



XL Semana Nacional de
Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"



XL SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

ESTUDIO DE EFECTOS DE BLOQUEO EN UN CANAL DE AGUA ABIERTO PARA ESTUDIOS DE VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICACIONES

Sonny F. Díaz^{a,b}, J. Antonio Castillo^a y Guadalupe Huelsz^a

- a) Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México A. P. 34, 62580 Temixco, Mor., México.
Tel/Fax 55+56-22-97-41, sfdc@ier.unam.mx, jacat@ier.unam.mx y ghl@ier.unam.mx
b) Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, A.P. 50, Mérida, Yuc., México.
Tel/Fax 999+ 930-05-50

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio numérico de los efectos de bloqueo en un canal de agua abierto. El modelo numérico fue validado con experimentos realizados en un canal abierto de agua usando una maqueta a escala de una habitación con una ventana y un intercambiador de viento en el techo, reportado previamente. En el estudio numérico se utilizaron dos modelos de la habitación a escala, se usaron las condiciones experimentales en el canal de agua, condiciones numéricas recomendadas con un dominio a una distancia de las paredes laterales 5 veces la altura de la habitación (5h) y un dominio similar con la distancia 10h. Con esto se varía la razón de bloqueo entre 0.8 y 13.8%. Los resultados de velocidad normalizada y flujo volumétrico normalizado a través de la ventana obtenidos en esta investigación indican que podrían existir efectos de bloqueo que son dependientes de otros parámetros y no solo de la razón de bloqueo como se ha reportado en la literatura para cuerpos sólidos sin rotación.

ABSTRACT

This paper presents a numerical study of the blocking effects in an open water channel. The numerical model was validated with experiments in an open water channel using a scale model of a room with a window and a windexchanger on the roof, previously reported. In the numerical study two models of the room scale were used, the experimental conditions used in the water channel, numerical conditions with the recommended domain, having a distance from the side walls with 5 times the height of the room (5h) and a similar domain with distance 10h. With these conditions, the blockage ratio varies reason between 0.8 and 13.8%. The results of the normalized speed and normalized volumetric flow through the window obtained in this investigation indicate that there might be blocking effects that are dependent on other parameters and not only on the blockage ration as reported in the literature for solid bodies without rotation.

Palabras claves: Efectos de bloqueo; Razón de bloqueo; Canal de agua; Ventilación Natural; Intercambiadores de viento; SPIV; CFD.

INTRODUCCIÓN

La ventilación natural se produce por la diferencia de presiones entre las entradas y salidas de aire de una edificación. Estas diferencias pueden generarse por dos mecanismos: por la fuerza del viento, en otras palabras por efecto del flujo del viento, o por diferencia de temperaturas, es decir por efecto térmico (Ghiabaklou, 2010). La ventilación natural por efecto del flujo del viento, estudiada en este trabajo, ocurre cuando el viento incide en una de las caras de la edificación, llamada barlovento, produciendo una presión positiva relativa con respecto a la pared en dirección opuesta, llamada sotavento, provocando que el aire dentro de la edificación fluya (Ghiabaklou, 2010). Experimentalmente se utilizan modelos a escala reducida de edificaciones en zonas de prueba de túneles de viento o canales de agua capaces de reproducir (a pequeña escala) la capa límite atmosférica (CLA). La CLA se define como la zona de influencia de la superficie terrestre sobre la velocidad del viento (Etheridge, 2012).

Los efectos de bloqueo se definen como el incremento de velocidad alrededor de cuerpos sólidos en una zona confinada y se dividen en bloqueo por sólidos (cuerpos rígidos sin rotación) y bloqueo por estelas (rotación de cuerpos rígidos) (Ross y Altman, 2011). En el caso de estudios de ventilación natural por viento en edificios (cuerpos rígidos sin rotación), el efecto de bloqueo por estelas no existe. Los efectos de bloqueo pueden tener un impacto importante en los resultados de estudios experimentales de ventilación natural realizados en túneles de viento o canales de agua; debido a que se puede estimar la magnitud de la velocidad y otros parámetros que dependen de esta. La razón de bloqueo (BR, por sus siglas en inglés) es el parámetro más utilizado en el estudio de los efectos de bloqueo, esta se define como la razón entre las áreas normales al flujo del modelo y de la zona de prueba. En experimentos en túnel de viento, algunos

autores recomiendan un valor máximo de BR=10% para que los efectos de bloqueo sean despreciables (Biswas et al., 2007; Roy y Saha, 2014; Chio y Kwon, 1998), mientras que autores consideran este valor máximo como 5% (Modi y Fernando, 1989; Ross y Altman, 2011; Montazeri y Azizian, 2008). En experimentos en canales de agua, algunos autores recomiendan un valor máximo de BR=10% (Kolekar y Banerjee, 2015; McTavish et al., 2014).

