

*Generación eólica en el entorno urbano**Wind power generation in the urban environment*Victor Manuel Padilla Segura^{a*}, Algozino Santiago^a,
Julio Marañón Di Leo^a, Juan Sebastián Delnero^b, Mantelli Pablo^a

a Universidad Nacional de La Plata,
Facultad de Ingeniería, Laboratorio
de Capa Límite y Fluidodinámica.
La Plata – BA, Argentina.

b Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas.
Buenos Aires - BA, Argentina.

*E-mail: manuelpseg@gmail.com

Palabras clave:
energía eólica; entorno urbano;
generación, turbulência.

Keywords:
wind energy; urban
environment; generation;
turbulence.

Resumen

A raíz del continuo desarrollo de la generación eólica, así como también de la descentralización de esta; el presente trabajo analiza el potencial eólico en terrazas de edificios a partir de ensayos experimentales en túnel de viento. Los ensayos consistieron en visualizaciones mediante inyección de humo y mediciones con anemometría de hilo caliente del campo de velocidad en la terraza de un edificio típico en la región latinoamericana, así como la influencia de diferentes edificios cercanos. Se realizaron mediciones para configuraciones específicas de dos edificios, donde el primero se considera obstáculo ubicado únicamente a barlovento, pudiendo modificar su altura respecto al edificio en estudio. Con las mediciones realizadas se cuantificaron velocidades medias y fluctuaciones en distintas ubicaciones sobre la terraza y se seleccionaron las ubicaciones más favorables para la colocación de aerogeneradores. Se encontró una gran influencia de la altura del obstáculo en las velocidades medias y turbulencias, con lo cual la elección de dichas ubicaciones dependerá del entorno circundante.

Abstract

In accordance with the continuous developments in wind energy, and the decentralization in its production, the present work analyzes the wind energy potential in the building roofs through experimental tests in a wind tunnel. These tests involve two different methods, visualizations with smoke injection and hot-wire measurements of the velocity field, over the roof of a building model with the characteristics of the most relevant buildings in Latin-America. Additionally, the influence of a windward obstacle of different heights was studied. Mean velocities and fluctuation were identified with the tests over different locations in the roof of the test model and the most favorable for the wind energy production were identified. An important influence of the obstacle height in the mean and fluctuations influence was found, showing a dependency of the most favorable location for the wind energy production with respect to the closest environment.

1 Introducción

La creciente demanda energética plantea nuevos retos de ingeniería buscando que la tendencia al crecimiento de los centros de población vaya de la mano con iniciativas sustentables que reduzcan su impacto. Varias son las fuentes de energía disponible en el planeta, donde la generación de aquellas renovables comienza a tomar fuerza a medida que el desarrollo tecnológico facilita su implementación.

