

*Impacto acústico de la interacción entre el viento y las edificaciones**Acoustic impact of the interaction between wind and buildings*Pablo Gianoli<sup>a\*</sup>, Alice Elizabeth González<sup>a</sup>, José Cataldo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad de la República  
Uruguay, Facultad de Ingeniería,  
Instituto de Mecánica de los  
Fluidos e Ingeniería Ambiental.  
Montevideo – Uruguay.

\*E-mail: pgianoli@fing.edu.uy

*Palabras clave:*

*Acústica ambiental;  
ruido en estructuras;  
aeroacústica.*

*Keywords:*

*environmental acoustic,  
noise in structure,  
aeroacoustic.*

*Resumen*

*Se presenta el análisis de emisiones acústicas generadas por la interacción del viento y la fachada de un edificio de gran altura en Uruguay. La fachada está compuesta por parasoles de vidrio. Una vez instalados, algunos vecinos y personas en la obra expresaron su molestia por ruido proveniente de los pisos superiores. Se realizaron mediciones de niveles de presión sonora en el sitio y en el entorno para obtener una caracterización de la zona de estudio. Se identificó la fuente de ruido: las emisiones acústicas se asociaron directamente con un fenómeno causado para velocidades de viento superiores a 5 m/s, desde diferentes direcciones, luego de pasar entre los parasoles de vidrio. Esta interacción generaba altos niveles de presión sonora (superando momentáneamente los 90 dBZ) en frecuencias bajas a medias (500 Hz y 630 Hz) y frecuencias altas (bandas de octava entre 3,2 kHz y 6,3 kHz). Una vez identificado el problema, se desarrolló una medida de mitigación que se implementó. Su buen funcionamiento se verificó con nuevas mediciones de niveles de presión sonora en el entorno.*

*Abstract*

*The analysis of acoustic emissions generated by the interaction of the wind and the glass facade of a high-rise building in Uruguay is presented. Once the glass plates of the facade were installed, some neighbors and people at the construction site expressed their annoyance for the noise coming from the upper floors. Measurements of sound pressure levels were made at the site and in the vicinity to characterize the studied area. The noise source was identified: the acoustic emissions are associated with a phenomenon caused by wind speed higher than 5 m/s, from different headings, after passing between the glass plates of the facade. This interaction generates high levels of sound pressure (exceeding 90 dBZ for some situations) at low to mid frequencies (500 Hz to 630 Hz) and high frequencies*

*(octave bands between 3.2 kHz and 6.3 kHz). Once the problem was identified, a solution was proposed and implemented. The good results obtained with this solution were verified with new measurements done in the studied area.*