En estudios de efectos de bloqueo para prismas y edificaciones (Choi y Kwon, 1998; Chakrabarty y Brahma, 2007; Tang y Wang, 2013) no se presenta una metodología o correlaciones de corrección para los resultados experimentales. En el estudio de Tang y Wang (2013), el único encontrado sobre efectos de bloqueo en edificaciones y realizado en un túnel de viento, los modelos, aunque tienen una BR<10%, presentan efectos de bloqueo en sus resultados, esto podría deberse a que no se tengan condiciones de similitud dinámica en los experimentos, los autores no especifican este punto. En el presente estudio se analiza numéricamente el efecto de bloqueo variando la razón de bloqueo en una zona de prueba de un canal abierto de agua (CAA), mediante el uso de un modelo numérico validado con resultados experimentales de una habitación con una ventana y un intercambiador de viento (IDV) en el techo (Cruz-Salas et al., 2014; Castillo et al., 2014).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El arreglo experimental se compone de un CAA, los modelos a escala de la habitación y el sistema de medición de velocimetría por imagen de partículas estereoscópico (SPIV, por sus siglas en inglés). El CAA se encuentra en el Laboratorio de Termociencias del Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Sus dimensiones son 6.00 m de largo, 0.50 m de altura y 0.315 m de ancho. La zona de prueba tiene un largo de 1.00 m, empezando a los 4.00 m después de la entrada de agua. El CAA tiene un sistema de tuberías para recircular el agua impulsada por una bomba de 4 HP y un depósito con capacidad de 1800 l. La entrada del canal es una caja de sedimentación útil para reducir la turbulencia vertical y transversal al flujo y homogeneizar la velocidad. Una rampa curvada se coloca al final del canal para mantener una profundidad de agua constante de 0.42 m y reducir la influencia en la zona de prueba. Se utilizaron dos modelos de una habitación con ventana y un IDV instalado en el techo. La configuración del IDV se compone de dos aberturas cuadradas perpendiculares a la dirección del viento, sin divisiones internas, modelo B0 en los estudios de Cruz-Salas et al. (2014) y Castillo et al. (2015). El primero con una escala de 1/25 (modelo B25) con BR=13.8% y el segundo de 1/50 (modelo B50) con BR=3.5%. Estos modelos están contruidos de acrílico transparente y representan a escala real una habitación con área interna de 3.00 m × 3.00 m y una altura interna de 2.70 m, teniendo una ventana cuadrada de 1.30 m por lado, centrada en el eje vertical y a una altura de 0.90 m desde la base en una de las caras. El IDV en escala real tiene una altura de 1.40 m medido desde el techo y tiene una sección transversal cuadrada de 0.65 m por lado. El sistema SPIV fue utilizado para medir las tres componentes de velocidad en el plano central del flujo en el modelo a escala de la habitación. El sistema está compuesto por una fuente de luz laser de doble pulso tipo Nd-YAG con óptica integrada para la formación del plano de luz en la zona de prueba, dos cámaras digitales de alta definición Nikon AF NIKKOR 50mm 1:1.4 D y el controlador electrónico de alta precisión LaVision VC-ImagePro 2M. Se tomaron un total de 90 campos de velocidad para el modelo B25 y 100 campos de velocidad para el modelo B50, todos con un intervalo de 0.04 s entre pulsos. Se promediaron los campos de velocidad para obtener un campo promedio que represente las estructuras que se forman independientes del tiempo.

Las longitudes de los dos modelos están referidos al mismo edificio en escala real, por lo que tienen similitud geométrica. Dadas las condiciones de cada experimento, en los dos modelos (B25 y B50) se buscó el mismo número de Reynolds, definido como $Re=UL/\nu$, donde U es la velocidad característica del fluido a la longitud característica L , que en estos experimentos es la altura del edificio, y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Para el cálculo de Re correspondiente al modelo se midió la temperatura del agua en el CAA al momento de la toma y así calcular el valor de ν . Se obtuvo una diferencia del 0.34% entre los Re de los dos modelos, por lo que se considera que ambos experimentos tienen similitud dinámica.

