



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – DISEÑO BIOCLIMÁTICO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO SOBRE
VENTILACIÓN CRUZADA CON VENTANA E
INTERCAMBIADOR DE VIENTO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. DELMER GÓMEZ HELERIA

TUTOR:
DRA. GUADALUPE HUELSZ LESBROS
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES (IER-UNAM)

TEMIXCO, MORELOS - ENERO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jorge Antonio Rojas Menéndez

Secretario: Dr. Sergio Cuevas García

1^{er} Vocal: Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros

2^{do} Vocal: Dr. José Antonio Castillo Torres

3^{er} Vocal: Dr. Saúl Piedra González

Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros

FIRMA

Dedicatoria

Por regalarme vida y cumplir con esta meta.
Jehová Dios de los Ejércitos

A mi amado padre y su esposa,
quienes me brindaron su apoyo incondicional
Delmer Gómez González y Bernardina López

Por todas sus enseñanzas,
a mis asesores:
Guadalupe Huelsz Lesbros y José Antonio Castillo Torres

Agradecimientos

Por aceptarme como su alumno y por enseñarme con paciencia, a mis asesores de tesis: la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros y el Dr. José Antonio Castillo Torres.

Al Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) por permitirme aprender de la ciencia dentro de sus instalaciones y poder realizar esta investigación.

A los miembros de mi jurado: Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros, Dr. José Antonio Castillo Torres, Dr. Jorge Antonio Rojas Menéndez, Dr. Saúl Piedra González y Dr. Sergio Cuevas García, quienes ayudaron en gran manera con mi formación académica. Asimismo agradezco al Dr. Guillermo Barrios del Valle.

Al Ing. Héctor Daniel Cortés González por su contribución para terminar este trabajo con el mantenimiento y soporte del servidor, y también a el Dr. Maximiliano Valdez González por la instalación del programa ANSYS Fluent. Al encargado de biblioteca Carlos Alberto Ramírez Vázquez por facilitarme la búsqueda de artículos científicos.

A los amigos que me ayudaron moralmente y académicamente durante esta etapa en mi vida: Jacqueline Moctezuma Ortíz, Alba Y. Vázquez Velázquez, Leonardo F. Córdova Castillo, Marseyi Gutiérrez González, Gabriela González, David R. Domínguez Lozoya, Hilda B. Mota Nava, Luis E. Moreles Vázquez, Manuel A. Ramírez Cabrera, etc. A Isaías Moreno Cruz, Carlos A. López Villalobos, James Pérez Barrera y Rodrigo Cuevas por ayudarme con dudas de programación y mecánica de fluidos.

A CONACYT por apoyarme económicamente durante dos años con la beca 417409 y a PAPIIT-UNAM proyecto IN103816 por su apoyo con una beca para la conclusión de esta tesis y para la realización de los experimentos y simulaciones.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
Nomenclatura	XVII
Resumen	XIX
1. Introducción	1
2. Metodología experimental	9
2.1. Casos de estudio	9
2.2. Dispositivo experimental	11
2.2.1. Canal de agua	11
2.2.2. Maquetas	13
2.2.3. Velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica	13
2.2.3.1. Programas de análisis de datos	15
2.3. Similitudes	17
2.3.1. Similitud geométrica	17
2.3.2. Similitud cinemática	17
2.3.3. Similitud dinámica	21
3. Análisis de resultados experimentales	23
3.1. Flujo de ventilación	23
3.2. Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa	29
3.3. Índice de homogeneidad	33

4. Validación de simulaciones numéricas	37
4.1. Modelo numérico	37
4.2. Generación de perfiles tridimensionales	38
4.2.1. Dominio largo computacional	38
4.2.2. Condiciones de frontera	40
4.2.3. Análisis de convergencia	41
4.2.4. Perfiles tridimensionales	42
4.3. Caso de referencia	46
4.3.1. Dominio corto computacional	46
4.3.2. Condiciones de frontera	47
4.3.3. Análisis de convergencia	48
4.3.4. Gradientes en la dirección del flujo	50
4.3.5. Variación de parámetros de simulación	51
4.3.5.1. Modelos de turbulencia	51
4.3.5.2. Tamaño de malla	53
4.3.6. Índice de convergencia de malla	55
4.4. Validación	56
5. Análisis de resultados numéricos	59
5.1. Dominio extendido en escala real	59
5.1.1. Condiciones de frontera	60
5.1.2. Comprobación de convergencia	61
5.2. Evaluación de la ventilación natural	61
5.2.1. Flujo de ventilación	62
5.2.2. Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa	64
5.2.3. Índice de homogeneidad	65
5.2.4. Promedio de la magnitud de velocidad	67
6. Conclusiones	69
Anexos	72
A. Planos constructivos de los intercambiadores de viento	73
Referencias	79

Índice de figuras

1.1. Representación esquemática de presiones sobre un edificio, vista en planta. (Vásquez, 2012).	2
1.2. Representación esquemática de la (a) ventilación cruzada con dos aberturas, una a barlovento y otra a sotavento (Karava <i>et al.</i> , 2011); (b) ventilación cruzada con una abertura a sotavento cerca de un techo inclinado a 45° (Perén <i>et al.</i> , 2015a).	4
1.3. Casos de estudio usados por Bangalee <i>et al.</i> (2013): caso 1, aberturas centradas sobre los muros; caso 2, aberturas localizadas diagonalmente sobre los muros; caso 3, aberturas localizadas cerca de las esquinas de los muros; caso 4, cuatro aberturas.	4
1.4. Representación esquemática de la ventilación cruzada con abertura en muro barlovento y lateral (Karava <i>et al.</i> , 2011).	5
1.5. Representación esquemática de la ventilación cruzada con abertura en muro barlovento y abertura vertical a sotavento en techos sierras (Perén <i>et al.</i> , 2016).	6
1.6. (a) Seis configuraciones de WE utilizados por Cruz-Salas <i>et al.</i> (2014) y Castillo <i>et al.</i> (2017); (b) Modelo del cuarto con ventana a barlovento y uno de los WE Cruz-Salas <i>et al.</i> (2014).	6
2.1. (a) Vista frontal del modelo a escala de la habitación con ventana cuadrada, cotas en m (escala 1 : 25); (b) Vista frontal del modelo a escala de la habitación con ventana rectangular, cotas en m (escala 1 : 25); y (c) Configuración de WE con tres aberturas y un ducto. . .	10

2.2.	Las letras en azul muestran el valor de A_D/A_V respecto a la ventana cuadrada (C), las letras en negro muestran el valor de A_D/A_V respecto a la rectangular (R) y las letras en rojo muestran el nombre asignado a cada intercambiador de viento conforme incrementa el área del ducto del intercambiador de viento (WE).	11
2.3.	Componentes del canal de agua: (a) Representación esquemática del canal de agua, cotas en m; (b) Fotografía del canal; (c) Rampa y reservorio de desagüe; (d) Bomba; (e) Depósito de almacenamiento; (f) Cámara de acondicionamiento; y (g) Placas de policarbonato celular.	12
2.4.	(a) Fotografía de los cinco intercambiadores de viento; (b) Fotografía de la habitación con ventana cuadrada; (c) Fotografía de la habitación con ventana rectangular; y (d) Fotografía de la habitación con ventana cuadrada y WE (caso RA3).	13
2.5.	(a) Esquema de la hoja de la luz láser del SPIV, cotas en m; (b) Lente; (c) Espejo; (d) Fuente de luz láser; y (e) Equipo de adquisición y procesamiento de datos.	16
2.6.	Perfiles de velocidad el viento, tomado de Fernández Diez (2016)	19
2.7.	Esquema representativo del arreglo de obstáculos usados a lo largo del canal para generar el perfil de velocidades.	20
2.8.	Fotografía del arreglo de obstáculos usados a lo largo del canal para generar el perfil de velocidades.	20
2.9.	Perfiles verticales: (a) de velocidad axial ($u(y)$), se indica el promedio experimental de la componente axial de la velocidad con su desviación estándar, la línea azul es el ajuste a los datos experimentales para la ley exponencial de Hellman ($R^2 = 0.984$); y (b) de intensidad de turbulencia ($I(y)$).	21
3.1.	Vista isométrica del plano de medición, donde $h = 0.123$ m es la altura externa del modelo y $d = 0.132$ m es el ancho.	24
3.2.	Los vectores en rojo representan los vectores que se tomaron en cuenta para el cálculo de flujos de entrada y salida por la ventana y por el WE	25
3.3.	Flujo de ventilación (F) para los diez casos de estudio. Los números sobre las barras representan la relación de áreas A_D/A_V	26
3.4.	Flujo de ventilación (F) como función de (a) el área de ducto del WE (A_D) y (b) el área total de abertura del WE (A_O).	27
3.5.	Flujo de ventilación (F) como función de las relaciones de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	27

3.6.	Campos vectoriales de velocidad para los diez casos de estudio. La línea de color azul delimita la zona habitable.	30
3.7.	Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) para los diez casos de estudio, tomado de la Tabla 3.3. Los números sobre las barras representan la relación de áreas A_D/A_V	31
3.8.	Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) como función de (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).	32
3.9.	Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) como función de las relaciones de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	33
3.10.	Variación del índice de homogeneidad (I_h) de cada caso. Los números sobre las barras representan la relación de áreas A_D/A_V	34
3.11.	Índice de homogeneidad (I_h) como función de (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).	35
3.12.	Índice de homogeneidad (I_h) como función de las relaciones de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	35
4.1.	Dominio largo computacional: (a) vista en isométrico con dimensiones del DL-bm; (b) vista frontal de los tres refinamientos de malla DL-cm con 33,120 celdas, DL-bm con 63,250 celdas y DL-fm con 119,691 celdas; (c) vista en isométrico del DL-bm con mallado en los contornos.	39
4.2.	Convergencia en el DL-bm para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) velocidad axial en un punto de interés.	41
4.3.	Esquema del dominio largo con los planos a diferente distancia de la entrada del canal.	42
4.4.	Perfiles a) horizontales y b) verticales de velocidad para el dominio base del canal (DL-bm) a $0L$, a $0.5L$, a $0.75L$ y a $0.98L$	43
4.5.	Perfiles de la velocidad axial para las tres mallas del DL en las líneas a) horizontal y b) vertical.	44
4.6.	Perfiles verticales de velocidad de los datos experimentales, del ajuste logarítmico a partir de los datos experimentales y numérico en $0.98L$ del DL-bm.	45
4.7.	Perfiles verticales experimental y el numérico obtenido en $0.98L$	45
4.8.	Caso de referencia.	46
4.9.	Dominio corto computacional: (a) vista en isométrico con dimensiones del DC; (b) vista frontal de los tres tamaños de malla; (c) vista en isométrico del DC-bm con mallado en los contornos.	47

4.10. Convergencia en el DC-bm para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) u en un punto de interés.	48
4.11. Puntos de monitoreo de la velocidad con habitación.	49
4.12. Convergencia en el DC-bm con la habitación para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) componentes de velocidad para algunos de los puntos de interés.	49
4.13. Perfiles (a) velocidad (u), (b) energía cinética de turbulencia (k) y (c) disipación específica de turbulencia (ω).	50
4.14. Evaluación de los modelos de turbulencia sobre las líneas de interés.	52
4.15. Evaluación de los modelos de turbulencia con el parámetro P_a	53
4.16. Evaluación del tamaño de malla sobre las líneas de interés L_h y L_v	54
4.17. Evaluación del tamaño de malla del DC con el parámetro P_a	55
4.18. La barra azul representa el GCI de la malla base para refinamiento y la línea continua es la solución de la malla base.	56
5.1. Vistas en isométrico del dominio extendido computacional en escala real: (a) esquema con dimensiones y (b) mallado con 2,285,304 celdas. Las dimensiones de h_a , h_T y d_a son 3.075 m, 4.450 m y 3.300 m, respectivamente.	60
5.2. Convergencia en el DE para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) componentes de velocidad para algunos de los puntos de interés.	61
5.3. Flujo de ventilación (F_v) como función del (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).	63
5.4. Flujo de ventilación (F_v) como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	63
5.5. Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v) como función de (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).	65
5.6. Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v) como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	65
5.7. Índice de homogeneidad I_{hv} como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	66
5.8. Promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}) como función de (a) A_D y (b) A_O	68
5.9. Promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}) como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V	68

Índice de tablas

2.1.	Casos de estudio de WE con ventana cuadrada (C) y rectangular (R)xxx- colocar la descripción de cada variable.	10
2.2.	Parámetros de la velocidad del viento para diferentes tipos de terrenos, tomado de RISO (2002).	18
2.3.	Viscosidad del agua a 1 atm de 26 °C a 30 °C (White, 2008).	22
3.1.	Evaluación de la ventilación mediante flujo de entrada (F_i), flujo de salida (F_s) y flujo de ventilación (F) para cada caso de estudio.	25
3.2.	Cambios de aire por hora para los diez casos de estudio a escala real.	28
3.3.	Temperatura de trabajo (T_w), número de Reynolds (Re) y evaluación de la ventilación mediante porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a).	31
3.4.	Evaluación de la ventilación mediante el índice de homogeneidad (I_h).	34
4.1.	Diferencia entre perfiles obtenidos $0.50L$ y $0.98L$ ($E_{50,98}$), y error entre perfiles obtenidos a $0.75L$ y $0.98L$ ($E_{75,98}$).	43
4.2.	Diferencia entre perfiles de la malla gruesa y la malla base del DL ($E_{cm,bm}$), de la malla fina y la malla base del DL ($E_{fm,bm}$).	44
4.3.	Diferencia porcentual entre resultado numérico y experimental de la componente axial (E_u) y componente vertical (E_v), en las líneas de interés L_h y L_v , y el promedio de ambas cantidades (E), para cada modelo de turbulencia.	52
4.4.	Diferencia porcentual entre resultado numérico y experimental de la componente axial (E_u) y componente vertical (E_v), en las líneas de interés L_h y L_v , y el promedio de ambas cantidades (E), para cada tamaño de malla.	54

4.5. Valores experimentales y numéricos y su diferencia porcentual de los parámetros P_a y I_h	57
5.1. Relación de áreas A_D/A_V , flujo de ventilación (F_v) y cambios de aire (ACH)	62
5.2. Relación de áreas A_D/A_V y porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v) para los diez casos de estudio.	64
5.3. Relación de áreas A_D/A_V e índice de homogeneidad I_{hv} para los diez casos de estudio.	66
5.4. Relación de áreas A_D/A_V , promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}) para los diez casos de estudio.	67

Nomenclatura

Acrónimos

C	Ventana cuadrada
R	Ventana rectangular
ACH	Cambios de aire por hora
CFD	Computational Fluid Dynamic (dinámica de fluidos computacional)
WE	Wind Exchanger (intercambiador de viento)

Símbolos Arábigos

\bar{p}	Promedio temporal de la presión	Pa
\bar{U}	Promedio de la magnitud de velocidad	m/s
A	Área	m ²
C_s	Constante de rugosidad	-
C_μ	Constante empírica de modelo	-
C_p	Coefficiente de presión	-
D	Dimensión espacial del dominio	-
E_u	Diferencia promedio entre los perfiles obtenidos en la posición a con respecto a los de la posición b	-
F	Flujo de ventilación evaluado en el plano central vertical	m ³ /s

f	Factor geométrico de escala	-
F_v	Flujo de ventilación evaluado el volumen habitable	m^3/s
H	Altura de medición de la velocidad	m
h	Altura exterior de la habitación	m
I	Intensidad de la turbulencia	-
I_{hv}	Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa	-
I_h	Índice de homogeneidad evaluado en la zona habitable del plano central vertical	-
k	Energía cinética de la turbulencia	m^2/s^2
k_s	Altura de rugosidad	m
M	Magnitud de velocidad de referencia	m/s
p	Presión	Pa
P_a	Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa	-
P_v	Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa	-
q	Relación entre mallas	-
r	Factor de refinamiento de malla	-
Re	Número de Reynolds	-
U	Velocidad a una altura de referencia	m/s
u	Componente axial de la velocidad	m/s
V	Volumen interior de la habitación	m^3
v	Componente vertical de la velocidad	m/s
w	Componente transversal de la velocidad	m/s
y	Altura	m

y_0	Longitud de rugosidad	m
U_{ABL}^*	Velocidad de fricción o de estrés	m/s

Símbolos Griegos

α	Coefficiente de fricción o exponente de Hellman	-
ϵ	Disipación de la energía cinética de turbulencia	m^2/s^3
κ	Constante de von Karman	-
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
ω	Disipación específica de la turbulencia	1/s
ρ	Densidad	kg/m^3
σ	Desviación estándar	-

Resumen

Un intercambiador de viento (WE, windexchanger, por sus siglas en inglés) es una estructura localizada sobre el techo de una habitación, no mayor a la altura de la misma, que se utiliza para mejorar la ventilación natural al interior de la habitación. El objetivo principal de este trabajo es estudiar, mediante experimentos y simulaciones numéricas, el efecto sobre la ventilación natural de variar el área del ducto del WE y de variar la geometría y el área de la ventana en el muro a barlovento. Se estudian cinco tamaños de área de ducto del WE y dos geometrías de ventana (cuadrada y rectangular) con diferentes áreas. El área de la ventana cuadrada es el doble del de la rectangular. Esto resulta en un total de diez casos de estudio, con diferentes valores de los parámetros geométricos: área de ducto y área de aberturas del WE; área de ventana; y relaciones de áreas. Los experimentos fueron realizados en un canal de agua con maquetas a escala 1:25 con respecto a la escala real. La velocidad fue medida en un plano central vertical utilizando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica. El perfil vertical de velocidad generado en la zona de pruebas del canal corresponde a una zona de terrenos con cultivos y con edificios distribuidos. El análisis de los resultados experimentales se llevó a cabo mediante tres parámetros: el flujo de ventilación (F), el porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) y el índice de homogeneidad (I_h). Se encontró que para los diez casos de estudio, F y P_a tienen mayores valores que el caso de referencia, consistente en la habitación sin WE con ventana cuadrada, reportado en la literatura. También se encontró que F crece linealmente con los parámetros geométricos, mientras que P_a y I_h no dependen de ellos. Las simulaciones numéricas se realizaron para obtener el campo tridimensional de velocidad en cada caso. Las simulaciones numéricas fueron validadas con los resultados experimentales. Se realizaron dos análisis de sensibilidad, para el modelo de turbulencia y para el tamaño de malla. Para estos flujos se encontró que el mejor modelo de turbulencia es el modelo *RNG* $k-\epsilon$ y que la malla base es adecuada. El dominio utilizando

la malla base fue escalado para realizar simulaciones numéricas a escala real con aire como fluido de trabajo. La ventilación natural fue estudiada mediante cuatro parámetros: el flujo de ventilación (F_v), el porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v), el índice de homogeneidad (I_{hv}) y el promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}). Se encontró que, para los rangos de los parámetros geométricos estudiados, F_v , P_v y \bar{U} crecen exponencialmente con los parámetros geométricos y que I_{hv} tiene dependencia con la geometría y área de ventana, pero no con los parámetros geométricos del WE. Además, se hacen sugerencias para futuros trabajos que complementen la investigación de esta tesis.

Introducción

En años recientes, la arquitectura bioclimática ha contribuido al ahorro de energía en edificaciones a través del uso de sistemas que utilizan las fuerzas naturales para su funcionamiento, también llamados sistemas pasivos (Givoni, 1994). La ventilación natural es la remoción del aire interior por aire del exterior, por los mecanismos de viento y flotación térmica (Etheridge y Sandberg, 1996). La ventilación natural provee en las zonas habitables de calidad de aire, remoción de gases nocivos y en climas cálidos contribuye al confort térmico (Ghiaus y Allard, 2005). Los principales sistemas pasivos utilizados para promover la ventilación natural son: ventanas u otras aberturas, torres de viento, chimeneas solares, muros trombe e intercambiadores de viento (o captadores de viento).

El mecanismo de ventilación natural por viento puede ser descrito como los cambios de presión que el viento produce sobre cada una de las fachadas del edificio. La fachada que está en dirección del viento tiene una zona de presión positiva y las demás fachadas una zona de presión negativa, con respecto a la presión lejos de la edificación (Figura 1.1). Las diferencias de presión que el viento produce sobre las fachadas pueden ser aprovechadas para mejorar la ventilación al interior del edificio dependiendo de la ubicación de las ventanas o aberturas (Etheridge y Sandberg, 1996). En un edificio las diferencias de presión incrementan conforme aumenta la presión dinámica del viento ($\frac{1}{2}\rho U_R^2$). Se acostumbra expresar la presión en las fachadas y techos de las edificaciones en términos del coeficiente de presión C_p , que se define como

$$C_p = \frac{2(\bar{p} - p_R)}{\rho U_R^2}, \quad (1.1)$$

donde \bar{p} es el promedio temporal de la presión, p_R la presión a la altura de referencia, U_R la velocidad a una altura de referencia y ρ es la densidad del aire. Por otra parte, la ventilación natural por efectos de flotación térmica es producida por gradientes verticales de temperatura los que provocan gradientes verticales densidad del aire, generando de esta manera un movimiento del aire también conocido como convección natural (Etheridge y Sandberg, 1996; Santamouris y Wouters, 2006).

La ventilación puede darse de dos formas, unilateral y cruzada. La ventilación unilateral es aquella que se da a través de una o más aberturas que se encuentran en el mismo muro o techo (Givoni, 1994). La ventilación cruzada es el flujo de aire natural que se da a través de dos o más aberturas situadas en diferentes partes de la edificación, siempre y cuando las aberturas se encuentren en muros o techos diferentes (Bainbridge y Haggard, 2011). En la literatura se encuentra una revisión bibliográfica sobre ventilación cruzada hecha por Ohba y Lun (2010), la cual incluye investigaciones experimentales y numéricas conocidas como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). De los dos tipos de ventilación, la ventilación cruzada produce mayores velocidades del aire al interior de la edificación que la ventilación unilateral (Visagavel y Srinivasan, 2009; Santamouris y Wouters, 2006). Por lo que en esta investigación se abordará la ventilación cruzada.

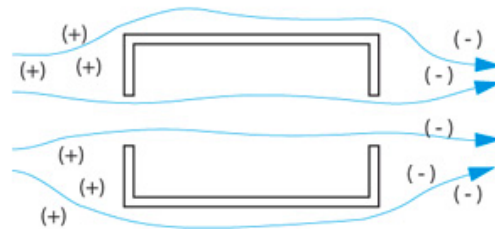


Figura 1.1: Representación esquemática de presiones sobre un edificio, vista en planta. (Vásquez, 2012).

La ventilación cruzada puede presentarse en muchas combinaciones: con una abertura en el muro en la dirección del viento, es decir, a barlovento y en el muro opuesto, es decir, a sotavento; con abertura en muro a barlovento y muro lateral; con abertura en muro a barlovento y abertura vertical a sotavento en techos sierra; con abertura en muro y abertura horizontal en techo proporcionada por un intercambiador de viento (estructura no mayor a la altura de la habitación localizada por encima de la misma). La evaluación de la ventilación cruzada se ha

llevado a cabo mediante experimentos (Karava *et al.*, 2006, 2011; Cruz-Salas *et al.*, 2014), simulaciones numéricas CFD (Liu *et al.*, 2011; Perén *et al.*, 2015a,b,c, 2016) y en combinación de ambos métodos (Kurabuchi *et al.*, 2004, 2006; Bangalee *et al.*, 2013). Los estudios hechos por Kurabuchi *et al.* (2004, 2006); Karava *et al.* (2006, 2011); Liu *et al.* (2011); Perén *et al.* (2015a,b,c, 2016) han usado aire como fluido de trabajo y otros estudios han utilizado agua (Bangalee *et al.*, 2013; Cruz-Salas *et al.*, 2014). A continuación se presentan los estudios realizados sobre ventilación cruzada con cada una de las combinaciones mencionadas.

La ventilación cruzada con aberturas en muro a barlovento y muro a sotavento (Figura 1.2a) ha sido muy estudiada (Kurabuchi *et al.*, 2004, 2006; Karava *et al.*, 2011; Bangalee *et al.*, 2013; Perén *et al.*, 2015a). Todos estos trabajos mantienen fijo el ángulo de incidencia del flujo de aire perpendicular a la abertura a barlovento (ángulo igual a cero) y el área de abertura a barlovento (A_1) igual al área de abertura a sotavento (A_2), a excepción de (Kurabuchi *et al.*, 2004) que variaron los ángulos de incidencia del flujo y (Karava *et al.*, 2011) que variaron las áreas de las aberturas. Kurabuchi *et al.* (2004) estudiaron el efecto de variar el ángulo de incidencia del flujo de aire de 0° a 67.5° sobre la abertura a barlovento y encontraron que al aumentar este ángulo la presión sobre la abertura disminuye. Karava *et al.* (2011) muestra que para tres alturas diferentes de aberturas, una porosidad A_1/A_{wall} del 20 %, donde A_{wall} es el área del muro, aumenta el flujo de ventilación (flujo volumétrico de entrada de aire que por conservación de masa es igual al flujo volumétrico de salida de aire) con respecto a porosidades de 5 % y 10 %, mientras que el flujo de ventilación a una porosidad del 10 % es similar al del 5 %. Bangalee *et al.* (2013) estudiaron el efecto de variar la localización de las aberturas, manteniendo constante el área de cada una de las aberturas y su altura con respecto al nivel de piso. Reportaron que el flujo de ventilación más alto es para aberturas centradas en muros, 7.4 % mayor que el de las aberturas localizadas en la esquina derecha de los muros y 34 % mayor con respecto al de aberturas localizadas diagonalmente sobre los muros. También encontraron que el desarrollo de la ventilación es similar para los casos con aberturas opuestas centradas y con aberturas opuestas localizadas en la esquina derecha de los muros (Figura 1.3). Perén *et al.* (2015a) estudiaron el efecto de variar la inclinación del techo hacia barlovento de la habitación sobre la ventilación cruzada cuando la abertura a sotavento se localiza cerca del techo, utilizando inclinaciones de techo hacia barlovento de 9° a 45° y encontraron que aumentar el ángulo de inclinación del techo aumenta la velocidad del aire al interior (Figura 1.2b).