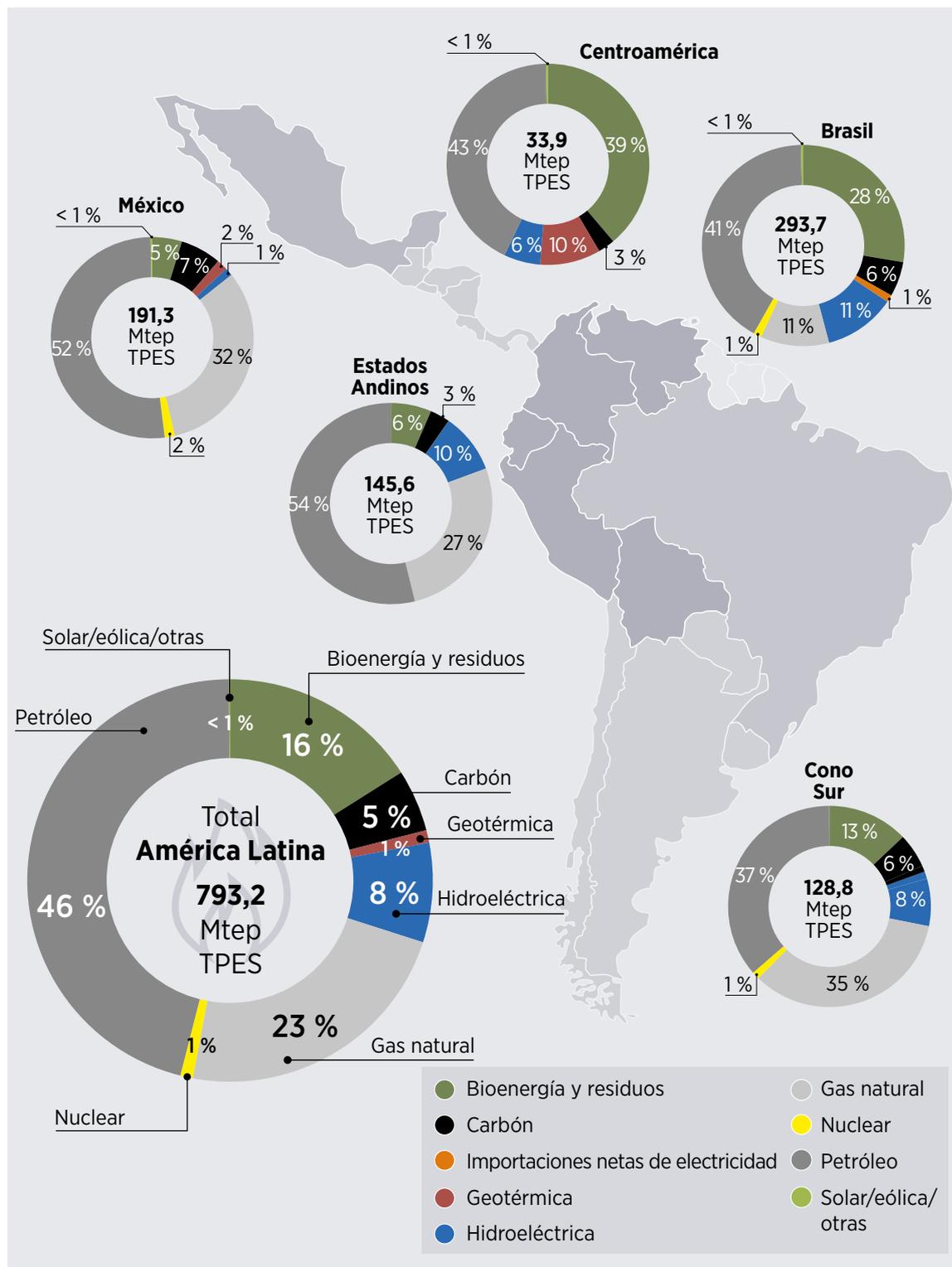
*Analizando latinoamerica, según los datos publicados por la International Energy Agency (2015 apud AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES, 2016), la región mantenía una producción de energía renovable del orden del 31 % del total de suministro de energía primaria en América Latina, ver **Figura 1**. Dentro de esta proporción, la energía eólica, fuente de interés para este trabajo, representa menos del 1 %; si bien es un número muy pequeño el que representade los últimos 10 años, y principalmente en los últimos 5 años las inversiones en esta tecnología aumentaron considerablemente en la región, según el mismo estudio de IRENA, pasando el 50 % de las inversiones respecto al total de inversiones en fuentes renovables.*

Muchos países, como una forma de mitigación del impacto producido por el crecimiento de los centros urbanos están optando por la implementación de códigos que obliguen a los nuevos proyectos habitacionales a contar con una producción propia de energía renovable, aunado a sistemas de conservación de temperatura y manejo de ambientes de manera eficiente e inteligente considerando que los edificios son responsables de aproximadamente 40 % del consumo energético del mundo. Si bien esta tendencia se observa en su mayor medida en Europa y Estados Unidos, la tendencia mundial apunta a este tipo de concepto para el crecimiento urbanístico.

Es por ello que surgen los llamados edificios inteligentes, que contemplan distintas formas eficientes de administrar la producción y el consumo de su energía, vale aclarar que estos edificios producen solo una parte de la energía total que consumen. En este contexto nace la pregunta: ¿Por qué no generar la energía localmente en cada edificio? Y desde el punto de vista de la energía eólica, ¿Qué ventajas y desventajas trae la generación eólica en edificios?

Existen distintos diseños de edificios que implementan la generación eólica, integrando los sistemas generadores a sus estructuras, siendo pioneros en esta rama de estudio entre ellos se pueden mencionar: el complejo Bahrain World Trade Center, en Bahrain, Asia, donde sus tres generadores eólicos producen entre el 10 % y 15 % de la energía que consume. Otros edificios recientes son el Pearl River Tower en Guangzhou, China y el Strata Tower en Londres.

Figura 1 - Proporções de produção de energia primária em América Latina



Fuente: International Energy Agency (2015 apud AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES, 2016, p. 7).