Los perfiles de velocidad de flujo como función de la altura, $u(z)$, obtenidos en la zona de prueba del CAA corresponden en la escala real a una CLA de una zona urbana. Para la generación de los perfiles se utilizó una serie de obstáculos verticales colocados desde la entrada del CAA (Cruz-Salas et al., 2014). El ajuste para los datos experimentales está dado por la expresión (Tominaga et al., 2008),

$$u(z) = U_r \left(\frac{z}{h} \right)^\alpha, \quad (1)$$

donde z es la altura, U_r es la velocidad de referencia a la altura de referencia h y α es el exponente que puede variar entre 0.30 y 0.40 para un perfil de una zona urbana (Buñuelos-Ruedas et al., 2010). Se obtuvo una diferencia del 5.60% entre los exponentes α de ambos modelos (B25 y B50). Ambos perfiles de velocidad se muestran en la figura 1. El perfil de la intensidad de turbulencia como función de la altura, $I(z)$, está calculado de acuerdo a (Tominaga et al., 2008; Ramponi y Blocken, 2012),

$$I(z) = \frac{k(z)^{1/2}}{u(z)}, k(z) = \frac{1}{2} (\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)), \quad (2), (3)$$

donde k es la energía cinética turbulenta (TKE, por sus siglas en inglés) y σ_u , σ_v y σ_w son las desviaciones estándar de las componentes de la velocidad en las direcciones x , y y z , respectivamente. Los valores de los perfiles de velocidad y número de Reynolds se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de los perfiles de velocidad y número de Reynolds.

Modelo	B25	B50	DP[%]
U_r [m/s]	0.0360 ± 0.0050	0.0785 ± 0.0140	-
h [m]	0.1230	0.0615	-
α [-]	0.320 ± 0.003	0.340 ± 0.004	5.60
R^2 [-]	0.910	0.964	-
T [°C]	23.0 ± 0.05	20.0 ± 0.05	-
ν [m ² /s]	9.370 × 10 ⁻⁷	1.004 × 10 ⁻⁶	-
Re_b [-]	4.72 × 10 ³ ± 0.66 × 10 ³	4.71 × 10 ³ ± 0.86 × 10 ³	0.34

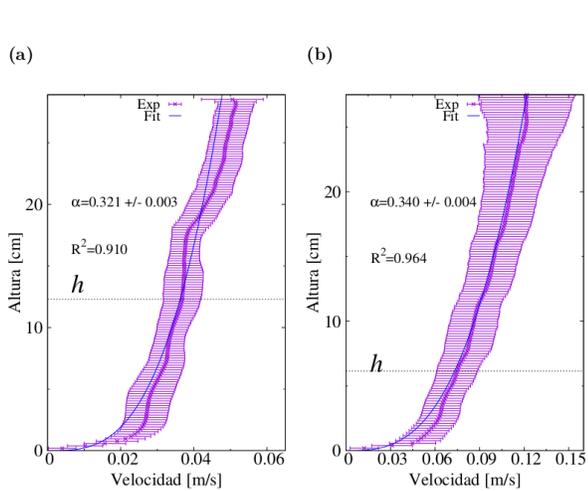


Figura 1. Perfil de velocidades como función de la altura (a) modelo B25 y (b) modelo B50. Donde α es el exponente del perfil y R^2 el coeficiente de correlación de ajuste.

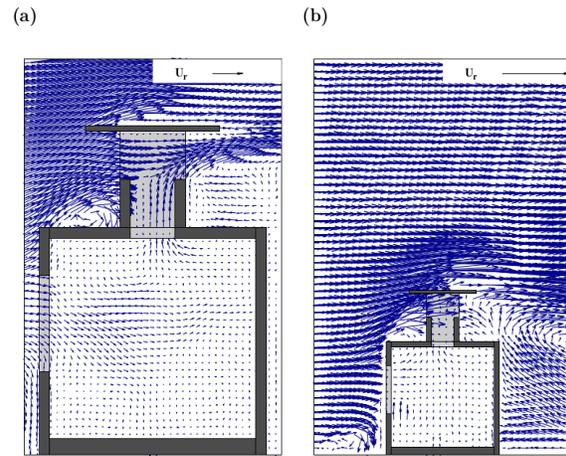


Figura 2. Campo vectorial promedio de velocidades (a) modelo B25 y (b) modelo B50.