La ventilación cruzada con abertura en muro a barlovento y muro lateral (Figura 1.4) ha sido estudiada por Karava *et al.* (2006, 2011). Variaron la relación de áreas A_1/A_2 , donde A_1 y A_2 son el área de la abertura a barlovento y el área de abertura lateral respectivamente. En el rango estudiado $0.2 \leq A_1/A_2 \leq 3$, encontraron que al aumentar A_1/A_2 aumenta el coeficiente de presión interior, siendo cero para $A_1/A_2 = 1$ (Karava *et al.*, 2006). Otro estudio de Karava *et al.* (2011) analiza cuatro combinaciones de alturas de aberturas (superior a barlovento con superior lateral, superior a barlovento con inferior lateral, inferior a barlovento con superior lateral, inferior a barlovento e inferior lateral). Ellos encontraron que una abertura superior a barlovento con una abertura inferior lateral tiene el promedio del coeficiente de presión al interior ligeramente mayor que las demás combinaciones.

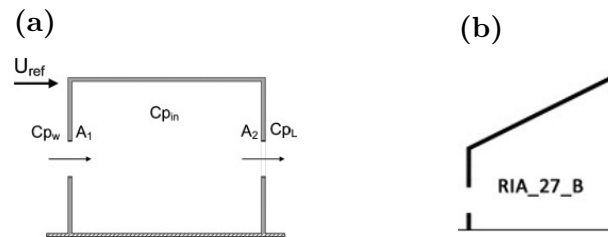


Figura 1.2: Representación esquemática de la (a) ventilación cruzada con dos aberturas, una a barlovento y otra a sotavento (Karava *et al.*, 2011); (b) ventilación cruzada con una abertura a sotavento cerca de un techo inclinado a 45° (Perén *et al.*, 2015a).

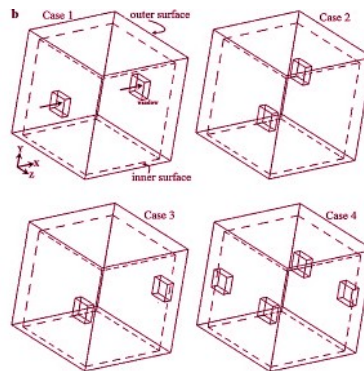


Figura 1.3: Casos de estudio usados por Bangalee *et al.* (2013): caso 1, aberturas centradas sobre los muros; caso 2, aberturas localizadas diagonalmente sobre los muros; caso 3, aberturas localizadas cerca de las esquinas de los muros; caso 4, cuatro aberturas.

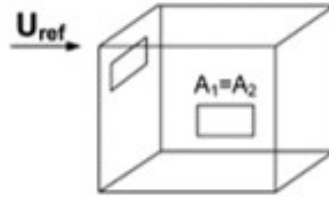


Figura 1.4: Representación esquemática de la ventilación cruzada con abertura en muro barlovento y lateral (Karava *et al.*, 2011).

Una comparación entre la ventilación cruzada con aberturas a barlovento y sotavento, y la ventilación cruzada con aberturas a barlovento y lateral fue llevada a cabo por Karava *et al.* (2011). Encontraron que la primera proporciona mayor flujo de ventilación, particularmente cuando las aberturas están localizadas a la mitad de la altura del edificio y centradas sobre los muros, y con $A_1/A_2 < 1$ ($1/2$ y $1/4$).

La ventilación cruzada con abertura en muro a barlovento y abertura vertical a sotavento en techos sierra (Figura 1.5) también ha sido estudiada (Perén *et al.*, 2015b,c, 2016). Agregar aleros a la abertura a barlovento con la misma inclinación del techo aumenta el flujo de ventilación (Perén *et al.*, 2015b). La geometría del techo es un importante parámetro de diseño que debe ser considerado debido a que el flujo de ventilación y la distribución del aire al interior dependen de este parámetro, (Perén *et al.*, 2015c). El impacto de diferentes geometrías de techos en la ventilación cruzada también fue estudiada por Perén *et al.* (2016), ellos muestran que los techos de doble plano tienen un ligero incremento en el flujo de ventilación que un solo techo de la misma geometría y utilizar $A_1/A_2 = 0.5$ en techos de doble plano aumenta el flujo de ventilación entre el 23% y 39% con respecto a los techos de doble plano con $A_1/A_2 = 1$, donde A_2 es la suma de áreas de las aberturas a sotavento en los techos de doble plano sierra (Figura 1.5).

La ventilación cruzada con abertura en muro (barlovento o sotavento) y abertura horizontal en techo proporcionada por un intercambiador de viento WE (por sus siglas en inglés, windexchanger) ha sido estudiada (Cruz-Salas *et al.*, 2014; Castillo *et al.*, 2017). Ambos trabajos estudiaron seis tipos de intercambiadores de viento (Figura 1.6a) y mantuvieron fijos el área de ducto de sección cuadrada del WE y la velocidad de viento; variaron el número de particiones en el interior del ducto del WE, el número y la orientación de las aberturas del WE. Doce casos de estudios fueron utilizados por ambos trabajos. Cruz-Salas *et al.* (2014) estudiaron el caso cuando la

abertura está a barlovento con área fija y encontraron que la velocidad del aire al interior disminuye cuando el WE cuenta con particiones en su interior y el porcentaje de área con un flujo de velocidad significativa es mayor cuando el WE tiene dos aberturas opuestas (una a barlovento y otra a sotavento) y sin particiones en su ducto (Figura 1.6b). Por otra parte, Castillo *et al.* (2017) estudiaron el caso cuando la abertura está a sotavento con área fija. Ellos encontraron que para este caso, los intercambiadores de viento que se comportan como inyectores de aire tienen mejor desempeño. Además, Castillo *et al.* (2017) compararon sus estudios con los estudios de Cruz-Salas *et al.* (2014) y dieron guías de diseño para los WE de acuerdo con la dirección del viento, la orientación de las ventanas y a la diferencia de temperatura del aire entre el exterior y el interior de la habitación.

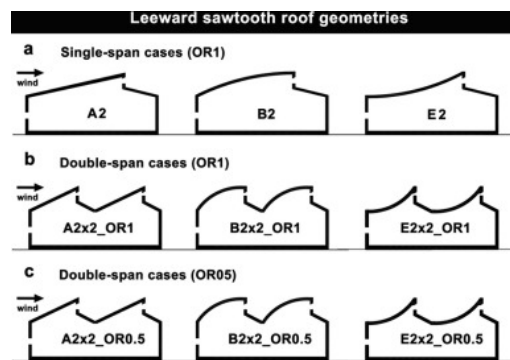


Figura 1.5: Representación esquemática de la ventilación cruzada con abertura en muro barlovento y abertura vertical a sotavento en techos sierras (Perén *et al.*, 2016).

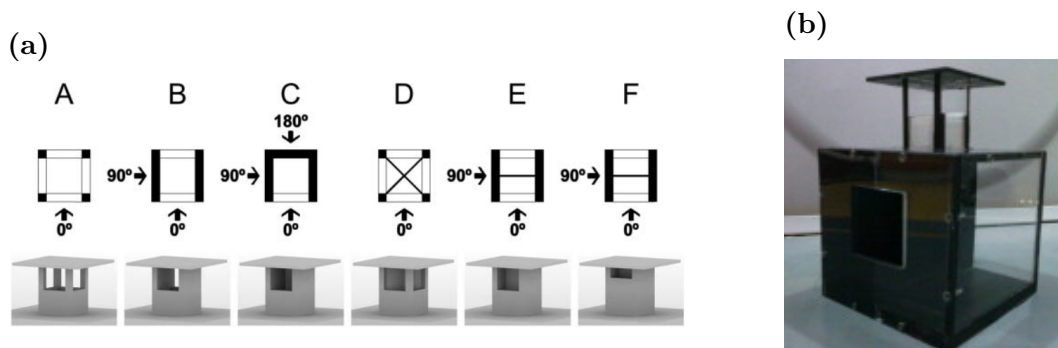


Figura 1.6: (a) Seis configuraciones de WE utilizados por Cruz-Salas *et al.* (2014) y Castillo *et al.* (2017); (b) Modelo del cuarto con ventana a barlovento y uno de los WE Cruz-Salas *et al.* (2014).

En este capítulo se ha mostrado que la ventilación cruzada ha sido estudiada bajo diferentes condiciones pero en ningún trabajo se ha reportado el efecto de variar el área del ducto de WE (manteniendo la geometría cuadrada) y el área y la geometría de la ventana (cuadrada y rectangular) a barlovento. Con base a los estudios realizados por Cruz-Salas *et al.* (2014) y Castillo *et al.* (2017) para este trabajo se propone utilizar un WE sin divisiones con tres aberturas, dos laterales y una a sotavento.

Metodología experimental

En este capítulo se presenta la metodología del estudio experimental sobre el desempeño de un tipo de WE colocado en la parte central del techo de una habitación. Se describen los casos de estudio, las componentes del dispositivo experimental y las condiciones de similitud entre el modelo a escala y el caso real.

2.1. Casos de estudio

El desempeño de un tipo de intercambiador de viento (WE) colocado en la parte central del techo de una habitación es estudiado mediante experimentos realizados en un canal de agua y maquetas. Las maquetas de la habitación y el WE fueron construidas de acrílico a una escala de 1 : 25 con respecto al tamaño real de la habitación. Los parámetros que se mantuvieron fijos son: las dimensiones de la habitación con ventana a barlovento, la forma cuadrada del ducto del WE (acorde con Elmualim y Awbi (2002) esta geometría es la de mejor desempeño), la altura del WE, la posición y altura de las tres aberturas del WE (dos laterales y otra a sotavento), el perfil y la magnitud de la velocidad del flujo incidente. Los parámetros que se variaron son: el área del ducto y el área total de las aberturas del WE, la geometría y el área de la ventana, resultando en total diez casos de estudio. En la Figura 2.1 se presenta la vista de frente de la habitación y un WE.

Los diez casos estudiados están dados por dos diferentes geometrías de la ventana, cuadrada y rectangular, que tienen diferente área y por cinco tamaños de intercambiadores de viento, que tienen diferente área de ducto y área de aberturas (Figura 2.2). La ventana cuadrada tiene una base y una altura de 5.2 cm, mientras que la ventana rectangular tiene una base de 2.6 cm y una altura de 5.2 cm, por lo que el área de la ventana cuadrada es el doble del área de la ventana rectangular.

Ambas ventanas están centradas en el fachada a barlovento de la habitación, a una altura de 3.6 cm del piso. Dado que la geometría del WE no se varió, el área de sus aberturas es proporcional al área del ducto. En la Tabla 2.1 se presentan los diez casos de estudio con los valores del área de ventana (A_V), área de ducto del WE (A_D), área de aberturas del WE (A_O) y las relaciones de área A_D/A_V y A_V/A_O . Los planos constructivos de los WE son presentados en el Anexo A.

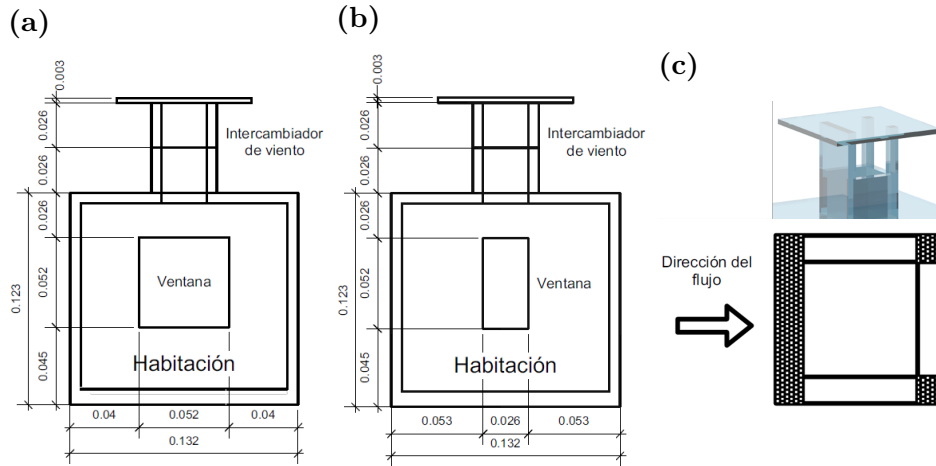


Figura 2.1: (a) Vista frontal del modelo a escala de la habitación con ventana cuadrada, cotas en m (escala 1 : 25); (b) Vista frontal del modelo a escala de la habitación con ventana rectangular, cotas en m (escala 1 : 25); y (c) Configuración de WE con tres aberturas y un ducto.

Tabla 2.1: Casos de estudio de WE con ventana cuadrada (C) y rectangular (R)xxx- colocar la descripción de cada variable.

Caso	$A_V[m^2]$	$A_D[m^2]$	$A_O[m^2]$	A_O/A_V [-]	A_D/A_V [-]
$CA1$	2.704×10^{-3}	0.676×10^{-3}	2.028×10^{-3}	0.75	1/4
$CA2$	2.704×10^{-3}	1.014×10^{-3}	2.484×10^{-3}	0.92	3/8
$CA3$	2.704×10^{-3}	1.352×10^{-3}	2.867×10^{-3}	1.06	1/2
$CA4$	2.704×10^{-3}	1.690×10^{-3}	3.206×10^{-3}	1.19	5/8
$CA5$	2.704×10^{-3}	2.704×10^{-3}	4.056×10^{-3}	1.50	1
$RA1$	1.352×10^{-3}	0.676×10^{-3}	2.028×10^{-3}	1.50	1/2
$RA2$	1.352×10^{-3}	1.014×10^{-3}	2.484×10^{-3}	1.84	3/4
$RA3$	1.352×10^{-3}	1.352×10^{-3}	2.867×10^{-3}	2.12	1
$RA4$	1.352×10^{-3}	1.690×10^{-3}	3.206×10^{-3}	2.37	5/4
$RA5$	1.352×10^{-3}	2.704×10^{-3}	4.056×10^{-3}	3.00	2

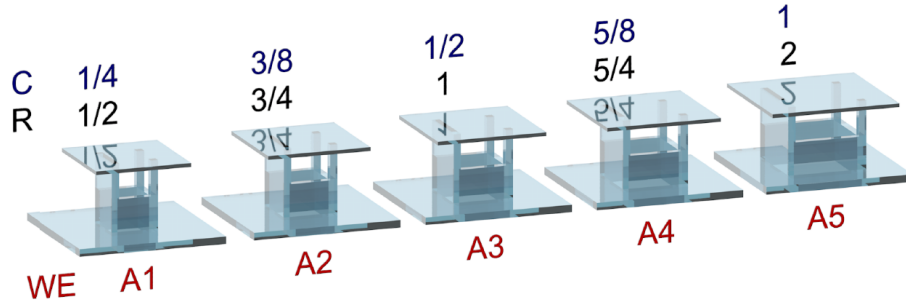


Figura 2.2: Las letras en azul muestran el valor de A_D/A_V respecto a la ventana cuadrada (C), las letras en negro muestran el valor de A_D/A_V respecto a la rectangular (R) y las letras en rojo muestran el nombre asignado a cada intercambiador de viento conforme incrementa el área del ducto del intercambiador de viento (WE).

2.2. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental utilizado está compuesto por un canal de agua, las maquetas y un sistema de velocimetría estereoscópica por imágenes de partículas.

2.2.1. Canal de agua

El canal de agua está compuesto por el canal propiamente dicho, una cámara de acondicionamiento, un sistema de recirculación, un depósito de almacenamiento con una capacidad de 1800 L y un reservorio de desagüe (Figura 2.3).

El canal tiene una longitud de 6.00 m, ancho de 0.32 m y altura de 0.50 m. El canal cuenta con una zona de pruebas, cuya longitud es de 1 m ubicada a 4 m de la entrada del canal, y una rampa a la salida para mantener la altura del nivel del agua constante y además para evitar que la influencia de la salida del agua perturbe la zona de pruebas.

Antes de la entrada del canal se ubica la cámara de acondicionamiento, cuya finalidad es amortiguar las perturbaciones producidas por la caída del agua. A la salida de la cámara de acondicionamiento hay una estructura hecha con placas de policarbonato celular para disminuir el tamaño de los vórtices que entran al canal. El sistema de recirculación está compuesto por las tuberías de entrada y salida del canal, una bomba de 4 HP, una válvula de control para regular el flujo hacia el canal y una tubería de alivio.

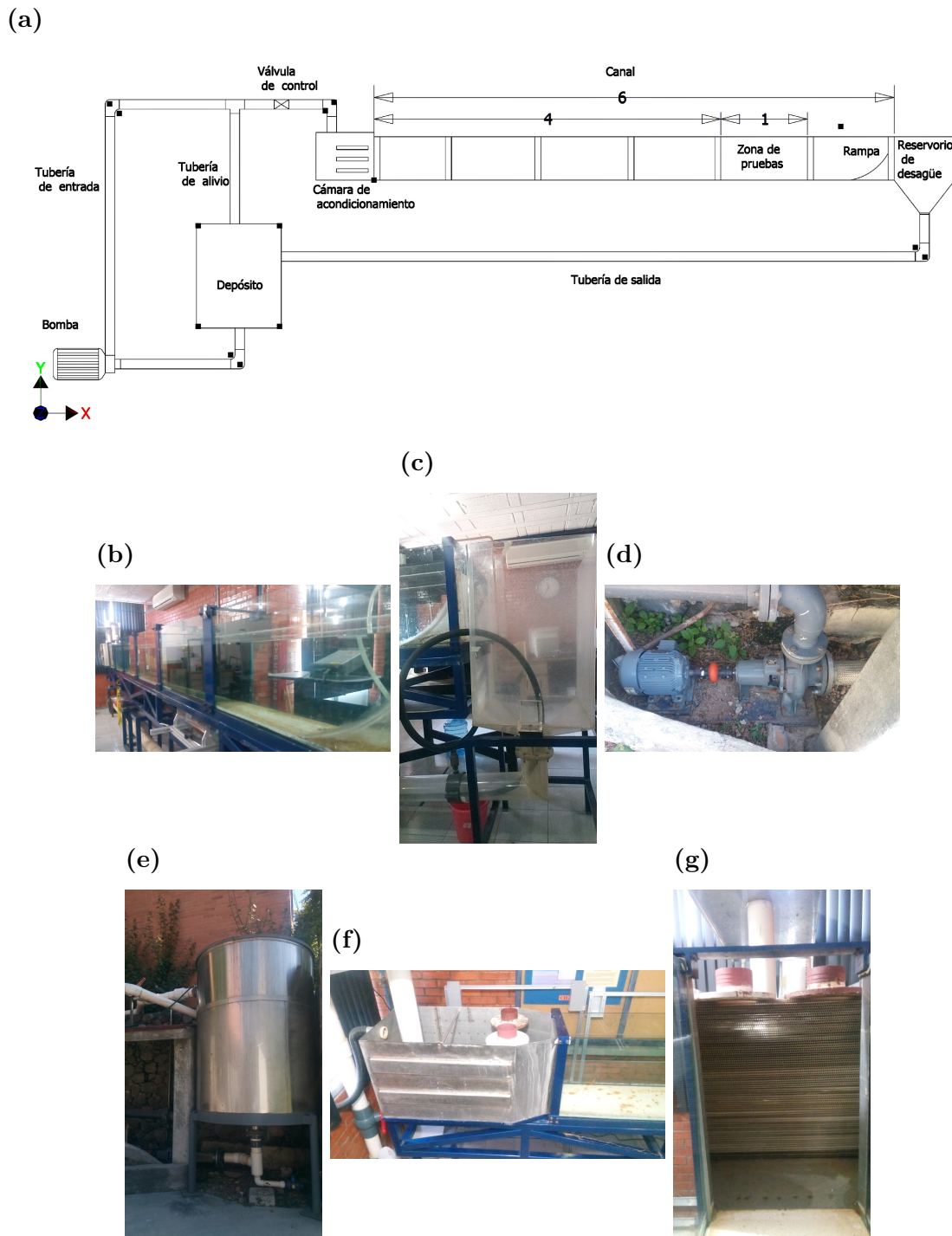


Figura 2.3: Componentes del canal de agua: (a) Representación esquemática del canal de agua, cotas en m; (b) Fotografía del canal; (c) Rampa y reservorio de desagüe; (d) Bomba; (e) Depósito de almacenamiento; (f) Cámara de acondicionamiento; y (g) Placas de policarbonato celular.

2.2.2. Maquetas

Las maquetas de la habitación y el WE fueron construidas de acrílico a una escala de 1 : 25 con respecto al tamaño real de una habitación. La maqueta de la habitación tiene un área interna de 12 cm \times 12 cm y una altura interna de 11 cm. Los muros y techo de la habitación tienen 6 mm de grosor, el piso tiene 9 mm de grosor y el techo del WE tiene 3 mm de grosor (Figura 2.4). Todos los WE tienen un ducto de sección cuadrada y tres aberturas localizadas en los laterales y a sotavento. La altura total del WE es de 5.5 cm medida desde el techo de la habitación y la altura de las aberturas del WE es de 2.6 cm (Figura 2.1). Otras especificaciones de las maquetas fueron presentadas en la Sección 2.1.

Para reducir los reflejos de la luz láser, que atraviesa la maqueta en el plano central cuando se utiliza la técnica de velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica, una máscara de papel adhesivo negro fue colocada sobre los contornos de las maquetas. También una máscara de papel adhesivo negro fue colocada en la pared del fondo del canal, dejando sin cubrir una ranura para el paso de la hoja de luz láser.

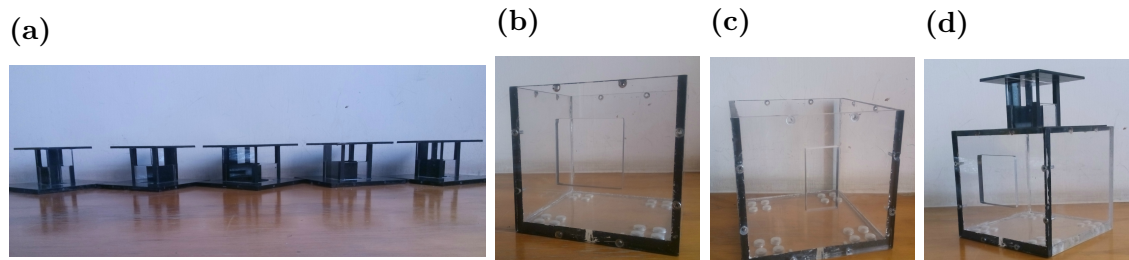


Figura 2.4: (a) Fotografía de los cinco intercambiadores de viento; (b) Fotografía de la habitación con ventana cuadrada; (c) Fotografía de la habitación con ventana rectangular; y (d) Fotografía de la habitación con ventana cuadrada y WE (caso RA3).

2.2.3. Velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica

En este trabajo para medir la velocidad del agua se utilizó la técnica velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica (SPIV). Esta técnica se basa en la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés Particle Image Velocimetry).

La técnica PIV es no intrusiva, mide en un plano la velocidad de flujo de un fluido que contiene pequeñas partículas que siguen al flujo. Por lo tanto, se requiere que el fluido y su contenedor sean transparentes. El sistema PIV está compuesto por cuatro componentes: una fuente de luz láser que tiene una lente a su salida para formar una hoja de luz láser; una cámara fotográfica; un sincronizador del pulso de luz láser y de la cámara; y una computadora para la adquisición y el procesamiento de datos. Adicionalmente se pueden tener espejos y una lente para controlar la entrada de la hoja de luz láser a la zona de estudio (Iriarte-Muñoz, 2008). El sistema PIV funciona de la siguiente manera: la fuente de luz láser emite dos pulsos de luz separados por un tiempo muy pequeño (del orden de microsegundos o nanosegundos). La cámara fotográfica captura una imagen de las partículas inmersas en el fluido que son iluminadas por el primer pulso y otra imagen correspondiente al segundo pulso. El programa de procesamiento de datos de la computadora divide a cada imagen en pequeñas áreas denominadas ventanas de interrogación. Las partículas dentro de una ventana de interrogación de la primera imagen son correlacionadas para diferentes desplazamientos con las partículas de la misma ventana de interrogación. El desplazamiento con el máximo valor de correlación es definido como el desplazamiento del fluido en la ventana de interrogación. La velocidad del fluido para cada ventana de interrogación está dado por el desplazamiento del fluido en dicha ventana dividido entre el tiempo ocurrido entre el primer y el segundo pulsos (Goldstein, 1996). La técnica de SPIV permite obtener las tres componentes de la velocidad del flujo de un fluido en un plano. El principio de funcionamiento del SPIV es el mismo que el del PIV, la única diferencia se debe a que el SPIV cuenta con dos cámaras fotográficas para percibir la profundidad de la zona iluminada por la luz láser, es decir, contar con una visión estereoscópica. En general, la hoja de luz láser para la técnica SPIV es más gruesa con respecto a la usada en la técnica PIV (Mares-Castro, 2010).

El sistema SPIV utilizado en este trabajo está compuesto por una fuente de luz láser de doble pulso de Nd:YAG (*Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet*), dos cámaras digitales Nikon AF NIKKOR 50 mm 1:1.4 D, dos espejos, una lente, un controlador LaVision VC-ImagerPro 2M y una computadora con procesador Intel (R) Xeon (R) (CPU, 5150 @2.66 GHz, 2.67 GHz, 3.00 GB de RAM). Esta computadora contiene el programa Davis 7.2 para controlar el dispositivo electrónico que sincroniza las cámaras y la fuente de luz láser y para la adquisición y el procesamiento de datos.

La fuente de luz láser está colocada paralela a la zona de pruebas con la hoja de luz láser horizontal. Se colocó un espejo plano de primera superficie con un diámetro de 35 cm girado 45° sobre el eje vertical para redirigir la hoja de luz láser por debajo de la zona de pruebas. Un segundo espejo de segunda superficie inclinado 45° con respecto a la horizontal para producir una hoja de luz vertical. Para disminuir el grosor de la hoja de luz láser, aproximadamente a 2 mm, una lente cilíndrica de 15 cm de diámetro hecha de lámina acrílica rolada relleno de agua fue colocada debajo de la zona de pruebas (Figura 2.5).

