



Confort eólico en zonas urbanas. Edificio a ser construido en la ciudad de Montevideo, Uruguay

Wind comfort in urban areas. A building to be constructed in the city of Montevideo, Uruguay

Alejandro López Llanusa, Pablo País y José Cataldo Ottieri

RESUMEN: La calidad de los espacios urbanos ha adquirido una especial atención en los últimos años a través del reconocimiento de que las condiciones micro-climáticas de los emplazamientos modifican la vida de las ciudades económica y socialmente. Es por estas razones que se ha dedicado un esfuerzo particular al estudio de los niveles de confort eólico peatonal. Este estudio evaluó el clima de vientos alrededor de una nueva edificación a insertar en un entorno construido, caracterizado por edificios de mediana altura de la ciudad de Montevideo. La evaluación se realizó a través de un modelo a escala reducida de la edificación y el emplazamiento ensayado en un túnel de viento de capa límite. El estudio permitió identificar tres zonas donde aparecieron condiciones de riesgo y falta de confort eólico peatonal, y proponer posibles medidas de mitigación.

PALABRAS CLAVE: Confort eólico, estructuras altas y túnel de viento.

ABSTRACT: The quality of urban spaces has gained attention in recent years through the recognition that micro-climatic conditions of specific locations, modify the social and economic activities of cities. A particular effort has been devoted to the study of pedestrian wind comfort levels. This study evaluates wind climate around a new building to be inserted into a built environment characterized by mid-rise buildings in the city of Montevideo. The evaluation was made through a reduced-scale model of the building and the environment tested in a wind tunnel boundary layer. The study identified three unsafe areas and the lack of pedestrian wind comfort. Possible mitigation measures were proposed.

KEYWORDS: Wind comfort, high structures and wind tunnel.

Introducción

El análisis de confort eólico consiste en evaluar y determinar zonas o áreas donde la influencia de las formas y dimensiones de las estructuras producen aceleraciones del flujo de aire, generando campos de velocidades desfavorables en áreas de circulación peatonal y en zonas abiertas. Estas situaciones, muchas veces pueden comprometer la seguridad de peatones o el funcionamiento de elementos del entorno de la zona. Las características del campo de velocidades dependen del tipo de viento incidente en la zona y de la interacción con las estructuras ya existentes en el caso de la inserción de una nueva edificación. Las áreas no confortables y situaciones peligrosas para el tránsito peatonal a nivel del suelo, han podido ser confirmadas a través de mediciones a escala real y mediante ensayos a escala reducida en túneles de viento [1][2]. Estos estudios han mostrado que cuando se generan espacios entre edificaciones de cierta altura, se producen vientos importantes a nivel del suelo, debido a los gradientes horizontales de presión. Para prevenir estos problemas, algunos investigadores han definido criterios de aceptabilidad, para los niveles de velocidad permisibles en áreas públicas [1][2][3].

En este trabajo se realizó un análisis del régimen de vientos alrededor de un edificio a insertar en la ciudad de Montevideo con el objetivo de identificar condiciones de falta de confort y de riesgo para los peatones y proponer posibles medidas de mitigación.

Materiales y Métodos

El estudio se dividió en dos etapas. En una primera fase se realizó el levantamiento detallado del entorno construido donde se propone insertar la edificación y posteriormente, haciendo uso de las leyes de semejanza [4], se construyó un modelo físico a escala reducida de la edificación y el entorno; que fue ensayado con el equipamiento disponible en el túnel de viento de capa límite del laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay [5]. Este túnel posee una zona de trabajo de 17 m de longitud con una sección de 2,25 m de ancho por 1,80 m de alto. Cuenta con un ventilador axial con un rotor de 2,5 m de diámetro el cual proporciona un caudal de 121,5 m³/s y una velocidad de rotación de 750 rpm, lo cual le permite desarrollar una velocidad de trabajo regulable de hasta 30 m/s y tiene un difusor de 4,1 m a la salida para equilibrar las variaciones de presión del aire en el interior de la cámara.

El trabajo experimental se abordó en dos períodos: en el primero se realizó una visualización del flujo en la zona de emplazamiento del objeto de análisis, con el objetivo de caracterizar los patrones de comportamiento que pudieran dar lugar a situaciones de falta de confort y de riesgo asociadas al viento. Este comportamiento se caracterizó por contracciones del flujo, aparición de vórtices de gran escala y variaciones en la intensidad de turbulencia. En la segunda etapa se procedió a medir la velocidad para diferentes direcciones en diversos puntos del entorno del modelo construido, los cuales se seleccionaron partiendo de las visualizaciones y de la caracterización del flujo obtenida en la primera etapa. Sobre la base de las mediciones realizadas en el túnel, se obtuvo la velocidad del viento en los distintos puntos y con esta información, se infirieron los indicadores del clima de vientos, que resultaron significativos para definir el la existencia o no de confort peatonal.

[1] Marighetti JO, Bortoli MED, Wittwer AR. Análisis de técnicas de medición en estudios de confort en túnel de viento sobre estructuras de dimensiones y formas distintas con categoría de terreno diferentes. [CD-ROM]. San Juan (Argentina): Memorias de XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural; 2010.

[2] Anssen W, Blocken JB, Van Hooff T. Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. *Building and Environment*. 2013;59:547-62.

[3] Sparks P, Elzebeda J. A comparison of pedestrian comfort criteria applied to a city center. En: *Wind Engineering 1983 3C: Proceedings of the Sixth international Conference on Wind Engineering*. Gold Coast, Australia; Auckland, New Zealand, March 21-25; 2012. p. 123. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610583901836>.