## 1 Introducción

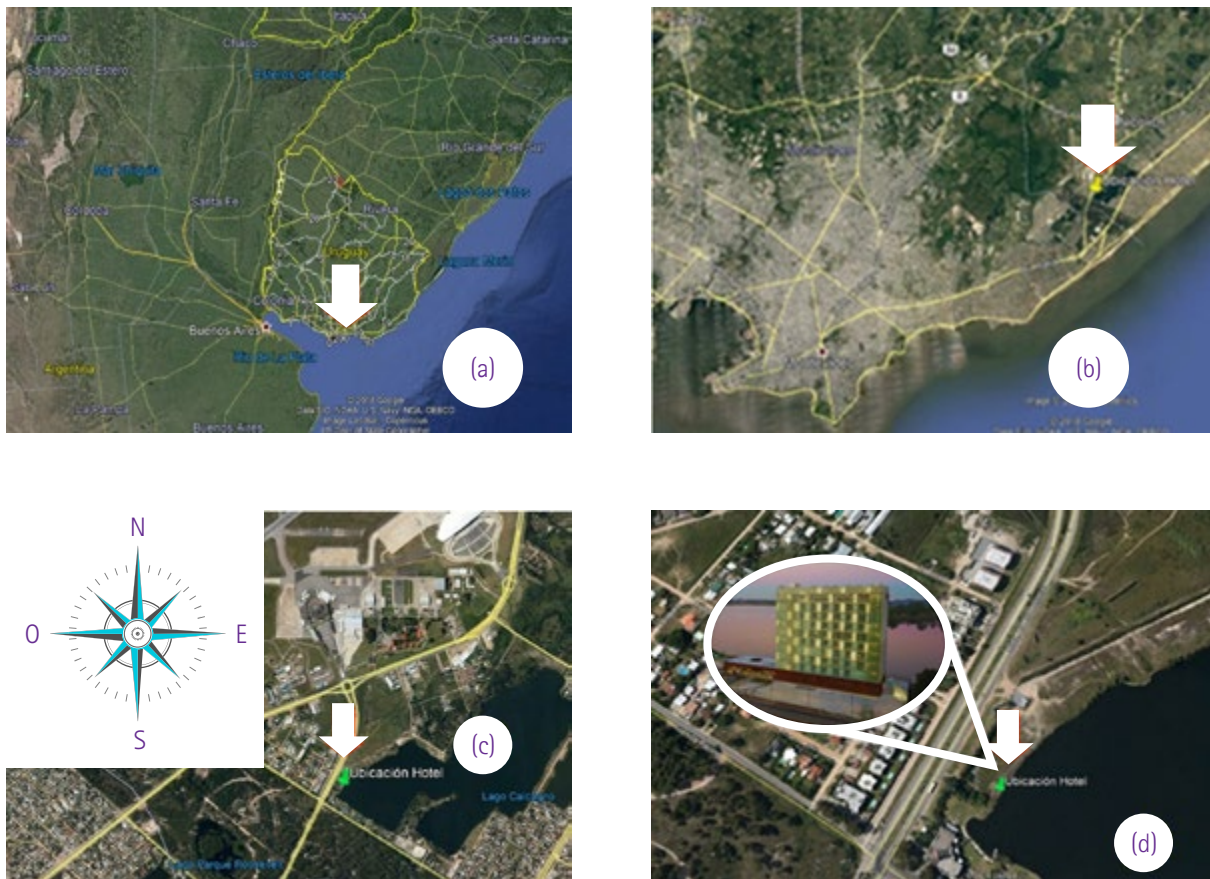
*El ruido es un agente contaminante muy fácil de producir ya que requiere muy poca energía para generarlo. Sin embargo, es muy difícil de combatir, principalmente porque las medidas para combatirlo suelen ser costosas al requerir alternativas ingenieriles y arquitectónicas sofisticadas. El sonido resulta de la propagación de un movimiento oscilatorio de partículas a través de un medio material, el cual está asociado a un campo oscilatorio de presiones que se caracteriza por la frecuencia y la amplitud del movimiento. La onda de sonido está asociada a un flujo de potencia por unidad de área que rodea el sitio donde la fuente genera tal movimiento. En este artículo, se presenta el análisis de las emisiones acústicas generadas por la interacción entre el viento y la fachada de un edificio.*

## 2 Características de la fuente de ruido

### 2.1 Descripción del edificio en estudio

*En el Departamento de Canelones (Uruguay), muy próximo al Aeropuerto Internacional de Carrasco, se construyó el edificio donde en la actualidad funciona un hotel, con una altura de aproximadamente 36 m y una sección rectangular de aproximadamente 35 m por 20 m de lado (ver **Figura 1**).*

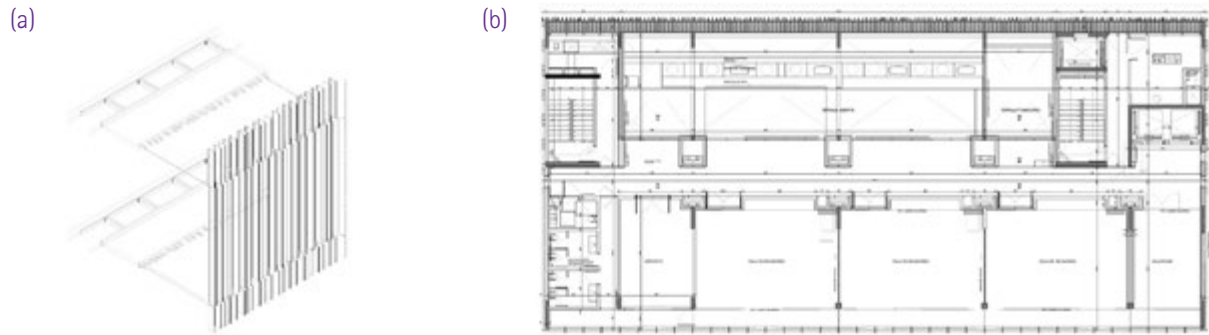
*Figura 1 - Ubicación de la zona de estudio en una escala continental (a); Límite Departamental Montevideo/Canelones (b); Zona de estudio incluyendo puntos cardinales (c); edificio en estudio (d) (imágenes modificadas de Google Earth)*