Antes de hacer experimentos en el canal de agua fue necesario calibrar el SPIV. Para ello, una placa de calibración LaVision tipo 22 fue colocada en la zona de pruebas del canal lleno de agua sin movimiento (LaVision, 2006).

Se obtuvieron los campos vectoriales de velocidad sobre el plano central vertical. Para cada caso de estudio, 100 campos vectoriales de velocidad fueron tomadas con una separación de 0.04 s. La separación temporal entre dos fotografías de una misma cámara para obtener cada campo fue de 9 ms.

2.2.3.1. Programas de análisis de datos

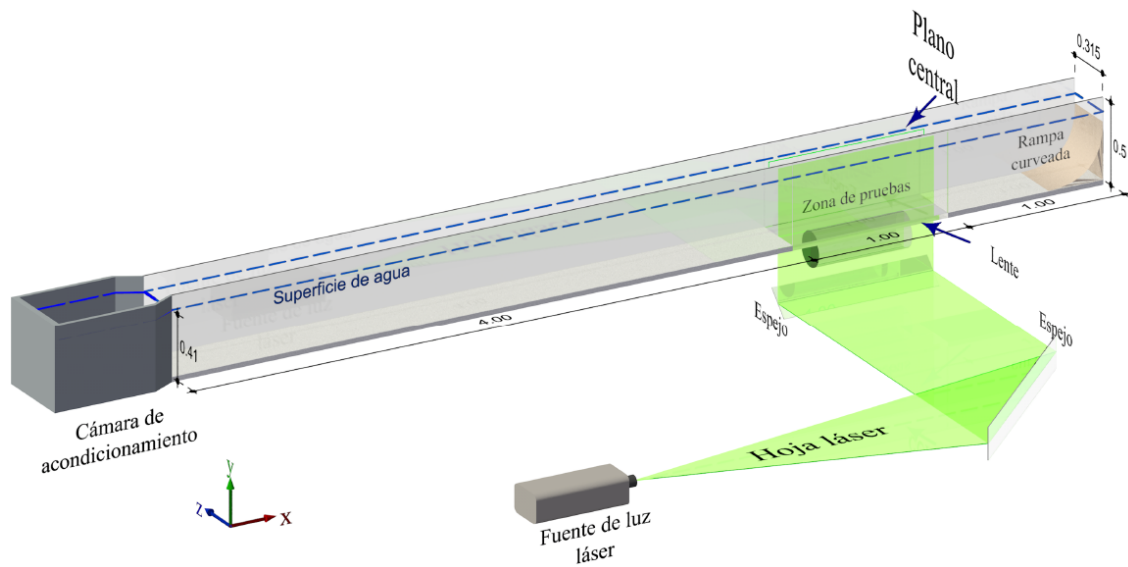
Se usaron dos programas en lenguaje de programación C para analizar los campos vectoriales de velocidad obtenidos con el SPIV, estos programas fueron desarrollados por el Dr. José Antonio Castillo Torres. El programa llamado *Time – dependence – profile* calcula la capa límite y el otro programa llamado *average – ventilation – analysis* calcula los parámetros de evaluación del desempeño para la ventilación cruzada.

El primer programa (*Time – dependence – profile*) calcula la capa límite experimental que modela la capa límite atmosférica. Usa los campos vectoriales obtenidos de las mediciones SPIV en la zona de estudio sin ningún obstáculo. El programa limita la zona del plano que será analizada y cambia la posición de referencia. Para cada punto en el plano, calcula el promedio temporal y la desviación estándar de cada una de las tres componentes de la velocidad. Además calcula los promedios temporales de los perfiles de velocidad en la entrada, parte central y salida de la zona examinada. Determina el perfil promedio espacial de velocidades a partir de los perfiles promedios temporales anteriores.

El segundo programa (*average – ventilation – analysis*) determina el campo de velocidades en toda la zona examinada y ubica las coordenadas de la ventana,

del ducto del WE, y de los muros del modelo experimental. Calcula los parámetros porcentaje de área con velocidad significativa y flujo de ventilación que se presentan en las Secciones 3.1 y 3.2. Utilizando los datos de salida de este programa, el parámetro índice de homogeneidad presentando en la Sección 3.3 fue calculado en una hoja de cálculo del programa LibreOffice Calc.

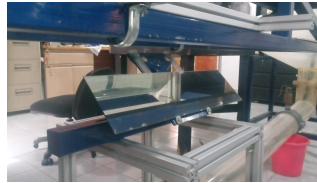
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



Figura 2.5: (a) Esquema de la hoja de la luz láser del SIV, cotas en m; (b) Lente; (c) Espejo; (d) Fuente de luz láser; y (e) Equipo de adquisición y procesamiento de datos.

2.3. Similitudes

Realizar experimentos de ventilación natural a escala reducida con respecto del modelo real es una forma de ahorrar dinero y tiempo. En la experimentación los modelos a escala reducida deben cumplir con tres condiciones de similitud: la similitud geométrica, la similitud cinemática y la similitud dinámica.

2.3.1. Similitud geométrica

La similitud geométrica implica que el modelo a escala debe tener la misma geometría que el modelo real y todas sus dimensiones lineales deben ser escaladas con el mismo factor (Moonen *et al.*, 2012; Potter *et al.*, 2002). En este trabajo la similitud geométrica fue considerada en la elaboración de la habitación y los WE a una escala de 1 : 25 con respecto al modelo real. La habitación a escala real representa una habitación tipo de viviendas de interés social, tiene un área interna de 3 m × 3 m con una altura interna de 2.7 m. La ventana está a 90 cm del suelo (antepecho) centrada sobre la fachada a barlovento. En la escala real, la ventana cuadrada tiene un área de 1.69 m² y la rectangular de 0.845 m².

2.3.2. Similitud cinemática

Existe una similitud cinemática entre el experimento y el modelo real cuando las velocidades del fluido y los gradientes de velocidad del fluido son semejantes en las ubicaciones correspondientes, es decir, el perfil vertical de velocidad y el perfil vertical de intensidad de turbulencia en el experimento tienen similitud con dichos perfiles de la capa límite atmosférica real (Moonen *et al.*, 2012).

La capa límite atmosférica es aquella parte de la troposfera en donde la velocidad del viento se ve afectada por las condiciones superficiales del terreno (Zavala, 2017). Generalmente, la capa límite atmosférica es representada por el modelo exponencial de Hellman o por el modelo logarítmico de perfil de velocidades.

El modelo exponencial de Hellman relaciona la velocidad del viento a dos alturas diferentes y toma en cuenta la fricción que los diferentes tipos de terreno pueden producir sobre el viento a través de un coeficiente (Fernández Diez, 2016).

$$\frac{u(y)}{U_0} = \left(\frac{y}{H_0} \right)^\alpha, \quad (2.1)$$

donde $u(y)$ es la componente axial de la velocidad para la altura y , U_0 es la velocidad a la altura H_0 (frecuentemente referida a una altura de 10 m) y α es el coeficiente de fricción o exponente de Hellman. Algunos valores del coeficiente de fricción son mostrados en la Tabla 2.2.

Acorde a Tominaga *et al.* (2008), el modelo logarítmico de perfil de velocidades está dado por:

$$u(y) = \frac{U_{ABL}^*}{\kappa} \ln \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right), \quad (2.2)$$

donde U_{ABL}^* es la velocidad de fricción o de estrés que se calcula a partir de la razón del esfuerzo cortante de la superficie sobre la densidad del fluido, κ es la constante de von Karman ($\kappa \approx 0.4$) y y_0 es el parámetro de rugosidad del terreno que se define como la altura extrapolada en la que velocidad teórica del viento es cero conocido como longitud de rugosidad. U_{ABL}^* y y_0 pueden ser obtenidos experimentalmente (RISO, 2002). Algunos valores para y_0 están registrados en la Tabla 2.2.

De acuerdo con Tominaga *et al.* (2008), la velocidad de estrés puede calcularse como

$$U_{ABL}^* = \left(k(y) \sqrt{C_\mu} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.3)$$

donde $C_\mu = 0.09$ es una constante empírica y $k(y)$ es la energía cinética de la turbulencia para la altura (y). La energía cinética de la turbulencia está dada por $k(y) = 0.5 (\sigma_u^2(y) + \sigma_v^2(y) + \sigma_w^2(y))$ (Tominaga *et al.*, 2008). Donde $\sigma_u(y)$, $\sigma_v(y)$ y $\sigma_w(y)$ son las desviaciones estándar de las componentes de la velocidad axial, vertical y transversal, respectivamente.

Tabla 2.2: Parámetros de la velocidad del viento para diferentes tipos de terrenos, tomado de RISO (2002).

Tipo de superficie	y_0 [m]	α [-]
Planicie con nieve	0.00001	-
Mar abierto sin olas	0.0001	-
Mar abierto con olas	0.0001 - 0.003	0.12
Zonas costeras	0.001	-
Campos abiertos sin edificios ni vegetación	0.01	-
Terrenos con cultivos y con edificios distribuidos	0.05	0.16
Bosques y zonas sub-urbanas	0.3	0.30
Ciudades grandes	1 - 10	0.40

La intensidad de turbulencia ($I(y)$) reportado por Ramponi y Blocken (2012) se define como:

$$I(y) = k(y)^{0.5}/u(y). \quad (2.4)$$

Para los experimentos de esta tesis se consideró una capa límite correspondiente a una zona de terrenos con cultivos y con edificios distribuidos (Tabla 2.2). En trabajos previos a este, para reproducir la rugosidad del terreno se han usado obstáculos en túneles de viento o canales de agua (Castillo-Torres, 2016; Cruz-Salas *et al.*, 2014; Kotani y Yamanaka, 2006; van Hooff *et al.*, 2011). En este trabajo se usó un arreglo de cuarenta obstáculos verticales a lo largo del canal colocados desde la entrada del canal hasta 2.10 cm después de la entrada de la zona de pruebas. Los obstáculos fueron construidos de policarbonato celular de 6.00 mm de grosor y 31.5 cm de longitud, con ocho alturas diferentes: 15.0 cm, 12.5 cm, 10.0 cm, 7.5 cm, 5.0 cm, 2.5 cm, 1.0 cm y 0.5 cm. Los obstáculos fueron separados 9.50 cm uno con respecto del otro (Figura 2.7).

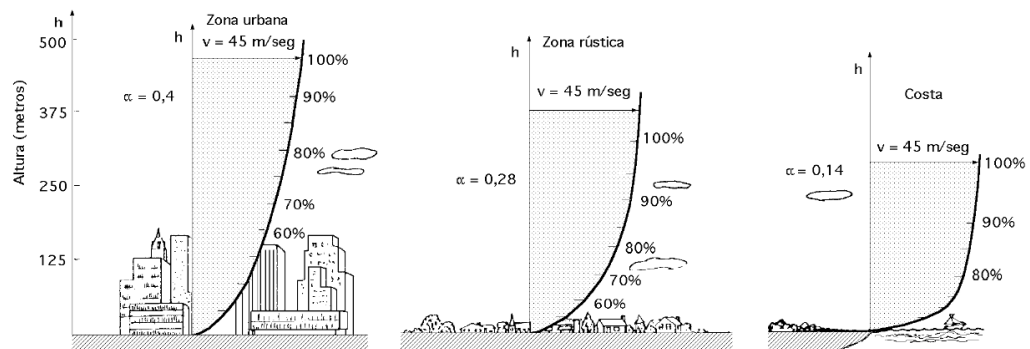


Figura 2.6: Perfiles de velocidad el viento, tomado de Fernández Diez (2016)

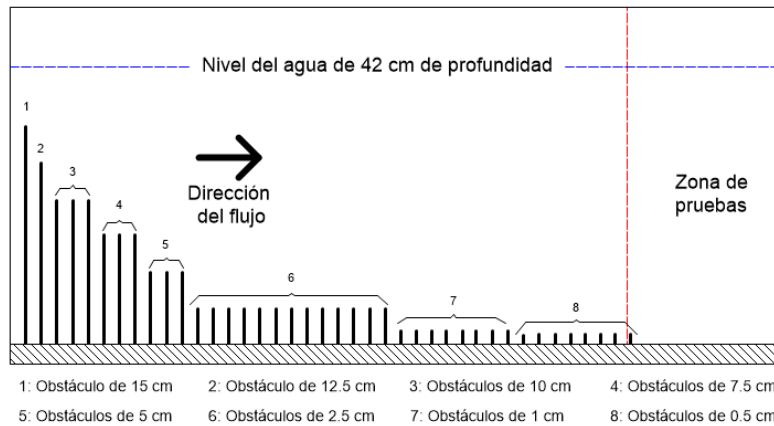


Figura 2.7: Esquema representativo del arreglo de obstáculos usados a lo largo del canal para generar el perfil de velocidades.



Figura 2.8: Fotografía del arreglo de obstáculos usados a lo largo del canal para generar el perfil de velocidades.

El perfil vertical de velocidad encontrado mediante el arreglo de obstáculos tiene un $\alpha = 0.180 \pm 0.002$ y el perfil vertical de intensidad de turbulencia en promedio es de un $22.507 \pm 4.403\%$ (Figura 2.9). Ambos perfiles representan una capa límite atmosférica de una zona de terrenos con cultivos y con edificios distribuidos (Figura 2.6). La velocidad axial a la altura exterior de la habitación $U_w = 0.094 \pm 0.017$ m/s.

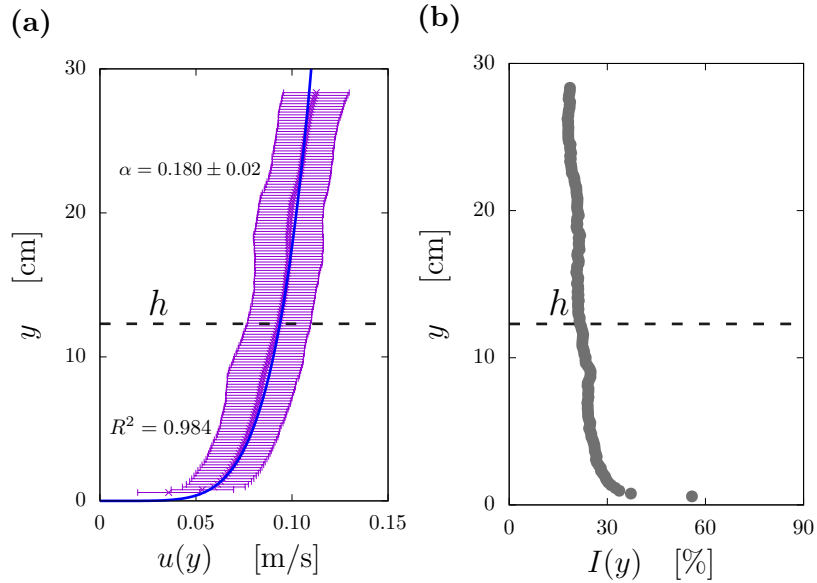


Figura 2.9: Perfiles verticales: (a) de velocidad axial ($u(y)$), se indica el promedio experimental de la componente axial de la velocidad con su desviación estándar, la línea azul es el ajuste a los datos experimentales para la ley exponencial de Hellman ($R^2 = 0.984$); y (b) de intensidad de turbulencia ($I(y)$).

2.3.3. Similitud dinámica

La similitud dinámica implica que las relaciones de fuerzas en el modelo a escala y real sean las mismas (Fox y Donald, 1983). El agua y el aire son fluidos newtonianos, los flujos se pueden considerar incompresibles e isotérmicos y se puede despreciar el efecto de superficie libre en el canal de agua, por lo cual la similitud dinámica está dada por la igualdad del número de Reynolds en ambas escalas. El número de Reynolds (Re) es la relación entre la fuerza inercial y viscosa (Mott, 2006).

Para tener similitud dinámica entre los experimentos y la escala real, el número de Reynolds en los experimentos en el canal de agua es igual al número de Reynolds de la escala real con aire. Entonces la velocidad a escala real (U_a) a la altura de la habitación (h_a) lejos de la misma, sin perturbación está dada por

$$U_a = \frac{\nu_a h}{\nu_w h_a} U_w, \quad (2.5)$$

donde U_w es la velocidad característica en el canal de agua, corresponde a la velocidad a la altura característica (h , la altura exterior de la habitación) medida sin la habitación, ν_w es la viscosidad cinemática del agua para la temperatura a la que se realizó el experimento (Tabla 2.3) y ν_a es la viscosidad cinemática del aire a 30 °C (1.608×10^{-5} [m²/s]).

Tabla 2.3: Viscosidad del agua a 1 atm de 26 °C a 30 °C (White, 2008).

Temperatura T_w °C	Viscosidad cinemática del agua ν_w [m ² /s]
26.0	8.756×10^{-7}
26.5	8.664×10^{-7}
27.0	8.572×10^{-7}
28.0	8.388×10^{-7}
28.5	8.296×10^{-7}
29.0	8.204×10^{-7}
30.0	8.020×10^{-7}

Análisis de resultados experimentales

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados experimentales de acuerdo con tres parámetros de evaluación de la ventilación natural: el flujo de ventilación, el porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa y el índice de homogeneidad.

3.1. Flujo de ventilación

El flujo volumétrico de entrada por la ventana (F_{iv}), el flujo volumétrico de salida por la ventana (F_{sv}), el flujo volumétrico de entrada por el WE (F_{ie}) y el flujo volumétrico de salida por el WE (F_{se}) fueron calculados usando 100 campos vectoriales de velocidad, cada campo vectorial de velocidad con áreas de interrogación de 16 píxeles \times 16 píxeles.

El cálculo de los flujos volumétricos se llevó a cabo suponiendo que el flujo es bidimensional, esto se hizo debido a que la velocidad sólo fue medida sobre el plano central vertical (Figura 3.1). Para el cálculo de F_{iv} y F_{sv} se consideraron tres columnas de 27 vectores de velocidad (81 vectores en total) en cada campo vectorial, para cada campo se obtuvo el promedio espacial de la componente axial de la velocidad de entrada y de salida sobre la ventana y se multiplicó cada uno por el área transversal de la misma. Una vez calculado el promedio espacial de los flujos se calculó el promedio temporal para F_{iv} y F_{sv} .

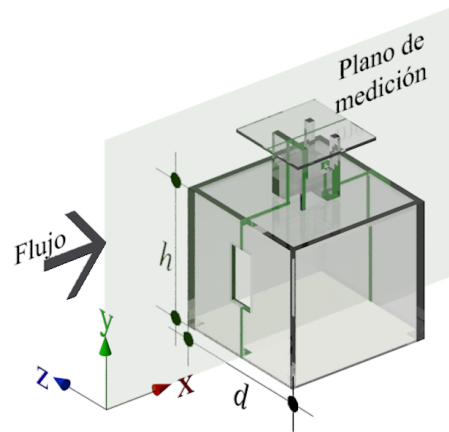


Figura 3.1: Vista isométrica del plano de medición, donde $h = 0.123$ m es la altura externa del modelo y $d = 0.132$ m es el ancho.

Un procedimiento semejante a lo anterior fue utilizado para el cálculo de F_{ie} y F_{se} . En este caso se consideró una fila de vectores de velocidad por debajo del ducto del WE, debido a que los bordes de acrílico del WE y las paredes de la habitación produjeron reflejos, por lo que mediciones de velocidad en esa zona no son confiables. Los vectores de velocidad que se tomaron en cuenta para los cálculos de F_{iv} , F_{sv} , F_{ie} y F_{se} se muestran en la Figura 3.2. El flujo volumétrico total de entrada (F_i) y el flujo volumétrico total de salida (F_s) por la habitación se calcularon como

$$F_i = F_{iv} + F_{ie} \quad (3.1)$$

$$F_s = F_{sv} + F_{se}. \quad (3.2)$$

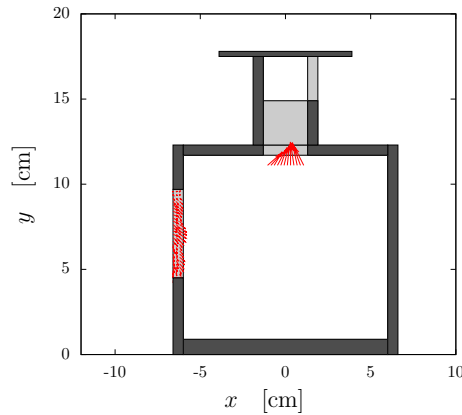


Figura 3.2: Los vectores en rojo representan los vectores que se tomaron en cuenta para el cálculo de flujos de entrada y salida por la ventana y por el WE.

El flujo de ventilación en la habitación (F) se calculó como

$$F = \frac{|F_i + F_s|}{2}. \quad (3.3)$$

La Tabla 3.1 muestra los valores de F_{iv} , F_{sv} , F_{ie} , F_{se} , F_i , F_s y F para cada caso de estudio. Puede notarse que $F_i \neq F_s$, contrario a lo que se deduce de la ley de conservación de masa, esto se debe a que el flujo es tridimensional y no bidimensional como se supuso para el cálculo de los flujos. Por esta razón F se calculó como el promedio de F_i y de F_s . Es importante mencionar que F para los diez casos de estudio es mayor que F del caso sin WE con ventana cuadrada denominado caso línea base (BL , base line, por sus siglas en inglés) del trabajo reportado por Cruz-Salas *et al.* (2014), donde $F = 0.021 \text{ m}^3/\text{h}$. Como se esperaba $CA5$ es el caso que mayor F presenta. Para los casos con ventana cuadrada puede notarse que $F_{ie} > F_{iv}$ y que para su homólogo (R) $F_{ie} \gg F_{iv}$, esto muestra que el flujo a través del WE está sobrevaluado.

El valor de F para cada caso de estudio se presenta en la Figura 3.3. Claramente se observa que los casos de estudio con ventana cuadrada (C) tienen mayor flujo de ventilación que los casos de estudio con ventana rectangular (R). Esto se debe a que la ventana cuadrada tiene el doble de área que la ventana rectangular.

Tabla 3.1: Evaluación de la ventilación mediante flujo de entrada (F_i), flujo de salida (F_s) y flujo de ventilación (F) para cada caso de estudio.

Casos	F_{iv} [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]	F_{sv} [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]	F_{ie} [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]	F_{se} [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]	F_i [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]	F_s [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]	F [$\times 10^{-3}$ m ³ /h]
RA1	34 ± 5	8±3	1±0.1	90±14	35±6	97±14	66±16
RA2	36 ± 1	7±3	1±0.2	115±19	38±10	123±19	80±22
RA3	18 ± 4	9±2	3±0.4	165±25	21±5	174±25	97±26
RA4	26 ± 5	10±2	2±0.3	162±22	28±6	172±22	100±22
RA5	31 ± 5	11±3	4±0.5	251±29	35±6	262±29	149±30
CA1	69 ± 17	9±2	2±0.5	97±20	71±17	106±20	88±26
CA2	97 ± 14	10±6	2±0.3	145±23	98±15	155±23	127±27
CA3	169 ± 23	4±2	3±0.5	190±30	172±23	194±30	183±38
CA4	120 ± 22	15±8	3±0.4	246±33	123±24	261±33	192±41
CA5	172 ± 26	13±4	4±0.6	357±48	176±26	370±48	273±54

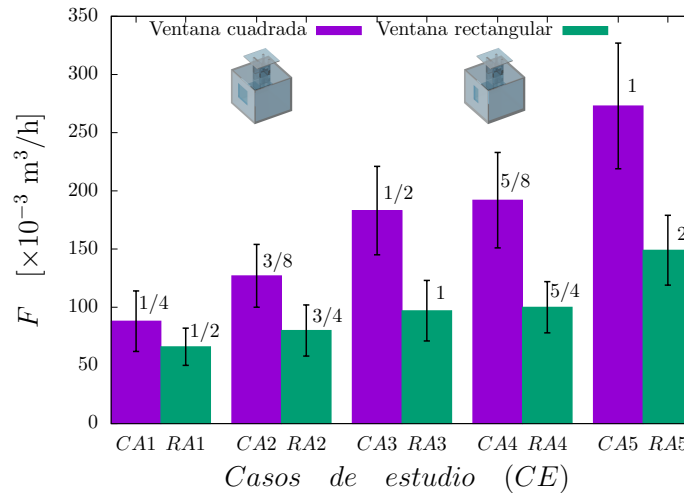


Figura 3.3: Flujo de ventilación (F) para los diez casos de estudio. Los números sobre las barras representan la relación de áreas A_D/A_V .

Se investigó la correlación de F con los parámetros geométricos A_D , A_O y las relaciones de área (A_D/A_V y A_O/A_V). En la Figura 3.4a se muestra F como función de A_D para los diez casos de estudio. Como se esperaba, F aumenta conforme aumenta A_D , siendo mayor en los casos de estudio con C que en el respectivo R . En la Figura 3.4b se muestra a F como función de A_O , también como se esperaba, F aumenta conforme aumenta A_O .

Las Figuras 3.5a y 3.5b muestran el efecto de variar las relaciones de áreas A_D/A_V y A_O/A_V , respectivamente, sobre F . Puede notarse que F en los casos de estudio con C es mayor que su respectivo R . Si la relación de áreas A_D/A_V y A_O/A_V aumenta también F .