[4] Pritchard PJ, Fox RW, McDonald A. *Introducción a Fluid Mechanics*. 8th ed. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons; 2011. ISBN 9780470547557. p.312-350.

[5] Cataldo J, Durañona V. Open boundary-layer wind tunnel built in Uruguay. In: *Proceedings of Transactions of the Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. Gramado, Brazil; 1998.

El nuevo edificio se emplazará en la ciudad de Montevideo en la zona de la Ciudad Vieja, en las proximidades del puerto. Esta zona se caracteriza por la ocurrencia de intensos vientos provenientes de la costa hacia el interior de la península, correspondiente a una dirección oeste. (Figura 1).



Figura 1: Imagen de la Ciudad vieja de Montevideo con la ubicación de la zona de estudio.

El edificio presenta dos tipos de exposición, dados por las características del terreno existente corriente arriba del mismo; una cuando el viento proviene del mar y la otra cuando proviene de zonas urbanas. En la tabla 1 se especifican los casos según las direcciones analizadas.

Tabla 1: Exposición al viento

Exposición	Direcciones	Características
Mar	ONO, NO, NNO, N, NNE, NE	Corriente arriba se encuentra el mar
Urbana	ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O	Corriente arriba se tiene un terreno tipo urbano

La estructura tiene una altura máxima de 35 m y dimensión en planta de 100 x 100 m. Presenta una geometría regular formada por bloques rectangulares. En las figuras 2 y 3, se aprecian vistas desde el sur y desde el norte del edificio en estudio.

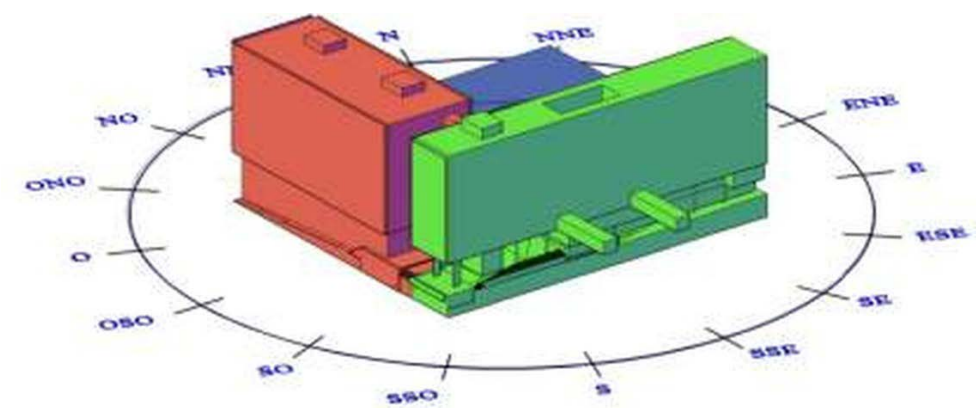


Figura 2: Vista del nuevo edificio desde el SUR

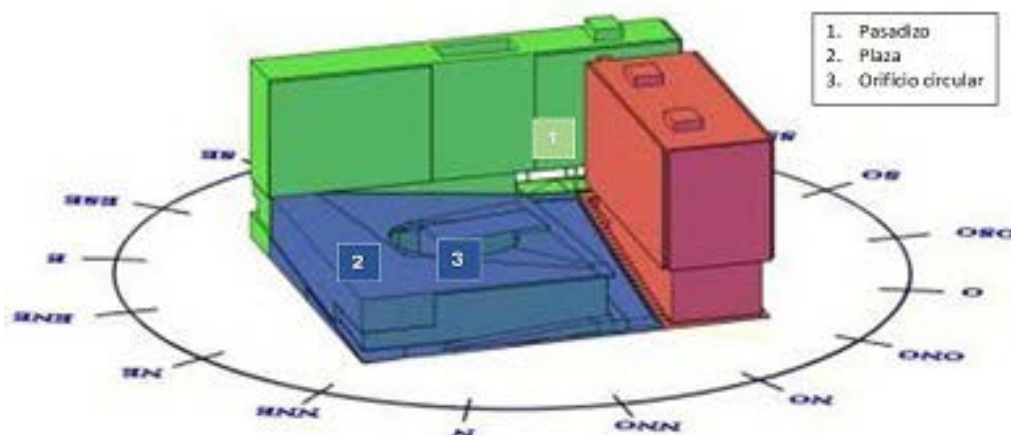


Figura 3: Vista del nuevo edificio desde el NORTE

Las edificaciones circundantes no superan la altura del edificio objeto de estudio con promedio de 15 m.

El modelo de la edificación y el entorno se construyó en una escala de 1/200 reproduciendo la zona construida alrededor del edificio de 400 m de radio. (Figura 4)

