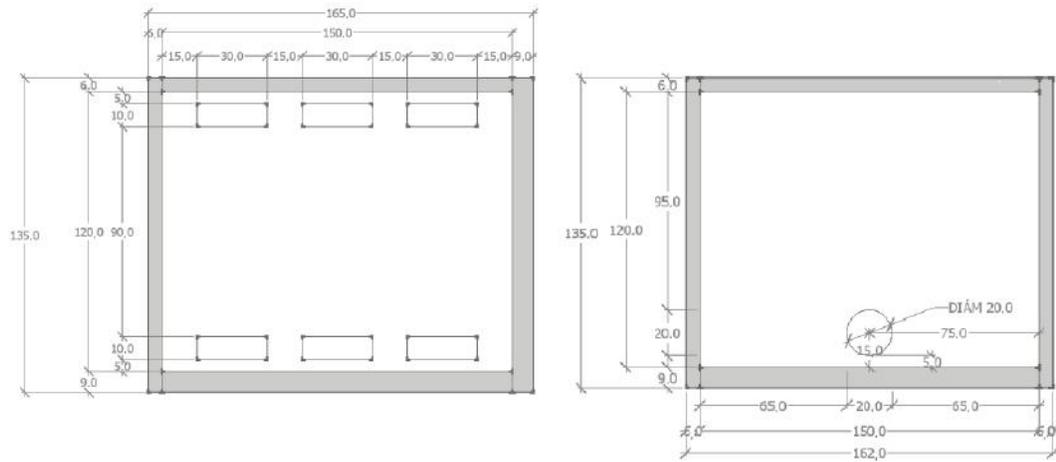
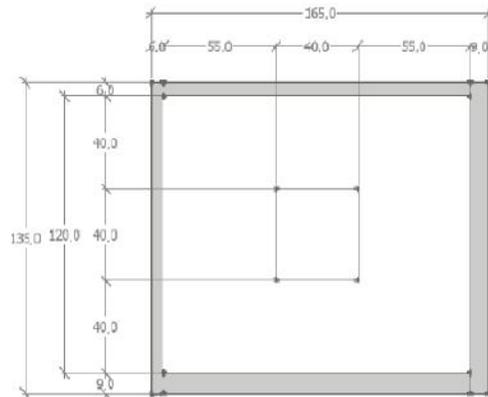


Figura 4.1: Representación 3D del modelo realizado. El modelo tiene 3 ventilas superiores y 3 inferiores de 3.0 cm x 1.0 cm en la pared trasera y en la pared frontal una ventana de 4.0 cm x 4.0 cm ubicada al centro. El techo tiene un orificio por donde se introduce una varilla con termopares, todas las paredes tienen un grosor de 6 mm, excepto la pared trasera y el piso que tienen un grosor de 9 mm debido a un orificio donde se introduce un tubo de vidrio por el cual se le inyecta el agua caliente.



Posterior

Lateral



Frontal

Unidades en mm

Figura 4.2: Esquema de la vista posterior, lateral y frontal del modelo con sus respectivas medidas en mm. La otra vista lateral tiene las mismas medidas pero sin el orificio, se omiten el piso y el techo del modelo.

4.2. Sistema de generación de plumas térmicas.

El sistema consiste de un tubo de vidrio de 20.0 cm de largo, 5 mm de diámetro interno y paredes de 1 mm de grosor, que cuenta con cinco orificios igualmente espaciados cada 3.0 cm, figura 4.3, por el cual se suministra agua desde un baño térmico programable marca Thermo Scientific modelo A25B. El tubo se inserta en el modelo a través del conector de PVC roscado a la pared lateral izquierda. La unión entre el tubo de vidrio y el conector de PVC se hace con pegamento de silicón. El orificio más próximo al conector se encuentra sellado y tiene un termopar que mide la temperatura del agua suministrada, por lo que al interior sólo se producen cuatro plumas térmicas.

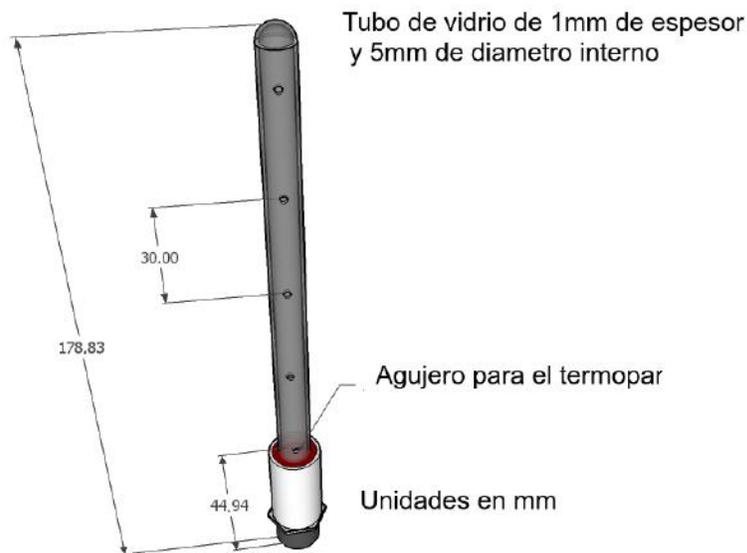


Figura 4.3: Esquema del tubo de vidrio. El tubo de vidrio tiene 5 orificios, pero una de ellas está tapada por un termopar, por los otros 4 fluye el agua sin problema, el tubo de vidrio esta fijado en su base al conector de PVC roscado, mediante silicón de alta temperatura.

4.3. Sistema de medición de temperatura

El sistema se compone de un adquisidor de datos marca Agilent modelo 34972A con una tarjeta multiplexora Agilent de 20 canales, un conjunto de 16 termopares tipo T (cobre-constán) marca Omega, calibre 30, de 2.30 m de largo, y una computadora de escritorio con el programa BenchLink Data Logger versión 4.3 de Agilent Technologies.

4.4. Arreglo experimental en el tanque ambiental

Para realizar la visualización de las plumas térmicas se utilizó un tanque ambiental cúbico lleno de agua, de 1.22 m por lado, construido con placas de acrílico transparente de 25 mm de espesor. Además se utilizó el sistema de generación de plumas térmicas, y el sistema de medición de temperatura con un conjunto de 16 termopares.

Para proveer iluminación se ocupó un proyector de acetatos marca 3M modelo 9050, con un foco ENX de 360 W y 82 V, que se situó detrás del tanque ambiental. Las plumas térmicas producidas se pudieron observar directamente en el seno del fluido y también mediante la proyección de sus sombras sobre una pantalla de papel albanene colocada en la parte frontal del tanque ambiental, figura 4.4.

El conjunto de termopares conectados al adquisidor quedaron instalados de la siguiente manera: los primeros diez termopares (del canal 101- al 110) se colocaron en la varilla separados verticalmente a intervalos de 1.2 cm entre ellos a partir de una altura de 1.2 cm; el termopar del canal 116 se ubicó en el primer orificio del sistema de generación de plumas térmicas; el termopar del canal 112 se colocó en el depósito de agua del baño térmico; el termopar del canal 113 se ubicó en el seno del agua contenida por el tanque ambiente y los termopares de los canales 114 y 115 estuvieron en el ambiente del laboratorio.

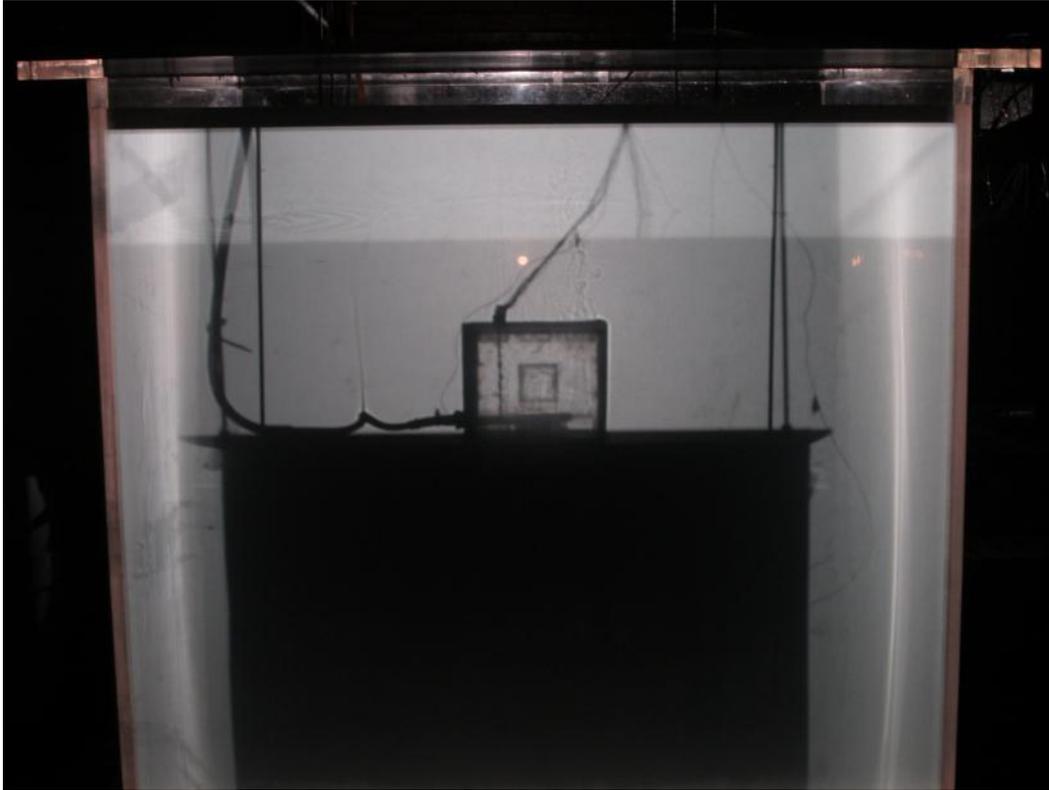


Figura 4.4: Fotografía de uno de los experimentos realizados en el tanque ambiente con el modelo dentro.

4.5. Arreglo experimental en el canal de agua

Los experimentos que se reportan en el capítulo 5 se llevaron a cabo en un canal de agua abierto (CAA) que produce corrientes de agua que simulan corrientes de aire en la escala real. En los experimentos se estudió la ventilación natural separando o combinando los efectos térmicos y del viento. El CAA tiene 6.00 m de largo, 0.315 m de ancho y 0.50 m de alto, figura 4.5. Para las pruebas se utilizó un tirante de agua de 0.42 m. El flujo de agua en el CAA es suministrada por una bomba de agua de 4 HP desde un depósito de aproximadamente 1800 l. A la entrada del canal se encuentra una cámara de sedimentación, construida de lámina de acero inoxidable de calibre 18 que cuenta con una cama de grava para amortiguar las perturbaciones generadas por la entrada del agua. Las paredes del canal son de vidrio transparente de

12 mm de grosor. La zona de prueba del CAA está a 4 m desde la entrada; en dicha zona de 0.315 m de ancho por 1.00 m de largo el piso es de vidrio transparente de 18 mm de espesor el cual permite el paso del haz de luz láser figura 4.6, utilizado en la técnica de velocimetría por imágenes de partículas estereoscópico (SPIV). Al final del CAA se colocó una rampa curva de 0.36 m de altura para mantener el tirante de agua de 0.42 m.



Figura 4.5: Fotografía del canal de agua y del sistema SPIV. 1) Entrada de agua, 2) Canal de agua, 3) Zona de estudio, 4) Lente cilíndrico, 5) Espejo plano rectangular inclinado, 6) Tubería de recirculación, 7) Espejo; a) Láser, b) Sistema de enfriamiento láser, c) Cámaras, d) Equipo de cómputo.

4.6. Velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica SPIV

El sistema de medición de campos de velocidades por velocimetría por imágenes de partículas (PIV), es una técnica no intrusiva, donde se hace pasar luz láser por un fluido transparente, en el cual se encuentran pequeñas partículas que reciben el nombre de partículas trazadoras. Para obtener óptimos resultados se recomienda una concentración densa de partículas trazadoras uniformemente distribuidas en el fluido. Existen varios tipos de láser para el

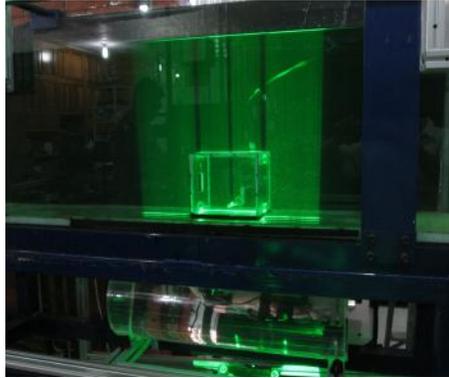


Figura 4.6: Fotografía de la zona de estudio. Se aprecia el cilindro que actúa como lente y las partículas alumbradas por el plano de luz láser.

PIV, siendo el más utilizado el láser neodymium-doped yttrium aluminium garnet Nd:YAG, por sus siglas en inglés. El rayo láser de Nd:YAG es generado desde una cavidad resonadora y pasa por dos lentes uno cilíndrico y otro esférico, generando un haz de luz láser que ilumina la zona de prueba. Enfrente se encuentra una cámara enfocando el plano que se desea observar. Con esta se obtienen pares de fotografías con intervalos de tiempo muy cortos, con lo que es posible calcular el desplazamiento de las partículas en el plano. Debido a que las imágenes del PIV contienen muchas partículas y se tiene un número considerable de fotografías, se hace necesario un buen sistema para la adquisición y procesamiento de las imágenes. Las fotografías tomadas se subdividen en pequeños cuadros denominados áreas de interrogación, para que cada una de las áreas de interrogación de la primera fotografía se correlaciona con el área de interrogación correspondiente de la segunda fotografía, de este modo se calcula el desplazamiento promedio más probable de las partículas, (Cruz-Salas, 2014), (Adrian, 2004). Con el anterior cálculo se construye el campo de velocidades, asumiendo que el movimiento de cada partícula corresponde al movimiento del fluido. Existen varios tipos de PIV que pueden clasificarse según su terna (k, l, m) donde $k=1,2,3$ indica el número de componentes de la velocidad que se miden, $l=0,1,2,3$ señala la cantidad de dimensiones espaciales del dominio y $m=0,1$ indica si el registro temporal es continuo o instantáneo. De este modo la mayoría de los PIV actuales pertenecen a la clasificación $(2,2,0)$. Otros tipos de PIV según esta clasificación son: PIV por holografía cinemática $(3,3,1)$, PIV por holografía simple $(3,3,0)$, el SPIV o PIV estereoscópico $(3,2,1)$ y el PIV translativo $(3,2,0)$ (Iriarte, 2008).

En los experimentos presentados en esta tesis se utilizó un sistema de medición SPIV que consta de una fuente de luz láser de doble pulso, dos cámaras digitales, un controlador para sincronizar las cámaras y el láser, y una computadora con el programa Davis 7.2 (software de control y adquisición). La fuente de luz láser utilizada es Nd:YAG marca New Wave RESEARCH modelo Solo120 XT-15Hz. Las cámaras digitales utilizadas son marca Nikon modelo AF con lentes NIKKOR 50 mm 1:1.4 D. Dichas cámaras únicamente se pueden manipular electrónicamente pues están sincronizadas con el pulso de luz láser, además las cámaras tienen un ángulo entre ellas de 30° que les permite crear una visión estereoscópica. Se ocupó una computadora con procesador Intel $\text{\textcircled{R}}$ Xeon $\text{\textcircled{R}}$ CPU, 5150 @2.66 GHz, 2.67 GHz, 3.00 GB de RAM. Se colocó un espejo de $0.13 \text{ m} \times 0.56 \text{ m}$ a una distancia de 1.50 m de la salida del haz de luz láser, con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal con el objetivo de cambiar la dirección del haz de luz en dirección vertical. Como el ancho de luz tiene un ancho menor al requerido fue necesario reducirlo, para ello se utilizó un tubo de acrílico con diámetro de 15 cm y paredes de 4.5 cm de espesor. El tubo de acrílico se llenó de agua, se selló en ambos extremos, y se dejó montado en una base metálica justo por encima del espejo inclinado, figura 4.6. El sistema de SPIV se calibró usando la tableta de calibración número 22, con un valor < 1 para la desviación estándar en las imágenes corregidas, (LaVision, 2006). Esta calibración se utilizó para todos los experimentos realizados en el CAA.

