



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

EVALUACIÓN DE SISTEMAS PASIVOS DE VENTILACIÓN

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

PRESENTA:
MIRIAM VERONICA CRUZ SALAS

TUTOR:
DRA. GUADALUPE HUELSZ LESBROS
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

MÉXICO, D.F. ENERO 2014



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: Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros

Vocal: Dr. José Manuel Ochoa de la Torre

1er. Suplente: Dr. Ramón Tovar Olvera

2do. Suplente: Dr. Pablo David Elías Lopez

Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros

FIRMA

*A la memoria de mi Madre,
A la vida de mi Padre.
A José Juan y Jesús Salvador
mis dos grandes amores y motor de vida,
A ti que hoy sólo existes en nuestros pensamientos
A mis sobrinos Ian, Fito, Cheo, la Goldis, Ferchita,
Diego, Donita, Miriamcita y Tebi,
a quienes llevo siempre en mi corazón
y de quienes espero un futuro académico exitoso.
A quienes me aprecian y están conmigo, aún en la distancia.*

Agradecimientos

Gracias a Dios que me ha prestado vida y la ha llenado de motivos para vivirla, me ha regalado sueños y me ha ayudado a alcanzarlos, me ha enseñado el dolor para valorar la felicidad.

Gracias a quien dedicó tiempo y paciencia, quien compartió una parte de su conocimiento, y dirigió esta tesis, muchas gracias Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros.

Gracias a mis sinodales: Al Dr. Jorge Rojas Menéndez por prestar el canal de agua desarrollado por él y su grupo de investigación, Dr. Ramón Tovar Olvera, Dr. Jose Manuel Ochoa de la Torre y al Dr. Pablo David Elias López, por sus acertadas correcciones y el tiempo dedicado para hacerlas.

Gracias al M.C. José A. Castillo por el apoyo en la ejecución de los experimentos. Gracias al técnico de laboratorio Guillermo Hernández y al Dr. Rafael Castrejón por las asesorías con el uso del láser. Gracias al Ing. Miguel Casas y al Dr. Guillermo Barrios por la asesorías sobre el uso de Latex. Gracias al M.C. José Juan Ramos por las asesorías sobre los programas realizados en esta tesis.

Gracias al Instituto de Energías Renovables de la UNAM, por permitirme la realización de los estudios de maestría. Gracias al personal docente, administrativo, amigos y compañeros, por todo el apoyo recibido durante mi estancia en el instituto.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para la realización de los estudios de maestría.

Resumen

El objeto de estudio de esta tesis es lo que aquí se denomina intercambiador de viento, el cual es un sistema pasivo de ventilación que constituye un apéndice en el techo y consiste en un ducto con o sin divisiones por el que entra y/o sale aire de la edificación. Su altura es mucho menor a la de la edificación. El objetivo general de esta tesis fue encontrar la configuración o las condiciones en las que un intercambiador de viento tiene un mejor desempeño. Para esto se realizaron experimentos a escala de laboratorio, utilizando un canal de agua, de una habitación con una ventana orientada al barlovento y esta habitación con 6 diferentes intercambiadores de viento colocados en el techo, para algunos intercambiadores se varió el ángulo de incidencia del viento (θ). Como referencia o línea base, también se estudió la habitación sin intercambiador de viento. Se utilizó el número de Reynolds ($Re = uL/\nu$) para obtener similitud dinámica. En donde u es la velocidad característica del flujo, L es la longitud característica y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Se obtuvieron velocidades en el plano central tangente a la dirección del viento con velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica (SPIV).

Se comparó el desempeño de los intercambiadores de viento con respecto al que se obtiene en la misma habitación sin intercambiador de viento y se evaluó en términos del porcentaje de área con mayor velocidad del aire en el interior de la habitación que la máxima velocidad sin intercambiador de viento y del flujo de entrada total a la habitación normalizado con el flujo de entrada total para el caso de línea base.

Esta tesis demuestra experimentalmente que el uso de intercambiadores de viento aumenta significativamente la ventilación natural al interior de la habitación. Para el caso de una habitación con una ventana orientada al

barlovento los intercambiadores trabajan principalmente como extractores de viento. Se encontró que el desempeño de un intercambiador de viento, en estas condiciones, depende principalmente de la orientación de las aperturas de éste con respecto al viento. El área de estas aperturas y el área del ducto también influyen en el desempeño de éste. También se comprobó que el uso de divisiones al interior del intercambiador entorpece el flujo.

Por todo lo anterior se concluye que para el caso de una habitación con una ventana, donde el viento tiene principalmente dirección hacia la ventana, es decir la ventana está al barlovento, de los 6 tipos de intercambiadores de viento evaluados con los parámetros mencionados, el intercambiador que tiene el mejor desempeño es el que no tiene división al interior del ducto y tiene dos aperturas opuestas, con la misma área de apertura y que en total corresponde a la mitad del área de la ventana. Estas aperturas deben estar paralelas al flujo principal.

Abstract

The object of study of this thesis is what is wind exchanger, a passive ventilation system which is an attachment on the roof and consists of a duct with or without divisions by entering and / or exiting air of the building. Its height is much lower than that of the building. The overall objective of this thesis was to find the setting or conditions in which wind exchanger has a better performance. For this, experiments were performed on a laboratory scale, using a water channel, a room with a window facing windward and this room with 6 different wind exchangers placed on the roof for some exchangers incidence angle was varied Wind (θ). As a reference or base line, room was also studied without wind exchanger. Reynolds number ($Re = uL/ \nu$) was used to obtain dynamic similarity. Where u is the characteristic velocity of the flow, L is the characteristic length and ν is the kinematic viscosity of the fluid. Velocities were obtained in the central plane tangent to the wind direction with Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV).

Performance wind exchangers relative to that obtained in the same room without wind exchanger and evaluated in terms of the percentage of area with higher air velocity inside the room high-speed exchanger was compared wind and the total inflow to the room with the normalized total inflow to the base line case.

This thesis demonstrates experimentally that using wind exchangers significantly increases natural ventilation into the room. In the case of a room with a window facing windward exchangers mainly work as extractors wind. It was found that the performance of a wind exchanger, in these conditions, mainly depends on the orientation of the openings of the latter with respect to the wind. The area of these openings and duct area also influence the perfor-

mance of it. It was also found that the use of divisions within the exchanger will hinder the flow.

Given the above it is concluded that for the case of a room with a window, where the wind has mainly towards the window, ie the window is to windward, of the 6 types of wind exchangers evaluated the above parameters, the exchanger that has the best performance is the one without division into the duct and having two opposed, with the same opening area and in total is half the area of the window openings. These openings should be parallel to the main flow.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	v
Abstract	vii
Nomenclatura	xvii
1. Introducción	1
1.1. Ventilación	1
1.1.1. Tipos de ventilación	2
1.2. Ventilación natural	2
1.2.1. Mecanismos de ventilación natural	3
1.2.2. Estrategias de la ventilación natural	5
1.3. Sistemas pasivos de ventilación	7
1.3.1. Ventana	9
1.3.2. Patios y atrios	10
1.3.3. Muro trombe	12
1.3.4. Chimena solar	13
1.3.5. Torre de viento	14
1.3.6. Intercambiador de viento	15
2. Revisión bibliográfica de intercambiadores de viento	17
2.1. Definición	17
2.1.1. Componentes	19

2.1.2. Funcionamiento	19
2.2. Ventajas y desventajas	20
2.3. Clasificación	21
2.4. Estudios realizados	21
3. Metodología experimental	27
3.1. Dispositivo experimental	28
3.1.1. Canal de agua	28
3.1.2. Maquetas	31
3.1.3. Fluido de trabajo	34
3.2. Sistema de medición SPIV	34
3.2.1. Arreglo experimental	36
3.3. Generación de la capa límite atmosférica	39
3.3.1. Obstáculos cerca de la zona de estudio	42
3.3.2. Obstáculos cerca de la entrada del canal	45
3.4. Diseño experimental	46
3.4.1. Similitud dinámica	48
3.4.2. Programa de experimentos	50
4. Análisis de resultados	55
4.1. Descripción cualitativa de los flujos	55
4.2. Análisis de áreas con velocidades significativas	58
4.3. Análisis de flujos de ventilación	60
4.4. Desempeño con respecto a LB	64
5. Conclusiones	71
A. Planos constructivos de maquetas	77

Índice de figuras

1.1. Movimiento de aire horizontal. Zonas de presión positiva (+) y negativa (-) creadas por el viento. Tomado de Rodriguez et al. (2011).	5
1.2. Ventilación en un solo lado inducida por las variaciones del viento y la flotación térmica. Tomado de Axley (2001).	6
1.3. Ventilación cruzada impulsada por el viento. Tomado de Axley (2001).	7
1.4. Ventilación por desplazamiento inducido por fuerzas de flotación. Tomado de Axley (2001).	8
1.5. Ventilación combinando fuerzas de viento y flotación. Tomado de Axley (2001).	8
1.6. El funcionamiento de un patio interior durante un ciclo de 24 horas. Tomado de Talib (1984).	11
1.7. Esquema del muro trombe para ventilación (a) calentamiento en invierno, (b) enfriamiento en verano.	13
1.8. Principio de operación de una torre de viento. Tomado de Khan et al. (2008). En los dos esquemas el aire entra en la abertura de la torre de viento orientada al barlovento y se conduce a través del subducto, en la primera el aire se introduce por la habitación para luego salir por la ventana. En la segunda imagen también entra aire a través de la ventana de la habitación, éste se une con el aire que entró por el subducto de la torre de viento y se conducen por el subducto para salir por la abertura orientada al barlovento.	15
2.1. Habitación con intercambiador de viento en el techo (Corte alzado).	19
3.1. Canal de agua donde se realizaron los experimentos.	28

3.2.	Tubería de recirculación, bomba de 4 <i>HP</i> y depósito de agua de 800 <i>l</i> de capacidad.	29
3.3.	Vista de arriba y vista lateral de la entrada al canal de agua de aluminio, muestran la grava y la pila a base de placas de policarbonato de 10 <i>cm</i> de ancho.	30
3.4.	Zona de trabajo con plano de luz láser.	30
3.5.	Esquema isométrico y fotografía del obstáculo en forma de una rampa curva al final del canal para mantener el tirante del agua.	30
3.6.	El esquema muestra la semejanza geométrica que guardan el modelo a escala 1:25 y el modelo real.	31
3.7.	Fotografías de maqueta las dos partes que conforman la maqueta y de los tipos de intercambiadores de viento.	32
3.8.	Planta y alzado de la habitación con una ventana y un intercambiador de viento colocado en el techo a escala real.	33
3.9.	Láser <i>New wave RESEARCH</i> y sistema de control y enfriamiento.	36
3.10.	Este esquema muestra las diferentes partes que componen el arreglo experimental.	37
3.11.	Espejo de segunda superficie y soporte metálico.	37
3.12.	Lente y soporte metálico.	38
3.13.	Esquema del acomodo de las cámaras.	38
3.14.	Tableta no. 22 utilizada para la calibración del sistema SPIV.	39
3.15.	Perfiles de velocidad del viento en zona urbana, zona rústica y costa. Tomado de UNAD (2013).	40
3.16.	Perfil obtenido en el canal de agua sin obstáculos.	41
3.17.	Perfil obtenido con 5 obstáculos, 3 placas verticales colocadas sobre el piso, separadas 5 <i>cm</i> entre ellas, la más cercana a 62 <i>cm</i> de distancia del centro de la zona de trabajo y una placa horizontal a una altura de 2.5 <i>cm</i> y una placa inclinada 45° a 25 <i>cm</i> de altura, éstas últimas a 90 <i>cm</i> de distancia del centro de la zona de trabajo.	43
3.18.	Perfil obtenido con 7 obstáculos, 3 placas verticales colocadas sobre el piso, separadas 5 <i>cm</i> entre ellas, la más cercana a 62 <i>cm</i> de distancia del centro de la zona de trabajo. Una placa horizontal a una altura de 2.5 <i>cm</i> y simultáneamente 3 placas inclinadas 45° a diferentes alturas (25,30 y 32 <i>cm</i>). Las últimas cuatro placas se colocaron a 90 <i>cm</i> del centro de la zona de trabajo.	44

3.19. Perfil obtenido con 6 obstáculos, 3 placas verticales colocadas sobre el piso, separadas 5 cm entre ellas, la más cercana a 62 cm del centro de la zona de trabajo. Se colocó una placa horizontal a una altura de 2.5 cm y 2 placas inclinadas 45° a diferentes alturas (25 y 28 cm), las últimas tres placas se colocaron a 90 cm de distancia del centro de la zona de trabajo. 45

3.20. a) Fotografía de obstáculos a la entrada del canal. b) Esquema y medidas de los obstáculos que se utilizó para obtener el perfil de capa límite usado en los experimentos. 46

3.21. Perfil obtenido con 18 obstáculos a la entrada del canal, 16 placas verticales de diferentes tamaños (3 de 10 cm, 3 de 7.5 cm, 3 de 5 cm y 7 de 2.5 cm) con diferentes separaciones entre ellas (10,7.5,5 y 2.5 cm) y 2 obstáculos de 2.5 cm de ancho y con un ángulo de 45° respecto al flujo, a 22.5 y 25 cm. Con estos obstáculos se encontró $\alpha = 0.284 \pm 0.004$ 47

3.22. Seis tipos de intercambiadores de viento evaluados experimentalmente. . . 50

3.23. Foto de maqueta de habitación con intercambiador de viento tipo A, antes y después de haber colocado la máscara con papel *contac* para evitar reflejos. 53

4.1. Campos de velocidad promedios calculados de los 12 casos, con áreas de interrogación de 64 pixeles \times 64 pixeles. 56

4.2. Campos de velocidad promedio calculados, en resolución 64 pixeles \times 64 pixeles. Se enmarcan los vectores tomados en cuenta dentro de la habitación y se remarcan en color rojo aquellos con magnitud $\geq M_r$ 59

4.3. Los vectores en rojo representan la ubicación de los vectores que se consideraron para el cálculo de los flujos de entrada y salida de la ventana y del intercambiador de viento. 62

4.4. Gráfica de los flujos promedios de entrada y salida a través de la ventana y el intercambiador de viento (\bar{F}_{ev} , \bar{F}_{sv} , \bar{F}_{ei} y \bar{F}_{si}). 63

4.5. Gráfica comparativa del flujos de entrada total ($F_{et} = \bar{F}_{ev} + \bar{F}_{ei}$) y el flujos de salida total ($F_{st} = \bar{F}_{sv} + \bar{F}_{si}$) de los doce casos. 64

4.6. Gráfica de la relación que guardan el flujo de entrada total y el promedio del flujo de entrada y salida total, con respecto a su homólogo de *LB*, para todos los casos. 66

4.7. Gráfica de tridimensioalidad del flujo para cada caso. 69

4.8. Gráfica de las fluctuaciones temporales. 70

Índice de cuadros

3.1. Propiedades del agua y el aire a 1 <i>atm</i> y 20 °C . Tomado de White (1979)	34
3.2. Coeficientes de fricción para diferentes tipos de terreno.	40
3.3. Número de Reynols y valores considerados en el cálculo, escala laboratorio y escala real.	49
3.4. Relación de experimentos realizados.	51
4.1. Concentrado de los porcentajes de vectores con magnitud $\geq M_r$ y ubicados en una altura menor de 2.20 <i>m</i> en escala real para todos los casos.	60
4.2. Resultados de la evaluación del desempeño de los diferentes intercambiadores de viento, tomados de la Fig. 4.6 y ordenados de mejor a peor desempeño de acuerdo al flujo de entrada. Se muestran algunas características para su mejor análisis.	67
5.1. Tabla comparativa del desempeño de los diferentes intercambiadores de viento, ordenados de mejor a peor desempeño de acuerdo a los dos parametros de evaluación. Se agrega una columna con los cambios de aire por hora que se generan en cada caso de acuerdo al flujo de entrada total calculado.	73

Nomenclatura

Letras griegas

α Coeficiente de fricción

μ Viscosidad dinámica

ν Viscosidad cinemática

ρ Densidad

θ Ángulo de incidencia del viento

Mayúsculas

A_d Área de ducto del intercambiador de viento (Sección transversal de área)

A_f Área de la fachada de la habitación

A_i Área total de las aperturas del intercambiador de viento

A_v Área de la apertura de la habitación (ventana)

D Número de subductos del intercambiador de viento

\bar{F}_{ei} Flujo promedio de entrada del intercambiador de viento

\bar{F}_{ev} Flujo promedio de entrada de la ventana

\bar{F}_{si} Flujo promedio de salida del intercambiador de viento

\bar{F}_{sv} Flujo promedio de salida de la ventana

F_{et} Flujo de entrada total

F_{st} Flujo de salida total

F_{prom} Flujo promedio

FET_{LB} Flujo de entrada total de línea base

FST_{LB} Flujo de salida total de línea base

$\bar{F}_{et}(110i)$ Promedio de flujo de entrada total de 110 campos de velocidad

$F_{et}(prom)$ Flujo de entrada total del campo promedio de velocidad

H Longitud del intercambiador de viento (Altura)

L Longitud característica

Ma Número de Mach

M_r Magnitud de referencia

N Número de aberturas del intercambiador de viento

Re Número de Reynolds

U Magnitud de la velocidad del viento

Minúsculas

f_{ei} Flujo de entrada del intercambiador de viento

f_{ev} Flujo de entrada de la ventana

f_{si} Flujo de salida del intercambiador de viento

f_{sv} Flujo de salida de la ventana

h_i Altura del intercambiador de viento

u Velocidad característica del flujo

Unidades

m Metro

cm Centímetro

mm Milímetro

ms Milisegundo

μs Microsegundo

l Litro

HP Caballos de fuerza

Capítulo 1

Introducción

1.1. Ventilación

En arquitectura se denomina ventilación a la renovación del aire del interior de una edificación mediante extracción y/o inyección de aire. La ventilación en los edificios se utiliza para mantener la calidad del aire interior. También puede utilizarse para mejorar el confort térmico si la temperatura del aire exterior es más cercana a la temperatura de confort y en climas cálido-húmedos ayuda a promover la disipación de calor a través de la piel.

La calidad del aire interior consiste en tener niveles aceptables de oxígeno en el aire (Awbi, 1998) y eliminar los contaminantes en el aire, que se generan tanto por la actividad humana como por el propio edificio. Estos contaminantes son los malos olores, para los cuales las personas que están entrando al cuarto son muy sensibles; la humedad, la cual aumenta el riesgo de crecimiento de moho; el dióxido de carbono resultado de la respiración, el cual en altas concentraciones puede inducir letargo; el polvo, aerosoles y gases tóxicos resultantes de la actividad humana, así como de los materiales volátiles que se desprendan del mismo edificio (materiales limpios deben ser elegidos para uso interno, pero esto no es siempre posible) (Roulet, 2005). La sensación de confort térmico en las personas depende de los parámetros del aire tales como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad, la turbulencia y la concentración de especies químicas (Chen, 2009); de la temperatura de

las superficies de los muros, techos y ventanas, y también del tipo de actividad que se realice y la vestimenta (Roulet, 2005). La ventilación es usada en edificios para crear un ambiente térmicamente confortable por medio de la regulación de los parámetros del aire interior. Por otra parte la falta de ventilación puede causar excesiva humedad, condensación, sobrecalentamiento y acumulación de olores, humos y contaminantes (Khan et al., 2008).

La ventilación busca que la velocidad del aire al interior de la edificación aumente lo cual afecta al cuerpo humano en dos diferentes maneras. En primer lugar determina el intercambio de calor convectivo del cuerpo, en segundo lugar afecta la capacidad evaporativa del aire y consecuentemente la eficiencia del enfriamiento por la sudoración (Givoni, 1976).

1.1.1. Tipos de ventilación

Olgay (1998) clasifica la ventilación en tres tipos: ventilación forzada, ventilación natural e infiltración.

La ventilación forzada es la que se realiza mediante la creación artificial de depresiones o sobrepresiones en conductos de distribución de aire o áreas del edificio. Éstas pueden crearse mediante extractores, ventiladores, unidades manejadoras de aire (UMAs) u otros elementos accionados mecánicamente.

La ventilación natural es la que se realiza mediante la adecuada ubicación de aperturas, conductos o superficies, aprovechando las depresiones o sobrepresiones creadas en el edificio por el viento, la convección térmica del aire, producido por fuentes de calor como la radiación solar o cualquier otro fenómeno sin que sea necesario aportar energía al sistema en forma de trabajo mecánico.

La infiltración es la entrada de aire desde el exterior por medio de las aberturas no intencionales, tales como rendijas en puertas o ventanas, grietas en paredes. Por su propia naturaleza, tiende a ser pequeña y muchas veces no identificable. Es probablemente imposible construir una envolvente del edificio que sea completamente hermética (Etheridge, 2012).

1.2. Ventilación natural

La ventilación natural ha adquirido importancia en la actualidad. Entre otras cosas por la preocupación de los seres humanos por el agotamiento de los recursos naturales, el calentamiento global y el incremento en el precio

de combustibles fósiles (Bahadori, 1978). Li y Mak (2007) comentan que la ventilación natural está siendo cada vez más utilizada en edificios modernos residenciales para minimizar el consumo de energías no renovables y la dependencia de medios activos para el control ambiental.

La ventilación natural no causa problemas ambientales y además soluciona además algunos de los problemas provocados por los distintos sistemas mecánicos de ventilación, tales como el ruido, los costos del mantenimiento y del consumo energético. Sin embargo, se reconoce que la ventilación natural no siempre puede reemplazar totalmente a la ventilación forzada, ya que ésta es muy útil en ciertas circunstancias donde es insuficiente la implementación de la ventilación natural. El empleo de la ventilación natural debería ser mucho mayor del que se hace en la actualidad y para ello hay que aumentar y difundir los conocimientos acerca de este tema.

Santamouris (2005) opina que la ventilación natural es una importante y simple técnica que, cuando se usa apropiadamente puede contribuir a luchar contra los problemas de calidad de aire interior por medio del decremento de la concentración de contaminantes en el interior, puede proveer condiciones de confort térmico en espacios interiores y puede disminuir el consumo de energía que requiere la ventilación forzada en edificios. Menciona que para que estos beneficios se lleven a cabo es necesario que la concentración de contaminantes en el exterior sea más baja que los contaminantes en el interior, la temperatura exterior esté dentro de los límites de ‘confort’o en el peor escenario, no de lugar a estrés térmico de las personas.

En las viviendas el tipo de ventilación más común es la ventilación natural a través de ventanas o aberturas y por la infiltración (McQuiston et al., 2005).

La ventilación natural debería ser un elemento fundamental en el diseño de edificios con objeto de lograr el uso eficiente de la energía de los edificios. En consecuencia, el viento debería ser uno de los parámetros más importantes a considerar en la arquitectura, ya sea para captarlo, evitarlo o controlarlo. Para lograr una adecuada ventilación en la arquitectura es necesario comprender como se comporta el viento y de que manera pueden aprovecharse los patrones que sigue en su recorrido a través de las edificaciones.

1.2.1. Mecanismos de ventilación natural

El flujo de aire a través de un edificio es inducido por gradientes de presión a través de él. La diferencia de presión se obtiene a partir de dos efectos: el flujo del viento externo (la fuerza del viento) y el gradiente de temperatura

entre el aire interior y exterior (fuerza térmica) (Givoni, 1976). Dicho de otra manera, la ventilación natural es inducida, ya sea por el viento o por la flotación térmica.

Ventilación por viento. El viento es uno de los factores de mayor importancia para lograr un ambiente más adecuado en climas cálidos y una de sus características primordiales y necesarias de conocer, es su dirección (Vélez, 1992). La acción de la radiación solar y el movimiento de rotación terrestre dan lugar a la presencia del viento en la Tierra. El viento es aire en movimiento que se genera por las diferencias de presión y de temperatura atmosféricas, causadas por un calentamiento no uniforme de la superficie terrestre, ya que mientras que el sol calienta el aire, el agua y la tierra de un lado del planeta, el otro lado se enfría a causa de la radiación de onda larga hacia el cielo. Este calentamiento desigual de la atmósfera origina movimientos de aire compensatorios que tienden a reducir la diferencia horizontal de temperatura (Rodríguez et al., 2011).

El ejemplo más claro de como actúa el viento, es cuando éste golpea el edificio, se crea presión positiva en el lado de barlovento (cara donde soplan los vientos dominantes) y presión negativa sobre el lado de sotavento (contrario al barlovento) del edificio como se muestra en la Fig. 1.1. Esta diferencia de presión actúa como una fuerza impulsora y se inicia la ventilación al permitir que el aire fluya hacia adentro del edificio a través de la abertura de barlovento y salga del edificio a través de la abertura de sotavento. La ventilación impulsada por el viento depende de la magnitud, la dirección y la velocidad del viento (Khanal y Lei, 2011). La diferencia entre las dos presiones puede generar ventilación cruzada intensa (Szokolay, 2008).

Ventilación por flotación térmica. Cuando la temperatura del aire interior y exterior no son la misma, la diferencia creada entre sus densidades y los gradientes de presión verticales difieren al interior y exterior (Givoni, 1976). La ventilación impulsada por la flotación depende de esta diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del edificio, o bien de la diferencia de temperaturas entre diferentes zonas dentro del edificio. En esta ventilación, el flujo de aire es causado por la diferencia de temperatura en la dirección vertical (Khanal y Lei, 2011). La ventilación natural impulsada por la flotación también se conoce como efecto *stack* y puede ser por mezclado o por desplazamiento dependiendo de la posición de las aberturas (Linden, 1999; Linden et al., 1990).