Se utilizaron dos parámetros de comparación para el estudio experimental de los efectos de bloqueo en el CAA. El primero es la velocidad a lo largo de la línea horizontal L_h que a escala real se encuentra a 1.55 m (la mitad de la ventana) medido desde el piso. Todas las velocidades fueron normalizadas con la U_r respectiva al modelo. El segundo parámetro es el flujo volumétrico de entrada a través de la ventana Q^* , normalizado con el producto de U_r y el área de la ventana respectivos al modelo. En la figura 2a se muestra el campo de velocidad promedio para el modelo B25. Se observa que el flujo que entra por la ventana se dirige a la parte inferior de la habitación generando dos vórtices en las esquinas, siendo mayor el de la esquina derecha, también se observa que una parte del flujo que entra por la ventana llega hasta la pared contraria, asciende y cambia de dirección para finalmente salir por el IDV. Para el modelo B50, la figura 2b muestra el campo de velocidad promedio. En la parte central del modelo se observan velocidades ascendentes que inician desde zonas muy pegadas al piso. Estas velocidades ascendentes solo se pueden explicar si se considera que la medición no se hizo exactamente en el plano central del modelo y que se está observando el flujo ascendente proveniente de un vórtice que se formó al entrar el flujo por la ventana y chocar con el piso. Posiblemente el modelo B50, que es pequeño, fue desalineado por el flujo del canal en el momento de realizar los experimentos. Con los resultados experimentales no es posible estudiar los efectos de bloqueo, por lo que este estudio se realizó mediante simulaciones numéricas, que fueron validadas con los experimentos del modelo B25.

VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Las simulaciones numéricas con dinámica fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) fueron realizadas con el software comercial COMSOL 5.2, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones en conjunto con el modelo de turbulencia *shear-stress transport SST k- ω* . Los parámetros, condiciones de frontera y mallado se tomaron de un trabajo de validación numérica previo (Castillo et al. 2014). Se utilizó un solucionador de GMRES con MULTIGRID-SOR para los términos viscosos de las ecuaciones gobernantes (COMSOL, 2010). Se utilizó un criterio de convergencia de 10^{-4} para los residuales. En las simulaciones se utilizó agua como fluido de trabajo para conservar la similitud dinámica con los experimentos. Para la validación del modelo numérico se generó la capa límite atmosférica tridimensional para el modelo B25, mediante la construcción del dominio del canal con obstáculos sin la presencia de la habitación a escala, tomando como valores de entrada al dominio computacional los perfiles experimentales de $u(z)$, $TKE(z)$ y de razón de disipación específica (SDR, por sus siglas en inglés). Se compararon los valores en el plano central de los tres perfiles tridimensionales obtenidos numéricamente en la zona de prueba con el correspondiente perfil experimental. La diferencia entre los valores experimentales y numéricos fue menor al 5%. Una vez obtenida la CLA tridimensional, se generó un dominio computacional corto (DCC) que representa el ancho ($W=0.315$ m) y el alto ($H=0.420$ m) de la sección transversal del volumen de agua contenido en el CAA. El largo del DCC se obtuvo siguiendo las recomendaciones de Ramponi y Blocken (2012), esto es, se consideró la distancia de la entrada del dominio a la cara a barlovento de la habitación a escala como $3h$, en donde h es la altura externa de la habitación, y se consideró la distancia de la cara a sotavento de la habitación a la salida del dominio como $15h$. Por lo que el largo del canal del DCC es $3h + b + 15h$, b es el largo de la habitación a escala. En la figura 3 se muestran las dimensiones del DCC y la construcción del mallado base con 527,537 células.

En el DCC generado se tomó como condición de entrada los perfiles tridimensionales de capa límite atmosférica de u , TKE y SDR obtenidos. Se aplicaron las funciones de pared estándar a las caras inferior y laterales del dominio (COMSOL, 2010). A la cara de salida se asignó una presión igual a cero y en la cara superior se aplicó la condición de libre deslizamiento. En la figura 4 se muestra la comparación cualitativa entre los campos vectoriales de velocidad experimental y numérico en el plano central de la habitación. Se observa similitud en los resultados, el resultado numérico reproduce la estructura promedio del flujo. Se observa que una parte del flujo que entra por la ventana desciende hacia el piso de la habitación y asciende al llegar a la pared posterior hasta salir por el IDV. También se observa que otra parte del flujo entrante asciende directo al IDV. En los resultados numéricos no se definen los vórtices en la parte inferior de la habitación observados en el campo vectorial experimental. En la figura 5 se muestra la comparación de la velocidad a lo largo de la línea L_h entre los resultados experimentales y los obtenidos de la simulación. Se observa que los resultados numéricos y los experimentales son similares en la parte exterior a la habitación, cerca de la ventana los valores experimentales no son confiables por los

reflejos en la pared, en la parte interior los resultados numéricos son menores a los experimentales, por lo que el modelo numérico tiende a subestimar los valores de velocidad a lo largo de la habitación.