4.7. Generación de la capa límite atmosférica a escala de laboratorio

La capa límite atmosférica (CLA) es la región donde el viento se ve influenciado en su velocidad por la superficie de la tierra cercana a este. Para reproducir la CLA en el CAA, se colocaron obstáculos transversales a la dirección del flujo de agua, figura 4.7. En total se ocuparon 32 placas de policarbonato de 6 mm de espesor en posición vertical con una separación entre cada una de 10 cm. Las placas se colocaron obteniendo un contacto uniforme con el piso y las paredes del CAA. Las 32 placas se colocaron iniciando con las de mayor altura como sigue: una placa de 15 cm, una de 13 cm, una de 10.5 cm, dos de 10 cm, tres de 7.5 cm, tres de 5 cm, tres de 3 cm, 5 de 1.5 cm con 4 protube-

rancias, cinco de 1.5 cm con 3 protuberancias y las restantes eran de 1 cm de altura.



Figura 4.7: Fotografía de los obstáculos colocados para simular la capa límite atmosférica

4.8. Casos de estudio

En el modelo de la habitación a escala, la ventana y las ventilas pueden cerrarse o mantenerse abiertas dependiendo del caso de estudio, figura 4.8. En este trabajo se plantean cinco casos de estudio donde la ventana frontal siempre se mantuvo abierta: para el caso de referencia CR solo estaba abierta la ventana, para el caso T1 con la ventila superior central, para el caso B1 con la ventila inferior central, para el caso T3 con las tres ventilas superiores, para el caso B3 con las tres ventilas inferiores. Además se realizó un caso de estudio FB en el que la ventana y las ventilas se mantenían cerradas, excepto por la ventila inferior central, con la finalidad de obtener los valores de los parámetros que describen el llenado de caja o *filling box*.

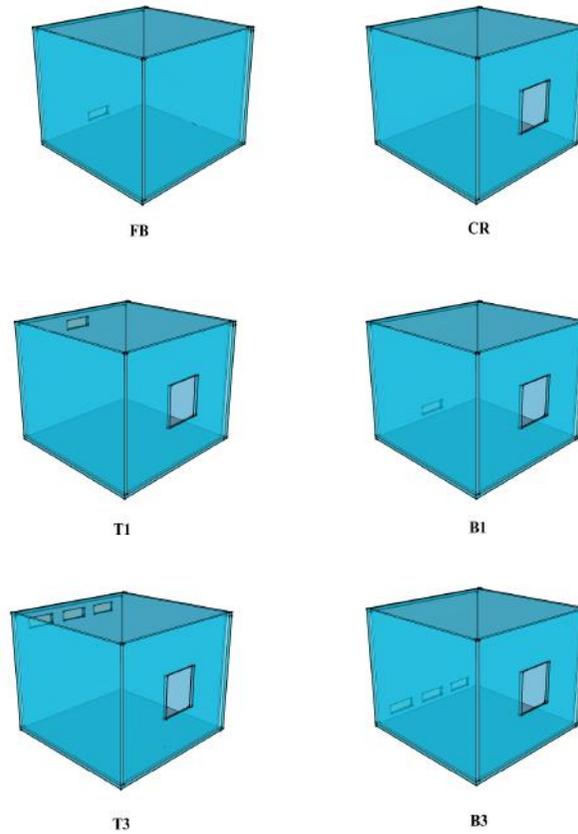


Figura 4.8: Representación de las diferentes configuraciones que presenta el modelo.

4.9. Metodología experimental en el tanque ambiente

Los experimentos de visualización en el tanque ambiente se realizaron manteniéndolo lleno de agua y sumergiendo en este el modelo a escala. Se tuvo cuidado de purgar el aire en el modelo a escala al momento de sumergirlo. Se fijaba el modelo a una plataforma de acrílico que representaba a escala real un piso circundante. Posteriormente al tiempo $t = 0$ s se iniciaba la adquisición de datos de temperatura a cada dos segundos por los termopares y al tiempo

$t = 20$ s se iniciaba un flujo de $90 \text{ cm}^3/\text{min}$ de agua caliente en el sistema de generación de plumas térmicas. El flujo era controlado desde el rotámetro. La temperatura promedio de inyección era aproximadamente de 70°C . Además se apagaban las luces del laboratorio. Los experimentos tenían una duración de 3 horas.

4.10. Metodología experimental en el canal de agua

Para realizar los experimentos en el CAA se llenaban de agua el depósito de 1800 l y el canal a sus límites de operación. Antes de realizar cualquier experimento se habilitó el CAA para producir en la zona de prueba una CLA de una zona suburbana, mediante la colocación de los obstáculos. Los valores de los parámetros de la CLA se muestran en el cuadro 4.3. Con el CAA habilitado, se sumergía el modelo de laboratorio en la zona de prueba alineando su plano central con el haz de luz láser. La ventana y las ventilas se abrían o cerraban según el caso de estudio. Los experimentos se iniciaban con la adquisición de temperaturas, con un intervalo de 2 s entre adquisiciones, por medio de los termopares al tiempo $t = 0$ s. Al $t = 60$ s se encendían simultáneamente el sistema de generación de plumas térmicas (mediante la abertura del rotámetro en el baño térmico y las válvulas en el arreglo de mangueras) y el SPIV. La temperatura del agua caliente suministrada en el sistema de plumas térmicas se programaba a 70°C , apartado 7.2. Con el SPIV se adquirían 100 campos de velocidad durante los primeros 200 s del experimento: 100 pares de fotografías por cada cámara con intervalos de separación entre los pulsos de láser de 0.0254 s, de 2 s y entre par de fotografías. A los 1200 s (20 min) se tomaba otro grupo de 100 campos de velocidad con el SPIV de las estructuras de flujo ventilación natural por efecto térmico. Inmediatamente después de la adquisición de los campos se iniciaba el flujo de agua en el canal mediante el encendido de la bomba de 4 HP. Una vez circulando el agua se esperaban otros 1200 s (20 min) del flujo para tomar un grupo de 100 campos de velocidad con el SPIV de la ventilación natural producida por la combinación de los efectos térmicos y de flujo de agua representando al viento. Después de esta toma con el SPIV, se extraía el modelo a escala de la zona prueba para tomar la CLA de cada caso y así verificar sus parámetros. Para finalizar los experimentos se apagaba la bomba. Las fotografías de los campos de velocidad se procesaron

Cuadro 4.1: Propiedades del agua y del aire a 1 atm. Tomado de (Mott, Robert L., 1996)

fluido	temperatura $T^{\circ}C$	densidad (kg/m^3)	peso específico $\gamma(N/m^3)$	viscosidad dinámica $\mu(Pa \cdot S)$
Aire	70	1.029	10.09	2.04×10^{-5}
Aire	25	1.184	11.615	1.835×10^{-5}
Agua	70	9.59	978	4.02×10^{-4}
Agua	25	9.78	997	8.91×10^{-4}

con resolución de 64×64 px y de 16×16 px para obtener el perfil de velocidad de la CLA y para obtener la magnitud de la velocidades en el interior del modelo, respectivamente. Este procedimiento se repitió para cada uno de los casos de estudio, excepto para el caso FB, ya que se le colocó aislante térmico para evitar lo más posible la perdida de calor por las paredes, pero la ventila inferior central se dejó abierta para dejar salir el excedente correspondiente al fluido inyectado.

4.11. Fluido de trabajo

Para los experimentos se utilizó agua como fluido de trabajo. El agua utilizada se obtuvo de los depósitos de agua del IER. Las propiedades del agua utilizada están en el cuadro 4.1. El agua se utilizó a $25^{\circ}C$ en el inicio de los experimentos en el CAA y por tanto en el modelo a escala. La temperatura promedio suministrada en el sistema de generación de plumas fue de $70^{\circ}C$. El agua en experimentos a pequeña escala puede reproducir el comportamiento del aire si se mantiene la similitud dinámica entre ambos flujos.

4.12. Similitud dinámica

El criterio fundamental para establecer la similitud dinámica en este trabajo esta basado en los valores del número de Reynolds y de Peclet. Los cuales son números adimensionales que nos dan un valor con respecto a un punto crítico, de ese modo Re nos indicará turbulencia y Pe nos indicará la relación entre la fuerza de advección de un fluido y la velocidad de difusión. De acuerdo

con (Linden, 1999), estos valores deben ser mayores a 10^3 y según (Partridge and Linden, 2013) $Re \sim 10^3$ y $Pe \sim 10^4$

$$Re \approx \frac{g^{1/2} H^{3/2}}{\nu} \qquad Pe \approx \frac{g^{1/2} H^{3/2}}{\alpha} \qquad (4.1)$$

Donde

$$g' \approx g \frac{\Delta T}{T_a} = g \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$$

En donde H denomina la altura característica, ν la viscosidad cinemática interna, α la difusividad térmica, g la aceleración debida a la gravedad, g' la gravedad reducida, T_a la temperatura absoluta, $\frac{\Delta T}{T_a}$ la diferencia de las temperaturas absolutas y ρ densidad.

En este sentido se interpreta que para la pluma térmica los efectos inerciales y advectivos son más importantes que los efectos difusivos y viscosos, (Partridge and Linden, 2013). Tomando en cuenta las premisas anteriores, el número de Re es de magnitud similar en ambas escalas, laboratorio y real, y el número de Pe puede llegar a ser mayor en escala de laboratorio, apartado 4.12.

En los experimentos realizados se tenía una potencia térmica aproximada de 282.15 watts generados por las plumas, correspondiente a un flujo volumétrico de $1.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ con una diferencia de temperatura de $\Delta T = 45^\circ \text{C}$, como eran 4 plumas a cada una se le asigno un valor aproximado de 70 watts. El ser humano promedio genera alrededor de 72 watts cuando esta durmiendo, si esta en reposo genera un aproximado de 100 watts, y las diferencias de temperatura de las plumas térmicas producidas son del orden 1°C . Asimismo se podrían incluir electrodomésticos o focos que consuman potencias equivalentes.

Con relación al flujo externo (flujo de viento) para cada uno de los casos con el SPIV se tomó un perfil de velocidades en el canal sin el modelo, figura 4.9. Del perfil de la CLA se obtiene una velocidad de referencia U_w con la que se determinarán los factores para relacionar el modelo de laboratorio con la habitación a escala real. Esto se hace tomando en consideración que en ambos casos los campos de velocidades guardan la misma proporción respecto a una velocidad de referencia, que se obtiene a partir de la definición del Re .

Cuadro 4.2: Valor de los números adimensionales obtenidos al interior de la pluma con $\Delta T = 45^\circ C$ y $\Delta T = 1,0^\circ C$ para las condiciones de laboratorio y reales respectivamente.

Número adimensional	Laboratorio	Real
$Re_{interno}$	33881	43110
$Pe_{interno}$	115835	31446

$$Re = \frac{U_w H}{\nu_w}$$

Donde Re es el número de Reynolds, U_w es la velocidad de referencia en el perfil, H la altura característica del modelo y ν_w la viscosidad cinemática del agua.

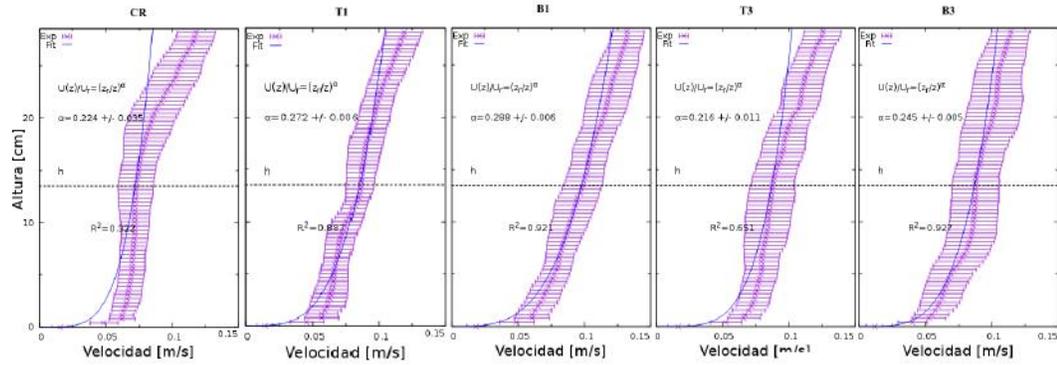


Figura 4.9: Perfiles de velocidad obtenidos en el canal de agua a la altura h_m se tiene la velocidad de referencia U_w .

Una vez obtenidos los valores de Re , se obtienen las velocidades de referencia a escala real para los cinco casos, ecuación (4.2), para obtener la velocidad de referencia en escala real, cuadro 4.3 y con ella establecer un criterio para el desplazamiento de las partículas.

$$U_a = \frac{Re \nu_a}{H_r} \quad (4.2)$$

Donde U_a es la velocidad de referencia en aire, Re es el número de Reynolds, ν_a es la viscosidad cinemática del aire y H_r la altura de la habitación (aire como fluido).

De los experimentos se obtiene un conjunto de factores para el escalamiento real ecuación (4.3)

$$\frac{U a_w}{U w_{x,y}} = \frac{U_a}{U_{x,y}} \quad (4.3)$$

Donde x,y son los índices para las coordenadas de las áreas de interrogación del SPIV que se escalan para el caso real, U_w y U_a son las velocidades en agua y aire respectivamente.

Cuadro 4.3: Condiciones al exterior del modelo, para aplicar el criterio de similitud dinámica. La tabla muestra la altura H para altura en el modelo, H_r para altura en escala real, la velocidad U , la viscosidad cinemática ν y el número de Reynolds Re . Los subíndices w y a denotan agua (water) y aire (air) para escala de laboratorio y real respectivamente. Obtenidos a partir de los experimentos.

	agua			aire			Re
	$H(m)$	$U_w(m/s)$	$\nu_w(m^2/s)$	$H_r(m)$	$U_a(m/s)$	$\nu_a(m^2/s)$	
CR	0.135	0.072636	0.839×10^{-6}	2.7	0.06922	1.6×10^{-5}	11681
T1	0.135	0.085959	0.839×10^{-6}	2.7	0.08190	1.6×10^{-5}	13821
B1	0.135	0.098761	0.839×10^{-6}	2.7	0.09410	1.6×10^{-5}	15881
T3	0.135	0.087765	0.839×10^{-6}	2.7	0.08362	1.6×10^{-5}	14111
B3	0.135	0.087673	0.839×10^{-6}	2.7	0.08352	1.6×10^{-5}	14095

4.13. Calibración de los termopares

Los termopares se soldaron en el laboratorio, por lo cual fue necesario realizar una calibración para ajustar las mediciones de temperatura obtenidas con los valores de un calibrador marca Ametek modelo Jofra PTC-155 B. Las temperaturas para la calibración se variaron de 10°C en 10°C hasta los 100°C .

Se utilizó una regresión lineal para cada termopar de donde se obtuvo la pendiente m y el ajuste al origen b . En el cuadro 4.4 muestran los valores de m y b para cada termopar.

Cuadro 4.4: Valores de pendiente y ordenada al origen en las regresiones lineales para la calibración de termopares.