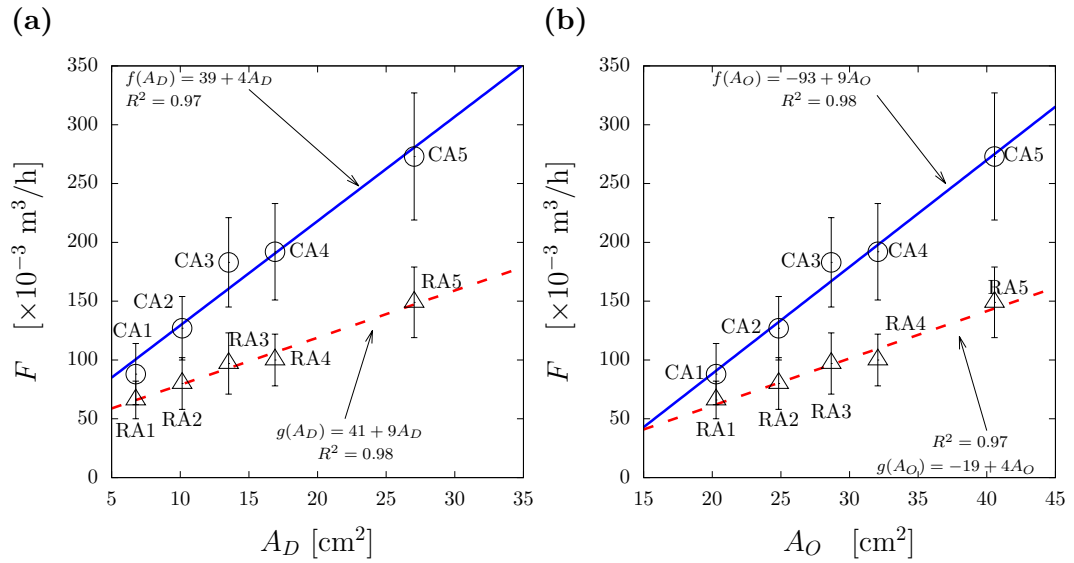


Figura 3.4: Flujo de ventilación (F) como función de (a) el área de ducto del WE (A_D) y (b) el área total de abertura del WE (A_O).

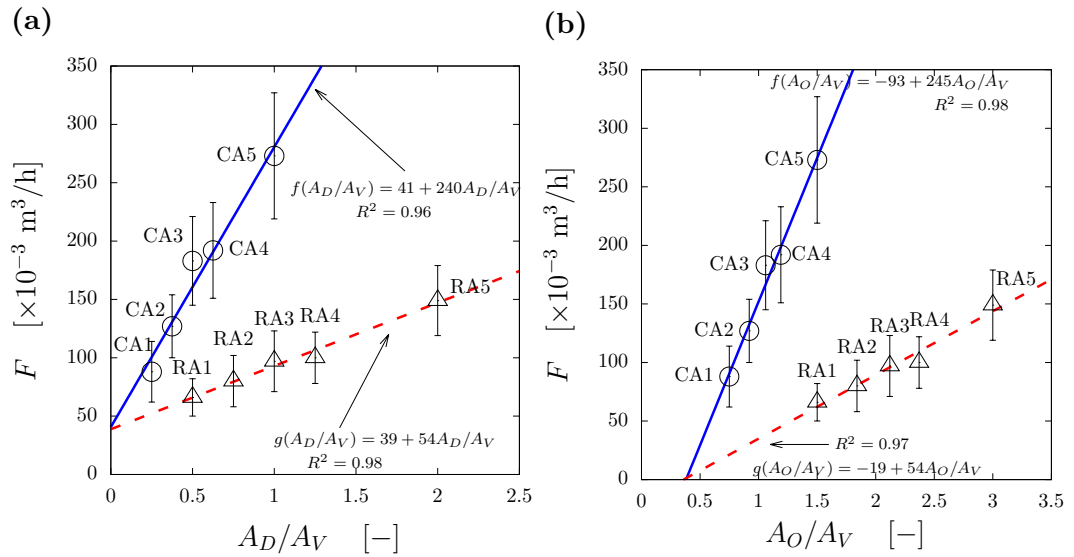


Figura 3.5: Flujo de ventilación (F) como función de las relaciones de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

Otro parámetro de evaluación de la ventilación es el número de cambios de aire por hora (ACH, air changes per hour, por sus siglas en inglés). ACH representa el

número de veces por hora que el volumen de aire al interior de un espacio es removido por el aire que entra por la ventilación (Mundo HVACR, 2017). El ACH para cada caso de estudio en el experimento (ACH_e) fue calculado mediante la relación de F/V_e . Donde V_e es el volumen interior del modelo a escala y F el flujo de ventilación para el modelo a escala. Para calcular el ACH para el modelo real (ACH_r), primero debe calcularse la velocidad de entrada por la ventana del modelo real (U_r). Por similitud dinámica, U_r está dada por

$$U_r = \left(\frac{\nu_a}{\nu_w f} \right) U_e, \quad (3.4)$$

donde $U_e = F/A_e$, A_e es el área de la ventana para el modelo a escala, $f = h_a/h$ y tiene un valor de 25. El producto de U_r con el área de la ventana en el modelo real (A_r) da como resultado el flujo de ventilación para el modelo real (F_r). F_r a su vez debe ser proporcional al flujo neto de entrada por la ventana del modelo a escala (F), de donde se deduce que

$$F_r = \left(\frac{U_r f^2}{U_e} \right) F. \quad (3.5)$$

Por lo tanto, ACH para el modelo a escala real (ACH_r) puede ser representado como una proporción de ACH_e .

$$ACH_r = \frac{F_r}{V_r} = \left(\frac{U_r}{U_e f} \right) ACH_e. \quad (3.6)$$

Los valores de ACH_e , ACH_r están registrados en la Tabla 3.2. Los resultados indican que los ACH son suficientes para mantener una buena calidad del aire en la habitación a escala real ya que en el peor de los casos se tiene hasta 4 veces lo recomendado para habitaciones por ASHRAE (2004).

Tabla 3.2: Cambios de aire por hora para los diez casos de estudio a escala real.

Casos	ACH_e [1/h]	ACH_r [1/h]	$ACH_r/0.35$ [-]
RA1	42.38±15.88	1.24±0.29	3.54±0.83
RA2	51.58±19.33	1.51±0.41	4.31±1.17
RA3	62.53±23.43	1.84±0.49	5.26±1.39
RA4	64.42±24.14	1.90±0.42	5.42±1.21
RA5	95.56±35.81	2.83±0.57	8.10±1.64
CA1	56.90±21.33	1.74±0.51	4.98±1.45
CA2	81.65±30.60	2.50±0.54	7.15±1.53
CA3	117.62±44.08	3.58±0.74	10.21±2.11
CA4	123.41±46.25	3.75±0.80	10.72±2.28
CA5	175.72±65.85	5.30±1.05	15.13±3.01

3.2. Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa

El porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) está definido como el área del plano central interior de la habitación por debajo de 7.2 cm (1.8 m a escala real), definida como la zona habitable, con magnitud de velocidad mayor a una magnitud de velocidad de referencia, con respecto al área de la zona habitable (Cruz-Salas *et al.*, 2014). P_a se calculó utilizando el promedio temporal de 100 campos vectoriales de velocidad con una resolución de 32 píxeles \times 32 píxeles. La velocidad de referencia se determina a partir de la máxima magnitud de la velocidad al interior de la habitación sin WE con ventana cuadrada a barlovento, caso línea base del estudio reportado en Cruz-Salas *et al.* (2014). Este estudio se realizó a una temperatura del agua de 30 °C. La velocidad de referencia y la velocidad característica reportadas en dicho estudio son $M_m = 0.008$ m/s y $U_m = 0.089$ m/s, respectivamente. La magnitud de referencia para este trabajo (M_w) se obtiene por similitud dinámica con los experimentos realizados por Cruz-Salas *et al.* (2014). Aunque ambos experimentos fueron realizados a la misma escala en agua, la temperatura del agua no es la misma, por lo que la viscosidad cambia. La similitud dinámica implica que el número de Reynolds para los experimentos de este trabajo (Re_w) debe ser igual al número de Reynolds de los experimentos del trabajo mencionado (Re_m), de donde se obtiene

$$M_w = \frac{\nu_w}{\nu_m} M_m. \quad (3.7)$$

Para cada caso de estudio, P_a se calculó utilizando la magnitud de referencia M_w correspondiente. En la Figura 3.6 se muestra el campo vectorial de velocidad en el plano central vertical para cada caso. Se señalan los vectores con magnitud mayor a la magnitud de referencia M_w dentro de la zona habitable con una altura menor a 1.80 m en la escala real (vectores en color rojo) y se indica el valor de P_a . Los valores de T_w , Re y P_a se incluyen en la Tabla 3.3. Se observa que todos los casos de estudio tienen valores altos de P_a por encima del 80% y que todos los casos de estudio tienen un P_a mucho mayor en comparación con BL que tiene un $P_a = 7\%$ (Cruz-Salas *et al.*, 2014). Se puede notar que el caso de estudio $RA3$ es el que tiene mayor P_a (98%). El segundo valor más alto de P_a se obtuvo con el caso $RA1$ (97%). Le sigue el caso de estudio $RA5$ con 95%. Después P_a decrece del 94% al 91% para los casos $CA2$, $CA5$, $RA2$ y $CA4$. Los peores casos de estudio para P_a son $RA4$, $CA1$ y $CA3$ con 88%, 85% y 84%, respectivamente.

30 3.2. Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa

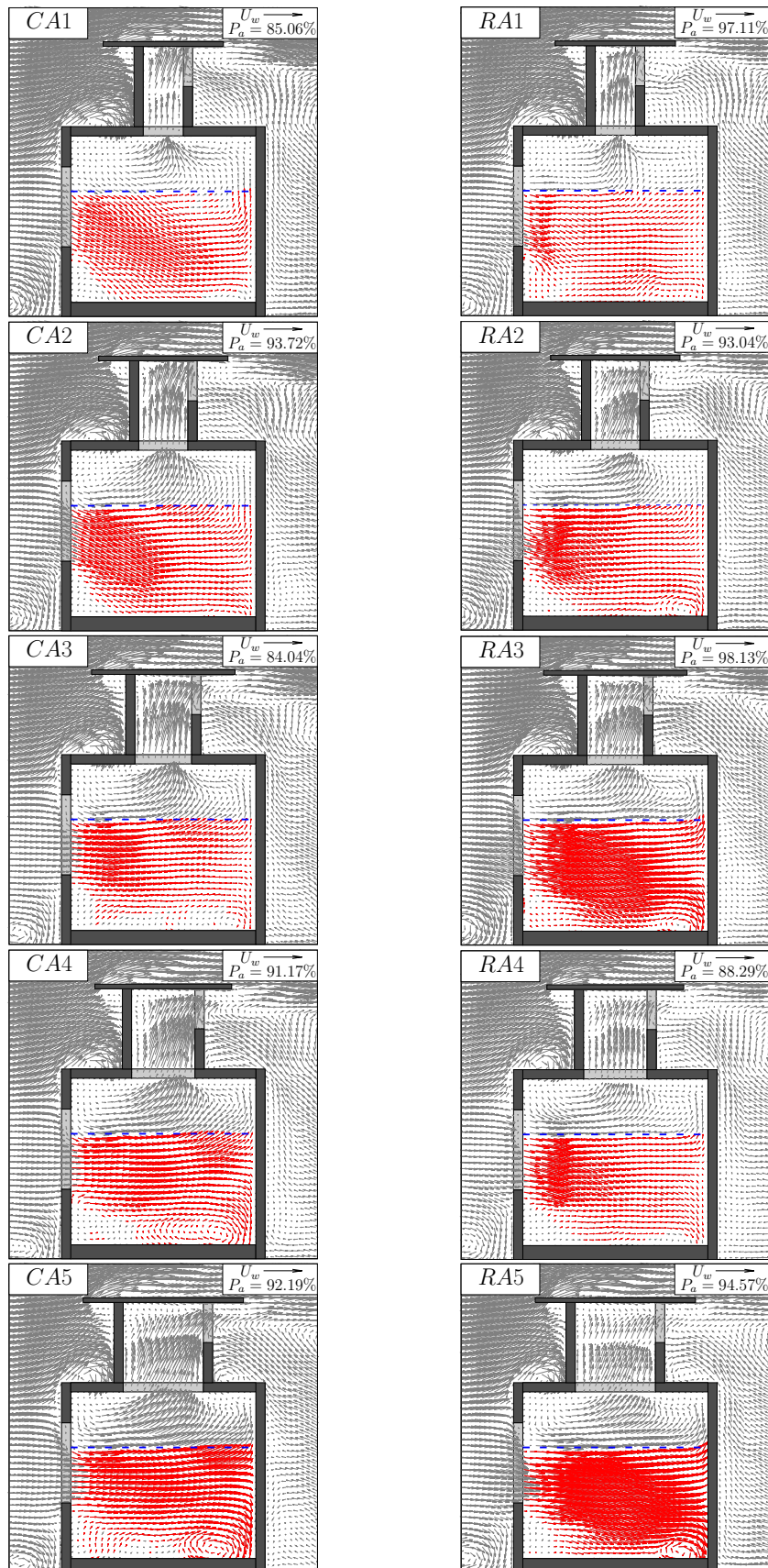


Figura 3.6: Campos vectoriales de velocidad para los diez casos de estudio. La línea de color azul delimita la zona habitable.

Tabla 3.3: Temperatura de trabajo (T_w), número de Reynolds (Re) y evaluación de la ventilación mediante porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a).

Casos	T_w [°C]	Re	P_a [%]
RA1	26.0	14.06×10^3	97.1 ± 0.4
RA2	26.0	14.06×10^3	93.0 ± 0.4
RA3	26.5	13.90×10^3	98.1 ± 0.4
RA4	26.5	13.90×10^3	88.3 ± 0.4
RA5	27.0	13.75×10^3	94.6 ± 0.4
CA1	29.0	13.17×10^3	85.1 ± 0.3
CA2	29.0	13.17×10^3	93.7 ± 0.4
CA3	28.5	13.31×10^3	84.0 ± 0.3
CA4	28.5	13.31×10^3	91.2 ± 0.4
CA5	28.0	13.46×10^3	92.2 ± 0.4

El valor de P_a para cada caso de estudio se presenta en la Figura 3.7. En esta figura se observa que P_a no es mayor en todos los casos con ventana cuadrada que los casos con ventana rectangular como se obtuvo para F .

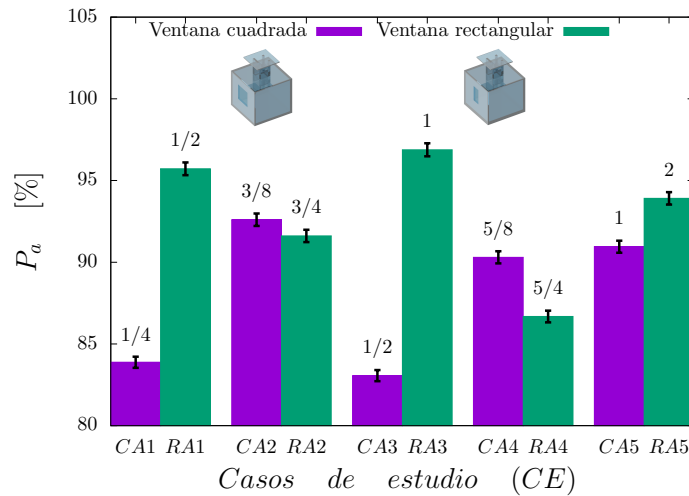


Figura 3.7: Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) para los diez casos de estudio, tomado de la Tabla 3.3. Los números sobre las barras representan la relación de áreas A_D/A_V .

32 3.2. Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa

Al igual que F , P_a fue correlacionado con parámetros geométricos. El efecto de variar A_D y A_O sobre P_a se presentan en las Figuras 3.8a y 3.8b. Puede notarse que P_a no tiene correlación directa con A_D y A_O . Sin embargo, al tomar a los casos de estudio con C y con R como un solo grupo se puede observar que P_a tiene una ligera tendencia a aumentar con el aumento de estos parámetros. Tampoco hay correlación directa sobre P_a si A_D/A_V o A_O/A_V varían pero si se considerara a todos los casos de estudio como un solo grupo, P_a tiene una ligera tendencia a aumentar con el aumento de estos parámetros (Figuras 3.9a y 3.9b). El hecho de que no se encuentra correlación de P_a con los parámetros geométricos puede deberse a que solo se está evaluando el plano central. Por lo tanto se recomienda realizar simulaciones numéricas (CFD) donde se considere todo el volumen de la habitación.

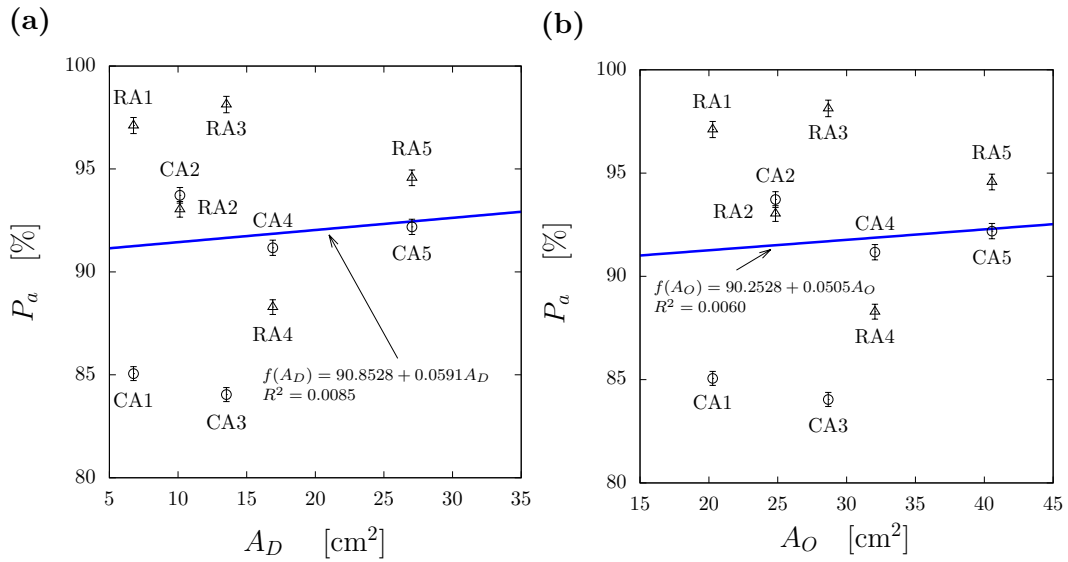


Figura 3.8: Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) como función de (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).

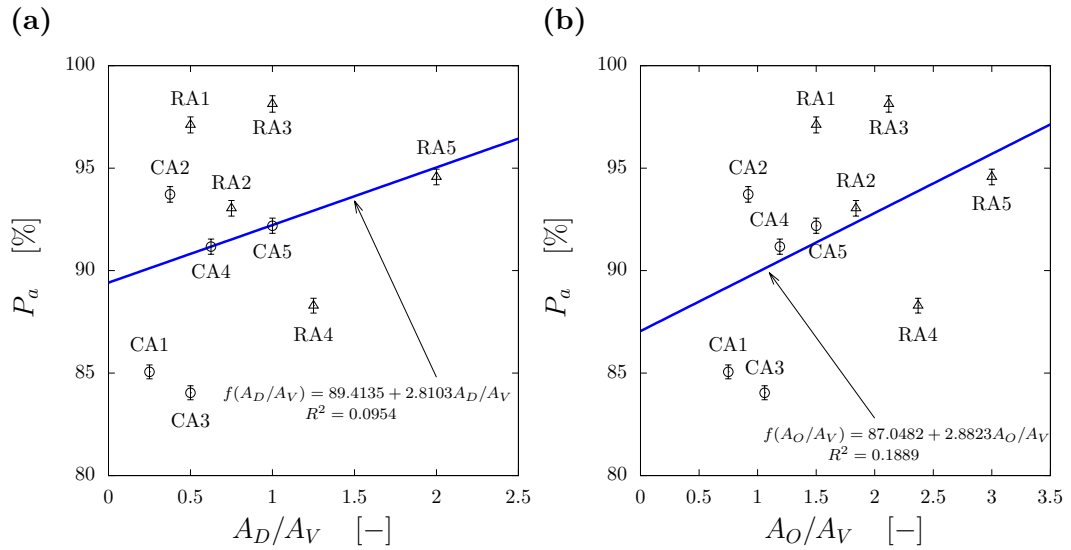


Figura 3.9: Porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) como función de las relaciones de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

3.3. Índice de homogeneidad

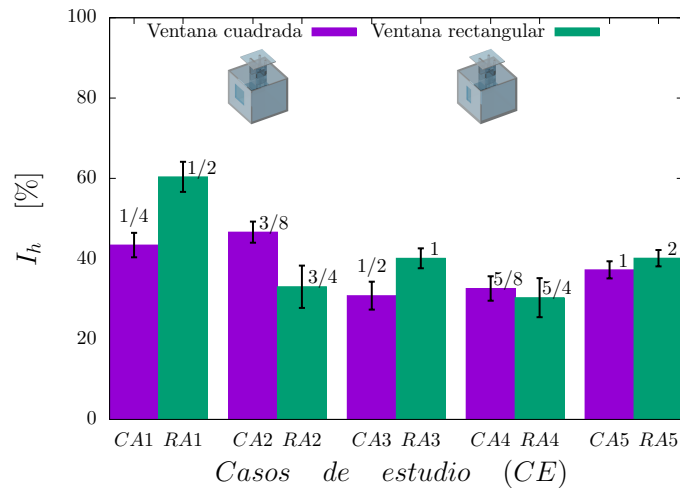
El índice de homogeneidad (I_h) es un parámetro que mide que tan uniforme es la magnitud de velocidad del aire en la zona habitable. En los experimentos se utilizó agua como fluido de trabajo, por lo que los resultados de I_h se refieren a la magnitud del agua. I_h fue calculado tomando en cuenta el promedio de la magnitud de la velocidad (\bar{U}) y la desviación estándar de la velocidad (σ_U) sobre el plano central. Un valor cercano a uno de I_h indica una distribución uniforme de la velocidad del aire al interior de la habitación.

$$I_h = 1 - \frac{\sigma_U}{\bar{U}}, \quad (3.8)$$

La Tabla 3.10 indica el valor de I_h expresado en porcentaje para cada caso de estudio. Puede observarse que el caso de estudio con mayor I_h es $RA1$ (60%). El segundo valor más alto es el caso $CA2$ (47%). El tercer valor más alto le corresponde al caso $CA1$ con 43%. Le siguen los casos $RA5$ y $RA3$ con 40% cada uno. Después el I_h disminuye de 37% a 32% para los casos $CA5$, $RA2$ y $CA4$. Los casos de estudio con menor valor de I_h son $CA3$ y $RA4$ con valores de 30%. La Figura 3.10 muestra que no hay dependencia de I_h con la forma de la ventana (C o R).

Tabla 3.4: Evaluación de la ventilación mediante el índice de homogeneidad (I_h).

Casos	I_h [%]
RA1	60 ± 4
RA2	33 ± 5
RA3	40 ± 2
RA4	30 ± 5
RA5	40 ± 2
CA1	43 ± 3
CA2	47 ± 3
CA3	31 ± 3
CA4	33 ± 3
CA5	37 ± 2

Figura 3.10: Variación del índice de homogeneidad (I_h) de cada caso. Los números sobre las barras representan la relación de áreas A_D/A_V .

Los parámetros geométricos descritos en las anteriores secciones fueron utilizados para buscar una correlación con I_h . En las Figuras 3.11a, 3.11b, 3.12a y 3.12b puede observarse que I_h no tiene correlación directa con los parámetros geométricos cuando se consideran por separado los casos de estudio C y R , pero si se consideran a estos casos como un solo grupo, puede observarse una ligera tendencia de I_h hacia descender conforme aumentan estos parámetros.

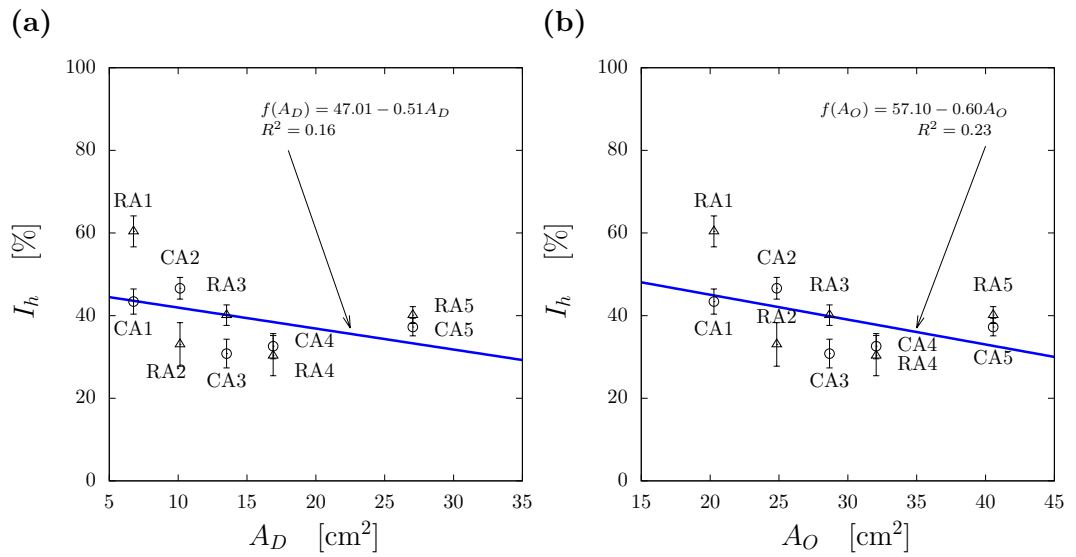


Figura 3.11: Índice de homogeneidad (I_h) como función de (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).