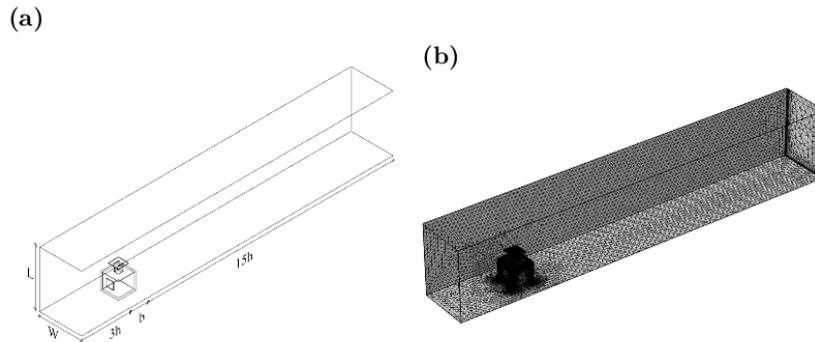


Figura 3. Dominio computacional del modelo B25: (a) vista en perspectiva del dominio; (b) vista en perspectiva del mallado en las caras baja, lateral y trasera (malla base con 527,537 células).

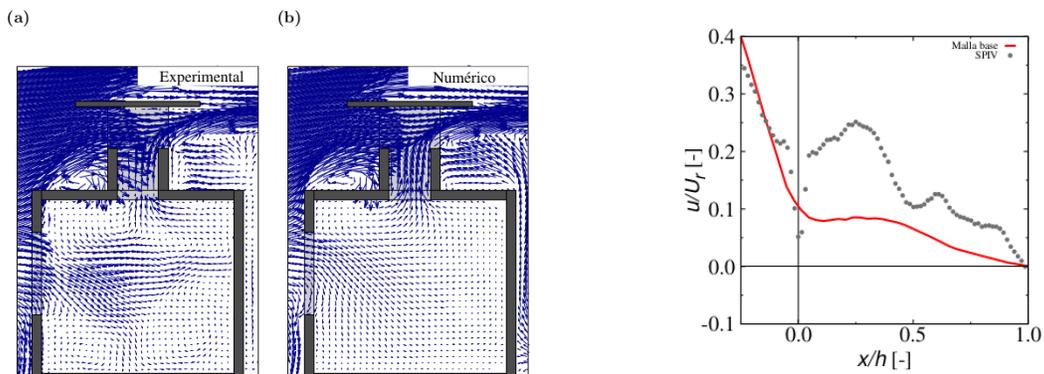


Figura 4. Campos vectoriales de velocidad en el plano central: (a) experimental y (b) numérico.

Figura 5. Comparación de resultados numéricos de la malla base con las mediciones experimentales, datos normalizados con U_r y a lo largo de L_h .

ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS EFECTOS DE BLOQUEO

Para este estudio se generaron DCC correspondientes a los experimentos de los modelos B25 y B50 (el del modelo B25 se usó para la validación). También se generaron DCC en los que se varió el ancho pero se mantuvieron la altura (L) y el largo ($3h + b + 15h$). El ancho del dominio está dado por $Fh + b + Fh$, donde F es el factor de confinamiento, h es la altura de la habitación y b es el ancho de la habitación. Se utilizó el valor de $F=5$, que corresponde a la recomendación de Ramponi y Blocken (2012) para obtener resultados libres de los efectos de bloqueo. Para confirmar si esta recomendación es aplicable en el fenómeno estudiado se realizaron las mismas simulaciones con $F=10$. Esquemas de los dominios computacionales usados se muestran en la figura 6. El modelo B25 con las condiciones experimentales (B25-E) tiene $BR=13.8\%$, con el factor $F=5$ (B25-5h) $BR=3.2\%$ y con $F=10$ (B25-10h) $BR=1.7\%$. El modelo B50 con las condiciones experimentales (B50-E) tiene $BR=3.5\%$, con $F=5$ (B50-5h) $BR=1.6\%$ y con $F=10$ (B50-10h) $BR=0.8\%$.

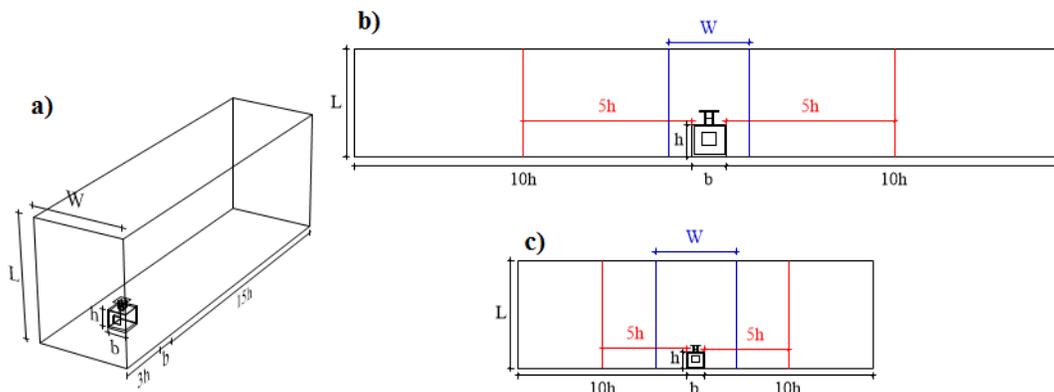


Figura 6. Dominios computacionales cortos generados para el estudio de los efectos de bloqueo. (a) vista en perspectiva del dominio B50-E; (b) corte transversal de los dominios B25 y (c) B50. En azul -E, en rojo -5h y en negro -10h.