Termopar	m	b
101	0.9974	0.7574
102	0.9973	0.7387
103	9973	7282
104	9974	7247
105	9970	7636
106	9973	0.7090
107	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

4.14. Criterio para análisis de zonas de estancamiento en bioaerosoles

Para poder relacionar los valores de velocidades obtenidos con la remoción de contaminantes biológicos y las zonas de estancamiento, se tomó la velocidad de sedimentación en aire de 0.013cm/s para organismos de $10\mu\text{m}$ de diámetro propuesta por (Cox and Wathes, 1995), (Sánchez-Monedero et al., 2006). Al valor de (0.013cm/s) se le relacionó con las velocidades del aire al interior del modelo después de haber obtenido sus respectivos valores en aire, ecuación (4.4), cuando la velocidad del aire al interior es menor a la velocidad de

sedimentación se considerará una zona de estancamiento y de ser mayor será una zona de remoción.

$$U_b = \frac{U_a}{U_s} \quad (4.4)$$

Donde U_b es la velocidad relativa del bioaerosol en la habitación y U_s es la velocidad de sedimentación de la partícula.

4.15. Llenado de caja

Cuando la pluma térmica alcanza el techo es el momento en el cual se inicia el llenado de caja, tras darse el choque, se forma la capa cálida y comienza a engrosar conforme al tiempo. En los experimentos los termopares estaban colocados a alturas específicas con lo cual era posible saber a que tiempo llegaba la capa de fluido cálido a la altura de cada uno de ellos, y ajustando los tiempos de llegada experimentales con la ecuación (3.2), fue posible obtener un ajuste analítico con los resultados experimentales. La constante de ajuste que resultó fue de 0.113.

En el corto plazo, la figura 4.11, en un plazo menor a 300 s, la temperatura de los termopares incrementa rápidamente. El orden en el que los termopares tienen una inflexión positiva es del superior al inferior. Dichas inflexiones marcan el tiempo al cual el frente térmico desciende y llega a la altura de cada termopar para elaborar la gráfica de la figura 4.10.

En un largo plazo figura 4.12, los termopares parecen formar un solo estrato, su aumento de temperatura se hace más lento conforme avanza el tiempo, lo cual es una característica de los procesos asintóticos.

Los termopares están muy juntos entre sí, como si fueran un solo estrato, menos el termopar 101 que esta ligeramente a menor temperatura. Cabe recordar que para este arreglo experimental y se dejo abierta la ventila inferior central, esto con el fin de dejar salir el fluido que se inyectaba, sin embargo parece que una pequeña cantidad de fluido también entraba por dicha abertura.

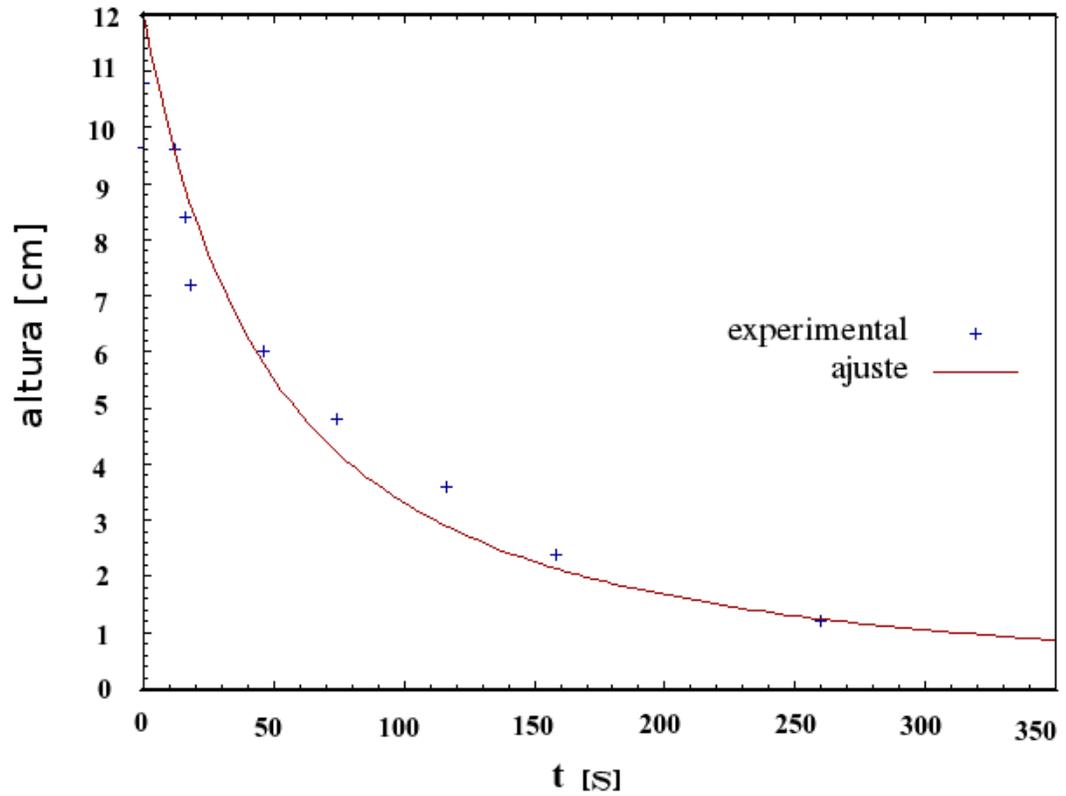


Figura 4.10: Descenso del frente térmico en el llenado de caja. Se muestra el tiempo que tarda el frente térmico en llegar a cada uno de los termopares. En la línea continua se observa la tendencia teórica ajustada a los tiempos experimentales con una constante de $C=0.113$, de acuerdo a la ecuación (3.2). Las cruces en la gráfica muestran los valores experimentales.

Adicionalmente el termopar de la superficie del tubo de vidrio T-115, parece que le incide un fluido que llega a una temperatura menor.

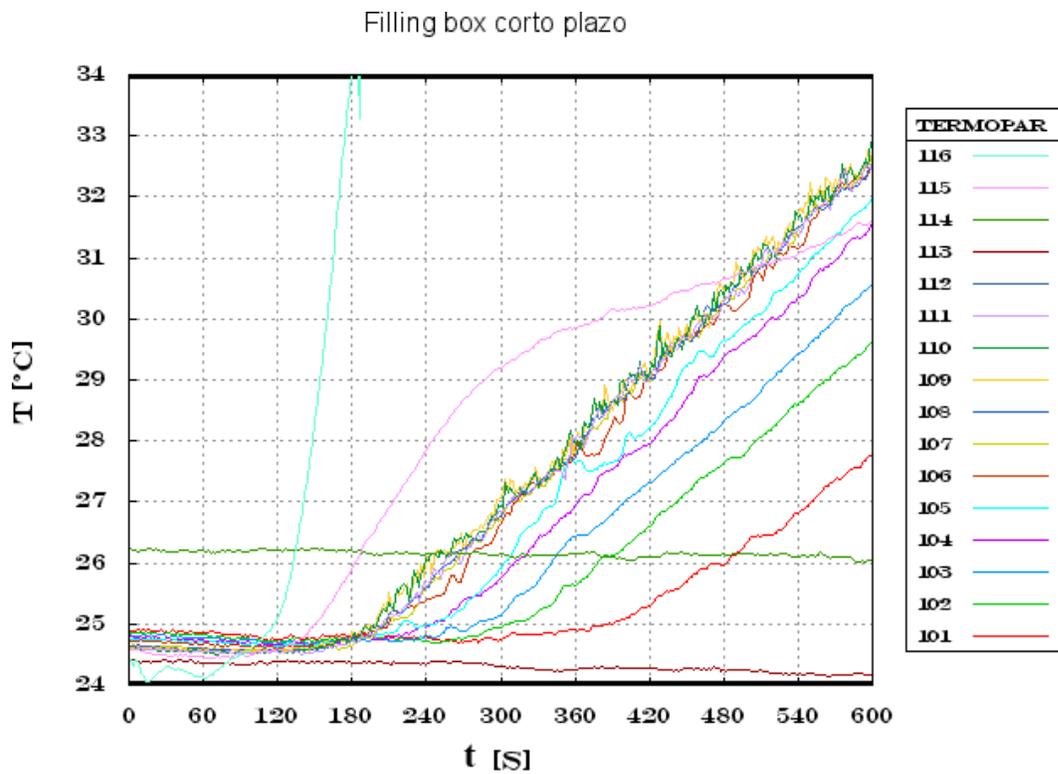


Figura 4.11: Aumento de temperatura de los termopares al interior del modelo el corto plazo para el llenado de caja. Los termopares 101-111 marcan la altura del frente térmico, el termopar 116 mide al fluido inyectado, el 113 al agua ambiente, el 114 al aire y el 115 la superficie del tubo de vidrio

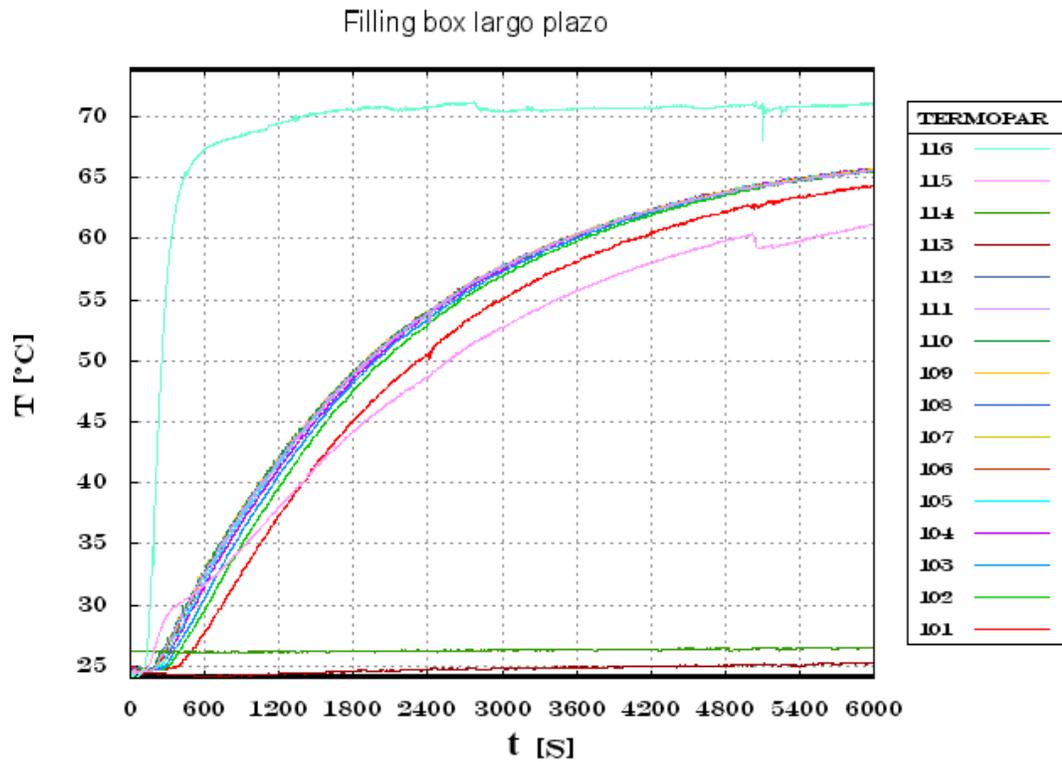


Figura 4.12: Aumento de temperatura de los termopares al interior del modelo en un largo plazo para el llenado de caja. Los termopares 101-111 marcan la altura, el termopar 116 al fluido inyectado, el 113 al agua ambiente, el 114 al aire y el 115 la superficie del tubo de vidrio

Resultados y discusiones

*Nada es perfecto, el mundo no es perfecto, pero está ahí para nosotros, haciéndolo lo mejor que puede. Eso es lo que hace que sea tan hermoso.
Roy Mustang.*

5.1. Efecto térmico	58
5.1.1. Caso de referencia CR	58
5.1.2. Casos con ventilas superiores T1 y T3	63
5.1.3. Casos con ventilas inferiores B1 y B3	64
5.2. Efectos térmico y del viento	69
5.2.1. Caso de referencia CR	70
5.2.2. Casos con ventilas superiores T1 y T3	73
5.2.3. Casos con ventilas inferiores B1 y B3	74
5.3. Discusiones	78

En este capítulo se presentan las mediciones de temperatura y velocidad, obtenidas con termopares y velocimetría por imágenes de partículas. El análisis primeramente se realiza en el apartado 5.1 para la ventilación producida únicamente por efecto térmico, y después en el apartado 5.2 para la ventilación producida por el efecto térmico conjuntamente con el del viento. Se utiliza el

caso con sólo la ventana frontal abierta como caso general de referencia (CR) y después se presentan los otros cuatro casos con sus particularidades. En todos los casos se analiza la propagación de calor así como las zonas de estancamiento y las de transporte de contaminantes biológicos.

5.1. Efecto térmico

5.1.1. Caso de referencia CR

Para este trabajo experimental se define efecto térmico al producido por las cuatro plumas térmicas suministradas desde el piso, sin la presencia de viento. La figura 5.1 contiene las mediciones de temperatura para el caso de referencia, obtenidas con la columna de termopares al interior del modelo.

A partir de los 180 s de haber iniciado la inyección de las plumas térmicas, los termopares superiores e intermedios registran un aumento de la temperatura que corresponde a un estado transitorio. Equivalente al llenado de caja sin completar, es decir, el frente térmico no llega hasta el piso, sino que al ir descendiendo el fluido cálido encuentra la ventana y por ahí sale hacia el ambiente. La razón de aumento de temperatura disminuye con el tiempo, cuando se establece un flujo de ventilación natural bidireccional estacionario a través de la ventana. Mediante este flujo bidireccional se extrae energía térmica del interior al salir fluido cálido por la parte superior de la ventana, figura 5.4a, y al mismo tiempo entrar fluido frío a la misma razón desde el exterior, por la mitad inferior. El estado permanente se alcanza aproximadamente a los 600 s, cuando los termopares ya no registran aumento de temperatura. En este estado la energía térmica extraída por el flujo bidireccional corresponde a la energía térmica suministrada por las plumas térmicas desde el piso. La tendencia de la temperatura por el efecto térmico cambia aproximadamente a los 1600 s, cuando se enciende la bomba del canal de agua y se genera el flujo de agua que simula al viento.

En la figura 5.1, también se puede observar que antes de los 1600 s que existe una estratificación térmica de dos capas, con los termopares superiores registrando mayor temperatura que los inferiores. El perfil de temperaturas de la figura 5.2, representa dicha estratificación con un estrato cálido en la par-

te superior, aproximadamente $32.1^{\circ}C$ y un estrato frío en la parte inferior a $27.6^{\circ}C$, este último con la temperatura del fluido que entra del ambiente, con una diferencia de temperatura de $4.5^{\circ}C$. Se tiene un perfil de temperaturas típico de la ventilación por desplazamiento en estado permanente, producido en este caso por las cuatro fuentes de calor puntuales. Se observa que hay una buena correspondencia con el valor de la gravedad reducida de la pluma, calculada a la altura media de la habitación $H/2 = 6cm$ mediante la ecuación (3.14), es de $0.94 cm/s^2$, y este valor corresponde a una diferencia de temperatura con la habitación de $3.3^{\circ}C$.

En la figura 5.3, se presenta la altura de la interfase como función de los parámetros geométricos de la habitación, representado por la ecuación 3.21. Para este caso el área efectiva $A^* = cA$ donde $c=0.25$, (Linden et al., 1990). Se puede observar que la altura obtenida experimentalmente, siguiendo la metodología de (Linden et al., 1990), está por debajo de lo esperado teóricamente pero dentro del rango del grosor de la interfase con un valor teórico de $\xi=0.79$ y un valor experimental de $\xi=0.73$.

A partir del campo de velocidades, figura 5.4a se puede inferir que hay un ascenso de la interfase en la zona frontal, entre la ventana y las plumas térmicas, producido por el flujo entrante que se incorpora al flujo de las plumas. En la habitación el flujo de la pluma no fue completamente vertical dado que en el experimento el orificio de la pluma central quedó ligeramente girado del centro.