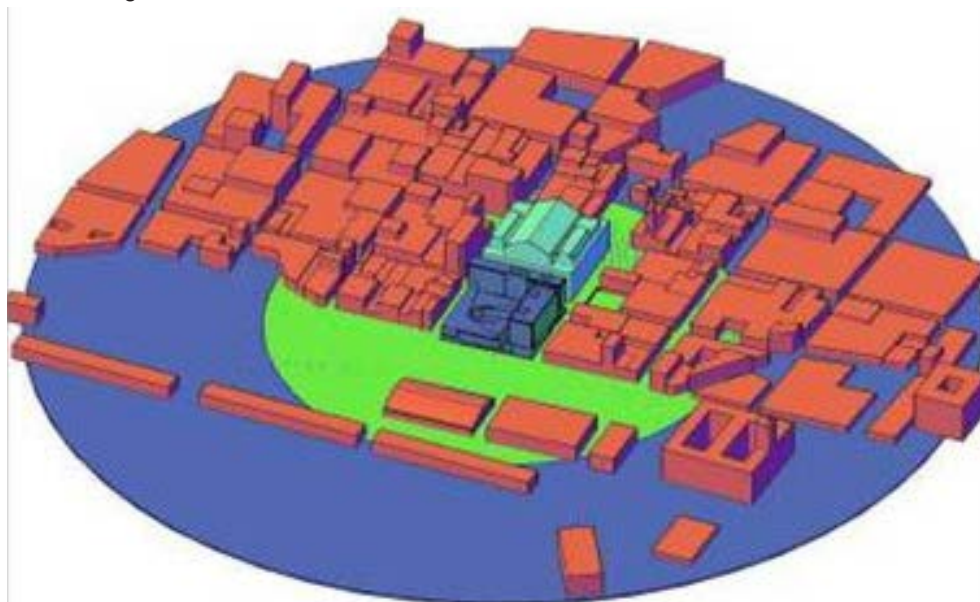


Figura 4: Modelo físico del Edificio y su entorno

El flujo de viento fue modelado asumiendo dos tipos de terrenos, costero y urbano. Estos terrenos definen condiciones de rugosidad diferentes que modifican el perfil vertical de velocidad media del viento. En función de las distintas normativas [6], estas condiciones de exposición pueden corresponder a categorías de terreno diferentes. Para las simulaciones de las capas límites atmosféricas definidas, se emplearon dispositivos de rugosidad, barreras y dispositivos de mezcla (Counihan) [7].

El ensayo de visualización se realizó a partir de la inyección de vapor de propilenglicol delante del modelo, que se ubica en la mesa giratoria del túnel como se muestra en las figuras 5 y 6.

Este vapor, que resulta neutro en el aire, actúa como trazador del flujo en el entorno del objeto. Mediante un plano de luz generado por un láser, se pudo apreciar visualmente el comportamiento del flujo y construir los

[6] Ge Y, Jin X, Cao S. Comparison of APEC Wind Loading Codification and Revision of Chinese National Code. En: Proceedings of 6th workshop on regional harmonization of wind loading and wind environmental specifications in Asia-Pacific economies. Korea, 2010. Disponible en: <http://www.wind.arch.tokougei.ac.jp/APECWW/Report/2010/CHN.pdf>

[7] Loredó-Souza AMS, Camaño EB, Paluch MJ. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. En: Moller VS, Silvestrini JS, editores. Turbulência. 4ta Escola de Primavera de Transição e Turbulência. Porto Alegre: ABCM; 2004. Vol 4. pp.137-164.

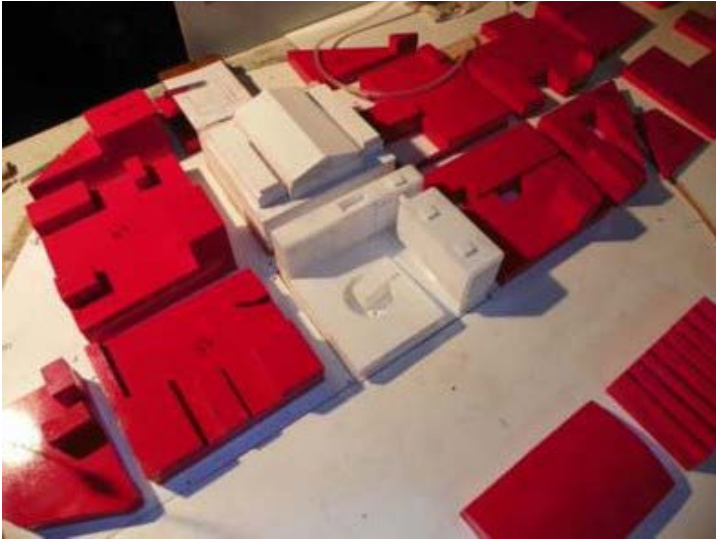


Figura 5: Modelo instalado para ensayar viento de dirección ESTENORESTE.



Figura 6: Modelo instalado para ensayar dirección de viento SURSURESTE.

patrones que se muestran en las figuras 7 y 8. En este proceso fue necesario ajustar la intensidad de la luz ambiente, para que se pudiera apreciar el plano de luz que generó el rayo láser cuando cortó el flujo de humo.



Figura 7: Imagen mostrando inyección de vapor utilizado en la visualización.

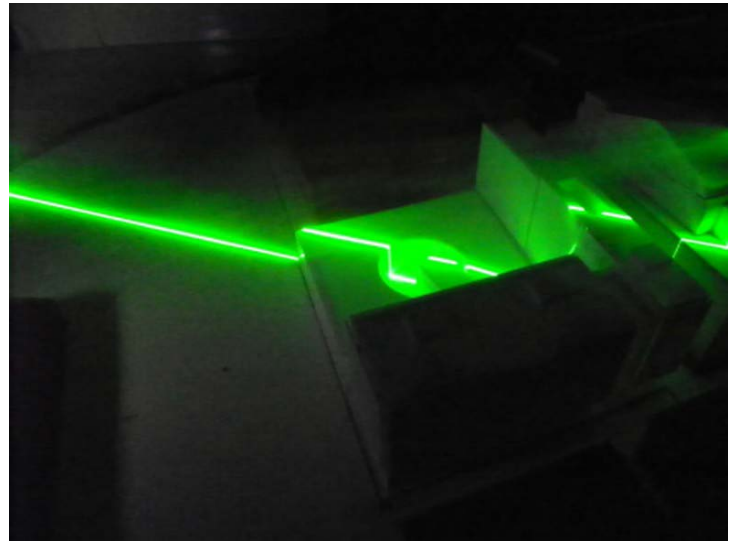


Figura 8: Imagen del plano de luz utilizado para la visualización.