Cuando el aire dentro de un ducto vertical es más caliente que el aire exterior y existe una abertura de entrada y otra de salida, el aire caliente se

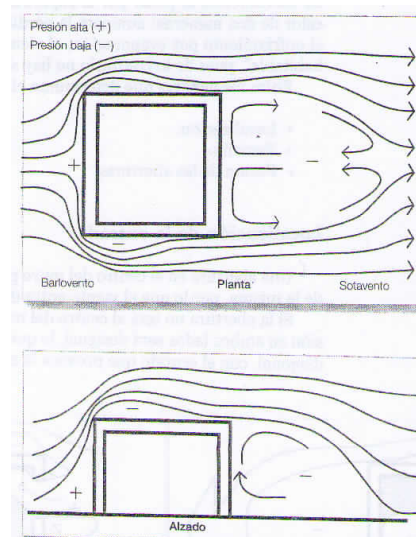


Figura 1.1: Movimiento de aire horizontal. Zonas de presión positiva (+) y negativa (-) creadas por el viento. Tomado de Rodríguez et al. (2011).

elevará y será remplazado por aire exterior más fresco que entra por la parte inferior, como ocurre en el ducto de una chimenea. La ventilación natural por flotación térmica también puede ocurrir dentro de un cuarto de altura significativa, si la salida tiene un nivel alto y la entrada uno bajo. El flujo de aire será proporcional a la diferencia de altura entre las aberturas de entrada y salida y la diferencia de temperatura entre el aire dentro del cuarto y el aire exterior (Szokolay, 2008). La ventilación natural por flotación térmica es dominante durante los períodos de baja velocidad del viento y se reduce en períodos de verano cuando la diferencia de la temperatura exterior y la interior es menor (Khan et al., 2008).

A pesar de que las dos fuerzas impulsoras – viento y flotación térmica – a menudo se encuentran en la naturaleza, son difíciles de controlar y por lo tanto tienen grandes retos en el diseño y el control de los sistemas de ventilación natural.

1.2.2. Estrategias de la ventilación natural

Ghiaus y Roulet (2005) describen diferentes estrategias de ventilación utilizando las fuerzas impulsoras de la ventilación natural; el viento y la flotación térmica.

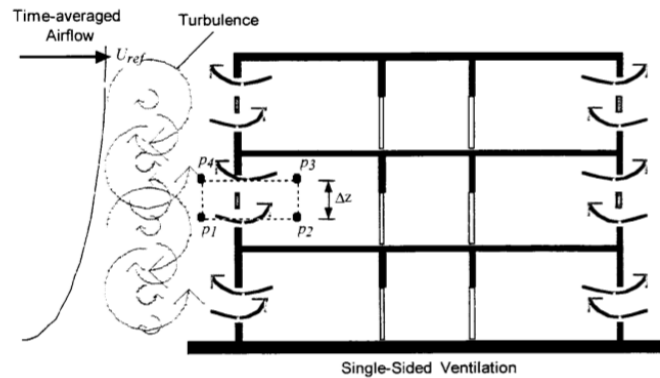


Figura 1.2: Ventilación en un solo lado inducida por las variaciones del viento y la flotación térmica. Tomado de Axley (2001).

- **Ventilación en un solo lado inducida por las variaciones del viento y la flotación térmica.** El viento tiene una componente media y una fluctuante que pueden variar sobre las aberturas y producir un ‘efecto de bombeo’. Cuando la temperatura interior es más alta que la exterior, la flotación hace que el aire frío entre por la parte inferior y el aire caliente salga sobre la parte superior de la abertura. La ventilación en una sola cara, puede ser utilizada cuando se necesita ventilar un solo cuarto (ver Fig. 1.2).
- **Ventilación cruzada impulsada por el viento** (ver Fig. 1.3). El flujo de aire sobre un edificio tiende a inducir una diferencia de presión sobre la superficie del barlovento y la del sotavento. Dicha diferencia de presión impulsa el flujo de aire de ventilación cruzada. Ésta toma lugar cuando el aire entra sobre la cara de un edificio, barre el espacio interior y sale del edificio en otro lado. La ventilación natural adolece de un inconveniente fundamental: que depende de la dirección e intensidad del viento. En la medida que el viento cambie de dirección, también lo hacen los coeficientes de presión del viento.
- **Ventilación por desplazamiento inducido por fuerzas de flotación.** El aire cálido es más ligero que el aire frío. En los climas templados y fríos (en ausencia de refrigeración artificial) el aire interior es a menudo más caliente que el aire exterior y tiende a salir del edificio a través de las aberturas superiores. Este aire se reemplaza por aire más

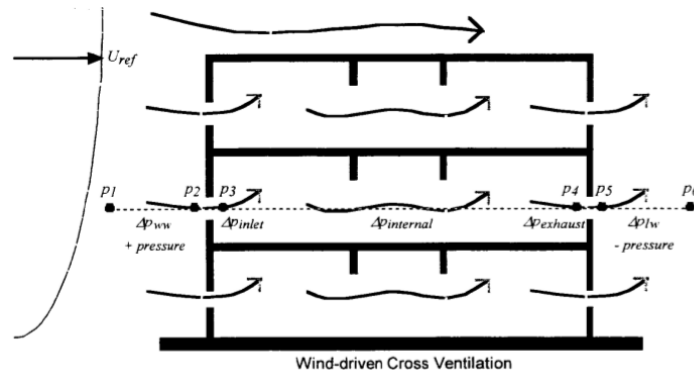


Figura 1.3: Ventilación cruzada impulsada por el viento. Tomado de Axley (2001).

frío entrante en las aberturas inferiores (ver Fig. 1.4).

- Ventilación por viento y por flotación.** En muchos casos, el aire interior es más caliente que el aire exterior y el efecto de flotación térmica conduce el flujo de aire de abajo para arriba. El viento impulsa el flujo de aire desde el barlovento a sotavento del edificio. Si las aberturas de ventilación están situados en una forma adecuada, la presión del viento se añade a la flotación térmica y la ventilación se refuerza como se muestra en la Fig. 1.5.

1.3. Sistemas pasivos de ventilación

El término ‘sistemas pasivos de ventilación’, en el contexto de este trabajo, es aplicado a varias técnicas simples que, sin utilizar energía externa, ayudan a aumentar la ventilación natural para obtener calidad de aire interior y en ciertas ocasiones a que la temperatura interior de un edificio sea lo más cercana posible a la temperatura de confort o al menos favorecer la disipación de calor a través de la piel, aumentando así el confort térmico.

Los sistemas pasivos de ventilación están siendo cada vez más propuestos como una alternativa a los sistemas de ventilación mecánica debido a sus beneficios potenciales en términos de costos operativos, consumo de energía y baja emisión de dióxido de carbono (Khanal y Lei, 2011).

Khan et al. (2008) realizaron una revisión bibliográfica y proponen una clasificación de técnicas de ventilación impulsadas por el viento, en donde

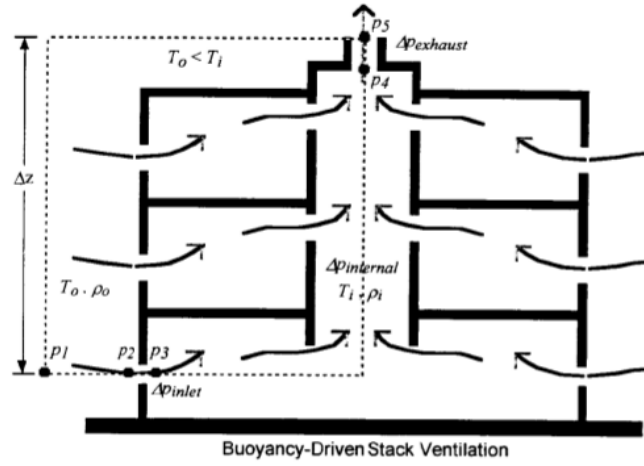


Figura 1.4: Ventilación por desplazamiento inducido por fuerzas de flotación. Tomado de Axley (2001).

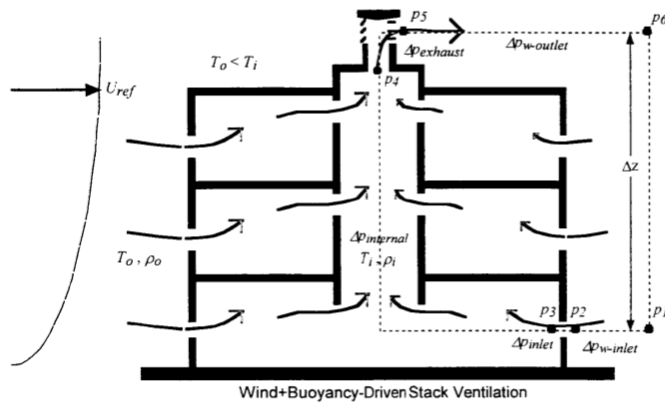


Figura 1.5: Ventilación combinando fuerzas de viento y flotación. Tomado de Axley (2001).

dividen en pasivos, pasivos dirigidos y activos. Dentro de los pasivos ubican a aquellos dispositivos que generalmente no tienen partes móviles. A continuación se describen algunos sistemas pasivos de ventilación, como son: ventanas, patios y atrios, muros trombe, chimeneas solares, torres de viento e intercambiadores de viento, los cuales utilizan los mecanismos de la ventilación natural.

1.3.1. Ventana

Una ventana es un vano o hueco que se abre en una pared con la finalidad de proporcionar luz y ventilación al interior. También se denomina ventana al conjunto de dispositivos que se utilizan para cerrar ese vano. La parte opturable de la ventana es la que permite la ventilación.

Las ventanas sirven también como una conexión física y/o visual con el exterior, en consecuencia permiten vistas a través de ella. Están presentes en la mayoría de las fachadas de los edificios, con una repetición armoniosa y rítmica, o por el contrario, una disposición aleatoria y apariencia desordenada, por lo que constituyen uno de los elementos primordiales de su composición estética.

ASHRAE (2005) refiere a la fenestración como un término arquitectónico que se encarga del arreglo, proporción y el diseño de sistema de ventanas, tragaluces y puertas dentro de un edificio. Menciona que los componentes de la ventana son el acristalamiento, el marco y, en algunos casos, las protecciones solares y las pantallas de insectos.

El acristalamiento puede ser simple o múltiple. El material de acristalamiento más común es el vidrio, aunque el plástico también se utiliza. El vidrio o el plástico pueden ser transparentes, tintados, recubiertos, laminados, estampados u oscurecidos. Las tres categorías principales de los materiales de marcos de ventana son madera, metal y polímeros. El sombreado puede estar en la parte exterior o al interior del edificio, y en algunos casos, se encuentra al interior del sistema de acristalamiento.

Las pantallas de insectos pueden ser necesarias en climas cálidos húmedos pero sus efectos sobre el flujo del aire y sobre la luz del día deben ser reconocidos. La pantalla que menos reduce el flujo de aire (30%) es la pantalla de nylon suave (Szokolay, 2008). Para mantener el mismo efecto, el tamaño de la ventana tendría que aumentarse.

Una de las principales funciones que cumple una ventana es la ventilación natural, permitiendo el paso del aire a través de ella. Cuando un edificio

se ventila naturalmente por la ventana abierta y el viento llega incluso a velocidades moderadas, la temperatura del aire interior tiende a acercarse al nivel de temperatura del aire libre. Una alta velocidad del aire interior también aumenta la velocidad de intercambio de calor entre el aire interior y la masa interior del edificio (Givoni, 1994). Otra función principal es permitir la iluminación natural, a través de la radiación solar, específicamente, la luz visible.

1.3.2. Patios y atrios

En las edificaciones existen espacios que debido a su entorno, generan diferentes condiciones ambientales a las del resto del edificio. Chun et al. (2004) los llaman ‘espacios transicionales’. Este término cubre una amplia gama de espacios, desde un pasillo y un corredor hasta un balcón o una terraza. En estos espacios el ocupante puede experimentar en cierta medida los efectos del cambio del clima exterior, debido a su proximidad con éste.

Los patios centrales y los atrios pertenecen a este tipo de espacios y son sistemas pasivos de ventilación, ya que por sus condiciones (tamaño y ubicación), tienen la capacidad de modificar el ambiente de los espacios que se encuentran cercanos y aumentar la ventilación. Ambos espacios son relativamente grandes a diferencia de los patios que se ven actualmente en las viviendas de construcción masiva.

Un patio central (en inglés *courtyard*), se define como un área sin techo que está completa o parcialmente cerrada por paredes o edificios. Esta condición proporciona un espacio relativamente cerrado que canaliza y dirige el flujo de aire, la abertura en el techo promueve la ventilación por convección natural dentro y alrededor del edificio (Khan et al., 2008), lo cual genera una zona de transición que mejora las condiciones de confort modificando el microclima alrededor del edificio (Khan et al., 2008). Un atrio (en inglés *atrium*) trabaja de una manera similar, se define como un vestíbulo de entrada con techo abierto lo cual permite proporcionar confort a través de una transmisión progresiva del entorno externo hacia el interno. Está claro que ambos sistemas son un espacio abierto que no tiene cobertura y está rodeado por paredes o edificios, la diferencia entre un patio central y un atrio es la ubicación dentro de la edificación. Cabe señalar que, algunos autores (Aldawoud y Clark, 2008; Taleghani et al., 2012) refieren el atrio como un patio central que está cubierto por un techo de vidrio.

Una de las principales razones de que los patios han sobrevivido por

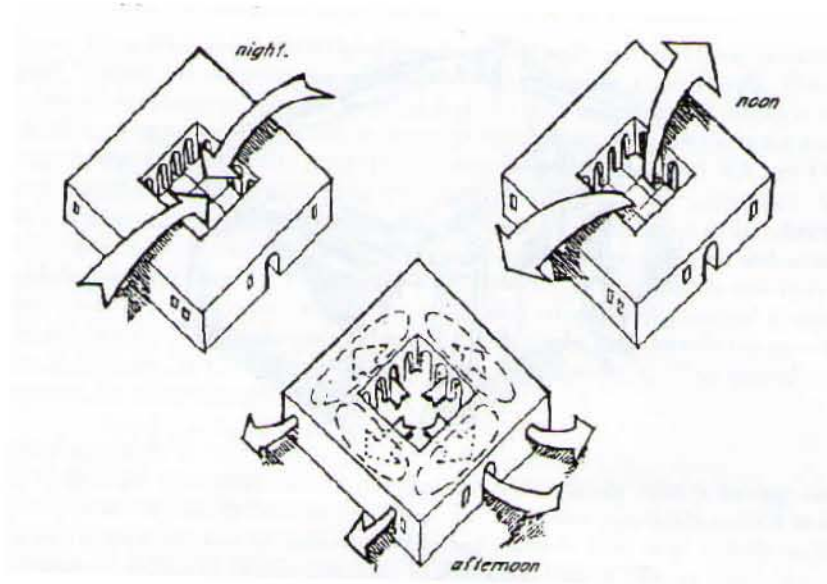


Figura 1.6: El funcionamiento de un patio interior durante un ciclo de 24 horas. Tomado de Talib (1984).

más de 5000 años, es su potencial para proporcionar una zona térmicamente confortable para vivir. Los patios proveen de aire, sol, humedad y sombras por lo que son una fuente de aire fresco y luz.

Talib (1984) describe el funcionamiento de los patios centrales durante el ciclo de 24 horas como se muestra en la Fig. 1.6. En la primera fase el aire fresco de la noche desciende dentro del patio central y dentro del ambiente circundante. La estructura, así como los muebles, se enfrían y el patio pierde calor rápidamente por la radiación al cielo nocturno claro. Por lo tanto el patio se utiliza a menudo para dormir durante las noches de verano. En la segunda fase, al mediodía, la radiación solar incide en el piso del patio directamente. El aire empieza a calentarse, en consecuencia sube y acarrea el aire de las habitaciones vecinas. Esto induce corrientes de convección lo cual puede proporcionar confort. Durante la última fase, durante el atardecer el piso del patio y el interior de los cuartos llegan a ser calentados. Después del atardecer la temperatura del aire cae rápidamente a medida que el patio empieza a irradiar rápidamente al cielo nocturno. El aire fresco de la noche comienza a descender en el patio, completando el ciclo.

Diferentes elementos naturales pueden ser utilizados en el patio para aumentar la humedad en climas secos. La humedad se necesita en las zonas

áridas para lograr el confort. Las plantas y los elementos de agua son los elementos principales que se utilizan en climas cálidos y secos.

La cantidad de sombra está determinada principalmente por la orientación del patio y la relación entre la altura y longitud del mismo. La adición de árboles aumentan de manera significativa la comodidad al aire libre en climas cálidos (Berkovic et al., 2012).

Patios y atrios toman un lugar especial en la arquitectura, además de provocar espacios agradables, ponen en contacto al ser humano con el ambiente que lo circunda y aportan un potencial para el ahorro de energía. En estos espacios las personas pueden sentarse, relajarse y disfrutar de los alrededores o transitarlos para ir de un espacio a otro. Otra ventaja que ofrecen estos espacios es la privacidad causada por los elementos que lo rodean (edificios, habitaciones o paredes), esta característica ofrece un lugar adecuado para descansar.

1.3.3. Muro trombe

Un muro trombe es un muro o pared orientado para recibir radiación solar. Consiste básicamente de una pared de gran espesor (entre 20 y 40 cm) y densidad, que puede ser de cualquier material con gran inercia térmica y de un vidrio sencillo o doble del lado exterior del muro. El vidrio se separa de la pared para generar un espacio pequeño o cámara, donde pueda moverse el aire. En general se pinta la parte exterior de la pared de un color oscuro para absorber la mayor parte de la radiación solar.

Un muro trombe funciona como un sistema pasivo de ventilación, para esto, el vidrio y el muro masivo deben contar con aberturas opturables que permitan el paso del aire exterior al interior de la edificación. El muro trombe puede utilizarse para calefacción o enfriamiento dependiendo de la ubicación de las aberturas. En ambos casos el muro masivo sirve para absorber y almacenar energía solar. La energía almacenada es transferida al interior del edificio para calentar en invierno o facilita el movimiento de aire para enfriar en verano (ver Fig. 1.7) (Gan, 1998).

El muro trombre, como sistema de ventilación para calentamiento, incluye dos aberturas. Una en la parte superior de la pared y otra en la parte inferior del acristalamiento. El aire exterior ingresa por la parte inferior del acristalamiento, es calentado por la pared, aumenta su temperatura y en consecuencia disminuye su densidad, por lo que asciende por convección natural e ingresa a la edificación por medio de la abertura superior en la pared, siempre y

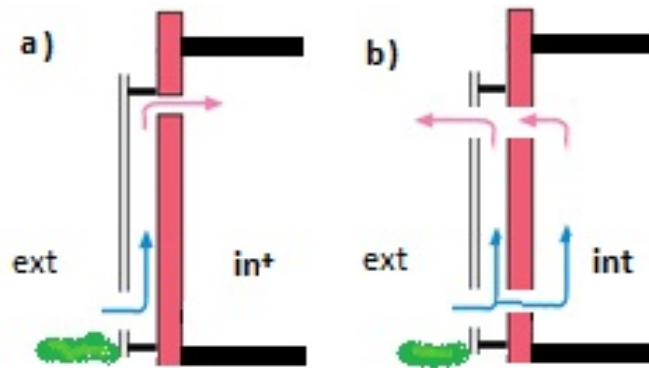


Figura 1.7: Esquema del muro trombe para ventilación (a) calentamiento en invierno, (b) enfriamiento en verano.

cuando haya una abertura en cualquiera otra pared de la habitación.

El muro trombe, como sistema de ventilación para enfriamiento, incluye dos aberturas en la pared y dos aberturas en el vidrio. Tanto la pared como el vidrio tienen una abertura en la parte superior y otra en la parte inferior. El aire exterior ingresa por la abertura inferior del vidrio, una parte ingresa a la edificación y la otra a la cámara. El aire que entra tanto en la edificación como en la cámara desplaza al aire caliente de ambos espacios, hacia el exterior de la edificación a través de las aberturas superiores. Ver Fig. 1.7.

1.3.4. Chimenea solar

La chimenea solar es un canal de aire en el que el mecanismo principal para el flujo de aire es a través de la flotación térmica (efecto termosifón) (Linden, 1999). Para que se considere chimenea solar, al menos una pared del canal de aire está expuesta a la radiación solar, pudiendo ser la pared interior cuando la exterior es un vidrio, y tiene una alta absorción. Esta pared se calienta y calienta el aire en su interior, por lo tanto la diferencia de temperatura interior-exterior se incrementa, lo que a su vez aumenta el flujo de aire (Szokolay, 2008).

Se pueden encontrar diferentes variaciones en el diseño de la chimenea solar, la cual es afectada por un número de factores tales como la ubicación, el clima, la orientación, el tamaño del espacio a ventilar y las ganancias de calor interna (Emmerich et al., 2001). Sin embargo, los elementos básicos son

la pared o paredes expuestas al sol (que funcionan como colectores solares) y las aberturas de entrada y salida (Khanal y Lei, 2011).

Casi todos los estudios de chimeneas solares se dirigen a la búsqueda de una óptima soluciones de diseño para mejorar la ventilación natural, teniendo en consideración los distintos parámetros de diseño. Entre los muchos parámetros descritos en la literatura están, la relación de aspecto de la chimenea (altura de la chimenea sobre el ancho del canal), la altura de ventilación (altura entre la entrada y salida aberturas), áreas de abertura y las características térmicas del material absorberdor.

1.3.5. Torre de viento

Las torres de viento han existido desde hace siglos, como un medio no mecánico para proporcionar ventilación interior.

La torre de viento es una estructura de sección generalmente cuadrada y montada en el techo, con mucha más altura que las dimensiones de la base. En la parte superior de sus caras tiene abertura(s) que permiten el flujo del aire del exterior al interior o viceversa. El propósito principal es aumentar la ventilación natural que se tenga por ventana(s).

La torre de viento, ver Fig. 1.8, aumenta la ventilación natural utilizando principalmente la fuerza del viento. El viento genera una diferencia de presión alrededor de la edificación. La presión positiva en la cara del barlovento conduce el aire fresco a la habitación y la presión negativa en el lado de sotavento extrae el aire del interior (Hughes y Ghani, 2010).

En ausencia de viento, la torre de viento utiliza la flotación térmica. La diferencia de temperaturas y en consecuencia la variación de la densidad del aire y el gradiente de presión de las masas de aire interior y exterior hace que el aire caliente (menos denso) se eleve y salga a través de la torre de viento. En consecuencia se aspira nuevo aire por la ventana para remplazar el aire que salió por la torre de viento (Hughes y Ghani, 2010).

La torre de viento ha sido utilizada principalmente en regiones cálidas y áridas, particularmente en la región del Golfo Pérsico, como es Irán, Irak, Dubai, Qatar y otros países árabes, también en el norte de África como Argelia y Egipto (Bouchahm et al., 2010). Este sistema pasivo ha sido el principal sistema de ventilación y enfriamiento de estas regiones durante los pasados trescientos años.

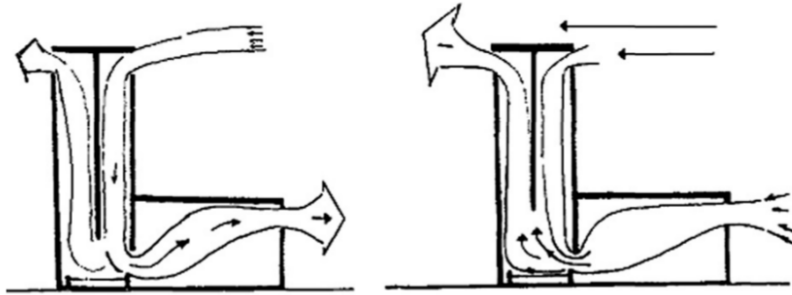


Figura 1.8: Principio de operación de una torre de viento. Tomado de Khan et al. (2008). En los dos esquemas el aire entra en la abertura de la torre de viento orientada al barlovento y se conduce a través del subducto, en la primera el aire se introduce por la habitación para luego salir por la ventana. En la segunda imagen también entra aire a través de la ventana de la habitación, éste se une con el aire que entró por el subducto de la torre de viento y se conducen por el subducto para salir por la abertura orientada al barlovento.

1.3.6. Intercambiador de viento

En la literatura el intercambiador de viento se conoce más como captador de viento (en inglés *windcatcher*), sin embargo en el grupo del IER se ha acuñado el término intercambiador de viento, ya que el mismo dispositivo puede funcionar como captador de viento o como extractor de aire, dependiendo de la posición del intercambiador y de la ventana o ventila con respecto a la dirección del viento.

El intercambiador de viento es un sistema pasivo de ventilación que constituye un apéndice en el techo y consiste en un ducto con o sin divisiones por el que entra y/o sale aire de la edificación (Saadatian et al., 2012). El intercambiador de viento es semejante a la torre de viento, pero la altura del intercambiador de viento es mucho menor a la de la edificación.

De los sistemas pasivos de ventilación estudiados, se considera que el uso del intercambiador de viento, dado su ubicación sobre el techo y sus dimensiones es viable para su uso en viviendas. Presenta tres ventajas: no reduce el área habitable de la edificación, tiene la posibilidad de captar viento de mayor velocidad comparado con el viento a nivel de ventanas y es de dimensiones relativamente pequeñas comparado con la torre de viento, lo que no encarece mucho la vivienda.

Se propone el estudio de los intercambiadores de viento como objeto prin-

cial de esta investigación. Por lo que en el capítulo siguiente se presenta una revisión bibliográfica exhaustiva de este sistema pasivo de ventilación.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica de intercambiadores de viento

El objeto de estudio en esta investigación es lo que aquí se denomina intercambiador de viento. Como se dijo en el capítulo anterior, lo llamamos intercambiador de viento ya que el mismo dispositivo puede funcionar como captador de viento o como extractor de aire, dependiendo de la posición del intercambiador y de la ventana o ventila con respecto a la dirección del viento.

El intercambiador de viento es un sistema pasivo para ventilación y enfriamiento de espacios (Saadatian et al., 2012). El intercambiador de viento, como un sistema de ventilación natural está siendo usada cada vez más en edificios modernos para minimizar el consumo de energía no renovable y reducir la emisión de contaminantes al medio ambiente.

2.1. Definición

Como ya se ha mencionado anteriormente, algunos sistemas pasivos de ventilación son la chimenea solar, la torre de viento y el intercambiador de viento (o captador de viento). Estos sistemas son similares –consisten en un ducto con o sin particiones por el cual entra o sale aire de la edificación. Se observa en la literatura revisada que no hay concenso en lo que es una

torre de viento y un captador de viento. Dicho de otra manera, no existe una división clara de cuando se trata uno u otro sistema. Montazeri y Azizian (2008), por ejemplo, definen a un captador de viento como una estructura alta de 5 a 33 m montada sobre el techo de un edificio, cuando la mayoría de los autores (Hughes y Ghani, 2010; Khan et al., 2008) a estructuras con tal altura la denominan torre de viento.