En la figura 5.4a, se pueden observar los campos de velocidades, existen dos flujos de entrada; en la parte inferior de la ventana y el fluido de la inyección de la pluma. Existe un flujo de salida en la parte superior de la ventana. Y dos zonas de recirculación en la cara opuesta a la ventana.

La remoción de aerosoles se representa en la figura 5.4b. Se observa que las regiones con mayor transporte de bioaerosoles están en el flujo entrante y en la pluma térmica. El transporte se da en menor grado en el flujo saliente y en las áreas de recirculación, con porcentaje de remoción de 66%. Las zonas de estancamiento se encuentran, una en la esquina que forma la pared de la ventana y el piso y otras dos en las inmediaciones de la pluma. La magnitud de la velocidad de flujo a la salida de la ventana concuerda con lo previsto por la ecuación (3.9), con $g'=0.99cm/s^2$ y $d=4$, $v=1.98 cm/s$.

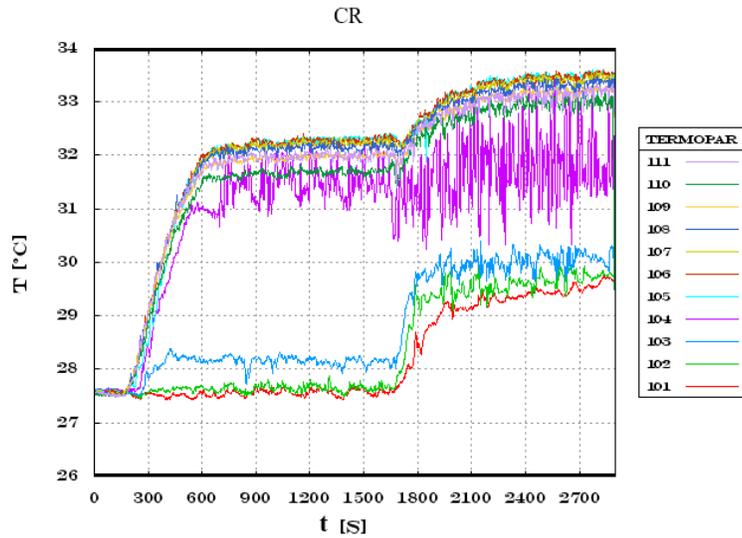


Figura 5.1: Temperatura al interior del modelo. El cambio radical de temperatura marca el final del efecto térmico y el inicio del efecto térmico combinado con el viento para el caso de referencia.

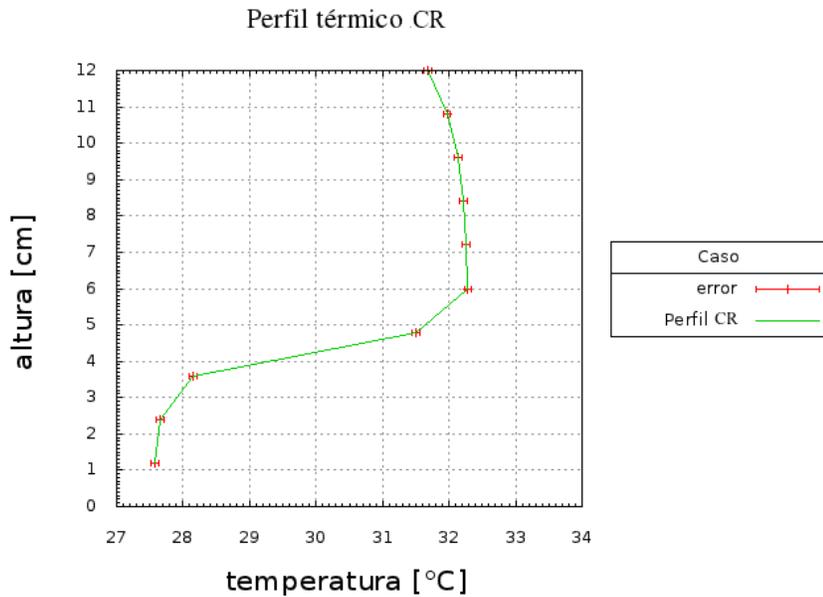


Figura 5.2: Perfil de la temperatura para el efecto térmico sin viento en el caso de referencia para el estado estacionario. En el estrato superior se observa cierto decremento de la temperatura probablemente asociado a una pérdida de calor por el conector metálico donde se sujeta la columna de termopares.

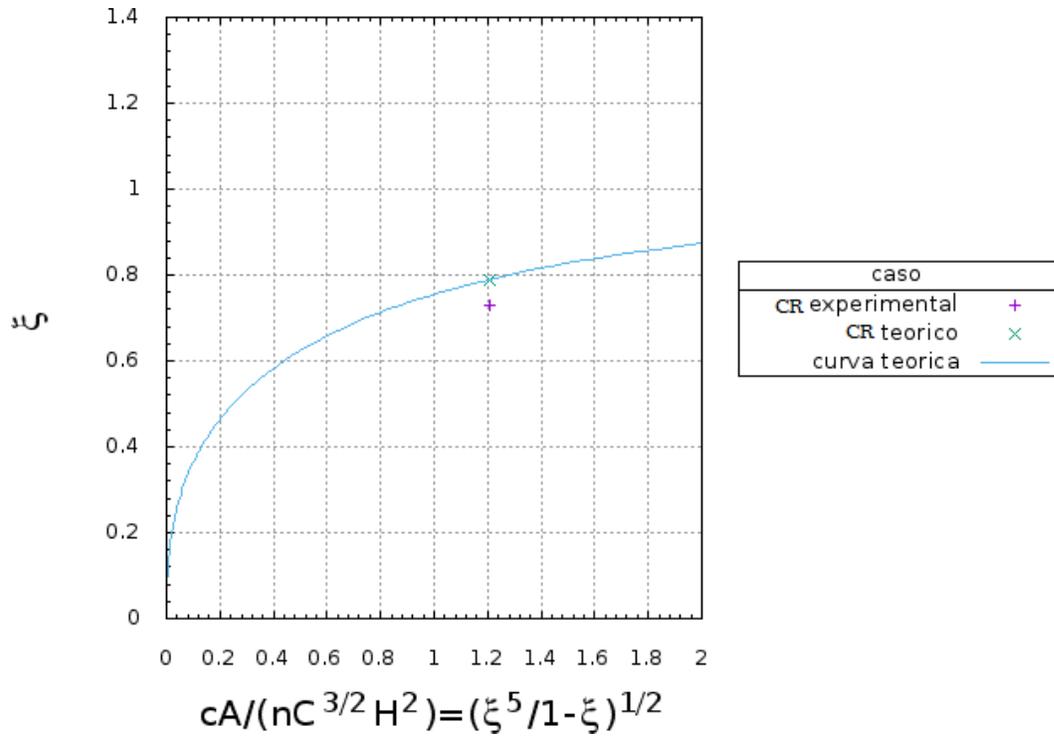
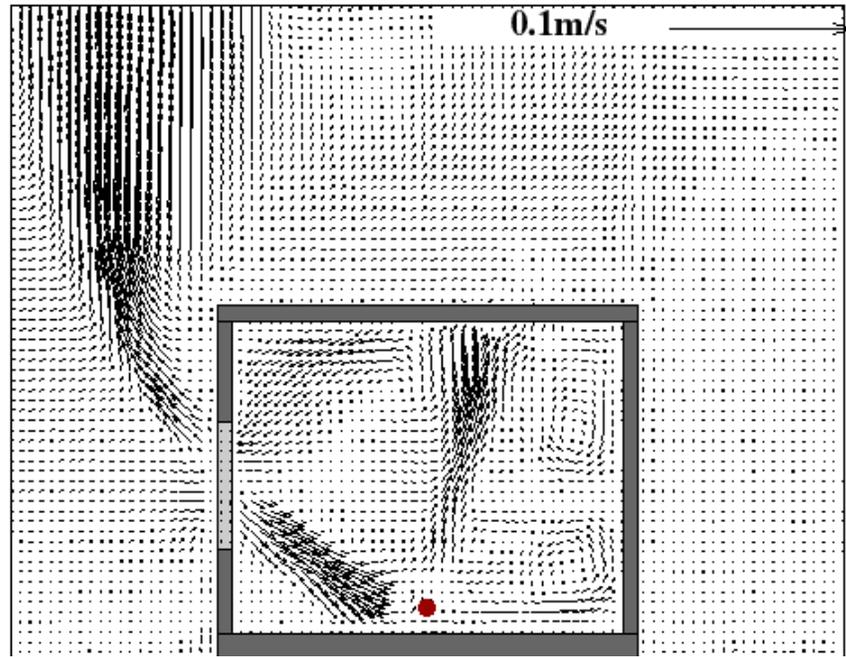
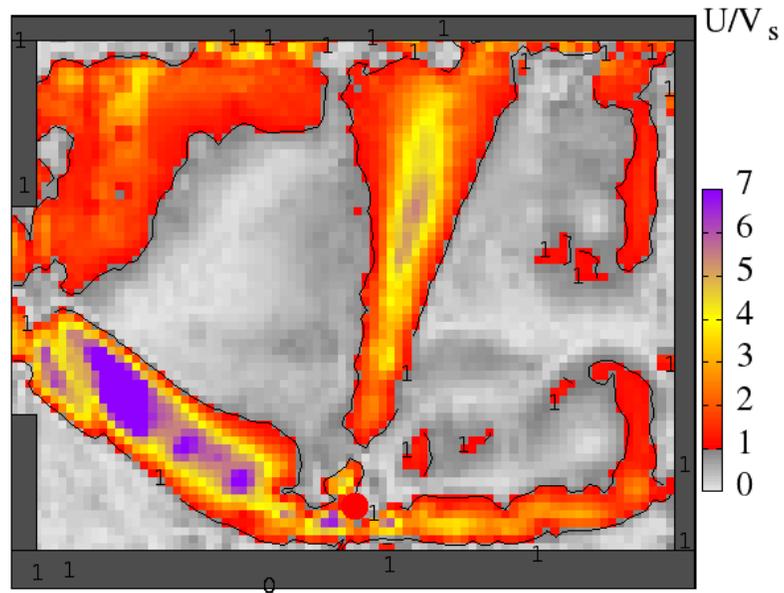


Figura 5.3: Interfase teórica y experimental del caso de referencia CR, sin viento. En este caso se utilizó la altura del centro de la ventana con respecto al piso $h_w = 6$ para normalizar las variables.



(a) CR



(b) CR

Figura 5.4: Campos vectoriales de velocidades y zonas de estancamiento para el caso de referencia CR.

5.1.2. Casos con ventilas superiores T1 y T3

En los casos con ventilas superiores (T1 y T3), en la figura 5.5a y b, también se observa un aumento transitorio de la temperatura en el seno del fluido, entre los 180 s y 400 s, relacionado con el llenado de caja interrumpido y el establecimiento de los flujos estacionarios.

Para el caso T1 se observa temporalmente un aumento adicional de la temperatura, por arriba de la temperatura del estado permanente, conocido como *overshoot*. Esta oscilación de la temperatura está relacionada con el retraso que tiene el proceso de drenado con respecto al proceso de llenado de caja, reportado por (Kaye and Hunt, 2004). La temperatura promedio del estrato superior es de 31.2°C y la del estrato inferior es la temperatura ambiente o temperatura inicial de 27.5°C . La altura de la interfase se encuentra en $y=6.1$ cm o bien $\xi = 0,02$, este resultado esta por arriba del valor teórico $\xi = -0.2$ figura 5.7a. Esto último se explica en función de que en el modelo teórico no se toma en cuenta la formación de un flujo bidireccional a través de la ventana que impide que el frente térmico descienda hasta el nivel predicho por la teoría. La altura de la interfase para este caso aún se puede estimar, pues este valor se aproxima con el modelo del bien mezclado, ecuación (3.15).

Para el caso T3 la temperatura del estado permanente es muy fluctuante y es la menor de todos los casos (30.1°C para el estrato superior), y no se presenta *overshoot*, lo cual se puede explicar en función de la dinámica del flujo desarrollada para este caso. Experimentalmente la altura promedio de la interfase se encuentra en $y = 6$ cm ($\xi = 0$), que está por debajo del valor teórico de $\xi = 0.25$ figura 5.7a. En este caso la flotación térmica produce el flujo de ventilación por desplazamiento más eficiente por tener las ventilas a mayor altura y un área efectiva más grande. Teóricamente estas condiciones propician que la interfase se establezca a mayor altura $y=7.25$ cm ($\xi = 0.25$) y se genere un flujo volumétrico mayor, el cual a su vez desplaza la masa cálida hacia afuera a una razón mayor, y hace que se tenga una menor temperatura en el estrato superior.

En la figura 5.8a y c, los flujos son muy similares al caso de referencia CR, pero el flujo de salida en las ventilas superiores genera una mayor remoción de aire que en el caso CR, además para T3 el flujo deja de ser bidireccional.

La remoción de bioaerosoles para el caso T1 se presenta en la figura 5.8b. Los bioaerosoles son transportados constantemente en el área en la entrada de fluido y en la pluma térmica, y en las esquinas superiores, debido a recirculaciones y a la salida de flujo. Las mayores zonas de estancamiento se encuentran en el área entre la pluma y ambas paredes a la altura de la interfase y en la esquina inferior debajo de la ventana. Para el caso T3, figura 5.8d, las zonas de estancamiento y de remoción son semejantes a T1 con la diferencia de que en T3 hay mayor flujo proveniente de la ventana, existe un estancamiento por encima de la ventana y la zona de la pluma tiene una mayor recirculación.

5.1.3. Casos con ventilas inferiores B1 y B3

El caso B1 presenta un *overshoot*, al igual que en el caso T1. La temperatura promedio del estrato superior es 32.5°C , y su diferencia con el estrato inferior es de 4.5°C segunda más alta de los casos, es muy semejante al caso de referencia. La altura promedio de la interfase es de $y=4.4\text{cm}$ ($\xi = 0.68$), y el valor experimental $y=6.0\text{cm}$ ($\xi = 1.0$) resulta por encima del teórico. La razón del porque la altura de interfase experimental resulta por encima de la teórica puede ser debida al flujo bidireccional a través de la ventana. Que asemeja al caso CR con $\xi = 0.79$, en cuyo caso el flujo a través de la ventila inferior causa una elevación en la interfase. El modelo teórico falla cuando la interfase queda por encima de la parte inferior de la ventana y ahí se forma el flujo bidireccional. Nuevamente este valor se aproxima con el modelo del bien mezclado usado en el caso de referencia CR.

El caso B3 tampoco es un caso de ventilación por desplazamiento dado que también presenta un flujo bidireccional en la ventana. La temperatura presenta fluctuaciones mínimas, y sin *overshoot*, la temperatura en el estrato superior es la más alta de los cuatro casos con 32.7°C . La altura teórica de la interfase se encuentra en $y=5.45\text{cm}$ ($\xi = 0.89$), que esta por arriba del valor experimental figura 5.7b. Experimentalmente la interfase se encuentra en $y=3.8\text{cm}$ ($\xi = 0.56$), figura 5.9a y c.

En el campo de velocidades figura 5.9a y c, se tiene un flujo bidireccional, con las entradas de flujo en la pluma, y la parte inferior de la ventana. Y las salidas de flujo en la parte superior de la ventana y las ventilas inferiores de la habitación. Existe una gran zona de recirculación en la parte superior opuesta

a la ventana.

La remoción de aerosoles para el caso B1 se presenta en la figura 5.9b. En este existe una gran recirculación, la cual repercute en las áreas de remoción, las principales zonas donde se transportan los bioaerosoles están en la entrada de fluido, la pluma térmica, la recirculación en ambas esquinas superiores (sobre todo en la esquina de la ventana). Las zonas de estancamiento se encuentran en el área entre la pluma y ambas paredes a la altura de la interfase, en la esquina debajo de la ventana y una pequeña zona en el cuadrante superior opuesto a la ventana. Para el caso B3, figura 5.9d, se presenta la misma tendencia pero con velocidades mayores en la entrada de fluido (ventila inferior) y en la salida del mismo.