Al colocar un generador eólico cerca a un edificio, es necesario tomar en cuenta la interacción entre ambos, pudiendo esto resultar en una ganancia de velocidad del flujo que ve el generador, o en caso de que la ubicación del mismo no sea la más adecuada, puede resultar en un flujo muy turbulento afectando el rendimiento y la durabilidad del equipo (MERTENS, 2006). A su vez, la velocidad del aire en el entorno urbano es solo una fracción de la velocidad en las zonas rurales, donde la rugosidad del terreno es mucho menor que en el primer caso (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL, 2005). En la mayoría de los casos, es sabido el carácter variable en cuanto a magnitud y dirección de los vientos en el entorno urbano, esto requiere que la turbina pueda adaptarse de manera rápida a esos cambios, afectando no solo la energía que entrega sino su durabilidad debido a las cargas dinámicas a las que se encuentra expuesta (MERTENS, 2006; HAU, 2006). Por este motivo, la colocación de aerogeneradores en edificios de gran altura parece ser una solución viable, sobre todo porque el edificio causa que la velocidad local de la corriente libre por encima de la terraza aumente alrededor del 20 % ("efecto concentrador") dependiendo de su forma y de la dirección del viento relativo al edificio. Además, en zonas costeras, puede ser de gran interés la aplicación de generadores eólicos, dado que el efecto de rugosidad del entorno urbano se ve disminuido.

El presente trabajo busca analizar experimentalmente en túnel de viento el potencial eólico en ciudades, específicamente en la región latinoamericana, considerando tanto ventajas como desventajas de la generación eólica en el entorno urbano, considerando la generación a partir de generadores de baja y media potencia colocados en terrazas de edificios.

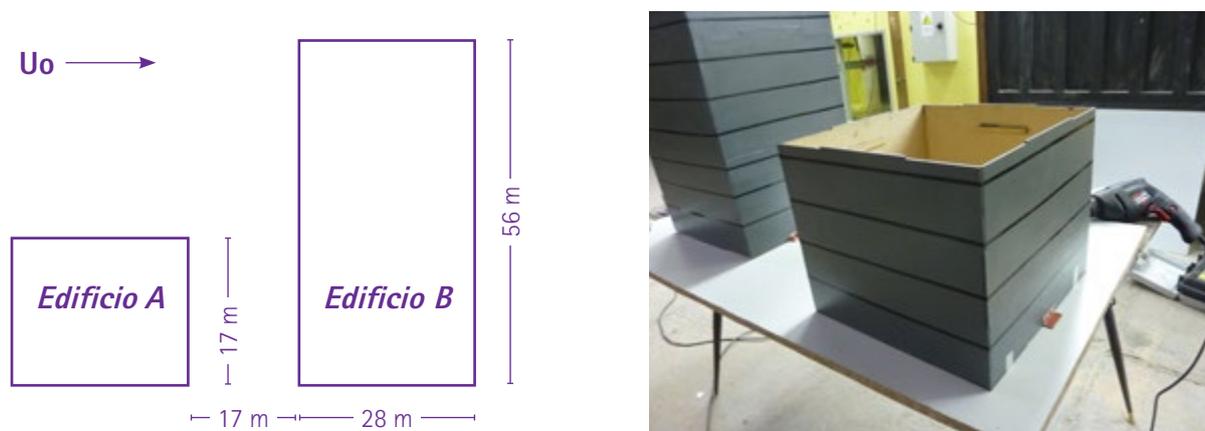
2 Metodología

Como fue mencionado anteriormente, el presente trabajo busca la caracterización del flujo de aire sobre la terraza de un edificio que se encuentra aguas abajo de otro edificio que puede modificar su altura para cuantificar su influencia. Para dicha caracterización se realizaron visualizaciones mediante inyección de humo, así como también mediciones mediante anemometría de hilo caliente, a distintas alturas respecto a la terraza. Los ensayos fueron realizados en el túnel de viento "Dr. Jorge Colman Lerner" de la UIDET-LaCLyFA de la Universidad Nacional de La Plata. Este túnel de viento de circuito abierto cuenta con una sección de prueba de 1,83 m x 2,4 m y una velocidad máxima de 20 m/s. (LERNER et al., 2012).

*Se construyó una maqueta de dos edificios en madera y escala 1:80 (**Figura 2**), en función de las características típicas de las construcciones en Latinoamérica. El edificio (A) cuenta con 5 módulos para modificar su altura; el primer módulo representa una altura de 24 m, y cada módulo restante suma 8 m de altura alcanzando una altura total de 56 m. El edificio B, es un único módulo de 70 cm, representando 56 m de altura en su escala real. La separación entre ambos edificios se mantuvo constante, y la misma representa la anchura media de una avenida con sus veredas correspondientes; esta distancia considerada fue de 17 m.*

Se realizaron mediciones para distintas alturas del edificio A ubicado en la cara a barlovento del edificio en estudio (edificio B). Las distintas configuraciones fueron modificadas con los módulos anteriormente descritos. Si bien se analizaron cinco configuraciones distintas, se presentan los resultados de la configuración 1 que corresponde con la altura básica de 24 m en el edificio A (45 % de la altura del edificio B); la configuración 3, que se agregan dos módulos, es decir una altura total de 40 m (85 % de la altura del edificio B), y la configuración 5 que corresponde a una altura total de 56 m, equivalente a la del edificio B.