Para el análisis de los efectos de bloqueo se realizó la comparación de la velocidad normalizada en la línea horizontal L_h en el plano central de cada uno de los modelos. En la figura 7a se muestra la comparación entre los valores de velocidad obtenidos para el modelo B25, la diferencia promedio entre los dominios B25-E y B25-5h es de 0.0341, entre B25-E y B25-10h es de 0.0300, mientras que la diferencia entre B25-5h y B25-10h es de 0.0040, lo que es un orden de magnitud menor. Para el modelo B50 se realizaron las mismas comparaciones. En la figura 7b se muestra la velocidad normalizada en la línea L_h , la diferencia entre B50-E y B50-5h es de 0.0092, entre B50-E y B50-10h es de 0.0104 y entre B50-5h y B50-10h la diferencia es de 0.0013. Se realizó la misma comparación para dos BR cercanos correspondientes a diferentes modelos, el dominio B25-5h con BR=3.2% y el dominio B50-E con BR=3.5%, presentan una diferencia promedio de 0.0137, la figura 8 muestra esta comparación. La diferencia es significativa comparada con la diferencia obtenida con B50-5h y B50-10h, señalando que BR podría no ser el único parámetro del que dependen los efectos de bloqueo. Para tener una estimación del error en la velocidad normalizada en L_h obtenida con los dominios E y 5h con respecto a la obtenida en el dominio 10h, se realizaron las gráficas presentadas en la figura 9. La pendiente de las líneas rectas que pasan por el origen indica el porcentaje de error. La recta con pendiente igual a uno representa 0% de error y conforme la pendiente aumenta o disminuye porcentualmente los valores de la pendiente, se van obteniendo las cotas del porcentaje de error. Se acotaron errores de 10%, 25%, 50% y 100%. En la figura 9a se muestran los valores para el modelo B25. Se observa que en general a medida que la velocidad disminuye el error aumenta sobrepasando el 100%, mientras que para los mayores valores de velocidad el error disminuye. La mayoría de las velocidades del dominio B25-E sobrepasan el 100%, mientras que las velocidades de B25-5h están más próximas a la recta del 0%. En la figura 9b se muestran los valores para el modelo B50. Se mantiene la tendencia de disminución de error conforme la velocidad aumenta. Los resultados de B50-5h se encuentran prácticamente sobre la recta del 0% de error, por lo que pueden considerarse libre de los efectos de bloqueo. La comparación entre ambas gráficas muestra que los dominios del modelo B25 tienen errores mayores a los del modelo B50. Para la obtención de resultados libres de bloqueo se realizó la comparación entre la velocidad normalizada medida en L_h para los dominios B25-10h y B50-10h, mostrada en la figura 10, las cuales presentan una diferencia promedio de 0.0044. Esta diferencia es mayor a la presentada entre B25-5h y B25-10h y B50-5h y B50-10h. De acuerdo con este parámetro solo se puede considerar B50-10h como libre de los efectos de bloqueo. Se realizó un estudio del flujo a través de la ventana para cada uno de los modelos. Se calculó el flujo volumétrico multiplicando el área de la ventana por el promedio en el área de la ventana de la velocidad normal a la ventana. Se reporta el flujo volumétrico normalizado (Q^*), se normaliza con el producto del área de la ventana por U_r . En la figura 11 se muestra Q^* en función de BR. Para el modelo B25, Q^* presenta dependencia con BR para los valores analizados, en cambio para el modelo B50, Q^* no presenta dependencia con BR para los valores analizados. Se observa que valores de BR cercanos correspondientes a diferentes modelos no tienen el mismo valor de Q^* , por ejemplo BR=3.2% obtenido con B25-5h presenta una diferencia del 11.7% con el resultado de BR=3.5% obtenido con B50-E. Esto indica que BR podría no ser el único parámetro del que dependen los efectos de bloqueo. El valor de Q^* libre de los efectos de bloqueo es de 0.0615. El máximo error en Q^* es de 20.4% para BR=13.8% obtenido con B25-E.