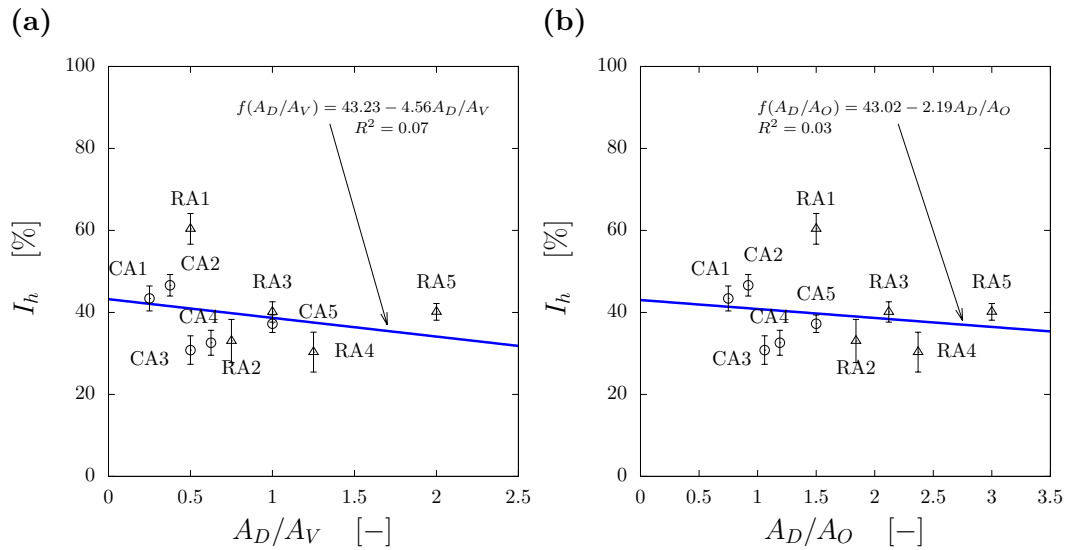


Figura 3.12: Índice de homogeneidad (I_h) como función de las relaciones de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

Validación de simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD, computational fluid dynamics, por sus siglas en inglés) son una herramienta para resolver las ecuaciones de balance de un flujo de fluido. En este capítulo se presenta la metodología de validación de la simulaciones CFD para el estudio de la ventilación natural, realizadas en el programa comercial *ANSYS-Fluent. V 17*, de una habitación con dos diferentes geometrías de ventana y cinco tamaños de WE (Sección 2.1). Para realizar la validación de las simulaciones numéricas se generó un modelo numérico de referencia con las características geométricas, agua como fluido de trabajo y de condición de frontera de un caso de estudio experimental, el caso CA1 (Sección 2.1). La metodología de validación incluye la generación de los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia tridimensionales en un dominio largo y para un caso de estudio de referencia utilizando un dominio corto, abarca el análisis de las condiciones de frontera, criterios de convergencia, gradientes en dirección de flujo y variación de parámetros de simulación; y la validación comparando los resultados numéricos con los experimentales.

4.1. Modelo numérico

En el estudio numérico se utilizaron las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS, por sus siglas en inglés, Reynolds-Averaged Navier-Stokes) (Alfonsi, 2009) en estado estacionario con diferentes modelos de turbulencia. Para resolver estas ecuaciones se utilizaron el método SIMPLEC para el desacople presión-velocidad, el esquema de discretización de segundo orden para la presión y el esquema

de discretización de segundo orden Upwind para los términos convectivos de las ecuaciones de balance (Ramponi y Blocken, 2012). Se utilizaron los factores de relajación preestablecidos por *ANSYS-Fluent* de 0.2, 0.5, 0.5 y 0.5 para la presión, ecuación de momento, energía cinética de la turbulencia y disipación específica de la turbulencia, respectivamente.

4.2. Generación de perfiles tridimensionales

En los experimentos se obtuvieron, en el plano central de la zona de pruebas, los perfiles verticales de velocidad (u), intensidad de turbulencia (I), energía cinética de la turbulencia (k), tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia (ϵ) y disipación específica de turbulencia (ω). La variación de estos perfiles como función de la coordenada transversal al flujo por efecto de las paredes, es decir los perfiles tridimensionales se deben conocer para determinar la condición de frontera de entrada en el modelo numérico. Para obtener los perfiles tridimensionales se generó un dominio computacional que reproduce la geometría y condiciones experimentales del canal de agua, sin el modelo a escala. A este dominio se le nombró dominio largo (DL) computacional. El modelo de turbulencia *SST k - ω* fue utilizado para realizar estas simulaciones debido a que este modelo ha sido utilizado para estudios similares a este (Ramponi y Blocken, 2012; Perén *et al.*, 2016; Castillo y Huelsz, 2017; van Hooff *et al.*, 2017). Como condición de entrada del DL se pusieron los perfiles verticales experimentales de u , k y ω . El perfil u a la entrada del DL fue modificado en un proceso iterativo hasta que entre el perfil u en el plano central obtenido en la zona correspondiente a la zona de pruebas experimental y el perfil experimental medido tuvieran una diferencia menor al 3%.

4.2.1. Dominio largo computacional

El DL computacional se generó utilizando los valores del ancho y la longitud del canal (Figura 2.3a) y la altura correspondiente al tirante de agua (Figura 4.1). El DL se construyó a través de la técnica de mallado por extrusión (van Hooff y Blocken, 2010). El mallado con 63,250 celdas se usó como malla base (DL-bm) y se creó siguiendo las recomendaciones de Franke *et al.* (2007). Para determinar la influencia del refinamiento de malla en la solución numérica, dos dominios computacionales a partir del DL-bm con distinto refinamiento de malla fueron creados. El primero con 33,120 celdas, se le nombró malla gruesa (DL-cm) y el segundo con 119,691 celdas, se le denominó malla fina (DL-fm). Ambas mallas fueron calculadas con los factores

de refinamiento de malla $r_{cm,bm}$ y $r_{fm,bm}$ para DL-cm y DL-fm, respectivamente. Los factores de refinamiento de malla se aplican a cada coordenada espacial del dominio.

$$r_{cm,bm} = (q_{cm,bm})^{(1/D)} \quad y \quad r_{fm,bm} = (q_{fm,bm})^{(1/D)}, \quad (4.1)$$

donde $q_{cm,bm}$ y $q_{fm,bm}$ son las relaciones entre el número de celdas de cada malla con respecto al número de celdas del DL-bm y D es el valor de la dimensión espacial del dominio, en estas simulaciones $D = 3$. Para $q_{cm,bm} = 0.5$ y $q_{fm,bm} = 2$ se utilizaron los valores recomendados por Franke *et al.* (2007). Para DL-cm y DL-fm se obtuvieron valores de $r_{cm,bm} = 0.79$ y $r_{fm,bm} = 1.26$, respectivamente. La Figura 4.1 muestra el DL y los tres tamaños de malla.

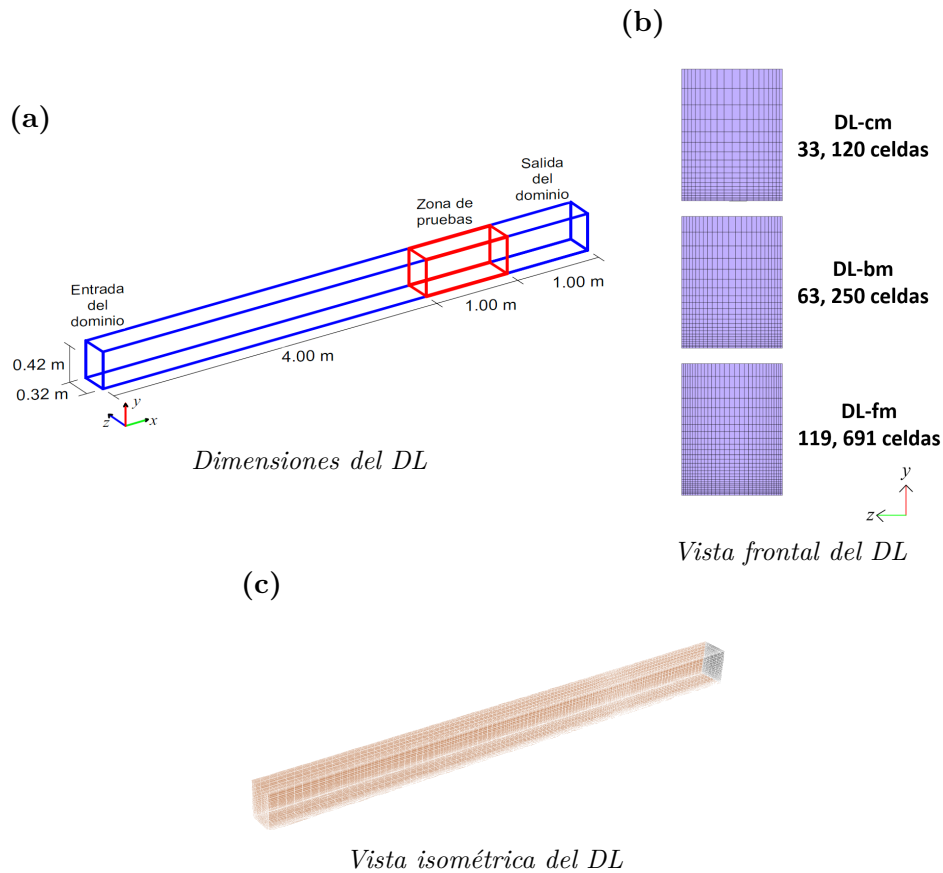


Figura 4.1: Dominio largo computacional: (a) vista en isométrico con dimensiones del DL-bm; (b) vista frontal de los tres refinamientos de malla DL-cm con 33,120 celdas, DL-bm con 63,250 celdas y DL-fm con 119,691 celdas; (c) vista en isométrico del DL-bm con mallado en los contornos.

4.2.2. Condiciones de frontera

Para la condición de frontera de entrada del DL se utilizaron los perfiles de $u(y)$ y $k(y)$ reportados en el Capítulo 2. Los perfiles ϵ y ω se obtienen con expresiones reportadas por Tominaga *et al.* (2008).

$$\epsilon(y) = \frac{U_{ABL}^{*3}}{\kappa(y + y_0)}, \quad (4.2)$$

$$\omega(y) = \frac{\epsilon(y)}{C_\mu k(y)}. \quad (4.3)$$

En la condición de frontera a la salida del DL se utilizó un gradiente de presión en dirección del flujo igual a cero. Para la condición de frontera superior se utilizó la condición de libre deslizamiento, es decir la velocidad normal y los gradientes normales iguales a cero. Para el piso y las paredes laterales, se utilizaron condiciones de no deslizamiento, mediante funciones de pared con una altura de rugosidad (k_s) y una constante de rugosidad (C_s) (ANSYSFluent, 2017; Blocken *et al.*, 2007). Para las paredes laterales se aplicaron $k_s = 0$ y $C_s = 0.5$ (ANSYSFluent, 2006a) y para el piso se calcularon mediante

$$k_s = \frac{\Delta y}{2.1}, \quad (4.4)$$

donde Δy es la altura de la primera celda en el dominio, 2.1 se definió para cumplir con la condición de que k_s debe ser menor a la altura de la mitad de la primera celda de control (Blocken *et al.*, 2007). El valor obtenido de k_s para el piso es de 2 mm.

La constante de rugosidad se calcula mediante (Blocken *et al.*, 2007)

$$C_s = \frac{9.793y_0}{k_s}, \quad (4.5)$$

En el manual de usuario de Fluent 6.1 (ANSYSFluent, 2006a) recomienda que C_s debe estar en el intervalo de [0.5,1.0]. El valor obtenido para $C_s = 2.82$ es mayor al valor máximo recomendado. Sin embargo en la literatura en estudios de ventilación natural se ha reportado un valor de $C_s = 7$ (Perén *et al.*, 2016).

Las funciones de pared permiten modelar la capa límite cercana al piso (ANSYSFluent, 2006b; Craft, 2012). Se calculó la distancia adimensional (y^+) mediante la expresión (Craft, 2012)

$$y^+ = \frac{y_p U_{ABL}^*}{\nu}, \quad (4.6)$$

donde $y_p = \Delta y/2$. Para DL, $y^+ = 55.3$, valor que se encuentra dentro del intervalo $[30, 1000]$ recomendado por Blocken *et al.* (2007).

4.2.3. Análisis de convergencia

En las simulaciones se realizaron 10,000 iteraciones. Para determinar la convergencia de los resultados numéricos se utilizaron dos parámetros: los valores de los residuales escalados y el valor de u en un punto de interés. El punto de interés considerado está localizado en el plano central a 4.5 m de la entrada del DL dentro de la zona de pruebas y a una altura $h = 12.3$ cm. En la Figura 4.2 se observa que los residuales escalados y u se mantienen prácticamente constantes a partir de la iteración 300. Los valores de los residuales obtenidos son: de la ecuación de continuidad menor a 10^{-4} , de u , k y ω menor a 10^{-7} y de v y w menor a 10^{-8} .

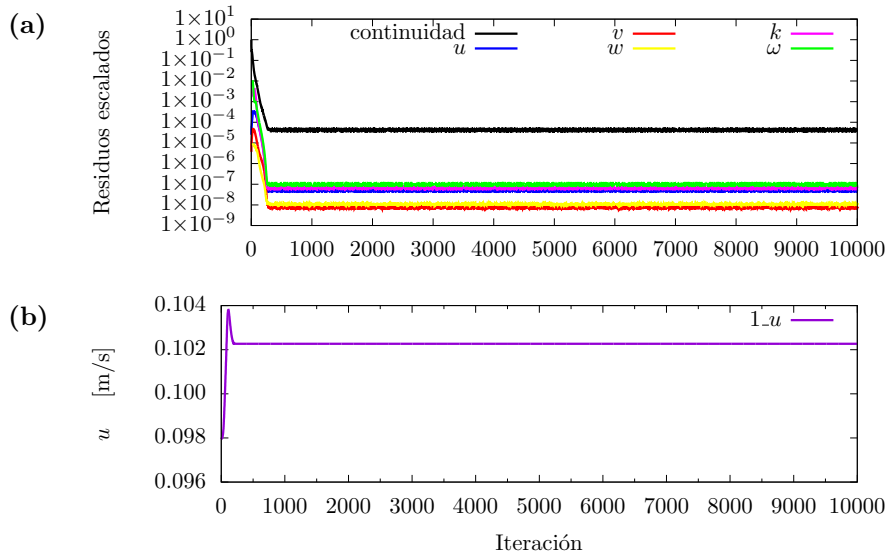


Figura 4.2: Convergencia en el DL-bm para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) velocidad axial en un punto de interés.

4.2.4. Perfiles tridimensionales

Se llevó a cabo un análisis de los perfiles de velocidad a lo largo del DL para determinar la distancia a la que el flujo está desarrollado. El análisis consistió en obtener la forma del perfil de velocidad en las líneas centrales (horizontal y vertical) de un plano perpendicular al flujo. El primer plano se localiza en la entrada del canal ($0L$); el segundo plano a la mitad del canal ($0.5L$); el tercer plano a $3/4$ partes del canal ($0.75L$) y el cuarto plano a 98% del canal ($0.98L$) Figura 4.3. Todos los perfiles horizontales fueron obtenidos a la mitad de la altura del DL.

Los perfiles verticales y horizontales obtenidos en las diferentes planos se presentan en la Figura 4.4. La diferencia $E_{a,b}$ entre los perfiles obtenidos en la posición a con respecto a los de la posición b fueron calculados con la expresión

$$E_{a,b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{u_a - u_b}{u_b}, \quad (4.7)$$

donde u_a y u_b son las componentes de la velocidad para el perfil en la posición a y en la posición b , respectivamente. En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos de $E_{50,98}$ y $E_{75,98}$ para el DL-bm. En general se observa una diferencia menor al 2.5% .

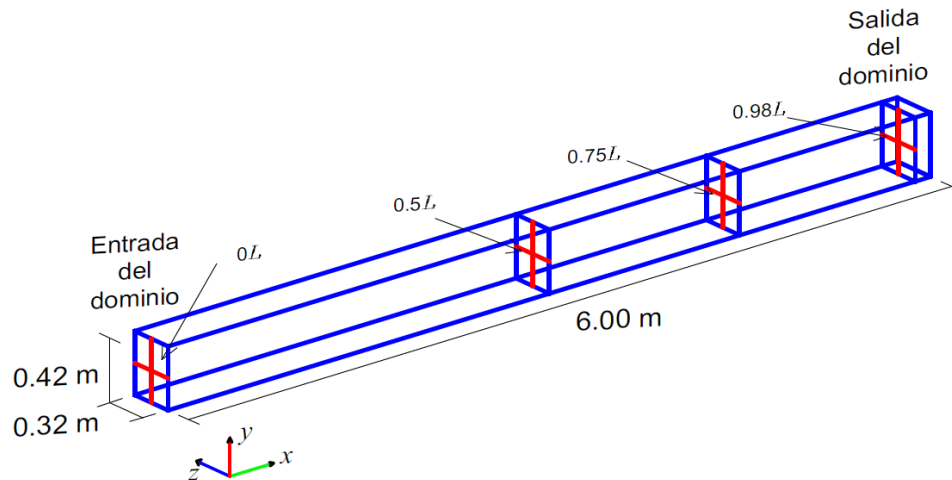


Figura 4.3: Esquema del dominio largo con los planos a diferente distancia de la entrada del canal.

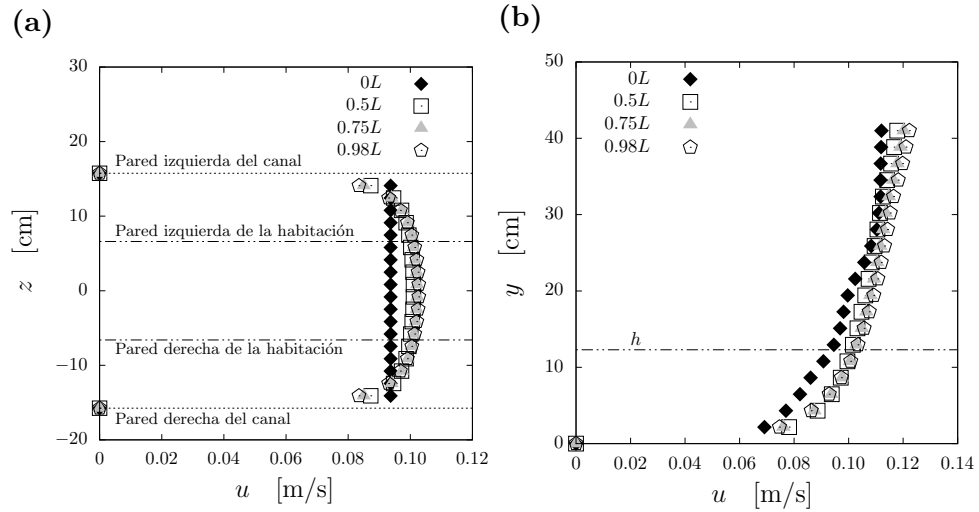


Figura 4.4: Perfiles a) horizontales y b) verticales de velocidad para el dominio base del canal (DL-bm) a $0L$, a $0.5L$, a $0.75L$ y a $0.98L$.

Tabla 4.1: Diferencia entre perfiles obtenidos $0.50L$ y $0.98L$ ($E_{50,98}$), y error entre perfiles obtenidos a $0.75L$ y $0.98L$ ($E_{75,98}$).

Perfil	$E_{50,98}$	$E_{75,98}$
Horizontal	1.1578	0.3310
Vertical	2.4867	1.0147

Para el análisis de la sensibilidad de tamaño de malla en el perfil de velocidad se utilizaron los perfiles obtenidos en $0.98L$. La Figura 4.5 muestra los perfiles horizontales y verticales de velocidad para las tres mallas del DL. La Tabla 4.2 muestra la diferencia entre perfiles de velocidad de la malla DL-cm y de la DL-fm con respecto a la DL-bm. En general se obtuvo una diferencia menor al 1%, por lo tanto no hay una diferencia significativa entre las soluciones numéricas de las tres mallas.

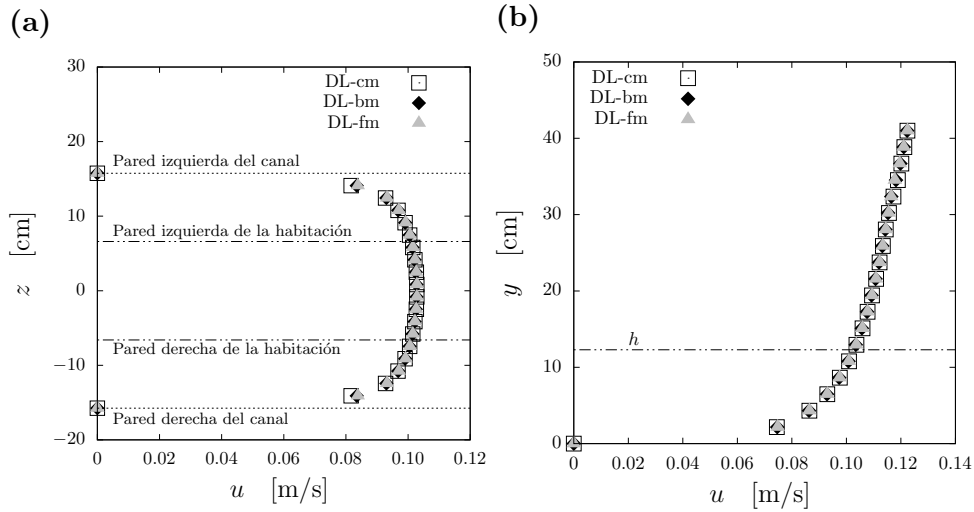


Figura 4.5: Perfiles de la velocidad axial para las tres mallas del DL en las líneas a) horizontal y b) vertical.

Tabla 4.2: Diferencia entre perfiles de la malla gruesa y la malla base del DL ($E_{cm,bm}$), de la malla fina y la malla base del DL ($E_{fm,bm}$).

Perfil	$E_{cm,bm}$ [%]	$E_{fm,bm}$ [%]
Horizontal	0.1741	0.2403
Vertical	0.1568	0.0777

Después de obtener una solución del perfil de velocidad desarrollado e independiente de la malla, se procedió a compararlo con el perfil experimental obtenido en el plano central de la zona de pruebas (Sección 2.3.2). Para ello se utilizó el perfil vertical de velocidad obtenido en el DL-bm. La Figura 4.6 muestra el perfil vertical numérico y el perfil vertical experimental con el ajuste al modelo logarítmico presentado en la Sección 2.3.2. Se obtuvo una diferencia del 85 % entre el perfil experimental y el perfil numérico.

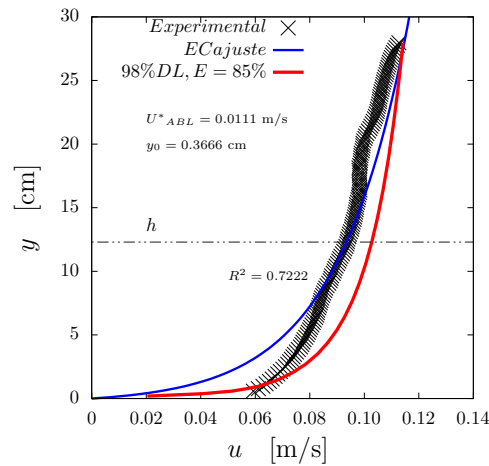


Figura 4.6: Perfiles verticales de velocidad de los datos experimentales, del ajuste logarítmico a partir de los datos experimentales y numérico en $0.98L$ del DL-bm.

Para disminuir la diferencia entre perfiles numérico y experimental, se modificaron iterativamente los valores de y_0 y U_{ABL}^* del perfil de la condición de entrada. Con los valores de y_0 del 29 % del valor del ajuste experimental y el de U_{ABL}^* del 66 %, se logró obtener una diferencia menor al 3 % entre los perfiles numérico y experimental (Figura 4.7). Se obtuvieron los perfiles tridimensionales de u , de k y de ω en $0.98L$, y se utilizaron en las simulaciones subsiguientes como condiciones de entrada.

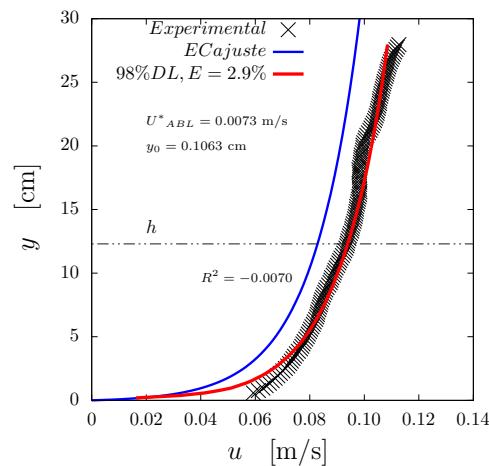


Figura 4.7: Perfiles verticales experimental y el numérico obtenido en $0.98L$

4.3. Caso de referencia

El caso de estudio experimental CA1, descrito en el Capítulo 2, fue tomado como caso de referencia (CR). El CR se utilizó para realizar las pruebas de sensibilidad de los parámetros de simulación: modelos de turbulencia y refinamiento de malla. Las pruebas de sensibilidad tienen el objetivo de obtener los parámetros que permitan obtener resultados numéricos con una diferencia menor al 5% con respecto a los experimentales. En la Figura 4.8 se muestra una vista isométrica del CR.

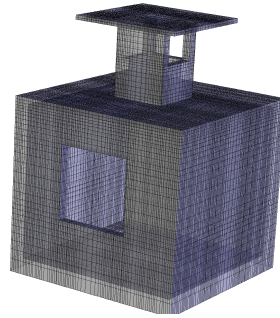


Figura 4.8: Caso de referencia.

4.3.1. Dominio corto computacional

Para realizar las simulaciones numéricas CFD con las condiciones experimentales del CR, se creó un dominio computacional corto (DC) siguiendo las recomendaciones de Franke *et al.* (2007). Este DC permite ahorrar tiempo cómputo para la obtención de resultados. En este dominio ya se incluye la habitación con el WE. El DC tiene los valores del ancho y la altura del DL. La longitud $3h$ de la entrada del DC al muro barlovento de la habitación y una longitud de $15h$ del muro sotavento a la salida del DC es la recomendada por Tominaga *et al.* (2008) (Figura 4.9a). De igual modo que el DL, el DC fue construido con la técnica de mallado por extrusión (van Hooff y Blocken, 2010). La malla con 3,479,494 celdas se le llamó malla fina (DC-fm). Para determinar la influencia del tamaño de malla en la solución numérica, dos dominios computacionales a partir del DC-fm fueron creados. El primero con 1,300,666 celdas se le nombró malla base (DC-bm) y el segundo con 614, 232 celdas se le denominó malla gruesa (DL-cm). Se utilizaron los valores recomendados por Franke *et al.* (2007) de $q_{bm, fm} = 0.5$ y $q_{cm, fm} = 0.25$. Para DC-bm y DC-cm se obtuvieron valores de $r_{cm, bm} = 0.79$ y $r_{fm, bm} = 0.63$, respectivamente. La Figura 4.9 muestra el DC y los tres tamaños de mallas.