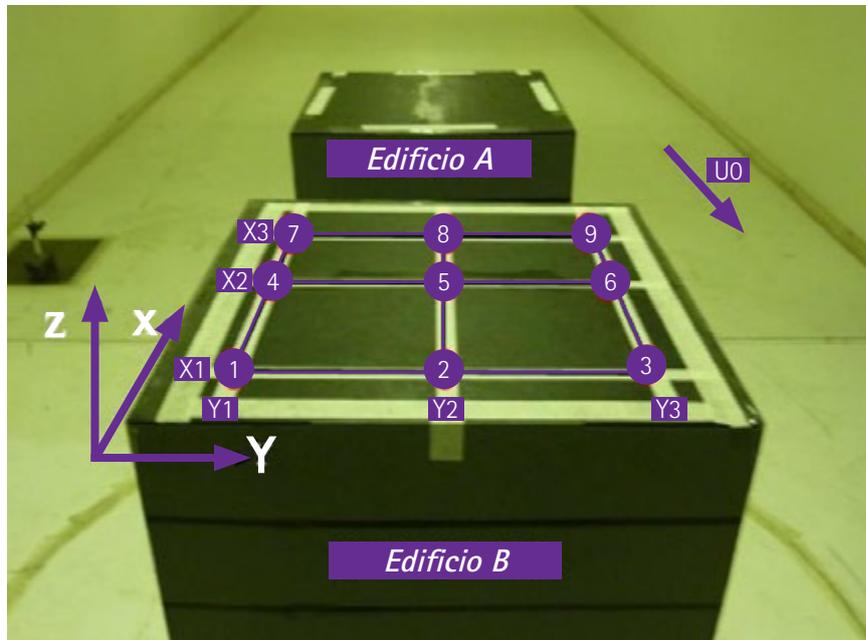
Figura 2 - Vista de la maqueta y esquema de montaje de ambos edificios



Fuente: elaborado por los autores

Para la medición de velocidades, se realizó la misma sobre 9 puntos en el plano de la terraza, y en cada uno de estos puntos, se realizaron mediciones a 5 alturas (eje Z) distintas, con una separación de 5 cm desde la terraza hasta los 25 cm (representando una diferencia de altura de 4 m entre cada punto de medición). En la **Figura 3** se puede ver el esquema de medición. Las mediciones se realizaron para una velocidad de corriente libre de 10 m/s correspondiente a la altura de la terraza del edificio B. Para la configuración de túnel empleada, la intensidad de turbulencia en el punto de referencia es de 1,8 %. Consistente con un perfil de capa límite correspondiente a una zona urbana edificada. Si bien la intensidad de turbulencia empleada en las mediciones es de un nivel bajo para un entorno urbano, se utilizó dicha configuración para realizar un primer análisis sobre los efectos de un obstáculo ubicado a barlovento en la terraza de un edificio en estudio sucesivos análisis incrementando la intensidad de turbulencia deberían ser realizados en trabajos futuros para analizar si modificaciones en el perfil incidente producen modificaciones en el campo de flujo sobre la terraza del edificio. Las mediciones de anemometría se realizaron a una frecuencia de adquisición de 2 kHz, con un filtro pasa-bajo de 1 kHz, empleando sensores fiber film probes 55R51 en el anemómetro de temperatura constante CTA Dantec Streamline.