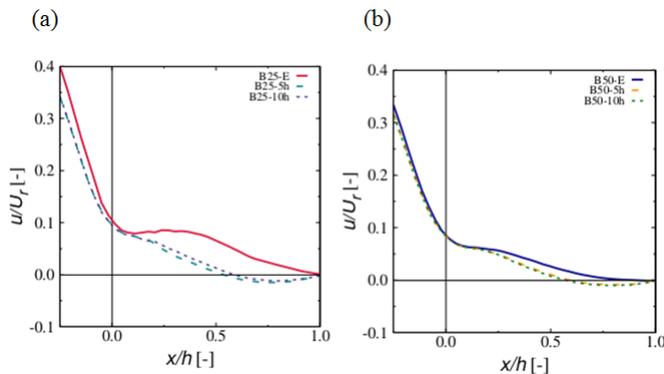


Figura 7. Comparación de velocidad normalizada medida en la línea de interés L_h para: (a) dominios del modelo B25; (b) dominios del modelo B50.

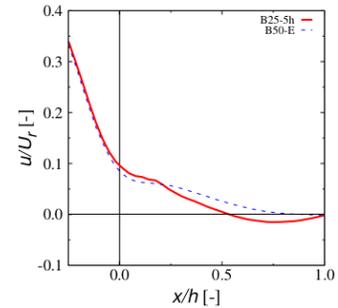


Figura 8. Comparación de velocidad normalizada medida en la línea de interés L_h para los dominios B25-5h (BR=3.2%) y B50-E (BR=3.5%).

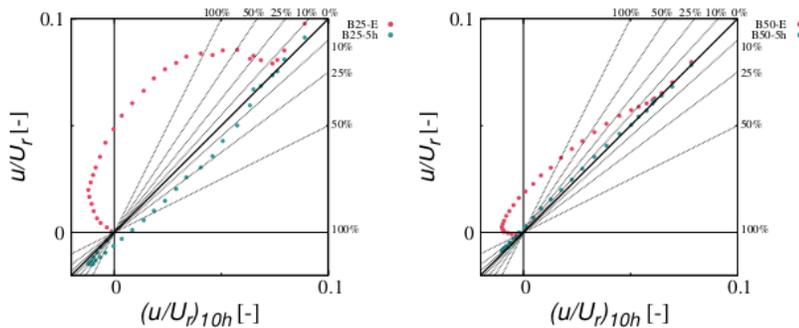


Figura 9. Error en la velocidad normalizada en L_h obtenida con los dominios -E y -5h con respecto a la obtenida en el dominio -10h: (a) modelo B25 y (b) modelo B50.

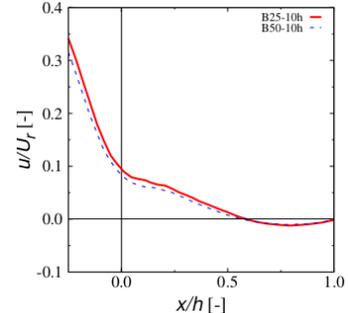


Figura 10. Comparación de velocidad normalizada medida en la línea de interés L_h para los dominios B25-10h y B50-10h.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el estudio de los efectos de bloqueo en un canal de agua abierto utilizado para investigar la ventilación natural por flujo de viento en una habitación a escala con una ventana a barlovento y un intercambiador de viento instalado en el techo. En el estudio se comparó la velocidad normalizada en una línea de interés y el flujo volumétrico normalizado de entrada a través de la ventana. Se utilizaron experimentos a escala de laboratorio y simulaciones numéricas utilizando dos modelos a escala, uno a 1/25 (B25) y uno a 1/50 (B50). De los resultados experimentales, el campo de velocidades medido en el modelo B50 no representa la dinámica del flujo esperado para un plano central, por lo que solo se utilizaron los resultados del modelo B25 para la validación de las simulaciones numéricas. El estudio de los efectos de bloqueo se realizó con las simulaciones numéricas modificando la distancia entre las caras laterales del dominio. La comparación de resultados numéricos de velocidad normalizada en una línea de interés entre dominios B25, B50 y B25-5h presentan errores mayores al 100% con respecto al correspondiente dominio 10h de cada modelo, solo el dominio B50-5h presenta un error menor al 10% en casi toda la línea de interés. La comparación entre los dominios 10h de los dos modelos presenta un error del 20.7%, por lo que solo se considera como resultados libres de bloqueo los obtenidos del dominio y B50-10h. De la comparación del flujo volumétrico normalizado de entrada a través de la ventana (Q^*), para los valores analizados de BR del modelo B25, Q^* presenta dependencia de BR, mientras que para el modelo B50 Q^* es independiente de BR. Los resultados de velocidad y flujo a través de la ventana obtenidos en esta investigación indican que podrían existir efectos de bloqueo que son dependientes de otros parámetros y no solo de la razón de bloqueo como se ha reportado en la literatura para cuerpos sólidos sin rotación. Se recomienda repetir el estudio numérico con un programa de simulación cuyos resultados se acerquen más a los resultados experimentales y determinar si esta dependencia se debe a un problema numérico o efectivamente hay otros parámetros que determinan la existencia de los efectos de bloqueo en cuerpos sólidos sin rotación a demás de la razón de bloqueo.