Para efecto de esta investigación proponemos la siguiente caracterización de cada sistema a fin de tener claro nuestro objeto de estudio. Llamaremos chimenea solar a aquellos dispositivos que inicien desde la base de la edificación, como es común en cualquier chimenea y tengan además una cara orientada adecuadamente para tener mayor ganancia solar. Utilizaremos el término torre de viento para aquellas estructuras cuya altura sea similar o mayor a la altura de la edificación, independientemente de que inicien desde la base de la edificación o desde el techo. Llamaremos intercambiador de viento a los apéndices en el techo con una altura mucho menor a la altura de la edificación, es decir, la altura del intercambiador corresponde aproximadamente a la mitad de la altura de la habitación.

De acuerdo a lo anterior, se define en esta investigación al intercambiador de viento, como un sistema pasivo para propiciar la ventilación natural aprovechando el viento que constituye un apéndice en el techo de altura mucho menor a la altura de la edificación y consiste en un ducto con o sin divisiones por el que entra y/o sale aire de la edificación. Ver Fig. 2.1. Diferenciando viento y aire, ya que el primero es la corriente de aire producido en la atmósfera por causas naturales (DRAE, 2001), mientras que el aire se define como el fluido que forma la atmósfera de la Tierra. La mezcla gaseosa, que, descontando el vapor de agua que contiene en diversas proporciones, se compone de 21 partes de oxígeno, 78 de nitrógeno y una de argón y otros gases semejantes a éste, al que se añaden algunas centésimas de dióxido de carbono (DRAE, 2001).

Los intercambiadores de viento pueden ser unidireccionales y bidireccionales (Saadatian et al., 2012). La sección transversal de los intercambiadores de vientos pueden o no estar divididas internamente en varios subsecciones. En la literatura encontramos que generalmente aquellos que no tienen divisiones son utilizados y estudiados principalmente por japoneses y son llamados monitor de techo (en inglés *monitor roof*) (Wang et al., 2010). En el contexto de este trabajo llamaremos a todos intercambiadores de viento haciendo la distinción de acuerdo a las divisiones que éstos contengan.

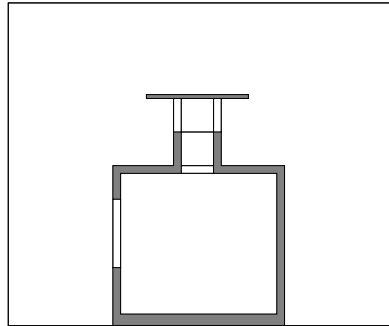


Figura 2.1: Habitación con intercambiador de viento en el techo (Corte alzado).

2.1.1. Componentes

Como el intercambiador de viento consiste en un ducto, está caracterizado por su longitud H y su sección transversal de área A_d . La sección transversal puede ser cuadrada, rectangular, circular, por mencionar las más comunes. Si el ducto tiene divisiones se forman subductos, el número de subductos D es 1 cuando el intercambiador no tiene divisiones.

Otra característica es el número de aberturas en la parte superior del intercambiador N . La suma de las áreas de estas aberturas da el área total de las aberturas A_i .

2.1.2. Funcionamiento

El intercambiador de viento utiliza principalmente la fuerza del viento para extraer o suministrar aire a los espacios y en algunos casos utiliza también la flotación térmica (Khan et al., 2008). Este sistema capta el viento de la corriente del aire exterior y lo induce o extrae del edificio con el fin de ventilar el interior, de enfriarlo cuando la temperatura en el exterior sea menor o de ayudar a generar confort térmico en los ocupantes por el aumento del movimiento del aire y en consecuencia, el aumento de la transferencia de calor por evaporación desde la superficie del cuerpo.

Ya que el funcionamiento de un intercambiador de viento es principalmente por fuerza del viento, este efecto es el más estudiado en la literatura (Elmualim, 2006; Li y Mak, 2007; Montazeri et al., 2010). Se sabe bien, que el flujo del aire sobre un edificio tiende a inducir una diferencia de presión

entre la superficie del barlovento y la de sotavento, esta diferencia de presión en caras opuestas del intercambiador es lo que define el movimiento a través de él. Cuando un intercambiador trabaja con las fuerza de viento y en consecuencia por la diferencia de presiones, la orientación de la abertura(s) del intercambiador de viento respecto al viento generalmente determina la forma en que funcionará el intercambiador, es decir, si introducirá o extraerá aire de la habitación.

En un intercambiador de viento la sección transversal del ducto puede o no estar dividida, cuando lo está se forman subductos. Cuando está subdividida, cada subducto cuenta con al menos una abertura y el aire entra a través de algunos subductos y sale a través de otros. Si el intercambiador de viento tiene subductos, y en consecuencia varias aberturas, trabajará con cualquier orientación del viento (Hughes y Ghani, 2010; Montazeri, 2011).

El intercambiador de viento con una sola abertura requiere una orientación adecuada con respecto al viento para que su funcionamiento sea óptimo. Montazeri y Azizian (2008) encontraron que para un intercambiador con una sola abertura y una dirección dominante del viento la abertura debe estar orientada al barlovento. Sin embargo cuando el viento no tiene una dirección dominante, se ha determinado que un intercambiador con cuatro subductos y cuatro aberturas tiene un mejor desempeño comparado con un intercambiador similar de dos, tres, seis y doce subductos (Montazeri, 2011).

2.2. Ventajas y desventajas

El intercambiador de viento es un sistema pasivo de ventilación natural, mejora la ventilación dentro de una edificación, esto representa la principal ventaja. Al ser un elemento pasivo, no requiere energía convencional para su funcionamiento, utiliza la ventilación natural con lo que ayuda a minimizar el gasto de operación, el consumo de energías no renovables y la emisión de contaminantes (Montazeri, 2011).

Las ventajas del intercambiador de viento sobre otros sistemas pasivos son su tamaño (pequeño en relación a la vivienda) lo cual lo hace relativamente económico. Su ubicación en el techo ayuda a orientar adecuadamente con relación a los vientos dominantes y captar velocidades de viento más altas y con menos polvo, por otra parte no afecta la circulación en la vivienda ni disminuye su área habitable.

Una de las desventajas es que la abertura del intercambiador también

permite el paso de polvo, insectos, malos olores y humedad. Otra desventaja es que para lugares en donde las velocidades del viento son cercanas a cero el intercambiador no es eficaz.

2.3. Clasificación

Existe una gran variedad de intercambiadores de viento, Saadatian et al. (2012) realizan una clasificación de acuerdo a sus atributos, la tecnología que ocupan y su configuración. Para los fines de este trabajo se dividen a los intercambiadores de viento en dos grandes grupos: intercambiadores de viento simples e intercambiadores de viento combinados con otros sistemas.

Un intercambiador de viento simple es aquel que ocupa únicamente los mecanismos de ventilación natural para su funcionamiento, no involucra el uso de fuerza o energía externa, y tampoco se apoya en otro sistema pasivo para mejorar su desempeño. Este tipo de intercambiador es en el cual centraremos esta investigación. Un intercambiador de viento combinado con otro sistema, es aquel que utiliza otro sistema pasivo o activo para mejorar su desempeño.

2.4. Estudios realizados

En la literatura revisada se encontraron diversos estudios sobre intercambiadores de viento. Los estudios que van encaminados a evaluar el desempeño de este sistema pasivo pueden agruparse de acuerdo al tipo de investigación realizada, experimental o numérica. Montazeri y Azizian (2008) realizaron un estudio experimental, Li y Mak (2007) realizaron un estudio numérico usando dinámica de fluidos computacionales (*CFD*) y algunos otros autores (Elmualim, 2006; Elmualim y Awbi, 2002; Montazeri, 2011; Montazeri et al., 2010) realizaron ambos tipos de estudios. Las técnicas experimentales incluyen visualización con humo en túnel de viento (Elmualim, 2006; Elmualim y Awbi, 2002; Montazeri, 2011; Montazeri y Azizian, 2008; Montazeri et al., 2010) y mediciones de presión en el interior y exterior del intercambiador de viento y/o en el interior de la habitación (Montazeri y Azizian, 2008; Montazeri et al., 2010). Para las simulaciones (*CFD*) se han utilizado códigos como *CFX Windows environment* (Elmualim, 2006), *FLUENT* (Li y Mak, 2007; Montazeri, 2011; Montazeri et al., 2010) y *VORTEX* (Elmualim y Awbi,

2002). A continuación se presenta, en orden cronológico, un breve resumen de cada uno de los artículos.

Elmualim y Awbi (2002) llevaron a cabo investigaciones experimentales y simulaciones en CFD para evaluar el desempeño de dos intercambiadores de viento, basados en modelos comerciales, uno de sección transversal cuadrada de $500 \times 500 \text{ mm}$ y otro circular de 550 mm de diámetro. La longitud de 1.5 y 1.2 m respectivamente. Ambos intercambiadores de viento fueron divididos internamente para formar cuatro subductos. Se instalaron sobre un cuarto de pruebas de $2.48 \times 2.48 \times 2.48$ con una puerta para permitir el acceso y totalmente sellada durante los experimentos. El cuarto de pruebas se construyó bajo el túnel y se utilizó silicón para sellarlo. Variaron la velocidad del viento desde 0.5 hasta 6.0 m/s y el ángulo de incidencia del viento en ángulos de 15° . Los resultados muestran que el desempeño del intercambiador de viento de sección cuadrada es mejor que el de sección circular, utilizando la misma velocidad del viento. Ellos explican que esto se debe al hecho que los bordes de las esquinas de la sección cuadrada crean una gran región de separación de flujo y mayor diferencia de presión a través del intercambiador de viento.

Elmualim (2006) llevó a cabo investigaciones experimentales en túnel de viento con pruebas de visualización de humo y estudios de CFD. Los experimentos fueron a escala real, el intercambiador de viento tenía sección cuadrada de $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ y 1500 mm de altura, estaba dividido en cuatro cuadrantes. Cada cara contenía 6 louvers de $500 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ para la entrada o salida de aire. Realizó pruebas con velocidades de viento de 0 , 0.5 , 1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 , 5.0 y 6.0 m/s y el viento en una sola dirección (0°). Realizó tres casos, el primero de acuerdo a la descripción anterior, el segundo agregó una rejilla en el lecho bajo del intercambiador y el tercero además de la rejilla agregó un calentador de 3 kW dentro de la habitación para simular la fuente de calor al interior. El objeto era estudiar el efecto de las rejillas y la fuente de calor sobre el desempeño de un intercambiador de viento para ventilación natural. Concluye que el efecto de la rejilla aún cuando se encuentre abierta reduce la tasa de ventilación. Para las velocidades de viento de 1 y 3 m/s la instalación de la rejilla reduce el suministro de aire aproximadamente un 50% y 20% , respectivamente. La instalación de la fuente de calor en la habitación incrementó la tasa de flujo, especialmente a bajas velocidades del viento.

Li y Mak (2007) realizaron un estudio numérico para evaluar el desempeño de intercambiadores utilizando la técnica de CFD. Modelaron un in-

tercambiador de 500 mm \times 500 mm \times 1000 mm, el cual fue evaluado con velocidades del viento de 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.0 m/s. Variaron también la orientación del viento en ángulos de 15°, 30° y 45°. Concluyen que en todos los casos estudiados, la velocidad máxima del aire que entra en la habitación está cerca de la velocidad del viento externo. Por otra parte, el flujo de aire que entra en la habitación aumenta con la velocidad del viento, y disminuye ligeramente con el ángulo de incidencia del viento cuando la velocidad del viento es menor que 3 m/s. La uniformidad de la entrada de aire disminuye con el aumento de la velocidad del viento y el ángulo de incidencia. La condición llega a ser particularmente peor cuando el ángulo de incidencia cambia a 30°. Los autores mencionan que el intercambiador de viento es una forma eficaz para canalizar el aire fresco a la habitación y que serán requeridos trabajos que estudien el patrón del flujo de aire al interior, que provee un intercambiador de viento conectado a una habitación.

Montazeri y Azizian (2008) realizaron estudios experimentales en túnel de viento con pruebas de visualización de humo para evaluar el desempeño de un intercambiador de viento de sección rectangular, con abertura en una sola cara y diferentes ángulos de incidencia del viento. Realizaron pruebas de visualización de humo para reconocer el patrón de flujo dentro y sobre el intercambiador. En este estudio se utilizó un modelo a escala 1:40 del intercambiador de viento de la Escuela de Kharmani, el flujo de aire en el intercambiador de viento y las diferencias de presión alrededor de éste se midieron variando el ángulo de incidencia del viento desde 0° hasta 180°, con incrementos de 15°. Se colocaron en el túnel de viento unas barras horizontales separadas estratégicamente para producir un perfil de capa límite similar al que existe en pequeñas ciudades con edificios de baja altura. Los experimentos también se realizaron con el intercambiador de viento y objetos aguas arriba, asemejando un edificio vecino con intercambiador de viento. En los experimentos colocan dentro del túnel de viento únicamente a el o los intercambiadores de viento, la habitación tiene una ventana y se encuentra debajo del túnel por lo que está a presión neutra. Ellos concluyen que para un intercambiador de viento con una sola abertura, el mejor desempeño se consigue con un ángulo de incidencia del viento de 0°. También concluyen que, para el ángulo de 0°, la presencia de un edificio aguas arriba con una altura menor a la del intercambiador de viento ayuda al buen desempeño de éste, especialmente cuando la distancia entre el edificio y el intercambiador es pequeña. Para objetos más altos colocados aguas arriba del intercambiador de viento y con una pequeña separación de éste, la abertura del intercambiador

se encuentra en la región de estela del objeto y el intercambiador de viento actuará como un dispositivo de succión. A una distancia mayor de los edificios vecinos que permita dejar atrás la zona de transición, el intercambiador de viento no se ve afectado por la presencia de los edificios vecinos.

Montazeri et al. (2010) realizaron estudios experimentales en túnel de viento con pruebas de visualización de humo y estudios numéricos (*CFD*) encaminados a evaluar el desempeño de un intercambiador de viento con abertura en dos caras y una división que genera 2 subductos, uno para cada abertura. El modelo del intercambiador de viento para esta investigación se construyó uniendo por la espalda dos intercambiadores similares a los utilizados en la investigación de Montazeri y Azizian (2008). Los experimentos realizados fueron similares a los de la investigación anterior (Montazeri y Azizian, 2008). El desempeño es evaluado en función del flujo volumétrico a través del intercambiador. Encontraron que para un intercambiador de viento con dos aberturas (opuestas) el mejor desempeño se consigue al tener un ángulo de incidencia del viento de 90° . Con este ángulo de incidencia del viento, el desempeño del intercambiador de viento aumenta aproximadamente 20% más que el de una sola cara con ángulo de incidencia 0° . La comparación que realizan estos autores, puede no ser válida ya que están comparando intercambiadores de viento con diferente sección transversal de área A_d y diferente área total de aberturas A_c . En la investigación objeto de este trabajo se busca encontrar qué intercambiador de viento tiene mejor desempeño manteniendo A_d y A_c .

Montazeri (2011) realizó experimentos en túnel de viento con pruebas de visualización de humo y *CDF* para investigar el desempeño de intercambiadores de viento de sección circular y diferentes números de aberturas. Para encontrar cómo el número de aberturas afecta el desempeño del intercambiador, empleó cinco cilindros con la misma sección y altura. Estos fueron divididos internamente generando 2, 3, 4, 6 y 12 subductos. Se realizaron mediciones con diferentes ángulos de incidencia del viento de 0° a 90° con incrementos de 15° . Concluye que a una velocidad y dirección de viento fija el flujo de aire al interior disminuye por el incremento del número de aberturas. El intercambiador de viento de dos subductos induce la mayor cantidad de aire dentro del cuarto con un ángulo de incidencia de 0° . Menciona que el ángulo óptimo en el cual cada intercambiador de viento induce mayor volumen de aire es el ángulo en el cual hay más área de abertura expuesta a la corriente del viento.

De acuerdo a los estudios anteriores se encuentra que las características

importantes del intercambiador de viento para su diseño son la orientación de su(s) abertura, su altura (Montazeri, 2011), la forma y dimensión de la sección transversal del ducto del intercambiador de viento (Montazeri, 2011) y el número de aberturas (Kobayashi et al., 2010; Saadatian et al., 2012). Otro factor importante a considerar es la velocidad y dirección del viento (Elmualim, 2006; Li y Mak, 2007).

De las investigaciones arriba señaladas se observa que experimentalmente, ninguno de los autores (Elmualim, 2006; Elmualim y Awbi, 2002; Li y Mak, 2007; Montazeri, 2011; Montazeri y Azizian, 2008; Montazeri et al., 2010) analizan el flujo dentro de la habitación. Además, la manera de considerar la habitación es diversa, algunos autores (Elmualim, 2006; Elmualim y Awbi, 2002) colocan una habitación completamente cerrada debajo del intercambiador de viento. En cuanto a los análisis de *CDF*, algunos autores (Elmualim y Awbi, 2002; Li y Mak, 2007) realizan simulaciones únicamente dentro y alrededor del intercambiador de viento. Elmualim (2006) si considera la habitación pero el análisis se centra en lo que ocurre en el intercambiador. Otros autores (Montazeri, 2011; Montazeri y Azizian, 2008; Montazeri et al., 2010) colocan debajo del intercambiador de viento una habitación con una ventana. En estas investigaciones, la habitación y su ventana se encuentran fuera del túnel de viento por lo que está a presión neutra. La investigación desarrollada en esta tesis sí considera el efecto del viento en el intercambiador y en la habitación con una ventana y analiza el flujo dentro de la habitación.

Todos los estudios realizados (Elmualim, 2006; Elmualim y Awbi, 2002; Li y Mak, 2007; Montazeri, 2011; Montazeri y Azizian, 2008; Montazeri et al., 2010) utilizan una abertura por cada subducto. No se sabe, cuál es el efecto que las subdivisiones, en el interior del intercambiador, tienen sobre el flujo y si son o no necesarias. En este trabajo de investigación se busca elucidar esta cuestión.

Capítulo 3

Metodología experimental

En esta investigación experimental se estudió el desempeño de diferentes intercambiadores de viento colocados en el techo de una habitación con una ventana. El objetivo general es encontrar la configuración o las condiciones en las que un intercambiador de viento tiene un mejor desempeño. En primer lugar se busca determinar si se desempeña mejor introduciendo aire del exterior o succionando aire de la habitación. En segundo lugar, encontrar la relación adecuada entre la abertura de la habitación y la abertura del intercambiador de viento. En tercer lugar encontrar la relación adecuada entre el área de abertura del intercambiador de viento y el ducto del mismo. En cuarto lugar, encontrar si las divisiones para generar subductos a lo largo del intercambiador mejoran o empeoran el desempeño del intercambiador. Los parámetros de evaluación son el flujo volumétrico y las velocidades del flujo al interior de la habitación.

Se realizaron doce experimentos en un canal de agua con una maqueta escala 1:25 de una habitación con una ventana y con seis tipos de intercambiadores de viento colocados en el techo. Se mantuvieron fijos el tamaño y la posición de la ventana (en la dirección del viento), y la velocidad del viento. Se utilizó el número de Reynolds ($Re = uL/\nu$) para obtener similitud dinámica, en donde u es la velocidad característica del flujo, L es la longitud característica y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Se tomaron velocidades en el plano central tangente a la dirección del viento, con velocimetría



Figura 3.1: Canal de agua donde se realizaron los experimentos.

por imágenes de partículas estereoscópica (SPIV).

Este capítulo describe el dispositivo experimental, la técnica de medición del campo de velocidades, el arreglo experimental, el proceso seguido para reproducir la capa límite atmosférica en la zona de medición y el diseño de experimentos.

3.1. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental está compuesto por un canal, la maqueta de la habitación y de 6 diferentes tipos de intercambiadores de viento y el fluido de trabajo (agua), los cuales se describen a continuación.

3.1.1. Canal de agua

Los experimentos se llevaron a cabo al interior de un canal de agua abierto instalado en el Laboratorio de Termociencias, del Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM, ver Fig. 3.1. Este canal fue construido para realizar investigaciones de flujo de agua en canales con estructuras de fondo



Figura 3.2: Tubería de recirculación, bomba de 4 *HP* y depósito de agua de 800 *l* de capacidad.

(Guido, 2007). Cuando se inició la presente investigación, el canal presentaba deterioro en varios de sus componentes, dejar operativo el canal fue parte del trabajo realizado para esta tesis. Las dimensiones del canal son 6.0 *m* de largo, 0.3 *m* de ancho y 0.5 *m* de alto. El canal cuenta con un sistema de recirculación que opera con una bomba de 4 *HP* de potencia, cuenta además con un depósito de 800 *l* de capacidad, ambos instalados en la parte exterior del laboratorio, ver Fig. 3.2. La entrada del canal es de aluminio, en esta zona se colocó una cama de grava para amortiguar las perturbaciones generadas por la entrada del agua y evitar que se propaguen a lo largo del canal como ondas superficiales. Terminando esta zona, se colocó un apilamiento de placas de policarbonato celular de 4 *mm* de espesor y 10 *cm* de ancho que permiten el paso del agua y que ayudan a reducir la escala de turbulencia del flujo. Ambas componentes se observan en la Fig. 3.3. La zona de trabajo se encuentra a 4.50 *m* de la entrada de agua al canal, en esta zona el piso consta de un vidrio transparente de 12 *mm* de espesor y de área de 0.25 *m* × 1.00 *m* que permite el paso del plano de luz láser, como se aprecia en la Fig. 3.4. Al final del canal se colocó un obstáculo en forma de rampa curva de 0.36 *m* de altura, como se muestra en la Fig. 3.5, para mantener el tirante de agua constante a 0.43 *m* de altura.

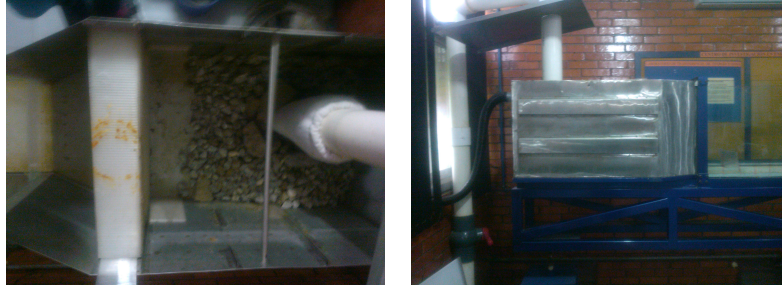


Figura 3.3: Vista de arriba y vista lateral de la entrada al canal de agua de aluminio, muestran la grava y la pila a base de placas de policarbonato de 10 cm de ancho.

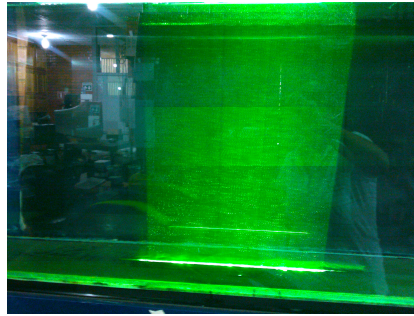


Figura 3.4: Zona de trabajo con plano de luz láser.

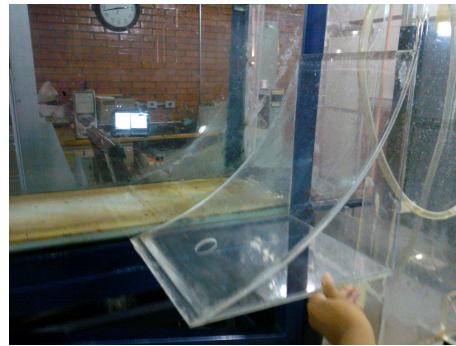
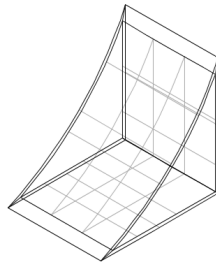


Figura 3.5: Esquema isométrico y fotografía del obstáculo en forma de una rampa curva al final del canal para mantener el tirante del agua.

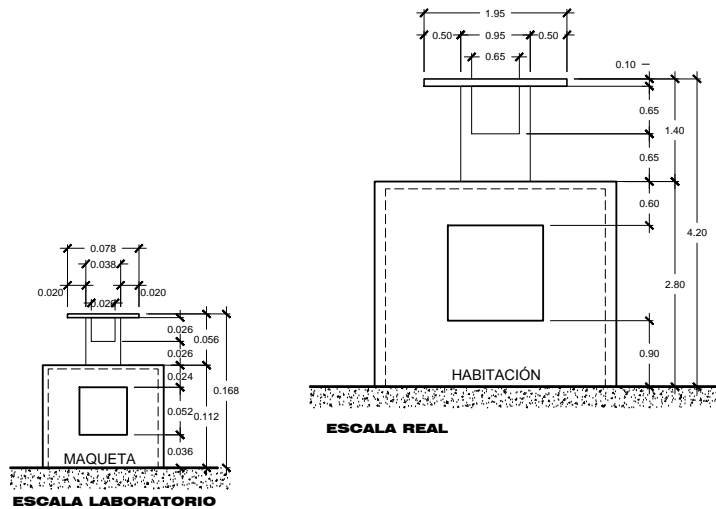


Figura 3.6: El esquema muestra la semejanza geométrica que guardan el modelo a escala 1:25 y el modelo real.

3.1.2. Maquetas

La maqueta de la habitación y las de los diferentes intercambiadores de viento se fabricaron a escala 1 : 25, respecto al modelo a escala real, para mantener la similitud geométrica que White (1979) define como: *Un modelo y un prototipo son geoméricamente semejantes si, y sólo si, todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tienen la misma relación de escala lineal.* Dicho de otro modo, *todas* las longitudes deben de estar referidas a la misma escala.