La caracterización del flujo por visualización se realizó para 16 direcciones de viento cada 22.5 grados.

Resultados

De acuerdo a las visualizaciones, para las direcciones NNE, NE, ENE, E y ESE se estableció un patrón de flujo similar, en el cual aparece una corriente descendente por la rampa de acceso hacia el mar y un escurrimiento, desde la plaza hacia el pasadizo ubicado debajo de la unión entre los dos bloques elevados del edificio. (Figura 9)

Para estas direcciones, el flujo sobre la plaza fue aproximadamente en dirección ENE a OSO. Se pudo observar que sobre las manzanas ubicadas al SSE del complejo se formaron vórtices de diversas escalas.

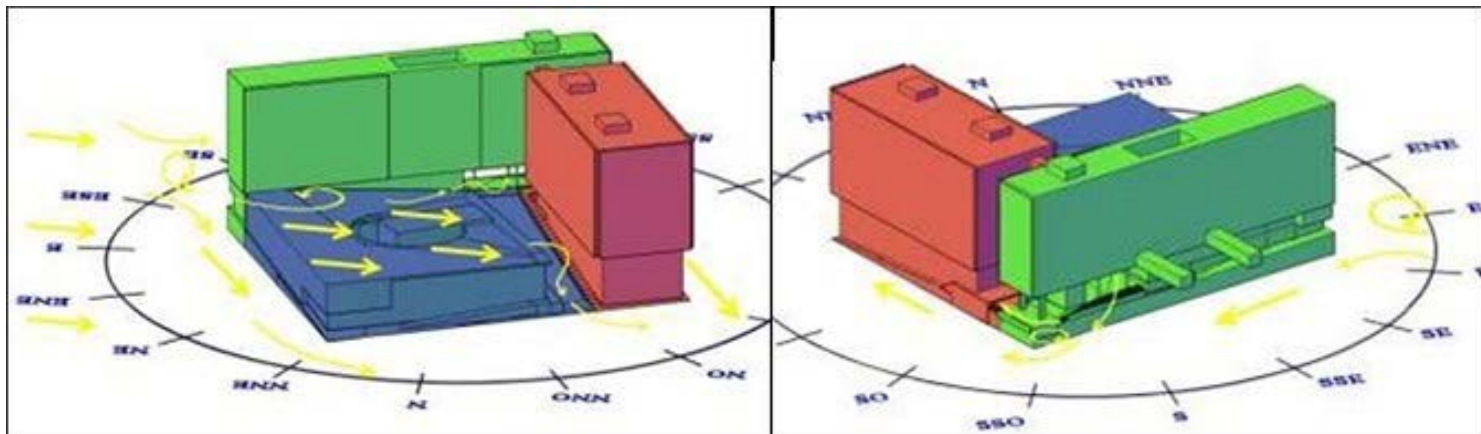


Figura 9: Patrón del flujo para las direcciones NNE, NE, ENE, E y ESE.

Para la dirección norte, aunque el patrón del flujo es similar al observado en las anteriores direcciones, sobre la rampa no se estableció una corriente, sino vórtices de una escala similar al ancho de la misma, como puede apreciarse en la figura 10.

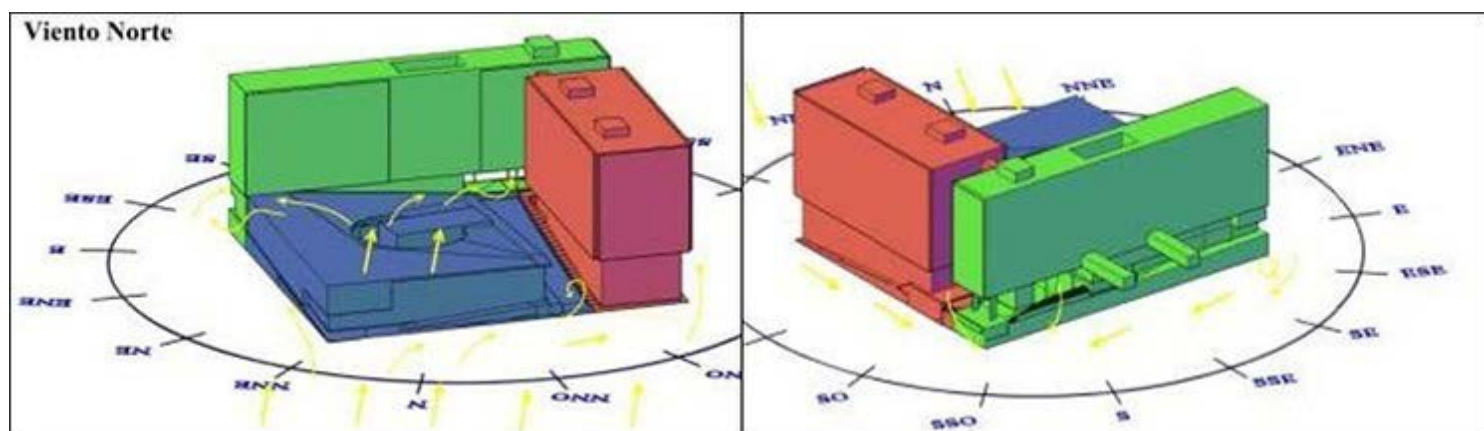


Figura 10: Patrón del flujo para la dirección Norte.

Para las direcciones NO y NNO se estableció una corriente ascendente por la rampa, desde la zona del mar hacia el pasadizo; lo que produce que se generen sobre la plaza zonas de bajas velocidades. En las direcciones SE, SSE, S, SSO, SO, OSO y O se estableció una corriente a través de los pasadizos. Para las direcciones SE y SSE, el flujo que circula por el pasadizo fue desviado hacia arriba, debido a la formación de un vórtice de eje horizontal en la entrada de la rampa. Para las direcciones S y SSO, la corriente que circula por los pasadizos se dirige luego hacia la plaza, no existiendo en estos casos flujo por la rampa.