Figura 3 – Grilla de medición de velocidades



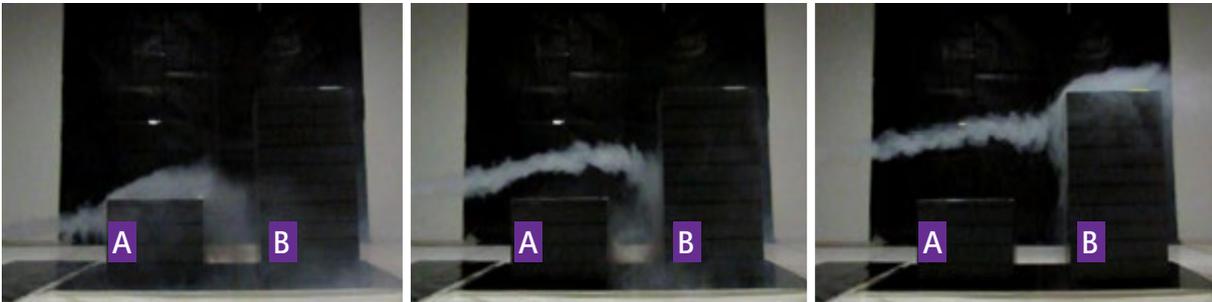
Fuente: elaborado por los autores

3 Resultados

2.2 Visualizaciones

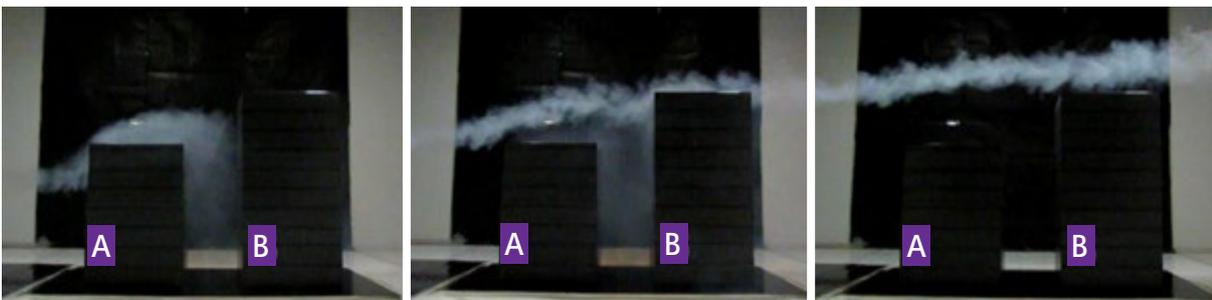
En las **Figura 4, 5 y 6** se pueden ver imágenes de las visualizaciones realizadas con inyección de humo para distintas alturas del edificio A. En la **Figura 4**, se observa que el edificio A no afecta, a priori, el flujo sobre la terraza del edificio B, pero si se puede visualizar la formación de un vórtice captivo entre ambos edificios. En la **Figura 5**, se visualiza cuando el edificio A posee una altura que representa el 85 % de la altura del edificio B. En dicha figura, se puede ver que el flujo que incide sobre el edificio B no está siendo afectado por el flujo vorticoso que genera el edificio A. Sin embargo, la influencia de esta sobre el edificio B se puede decir que es favorable en la medida que reduce el tamaño de la burbuja de separación sobre el edificio B; dicho tamaño no se muestra en las figuras, dado que se puede visualizar en los videos capturados. Por último, en la **Figura 6**, se observa la influencia del edificio A cuando este posee la misma altura que el edificio B. El flujo sobre la terraza del edificio B es altamente turbulento, debido a la influencia que genera el flujo proveniente del interior de la burbuja de separación del edificio A. Este resultado también fue encontrado en la configuración donde el edificio A representa una altura del 93 % del edificio B.

Figura 4 - Visualización para la menor altura del obstáculo A (24 m). Configuración 1