La Fig. 3.6 ilustra la habitación con el intercambiador de viento a escala real y su modelo a escala 1 : 25. Todas las longitudes del modelo son un venticincuavo más pequeñas que la de la habitación a escala real, el ángulo de incidencia del viento no se ve afectado por el escalamiento entre la realidad y el modelo.

Se elaboraron las maquetas en acrílico transparente, cuyos planos constructivos se presentan en el Anexo 1. Para cada experimento, la maqueta empleada consta de dos partes, la primera corresponde a la habitación sin

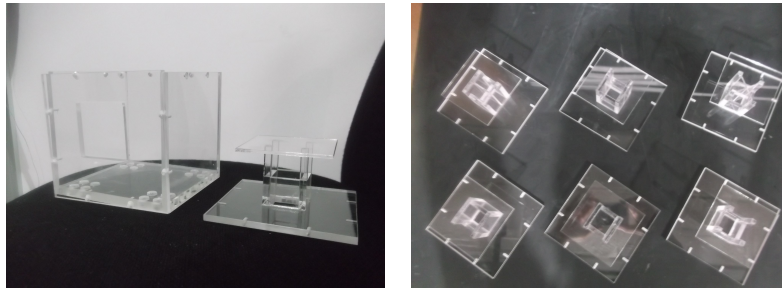


Figura 3.7: Fotografías de maqueta las dos partes que conforman la maqueta y de los tipos de intercambiadores de viento.

techo y la segunda al techo con un intercambiador de viento, tal como se muestra en las Figs. 3.7 y 3.8.

La habitación en escala real es de $3.30\text{ m} \times 3.30\text{ m}$ con una altura interna de 2.70 m y una ventana de abertura $1.30\text{ m} \times 1.30\text{ m}$. Las dimensiones de la habitación se propusieron así pues se considera un espacio mínimo habitable con una altura mínima adecuada para una zona de clima cálido. La ventana se encuentra centrada en la fachada, a una altura de 90 cm del piso y termina a 2.20 m como convencionalmente se utiliza. El área de la abertura (A_v) es de 1.69 m^2 y al área de la fachada (A_f) es de 9.24 m^2 . Lo cual da una relación de aspecto entre el área de la abertura y el área de la fachada del 0.183 (18.3%) y por lo tanto la ventana es del tipo 4 (Etheridge, 2012).

Se elaboraron seis techos de la habitación sobre el cual se encuentra ubicado un diferente intercambiador de viento, las diferencias entre estos intercambiadores se explican adelante. Todos los intercambiadores de viento se ubican en el centro del techo de la habitación. A escala real, la altura de los intercambiadores de viento (h_i), a partir del techo, es de 1.40 m , su sección transversal es cuadrada y mide $0.65\text{ m} \times 0.65\text{ m}$, con lo cual se obtiene un área de ducto (A_d) igual a 0.423 m^2 . Estudios previos han demostrado que la sección transversal de forma cuadrada es más eficiente que la de forma circular (Elmualim y Awbi, 2002), por lo que en esta investigación se utiliza la sección trasversal cuadrada.

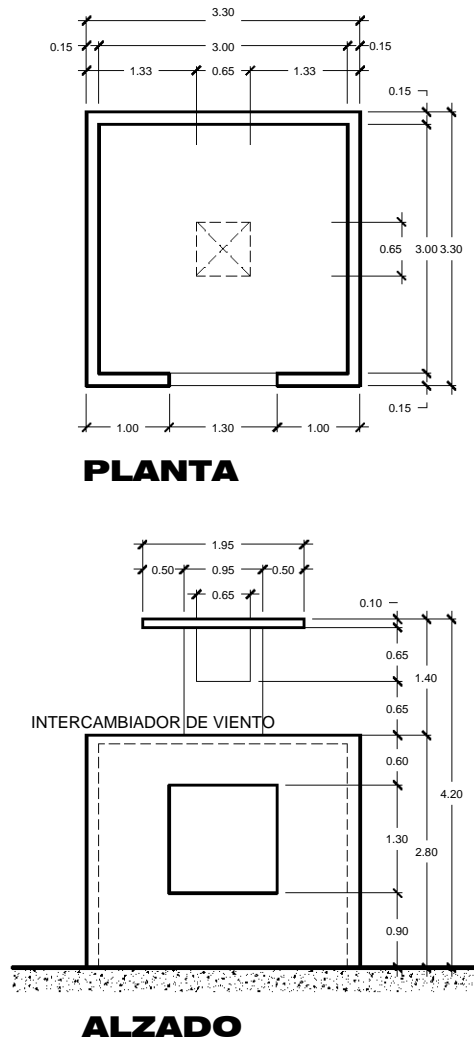


Figura 3.8: Planta y alzado de la habitación con una ventana y un intercambiador de viento colocado en el techo a escala real.

Tabla 3.1: Propiedades del agua y el aire a 1 atm y 20°C . Tomado de White (1979)

Fluido	Densidad ρ [kg/m ³]	Viscosidad dinámica μ [kg/(m.s)]	Viscosidad cinemática ν [m ² /s]
Agua	999.00	1.0×10^{-3}	1.01×10^{-6}
Aire	1.20	1.8×10^{-5}	1.51×10^{-5}

3.1.3. Fluido de trabajo

El fluido de trabajo es agua a temperatura ambiente (20°C aproximadamente). El agua y el aire son fluidos newtonianos y se comportan de manera similar al fluid, sin embargo poseen propiedades diferentes que se toman en cuenta para el desarrollo de esta investigación. En la tabla 3.1 se presentan las propiedades del agua y del aire.

En los experimentos el agua simuló el comportamiento del aire en una habitación con una ventana a través de un intercambiador de viento, teniendo en cuenta la similitud dinámica de los flujos respectivos, más adelante se detalla este punto.

3.2. Sistema de medición SPIV

La velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica (SPIV) es una técnica óptica de medición no intrusiva, mide la velocidad de un elemento de fluido indirectamente a través de la medición de la velocidad de partículas trazadoras dentro del flujo, las cuales en la mayoría de los casos han sido agregadas al fluido antes de comenzar los experimentos. Para los experimentos realizados en esta investigación no fué necesario adicionar micropartículas al agua.

El sistema SPIV es una técnica para obtener las tres componentes de un campo de velocidad en un plano del flujo a través de la estimación del desplazamiento de partículas, introducidas o existentes en el fluido, a partir de pares de fotografías. Las partículas se iluminan en un plano del flujo, por lo menos dos veces y dentro de un intervalo de tiempo corto. La luz dispersada por las partículas es grabada en imágenes o fotografías, el desplazamiento de las partículas entre pares de fotografías dividido entre el tiempo transcurrido entre los pulsos de luz determina la velocidad. Con el fin de ser capaz de

manejar la gran cantidad de datos que pueden ser recogidos empleando la técnica de SPIV, se requiere el uso de sofisticados procesamientos (Raffel et al., 1998). Gracias al uso de dos cámaras y a su acomodo, se obtiene una visión estereoscópica de las partículas, lo cual permite junto con la iluminación de un plano de flujo con un espesor mínimo ($> 1 \text{ cm}$), obtener las tres componentes de la velocidad.

Las imágenes digitales adquiridas se procesan de la siguiente forma (Raffel et al., 1998). Cada una de las imágenes se subdivide en regiones rectangulares más pequeñas llamadas áreas de interrogación. Cada una de esas áreas de interrogación, con al menos cinco partículas, correspondiente a la primera pulsación del láser se correlaciona con su respectiva área de la segunda pulsación para producir el más probable vector de desplazamiento promedio de las partículas. Llevando a cabo este procedimiento para todas las áreas de interrogación, el programa obtiene un mapa de vectores de desplazamiento que luego se convierte en el campo de velocidad más probable. Por medio de los procesos de validación se reducen errores, en esta investigación se realizó validación de picos con sustitución de promedios de los vecinos. Cuando se tienen muchos campos de velocidad es posible obtener el campo de velocidad promedio.

El sistema de medición SPIV utilizado está compuesto por una fuente de luz laser de doble pulso, dos cámaras, un controlador de alta precisión para sincronizar el láser y las cámaras y una computadora con el programa de control y adquisición. La fuente de luz láser de doble pulso utilizada es de tipo Nd:YAG (*Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet*) marca *New Wave RESEARCH*, modelo Solo120 XT-15Hz, como se observa en la Fig. 3.9. Se utilizaron dos cámaras digitales de alta resolución marca Nikon modelo AF NIKKOR 50 mm 1:1.4 D. Estas cámaras no tienen controles manuales, su operación es a través de un dispositivo electrónico que sincroniza la toma de imágenes a la pulsación láser. La Fig. 3.13 muestra como se acomodaron las cámaras para conseguir la visión estereoscópica. Se utilizó 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 manipular el dispositivo electrónico que sincroniza las cámaras y el láser y para la adquisición y el procesamiento de datos. El intervalo de tiempo entre las emisiones de luz de cada láser y su intensidad fue controlado desde este programa.



Figura 3.9: Láser *New wave RESEARCH* y sistema de control y enfriamiento.

3.2.1. Arreglo experimental

El arreglo experimental está compuesto por el canal, las maquetas, el agua, el sistema SPIV y algunos componentes para dirigir el haz de luz láser. En esta sub-sección se describen estos componentes, formados por: un espejo y su soporte y una lente cilíndrica y su soporte. La Fig. 3.10 muestra el arreglo experimental completo.

Se colocó un espejo de segunda superficie de $0.13 \times 0.56 \text{ m}$ a una distancia de 1.50 m de la salida del haz de luz láser con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, con la finalidad de cambiar la dirección del plano de luz en dirección vertical hacia arriba. Se fabricó un soporte metálico para colocar el espejo. El espejo y el soporte se muestran en la Fig. 3.11.

Debido a la distancia entre el láser y la zona de trabajo, el plano de luz tenía un ancho mayor al requerido, para reducirlo, se elaboró una lente cilíndrica con un tramo de 40 cm de tubo de acrílico de 6 pulgadas (15.24 cm) de diámetro y $3/16$ pulgadas (4.7 mm) de espesor de pared, el cual se llenó de agua y se selló en ambos extremos. Además, se elaboró un soporte para colocarlo en forma horizontal, paralelo al canal de agua, entre el espejo y la zona de trabajo, ver Fig. 3.12.

Una vez lleno el canal de agua, pero con flujo cero, antes de empezar cada serie de experimentos, se realizó la calibración del sistema de medición



- | | |
|--------------------------------------|----------------------|
| 1. Canal de agua | 3. Espejo y soporte |
| a. Zona de trabajo | 4. Lente y soporte |
| b. Tope-rampa | 5. Cámara 1 |
| c. Llegada del agua | 6. Cámara 2 |
| d. Tubería de recirculación | 7. Equipo de cómputo |
| 2. Láser | |
| e. Sistema de enfriamiento del láser | |

Figura 3.10: Este esquema muestra las diferentes partes que componen el arreglo experimental.



Figura 3.11: Espejo de segunda superficie y soporte metálico.



Figura 3.12: Lente y soporte metálico.

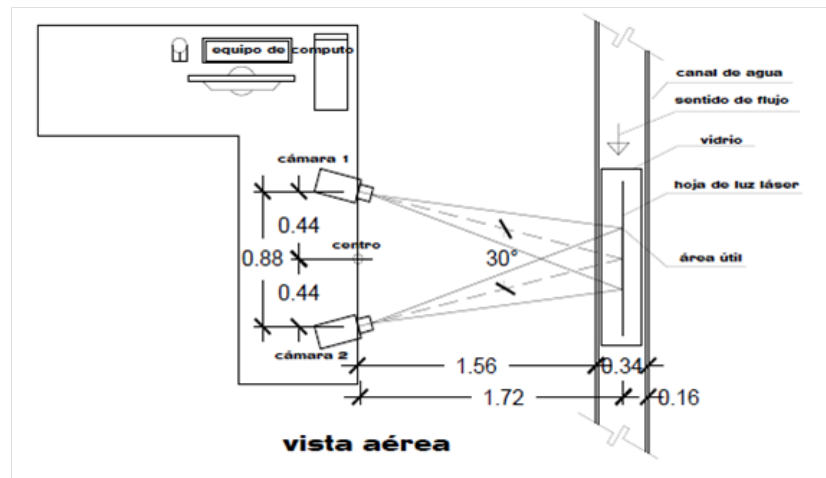


Figura 3.13: Esquema del acomodo de las cámaras.

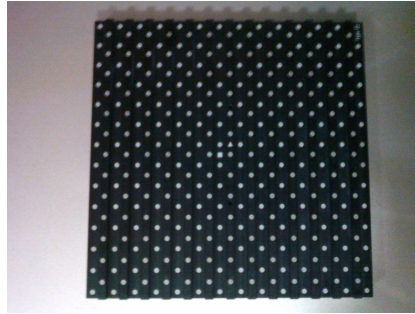


Figura 3.14: Tableta no. 22 utilizada para la calibración del sistema SPIV.

SPIV de acuerdo al manual del SPIV (LaVision, 2006). Para ello, se utilizó la tableta no. 22, que se muestra en la Fig. 3.14.

3.3. Generación de la capa límite atmosférica

En esta sección se describe el procedimiento seguido para generar la capa límite atmosférica que representa las condiciones de viento externo a la vivienda en una zona suburbana o rústica.

En mecánica de fluidos, la capa límite de un flujo es la zona donde el movimiento de éste es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella región en la que la velocidad del fluido, por el contacto con un sólido o una superficie en reposo, varía desde cero hasta el 99 % de la velocidad de la corriente no perturbada. La presencia de esta capa se debe a la viscosidad, propiedad inherente de cualquier fluido (White, 1979). La superficie de la Tierra es un límite que ejerce una gran influencia sobre la atmósfera. La capa límite atmosférica representa este estrato de aire sujeto a la influencia de la superficie terrestre. Se le conoce también como capa límite planetaria o capa límite atmosférica o por sus siglas en inglés PBL (*Planetary Boundary Layer*) o ABL (*Atmospheric Boundary Layer*), respectivamente.

El perfil del viento es la representación gráfica de la variación de la velocidad con la altura. Existen diversas expresiones teóricas usadas para determinar el perfil de velocidad del viento. La más común y simple de estas expresiones es la ley exponencial de Hellmann que relaciona las velocidades de dos alturas cualesquiera y es expresada con la siguiente ecuación (Ata y Cetin, 2011)

Tabla 3.2: Coeficientes de fricción para diferentes tipos de terreno.

Tipo de terreno	Coefficiente de fricción α
Lagos, océanos, superficies suaves y duras	0.10
Césped	0.15
Terrenos de cultivos, setos o vallas y arbustos	0.20
Campos boscosos con muchos árboles	0.25
Pueblo pequeño con algunos árboles y arbustos	0.30
Área de la ciudad con edificios altos	0.40

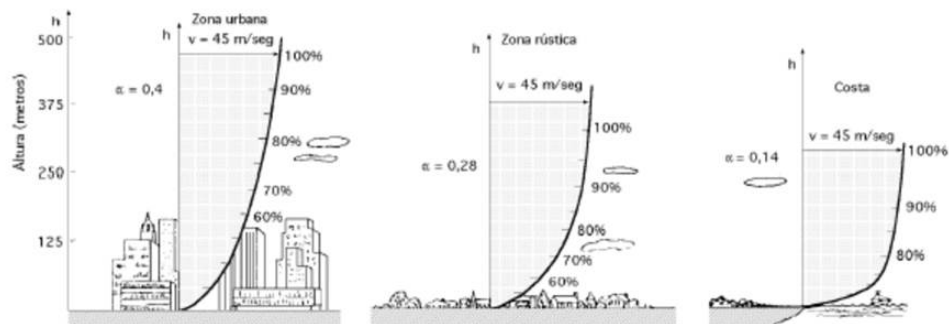


Figura 3.15: Perfiles de velocidad del viento en zona urbana, zona rústica y costa. Tomado de UNAD (2013).

$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

donde u es la velocidad a la altura H , 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. Este coeficiente está en función la rugosidad del terreno sobre el cual se está midiendo la velocidad del viento y cuyos valores vienen indicados en la Tabla 3.2.

La estructura vertical de la capa límite, por lo tanto, tiene una dependencia con el tipo de superficie. La Fig. 3.15, muestra la variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann.

Para tener semejanza entre el perfil del canal de agua y el perfil de la capa límite atmosférica se buscó que el α del primero fuera cercano a 0.28, lo cual de acuerdo a la Fig. 3.15 representa el perfil del viento en una zona rústica, es

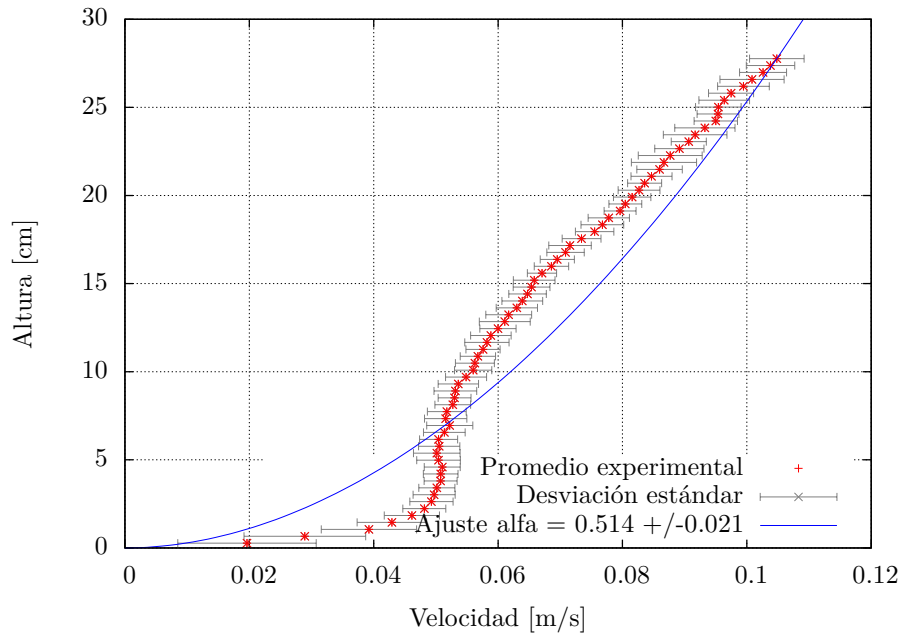


Figura 3.16: Perfil obtenido en el canal de agua sin obstáculos.

decir, semi-urbana. Para lo anterior se llevó a cabo una serie de mediciones con el sistema SPIV en el canal de agua. El primer paso fue encontrar el perfil existente en el canal de agua sin ningún obstáculo. Se obtuvieron 95 campos de velocidad con el equipo SPIV y se obtuvo el campo de velocidades promedio, se extrajo la componente en x de la velocidad para cada altura y se graficaron los datos. Se realizó un ajuste por mínimos cuadrados a los resultados con la ecuación de Hellmann (3.1), se obtuvo el valor de α y se graficó el perfil correspondiente al α obtenido. La Fig. 3.16 muestra el perfil de velocidad obtenido en el canal de agua sin ningún obstáculo en donde se encontró $\alpha = 0.514 \pm 0.021$, lo cual representa un terreno demasiado rugoso, incluso mayor que una zona urbana con edificios muy altos.

En la literatura se encontró que algunos autores (Montazeri y Azizian, 2008; Van Hooft et al., 2011), colocan obstáculos antes del área de trabajo para modificar el perfil de velocidades en un túnel de viento. Por lo anterior, se llevaron a cabo diversas pruebas con obstáculos verticales, horizontales e inclinados a diferentes distancias del área de trabajo. Se realizaron algunas mediciones con obstáculos cerca de la zona de estudio y otros a la entrada del

canal. A continuación se describen los experimentos realizados para obtener el perfil de viento deseado y se presentan algunos de los resultados obtenidos con estas mediciones.

3.3.1. Obstáculos cerca de la zona de estudio

Perpendicular al flujo del canal y sobre el piso, se colocaron placas verticales de policarbonato de 2.5 *cm* de altura. Se varió el número de placas y se probaron diferentes distancias entre el centro del área de trabajo y la primera placa (a 20, 37 y 62 *cm*). Se encontró que con 3 placas separadas 5 *cm* entre ellas y la más cercana a una distancia de 62 *cm* del centro de la zona de trabajo, el perfil se parecía más a una exponencial de la forma de la ecuación (3.1).

Se realizaron pruebas agregando placas horizontales e inclinadas 45° en la parte inferior y superior del canal. Se probaron alturas de 10, 15, 20, 25 y 30 *cm*, individuales y con diferentes combinaciones. Se probaron también diferentes distancias entre el centro del área de trabajo y la(s) placa(s). Las placas medían 3 *cm* de ancho, estaban hechas de policarbonato por lo que, dependiendo como se cortaran, en un sentido permitían el paso del agua y en otro no. Se probaron ambas opciones. Se tomaron mediciones con el sistema SPIV, se procesaron los datos y se graficaron. Cuando se colocaron 3 placas verticales de 2.5 *cm* de altura, a 62 *cm* de distancia del centro del área de trabajo, con 5 *cm* de separación entre sí, y una placa horizontal de 3 *cm* y una placa inclinada 45° a 25 *cm* de altura, ambas a 90 *cm* del área de trabajo, se obtuvo el perfil que se observa en la Fig. 3.17, en donde se encontró un $\alpha=0.365 \pm 0.007$, el cual era menor que el valor obtenido sin obstáculos, pero necesitaba ser aún más bajo para representar una zona rústica.

Se decidió agregar dos obstáculos más para frenar el flujo en la parte más alta y disminuir el valor de α . Éstos se colocaron a 32 y 30 *cm* de altura, a 90 *cm* del centro del área de trabajo y con un ángulo de inclinación de 45° respecto a la horizontal, de tal modo que las placas opusieran mayor resistencia en el flujo. En la Fig. 3.18 se observa el perfil obtenido, el valor de α disminuyó más de lo esperado, $\alpha = 0.214 \pm 0.007$.

Se realizaron algunas pruebas más y finalmente se encontró un perfil con un $\alpha=0.276 \pm 0.005$. Este perfil se logró colocando 3 placas de 3 *cm* de altura, separadas 5 *cm* entre ellas y la más cercana a una distancia de 62 *cm* del centro del área de trabajo. Una placa horizontal a una altura de 2.5 *cm* y simultáneamente 2 placas de 2.5 *cm* a 25 y 28 *cm* de altura, con un ángulo

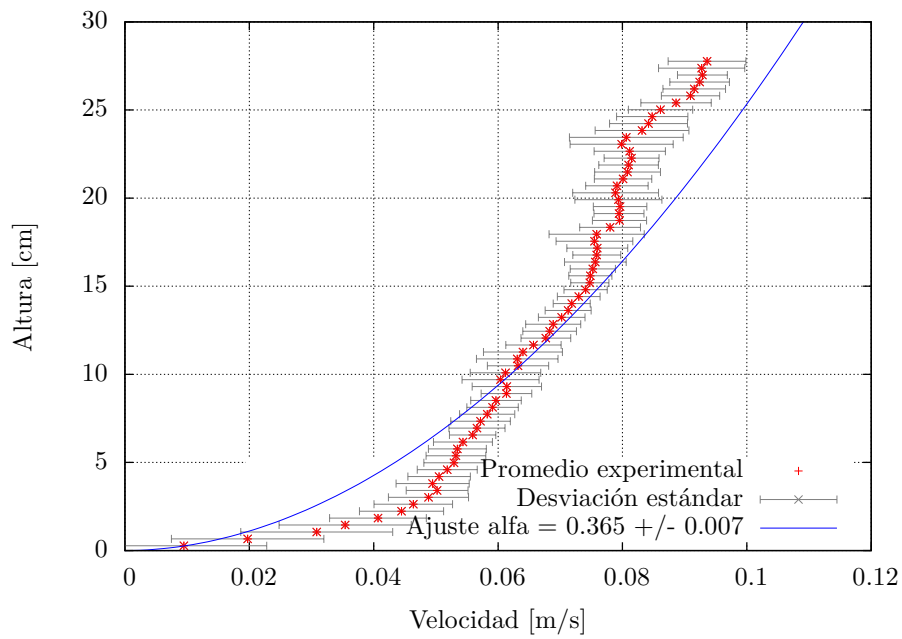


Figura 3.17: Perfil obtenido con 5 obstáculos, 3 placas verticales colocadas sobre el piso, separadas 5 cm entre ellas, la más cercana a 62 cm de distancia del centro de la zona de trabajo y una placa horizontal a una altura de 2.5 cm y una placa inclinada 45° a 25 cm de altura, éstas últimas a 90 cm de distancia del centro de la zona de trabajo.

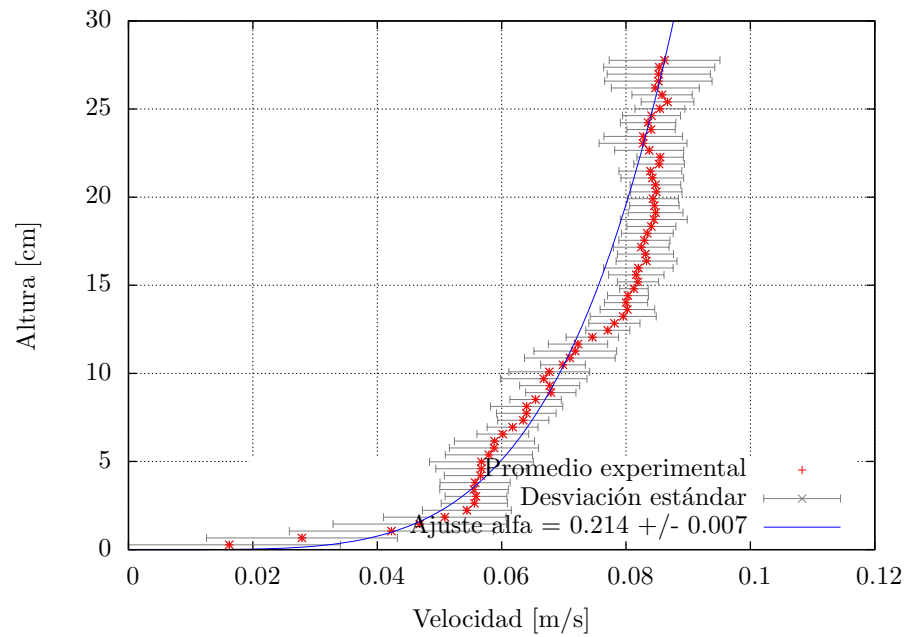


Figura 3.18: Perfil obtenido con 7 obstáculos, 3 placas verticales colocadas sobre el piso, separadas 5 cm entre ellas, la más cercana a 62 cm de distancia del centro de la zona de trabajo. Una placa horizontal a una altura de 2.5 cm y simultáneamente 3 placas inclinadas 45° a diferentes alturas (25,30 y 32 cm). Las últimas cuatro placas se colocaron a 90 cm del centro de la zona de trabajo.