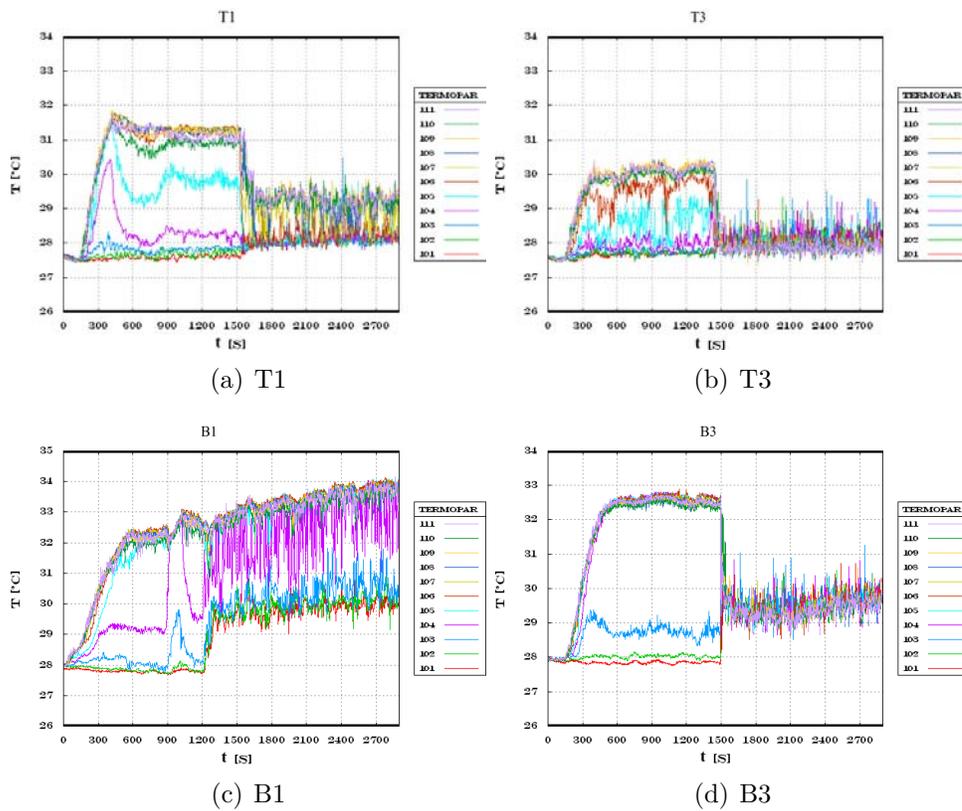


Figura 5.5: Evolución de la temperatura para los casos de estudio

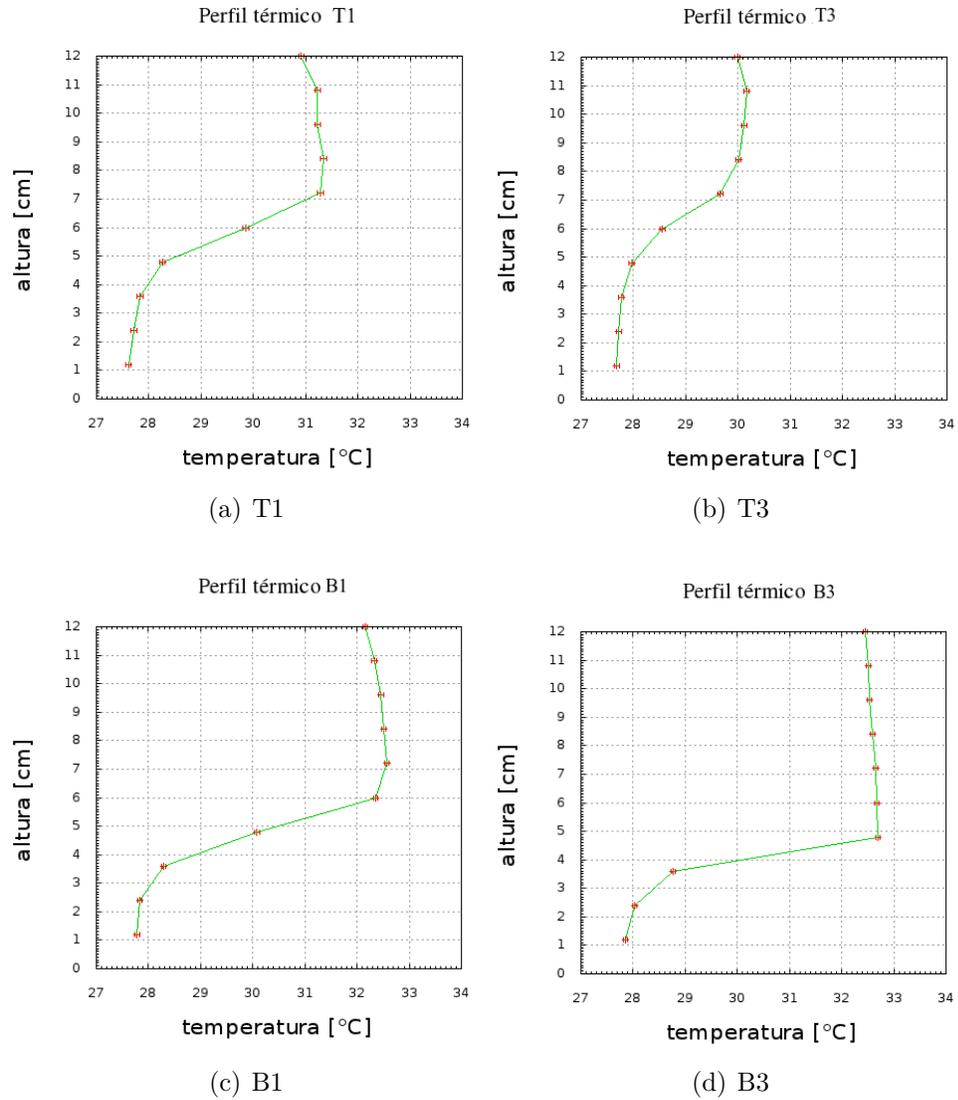


Figura 5.6: Estratificación térmica para los casos del efecto térmico sin viento tomados a partir de los 900 y hasta los 1200s.

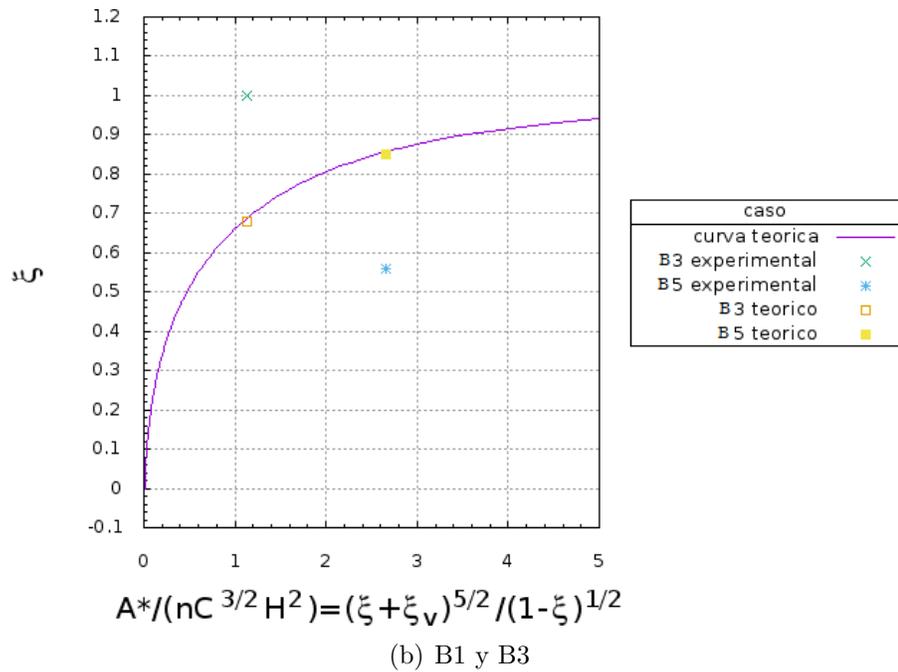
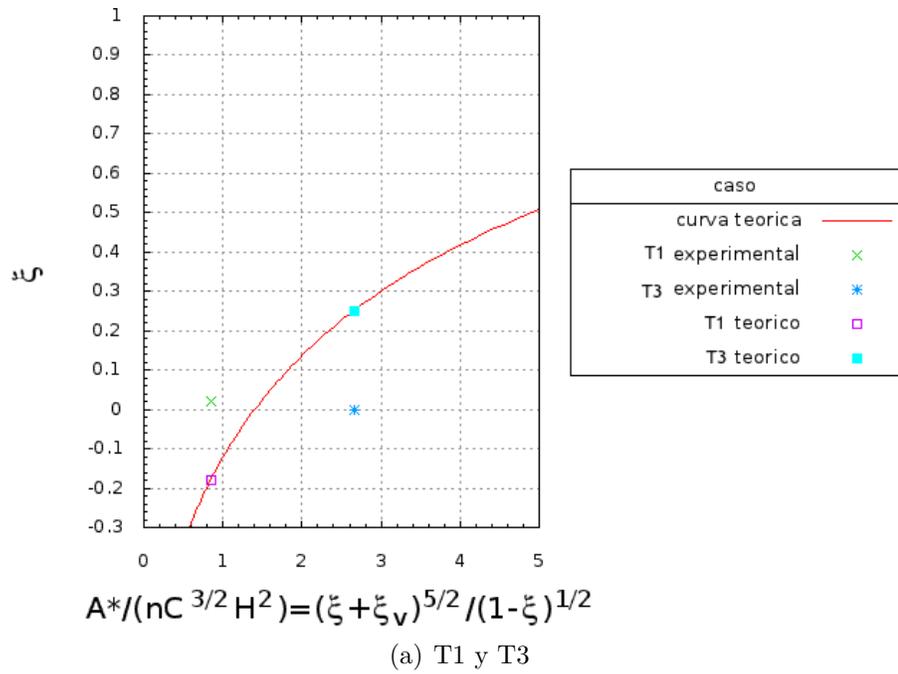


Figura 5.7: Altura de interfase experimental y teórica

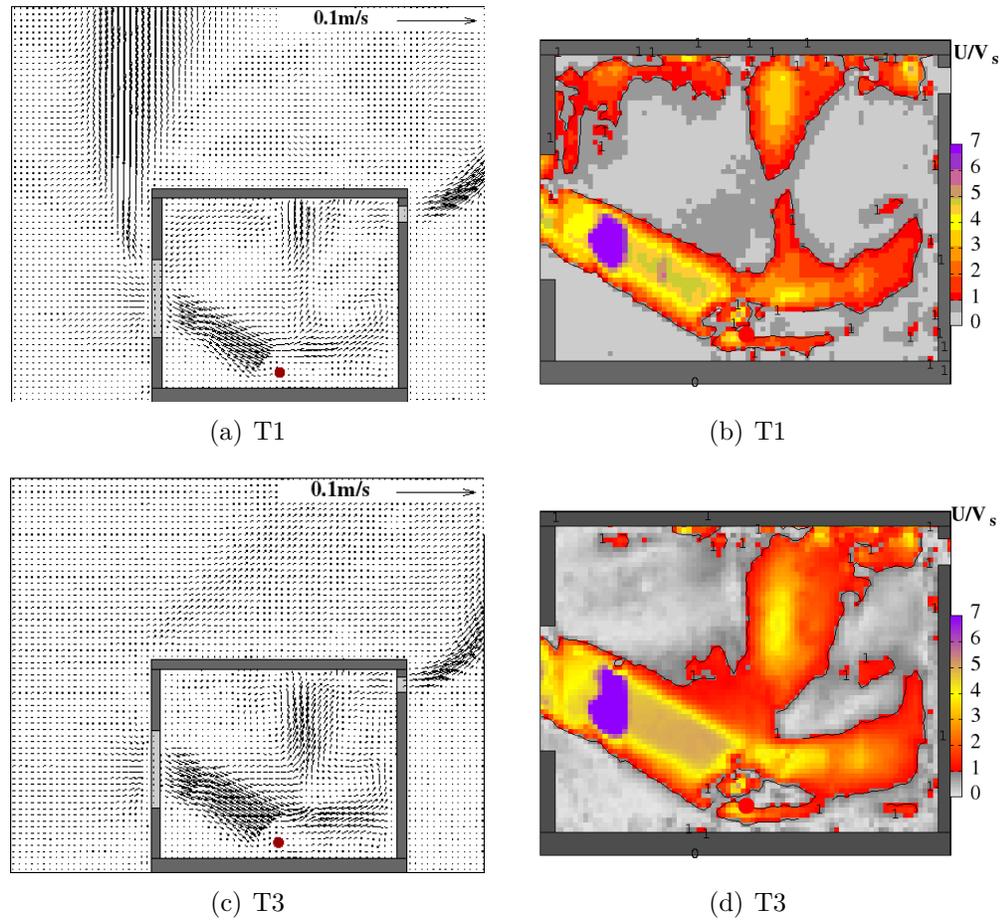


Figura 5.8: Campos de velocidad con efecto térmico sin viento, en zonas de remoción y estancamiento para los casos con ventilas superiores T1 y T3.

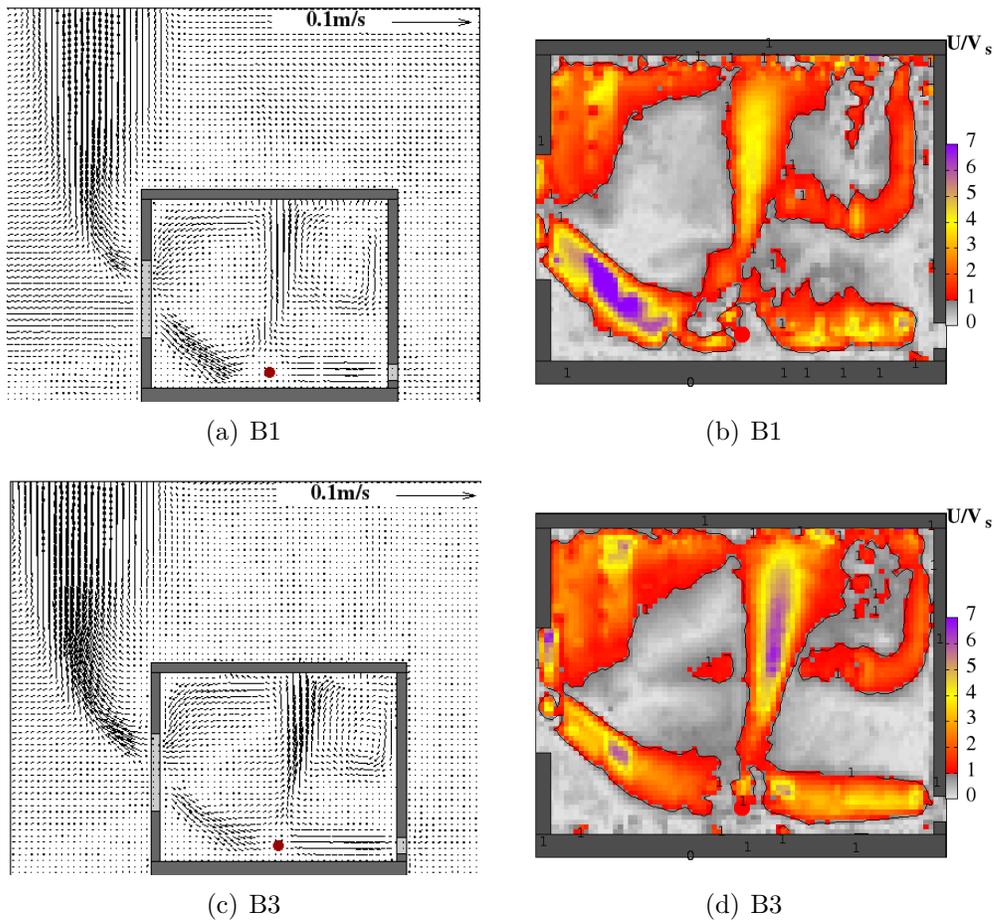


Figura 5.9: Campos de velocidad con efecto térmico sin viento, en zonas de remoción y estancamiento para los casos con ventilas superiores B1 y B3.