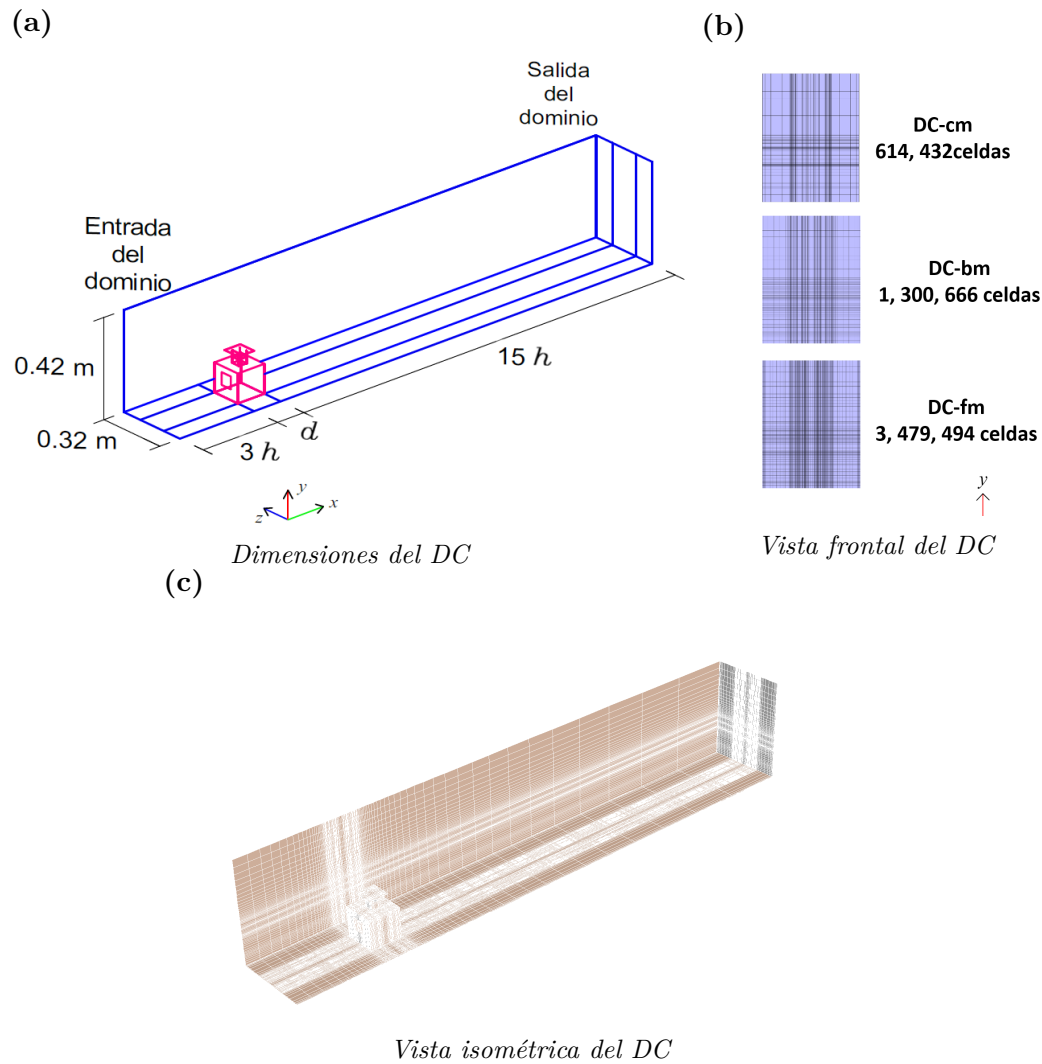


Figura 4.9: Dominio corto computacional: (a) vista en isométrico con dimensiones del DC; (b) vista frontal de los tres tamaños de malla; (c) vista en isométrico del DC-bm con mallado en los contornos.

4.3.2. Condiciones de frontera

Los perfiles tridimensionales de u , de k y de ω extraídos del DL-bm fueron impuestos como condición de frontera de entrada en el DC. En la condición de frontera de salida se utilizó un gradiente de presión en dirección del flujo igual a cero. Para la condición de frontera superior se utilizó la condición de libre deslizamiento.

Para el piso y las paredes laterales se utilizaron condiciones de no deslizamiento mediante las funciones de pared k_s y C_s . Para las paredes laterales se usaron $k_s = 0$ y $C_s = 0.5$ (ANSYSFluent, 2006a, 2017). Para el piso, k_s y C_s fueron calculados con la altura de la primera celda que corresponde al grosor del piso de la habitación y tienen valores de 4.3 mm y 1.19, respectivamente. El valor de C_s obtenido es mayor al valor máximo recomendado. Sin embargo en la literatura en estudios de ventilación natural se ha reportado un valor de $C_s = 7$ (Perén *et al.*, 2016). El valor de y^+ para el DC es de 49.8.

4.3.3. Análisis de convergencia

El análisis de la convergencia se llevó a cabo para dos condiciones, sin habitación y con la habitación. Ambas simulaciones se realizaron con 10,000 iteraciones. Para determinar la convergencia de los resultados numéricos sin la habitación se utilizaron los residuales escalados y el valor de u en un punto de interés. El punto de interés considerado está localizado en el plano central a $3h = 36.9$ cm de la entrada del DC y a una altura de $h = 12.3$ cm. En la Figura 4.10 se observa que los residuales escalados y u se mantienen prácticamente constantes a partir de la iteración 3,000 y 1,000, respectivamente. Los valores de los residuales obtenidos son: de la ecuación de continuidad menor a 10^{-4} y de u , k y ω menor a 10^{-7} y de v , w menor a 10^{-8} .

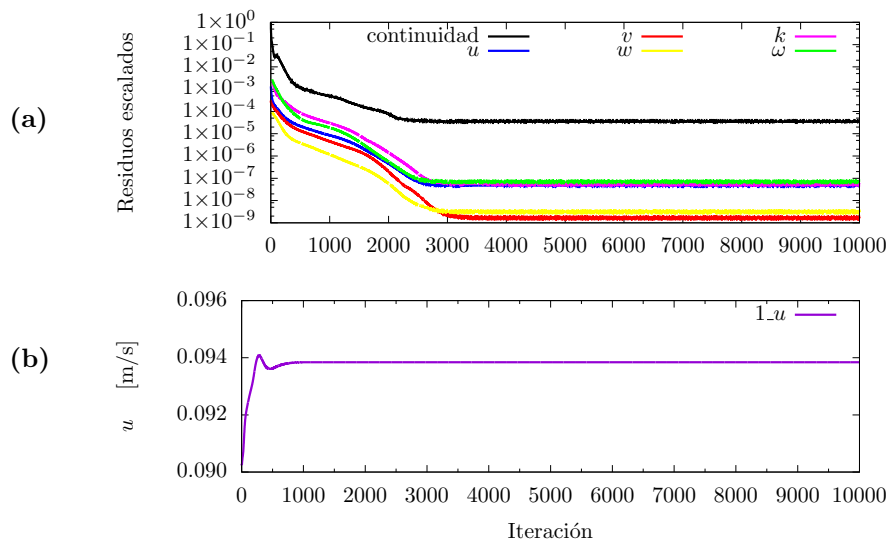


Figura 4.10: Convergencia en el DC-bm para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) u en un punto de interés.

Para determinar la convergencia de los resultados numéricos con la habitación se utilizaron los valores de los residuales escalados y el valor de componentes de velocidad en ocho puntos de interés colocados dentro y fuera de la habitación (Figura 4.11). En la Figura 4.12 se observa que después de un transitorio los residuales escalados oscilan alrededor de un valor medio constante. Pese a esto, los valores de las componentes de velocidad se mantienen prácticamente constantes. Los valores de los residuales obtenidos son: de la ecuación de continuidad menor a 10^{-2} , de k y ω menor a 10^{-4} y de u , v , w menor a 10^{-5} . Para corroborar la conservación de masa en el dominio, se calculó la diferencia porcentual del flujo másico de salida con respecto al flujo másico de entrada, siendo de $-3 \times 10^{-3} \%$. Por lo que se considera que la ley de conservación de masa se cumple.

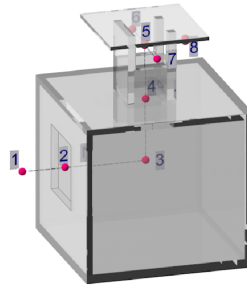


Figura 4.11: Puntos de monitoreo de la velocidad con habitación.

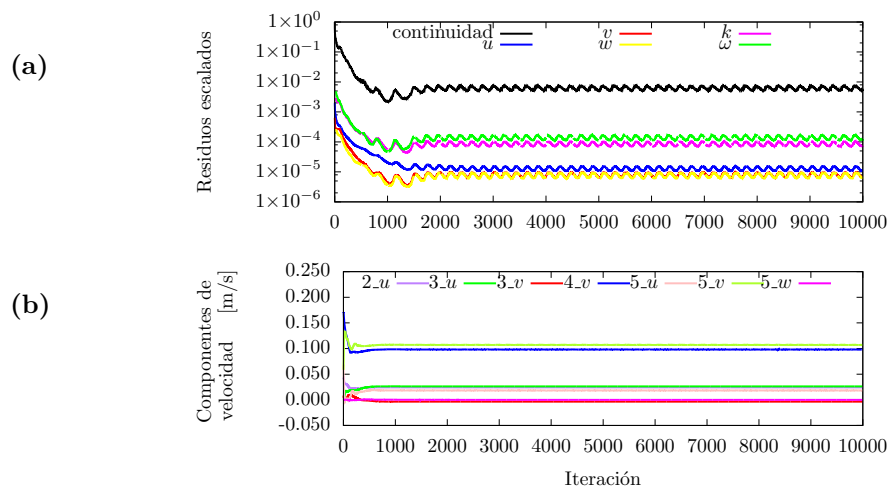


Figura 4.12: Convergencia en el DC-bm con la habitación para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) componentes de velocidad para algunos de los puntos de interés.

4.3.4. Gradientes en la dirección del flujo

Los perfiles verticales de entrada y los incidentes sin la habitación (perfiles localizados a una distancia de $3h$ de la entrada) de u , de k y de ω deben ser prácticamente iguales, esto es que los gradientes en la dirección del flujo deben ser cercanos a cero. Las diferencias entre los perfiles fueron calculadas. La Figura 4.13 muestra que existe una diferencia del 0.35 % entre perfiles verticales de velocidad, una diferencia del 5.32 % entre perfiles de k y una diferencia del 6.44 % entre perfiles de ω . Por lo que, los gradientes en la dirección del flujo son despreciables.

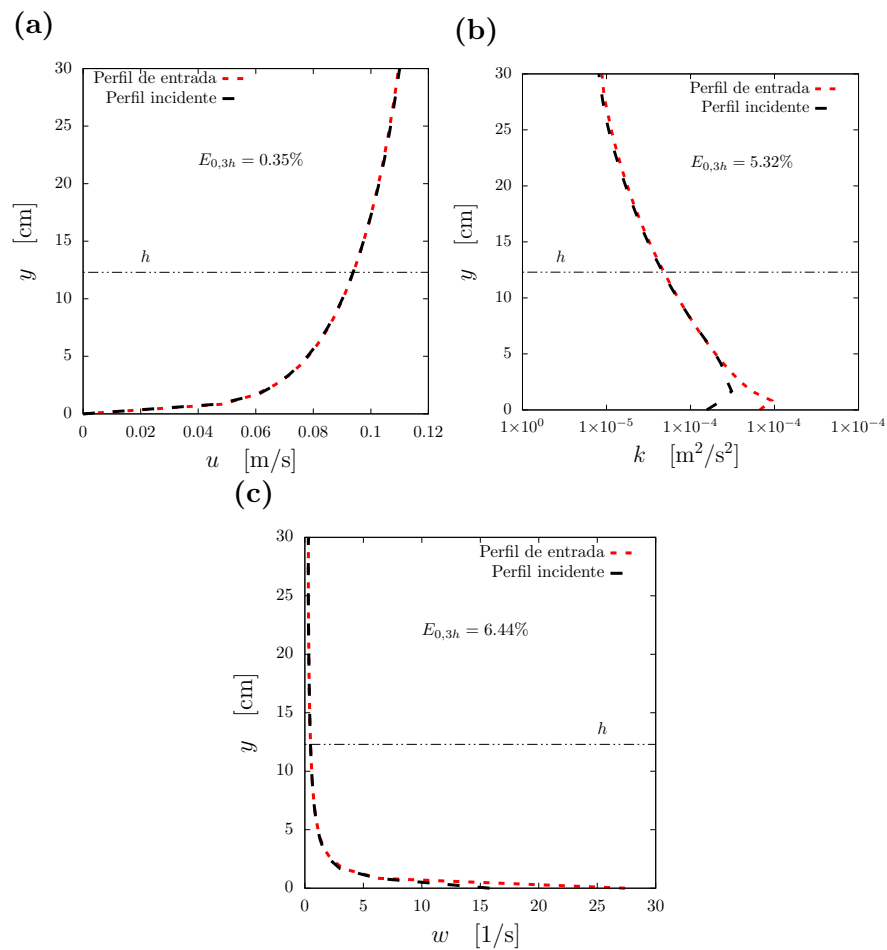


Figura 4.13: Perfiles (a) velocidad (u), (b) energía cinética de turbulencia (k) y (c) disipación específica de turbulencia (ω).

4.3.5. Variación de parámetros de simulación

Una vez verificado que los gradientes en la dirección del flujo no son importantes, se realizaron análisis de sensibilidad al modelo de turbulencia y al tamaño de malla.

4.3.5.1. Modelos de turbulencia

Para estudios de ventilación natural en edificios Blocken (2015); Perén *et al.* (2015a,b,c, 2016); Liu *et al.* (2011); Ramponi y Blocken (2012); Ramponi *et al.* (2015) y van Hooff *et al.* (2017) han utilizado las ecuaciones RANS y por lo tanto modelos de turbulencia RANS. Por lo tanto, en este trabajo también se utilizaron las ecuaciones RANS con modelos de turbulencia. Entre los modelos de turbulencia RANS se encuentran: el modelo *Standard k- ϵ* ($Sk-\epsilon$) (Jones y Launder, 1972), el modelo *Realizable k- ϵ* ($Rk-\epsilon$) (Tsan-Hsing *et al.*, 1995), el modelo *Renormalization Group k- ϵ* ($RNG k-\epsilon$) (Choudhury, 1993), el modelo *Standard k- ω* ($Sk-\omega$) (Wilcox, 1998), el modelo *Shear Stress Transport k- ω* ($SST k-\omega$) (Menter, 1994) y el modelo *Reynolds Stress* (RSM) (Launder *et al.*, 1975).

El efecto de los modelos RANS en ventilación natural en edificios ha sido estudiado por Blocken (2015); Perén *et al.* (2015a,b,c, 2016); Ramponi y Blocken (2012); Ramponi *et al.* (2015) y van Hooff *et al.* (2017) comparando componentes de velocidad en líneas de interés. En este trabajo se evalúa sobre las líneas de interés L_h y L_v mostradas en la Figura 4.14. La Tabla 4.3 muestra la diferencia en las componentes de velocidad entre los modelos RANS y el experimento. Se observa que los modelos $Sk-\omega$ y $Sk-\epsilon$ son los mejores, contrario a lo encontrado por Ramponi y Blocken (2012). Ya que se cuenta con resultados experimentales de la velocidad en el plano central se optó por utilizar estos resultados para la comparación de los modelos RANS.

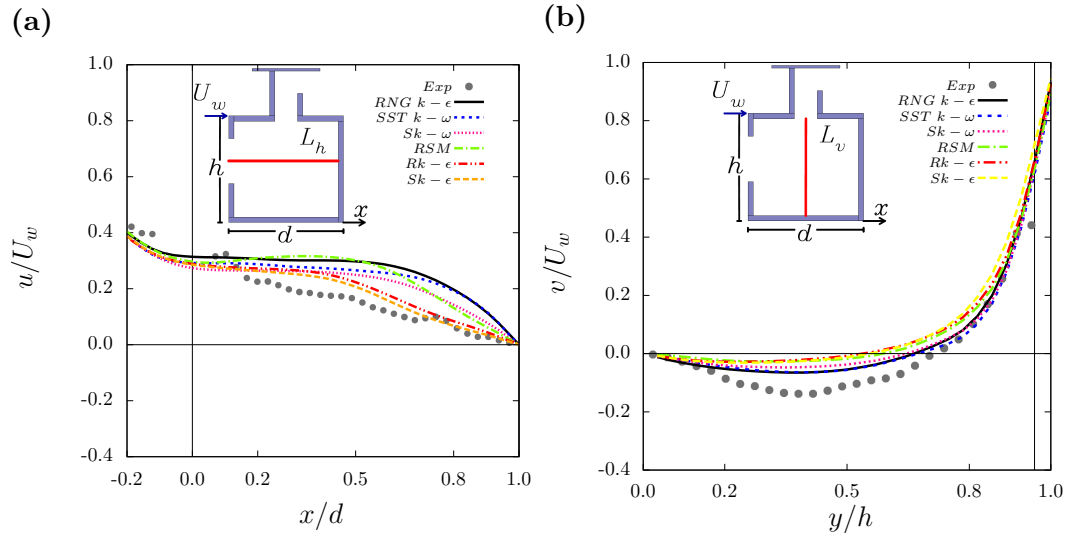


Figura 4.14: Evaluación de los modelos de turbulencia sobre las líneas de interés.

Tabla 4.3: Diferencia porcentual entre resultado numérico y experimental de la componente axial (E_u) y componente vertical (E_v), en las líneas de interés L_h y L_v , y el promedio de ambas cantidades (E), para cada modelo de turbulencia.

Modelo de turbulencia	E_u [%]	E_v [%]	E [%]
$Sk-\omega$	47	34	40
$Sk-\epsilon$	18	63	40
$SST k-\omega$	66	22	44
$Rk-\epsilon$	23	65	45
$RNG k-\epsilon$	70	21	46
RSM	47	60	53

Para evaluar los modelos RANS sobre el plano central se utilizó como parámetro el porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) (Sección 3.2). El valor de P_a para cada modelo RANS se presenta en la Figura 4.15. Al comparar el valor experimental de P_a con los resultados numéricos puede notarse que el modelo $RNG k-\epsilon$ es el mejor seguido del modelo $SST k-\omega$. Esto coincide con los resultados de Ramponi y Blocken (2012). En consecuencia, el modelo $RNG k-\epsilon$ fue elegido para realizar las simulaciones subsiguientes de este trabajo.

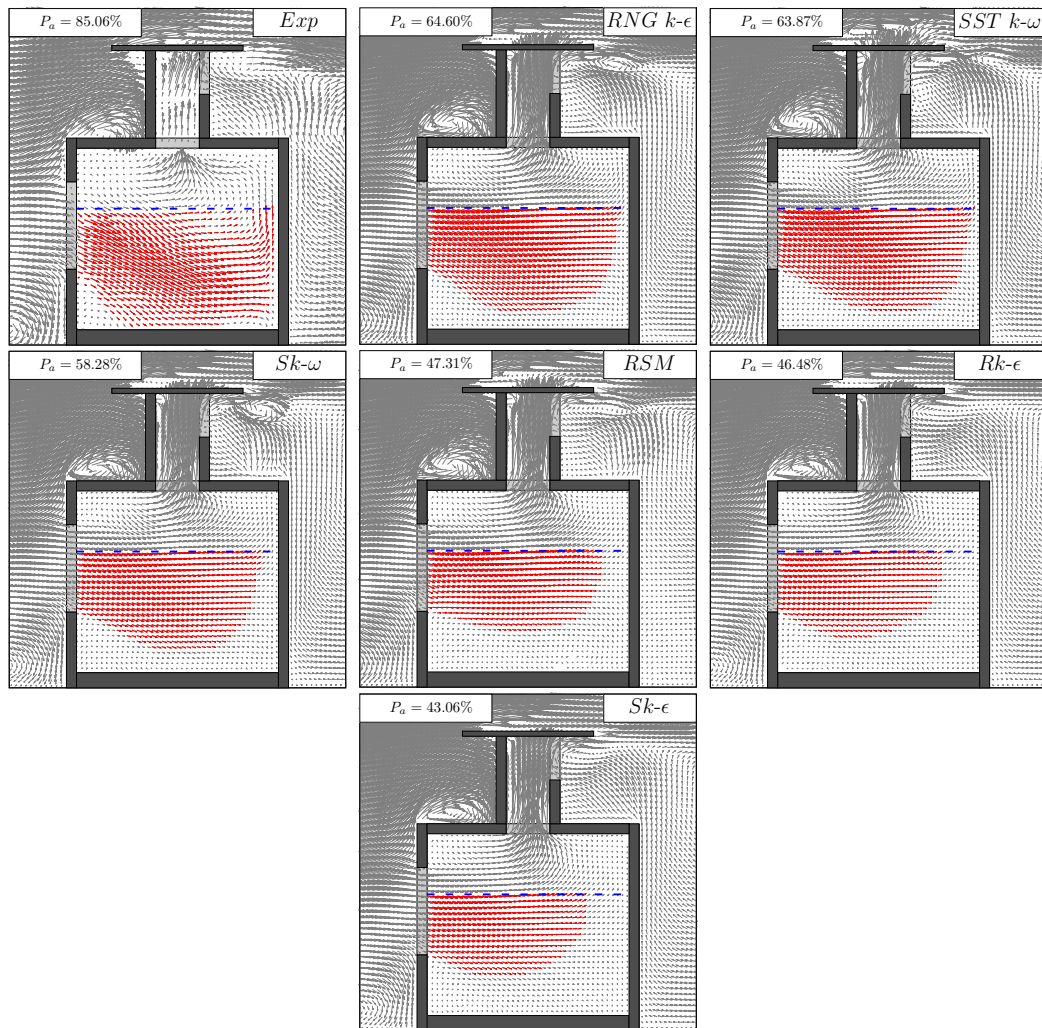


Figura 4.15: Evaluación de los modelos de turbulencia con el parámetro P_a .

4.3.5.2. Tamaño de malla

Un análisis de sensibilidad al tamaño de malla fue realizado para las tres mallas del DC. La Figura 4.16 presenta componentes de velocidad para los tres tamaños de mallas sobre las líneas L_h y L_v ; la diferencia de velocidad entre el resultado numérico y el experimental se muestra para cada tamaño de malla en la Tabla 4.4. Se observa que las diferencias son altas, las mallas DC-cm y DC-bm tienen menores diferencias. También se utilizó el parámetro P_a para el análisis, los resultados numéricos y el experimental se muestran en la Figura 4.17, en ellos se observa las mallas DC-cm y

DC-bm tienen menores diferencias con respecto al experimental del 24 %, mientras que la malla DC-fm tiene una diferencia del 29 %. De los resultados se optó por utilizar el DC-bm para los estudios subsecuentes.

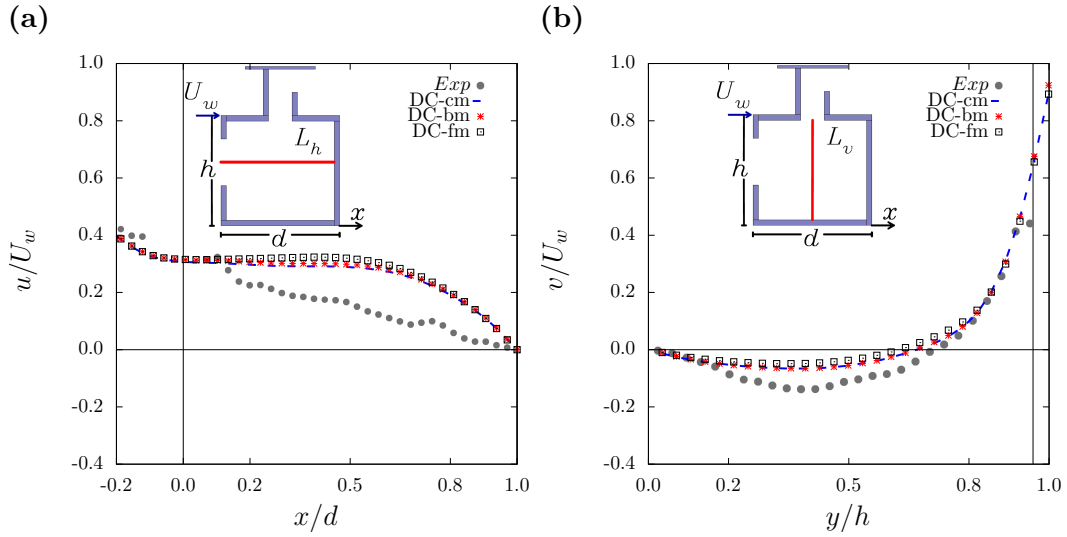


Figura 4.16: Evaluación del tamaño de malla sobre las líneas de interés L_h y L_v .

Tabla 4.4: Diferencia porcentual entre resultado numérico y experimental de la componente axial (E_u) y componente vertical (E_v), en las líneas de interés L_h y L_v , y el promedio de ambas cantidades (E), para cada tamaño de malla.

Tamaño de malla	E_u [%]	E_v [%]	E [%]
DC-cm	68	20	44
DC-bm	70	21	46
DC-fm	73	41	57

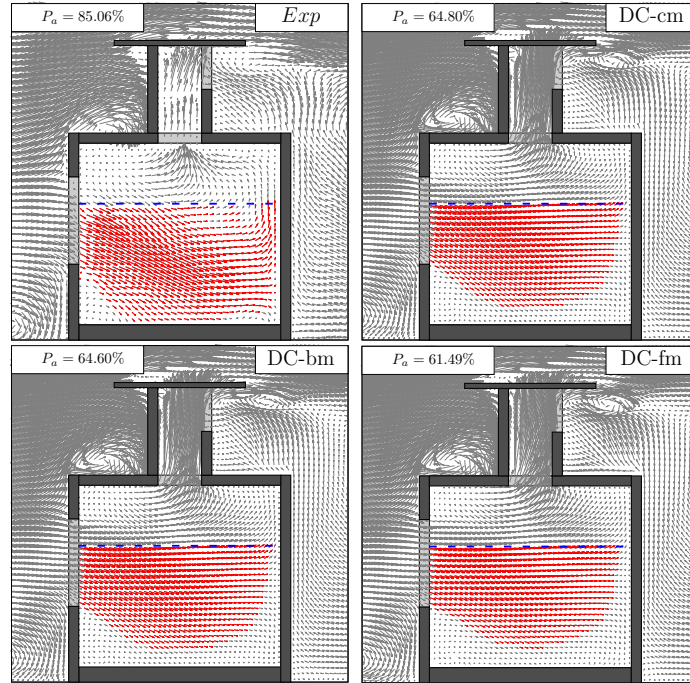


Figura 4.17: Evaluación del tamaño de malla del DC con el parámetro P_a .