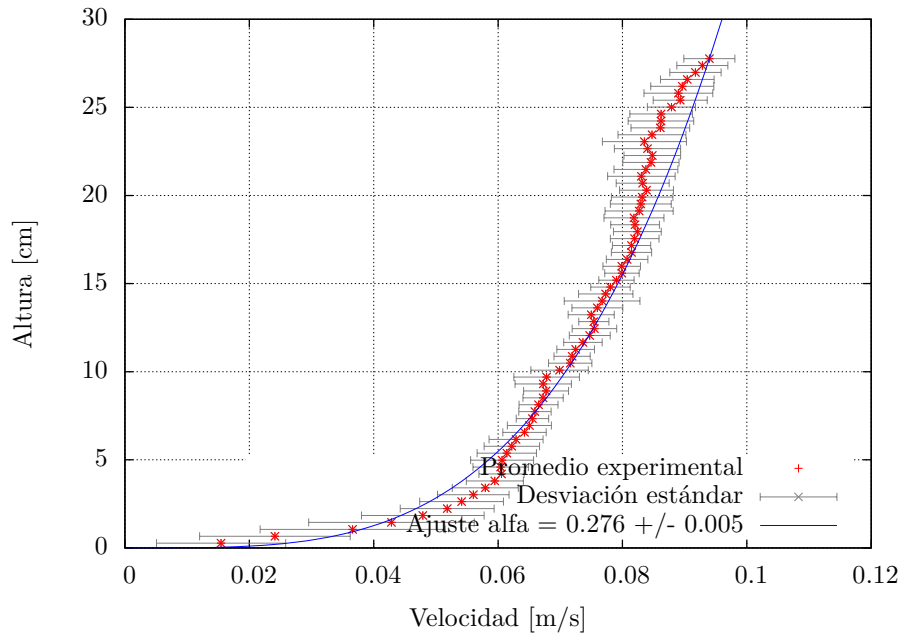


Figura 3.19: Perfil obtenido con 6 obstáculos, 3 placas verticales colocadas sobre el piso, separadas 5 cm entre ellas, la más cercana a 62 cm del centro de la zona de trabajo. Se colocó una placa horizontal a una altura de 2.5 cm y 2 placas inclinadas 45° a diferentes alturas (25 y 28 cm), las últimas tres placas se colocaron a 90 cm de distancia del centro de la zona de trabajo.

de 45° respecto a la horizontal. Las últimas tres placas se colocaron a 90 cm del centro del área de trabajo. Con lo anterior se encontró el perfil que se muestra en la Fig. 3.19.

Si bien se había conseguido el α deseado a la hora de iniciar los experimentos se encontró que el perfil ya no era el mismo. Había problema con la repetibilidad en el flujo del canal.

3.3.2. Obstáculos cerca de la entrada del canal

Se optó por colocar obstáculos a la entrada del canal. Como lo que se buscaba era tener velocidades menores en la parte inferior y que éstas fuesen aumentando con la altura se propuso colocar obstáculos verticales sobre el piso cerca de la entrada del canal. Se colocaron 16 obstáculos verticales y perpendiculares al flujo; 3 placas de 10 cm con 10 cm de separación entre

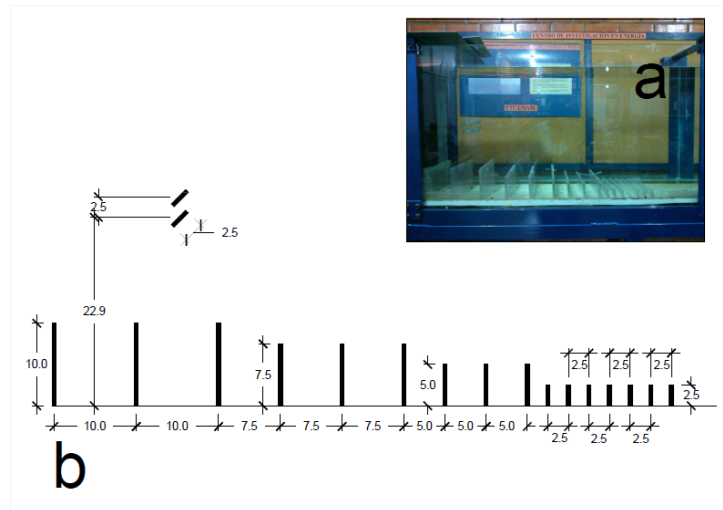


Figura 3.20: a) Fotografía de obstáculos a la entrada del canal. b) Esquema y medidas de los obstáculos que se utilizó para obtener el perfil de capa límite usado en los experimentos.

ellas, 3 placas de 7.5 *cm* con 7.5 *cm* de separación entre ellas, 3 placas de 5 *cm* con 5 *cm* de separación entre ellas y por último 7 placas de 2.5 *cm* con 2.5 *cm* de separación entre ellas. Con estos obstáculos se observó que se necesitaba frenar las velocidades en la parte superior del canal. Se colocaron, adicionalmente a los 16 obstáculos verticales sobre el piso, 2 obstáculos de 2.5 *cm* de ancho y con un ángulo de 45° respecto al flujo, a 22.5 y 25 *cm* de altura. La Fig. 3.20 muestra un esquema y una fotografía de los obstáculos y la forma en que se acomodaron para obtener el perfil que se utilizó en los experimentos. Se encontró un valor de α igual a 0.284 ± 0.004 . La Fig. 3.21 muestra el perfil obtenido con los obstáculos mencionados. Éste es el perfil que se utilizó para los 12 experimentos realizados.

3.4. Diseño experimental

Para evaluar el desempeño de los 6 intercambiadores de viento, se realizaron 12 experimentos: uno con una habitación con una ventana y sin intercambiador de viento y 11 con los 6 diferentes tipos de intercambiadores de viento, ya que algunos se evaluaron a distintos ángulos con respecto al viento.

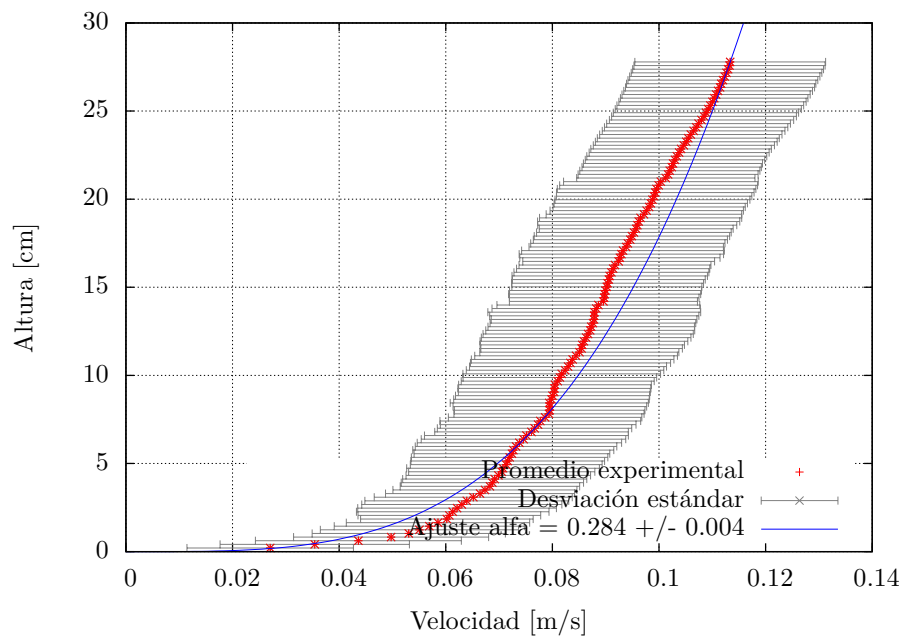


Figura 3.21: Perfil obtenido con 18 obstáculos a la entrada del canal, 16 placas verticales de diferentes tamaños (3 de 10 *cm*, 3 de 7.5 *cm*, 3 de 5 *cm* y 7 de 2.5 *cm*) con diferentes separaciones entre ellas (10,7.5,5 y 2.5 *cm*) y 2 obstáculos de 2.5 *cm* de ancho y con un ángulo de 45° respecto al flujo, a 22.5 y 25 *cm*. Con estos obstáculos se encontró $\alpha = 0.284 \pm 0.004$.

3.4.1. Similitud dinámica

El análisis dimensional se emplea para el trabajo con modelos a escala con el objetivo de que el comportamiento de los mismos sea lo más cercano posible a como se comportaría en una situación real el fenómeno en cuestión. Existe semejanza dinámica cuando el modelo y el prototipo tienen la misma relación de escalas de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas. La similitud geométrica es el primer requisito. La semejanza dinámica existe simultáneamente con la semejanza cinemática, si todas las fuerzas en el modelo y en el prototipo guardan la misma proporción (White, 1979).

Dentro de la planificación de los experimentos se consideró el análisis dimensional. Una ventaja importante del análisis dimensional es que proporciona las leyes de escala que pueden convertir los datos obtenidos sobre un pequeño modelo en información para el diseño de un prototipo grande, lo cual genera un enorme ahorro de tiempo y dinero. Cuando las reglas de escala son válidas se dice que existe semejanza dinámica entre el modelo y el prototipo. Para analizar mediante un modelo a escala los fenómenos que podrían ocurrir en el objeto real es necesario que entre ambos (modelo y objeto real) exista semejanza geométrica y dinámica.

La similitud geométrica se consideró para la elaboración de las maquetas, todas están a una escala fija (1:25), respecto a la habitación y al intercambiador de viento que representan. Los criterios fundamentales para establecer la semejanza dinámica de un modelo a escala con el objeto real cuando el problema es isotérmico, como es en estos experimentos, son la igualdad del número de Reynolds (Re) y del número de Mach (Ma). Puesto que la velocidad del fluido ($< 0.14 \text{ m/s}$) es mucho menor que la del sonido (343 m/s), el número de Mach no es importante. Por lo tanto, sólo se utilizó la igualdad del número de Reynolds ($Re = UL/\nu$) para obtener similitud dinámica. En donde U es la velocidad característica del flujo, L es la longitud característica y ν es la viscosidad cinemática del fluido. En este caso U se tomó a la altura de 0.278 m en la escala de laboratorio, 6.948 m en la escala real. En la Tabla 3.3 se muestran los valores de las variables para obtener igualdad en el número de Reynolds en los experimentos de laboratorio y lo que representa a escala real. La velocidad del flujo en el canal es muy baja al igual que la velocidad a escala real (0.068 m/s), aún cuando se utilizó la bomba a su mayor capacidad, sin embargo el número de Reynolds que se obtiene es mayor que el Reynolds crítico ($Re_c = 8000$) que se encuentra reportado en la literatura con

Tabla 3.3: Número de Reynolds y valores considerados en el cálculo, escala laboratorio y escala real.

Característica	Escala laboratorio	Escala real
	Agua	Aire
U [m/s]	0.113	0.068
L [m]	0.123	3.075
ν [m ² /s]	1.01×10^{-6}	1.51×10^{-5}
Re [-]	13805.37	13805.37

geometrías semejantes (Uehara et al., 2003), es decir, $Re > Re_c$, por lo que se confía en utilizar los resultados para validaciones numéricas.

Defraeye et al. (2011) mencionan que una vez que se excede cierto número de Reynolds, en la pruebas de túnel de viento, el campo del flujo se vuelve independiente del número de Reynolds. El valor mínimo a partir del cual se produce este efecto, se denomina Reynolds crítico. Los valores correspondientes al Re_c son obtenidos en túneles de viento, con base a la altura del edificio y la velocidad del viento a esa altura. Algunos estudios muestran que la dependencia del número de Reynolds está influenciado por la dirección del viento, la geometría de la construcción y la localización sobre la superficie (Defraeye et al., 2011). De acuerdo a lo anterior, lo más adecuado sería obtener el Re_c para cada caso. Sin embargo Uehara et al. (2003) realizó experimentos en túnel de viento con una geometría similar a la de esta investigación y con el flujo perpendicular como en nuestro caso y encontró el $Re_c = 8000$. El número de Reynolds obtenido en este estudio es mayor que el Reynolds crítico encontrado por Uehara et al. (2003), por lo que aún cuando la velocidad en la ambas escalas es muy baja, se tiene cierta confianza para utilizar los resultados experimentales para la validación de simulaciones.

En los 12 experimentos realizados el techo de la habitación y el del intercambiador de viento son planos. Para el desarrollo experimental se propuso mantener fijos los siguientes parámetros: la geometría de la habitación, el área de la ventana abierta (A_v) y su ubicación; la ubicación del intercambiador de viento en el centro del techo de la habitación; la altura del intercambiador (h_i), la forma de la sección transversal del ducto total del intercambiador y su área (A_d) y la magnitud de la velocidad del viento (U).

Los parámetros que se varían en el intercambiador de viento son: el número

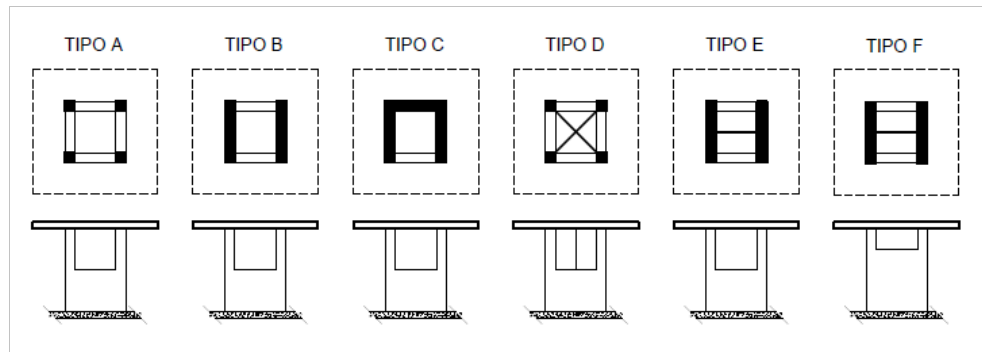


Figura 3.22: Seis tipos de intercambiadores de viento evaluados experimentalmente.

ro de aberturas (N), el área total de las aberturas (A_i), el número de subductos dentro del ducto total (D). Para esto, se realizaron 6 diferentes tipos de intercambiadores de viento, los cuales se muestran en la Fig. 3.22. Para algunos, también se varía el ángulo de incidencia del viento (θ). En las maquetas, los intercambiadores de viento forman una sola pieza con el techo de la habitación y pueden desmontarse y girar en ángulos de 90° para modificar la incidencia del viento en el intercambiador.

3.4.2. Programa de experimentos

En la Tabla 3.4 se enlistan los 12 experimentos realizados, las características de cada intercambiador de viento y el ángulo de incidencia del viento. La nomenclatura que se propone en función al tipo de intercambiador de viento y el ángulo de incidencia del viento sobre éste. El experimento sin intercambiador de viento se consideró la línea base (LB) y sirvió de referencia para evaluar el desempeño de cada intercambiador de viento.

Tabla 3.4: Relación de experimentos realizados.

EXPERIMENTO		PARÁMETROS DEL INTERCAMBIADOR DE VIENTO						
NÚM.	NOMEN- CLATURA	TIPO DE INTERCAM- BIADOR DE VIENTO	ÁNGULO DE INCIDENCIA DEL VIENTO θ [°]	NÚMERO DE abertura(S) N [-]	ÁREA TOTAL DE abertura(S) A_i [m ²]	NÚMERO DE DUCTOS D [-]	RELACIÓN ENTRE aberturaS A_v/A_i [-]	RELACIÓN abertura Y DUCTO A_i/A_d [-]
1	LB	ninguno	–	–	–	–	–	–
2	A-0	A	0	4	1.69	1	1.00	1
3	B-0	B	0	2	0.85	1	0.50	2
4	B-90	B	90	2	0.85	1	0.50	2
5	C-0	C	0	1	0.42	1	0.25	3
6	C-90	C	90	1	0.42	1	0.25	3
7	C-180	C	180	1	0.42	1	0.25	3
8	D-0	D	0	4	1.69	4	1.00	1
9	E-0	E	0	2	0.85	2	0.50	2
10	E-90	E	90	2	0.85	2	0.50	2
11	F-0	F	0	2	0.42	2	0.25	2
12	F-90	F	90	2	0.42	2	0.25	2

Observando la Fig. 3.22 y la Tabla 3.4, se nota que los siguientes pares de intercambiadores A y D , B y E , así como C y F tienen la misma área total de abertura del intercambiador de viento A_i ; y por lo tanto, la misma relación de aspecto A_v/A_i y A_i/A_d , variando entre cada par de ellos, únicamente el número de ductos. El tipo C y F tienen diferente número de aberturas, sin embargo el área total de abertura A_i es la misma.

Como ya se mencionó, se utilizó la técnica SPIV. Se hizo pasar un plano de luz láser en el plano central del modelo a escala y tangente a la dirección del flujo del agua, se tomaron imágenes simultáneas con dos cámaras. Para cada experimento, se realizaron 220 disparos de cada cámara, se adquirieron 440 fotografías, cada par de fotografías tomadas al mismo tiempo, integran una imagen estereoscópica. Al tiempo t se adquieren un par de fotografías (una con cada cámara), al tiempo $t + \Delta t$ otro par de fotografías, donde $\Delta t = 0.009 \text{ s}$ ($9000 \mu\text{s}$). Por cada cuatro fotografías el programa Davis 7.2 realiza correlaciones y arroja las tres componentes del campo de velocidades en el plano de estudio. En cada experimento se obtuvieron 110 campos de velocidades, con un intervalo de tiempo entre campos de 0.04 s (40 ms).

Para evitar los reflejos de luz, se colocaron máscaras con papel *contac* negro sobre el vidrio que conforma el piso de la zona de trabajo, sobre el piso y debajo del techo de la maqueta de la habitación, en el lecho bajo del techo de todos los intercambiador de viento y en las paredes interiores de la maqueta que se encontraban detrás del plano de luz, visto desde la posición de las cámaras, ver Fig. 3.23, en todos los caso se dejó libre el paso de la hoja de luz láser a través de una ranura en el papel *contac*. También se pintaron en color negro mate los bordes de la maqueta generados por el espesor del acrílico.

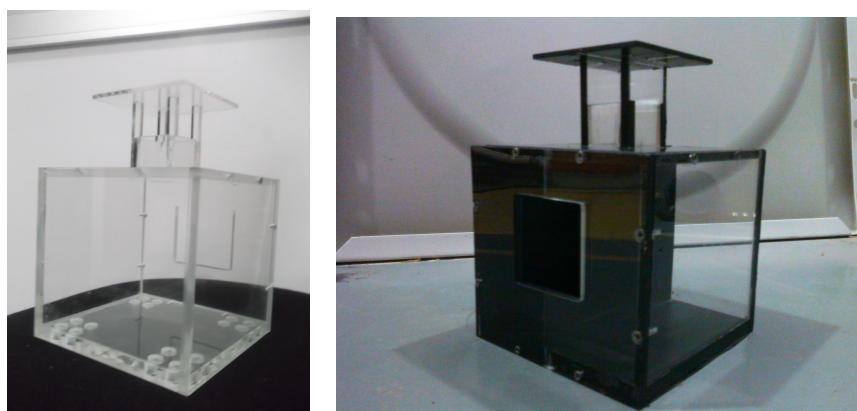


Figura 3.23: Foto de maqueta de habitación con intercambiador de viento tipo A, antes y después de haber colocado la máscara con papel *contac* para evitar reflejos.

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este capítulo se presentan y se analizan los resultados obtenidos en los experimentos realizados para este trabajo de tesis. Se realizó un análisis cualitativo de los flujos en los campos de velocidad promedio calculados, luego se identificaron las áreas con velocidades significativas dentro de la habitación y debajo de 2.20 m de altura. Se calcularon los flujos de entrada y salida a través de la ventana y el intercambiador de viento bajo el supuesto de que el flujo era bidimensional. La forma de cómo se realizaron los cálculos y el análisis de los resultados se presentan en las siguientes secciones de este capítulo.

4.1. Descripción cualitativa de los flujos

En cada experimento realizado se obtuvieron 110 campos de velocidad. Se realizó un programa para calcular el campo de velocidad promedio para cada experimento. Para obtenerlo, el programa realiza la sumatoria de cada componente de la velocidad (u, v, w) para cada punto fijo (x, y, z) y divide entre el número de datos sumados (110). El programa *Davis7.2* calcula también el campo de velocidad promedio, sin embargo se encontró que da valores erróneos dado que el número de datos que ocupa para dividir la sumatoria varía en cada punto, ya que sólo considera los datos diferentes de cero.

En la Fig. 4.1 se muestran los 12 campos de velocidad promedio obtenidos

con áreas de interrogación de $64 \text{ pixeles} \times 64 \text{ pixeles}$. Se observa que algunos intercambiadores de viento producen velocidades de flujo al interior de la habitación mayores que otros y por lo tanto, los primeros tienen un mejor desempeño para la ventilación.

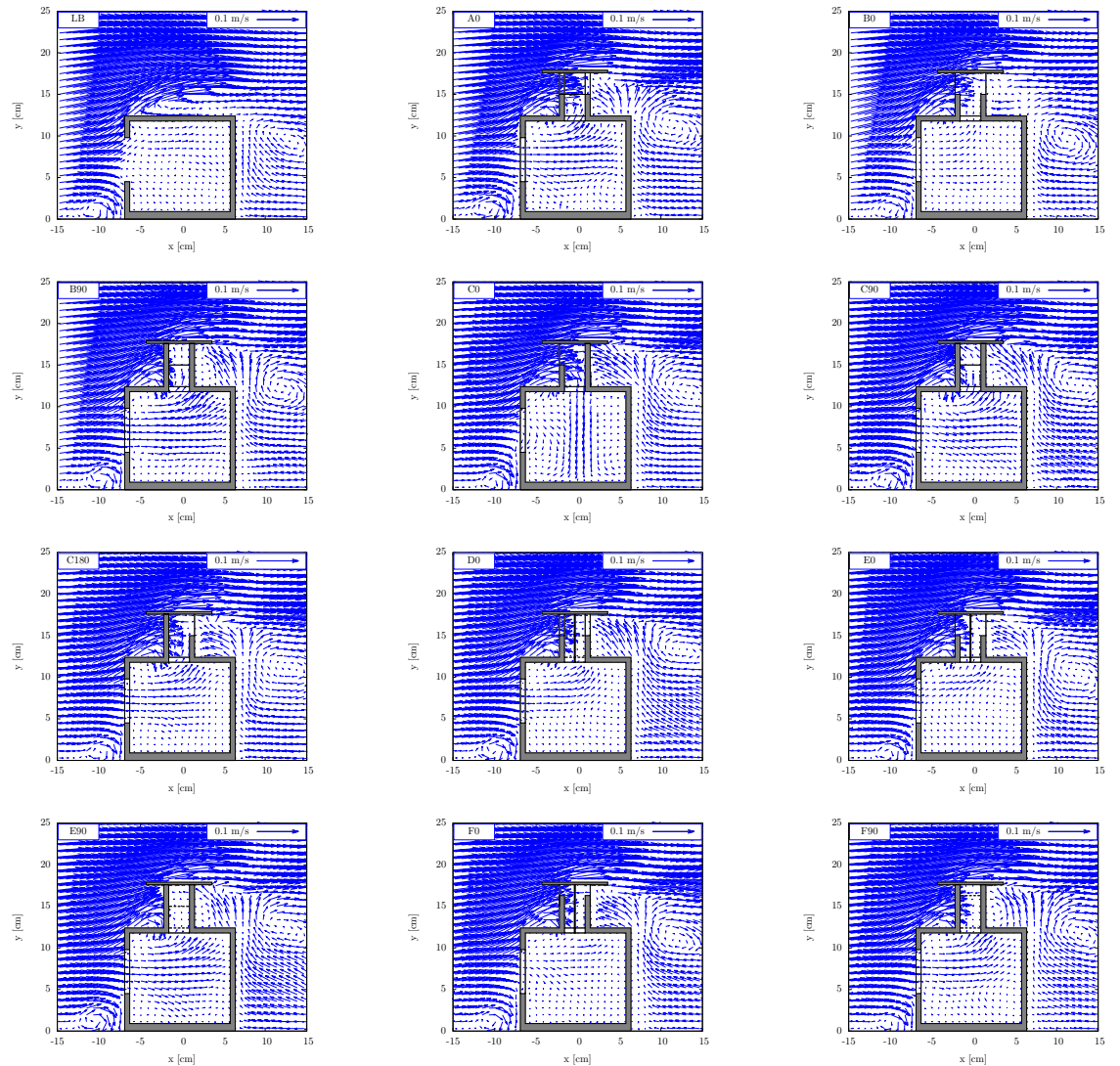


Figura 4.1: Campos de velocidad promedio calculados de los 12 casos, con áreas de interrogación de $64 \text{ pixeles} \times 64 \text{ pixeles}$.

Se observa que en todos los casos con intercambiador, hay velocidades al interior de la habitación mayores que para el caso de la habitación sin intercambiador (LB). Con relación a las velocidades que aparecen en el caso LB , al interior de la habitación, se observa un aumento importante de las velocidades en los casos $A0$, $B90$, $C0$, $C90$ y $E90$. En los casos $C180$, $D0$ y $F90$ se observa menor aumento de las velocidades. Finalmente, en los casos $B0$, $E0$ y $F0$ las velocidades son ligeramente mayores a las del caso LB .