5.2. Efectos térmico y del viento

Para este trabajo se define a los efectos térmicos y del viento al producido por las cuatro plumas térmicas suministradas desde el suelo con la presencia del viento, que es simulado por el agua bombeada en canal.

5.2.1. Caso de referencia CR

La figura 5.1 tiene la evolución de las temperaturas para el caso de referencia obtenidas con la varilla de termopares al interior del modelo, el efecto térmico en la gráfica inicia en el segundo 1700 y dura hasta el segundo 2800 de haber iniciado la inyección de las plumas. Al introducir el flujo en el canal los termopares superiores e inferiores tienen un aumento brusco en la temperatura (más notorio en los termopares inferiores). Se establece un flujo de ventilación natural bidireccional en la ventana, en el cual el fluido cálido de la pluma sale por la parte superior de la ventana y el fluido frío del exterior entra por la parte inferior de la ventana, figura 5.11a.

Con base en la figura 5.10, se puede observar que existe una estratificación térmica de dos capas, con los termopares superiores registrando una temperatura máxima de $33.4^{\circ}C$ y en el estrato inferior una temperatura mínima de $29.4^{\circ}C$. Con la introducción de viento se esperaba una reducción de la temperatura en ambos estratos, pero los resultados indican un incremento en la temperatura con respecto a la ventilación térmica sin viento.

El aumento en la temperatura se puede explicar a partir del campo de velocidades figura 5.11a, donde el flujo a barlovento (ventana) es bidireccional. Hay una zona de recirculación en la parte superior a sotavento, que ocasiona una asimetría térmica del fluido. Además la conservación del flujo bidireccional del caso sin viento requiere de una mayor diferencia de temperatura en la habitación (flotación térmica), para contrarrestar la presión ejercida por el viento en la ventana.

La remoción de bioaerosoles se presenta en la figura 5.11b. El mayor transporte de bioaerosoles está en el flujo de la entrada, de salida, de la pluma y de recirculación. Las zonas de estancamiento se encuentran en el área entre la pluma y la pared a sotavento, entre la pluma y la pared a barlovento, y en la esquina inferior a barlovento.

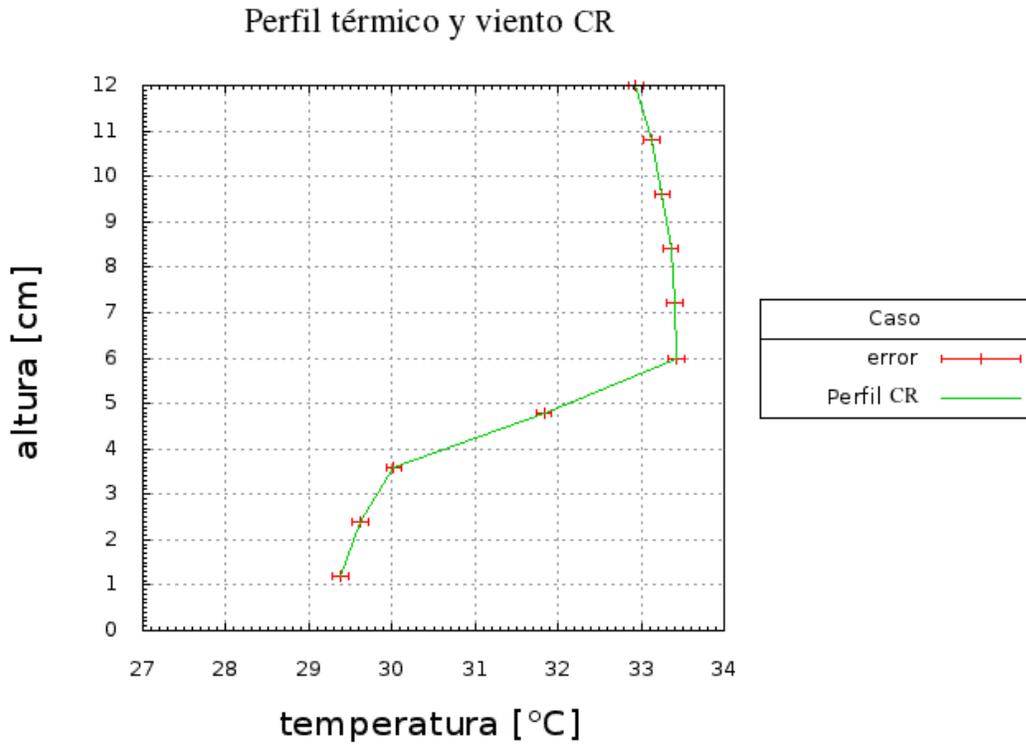
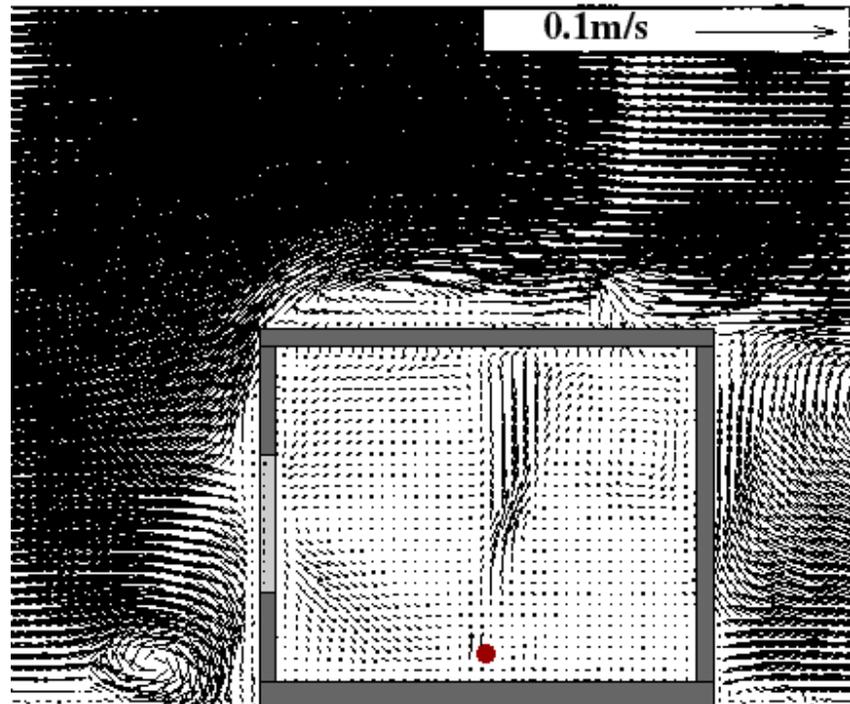
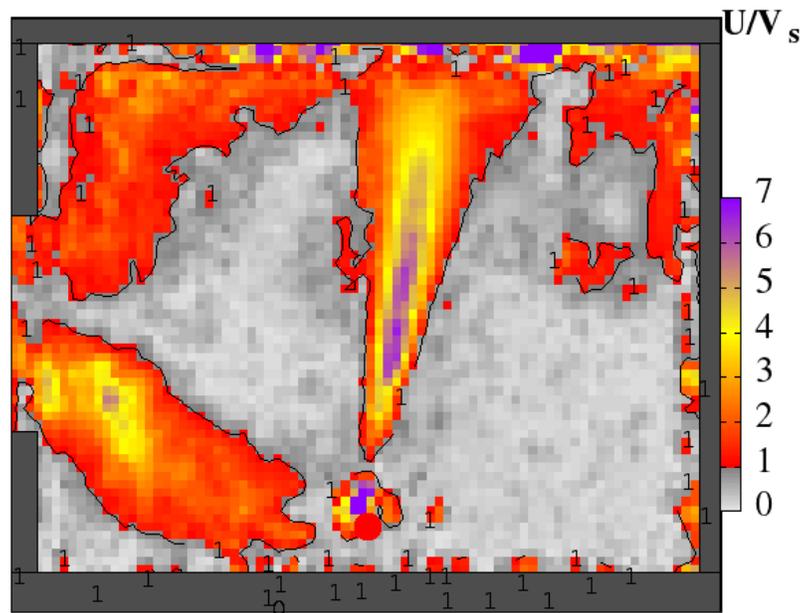


Figura 5.10: Perfil de la temperatura para el caso de referencia CR, efectos térmico y del viento.



(a) CR



(b) CR

Figura 5.11: Caso de referencia CR para campos vectoriales de velocidad y zonas de estancamiento en el efecto térmico y flujo de viento para el caso de referencia CR.

5.2.2. Casos con ventilas superiores T1 y T3

En T1 las temperaturas de los termopares superiores descienden y la temperatura de los termopares inferiores aumenta un poco, la temperatura en ambos estratos es muy fluctuante, y por momentos pareciera formarse un solo estrato. Con base en la figura 5.12a, es posible observar las dos capas débilmente estratificadas. En un tiempo aproximado de 1800 a 2400 s los termopares superiores registran una temperatura promedio de $29.3^{\circ}C$, y los termopares inferiores de $28.1^{\circ}C$. La disminución en la temperatura se puede explicar en base al campo de velocidades, figura 5.13a, donde se tiene una salida de flujo cálido en la ventila y una gran entrada de flujo frío en la ventana. La pluma térmica es desviada y direccionada hacia la salida debido a la entrada de fluido.

Para T3 la temperatura desciende considerablemente en los termopares superiores y en los termopares inferiores presenta un aumento mínimo. Los estratos pasan a formar uno solo. Con base en la figura 5.12b, es posible observar una débil estratificación térmica invertida aunque los termopares superiores registran una temperatura de $27.8^{\circ}C$, y los termopares inferiores una temperatura mínima de $28.2^{\circ}C$. Es posible explicar la disminución de la temperatura en base a la figura 5.13c, en la cual entra una gran cantidad de fluido frío por la ventana y se retira el fluido producido por la pluma a través de la ventila. De todos los casos estudiados, este caso es el que posee la mejor ventilación.

La remoción de bioaerosoles en el caso T1 se presenta en la figura 5.13b. El mayor transporte de bioaerosoles se da en el flujo de la entrada, en la pluma térmica y en el flujo de salida. Las zonas de estancamiento se encuentran en la esquina inferior a barlovento, en el cuadrante superior a barlovento y en el área entre la pluma y la pared a sotavento exceptuando la salida de flujo. En el caso T3, figura 5.13d, la ventilación es tan grande que se remueven prácticamente todas las partículas al interior de la habitación, las zonas de remoción son del 90%. Y las zonas de estancamiento se producen solo en la esquina superior e inferior de la pared a barlovento y en una pequeña zona de la parte superior poco antes de la salida del flujo.

5.2.3. Casos con ventilas inferiores B1 y B3

En B1 las temperaturas incrementan tanto para el estrato inferior como para el superior, figura 5.5, con respecto a la temperatura en el efecto térmico. Con base en la figura 5.12c, es posible observar las dos capas estratificadas. Los termopares superiores registran una temperatura de $33.7^{\circ}C$, los termopares inferiores una temperatura de $29.8^{\circ}C$. El aumento de la temperatura se explica mediante el campo de velocidades, figura 5.13c, en donde se aprecia la entrada de fluido frío por la ventana y la salida de fluido por la ventila, a diferencia de lo visto para el mismo caso sin viento el fluido escapa por la ventila en lugar de entrar por ella. El fluido de la pluma no tiene mucha interacción con el fluido entrante. Existen dos zonas de recirculación una en la parte superior a barlovento y otra en la parte superior a sotavento.

El caso B1 ya no es parecido al caso de referencia debido a que se rompe el patrón de cuando solo se tiene el efecto térmico, el flujo bidireccional a través de la ventana se cancela, sin embargo al tener un área efectiva limitada hay una mayor acumulación de calor en este nuevo régimen, dando como resultado mayores temperaturas en el estrato superior.

Con respecto a la temperatura en el efecto térmico, en el caso B3, desciende considerablemente en los termopares superiores pero en los termopares inferiores presenta un aumento. Los estratos superior e inferior pasan a formar un solo estrato con bastantes fluctuaciones en su temperatura. En la figura 5.12b, es posible observar que no existen capas estratificadas y que la temperatura se encuentra en un rango de $29.3^{\circ}C$ a $29.8^{\circ}C$. Este comportamiento se explica en la figura 5.14c, en donde entra una gran cantidad de fluido frío por la ventana y es retirado por la ventila inferior, cuando el fluido entra en la habitación la pluma es destruida. El fluido entrante que no alcanza a salir por la ventila choca contra la pared a sotavento y forma una gran área de recirculación en la parte superior.

La remoción de bioaerosoles en el caso B1 se presenta en la figura 5.14b, con poco aumento en el área total de remoción (71 %). El mayor transporte de bioaerosoles se da en el flujo de la entrada, en la pluma térmica, en el flujo de salida de la ventila y en las recirculaciones de las esquinas superiores. Las zonas de estancamiento se encuentran en la esquina inferior a barlovento y a los lados de la pluma a la altura de la ventana. En el caso B3, figura 5.14d, la

remoción de partículas es tan grande (89%), que únicamente es comparable con el caso T3. Las zonas de estancamiento son mínimas y se producen en la esquina superior e inferior de la pared a barlovento, existe una pequeña área de estancamiento rodeada por una zona de recirculación en la parte superior central.

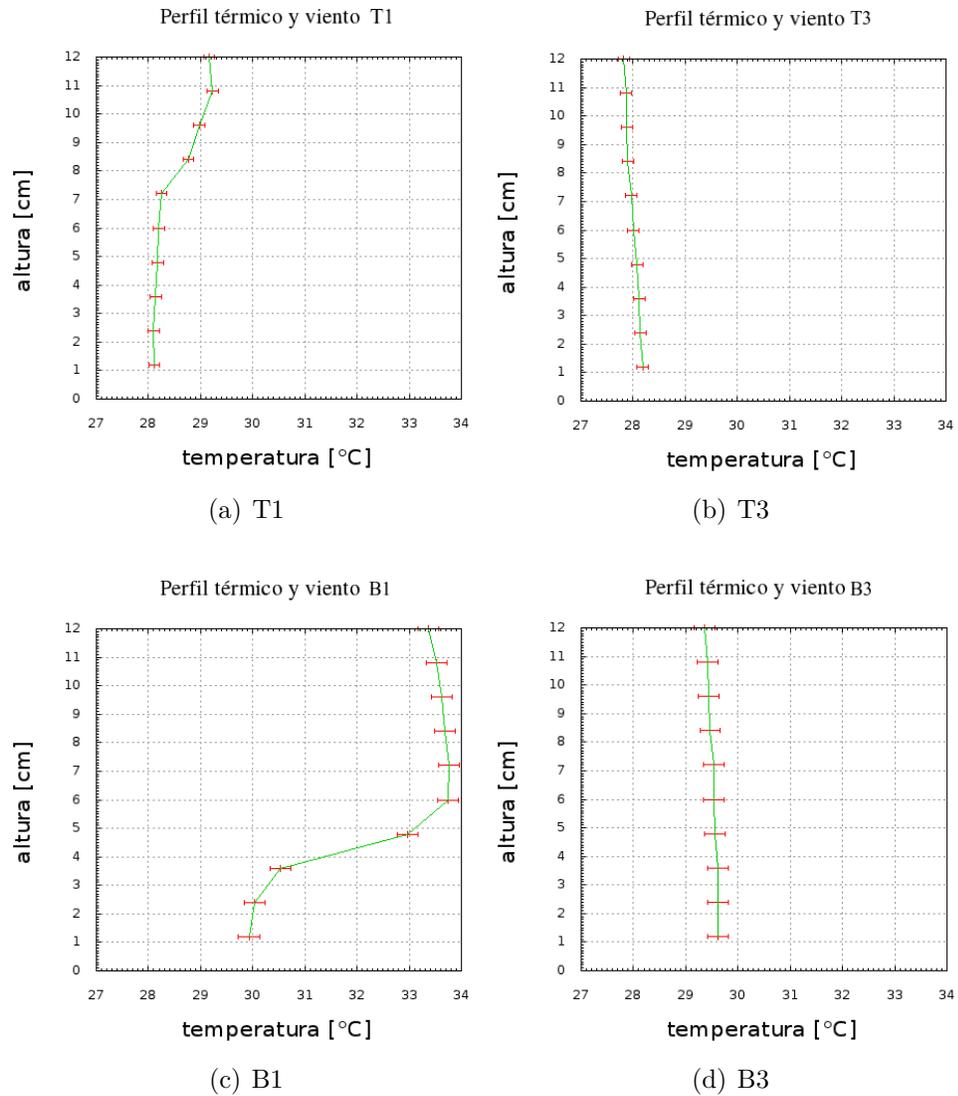


Figura 5.12: Frentes térmicos para los casos del efecto térmico y del viento tomados a partir de los 1800 y hasta los 2400s.