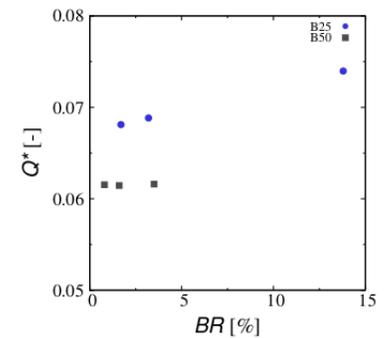


Figura 11. Comparación de flujo volumétrico de entrada a través de la ventana normalizado (Q^*) para los dominios de los modelos B25 y B50, como función de BR.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los proyectos IN114314 y IN103816 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM por la infraestructura experimental y numérica utilizada en esta investigación. S.F. Díaz agradece al proyecto IN103816 PAPIIT-UNAM por la beca escolar.

REFERENCIAS

- Biswas, A, Gupta, R y Sharma, K K: (2007) "Experimental investigation of overlap and blockage effects on three-bucket savonius rotors", *Wind Engineering*, **31**, pp363-368.
- Buñuelos-Ruedas, F, Angeles-Camacho, C, y Rios-Marcuello, S: (2010) "Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp202-213.
- Castillo, J A, Huelsz, G, and Cruz, M V: (2014). "Natural ventilation by windcatchers: CFD simulations and experiments", Hamburg, Germany. *CWE 2014, 6th International Symposium on Computational Wind Engineering*.
- Castillo, J A, Huelsz, G y Cruz-Salas, M: (2015) "Design guidelines for the use of windexchangers in a building with a window to windward or to leeward", *XXXIX SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR*, ID 4.
- Chakrabarty, D y Brahma, R: (2007) "Effect of wall proximity in fluid flow and heat transfer from a square prism placed inside a wind tunnel", *Thermal Science*, **11(4)**, pp56-78.
- Choi, C K y Liou, L R (1998) "Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body", *Wind and Structure*, **1** pp351-364.
- COMSOL: (2010) "COMSOL Multiphysics:user guide", COMSOL AB, U.S.
- Cruz-Salas, M V, Castillo, J A y Huelsz, G: (2014) "Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers", *Energy and Buildings*, **38**, pp939-948.
- Etheridge, D: (2012) "Natural Ventilation in Buildings – Theory, Measurement and Design", *John Wiley and Sons*, Chichester.
- Ghiabaklou, Z: (2010) "Natural Ventilation as a design strategy for energy saving", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **71**, pp315-320.
- Kolekar, N y Banerjee, A: (2015) "Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects", *Applied Energy*, **148**, pp121-133.
- McTavish, S, Feszty, D y Nitzsche, F: (2014) "An experimental and computational assessment of blockage effects on wind turbine wake development", *Wind Energy*, **17**, pp1515-1529.
- Modi, V J y Fernando, M S U K: (1989) "On the performance of the savonius wind turbine", *Journal of Solar Energy Engineering*, **111**, pp71-81.
- Montazeri, H y Azizian, R: (2008) "Experimental study on natural ventilation performance of one-side wind catcher", *Building and Environment*, **43(12)**, pp2193-2202.
- Ramponi, R y Blocken, B: (2012) "CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters", *Building and Environment*, **53**, pp34-48.
- Ross, I y Altman, A: (2011) "Wind tunnel blockage corrections: Review and application to savonius vertical-axis wind turbines", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **99**, pp523-538.
- Roy, S y Saha, U K: (2014) "An adapted blockage factor correlation approach in wind tunnel experiments of a savonius-style wind turbine", *Energy Conversion and Management*, **86**, pp418-427.
- Tang, H y Wang, L: (2013) "Investigation on wind tunnel blockage effects of high-rise building", *Applied Mechanics and Materials*, **477-478**, pp793-796.
- Tominaga, Y, Mochida, A, Yoshie, R, Kataoka, H, Nozu, T y Yoshikaw, M: (2008) "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**, pp1749-1761.