Todas la aberturas de los intercambiadores orientadas al barlovento meten flujo, algunas ($A0$ y $B0$) solo atraviesan el intercambiador y salen por las demás aberturas, las que tienen divisiones perpendiculares al flujo ($D0$, $E0$ y $F0$) obligan al flujo a entrar a la habitación y después salen por las demás abertura(s). Sin embargo, a excepción del caso $C0$, considerando el flujo de entrada y salida total, todos los intercambiadores de viento están trabajando principalmente como extractores.

Para todos los casos, dada la presencia de la maqueta, la velocidad del aire en la parte exterior a la altura de la(s) abertura(s) del intercambiador es mayor que a la altura de la ventana de la habitación, y por lo tanto la presión es mayor. La mayoría de los intercambiadores de viento tienen otra(s) abertura(s) con menor presión que la de la ventana por estar orientadas al sotavento y en consecuencia por ellas hay salida de flujo. El intercambiador de viento tipo C es el único que cuenta con una sólo abertura, en los casos $C90$ y $C180$, la abertura del intercambiador tiene una presión menor a la de la ventana de la habitación, por lo que la entrada del flujo se da principalmente por la ventana y la salida por la abertura del intercambiador, esto no se refleja en los vectores de salida de todos los casos dado que la medición es en el plano central de la maqueta y en algunos casos ($E0$ y $F0$) el intercambiador de viento tiene una división es el centro. En el caso $C0$ la abertura del intercambiador y la ventana están orientadas al barlovento, por lo que el flujo entra por la abertura del intercambiador y por la ventana principalmente se da la salida del aire.

En todos lo casos, incluyendo el que no tiene intercambiador de viento, al exterior se observan dos vórtices. El primero, sobre la cara del barlovento de la habitación, entre el piso y el lecho bajo de la ventana. El segundo y más grande, en la cara del sotavento de la habitación, la altura donde se ubica depende del tipo de intercambiador. La posición más baja se tiene cuando no existe intercambiador y la más alta cuando el intercambiador no tiene abertura hacia el sotavento.

4.2. Análisis de áreas con velocidades significativas

Para el análisis de áreas con velocidades significativas, se usaron los campos de velocidad promedio calculados anteriormente cuyas áreas de interrogación tienen resolución $64 \text{ pixeles} \times 64 \text{ pixeles}$. Para el análisis se calculó la magnitud de los vectores que se encontraban al interior de la habitación a una altura menor a 0.088 m , que corresponde a 2.20 m en la habitación a escala real, ya que después de esa altura cualquier mejora en la ventilación ya no es percibida por el ocupante. En el caso *LB* se buscó el vector con mayor magnitud y se tomó como referencia ($M_r = 0.014 \text{ m/s}$). En los casos con intercambiador de viento se localizaron los vectores con magnitud mayor o igual a la de referencia M_r . En la Fig. 4.2 se muestra en rojo, para el caso *LB*, el vector con mayor magnitud y para los demás casos los vectores con magnitud mayor o igual que M_r . La línea azul enmarca los vectores que se tomaron en cuenta y que representan al 100% , que en todos los casos son 165 vectores.

Se calculó el porcentaje de vectores con magnitud $\geq M_r$ con respecto al número de vectores tomados en cuenta (165). La Tabla 4.1 concentra el porcentaje de vectores con magnitud $\geq M_r$ y que se encuentran ubicados dentro de la habitación a una altura menor que 2.20 m en escala real (0.088 m en escala laboratorio), para cada caso.

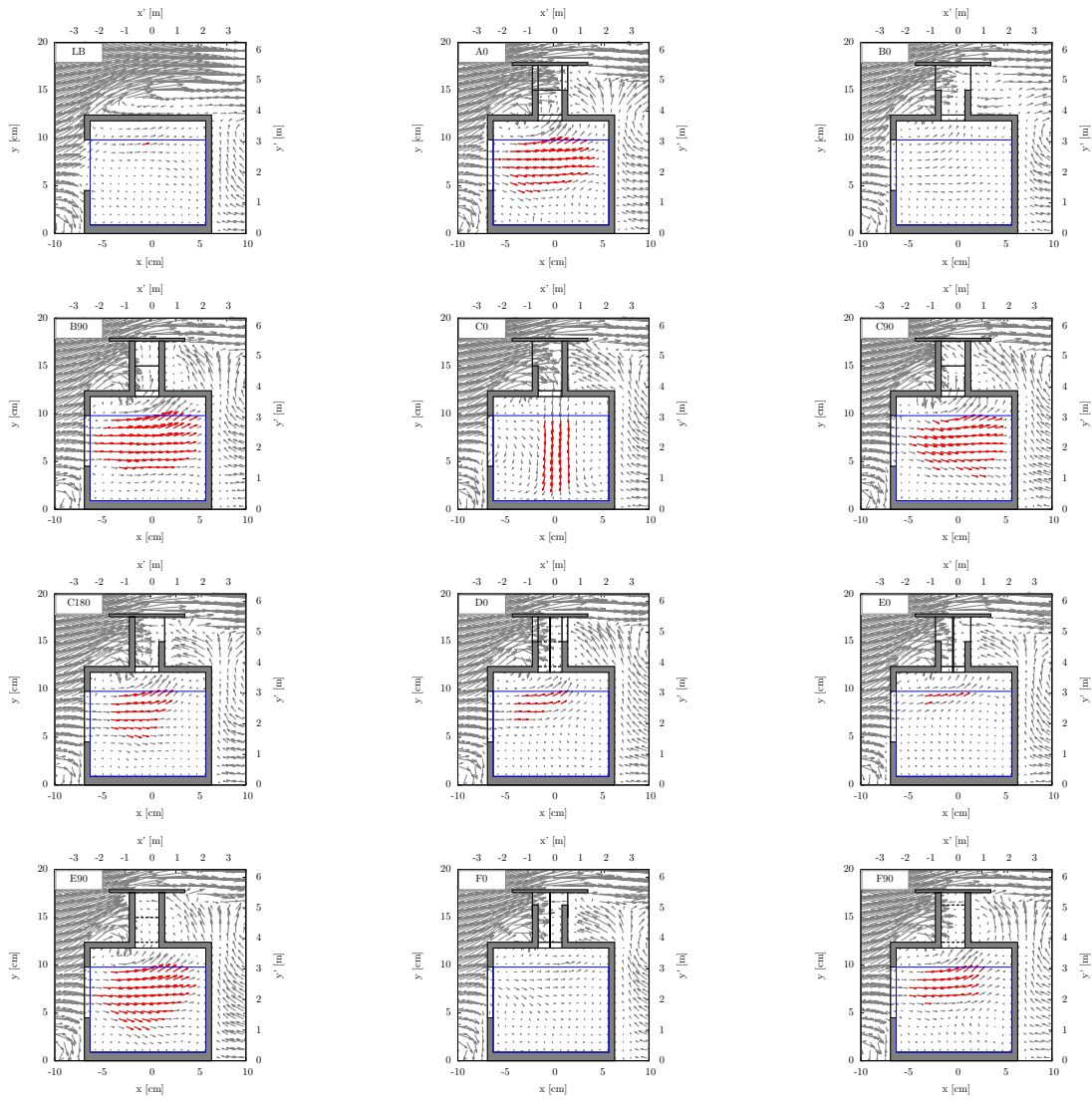


Figura 4.2: Campos de velocidad promedio calculados, en resolución $64 \text{ pixeles} \times 64 \text{ pixeles}$. Se enmarcan los vectores tomados en cuenta dentro de la habitación y se remarcan en color rojo aquellos con magnitud $\geq M_r$.

Tabla 4.1: Concentrado de los porcentajes de vectores con magnitud $\geq M_r$ y ubicados en una altura menor de 2.20 m en escala real para todos los casos.

Caso	Vectores con magnitud $\geq M_r$ con altura ≤ 2.20 m [%]
<i>A0</i>	39.4
<i>B0</i>	0.0
<i>B90</i>	48.5
<i>C0</i>	21.2
<i>C90</i>	43.0
<i>C180</i>	22.4
<i>D0</i>	11.5
<i>E0</i>	4.2
<i>E90</i>	43.0
<i>F0</i>	0.0
<i>F90</i>	21.2

Se observa que el caso *B90* es el que tiene el mayor porcentaje de área (48.5 %) con velocidades con magnitud mayor o igual que M_r , los casos *C90*, *E90* tienen el mismo porcentaje (43.0 %), destaca el hecho que el primero y el tercero sean intercambiadores de viento similares, salvo por la división que tiene el segundo. Le sigue el caso *A0* con el 39.4 %. Luego el porcentaje cae al 21-22 % en los casos *C0*, *C180* y *F90*. Los casos con el porcentaje menor son *D0* con 11.5 % y *E0* con tan solo 4.2 %. Los casos *B0* y *F0* no tienen velocidades con magnitud mayor que M_r . Los porcentajes que se reportan consideran únicamente los resultados de las mediciones en el plano central, ya que no se realizaron mediciones fuera de éste.

4.3. Análisis de flujos de ventilación

Con los 110 campos de velocidad, ahora con áreas de interrogación de 16 pixeles \times 16 pixeles, se calcularon para cada caso los flujos volumétrico promedios de entrada y de salida en la ventana y en el intercambiador de viento en m^3/s .

El ancho de la ventana y del intercambiador de viento son diferentes y por lo tanto el área que ofrecen para la entrada y/o salida del flujo no es la misma. Ya que los campos de velocidad medidos corresponden sólo al plano vertical

del centro de la habitación, el cálculo del flujo volumétrico se realizó con la suposición de que el flujo era bidimensional, es decir, que no cambia en la dirección perpendicular al plano medido.

Primero se calculó el flujo de entrada de la ventana f_{ev} y el flujo de salida de la ventana f_{sv} en cada uno de los 110 campos de velocidad. Para esto se elaboró un programa que seleccionara los vectores que se encontraban en el área de la ventana, 3 columnas de 26 vectores (78 vectores en total) en cada campo, se obtuvo el promedio de la componente de la velocidad en x de los tres vectores que se encontraban a la misma altura y se multiplicaron por el Δy correspondiente a cada caso (aproximadamente 0.00204 m). Se sumaron por separado los valores positivos (entrada) y los valores negativos (salida) y luego se multiplicaron por el ancho de la ventana (0.052 m). Una vez obtenidos el f_{ev} y el f_{sv} para cada campo de velocidad, se calcularon los flujos promedio de entrada y salida de la ventana, \bar{F}_{ev} y \bar{F}_{sv} respectivamente. Éstos se obtuvieron con la sumatoria de los f_{ev} y f_{sv} , ambos divididos entre 110.

Para el cálculo del flujo promedios de entrada (\bar{F}_{ei}) y del flujo promedio de salida (\bar{F}_{si}) del intercambiador de viento, se realizó un procedimiento similar al anterior. Primero se calculó el flujo de entrada del intercambiador de viento f_{ei} y el flujo de salida del intercambiador de viento f_{si} en cada uno de los 110 campos de velocidad, con el programa se seleccionaron los vectores que se encontraban debajo del área de ducto del intercambiador de viento ya que por la cercanía entre la paredes de acrílico en el área del ducto del intercambiador se generaban reflejos y los vectores obtenidos ahí no eran confiables para los cálculos. Se seleccionó una fila de 12 vectores, se tomó la componente en y de cada vector y se multiplicó por el Δx correspondiente (aproximadamente 0.00204 m). Se sumaron por separado los valores positivos (salida) y los valores negativos (entrada) y luego se multiplicaron por el ancho del intercambiador (0.025 m). Una vez obtenidos el f_{ei} y el f_{si} para cada campo de velocidad, se calcularon los flujos promedio de entrada y salida del intercambiador de viento, \bar{F}_{ei} y \bar{F}_{si} respectivamente. Éstos se obtuvieron con la sumatoria de los f_{ei} y f_{si} , ambos divididos entre 110. La Fig. 4.3 muestra la ubicación de los vectores que se seleccionaron en los 110 campos de velocidad de cada experimento.

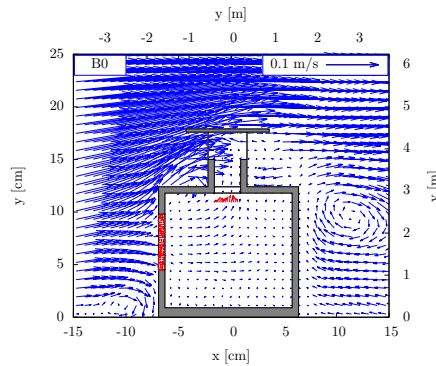


Figura 4.3: Los vectores en rojo representan la ubicación de los vectores que se consideraron para el cálculo de los flujos de entrada y salida de la ventana y del intercambiador de viento.

En la gráfica de la Fig. 4.4 se muestran los resultados obtenidos para los valores de \bar{F}_{ev} , \bar{F}_{sv} , \bar{F}_{ei} y \bar{F}_{si} para los 12 casos de estudio, en m^3/s . En la gráfica se observa que para todos los casos con intercambiador de viento, excepto el caso $C0$, la entrada de flujo se dan principalmente por la ventana. Se observa también como el \bar{F}_{ev} de todos los casos con intercambiador de viento es mayor al caso LB . Salvo en el caso $C0$, en que el intercambiador de viento trabaja como captador de viento, el \bar{F}_{ei} es generalmente poco. Debido a que el flujo se calculó con los vectores que están debajo del intercambiador, no se considera el flujo que atraviesa al intercambiador y que no entra a la habitación. Resulta interesante ver como dentro de estos intercambiadores que trabajan como extractores de aire, los dos que registran un mayor \bar{F}_{ei} son los que tienen aberturas orientadas al barlovento y la división que conduce el flujo al interior de la habitación ($E0$ y $F0$), es decir, la división impide que el flujo solo atravesase el intercambiador.

Los casos que tienen mayor flujo promedio de entrada por la ventana son $B90$ y $A0$, en el primer caso las aberturas del intercambiador están paralelas al flujo y en consecuencia la presión ahí es menor que en la ventana, el segundo caso tiene aberturas en las cuatro caras, tres de ellas con menor presión que la de la ventana. Ninguno de estos casos tiene divisiones para generar subductos. Se deduce que cuando la ventana está orientada al barlovento ésta tiende a ingresar el aire y en consecuencia los intercambiadores que trabajan mejor son los que tienen aberturas que ayudan a extraer el aire que la ventana ingresó. Los intercambiadores de viento de los casos $B90$, $E90$ y $F90$ son similares salvo que los dos últimos cuentan con una división al interior que

genera subductos y en el caso $F90$ el área de la abertura del intercambiador es menor. La diferencia en el desempeño de estos tres casos ($B90$, $E90$ y $F90$) es notable, mostrando éstos un desempeño decreciente.

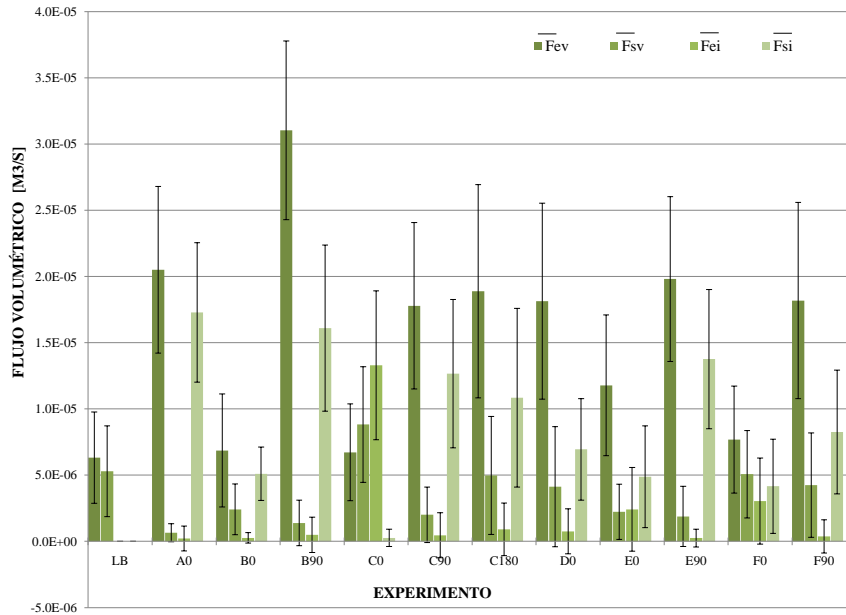


Figura 4.4: Gráfica de los flujos promedio de entrada y salida a través de la ventana y el intercambiador de viento (\bar{F}_{ev} , \bar{F}_{sv} , \bar{F}_{ei} y \bar{F}_{si}).

Se obtuvieron los flujos de entrada y de salida totales con la sumatoria de los flujos promedio de entrada y salida de cada caso. El flujo de entrada total F_{et} es igual a la suma de los flujos promedio de entrada por la ventana y por el intercambiador de viento, $F_{et} = \bar{F}_{ev} + \bar{F}_{ei}$. El flujo de salida total F_{st} es igual a la suma de los flujos promedio de salida por la ventana y por el intercambiador de viento, $F_{st} = \bar{F}_{sv} + \bar{F}_{si}$. La Fig. 4.5 muestra el flujo de entrada y salida total de los doce casos, los cuales por conservación de masa deberían ser iguales. La diferencia se debe a la consideración hecha para el cálculo de los flujos, en el sentido de suponer la bidimensionalidad

del flujo. Por lo que a mayor diferencia entre los flujos totales de entrada y salida indica mayor tridimensionalidad del flujo.

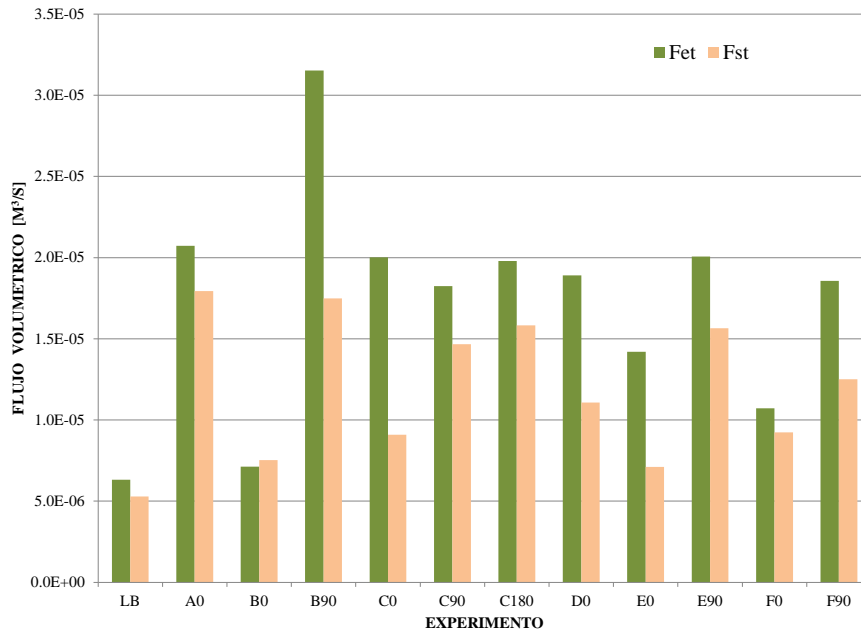


Figura 4.5: Gráfica comparativa de los flujos de entrada total ($F_{et}=\bar{F}_{ev} + \bar{F}_{ei}$) y los flujos de salida total ($F_{st}=\bar{F}_{sv} + \bar{F}_{si}$) de los doce casos.

4.4. Desempeño con respecto a LB

Uno de los alcances importantes de este trabajo de investigación experimental es poder evaluar el desempeño de diferentes tipos de intercambiadores de viento, e incluso demostrar que el uso de intercambiadores de viento favorece la ventilación natural. Dentro de los 12 casos, el caso LB es el único que no tiene intercambiador de viento en el techo y es por ello que se utiliza como línea base para evaluar el desempeño de los demás casos.

Se evaluó el desempeño de los intercambiadores de viento, principalmente conforme a la relación que guarda el flujo de entrada total de cada caso

respecto al flujo de entrada total del caso *LB* (F_{et} / FET_{LB}). También se obtuvo la relación del promedio de los flujos de entrada y salida totales con respecto al promedio del caso *LB* ($((F_{et} + F_{st})/2)/((FET_{LB} + FST_{LB})/2)$). Es decir, en ambos cálculos se normalizó el flujo con respecto a su homólogo del caso *LB*. Los resultados se graficaron en la Fig. 4.6. Se observa que el resultado para *LB* es uno pues se dividió entre sí mismo. El resultado de la división para cada caso nos indica cuantas veces el flujo de entrada total y el flujo promedio es mayor que el del caso *LB*. Si hubiese algún caso con un valor menor a 1, sería aquel en que el intercambiador estuviese generando un flujo menor al del caso *LB*. Al no existir, se confirma el hecho de que todos los casos realizados con intercambiador de viento tienen un flujo de entrada mayor al del caso *LB* y en consecuencia se afirma que el uso de intercambiadores de viento en el techo de un habitación con una ventana mejora la ventilación natural al interior.

Considerando el flujo de entrada total, en la Fig. 4.6 se observa que el caso *B90* es el que tiene un mejor desempeño, puesto que el F_{et} es 5 veces el FET_{LB} . En los casos *A0*, *C0*, *C180* y *E90* el F_{et} es más de 3 veces el FET_{LB} , en los casos *C90*, *D0*, *E0* y *F90* el F_{et} es más del doble del FET_{LB} , en el caso *F0* el F_{et} es 1.7 veces el FET_{LB} y finalmente el caso *B0* presenta el peor desempeño, aún así tiene un F_{et} mayor que en el caso *LB*. Considerando el flujo promedio de cada caso las primeras cuatro posiciones (*B90*, *A0*, *E90* y *C180*) y las últimas tres (*E0*, *F0* y *B0*) conservan su posición, aunque el número de veces que el flujo promedio es mayor que el del caso *LB* varía ligeramente.

Se hizo la evaluación del desempeño conforme a el flujo de entrada total y el promedio del flujo de entrada y salida total, ya que los valores del flujo de entrada total (F_{et}) y de salida total (F_{st}) no son iguales, debido a la tridimensionalidad del flujo, sin embargo se observa que en ambos casos los intercambiadores de viento que presentan los mejores y los peores desempeños se repiten.

Se considera que el caso *B90* presenta el mejor desempeño debido a que la orientación de las aberturas del intercambiador permiten la salida del aire que la ventana introdujo, al no tener aberturas orientadas al barlovento la entrada a través del intercambiador es mínima y no entorpece que flujo de salida que tiene el intercambiador. Lo cual es probable que esté ocurriendo en el caso *A0* al tener una abertura orientada al barlovento, y por ello el desempeño disminuye sobre el caso anterior aún cuando tenga más aberturas orientadas adecuadamente. Esto también ocurre con el caso *B0*, donde el intercambiador

sólo tiene una abertura orientada al barlovento y otra al sotavento, por lo que el flujo que entra en una abertura sale en la otra entorpeciendo el flujo de salida a través del intercambiador, lo que genera que este caso tenga el peor desempeño.

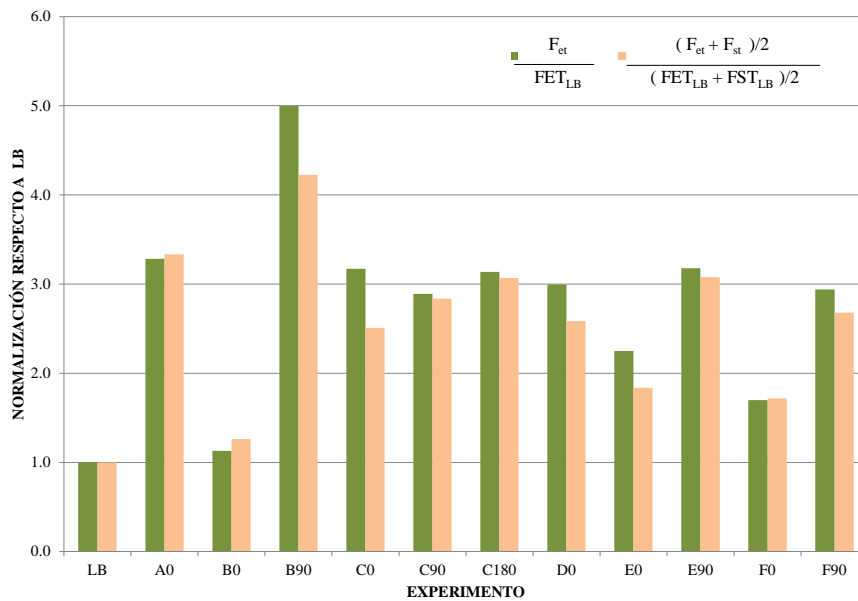


Figura 4.6: Gráfica de la relación que guardan el flujo de entrada total y el promedio del flujo de entrada y salida total, con respecto a su homólogo de LB , para todos los casos.

La orientación de las aberturas del intercambiador de viento juega un papel muy importante en el desempeño de éste, un ejemplo de esta afirmación es lo que se observa en la Fig. 4.6, cuando el mismo intercambiador de viento (tipo B) puede ser el que tenga el mejor ($B90$) o peor ($B0$) desempeño con tan solo variar el ángulo de incidencia del viento de 0° a 90° sobre sus aberturas.

En la Tabla 4.2 se enlistan todos los casos en orden del mejor al peor desempeño, evaluado con respecto al caso LB , se agregan también algunas características relevantes. Se observa en las primeras posiciones aquellos in-

tercambiadores de viento que no tienen divisiones en su interior (a excepción del caso $E90$ el cual tiene la orientación más favorable), lo cual plantea el hecho que las divisiones al interior entorpecen el flujo al interior del intercambiador por los efectos de fricción. Ésto se comprueba al comparar la relación entre el F_{et} y el FET_{LB} de los casos $B90$ (5.00) y $E90$ (3.18), en donde la diferencia es la división al interior del intercambiador de viento que tiene el caso $E90$.

Tabla 4.2: Resultados de la evaluación del desempeño de los diferentes intercambiadores de viento, tomados de la Fig. 4.6 y ordenados de mejor a peor desempeño de acuerdo al flujo de entrada. Se muestran algunas características para su mejor análisis.