4.3.6. Índice de convergencia de malla

El índice de convergencia de malla o error de convergencia de malla (GCI, Grid Convergence Index, por sus siglas en inglés) proporciona el límite del porcentaje de error mediante una barra de error dentro de la cual es probable que se encuentre la solución numérica de la malla seleccionada, en este trabajo la malla base (Schwer, 2008). El GCI se define a través del error de Richardson (Roache, 1994, 1997). En este trabajo se ocupa el GCI de la malla base para refinamiento $\eta = \varepsilon / [1 - r_{fm,bm}^\lambda]$. Donde $\varepsilon = f_{bm} - f_{fm}$, f_{bm} y f_{fm} , son las soluciones para la malla DC-bm y DC-fm, respectivamente y λ es el orden de precisión del algoritmo, para estas simulaciones $\lambda = 2$ (Sección 4.1). El GCI de la malla base para refinamiento viene dado por

$$GCI = \tau |\eta|, \quad (4.8)$$

donde $\tau = 1.25$ (Roache, 1994).

La Figura 4.18 muestra el GCI de la malla base para refinamiento sobre líneas de interés dentro de la habitación. El GCI promedio de la malla base para refinamiento

es de 1.85 % para los resultados extraídos sobre la línea horizontal y 2.94 % para los resultados extraídos sobre la línea vertical.

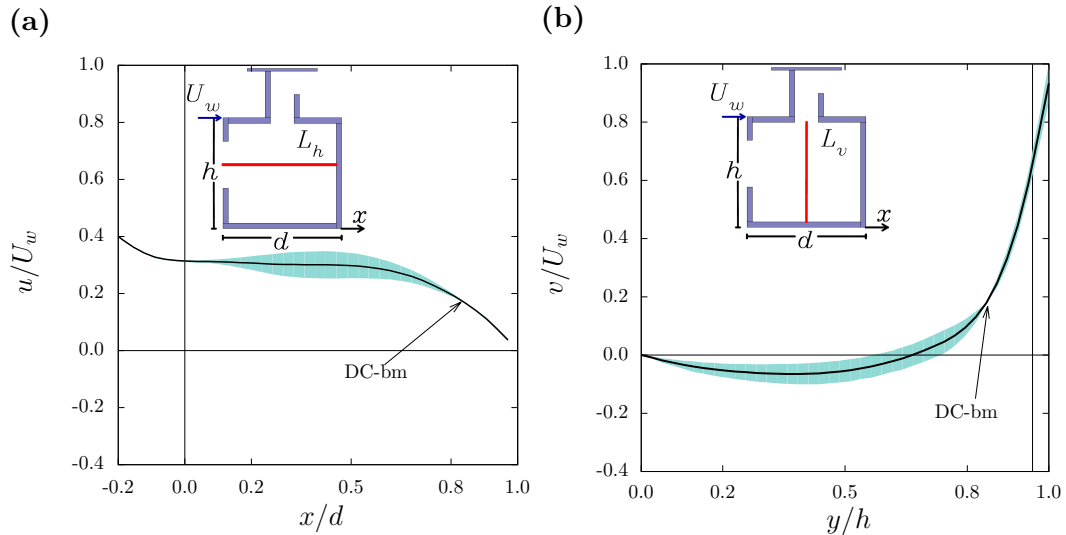


Figura 4.18: La barra azul representa el GCI de la malla base para refinamiento y la línea continua es la solución de la malla base.

4.4. Validación

El perfil de velocidad fue reproducido tridimensionalmente con datos bidimensionales de los experimentos. Para ello fue necesario crear un dominio computacional que conservara las dimensiones del canal, denominado dominio largo (DL). Se comprobó que el perfil vertical de velocidad numérico coincide con el perfil vertical de velocidad obtenido en el experimento. Un perfil tridimensional de velocidad fue generado con este dominio.

Por otra parte, para ahorrar recurso computacional se disminuyó la longitud del DL. A este dominio se le llamó dominio corto (DC) y fue el utilizado en los estudios subsecuentes. El perfil tridimensional de velocidad obtenido en el DL fue aplicado como condición de frontera de entrada en el DC. Se verificaron que los perfiles de entrada e incidentes tengan una diferencia mínima. Los análisis de sensibilidad de los modelos de turbulencia y de tamaño de malla usándose como parámetros de evaluación componentes de velocidad sobre líneas de interés y el P_a . Estos análisis se realizaron con la habitación para el caso de referencia (CR). Se encontró que

el mejor modelo de turbulencia es el modelo *RNG k- ϵ* y la malla seleccionada es DC-bm. La incertidumbre numérica de la malla DC-bm fue calculada con el GCI.

Una vez seleccionado el modelo de turbulencia y el tamaño de malla se realizó la validación del modelo numérico con datos experimentales para el CR. Se utilizaron como parámetros de evaluación el P_a y el I_h . En la Tabla 4.5 se presentan los valores experimentales y numéricos y su diferencia porcentual de los parámetros P_a y I_h . Se observa que P_a tiene una diferencia porcentual del 24% mientras que I_h tiene una diferencia porcentual del 6% .

Tabla 4.5: Valores experimentales y numéricos y su diferencia porcentual de los parámetros P_a y I_h .

Parámetro	Experimental	Numérico	Diferencia [%]
P_a [%]	85	65	24
I_h [%]	43	41	6

Análisis de resultados numéricos

En este capítulo se presentan las simulaciones numéricas en escala real y la evaluación de los diez casos de estudio (Figura 2.2). Estas simulaciones fueron realizadas utilizando aire como fluido de trabajo y los parámetros de simulación que se determinaron en el estudio para la validación de las soluciones numéricas (Sección 4.4). Las características particulares de las simulaciones a escala real y del procedimiento para utilizar los parámetros de simulación se presentan en las siguientes secciones.

5.1. Dominio extendido en escala real

Para las simulaciones numéricas en escala real se escaló el DC-bm del CR validado en la Sección 4.3 con un factor de 25. El dominio escalado fue modificado para reducir los efectos de las paredes del dominio, las caras laterales y la cara superior fueron extendidas, obteniéndose una razón de bloqueo menor al 3% (Tominaga *et al.* (2008)). A este dominio se le denominó dominio extendido (DE) en escala real. Las dimensiones del DE se muestran en la Figura 5.1, donde $h_a = 3.075$ m, $h_T = 4.450$ m y $d_a = 3.300$ m.

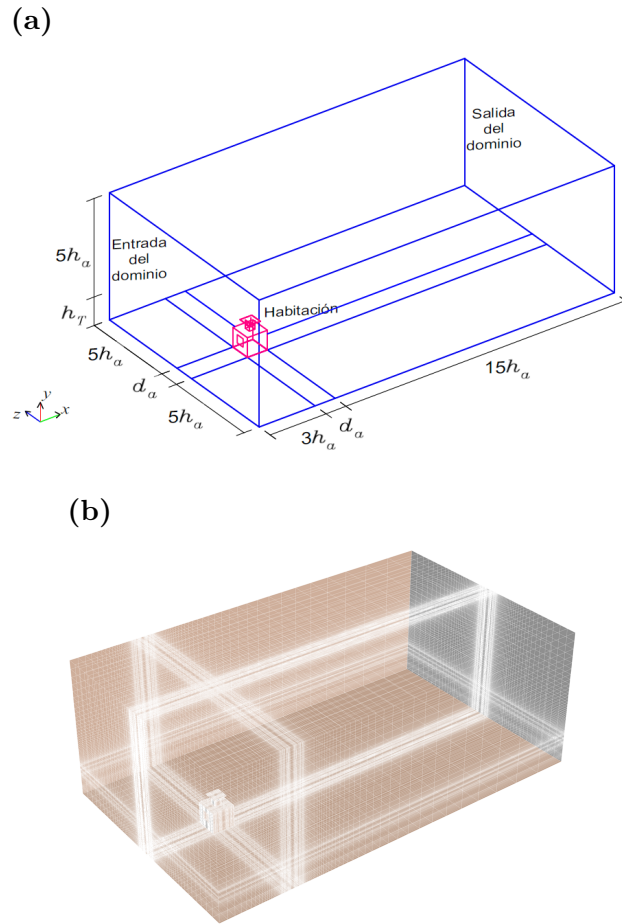


Figura 5.1: Vistas en isométrico del dominio extendido computacional en escala real: (a) esquema con dimensiones y (b) mallado con 2,285,304 celdas. Las dimensiones de h_a , h_T y d_a son 3.075 m, 4.450 m y 3.300 m, respectivamente.

5.1.1. Condiciones de frontera

En la entrada del DE se utilizó el perfil logarítmico de velocidad, correspondiente a una zona sub-urbana, con $y_0 = 0.08 \text{ m}$ (Wieringa, 1992) y $U_{ABL}^* = 0.117 \pm 0.037 \text{ m/s}$ (Castillo y Huelsz, 2017). La velocidad de referencia medida a la altura de la habitación es $U_a = 1.04 \text{ m/s}$. En la salida se utilizó un gradiente de presión en dirección del flujo igual a cero. Para las fronteras superior y laterales se utilizó la condición de simetría. Para el piso se impuso una condición de

no deslizamiento con funciones de pared con $k_s = 0.1125$ m y $C_s = 6.9640$. En las paredes de la habitación y del WE se utilizó la condición de no deslizamiento para paredes lisas con $k_s = 0.0$ m y $C_s = 0.5$. El valor de y^+ para el DE es de 903.3.

5.1.2. Comprobación de convergencia

Para el DE se utilizaron los criterios de convergencia aplicados en la Apartado 4.2.3. En la Figura 5.2 se observa que los residuales escalados del DE y componentes de velocidad en los puntos de interés en la habitación se mantienen prácticamente constantes a partir de la iteración 9,000 y 2,000, respectivamente. Los valores de los residuales obtenidos son para la ecuación de continuidad menor a 10^{-3} y de u , v , w y k menor a 10^{-6} , y de ϵ menor a 10^{-4} .

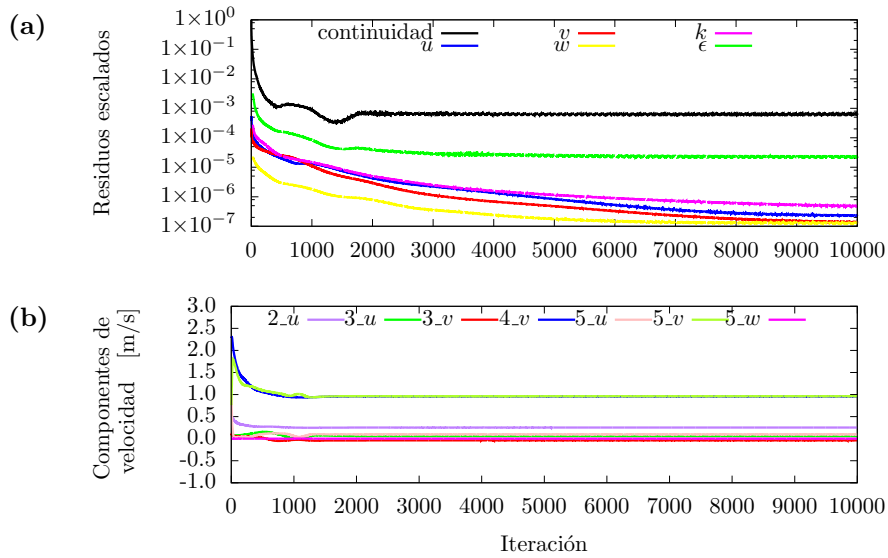


Figura 5.2: Convergencia en el DE para las 10,000 iteraciones de: a) residuales escalados y b) componentes de velocidad para algunos de los puntos de interés.

5.2. Evaluación de la ventilación natural

En esta sección se presenta la evaluación de la ventilación natural, para los diez casos de estudio, mediante los parámetros de flujo de ventilación (F_v), porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v), índice de homogeneidad (I_{hv}) y promedio de la magnitud de la velocidad (\bar{U}). Los parámetros P_v , I_{hv} y \bar{U}

se evaluaron en el interior de la habitación considerado como volumen habitable de dimensiones $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$.

5.2.1. Flujo de ventilación

El F_v es la suma de los flujos volumétricos de entrada a la habitación por la ventana y por el ducto del WE. Ambos flujos se calcularon con la integral de área de la velocidad normal al área de la ventana o el área de ducto del WE. En la Tabla 5.1 se presentan los valores de A_D/A_V , F_v y ACH para los diez casos de estudio. Se puede notar que los casos con ventana cuadrada tienen mayor flujo de ventilación que sus correspondientes con ventana rectangular. Para valores iguales de A_D/A_V , se observa que el caso con ventana cuadrada tiene aproximadamente el doble de F_v que el caso con ventana rectangular.

Tabla 5.1: Relación de áreas A_D/A_V , flujo de ventilación (F_v) y cambios de aire (ACH)

Caso de estudio	A_D/A_V	F_v [m^3/h]	ACH [1/h]
<i>RA1</i>	0.50	1,144	47
<i>RA2</i>	0.75	1,509	62
<i>RA3</i>	1.00	1,756	72
<i>RA4</i>	1.25	1,923	79
<i>RA5</i>	2.00	2,195	90
<i>CA1</i>	0.25	1,270	52
<i>CA2</i>	0.38	1,799	74
<i>CA3</i>	0.50	2,206	91
<i>CA4</i>	0.63	2,679	110
<i>CA5</i>	1.00	3,456	142

La Figura 5.3 presenta F_v como función de A_D y como función de A_O . Para ambos tipos de ventana, se observa que F_v aumenta exponencialmente con respecto a A_D y A_O . Los ajustes exponenciales aplicados son válidos en los intervalos estudiados de A_D y de A_O . De la tendencia de los ajustes, se observa que para valores de $A_D < 0.42 \text{ m}^2$ y $A_O < 1.26 \text{ m}^2$, F_v es mayor en casos con ventana rectangular que para casos con ventana cuadrada.

La Figura 5.4 presenta F_v como función de A_D/A_V y como función de A_O/A_V . Puede observarse que, en el rango estudiado, F_v crece exponencialmente con A_D/A_V y A_O/A_V , mientras que en los resultados experimentales, obtenidos de mediciones en el plano central, el flujo de ventilación (F) crece linealmente con A_D/A_V y A_O/A_V (Figura 3.5).

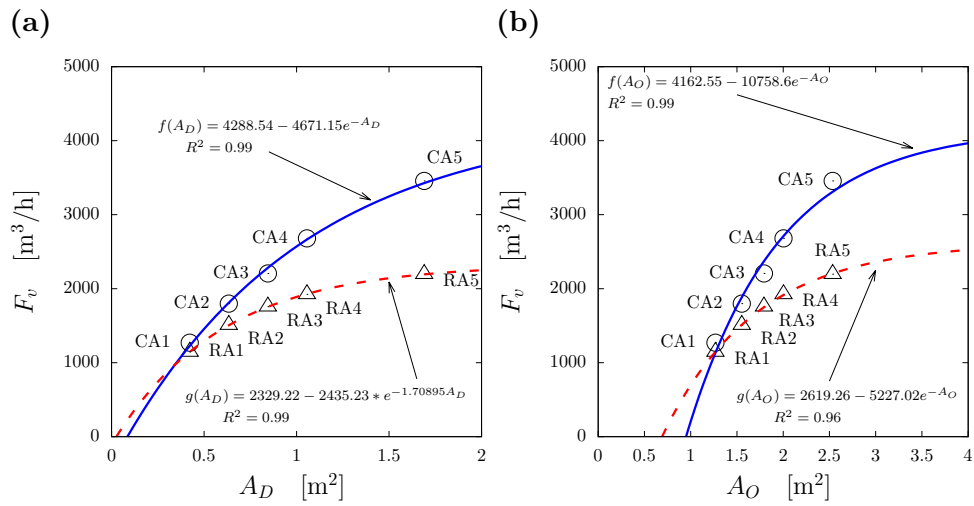


Figura 5.3: Flujo de ventilación (F_v) como función del (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).

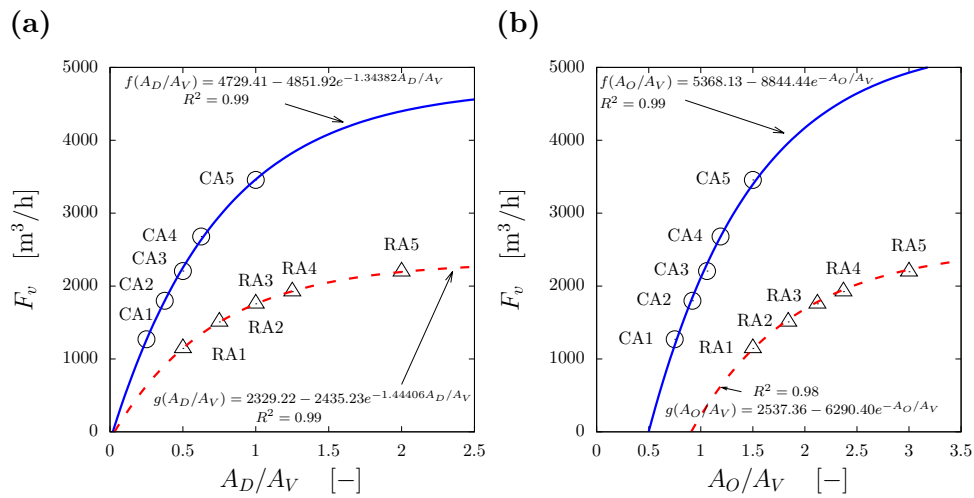


Figura 5.4: Flujo de ventilación (F_v) como función de la realación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

5.2.2. Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa

El parámetro P_v está definido como el porcentaje del volumen habitable con magnitud de velocidad mayor o igual a una magnitud de velocidad de referencia. La magnitud de velocidad de referencia corresponde al 10% de U_a . La Tabla 5.2 presenta la relación de áreas A_D/A_V y los valores de P_v para los diez casos de estudio. Se puede notar que los casos $CA5$, $CA4$ y $RA5$ tienen un valor mayor al 90%. Los casos $RA1$ y $CA1$ tienen un valor menor al 70%. Para valores iguales de A_D/A_V , se observa que el caso con ventana cuadrada tiene mayor valor de P_v que el caso con ventana rectangular.

Tabla 5.2: Relación de áreas A_D/A_V y porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v) para los diez casos de estudio.

Caso de estudio	A_D/A_V	P_v [%]
$RA1$	0.50	64
$RA2$	0.75	81
$RA3$	1.00	86
$RA4$	1.25	88
$RA5$	2.00	93
$CA1$	0.25	58
$CA2$	0.38	78
$CA3$	0.50	87
$CA4$	0.63	94
$CA5$	1.00	97

Las Figuras 5.5 y 5.6 presentan a P_v como función de A_D , A_O , A_D/A_V y A_O/A_V . En las gráficas se puede observar que P_v crece exponencialmente con A_D , A_O , A_D/A_V y A_O/A_V . En la Figura 5.5 se observa que el comportamiento del ajuste de P_v a partir del valor de $A_D < 0.845 \text{ m}^2$ y de $A_O < 1.55 \text{ m}^2$ es mayor para casos con ventana rectangular que para los casos con ventana cuadrada.

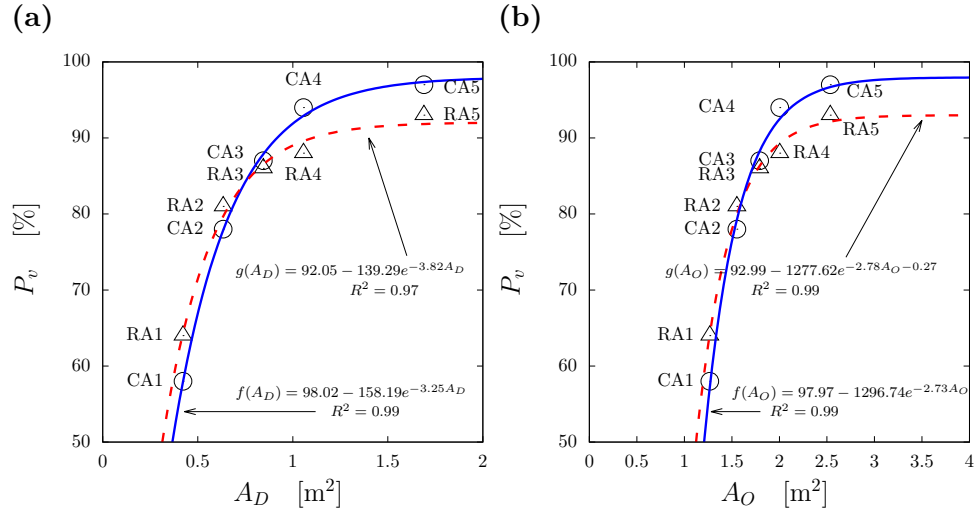


Figura 5.5: Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v) como función de (a) área de ducto del WE (A_D) y (b) área total de abertura del WE (A_O).

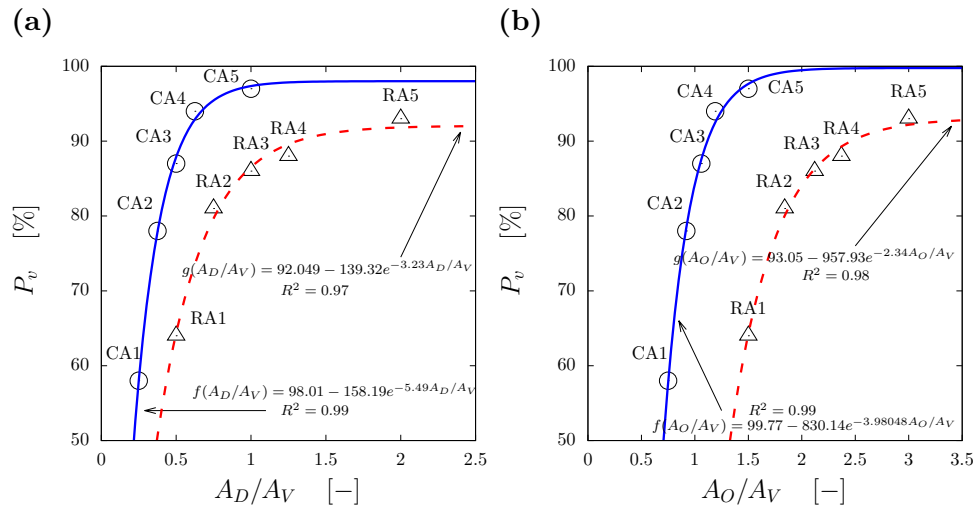


Figura 5.6: Porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v) como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

5.2.3. Índice de homogeneidad

En la Sección 3.3 se definió el índice de homogeneidad I_h para evaluar la uniformidad de la magnitud de velocidad del aire en el plano central. En forma

análoga se define el índice de homogeneidad I_{hv} para evaluar la uniformidad de la magnitud de velocidad del aire en el volumen habitable. Los resultados se muestran en la Tabla 5.3. I_{hv} tiene valores más altos para los casos con ventana cuadrada. Los valores de I_{hv} para los casos con ventana cuadrada se encuentran alrededor del 50% y para los casos con ventana rectangular alrededor del 37%. El caso $CA2$ tiene el mayor valor de $I_{ht} = 50.7\%$ y el caso $RA4$ tiene el menor valor de $I_{hv} = 37.0\%$. La Figura 5.7 muestra a I_{hv} en función de las relaciones de áreas A_D/A_V y A_O/A_V . Se puede observar que I_{hv} es dependiente de la geometría y área de la ventana.

Tabla 5.3: Relación de áreas A_D/A_V e índice de homogeneidad I_{hv} para los diez casos de estudio.

Caso de estudio	A_D/A_V	I_{ht} [%]
$RA1$	0.50	37.1
$RA2$	0.75	37.3
$RA3$	1.00	37.5
$RA4$	1.25	37.0
$RA5$	2.00	40.8
$CA1$	0.25	49.6
$CA2$	0.38	50.7
$CA3$	0.50	50.3
$CA4$	0.63	50.4
$CA5$	1.00	49.1

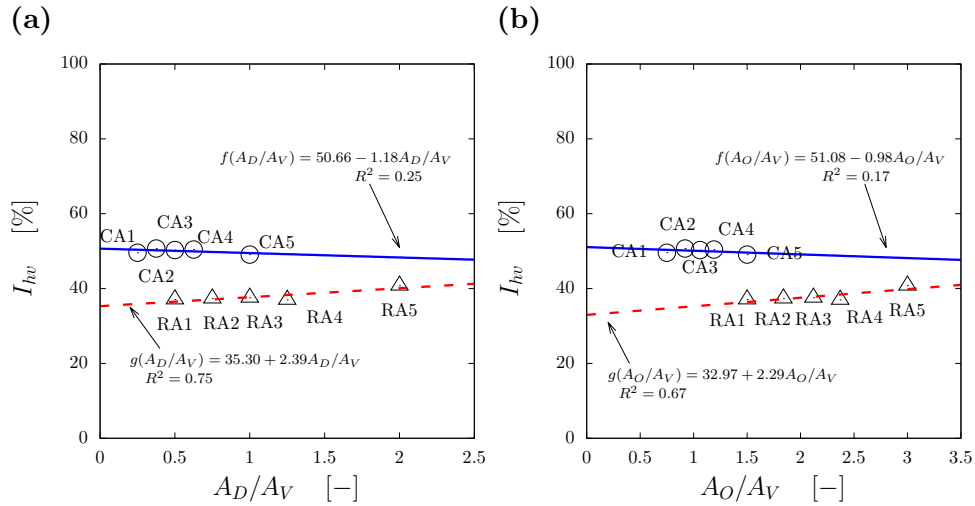


Figura 5.7: Índice de homogeneidad I_{hv} como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

5.2.4. Promedio de la magnitud de velocidad

En la Tabla 5.4 se muestra la relación de áreas A_D/A_V y el valor de \bar{U} para cada caso de estudio. Se puede ver que los casos de estudio con ventana rectangular tienen un valor ligeramente mayor de \bar{U} que sus homólogos con ventana cuadrada, a excepción de los casos con intercambiador $A5$, donde el caso con ventana cuadrada tiene el mayor valor. El caso $CA5$ tiene el mayor valor $\bar{U} = 0.37$ m/s mientras que el caso $CA1$ tiene el menor valor $\bar{U} = 0.13$ m/s. Para valores iguales de A_D/A_V , se observa que el caso con ventana cuadrada tiene mayor valor de \bar{U} que el caso con ventana rectangular. Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran a \bar{U} como función de A_D , A_O , A_D/A_V y A_O/A_V . Se observa que al igual que F_v y P_v , \bar{U} crece exponencialmente con A_D , A_O , A_D/A_V y A_O/A_V .