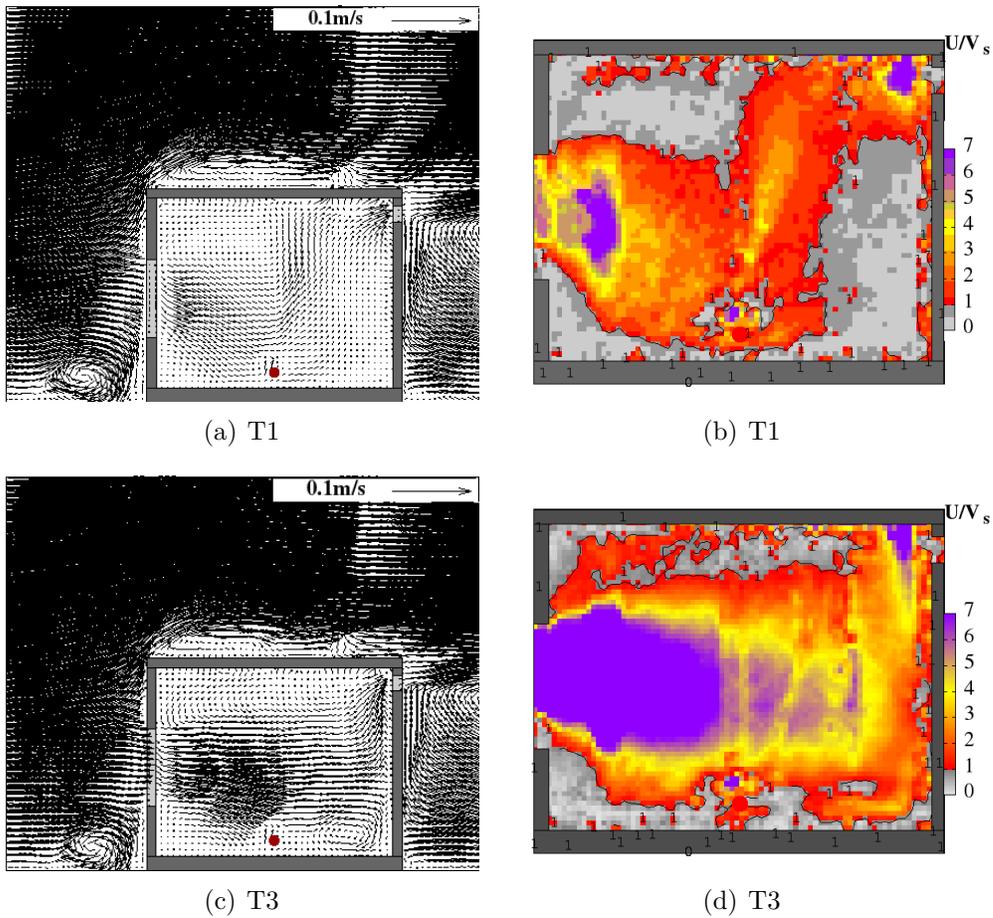


Figura 5.13: Campos vectoriales de velocidad y zonas de estancamiento en los bioaerosoles para los casos con ventilas superiores con los efectos térmico y del viento.

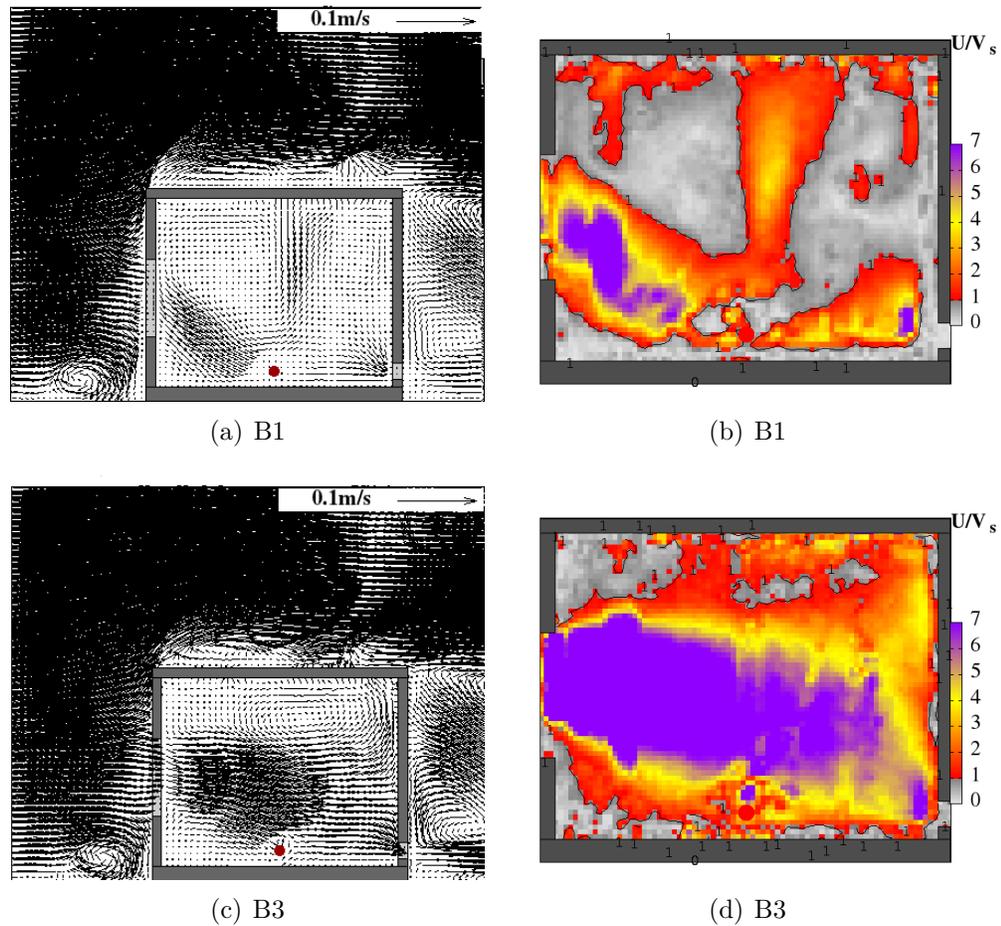


Figura 5.14: Campos vectoriales de velocidades y zonas de estancamiento en los bioaerosoles para los casos con ventilas inferiores con los efectos térmico y del viento.

5.3. Discusiones

Los resultados de los casos de ventilación por efecto térmico se presentan de manera resumida en el cuadro 5.1, y los de ventilación por efectos térmico y del viento en el cuadro 5.2. Se ordenaron considerando el caso base como el peor caso en cuanto a diferencia de temperatura con el exterior y porcentaje de área de remoción de microorganismos, en el entendido que en el mejor caso se tiene la menor diferencia de temperatura y la mayor área de remoción. Además

se comparan las diferencias térmicas de todos los casos en la figura 5.15.

En la ventilación por efecto térmico, al abrir una ventila en la parte inferior del muro se genera un flujo de entrada a través de esta. Si la ventila es relativamente pequeña (caso B1) se mantiene prácticamente el mismo flujo del caso base, con una pequeña reducción en la temperatura ($3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), y manteniéndose el mismo porcentaje del área de remoción (66 %). Al abrir las tres ventilas inferiores aumenta el flujo volumétrico total que entra a través de ellas. Esto ocasiona que disminuya el flujo de entrada a través de la ventana y aumente el flujo de salida a través de la misma. La zona de remoción aumenta de 66 % a 73 % pero la diferencia de temperatura con el exterior es la misma ($3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Al abrir una ventila superior y permitir un flujo de salida a través de ésta, ocasiona a su vez que se reduzca el flujo de salida a través de la ventana y que aumente el flujo de entrada a través de la misma. El nivel de la interfase asciende un poco con la consecuente disminución de la diferencia de temperatura con el ambiente ($2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Finalmente al abrir las tres ventilas superiores (caso T3), por éstas se establece todo el flujo de salida, se anula el flujo de salida a través de la ventana y se establece un flujo unidireccional de entrada a través de ellas. El nivel de la interfase se eleva un poco más y se obtiene la menor diferencia de temperatura ($1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quedando como el mejor de los casos en la ventilación por efecto térmico sin viento.

Cuadro 5.1: Comparación entre los casos de estudio con el efecto térmico.

Caso	Zonas de remoción	Destrucción de la pluma	Diferencia térmica	Interfase experimental ξ	Flujo de la ventana
CR	66 %	no	3.40	0.73	bidireccional
B1	66 %	no	3.03	0.68	bidireccional
B3	73 %	no	3.50	0.56	bidireccional
T1	68 %	no	2.40	0.02	bidireccional
T3	72 %	no	1.80	0	unidireccional

En la ventilación por efectos térmico y del viento, cuando se abre una ventila en la parte inferior del muro (caso B1), la temperatura y flujo al interior de la habitación son muy similares al caso de referencia con 4.6°C y 76 % de área de remoción. Al abrir una ventila en la parte superior (T1), aumenta el flujo volumétrico total que entra a por la ventana, la zona de remoción aumenta de

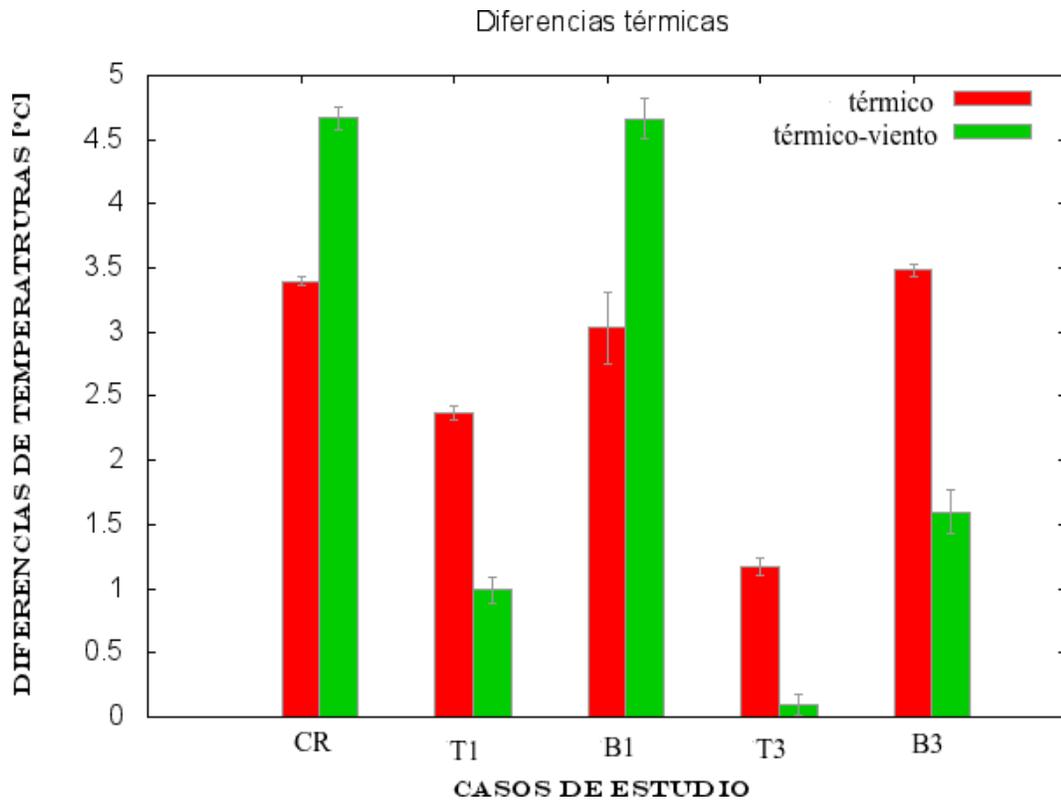


Figura 5.15: Diferencias de temperaturas promedio en el modelo con respecto a la temperatura ambiente

71 % a 78 %, pero la diferencia de temperatura con el exterior (1°C), se reduce bastante en comparación con el caso de referencia (4.67°C). Al abrir todas las ventilas inferiores (B3), el flujo ocasionado por el viento es tan grande que la pluma es destruida, como consecuencia la temperatura es 1.6°C y el área de remoción de 89 %. Finalmente al abrir las tres ventilas superiores (caso T3), por éstas se establece todo el flujo de salida que se ve ayudado por el flujo de entrada a través de la ventana, nuevamente el flujo ocasionado por el viento inhibe la pluma, en este caso se presentaron los mejores resultados, con un área de remoción de 90 % y una diferefencia térmica con respecto al ambiente de 0.1°C .

Comparando los resultados obtenidos por efecto térmico y por efectos térmico y del viento, en general se tiene una mejora en el caso de estudio

Cuadro 5.2: Comparación entre los casos de estudio con el efecto térmico combinado con el viento.

Caso	Zonas de remoción	Destrucción de la pluma	Diferencia térmica	Flujo de la ventana
CR	67%	no	4.67	bidireccional
B1	71%	no	4.60	bidireccional
T1	78%	no	1	bidireccional
B3	89%	si	1.6	bidireccional
T3	92%	si	0.10	unidireccional

cuando se tiene la acción del viento, tanto para la remoción de microorganismos como para la reducción de temperatura. En los casos donde se encontró la mayor diferencia fue en los de ventilas superiores (T1 y T3), donde ocurre una ventilación por efecto térmico asistida por el viento. Sin embargo cuando se tiene la acción del viento pero el área de salida es muy reducida y la ventila esta en la parte inferior (caso B1) la temperatura incrementa con respecto a su homólogo sin viento, esto es debido a que el viento entrante por la ventana no permite una buena salida de la pluma térmica generada en la habitación. El caso de referencia se mantiene similar en ambos efectos, solo tiene un pequeño aumento en su temperatura de 3.4°C por efecto térmico a 4.67°C por efectos térmico y del viento.

De acuerdo con los resultados todos los casos y para ambos efectos estudiados los lugares con mayor concentración de bioaerosoles y por tanto los lugares al interior de la habitación con mayor probabilidad de causar alguna enfermedad respiratoria, están en las esquinas inferiores de la ventana. Así mismo los casos con mayor remoción de bioaerosoles se presentan cuando mayor es el área en las ventilas. En el efecto térmico las zonas de estancamiento de bioaerosoles son similares, esquinas y área de la interfase en ambos extremos de la pluma. Con la adición del viento las zonas de estancamiento para todos los casos se presentan en las esquinas inferiores a barlovento, para los casos con una sola ventila el estancamiento de bioaerosoles también se presenta de la interfase a sotavento, de la ventila hacia el piso (T1), y de la interfase a sotavento, hacia el techo (B1). Con el efecto del viento en T3 y B3 domina el régimen del viento y solo existe estancamiento en las esquinas a barlovento y en una pequeña área en el techo.