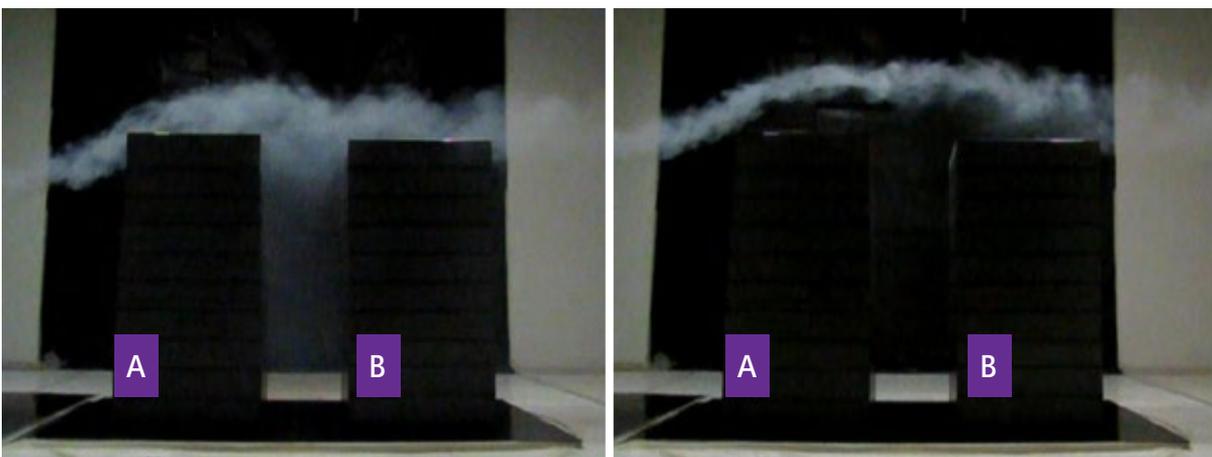
Fuente: elaborado por los autores

Figura 5 - Visualización para una altura de 48 m del obstáculo. Configuración 3



Fuente: elaborado por los autores

Figura 6 - Visualización para una altura de 56 m del obstáculo. Configuración 5



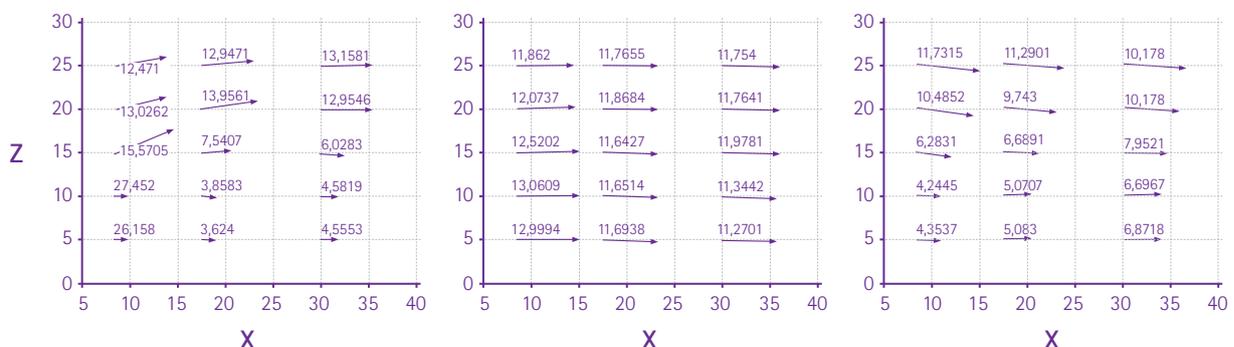
Fuente: elaborado por los autores

3.2 Mediciones de velocidad

Para la representación de las velocidades sobre la terraza del edificio A, son considerados tres planos de medición. Dichos planos son verticales y paralelos a la velocidad de la corriente libre, para poder analizar la evolución del flujo a medida que este avanza sobre la terraza. De esta forma, el Plano Y3-Z contiene a los puntos 1, 4, 7; el plano Y2-Z contiene a los puntos 2, 5, 8; y el plano Y1-Z contiene a los puntos 3, 6, 9; así como todas las mediciones en altura de cada punto. Ver **Figura 3** para la referencia de la locación de los puntos. Por una simplicidad a la hora de comparación de los resultados para las distintas configuraciones, se mostrarán los resultados del plano central del edificio, es decir el plano Y2-Z, dado que en dicho plano se encontraron los mayores valores de velocidad.

En la **Figura 7**, se puede ver el campo de velocidades medias para las tres configuraciones mostradas en las visualizaciones. Allí se puede observar un aumento considerable por encima de los 12 m de escala real (15 cm) debido a los efectos de la separación turbulenta que produce el límite de la terraza. A su vez, los mayores valores de velocidad se encuentran en el borde frontal (barlovento) de la terraza. Además, a partir de los 20 cm de separación, los vectores de velocidad se mantienen prácticamente constantes para los dos primeros casos, observando una leve tendencia descendente en el último caso. Otro punto por remarcar es en el segundo caso de análisis la velocidad se mantiene constante prácticamente en todo el plano de estudio, aunque presentando una disminución en la magnitud respecto al primer caso. Además, en el segundo caso se puede observar que el gradiente de velocidades se disminuye considerablemente, indicando una disminución en el tamaño de la burbuja de separación sobre la terraza. Por último, como era esperado a partir de lo observado en las visualizaciones, en la configuración 5 (altura del edificio A igual a la del edificio B), el flujo presenta una componente descendente; además se puede observar como las magnitudes de velocidad disminuyen considerablemente respecto a los casos anteriores producto de la interacción de la burbuja de separación del edificio A sobre el edificio B.