Tabla 5.4: Relación de áreas A_D/A_V , promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}) para los diez casos de estudio.

Caso de estudio	A_D/A_V	\bar{U} [m/s]
<i>RA1</i>	0.50	0.16
<i>RA2</i>	0.75	0.21
<i>RA3</i>	1.00	0.26
<i>RA4</i>	1.25	0.29
<i>RA5</i>	2.00	0.33
<i>CA1</i>	0.25	0.13
<i>CA2</i>	0.38	0.18
<i>CA3</i>	0.50	0.22
<i>CA4</i>	0.63	0.27
<i>CA5</i>	1.00	0.37

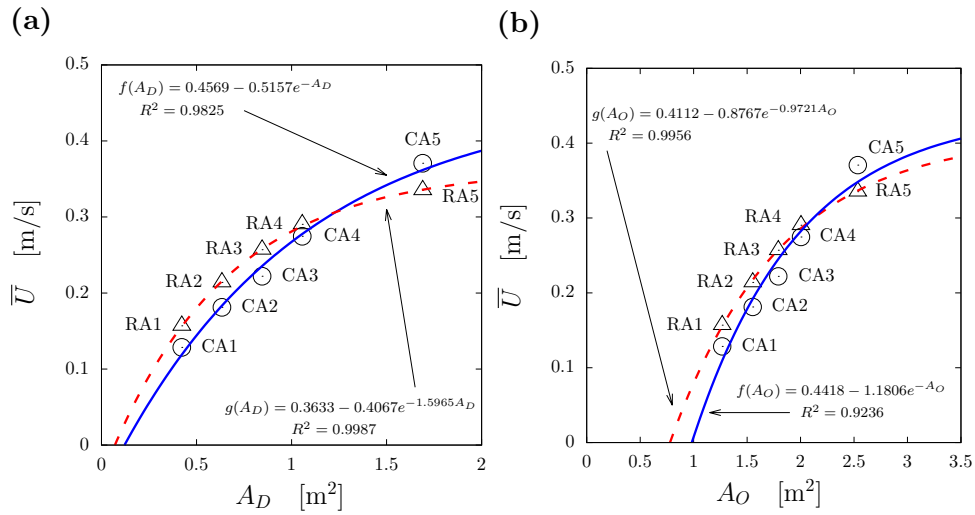


Figura 5.8: Promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}) como función de (a) A_D y (b) A_O .

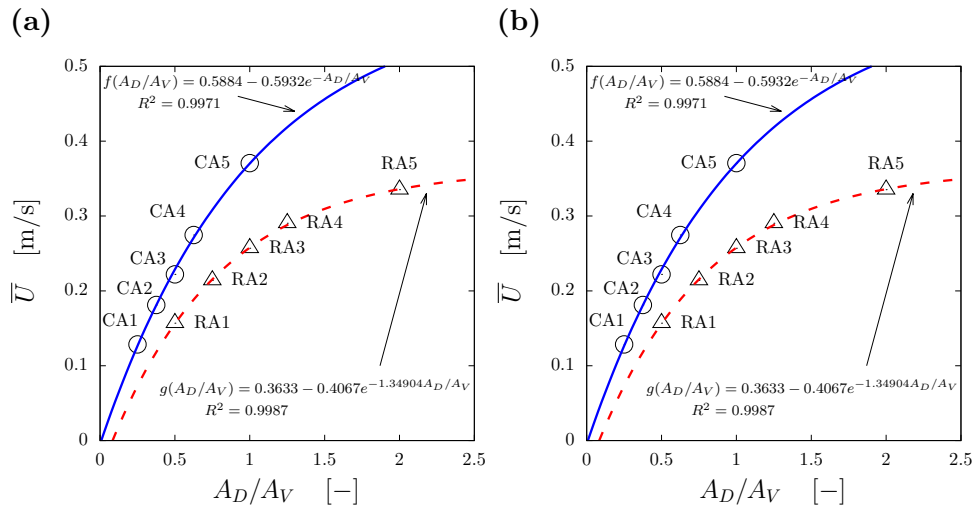


Figura 5.9: Promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}) como función de la relación de áreas (a) A_D/A_V y (b) A_O/A_V .

Conclusiones

El objetivo central de este trabajo de tesis fue estudiar el efecto en la ventilación natural en una habitación al variar el área del ducto de un intercambiador de viento (WE) en el techo, manteniendo la geometría cuadrada, y al variar el área y la geometría de la ventana en el muro a barlovento, cuadrada y rectangular, siendo el área de la ventana cuadrada el doble del de la rectangular.

Para ello se hicieron experimentos para evaluar cinco tamaños de WE y dos ventanas, dando un total de diez casos. Los experimentos se realizaron en un canal de agua con maquetas a una escala de 1:25, se obtuvieron mediciones con velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica en el plano central vertical de la habitación. Los resultados experimentales fueron comparados con un caso sin WE con ventana cuadrada, denominado caso línea base (BL) realizado por Cruz-Salas *et al.* (2014). Se utilizaron tres parámetros para evaluar la ventilación natural: el flujo de ventilación (F), el porcentaje de área con magnitud de velocidad significativa (P_a) y el índice de homogeneidad (I_h).

Las conclusiones de la investigación experimental se enlistan a continuación.

- Al duplicar el área de ventana, de rectangular a cuadrada, y mantener el mismo tipo de WE, en todos los casos F es más grande con la ventana cuadrada. Sin embargo para áreas de ducto del WE menores a la mitad del área de la ventana cuadrada, F no duplica su valor. Para casos con áreas de ducto del WE mayores a la mitad del área de la ventana cuadrada, F si duplica su valor.
- F como función de A_D/A_V es mayor en los casos con ventana cuadrada que en los casos con ventana rectangular. Para casos con el mismo valor de la relación de áreas ($A_D/A_V = 1/2, 1$), F es más del doble para los casos con ventana cuadrada que para los casos con ventana rectangular.

- F crece linealmente con el área de ducto del WE (A_D), el área total de aberturas del WE (A_O), la relación de áreas A_D/A_V y la relación de áreas A_O/A_V .
- P_a y I_h no presentan una correlación clara con A_D , A_O , A_D/A_V y A_O/A_V .

Debido a que el sistema de medición de la velocidad está restringido a un plano (dos dimensiones), se realizaron simulaciones numéricas CFD para obtener el campo tridimensional de velocidad (Capítulo 4). Las simulaciones numéricas fueron validadas con datos obtenidos experimentalmente. Las conclusiones de la validación son:

- La componente axial de la velocidad varía un máximo del 2% a partir de la mitad de la longitud del dominio.
- La diferencia promedio entre el perfil vertical de velocidad numérico y el experimental es menor al 3%.
- Los resultados numéricos utilizando el modelo de turbulencia $RNGk-\epsilon$ obtuvieron las menores diferencias con resultados experimentales.
- Los resultados numéricos utilizando tres tamaños de malla indican que la malla base es adecuada.
- El índice de convergencia de refinamiento para la malla base evaluado sobre la línea vertical central y la horizontal al interior de la habitación es 1.85% y 2.94%, respectivamente.
- La diferencia entre el resultado numérico y el experimental para P_a e I_h son del 24% y 7%, respectivamente.

El dominio validado fue escalado para realizar simulaciones a escala real con aire como fluido de trabajo. Se utilizaron cuatro parámetros para evaluar la ventilación natural: el flujo de ventilación (F_v), el porcentaje de volumen con magnitud de velocidad significativa (P_v), el índice de homogeneidad (I_{hv}) y el promedio de la magnitud de velocidad (\bar{U}).

Las conclusiones de la investigación numérica se enlistan a continuación.

- En los rangos analizados, F_v , P_v y \bar{U} aumentan exponencialmente con A_D , A_O , A_D/A_V y A_O/A_V .
- I_{hv} solo depende de la geometría y área de la ventana. La ventana cuadrada presenta mejor desempeño en I_{hv} que la ventana rectangular.
- Por lo tanto, la ventilación natural es mejor para el caso con el ducto del WE de mayor tamaño y con la ventana más grande.

Sugerencias para futuros trabajos

Comprobar que en las simulaciones de los casos estudiados, los flujos de entrada y los flujos de salida en la habitación sean iguales (conservación de masa).

Se sugiere ampliar los rangos de estudio de las relaciones de área A_D/A_V y A_O/A_V con valores mayores a los valores estudiados. En los rangos estudiados, F_v , P_v y \bar{U} aumentan exponencialmente, sin embargo es de esperarse que estos parámetros alcancen un máximo y luego disminuyan.

En este trabajo se evaluaron dos geometrías de ventana con diferente área, se presume que los resultados encontrados son efecto principalmente del cambio de área, para verificar esto se sugiere realizar estudios cambiando la geometría de la ventana pero con la misma área, y por separado cambiar el área con la misma geometría.

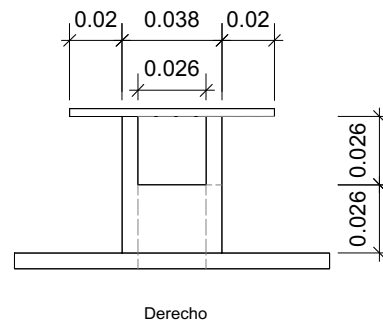
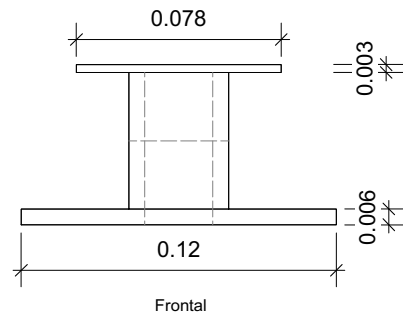
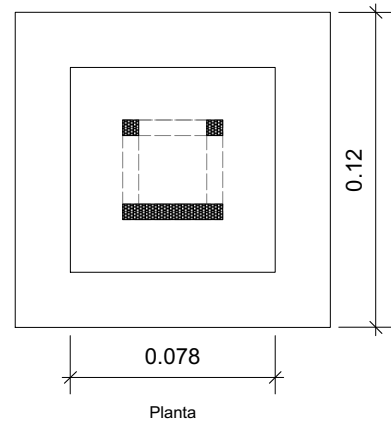
Para complementar todos estos estudios se sugiere incluir los efectos térmicos.



Planos constructivos de los intercambiadores de viento

Los planos constructivos correspondientes a cada uno de los cinco intercambiadores de viento fueron diseñados en el programa VectorWorks@2016 a una escala de 1 : 25 con respecto al modelo real. Las dimensiones de los WE varían conforme al área de ducto.

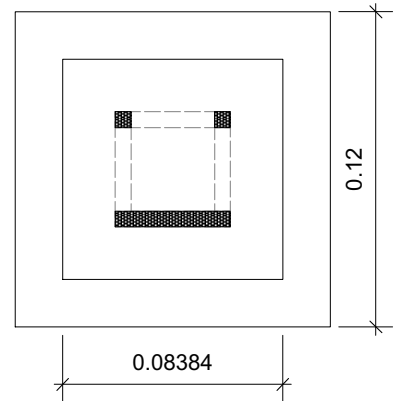
Vectorworks Educational Version



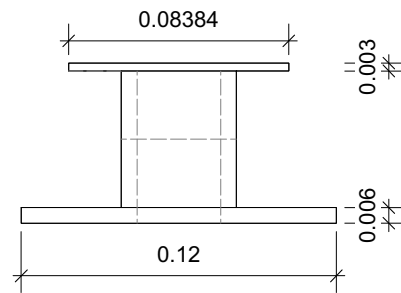
Nombre del plano: Intercambiador de viento A1	
Dibujado por: Delmer Gómez Heleria	
Escala: 1:25	Número de plano: 1
Fecha: 07 de marzo de 2016	

Vectorworks Educational Version

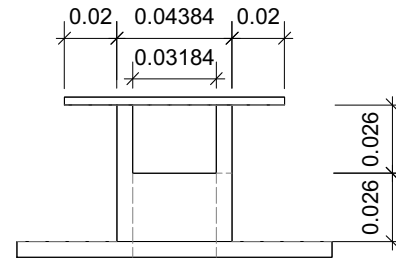
Vectorworks Educational Version



Planta



Frontal

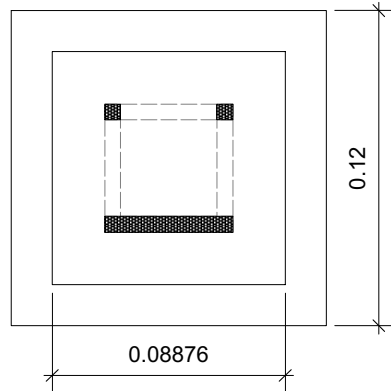


Derecho

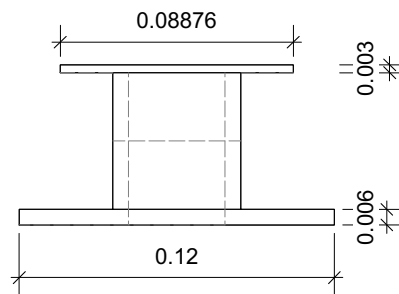
Nombre del plano: Intercambiador de viento A2	
Dibujado por: Delmer Gómez Heleria	
Escala: 1:25	Número de plano: 2
Fecha: 07 de marzo de 2016	

Vectorworks Educational Version

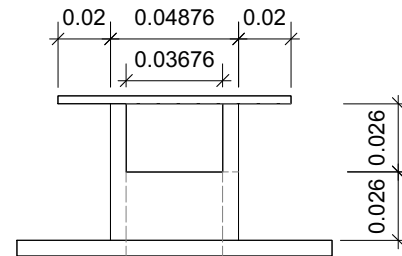
Vectorworks Educational Version



Planta



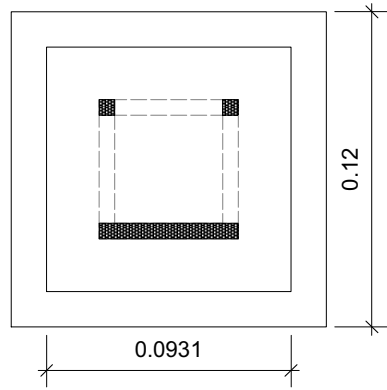
Frontal



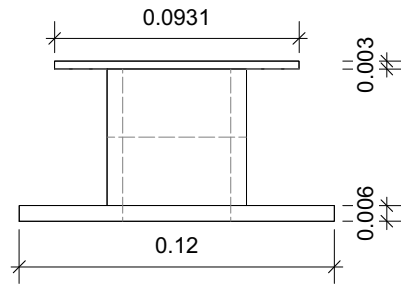
Derecho

Nombre del plano: Intercambiador de viento A3	
Dibujado por: Delmer Gómez Heleria	
Escala: 1:25	Número de plano: 3
Fecha: 07 de marzo de 2016	

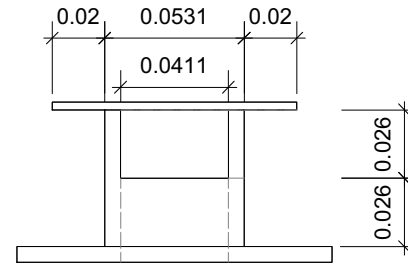
Vectorworks Educational Version



Planta



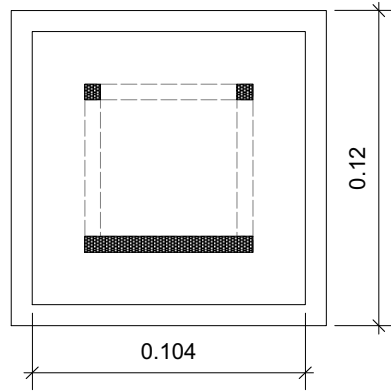
Frontal



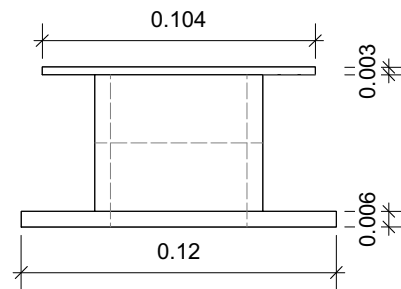
Derecho

Nombre del plano: Intercambiador de viento A4	
Dibujado por: Delmer Gómez Heleria	
Escala: 1:25	Número de plano: 4
Fecha: 07 de marzo de 2016	

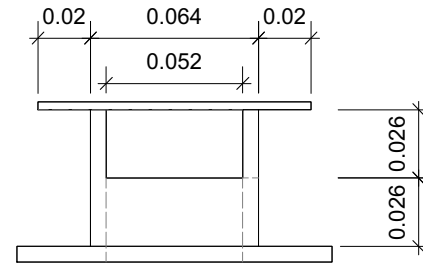
Vectorworks Educational Version



Planta



Frontal



Derecho

Nombre del plano: Intercambiador de viento A5	
Dibujado por: Delmer Gómez Heleria	
Escala: 1:25	Número de plano: 5
Fecha: 07 de marzo de 2016	

Vectorworks Educational Version

Referencias

- Alfonsi, G. (2009). Reynolds-averaged navier–stokes equations for turbulence modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 62(4):040802.
- ANSYSFluent (2006a). Fluent 6.1 User’s Guide. <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/pdf/ug/fl61ug.pdf>. Consultado: 2017-10-12.
- ANSYSFluent (2006b). Fluent 6.3 Turbulence: Fluent Inc. http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Turbulence_Notes_Fluent-v6.3.06.pdf. Consultado: 2017-05-27.
- ANSYSFluent (2017). Wall boundary conditions. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node252.htm>. Consultado: 2017-09-07.
- ASHRAE (2004). *ASHRAE Standard 62.1-2004. Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- Bainbridge, D. y Haggard (2011). *Passive solar achitecture: heating, cooling, ventilation, and more using natural flows*. Chelsea Green Publishing.
- Bangalee, M. Z. I., Miao, J. J., Lin, S. Y., y Yang, J. H. (2013). Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model. *Energy and Buildings*, 66:306–314.
- Blocken, B. (2015). Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91:219–245.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., y Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2):238–252.

- Castillo, J., Cruz-Salas, M., y Huelsz, G. (2017). Natural ventilation by windexchangers in a building with a window in prevailing winds: design guidelines. *International Journal of Ventilation*, 16(1):1–14.
- Castillo, J. y Huelsz, G. (2017). A methodology to evaluate the indoor natural ventilation in hot climates: Heat Balance Index. *Building and Environment*, 114:366–373.
- Castillo-Torres, J. A. (2016). *Natural ventilation in rooms using windexchanger*. Tesis doctoral, Programa de Posgrado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Choudhury, D. (1993). *Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling*. Fluent incorporated.
- Craft, T. (2012). Near-wall modelling. *Department of Mechanical, Aerospace, and Manufacturing Engineering, University of Manchester, Manchester, England (unpublished)*.
- Cruz-Salas, M., Castillo, J. A., y Huelsz, G. (2014). Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers. *Energy and Buildings*, 84:458–465.
- Elmualim, A. A. y Awbi, H. B. (2002). Wind tunnel and CFD investigation of the performance of wind catcher ventilation systems. *Journal of Ventilation*, 1(1):53–64.
- Etheridge, D. W. y Sandberg, M. (1996). *Building ventilation: theory and measurement*, volumen 50. John Wiley & Sons Chichester, UK.
- Fernández Diez, P. (2016). Energía eólica. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Catambria. http://data.torre-solar.es/thesis/2000_Pedro_Fernandez_Diez-energia_eolica-135p.pdf. Consultado: 2016-11-16.
- Fox, R. y Donald, M. (1983). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. Interamericana.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlúnzen, H., y Carissimo, B. (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *European Cooperation in Science and Technology*.

- Ghiaus, C. y Allard, F. (2005). *Natural ventilation in the urban environment: assessment and design*. Earthscan, USA.
- Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Goldstein, R. J. (1996). *Fluid Mechanics Measurements*. Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- Iriarte-Muñoz, J. M. (2008). Velocimetría PIV en tiempo real basada en lógica programable FPGA. Reporte técnico. Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
- Jones, W. y Launder, B. (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15:301 – 314.
- Karava, P., Stathopoulos, T., y Athienitis, A. K. (2006). Impact of internal pressure coefficients on wind-driven ventilation analysis. *International Journal of Ventilation*, 5(1):53–66.
- Karava, P., Stathopoulos, T., y Athienitis, A. K. (2011). Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. *Building and Environment*, 46:266–279.
- Kotani, H. y Yamanaka, T. (2006). Flow visualization and inflow direction measurement at a cross-ventilated large opening. *International Journal of Ventilation*, 5(1):79–87.
- Kurabuchi, T., Akamine, O., Endo, G., y Kamata (2006). A study on the effects of porosity on discharge coefficient in cross-ventilated buildings based on wind tunnel experiments. *International Journal of Ventilation*, 5(1):371–382.
- Kurabuchi, T., Ohba, M., Endo, T., Akamine, Y., y Nakayama, F. (2004). Local dynamic similarity model of cross-ventilation part 1 - theoretical framework. *International Journal of Ventilation*, 2(4):371–382.
- Launder, B. E., Reece, G. J., y Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*, 68:537–566.
- LaVision, e. (2006). *Product-Manual for Davis 7.2. Imaging Tools*. "LaVision GmbH, Germany".

- Liu, S., Mak, C. M., y Niu, J. (2011). Numerical evaluation of louver configuration and ventilation strategies for the windcatcher system. *Building and Environment*, 46(8):1600–1616.
- Mares-Castro, C. I. (2010). Medición de velocidad de fluidos en 3D. Tesis de maestría. Centro de Investigaciones en Óptica.
- Menter, F. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605.
- Moonen, P., Defaeye, D., y Carmeliet, J. (2012). Urban physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, 1:197–228.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson Education, México.
- Mundo HVACR (2017). Conceptos y cambios de aire por hora para la ventilación. <https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2012/07/conceptos-y-cambios-de-aire-por-hora-para-la-ventilacion/>. Consultado: 2017-12-12.
- Ohba, M. y Lun, I. (2010). Overview of natural cross ventilation studies and the latest simulation design tools used in building ventilation-related research. *Advances in Building Energy Research*, 4:127–166.
- Perén, J., Van Hooff, L., y Blocken (2016). CFD simulation of wind-driven upward cross ventilation and its enhancement in long buildings: Impact of single-span versus double-span leeward sawtooth roof and opening ratio. *Building and Environment*, 96:142–156.
- Perén, J., van Hooff, T., Leite, B., y Blocken, B. (2015a). CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. *Building and Environment*, 85:263–276.
- Perén, J., van Hooff, T., Leite, B., y Blocken, B. (2015b). Impact of eaves on cross-ventilation of a generic isolated leeward sawtooth roof building: Windward eaves, leeward eaves and eaves inclination. *Building and Environment*, 92:578–590.
- Perén, J., van Hooff, T., Ramponi, R., y Blocken, B. y Leite, B. (2015c). Impact of roof geometry of an isolated leeward sawtooth roof building on cross-ventilation: Straight, concave, hybrid or convex? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145:102–114.

- Potter, M. C., Wiggert, D. C., Hondzo, M., y Shih, T. I. (2002). *Mecánica de fluidos*. Thomson, México.
- Ramponi, R. y Blocken, B. (2012). CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and Environment*, 53:34–48.
- Ramponi, R., Blocken, B., Laura, B., y Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92:152–166.
- RISO (2002). *Guidelines for design of wind turbines*. Jydske Centraltrykkeri, Denmark.
- Roache, P. (1994). Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 116(3):405–413.
- Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 29(1):123–160.
- Santamouris, M. y Wouters, P. (2006). *Building Ventilation: The State of the Art*. Routledge., London.
- Schwer, L. E. (2008). Is your mesh refined enough? Estimating discretization error using GCI. *7th LS-DYNA Anwenderforum*, 1(1):50.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., y Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96:1749–1761.
- Tsan-Hsing, S., William, W. L., Aamir, S., Zhigang, Y., y Jiang, Z. (1995). A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3):227 – 238.
- van Hooff, T. y Blocken, B. (2010). Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam arena stadium. *Environmental Modelling and Software*, 25(1):51–65.

- van Hooff, T., Blocken, B., Aanen, L., y Bronsema, B. (2011). A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. *Building and Environment*, 46:1797–1807.
- van Hooff, T., Blocken, B., y Tominaga, Y. (2017). On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: comparison of RANS, LES and experiments. *Building and Environment*, 114:148–165.
- Vásquez, C. (2012). El diseño del sistema de cerramiento. Reporte técnico. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Visagavel, K. y Srinivasan, P. (2009). Analysis of single side ventilated and cross ventilated rooms by varying the width of the window opening using CFD. *Solar Energy*, 2.
- White, F. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill, México, DF.
- Wieringa, J. (1992). Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41:357 – 368.
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD*, volumen 2. DCW industries La Canada, CA.
- Zavala, H. J. (2017). Capa límite atmosférica. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. <http://www.atmosfera.unam.mx//jzavala/OceanoAtmosfera/2014/EnergiaCineticaTurbulenta.pdf>. Consultado: 2017-02-05.