CASO	F_{et}/FET_{LB} [-]	TIENE DIVISIONES	INTERCAMBIADOR DE VIENTO	
			NÚM. DE ABERTURAS $N[-]$	ÁREA TOTAL $A_i[cm^2]$
$B90$	5.00	no	2	13.52
$A0$	3.28	no	4	27.04
$E90$	3.18	si	2	13.52
$C0$	3.17	no	1	6.76
$C180$	3.13	no	1	6.76
$D0$	2.99	si	4	27.04
$F90$	2.94	si	2	6.76
$C90$	2.89	no	1	6.76
$E0$	2.25	si	2	6.76
$F0$	1.70	si	2	13.52
$B0$	1.12	no	2	13.52

Evaluación de la tridimensionalidad

Para el cálculo de los flujos de entrada y salida se planteó que el flujo era bidimensional. Si dicha suposición fuese cierta, la diferencia del flujo de entrada total y el flujo de salida total, de cada caso, sería igual a cero ($F_{et}-F_{st}=0$). Sin embargo, esta diferencia arroja valores diferentes de cero, y que varían para cada caso. Por lo que esta diferencia da una medida de la tridimensionalidad de los flujos a la habitación por la ventana y por el intercambiador.

La Fig. 4.7 nos muestra cuán tridimensional es el flujo en cada caso. Los

datos graficados resultan de la división del valor absoluto de la diferencia del flujo total de entrada F_{et} y de salida F_{st} entre el flujo promedio F_{prom} de cada caso y multiplicado por 100 para obtener el porcentaje, es decir,

$$\left(\frac{|F_{et} - F_{st}|}{(F_{et} + F_{st})/2} \right) * 100 \quad (4.1)$$

donde $(F_{et} + F_{st})/2$ es igual a F_{prom} . Se observa que el porcentaje de tridimensionalidad más alto (75.1 %) es para el caso $C0$ que incidentalmente es el único que está trabajando como captador de viento. Los casos con porcentajes por arriba del 50 % son $E0$ con 66.6 %, $B90$ con 57.5 % y $D0$ con 52.2 %. Le siguen los casos $F90$ con 39.0 %, $E90$ con 24.7 %, $C180$ con 22.3 % y $C90$ con 21.7 %. Los casos $F0$ y $A0$ tienen porcentajes similares, 15.0 % y 14.4 % respectivamente. El porcentaje más bajo lo tiene el caso $B0$ que es el que tiene el peor desempeño de acuerdo a la evaluación de los flujos respecto al caso LB .

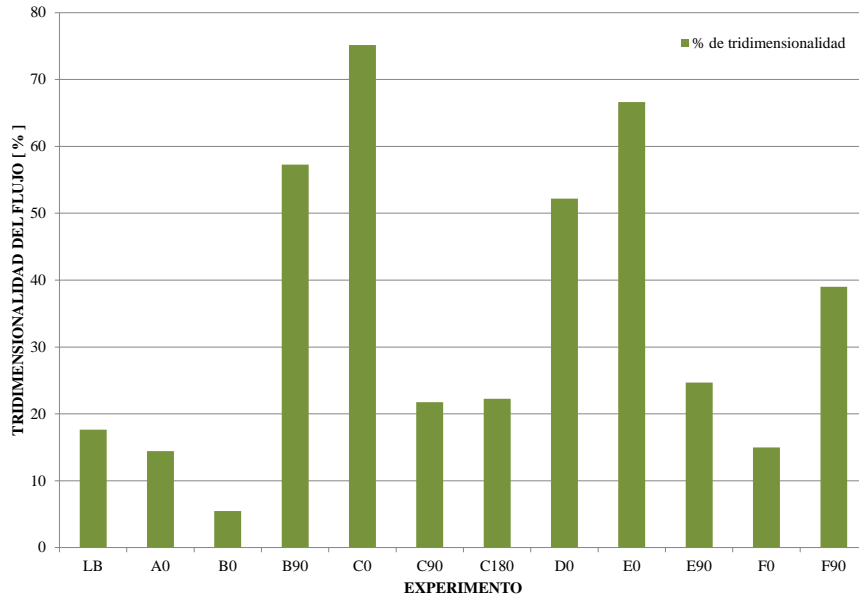


Figura 4.7: Gráfica de tridimensionalidad del flujo para cada caso.

Cuantificación de las fluctuaciones temporales

Para cuantificar las fluctuaciones temporales en el flujo total de entrada se utilizó la siguiente expresión:

$$\frac{\bar{F}_{et}(110i) - F_{et}(prom)}{\bar{F}_{et}(110i)} \quad (4.2)$$

donde $\bar{F}_{et}(110i)$ es el promedio de los f_{et} obtenido a partir de los 110 campos de velocidad, y $F_{et}(prom)$ es el f_{et} obtenido a partir del campo promedio de velocidad. La Fig. 4.8 muestra la cuantificación de las fluctuaciones temporales para cada caso. Se observa que las fluctuaciones menores las tienen los casos *A0* y *B90* que son los que tienen un mejor desempeño. Las fluctuaciones más altas las tienen los casos *F0* y *B0* que son los casos que tienen los peores desempeños de acuerdo a la evaluación de los flujos respecto al caso *LB*.

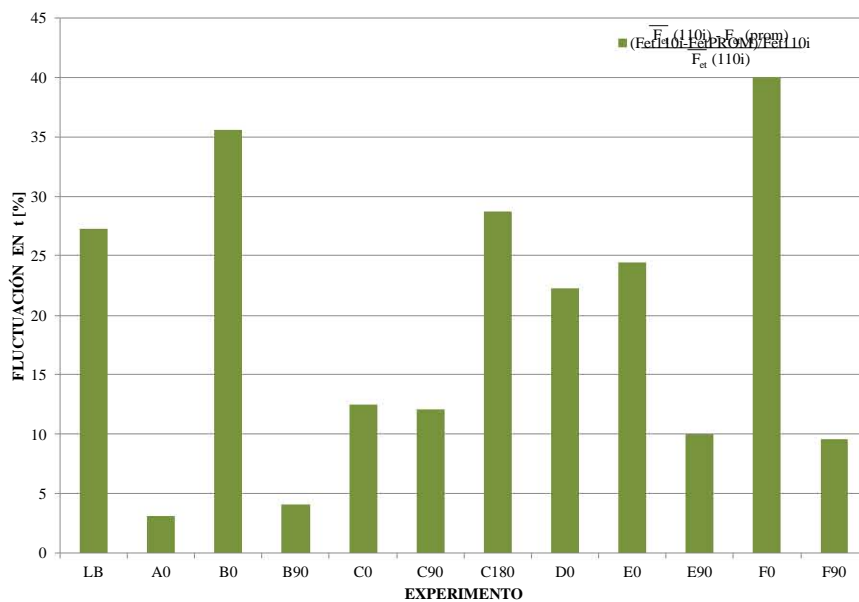


Figura 4.8: Gráfica de las fluctuaciones temporales.

Capítulo 5

Conclusiones

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo general encontrar la configuración o las condiciones en las que un intercambiador de viento tiene un mejor desempeño. Para esto se realizaron experimentos a escala laboratorio de una habitación con una ventana orientada a barlovento y con 6 diferentes intercambiadores de viento colocados en el techo. Para algunos intercambiadores se varió el ángulo de incidencia del viento (θ).

Los resultados analizados en el capítulo anterior muestran que para una habitación con una ventana orientada al barlovento, casi cualquier intercambiador trabaja como extractor de viento, debido a que la orientación de la ventana favorece la entrada del aire y el intercambiador ofrece la posibilidad para extraer el aire que la ventana ingresó. De los 11 casos con intercambiador de viento el único que trabaja como captador es el caso $C0$ y se debe a que su única abertura está orientada al barlovento, al igual que la ventana, entonces la mayor presión en el intercambiador de viento tiende a captar el aire, mientras que la menor presión en la ventana ayuda a extraerlo.

Se evaluó el desempeño de los intercambiadores de viento en términos de dos parámetros, el primero es el porcentaje del área central dentro de la habitación a una altura menor que 2.20 m con velocidades mayores a la velocidad de referencia M_r , esto para identificar qué intercambiador de viento genera en un área más grande con mayor movimiento de aire que el caso línea base (LB). El segundo parámetro es el flujo total de entrada a la habitación,

esto para identificar que intercambiador de viento genera mayor ventilación. La tabla 5.1 presenta los resultados de la evaluación del desempeño de los diferentes intercambiadores de viento de acuerdo a ambos parámetros, ordenados de mejor a peor desempeño. Se agrega una columna con los cambios de aire por hora que se generan en cada caso. El caso *B90* ocupa el primer lugar para ambas evaluaciones por lo que se afirma que es el que tiene mejor desempeño, en estas condiciones. El caso *C90* es el segundo en porcentaje de áreas significativas, sin embargo en cuanto al flujo de entrada total es el octavo, lo cual se explica por el hecho de que la abertura está orientada correctamente pero el área de ésta es solo la mitad de la del caso *B90*. El caso *A0* es el cuarto en porcentaje de áreas significativas, pero el segundo de acuerdo al flujo de entrada total, esto debido a que tiene tres aberturas orientadas adecuadamente, quizá de no tener la abertura orientada al barlovento sería mejor que el caso *B90* ya que tendría mayor área para extraer el flujo que la ventana introdujo. Para ambas evaluaciones, el tercer lugar lo ocupa el caso *E90* que es igual al caso *B90* pero con la división al interior del ducto del intercambiador de viento, esto demuestra el efecto negativo que tiene esta división en el desempeño. El cuarto lugar en cuanto al flujo de entrada lo ocupa el caso *C0*, que es el único que está trabajando como captador de viento y que en cuanto a su porcentaje de área significativas ocupa la sexta posición. La quinta posición para ambas evaluaciones lo ocupa el caso *C180*, de éste puede decirse que su única abertura en el intercambiador está orientada adecuadamente sin embargo el área de ésta limita la capacidad de extraer el aire introducido por la ventana. El caso *D0* tiene el sexto lugar en cuanto a la entrada de flujo total y el octavo en cuanto al porcentaje de áreas significativas, sin duda las divisiones que tiene al interior del intercambiador de viento afectan notablemente su desempeño, esto se observa al compararse con el caso *A0*. El caso *F90* ocupa la sexta posición para ambas evaluaciones, este caso además de la división al interior del intercambiador, tiene las aberturas de éste con un área menor que la de cualquier otro caso, lo cual también afecta su desempeño. Los casos *E0*, *F0* y *B0* se encuentran en las tres últimas posiciones, es decir tienen los peores desempeños, destaca el hecho que los tres tengan sus dos aberturas orientadas una al barlovento y otra al sotavento, los casos *E0* y *F0* al tener la división al interior utilizan la abertura orientada al barlovento para meter aire y la abertura orientada al sotavento para extraerlo, en consecuencia el área de ducto para cada flujo se reduce a la mitad lo cual hace que el intercambiador no alcance a extraer todo el aire que la ventana sería capaz de meter y en consecuencia la ventana

se limita a introducir el aire que ella y el intercambiador puedan desalojar. En el caso *F0* el área de las aberturas es la mitad que las del caso *E0*, lo cual hace reducir aún más el flujo. De acuerdo a ambas evaluaciones el intercambiador de viento con el peor desempeño es el del caso *B0*, se observa que al no tener división interna, el flujo que entra en la abertura orientada al barlovento sale, sin entrar a la habitación, por la abertura orientada al sotavento lo cual entorpece el desempeño del intercambiador ya que este flujo reduce el área de abertura del intercambiador disponible para extraer el flujo que entró por la ventana. De ahí que el caso *C180* que sólo tiene la abertura orientada al sotavento tenga un mejor desempeño que éste.

Tabla 5.1: Tabla comparativa del desempeño de los diferentes intercambiadores de viento, ordenados de mejor a peor desempeño de acuerdo a los dos parametros de evaluación. Se agrega una columna con los cambios de aire por hora que se generan en cada caso de acuerdo al flujo de entrada total calculado.

Caso	Vectores con magnitud $\geq M_r$ con altura $\leq 2.20 m$ [%]	Caso	Flujo de entrada total F_{et} [m^3/s]	Cambios de aire por hora [$\times hora$]
B90	48.5	B90	3.15×10^{-5}	73.0
C90	43.0	A0	2.07×10^{-5}	48.0
E90	43.0	E90	2.01×10^{-5}	46.4
A0	39.4	C0	2.00×10^{-5}	46.3
C180	22.4	C180	1.98×10^{-5}	45.8
C0	21.2	D0	1.89×10^{-5}	43.7
F90	21.2	F90	1.86×10^{-5}	43.0
D0	11.5	C90	1.82×10^{-5}	42.2
E0	4.2	E0	1.42×10^{-5}	32.9
F0	0.0	F0	1.07×10^{-5}	24.8
B0	0.0	B0	0.71×10^{-5}	16.5
LB	0.0	LB	0.63×10^{-5}	14.6

Se encontró que el desempeño de un intercambiador de viento, en estas condiciones, depende principalmente de la orientación de las aberturas de éste con respecto al viento.

En los casos de estudio se mantuvo fija el área de abertura de la ventana

y se varió el área total de abertura(s) del intercambiador de viento, se observa que el área de abertura del intercambiador que realmente impacta en la mejora del desempeño de éste es aquella área que está orientada adecuadamente, para este caso cualquier abertura no orientada al barlovento. El área de estas aberturas en conjunto con el área del ducto son importantes pues determinan la capacidad para extraer o introducir el flujo de ventilación.

Si el intercambiador de viento tiene alguna división al interior y es perpendicular al flujo, ésta ayuda a conducir el aire al interior de la habitación, sin embargo se comprobó que esta división entorpece el flujo ya que en los casos *B90* y *E90*, que son similares, el caso que tiene un mejor desempeño es el que no tiene la división (*B90*).

Por todo lo anterior se concluye que para el caso de una habitación con una ventana, donde el viento tiene principalmente dirección hacia la ventana, es decir la ventana está al barlovento, de los 6 tipos de intercambiadores de viento evaluados con los parámetros mencionados, el intercambiador que tiene el mejor desempeño es el que no tiene división al interior del ducto y tiene dos aberturas opuestas (tipo *B*) con un área de 6.76 cm^2 cada una, que en total (13.52 cm^2) corresponden a la mitad del área de la ventana (27.04 cm^2). Estas aberturas son paralelas al flujo principal (caso *B90*). Se observó que este caso es el segundo con menor fluctuación temporal, lo cual agrega confianza sobre los resultados.

Recomendaciones sobre intercambiadores de viento

Para mejorar la ventilación natural se recomienda el uso de intercambiadores de viento en el techo de cualquier habitación con una ventana orientada al barlovento. Para lugares donde el viento tiene principalmente una dirección se recomienda un intercambiador de viento de sección transversal cuadrada sin divisiones al interior del ducto y con dos aberturas opuestas y orientadas perpendicularmente, es decir, paralelas al flujo principal (tipo *B*).

En el caso que el viento no tenga una dirección principal se recomienda utilizar un intercambiador de viento de sección transversal cuadrada sin divisiones al interior del ducto y cuatro aberturas, una en cada cara (tipo *A*), puesto que es el que tiene el segundo mejor desempeño, bajo estas condiciones de viento resulta ser el más adecuado.

Se recomienda orientar adecuadamente las aberturas del intercambiador conforme al flujo del viento y evitar el uso de divisiones al interior del intercambiador de viento.

Recomendación para futuros estudios

Para futuros estudios y complementar la investigación realizada en esta tesis se sugiere realizar experimentos variando la orientación de la ventana de la habitación con respecto al flujo del viento para ampliar el conocimiento y entendimiento del fenómeno de la ventilación natural a través de intercambiadores de viento.

En esta investigación se encontró que el flujo no es bidimensional y como se realizaron mediciones únicamente en el plano central y tangente a la dirección del viento, se desconoce el flujo tridimensional. Se recomienda desarrollar alguna metodología, experimental o numérica, para conocer el campo de velocidades en tres dimensiones en toda la habitación. Se recomienda también desarrollar alguna metodología para conocer el coeficiente de descarga de las aberturas, tanto de la habitación como del intercambiador de viento. Esto último para realizar un modelado teórico que permita evaluar de otra forma el desempeño de los intercambiadores de viento.

El efecto de flotación térmica no fue considerado para esta investigación por lo que se sugiere que en futuros estudios se estudie el funcionamiento de intercambiadores de viento con alguna fuente de calor al interior de la habitación, esto para conocer en que forma esta fuente de calor afecta el desempeño del intercambiador de viento.

Otras posibilidades no exploradas en este trabajo son: variar la velocidad del viento, y el área de ducto del intercambiador de viento.

Apéndice A

Planos constructivos de maquetas

Bibliografía

- Aldawoud, A. y Clark, R. (2008), “Comparative analysis of energy performance between courtyard and atrium in buildings”, *Energy and Buildings* , Vol. 40, pp. 209–214.
- ASHRAE (2005), *Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Ata, R. y Cetin, N. S. (2011), “Analysis of height affect on average wind speed by ann”, *Mathematical and computational applications* , Vol. 16, pp. 556–564.
- Awbi, H. B. (1998), “Chapter 7 - ventilation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , Vol. 2, pp. 157–188.
- Axley, J. (2001), *Application of natural ventilation for US commercial buildings*, NIST, Washington, D.C, United States of America.
- Bahadori, M. M. (1978), “Passive cooling system in iranian architecture”, *Scientific American Journal* , Vol. 2, pp. 144–154. Referido por Saadatian (2012).
- Berkovic, S., Yezioro, A. y Bitan, A. (2012), “Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate”, *Solar Energy* , Vol. 86, pp. 1173–1186.
- Bouchahm, Y., Bourbia, F. y Belhamri, A. (2010), “Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate”, *Renewable Energy* , Vol. 36, pp. 898–906. Referido por Saadatian (2012).

- Chen, Q. (2009), “Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications”, *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 848–858.
- Chun, C., Kwok, A. y Tamura, A. (2004), “Thermal comfort in transitional spaces-basic concepts: Literature review and trial measurement”, *Building and Environment*, Vol. 39, pp. 1187–1192.
- Defraeye, T., Blocken, B. y Carmeliet, J. (2011), “Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and cfd modelling”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 512–522.
- DRAE (2001), *Diccionario de la lengua española*, 22 edn, Real Academia Española, Madrid, España. www.rae.es.
- Elmualim, A. A. (2006), “Effect of damper and heat source on wind catcher natural ventilation performance”, *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 939–948.
- Elmualim, A. A. y Awbi, H. B. (2002), “Wind tunnel and cfd investigation of the performance of wind catcher ventilation systems”, *Journal of ventilation*, Vol. 1, pp. 53–64. Referido por Montazeri (2008).
- Emmerich, S. J., Dols, W. S. y Axley, J. W. (2001), “Natural ventilation review and plan for design and analysis tools report”, *National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U.S. Department of Commerce*. Referido por Khanal (2011).
- Etheridge, D. (2012), *Natural ventilation of buildings –Theory, measurement and desing*, WILEY, United Kingdom.
- Gan, G. (1998), “A parametric study of trombe walls for passive cooling of buildings”, *Energy and Buildings*, Vol. 27, pp. 37–43.
- Ghiaus, C. y Roulet, C. A. (2005), “Strategies for natural ventilation”, *In Natural ventilation in the urban environment. Ed. C. Ghiaus and F. Allard. Earthscan, London*, pp. 136–157.
- Givoni, B. (1976), *Man, climate and architecture*, APPLIED SCIENCE, Great Britain.

- Givoni, B. (1994), *Passive and low energy cooling of buildings*, VAN NOSTRAND REINHOLD, United States of America.
- Guido, P. (2007), Estudio experimental del transporte de partículas sólidas en flujo turbulento, PhD thesis, Centro de Investigación en Energía, UNAM.
- Hughes, B. R. y Ghani, A. (2010), “A numerical investigation into the effect of windvent louvre external angle on passive stack ventilation performance”, *Building and Environment*, Vol. 45, p. 102.
- Khan, N., Su, Y. y Riffat, S. B. (2008), “A review on wind driven ventilation techniques”, *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 1586–1604.
- Khanal, R. y Lei, C. (2011), “Solar chimney-a passive strategy for natural ventilation”, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1811–1819.
- Kobayashi, T., Yamanaka, T., Kotani, H., Sagara, K., Maruhashi, Y. y Tanabe, S. (2010), “Ventilation performance of monitor roof provided for a pitched-roof detached house”, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 75, pp. 595–601.
- LaVision, ed. (2006), *Manual for Davis 7.2. Flow Master Getting Started*, LaVision GmbH, Germany.
- Li, L. y Mak, C. M. (2007), “The assessment of the performance of a windcatcher system using computation fluid dynamics”, *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 1135–1141.
- Linden, P. (1999), “The fluid mechanics of natural ventilation”, *Annual Review on Fluid Mechanics*, Vol. 31, pp. 201–238.
- Linden, P., Lane-Serff, G. y Smeed, D. (1990), “Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 212, pp. 309–336.
- McQuiston, F. C., Parker, J. D. y Spitler, J. D. (2005), *Heating, ventilating and air conditioning: analysis and design*, JOHN WILEY AND SONS.
- Montazeri, H. (2011), “Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers”, *Building and Environment*, Vol. 46, pp. 370–378.

- Montazeri, H. y Azizian, R. (2008), “Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher”, *Building and environment*, Vol. 43, pp. 2193–2202.
- Montazeri, H., Montazeri, F., Azizian, R. y Mostafavi, S. (2010), “Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling”, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 1424–1435.
- Olgay, V. (1998), *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*, GUSTAVO GILI.
- Raffel, M., Willert, C. y Kompenhans, J. (1998), *Particle image velocimetry. A practical guide*, SPRINGER, Germany.
- Rodriguez, M., Figueroa, A., Fuentes, V., Castorena, G., Huerta, V., García, J. R., Rodríguez, F. y Guerrero, L. (2011), *Introducción a la Arquitectura Bioclimática*, LIMUSA: Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Roulet, C. A. (2005), “The role of ventilation”, *In Natural ventilation in the urban environment. Ed. C. Ghiaus and F. Allard. Earthscan, London*, pp. 20–35.
- Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K. y Sulaiman, M. Y. (2012), “Review of windcatcher technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 1477–1495.
- Santamouris, M. (2005), “Energy in the urban environment: the role of natural ventilation”, *In Natural ventilation in the urban environment. Ed. C. Ghiaus and F. Allard. EARTHSCAN, London*, p. 26.
- Szokolay, S. V. (2008), *Introduction to Architectural Science: The basis of sustainable design*, ARCHITECTURAL PRESS.
- Taleghani, M., Tenpierik, M. y van den Dobbelsteen, A. (2012), “Environmental impact of courtyards—a review and comparison of residential courtyard buildings in different climates”, *Journal of Green Building*, Vol. 7, pp. 113–136.
- Talib, K. (1984), *Shelter in Saudi Arabia*, ST. MARTIN’S PRESS.

Uehara, K., Wakamatsu, S. y Ooka, R. (2003), “Studies on the critical reynolds number indices for wind-tunnel experiments on flow within urban areas.”, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 107, pp. 353–370.