Figura 7 – Campo de velocidades medias en m/s en el plano central del edificio para tres configuraciones de obstáculo. Izquierda: Configuración 1; Centro: Configuración 3 Derecha: Configuración 5. Las posiciones X y Z se muestran en cm, en la escala del modelo



Fuente: elaborado por los autores

Al cuantificar las velocidades medias en los distintos puntos, se puede destacar el incremento de velocidad sobre la terraza, respecto a la corriente libre, de un 43 %, un 22 % y 15 % aproximadamente, en promedio, para las configuraciones 1, 3 y 5, respectivamente. A su vez, estos incrementos se observan a partir de los 15 cm en la configuración 1, en toda la terraza para la configuración 3 y a partir de los 20 cm en la configuración 5. Se recuerda que 5 cm representan 8 m en escala real. Otro punto por destacar es que si analizamos las variaciones entre los tres planos paralelos a la corriente libre (Y1-Z, Y2-Z, Y3-Z), las diferencias encontradas son menores al 5 %, con lo cual los resultados hallados en el plano central son extrapolables a los demás planos de la terraza. En la **Tabla 1** se muestran las ubicaciones recomendadas que deberían tener los aerogeneradores en las distintas ubicaciones de la terraza para poder aprovechar los incrementos de velocidad.

Tabla 1 – Altura recomendada para mayor velocidad media en función de cada configuración y los puntos analizados. Las alturas están representadas en fracción de la altura total del edificio

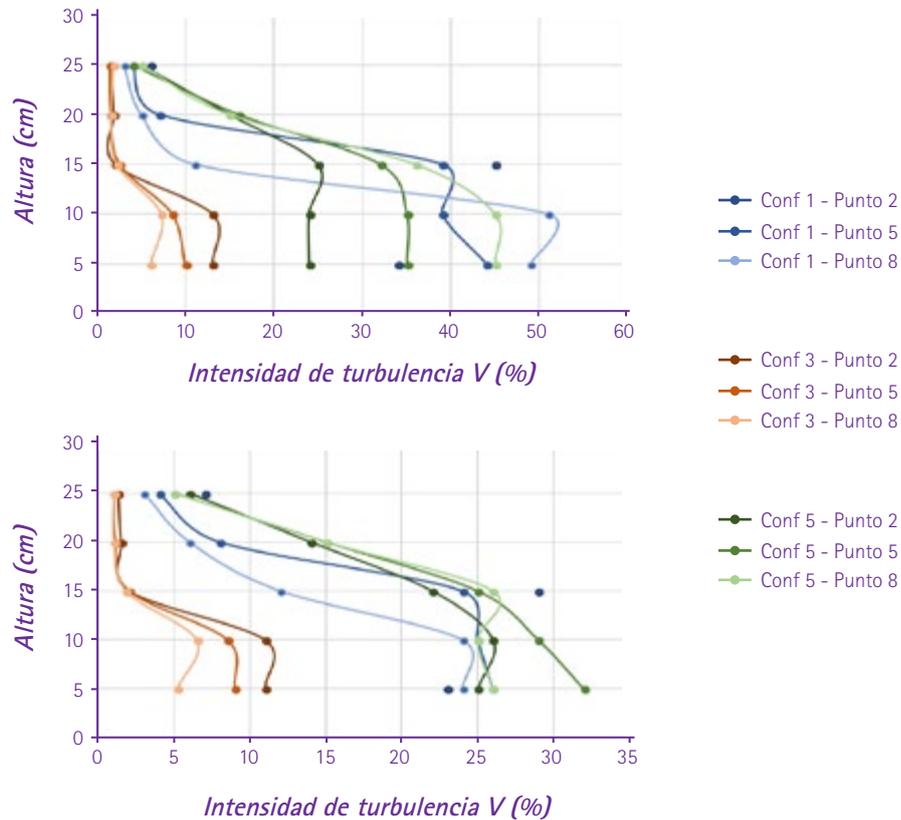
	Posición 2	Posición 5	Posición 8
Configuración 1	0,36	0,29	0,21
Configuración 3	0,36	0,21	0,14
Configuración 5	0,36	0,36	0,36

Fuente: elaborado por los autores

Otro punto por analizar es la turbulencia sobre la terraza, dado que los generadores eólicos verán afectado su rendimiento producto de dicha turbulencia, así como también la aparición de cargas fluctuantes sobre las palas de los generadores. En este estudio, se considera la velocidad de referencia para los valores de intensidad, tanto en la componente longitudinal "U" y en la vertical "V", a la velocidad media en U de cada punto.

Como se puede observar en la **Figura 8**, para la configuración 1, se puede observar como en las posiciones 2 y 5, a partir de los 15 cm de altura, la turbulencia disminuye considerablemente, mientras que para la posición 8, dicha disminución se ve a partir de los 10 cm. Como era esperado, a medida que nos acercamos al flanco a sotavento la capa turbulenta aumenta su espesor. En la configuración 3, se observa un comportamiento similar al de la configuración 1, donde hay una reducción considerable en la turbulencia a partir de los 10 cm de altura. Sin embargo, en esta configuración, los valores de intensidad son menores comparados con los hallados para las otras dos configuraciones. En la configuración 5, una vez más, la reducción de la intensidad de turbulencia se observa a partir de los 15 cm, y retomando valores similares a los de la configuración 1. Sin embargo, entre 20 cm y 25 cm de altura, se encuentran valores mayores de intensidad de turbulencia respecto a las otras dos configuraciones.