A pesar de tener una remoción constante en los casos estudiados, existe un riesgo de infección importante ya que gran parte de las zonas de estancamiento se encuentran en un área a la que el ser humano se ve afectado, es decir una altura media de la habitación donde sus vías respiratorias están en contacto con los bioaerosoles, en los casos de las ventilas superiores existe mayor exposición para quienes tengan sus vías respiratorias a una altura menor, por una parte debido a la sedimentación de microorganismos y por otra a la poca remoción del estrato inferior. Sin embargo los casos con las tres ventilas y el efecto del viento tienen una óptima remoción de microorganismos por lo que un riesgo de infección es mucho más bajo comparado con los demás casos.

Conclusiones

*Una persona no puede ganar nada sin perder nada, para ganar algo necesitas algo del mismo valor.
Hermanos Elric.*

Esta tesis trata sobre la ventilación natural por efectos térmicos y por efectos térmicos combinados con efectos del viento, y sobre las zonas de estancamiento y remoción de bioaerosoles en una habitación. Se trabajó con un modelo a escala en el que se evaluaron cuatro casos, variando la posición y número de ventilas traseras. Al modelo se le instaló un sistema de generación de plumas térmicas para producir cuatro plumas turbulentas cálidas, un sistema de medición de temperaturas para registrar las temperaturas a lo largo del experimento, y un sistema de medición de velocimetría por imágenes de partículas.

El modelo experimental consistía en una habitación a escala 1:20, con una ventana frontal siempre abierta, y ventilas en la parte posterior que se podían abrir o cerrar. En el modelo se variaba la posición y número de ventilas traseras, para los casos con ventilas superiores se asignó la letra "T" (*Top*) y la letra "B" (*bottom*) para los casos con ventilas inferiores. El número de ventilas

abiertas fue de uno y tres, de ese modo se tenían los casos T1, T3, B1 y B3. Adicionalmente se estudió un caso con la ventana abierta y todas las ventilas cerradas, y se asignó como caso de referencia CR

Para los experimentos el modelo era sumergido en un canal de agua abierto llenado al límite de operación. Los experimentos iniciaban con la medición y adquisición de temperaturas a intervalos de 2 s, a lo largo de los experimentos que tenían una duración aproximada de 50 minutos, y con el sistema esteoscópico de velocimetría por imágenes de partículas (SPIV) se tomaban 100 campos de velocidades cada 10 s al alcanzarse el estado estacionario. Posterior a la adquisición de los campos de velocidades se iniciaba el flujo en el canal de agua mediante el encendido de una bomba, esto con el fin de simular una capa límite atmosférica, y al alcanzar un nuevo estado estacionario se tomaban otros 100 campos de velocidades con el SPIV.

Los flujos de ventilación natural originada por las diferencias de temperatura sin la acción del viento, indican que la mayor ventilación se obtiene con la ubicación vertical de las ventilas con respecto a la ventana, y en menor medida por el área de las aberturas de las ventilas. El nivel de la interfase asciende y con ello disminuye la temperatura del estrato superior, y de la habitación en general. En cuanto al arrastre de bioaerosoles, es mejor cuando el área en las ventilas es mayor (T3 y B3), ya que los resultados no parecen mostrar mejora según la posición de la altura de la ventila.

Los flujos de ventilación natural por efectos térmico y del viento, indican que la mayoría de los casos presentan mejoras en el área de remoción y en la reducción de temperatura en comparación a los casos sin efecto del viento, salvo por CR y B1. Nuevamente los mejores resultados térmicos se obtienen con las ventilas superiores ($\Delta T1=1^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T3=0.1^{\circ}\text{C}$), donde la ventilación por efecto térmico se ve ayudada por la ventilación cruzada, además se elimina el flujo bidireccional que se tenía a través de la ventana, para el caso B3 domina el régimen del viento, y para el caso B1, contrario a lo esperado la temperatura es equiparable al caso de referencia e incluso incrementa a su temperatura sin el efecto del viento, esto debido a la poca interacción entre la pluma y el flujo entrante. En cuanto a la remoción de bioaerosoles otra vez, el factor de importancia es el área de la ventila (T3 y B3), teniendo hasta un 90% en remoción de contaminantes biológicos. No obstante para el caso de referencia CR el área de remoción se mantiene igual.

Cabe destacar que cuando se tiene el efecto térmico y el efecto del viento, la mejora que llega a existir se debe a la acción conjunta de la ventilación por efecto térmico y la ventilación cruzada.

A pesar de que los mejores resultados en reducción de temperatura se obtienen en casos con ventilas superiores, para la remoción de bioaerosoles no siempre será lo más idóneo, puesto que las zonas de estancamiento se encontrarán en zonas donde es más fácil la interacción con las vías respiratorias. Los casos con ventilas inferiores parecen tener mejores resultados para la remoción de bioaerosoles, debido a que las zonas de estancamiento tienen una reducción en el área media del cuarto y en la parte inferior. Lo que indica que el riesgo de infección con ventilas inferiores es un poco menor. Y para los casos particulares de B3 y T3 con la acción del efecto térmico en adición el efecto del viento, la remoción de organismos es constante por lo que el riesgo de infección es mucho menor al resto de los casos.

Anexos

7.1. Principales enfermedades transmitidas a través del aire	87
7.2. Recomendaciones y observaciones	89

7.1. Principales enfermedades transmitidas a través del aire

Cuadro 7.1: Tabla de enfermedades bacterianas adaptado de De La Rosa 2002.

Principales enfermedades transmitidas por el aire	
Principales enfermedades bacterianas	
Enfermedad	Especie
Amigdalitis, faringitis, bronquitis, escarlatina	<i>Streptococcus pyogenes</i>
Difteria	<i>Corynebacterium diphtheriae</i>
Neumonía clásica	<i>Streptococcus pneumoniae</i>
Neumonía atípica, bronquitis	<i>Mycoplasma pneumoniae</i>
Meningitis	<i>Neisseria meningitidis</i>
Tuberculosis	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>
Peste	<i>Yersinia pestis</i>

Cuadro 7.2: Tabla de principales enfermedades fúngicas adaptado de De La Rosa 2002.

Principales enfermedades transmitidas por el aire	
Principales enfermedades fúngicas	
Enfermedad	Género o especie
Neumonías	<i>Pneumocystis carinii</i>
Micosis sistémica	<i>Cryptococcus neoformans</i>
Hipersensibilidad	<i>Alternaria, Aspergillus, Penicillium, Cladosporium</i>
Micotoxicosis	<i>Aspergillus, Fusarium, Stachybotrys</i>

Cuadro 7.3: Tabla de principales enfermedades víricas adaptado de De La Rosa 2002.

Principales enfermedades transmitidas por el aire	
Principales enfermedades víricas	
Enfermedad	Género
Resfriado común	<i>Rhinovirus, Mastadenovirus</i>
Gripe	<i>Influenzavirus</i>
Bronquitis, Neumnia	<i>Pneumovirus, Mastadenovirus, Hantavirus</i>
Poliomielitis	<i>Enterovirus</i>
Viruela	<i>Orthopoxvirus</i>
Varicela	<i>Varicellovirus</i>
Rubiola	<i>Rubivirus</i>
Rabia	<i>ORotavirus</i>

7.2. Recomendaciones y observaciones

Con base en la experiencia de este trabajo se hacen algunas recomendaciones para futuros trabajos con la misma metodología o una metodología similar.

La temperatura en el baño térmico era de $90^{\circ}C$ pero se tenía una gran pérdida de calor, pues la temperatura registrada en el tubo de vidrio estaba muy por debajo de la del baño térmico, por ello se procedió a cubrir las mangueras con aislante térmico y reducir lo más que se pudo la distancia en las mangueras. Con estas mejoras aún se encontraba muy por debajo de la deseada pero se obtuvo una temperatura de inyección de $70^{\circ}C$.

El aislante térmico en la manguera daba una flotabilidad positiva al modelo, motivo por el cual se utilizaron dos imanes para poder fijarlo, en el caso del llenado de caja FB con aislante térmico además fue necesario colocar varios pesos encima del modelo.

En los primeros experimentos se notaron muchas burbujas, por lo cual fue necesario repetir los experimentos hasta que dejaron de presentarse las burbujas. Para evitar las burbujas se colocaron dos llaves: una cercana a la interfase de agua-aire que regulaba el flujo, y otra muy proxima a la llave anterior, esta llave servía como jarro de aire para ayudar a purgar las mangueras. Adicionalmente se tenían que purgar las mangueras para cada experimento.

Referencias

- Adrian, R. J. (2004). Twenty years of particle image velocimetry. Technical report, 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Department of Theoretical and Applied Mechanics University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C., Jessen, P., Li, Y., and S, W.-H. (2010). *Ventilación natural para el control de las infecciones en entornos de asistencia sanitaria*. Organización Mundial de la Salud; Organización Panamericana de la Salud, Washington.
- Awbi, H. (2003). *Ventilation of Buildings*. Spon Press, London.
- Bolster, D. T. and Linden, P. F. (2007). Contaminants in ventilated filling boxes. *Journal of Fluids Mechanics*, 591:97–116.
- Bolster, D. T. and Linden, P. F. (2008a). Particle transport in low-energy ventilation systems.part 1: theory of steady states. *Indoor Air*, 19(2):122–129.
- Bolster, D. T. and Linden, P. F. (2008b). Particle transport in low-energy ventilation systems.part 2: theory of steady states. *Indoor Air*, 19(2):130–144.
- Bordehore, C. (2001). Problemas ambientales, problemas humanos. *Sociología Ambiental*, pages 321–355.
- Castillo, J. A. T. (2011). Ventilación natural en habitaciones con techo y frío y generación de calor interna. Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma De México. Centro de Investigación en Energía.

- Cox, C. S. and Wathes, C. M. (1995). *Bioaerosols handbook*. Lewis Publishers, Florida.
- Cruz-Salas, M. V. (2014). Evaluación de sistemas pasivos de ventilación. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma De México. Instituto de Energías Renovables.
- Cruz-Salas, M. V., Castillo, J. A., and Huelsz, G. (2014). Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers. *Energy and Buildings*, 84:458–465.
- De La Rosa, M. C., Mosso, M. A., and C., U. (2002). El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. *Observatorio Medioambiental*, 5:375–402.
- Dowd, S. E., Gerba, C. P., Pepper, I. L., and Pillai, S. D. (2000). Bioaerosol transport modeling and risk assessment in relation to biosolid placement. *Journal of Environmental Quality*, 29:343–348.
- Dungan, R. S. (2010). Board-invited review: Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures. *journal of Animal Science*, 88:3693–3706.
- Economidou, M. and Hunt, G. R. (2010). Transient flows in enclosures: A generalised approach for modelling the effects of geometry, heat gains and wind. *Building and Environment*, 45:2607–2619.
- Ghiabaklou, Z. (2010). Natural ventilation as a design strategy for energy saving. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 4(11):260–265.
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building desing guidelines. *Energy and buildings*, 18(1):11–23.
- Gob.Morelos-SEMARNAT-CEAMA (2009). Programa para el mejoramiento de la calidad del aire de la zona metropolitana de cuernavaca. Technical report, Gobierno del estado de Morelos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente, Morelos, México.
- Hunt, G. R. and Kaye, N. B. (2006). Pollutant flushing with natural displacement ventilation. *Building and Environment*, 41:1190–1197.

- Hunt, G. R. and Linden, P. F. (1999). The fluid of natural ventilation-displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. *Building and Environment*, 34:707–720.
- Hunt, G. R. and Linden, P. F. (2001). Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *Journal of Fluids Mechanics*, 426:355–386.
- INEGI (2005). *Distribución porcentual del clima según clasificación para cada entidad federativa*. <http://www.inegi.org.mx/Default.aspx>.
- Iriarte, M. n. J. M. (2008). Velocimetría piv en tiempo real basada en lógica programable fpga. Technical report, Universidad Nacional De Cuyo. Proyecto integrador de la carrera de ingeniería nuclear.
- Joshi, S. M. (2008). The sick building syndrome. *Indian Journal Occupational & Environmental Medicine*, 12(2).
- Kaye, N. B. and Hunt, G. R. (2004). Time-dependent flows in an emptying filling box. *Journal of Fluids Mechanics*, 520:135–156.
- LaVision (2006). *Product-Manual for Davis 7.2. Imaging Tools*. LaVision GmbH, Göttingen.
- Lied, J. and Ahmed, N. (2011). *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution an Indoor Air Quality*. InTech.
- Linden, P. F. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31:201–238.
- Linden, P. F. and Kaye, N. B. (2006). Interacting turbulent plumes in a naturally ventilated enclosure. *International Journal of Ventilation*, 4(4):301–310.
- Linden, P. F., Lane-Serff, G. F., and Smeed, D. A. (1990). Emptying filling boxes : the fluid mechanics of natural ventilation. *Journal of Fluids Mechanics*, 212:309–335.
- Lishman, B. and Woods, A. W. (2006). The control of naturally ventilated buildings subject to wind and buoyancy. *Journal of Fluids Mechanics*, 557:451–471.

- Lishman, B. and Woods, A. W. (2009a). The effect of gradual changes in wind speed or heat load on natural ventilation in a thermally massive building. *Building and Environment*, 44:762–772.
- Lishman, B. and Woods, A. W. (2009b). On transitions in natural ventilation flow driven by changes in the wind. *Building an Environment*, 44:666–673.
- López, D. A. M. (2003). Diplomado: Acercamiento a criterios arquitectónicos ambientales para comunidades aisladas en áreas naturales protegidas en chiapas. Technical report, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutierrez, Chiapas.
- Marincic, I., Ochoa, J. M., Alpuche, G., Duarte, A., Vargas, L., González, I., Barrera, I., and Huelsz, G. (2011). La construcción actual de las viviendas en hermosillo y su adecuación al clima por medios pasivos. Technical report, XXXV Congreso Nacional de Energía Solar ANES. Dpto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora y Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendell, M. J., Fisk, W. J., Deddens, J. A., Seavey, W. G., Smith, A. H., Smith, D. F., Hodgson, A. T., Daisey, J. M., and R., G. L. (1996). Elevated symptom prevalence associated with ventilation type in office buildings. *Epidemiology*, 7:583–589.
- Mintz, D. (2006). Guideline for reporting of daily air quality –air quality index (aqi). Technical report, Environmental Protection Agency Research Triangle Park, North Carolina.
- Morton, B. R., Taylor, Geoffrey, T., and Turner, J. S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 234(1196):1–23.
- Mott, Robert L. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada. 4a Edición*. Pearson, México.
- NADF-009-aire (2006). Norma ambiental del distrito federal nadf-009-aire-2006. Technical report, Secretaria del Medio Ambiente Distrito Federal, Ciudad de México, México.

- Oropeza, I. P. (2008). Potencial estimado para el aprovechamiento de la ventilación natural para la climatización de edificios en México. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma De México. Instituto de Ingeniería.
- Partridge, J. L. and Linden, P. F. (2013). Validity of thermally-driven small-scale ventilated filling box models. *Experiments in Fluids*, 54(1613).
- Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. *Australian Meteorological Magazine*, 90:33–49.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Cayuela, M. L., and Stentiford, E. I. (2006). Emisión de bioaerosoles asociada a la gestión de residuos orgánicos. *Ingeniería*, 10(1):39–47.
- Starr, C. and Taggart, R. (2008). *Biología: La unidad y diversidad de la vida. Undécima Edición*. Thomson, México.
- Thomas, L. P., Marino, B. M., Tovar, R., and Linden, P. F. (2008). Buoyancy-driven flow between two rooms coupled by two openings at different levels. *Journal of Fluids Mechanics*, 594:425–443.
- Urika, I. and Urika, S. (2003). *Energía Renovable Práctica*. Pamiela, España.
- Vélez-Pereira, A. M. and Camargo, Y. C. (2008). Comportamiento aerodinámico y viabilidad de las partículas biológicas. *RE'TAKVN*, 1(1):44–56.