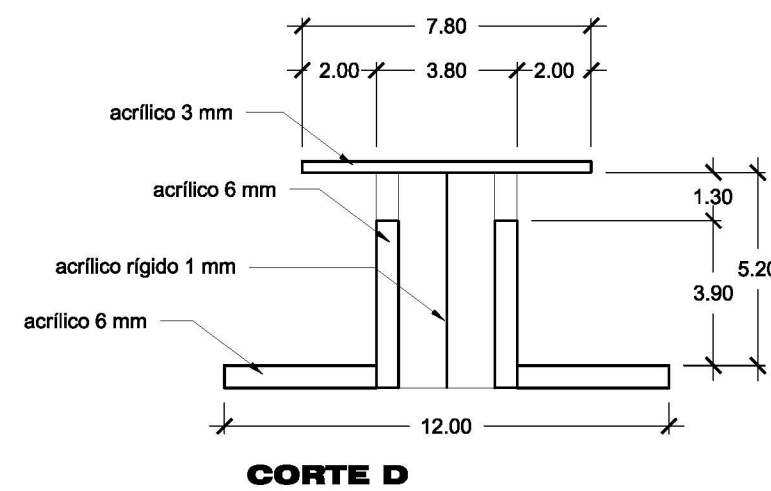
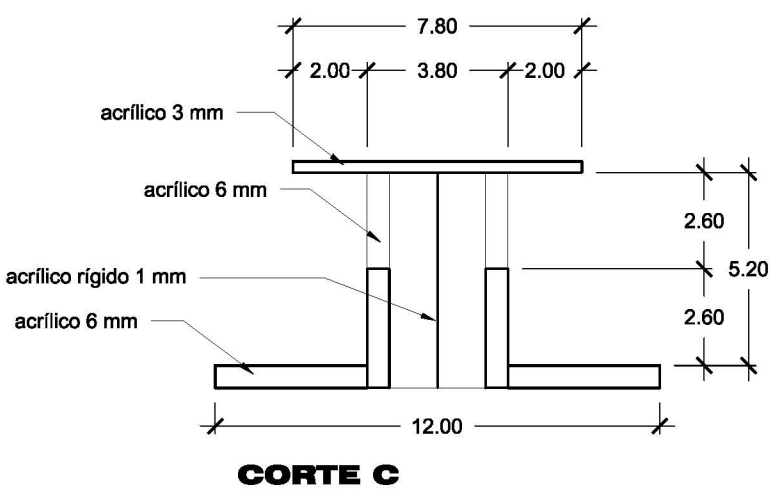
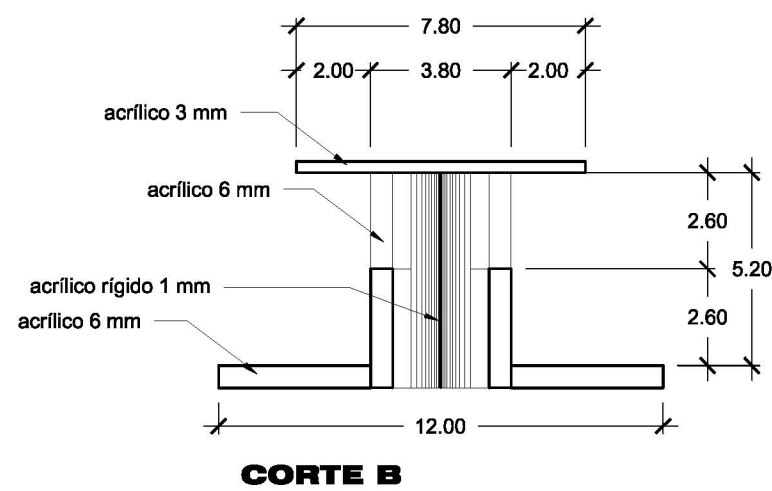
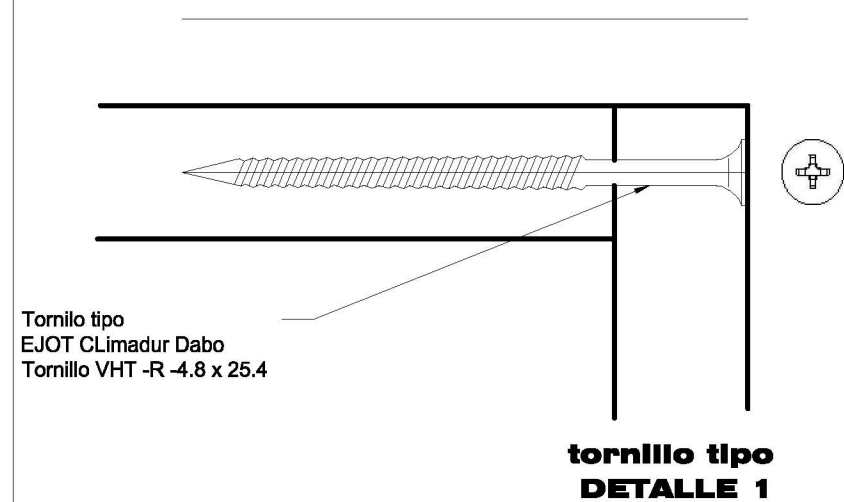
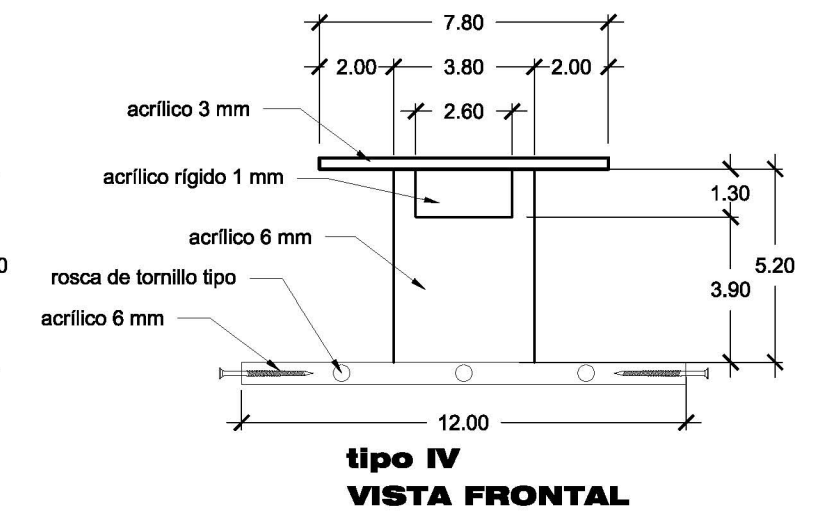
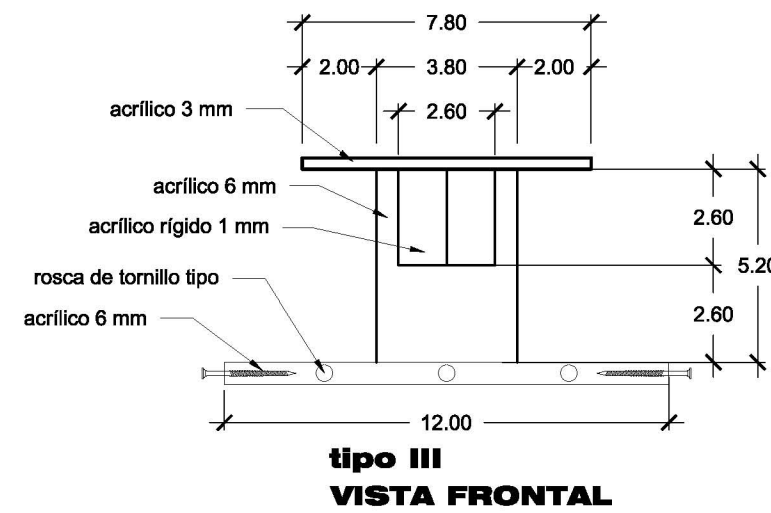
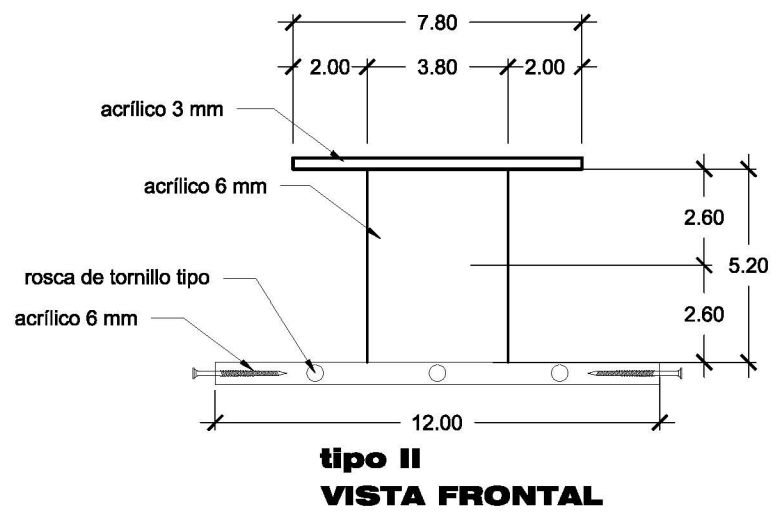
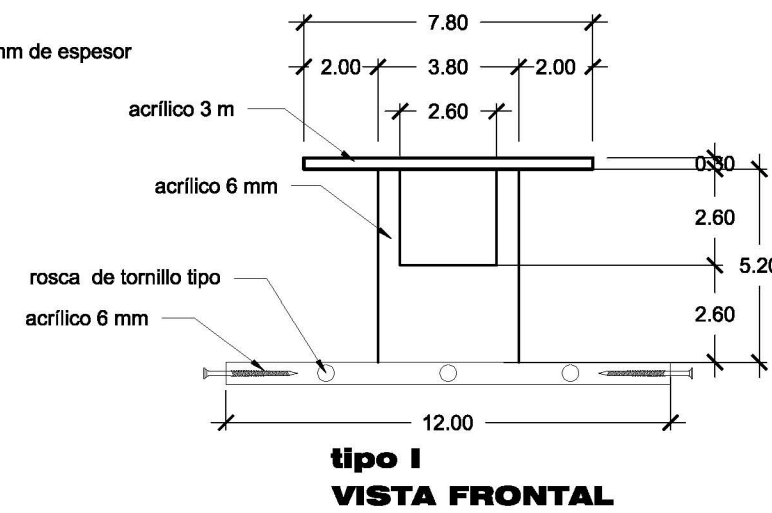
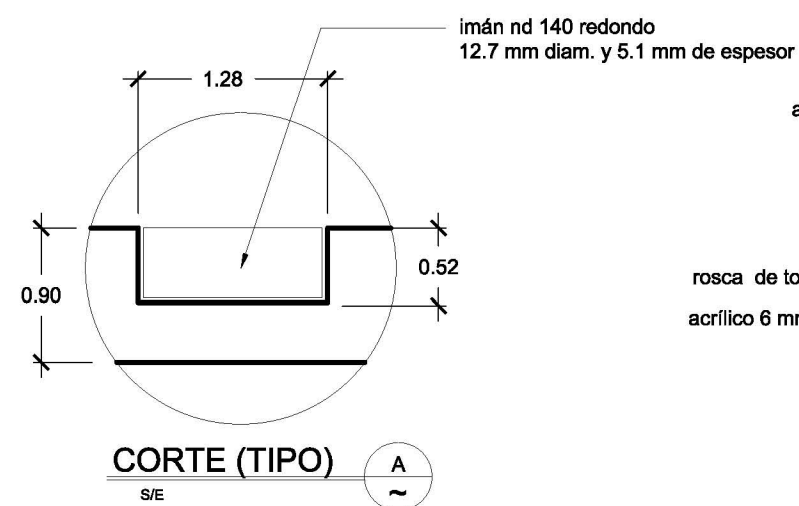
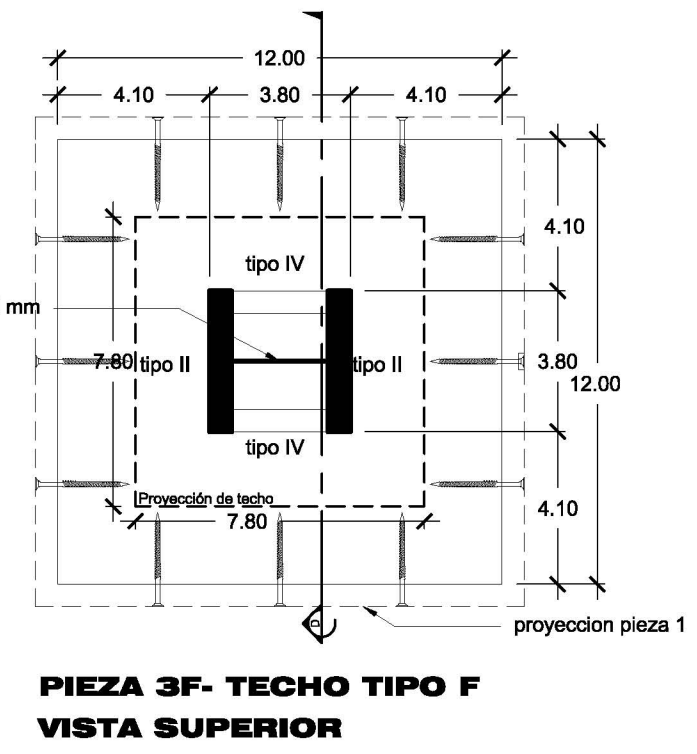
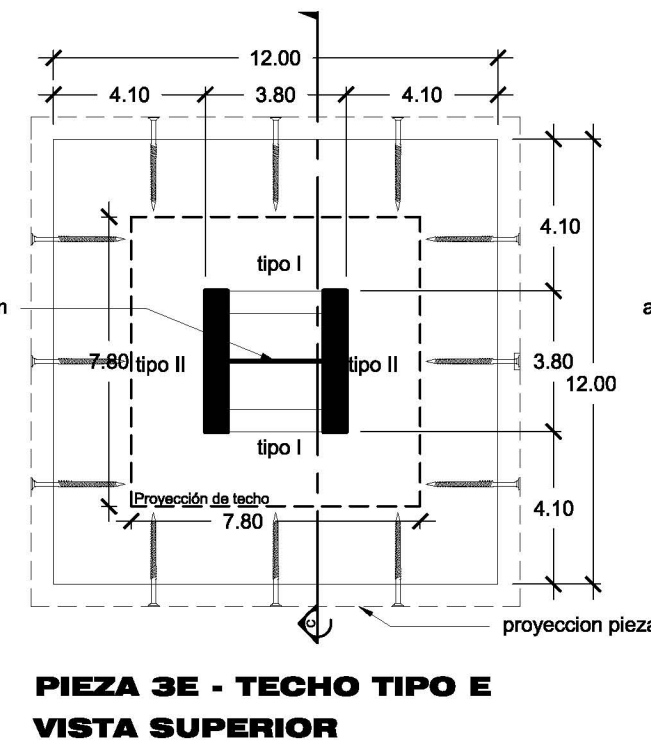
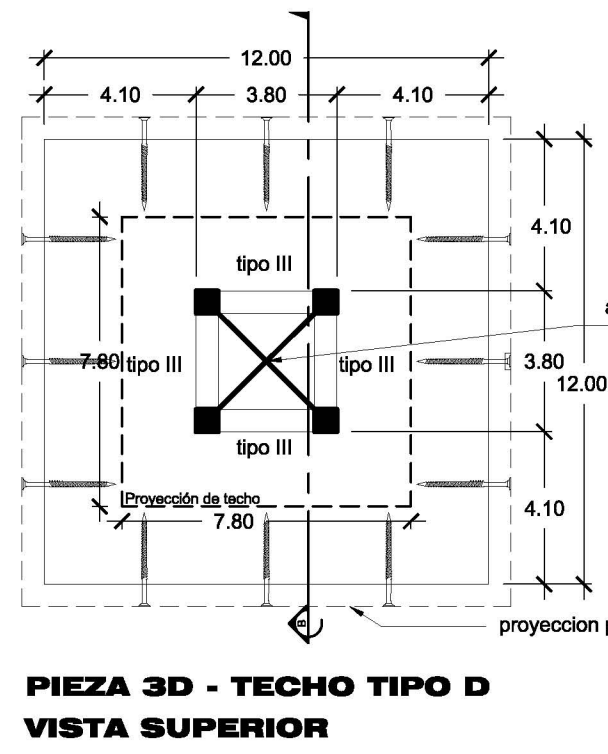
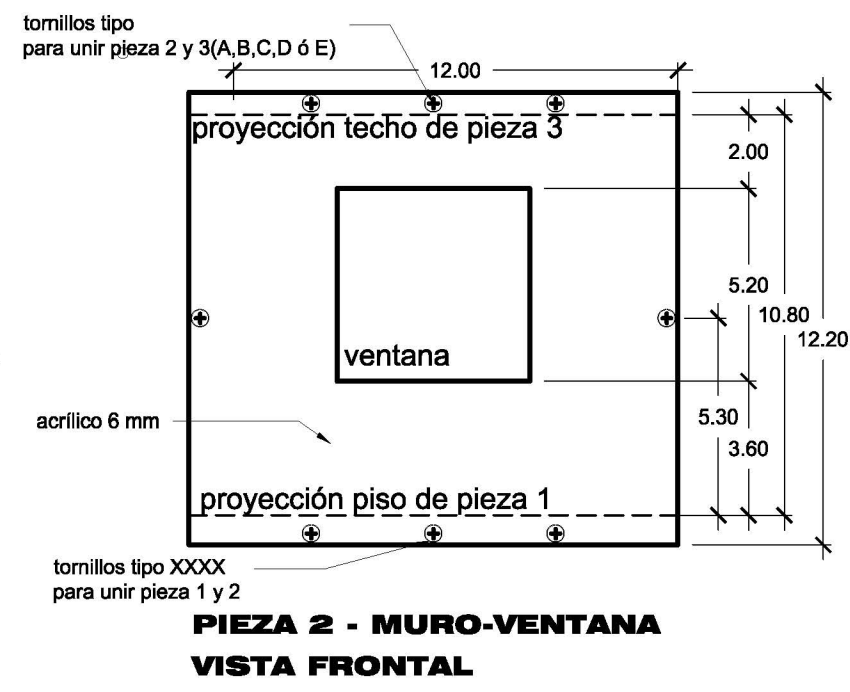
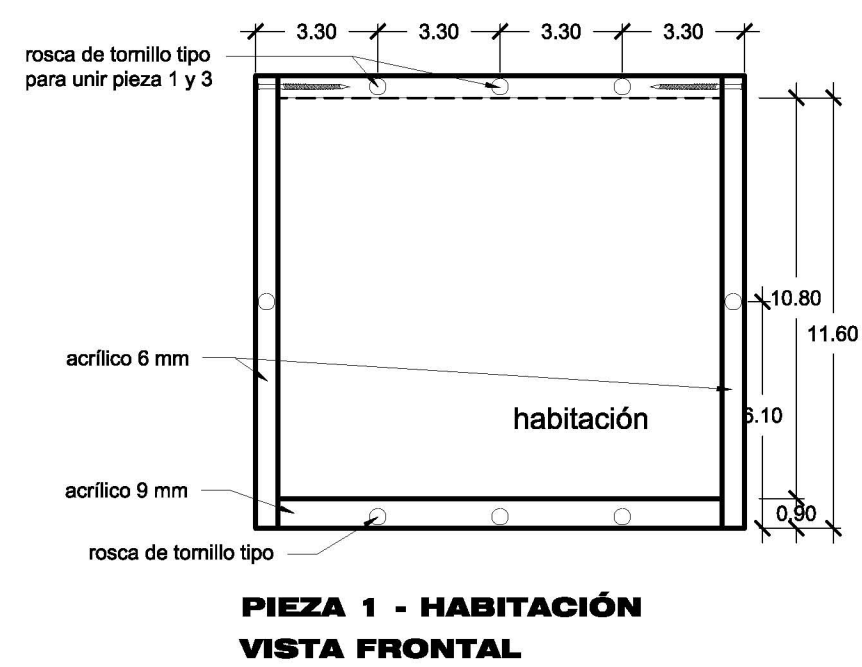
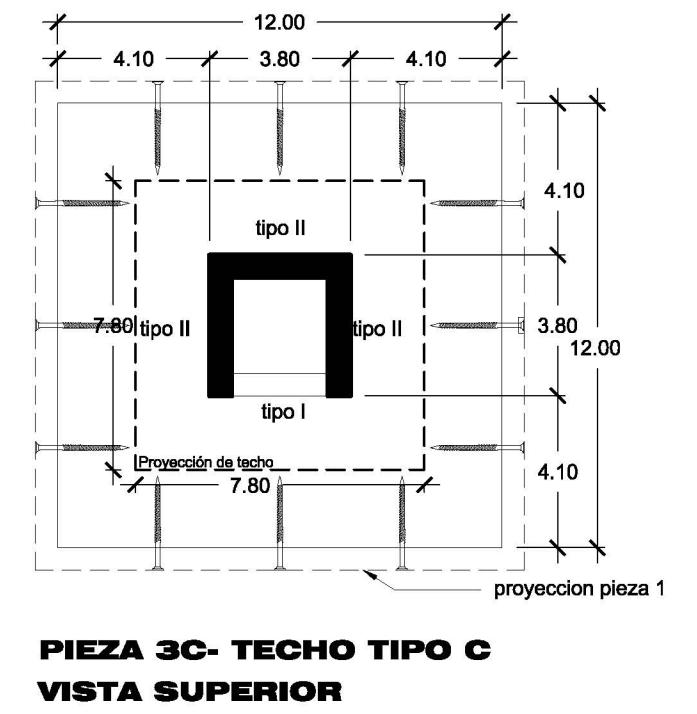
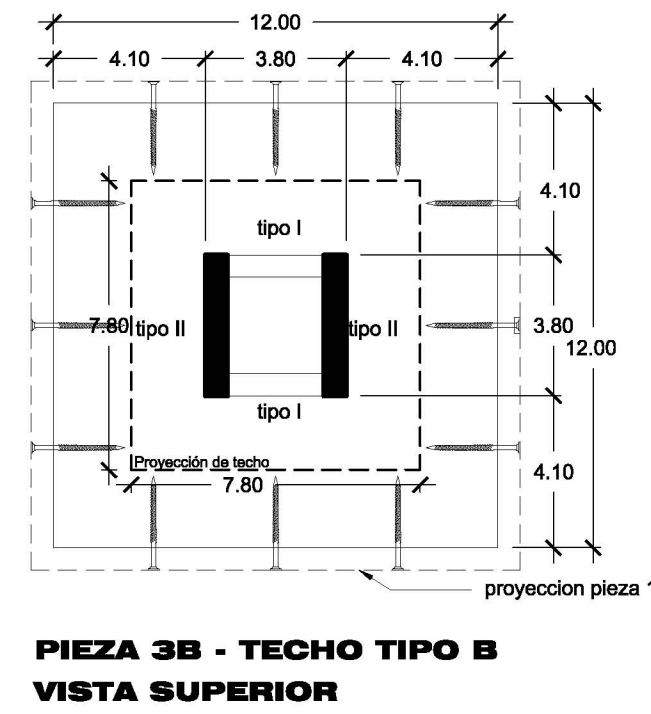
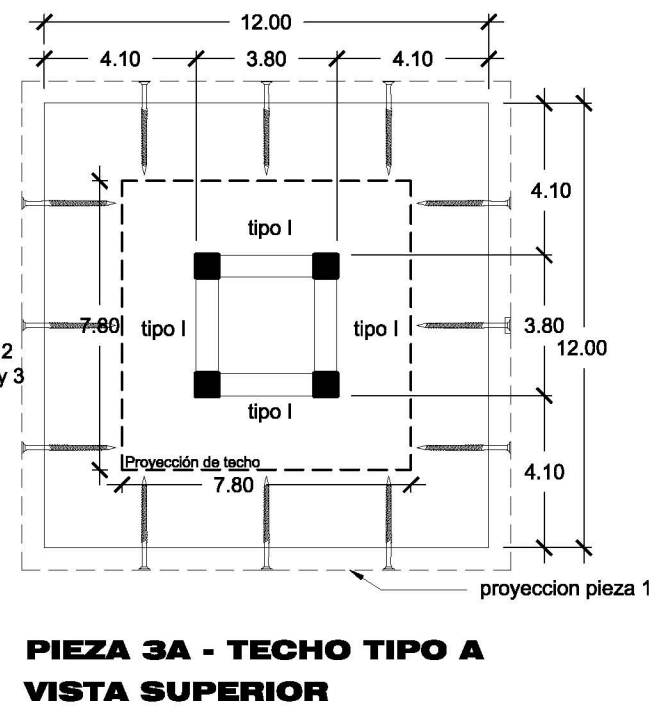
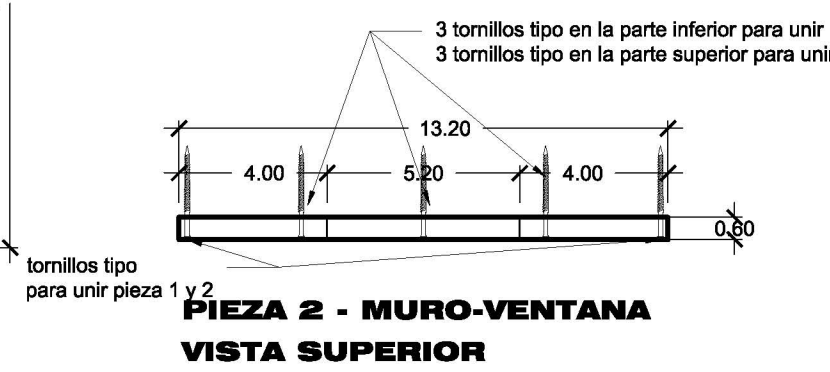
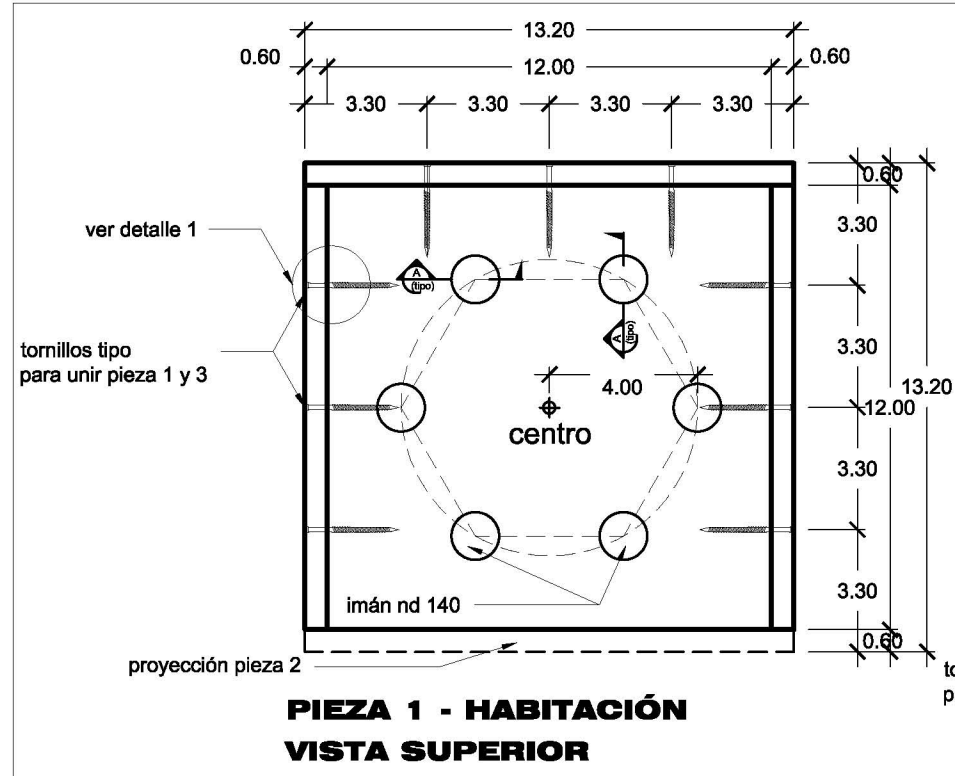
UNAD, C. (2013), ‘Lección 12. ley exponencial de velocidad’,
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/leccin_12_ley_exponencial_de_velocidad.l

Van Hooff, T., Blocken, B., Aanen, A. 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*, Vol. 46, pp. 1797 – 1807.

Vélez, R. (1992), *La ecología en el diseño arquitectónico*, TRILLAS, México.

Wang, Y., Yoshino, Y., Kumagai, K. y Takahashi, M. (2010), “A study on actual conditions of thermal environment and indoor air quality in a japanese traditional house corresponding to sericulture”, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 9, pp. 509–514.

White, F. M. (1979), *Mecánica de Fluidos*, MCGRAW-HILL, México.



simbología

- ⊕ tornillo tipo
- rosca de tornillo tipo

PLANOS CONSTRUCTIVOS DE MAQUETAS PARA DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPTADORES DE VIENTO

PRESENTA:
MIRIAM VERONICA CRUZ SALAS

22-AGOSTO-2012

ACOTACIÓN EN CM