Figura 8 - Intensidad de turbulencia para distintas configuraciones y puntos localizados en el plano Y2-Z en la terraza del edificio. Izquierda corresponde a turbulencia en componente U, Derecha corresponde componente V. Colores azules para la configuración 1, marrones para la configuración 3, y verdes para la configuración 5



Fuente: elaborado por los autores

Al analizar los niveles de turbulencia en cada zona elegida como ubicación óptima, el nivel de turbulencia tiene valores entre 6 % y 12 %; en la configuración 5 en valores cercanos al 15 % mientras que, para la configuración 3, estos valores son considerablemente menores, oscilando entre 1,5 % y 2 %, es decir cercanos al valor de intensidad de la corriente libre (1,8 %). Considerando la recomendación realizada en la norma IEC 61400-2, que establece un límite del 18 % para el nivel de turbulencia aceptable, estas ubicaciones cumplen con dicho requerimiento (INTERNATIONAL STANDARD, 2006).

4 Conclusiones

Se realizaron visualizaciones y mediciones del campo de velocidad en distintos puntos sobre la terraza de un edificio en función de distintas configuraciones de obstáculos que puedan estar localizados aguas arriba del mismo. De esta forma, se logra cuantificar el efecto del obstáculo para la colocación de generadores eólicos, y poder hallar la ubicación más efectiva en función de los parámetros intervinientes.

Del análisis de las visualizaciones, se puede observar como a partir de que el edificio obstáculo alcanza una altura del 85 % del edificio en análisis, las perturbaciones sobre la terraza son considerables, mientras que, si la altura es menor al 50 %, los efectos son despreciables.

*Respecto a la altura del edificio obstáculo en comparación con el edificio en análisis, se concluye que lo ideal siempre es que la altura del obstáculo sea mucho menor, dado que ello genera un incremento mayor en la velocidad media y la estela de este no influye sobre el edificio en análisis. Sin embargo, la configuración 3 también tiene su ventaja, dado que, si bien la velocidad media es un poco menor a la velocidad hallada en la configuración 1, los niveles de turbulencia se disminuyen considerablemente y la componente de flujo es prácticamente paralela al plano de la terraza, lo cual es beneficioso para colocación de aerogeneradores de eje horizontal. En la **Tabla 1** se pueden observar las ubicaciones recomendadas para la colocación de aerogeneradores en la terraza de un edificio en función de la altura del obstáculo que haya presente aguas arriba.*

Como conclusión general, se logró determinar el campo de flujo sobre la terraza de un edificio con un obstáculo aguas arriba para distintas configuraciones de este. Se hallaron las zonas más beneficiosas para la colocación de aerogeneradores, en función de las velocidades medias y la intensidad de turbulencia. Se continúa trabajando para analizar la influencia de distintas escalas turbulentas e intensidades en el perfil incidente, y su influencia sobre el campo fluidodinámico de ambas estructuras en estudio.

5 Referencias

AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES. **Análisis del mercado de energías renovables América Latina**: Resumen Ejecutivo. Abu Dabi: IRENA, 2016. 19 p. Dipsonivel em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Market_Analysis_Latin_America_summary_ES_2016.pdf?la=en&hash=91515195FAA6AAF26969178D5D811456B7C3814D>. Acceso em: 20 abr. 2019.

HAU, E. **Wind turbines**: fundamentals, technologies, application, economics. Berlin: Springer 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL. **CIRSOC 102-2005**: Reglamento Argentino de la acción del viento sobre las construcciones. Buenos Aires: INTI, 2005.

INTERNATIONAL STANDARD. **IEC 61400**: Wind turbines - Part 2: Design requirements for small wind turbines. Geneve: IES, 2006

LERNER, J. C.; DI LEO, J. M.; DELNERO, J. S.; SAÍNZ, M. G.; BOLDER U. Sobre el túnel de viento de capa límite de circuito abierto del laboratorio de capa límite y fluidodinámica ambiental (LACLYFA), Facultad de Ingeniería, UNLP. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA DE VIENTOS, 2., 2012, La Plata. **Memorias...** La Plata: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata, 2012.

MERTENS, S. **Wind energy in the built environment**. Brentwood, UK: Multi-Science, 2006.