En general, en el área central de la plaza, se tiene una zona de baja velocidad, al menos inferida a partir de la visualización. Merece ser destacado que cuando el viento es de dirección ENE, se genera un vórtice de eje horizontal con una escala del orden de la profundidad del orificio de la plaza, similar al flujo que se establece en una cavidad sobre la cual circula un fluido. Esto hace que la velocidad en el suelo del orificio, sea del orden de la velocidad sobre la plaza para estas direcciones.

A partir de los resultados obtenidos en la visualización del flujo, así como de los intercambios mantenidos con arquitectos del nuevo edificio, se propusieron un total de 30 puntos sobre el modelo donde realizar las

mediciones de velocidad. En las figuras 11 y 12 se presentan en las vistas norte y sur del modelo la ubicación de los puntos de medición (dadas las vistas, no puede apreciarse el punto 5, que se ubica entre los puntos 4 y 6 en el pasadizo entre los edificios).

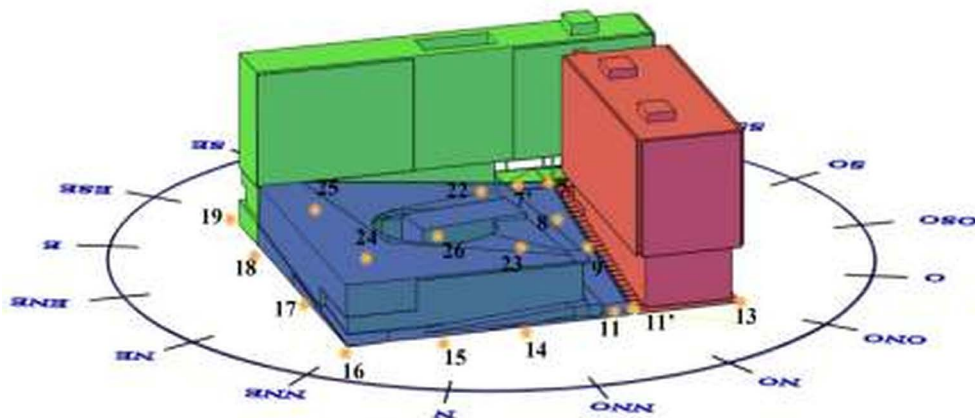


Figura 11: Ubicación de sitios de medición, Vista Norte del modelo.

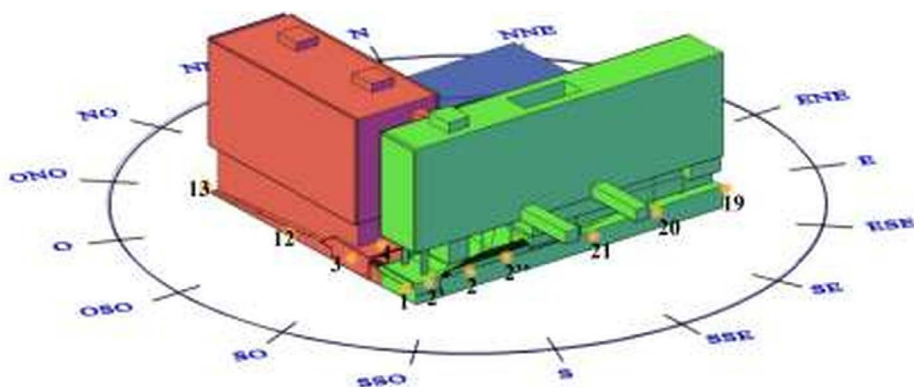


Figura 12: Ubicación de sitios de medición, Vista Sur del modelo.

Las mediciones de velocidad se realizaron a una altura de 2 m sobre el suelo a escala de prototipo con un anemómetro de hilo/lámina caliente. El posicionamiento de las probetas (hilo) sobre los puntos de medición, se efectuó con la ayuda de un robot posicionador de cuatro grados de libertad. En la figura 13 se presenta una imagen del robot y de la probeta, ubicados en uno de los puntos de medición.



Figura 13: Imágenes de las mediciones en el modelo.

A partir de los datos obtenidos de la medición se dedujeron los parámetros a utilizar como criterios de confort: la velocidad media del viento en cada sitio (V), la intensidad de turbulencia (I_u) y la velocidad efectiva (V_e).

La velocidad media se define, tal como se hace en flujos turbulentos atmosféricos, como el valor medio de la velocidad determinado a lo largo de un periodo de tiempo del orden de 10 minutos (V). Los resultados del modelo se extrapolaron para el prototipo (situación de la realidad) aplicando la teoría de semejanza [4], por lo cual se hizo necesario definir números adimensionales, en particular el cociente V/V_H , o sea, el valor medio anteriormente determinado, (V), dividido por el valor medio de la velocidad del viento que incide sobre el edificio, (V_H), a una altura H del techo. La altura elegida fue 38 m. Esta relación se determinó para cada dirección en todos los puntos de medición.

La intensidad de turbulencia (I_u) es el cociente entre la media cuadrática de la fluctuación de la velocidad (σ) (desviación estándar) y su valor medio (V), tomado en el mismo periodo en que se calcula la media [8][9], es decir, la intensidad de turbulencia se define como:

$$I_u = \sigma/V \quad (1)$$

Para tomar en consideración los efectos tanto del flujo medio como de la componente turbulenta, se definió el parámetro velocidad efectiva (V_e) según la ecuación 2 [9]

$$V_e = V(1 + 3I_u) \quad (2)$$

Utilizando la teoría de la semejanza [10], en la medida que el punto P, identificado en ambos esquemas, responde a ubicaciones homólogas en el modelo y el prototipo, se cumplirá el cociente de velocidades (V_e/V) obtenido a partir del ensayo es igual al del prototipo. En la figura 14 se presenta en forma esquemática esta situación.

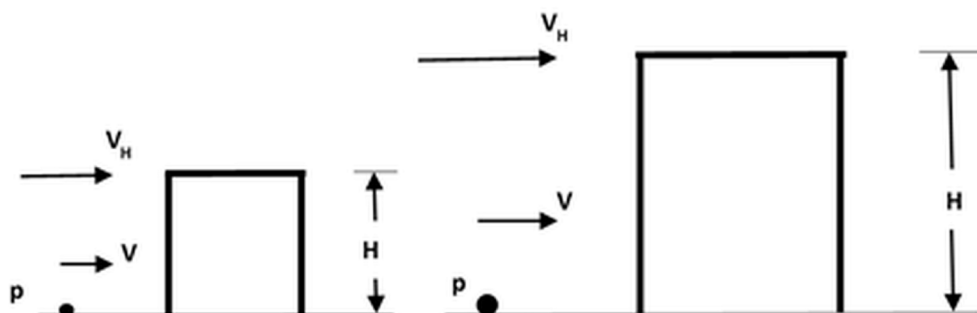


Figura 14: Esquema de situación Modelo y de situación Prototipo

Haciendo empleo de los cocientes de velocidades inferidos a partir del ensayo en el túnel de viento y de las series históricas a la altura de referencia en el prototipo, obtenidas a partir de los datos de una estación meteorológica cercana, medidos a 10 m del nivel de terreno en un periodo de 9 años; fue posible corroborar algunos parámetros que permitieron identificar situaciones de riesgo a las cuales puede estar sometido un peatón.

Análisis de Resultados

En cuanto a resultados, dos estados deben establecerse: condiciones de confort y condiciones de riesgo, pues cada una establece rangos diferentes para los parámetros de evaluación.

En la estimación del confort fueron empleados dos criterios: las

[6] Ge Y, Jin X, Cao S. Comparison of APEC Wind Loading Codification and Revision of Chinese National Code. En: Proceedings of 6th workshop on regional harmonization of wind loading and wind environmental specifications in Asia-Pacific economies. Korea, 2010. Disponible en: <http://www.wind.arch.tokugei.ac.jp/APECWW/Report/2010/CHN.pdf>

[7] Loredó-Souza AMS, Camaño EB, Paluch MJ. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. En: Moller VS, Silvestrini JS, editores. Turbulência. 4ta Escola de Primavera de Transição e Turbulência. Porto Alegre: ABCM; 2004. Vol 4. pp.137-164.

condiciones para transitar o permanecer en el sitio son aceptables cuando la velocidad media supera el valor de 5 m/s por no más del 20 % del tiempo de exposición o cuando la velocidad efectiva no supere el valor de 6 m/s en más del 10 % al 20 % del tiempo [9][11][12]. Estos dos criterios de confort atienden a situaciones diferentes desde el punto de vista del flujo de aire. El primer criterio se dirige a evaluar las situaciones en sitios con baja turbulencia, en tanto que el segundo criterio es para evaluar situaciones en sitios con elevada turbulencia.

A partir de la observación se identificó que los sitios que se presentan en

Tabla 2: Sitios identificados como no confortables.

Criterio	Velocidad Media	Velocidad Efectiva
Excede	P17 y P2	P15, P16, P17, P18, P19, P24, P2'', P2, P2', P1, P3, P4, P5, P12, P13, P11', P11, P6, P7' y P14
Próximo	P12 y P13	P20

la tabla 2 no cumplen los criterios de confort establecidos.

En las figuras 15 y 16 se representan las líneas de igual proporción del tiempo, en las que la velocidad media supera el valor de 5 m/s y la velocidad

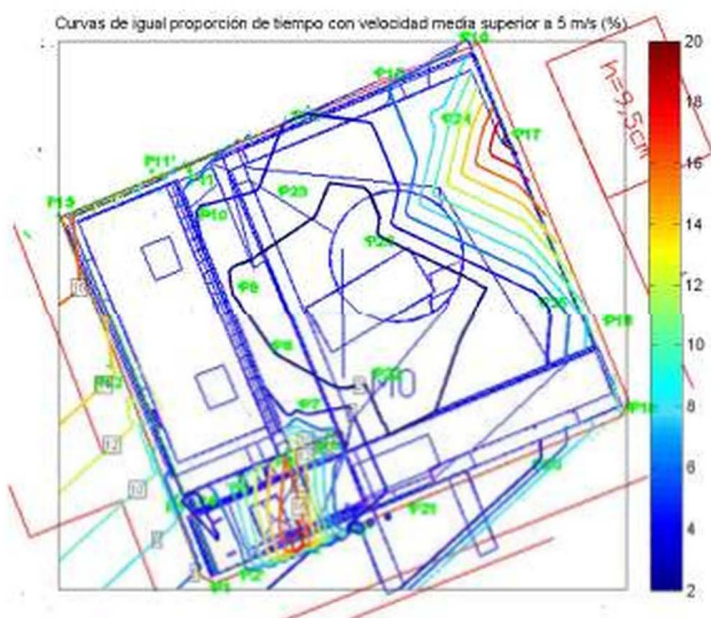


Figura 15: Curvas de igual proporción de tiempo donde la velocidad media supera 5.

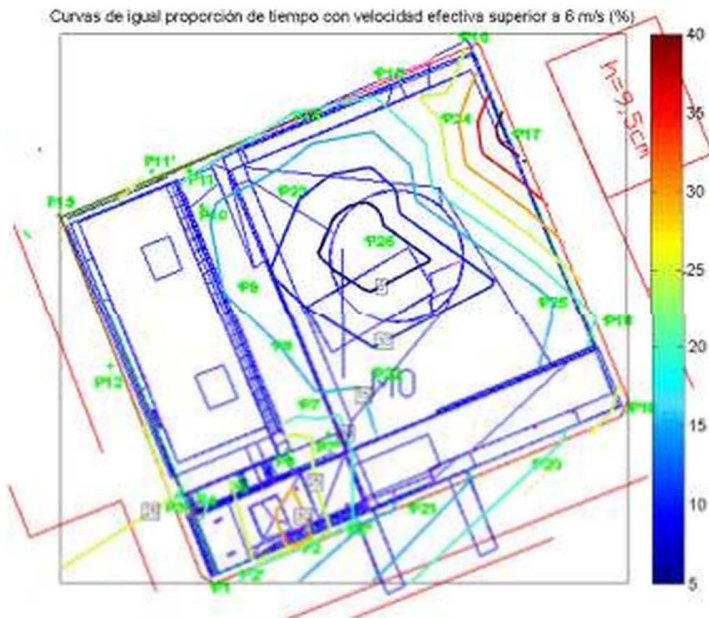


Figura 16: Curvas de igual proporción de tiempo en que la velocidad efectiva supera los 6.

efectiva el valor de 6 m/s.

A partir de la observación de ambas figuras, se identificaron las zonas de falta de confort las cuales se ubican hacia el interior de los pasadizos, entre la rampa de acceso y las calles laterales al nuevo edificio, así como sobre la calle lateral ubicada al ENE.

En forma complementaria, en la figura 17 se observan curvas de igual velocidad promedio, siendo similares al valor de la velocidad media anual y el gradiente de velocidad media anual hacia el interior del pasadizo y hacia las calles laterales al nuevo edificio, donde se alcanzarían velocidades medias anuales de entre 10 m/s y 11 m/s.

Las situaciones de riesgo asociadas al viento se presentan cuando las

[8] Tamura Y, Kareem A. Advanced Structural Wind Engineering. Tokio: Springer; 2013. pp.215-259. ISBN 978-4-431-54336-7. DOI 10.1007/978-4-431-54337-4.

[9] Stathopoulos T. Introduction to Environmental Aerodynamics. In: Baniotopoulos C. Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures. New York: Springer; 2011. 340 p. pp.3-30. ISBN 978-3-7091-9052-6.

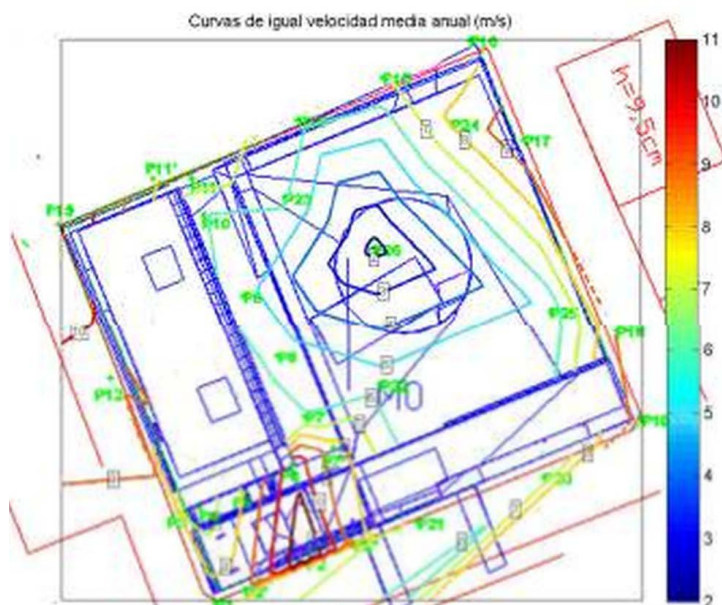


Figura 17: Curvas de igual velocidad promedio.

personas pueden verse afectadas al transitar o permanecer en algún sitio. En este caso el valor umbral de la velocidad media o de la velocidad efectiva para que se tenga una situación de riesgo por esta acción sería de 20 m/s [9, 13]. Un sitio se podría considerar riesgoso si se supera este umbral en más del 0.06 % del tiempo [11][12].

En las figuras 18 y 19 se presentan curvas de igual proporción de tiempo en que la velocidad media supera el valor de 10 m/s (zonas definitivamente desagradables sin llegar a ocasionar peligro) y en que la velocidad efectiva



Figura 18: Curvas de igual proporción de tiempo en que la velocidad media supera 10.

supera el valor de 20 m/s.

A partir del análisis presentado surgen como zonas donde se tendrán situaciones de falta de confort y de riesgo, el pasadizo bajo el edificio, el espacio sobre las calles laterales y una zona centrada sobre la esquina



Figura 19: Curvas de igual velocidad extrema con 20 años de periodo de retorno.

- [10] Simiu E. Design of Buildings for Wind. 2nd ed. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons; 2011. 354 p. pp.117-137. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118086131.fmatter/pdf>
- [11] Stathopoulos T. Pedestrian level winds and outdoor human comfort. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2006;94:769-80. Industrial Aerodynamics. 2006, vol. 94, pp. 769-780.
- [12] Isyumov N, Davenport A. The ground level wind environment in builtup areas. In: Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. London, 1975, pp.403-422. ISBN 9780521208017.
- [13] Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J, Hensen J. Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment. In: Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference. Glasgow, Scotland, 2009. pp.489-496. ISBN 978-047-06897-9-0.

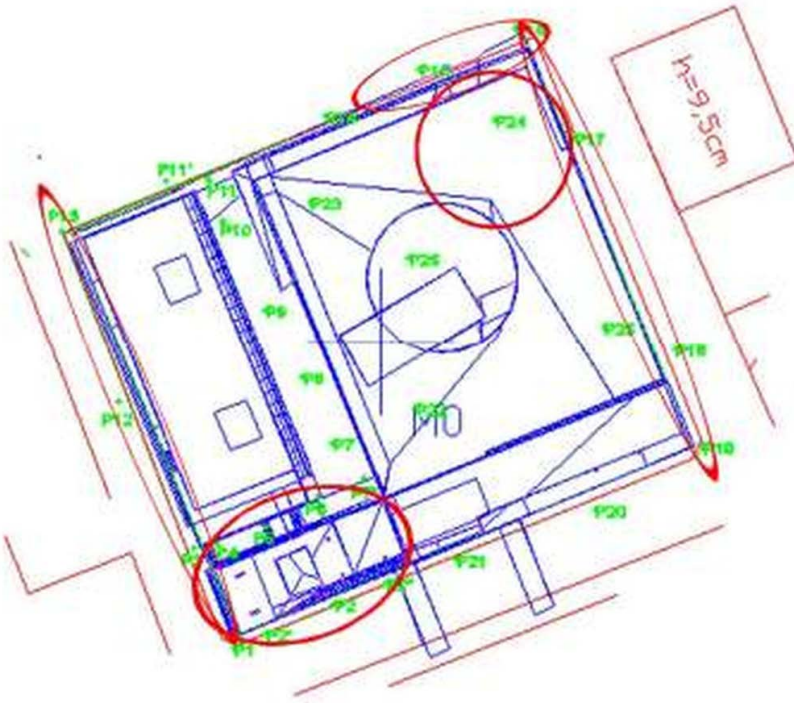


Figura 20: Zonas de riesgo y de falta de confort

norte del área elevada donde se ubica el orificio cilíndrico, tal como se presenta en la figura 20.

En general las situaciones de falta de confort y de riesgo se registran cuando el viento incide del cuadrante norte o desde el oeste.

Para optimizar las posibles soluciones de mitigación del riesgo y la falta de confort, tendrían que realizarse ensayos específicos de cada variante que se proponga en función de la zona a mejorar, siempre en consulta con los arquitectos para alterar en la menor medida posible el diseño original. Sin embargo, de acuerdo a la consulta de algunos trabajos bajo situaciones similares que necesitan disminuir las velocidades de viento [1][14][15] es posible establecer algunos criterios. En las zonas laterales de la edificación, de acuerdo a su posicionamiento geográfico, resulta difícil instrumentar una solución física de mitigación, en estos casos se recomienda colocar la señalética adecuada para advertir a los peatones de los niveles de riesgo o poner en marcha un procedimiento de gestión que podría incluir la instalación de barreras que prohíban el tránsito peatonal cuando las condiciones meteorológicas conlleven a sobrepasar los límites de riesgo establecidos.

Respecto al pasadizo, desde el punto de vista eólico, una solución que podría analizarse arquitectónicamente, sería la vinculación de los dos edificios mediante el cierre del espacio entre ellos que genera el pasadizo y disponer de puertas giratorias que permitan el tránsito y garanticen al mismo tiempo la hermeticidad de la zona ante el flujo del viento.

Otra alternativa podría consistir en cerrar parcialmente el pasadizo, disponiendo barreras o rejas que protejan las zonas abiertas, para evitar el flujo en las direcciones problemáticas y así disminuir las velocidades del viento [1][14].

Respecto a la zona sobre la plaza, la forma de protegerla sería instalar una reja de altura y porosidad adecuada en el perímetro de la misma [15]. Esta solución, que implica la instalación de la reja, posiblemente aporte

- [14] Bustamante C, Jans M, Higuera E. El comportamiento del viento en la morfología urbana y su incidencia en el uso estancial del espacio público, Punta Arenas, Chile. AUS 2014[15]:28-33.
- [15] Blessing C, Chowdhury AG, J L, P H. Full-scale validation of vortex suppression techniques for mitigation of roof uplift. Engineering Structures. 2009;31:2936-46.

en la resolución de algunas situaciones de falta de confort y riesgo que se producen en el pasadizo.

Conclusiones

El sitio que ocupará el nuevo edificio estará expuesto a vientos provenientes del mar para las direcciones entre ONO y NE y a vientos de exposición urbana, para el resto de las direcciones.

Se identificaron tres zonas donde aparecen condiciones de riesgo y falta de confort eólico que son las calles laterales, el pasadizo ubicado debajo del edificio y la esquina NNE de la plaza. Estas situaciones se vinculan, principalmente, a vientos que soplan desde direcciones entre ONO y NNE y O.

Sobre las calles laterales, el flujo se desarrolla principalmente en la dirección del edificio. Las medidas de mitigación en este caso se podrían orientar a gestionar (colocación de señalética, barreras) la utilización de esas zonas.



*Alejandro López Llanusa.
Ingeniero Civil. Master en Ciencias
Técnicas, Profesor Instructor, Facultad
de Ingeniería Civil, Cujae. alo@civil.
cujae.edu.cu*



*Pablo País.
Tecnólogo Mecánico, Facultad de
Ingeniería, Universidad de la República
(UdelaR), ppais@fing.edu.uy*



*José Cataldo Ottieri.
Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias
Técnicas, Profesor Titular, Facultad de
Ingeniería, Universidad de la República
(UdelaR), jcataldo@fing.edu.uy*