*Fuente: elaborado por los autores*

*El edificio presenta placas de vidrio verticales en su fachada, que forman parte del diseño estético del mismo. Estos parasoles de vidrio están compuestos por placas de 16 mm de espesor, 19 cm de ancho y tramos de la altura de cada piso, del orden de 3,2 m. Se encuentran ubicados perpendicularmente a la fachada, en forma aleatoria a lo largo y ancho de la misma, tal cual lo muestra la **Figura 1 d**, con una separación de entre 7 cm y 25 cm, con un promedio de 20 cm. A fines del mes de mayo y a principios del mes de junio de 2017 se culminó con la colocación de estos parasoles en toda la fachada del edificio. Una vez finalizada la instalación de los parasoles tanto los responsables de la obra como las personas del entorno comenzaron a percibir sonidos provenientes, en principio, del piso 9. Este piso posee una geometría diferente a los demás pisos, ya que en esa zona se ubican los equipos de aire acondicionado de todo el edificio (ver **Figura 2 b**).*

Figura 2 - Detalle de parasoles utilizados (a); Dibujo CAD, Planta piso 9 (b)



Fuente: elaborado por los autores

## 3 Procesos generadores de ruido en el edificio

### 3.1 Flujo alrededor de la estructura

La interacción entre el flujo de aire y una estructura puede dar como resultado un desprendimiento de vórtices con una escala similar a las dimensiones de la estructura. Estos vórtices se emiten con una frecuencia característica, que depende de la geometría del obstáculo y de la velocidad del flujo incidente sobre él. En el caso del edificio, el número de Strouhal ( $St = f \cdot D / U$ ) presenta un valor del orden de 0,12, por lo que para los valores de interés del ancho del obstáculo  $D$  y de la velocidad del viento  $U$ , la frecuencia de emisión de estos vórtices así como del movimiento y campo de presiones oscilatorio que induce, sería inferior a 1 Hz.

### 3.2 Vibración de las placas de vidrio

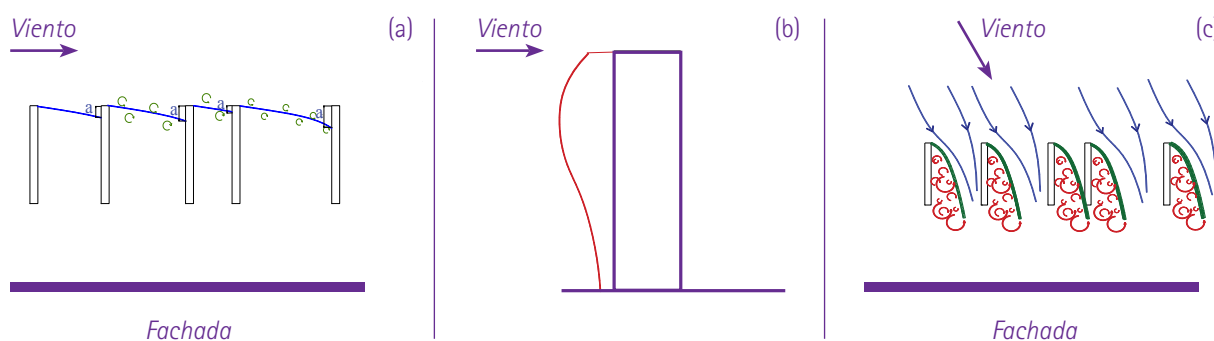
La vibración de una componente de una estructura puede dar lugar a una emisión acústica debido a la oscilación del campo de presiones que induce en el aire, así como la ocurrencia de impactos. Las placas de vidrio están sujetas por sus extremos empotradas en alojamientos metálicos y vinculados por un pegamento que se interpone entre el vidrio y el metal. Si se supone que las placas de vidrio se encuentran doblemente empotradas, con una luz de 3,2 m, un ancho de 19 cm y un espesor de 16 mm, su frecuencia propia sería del orden de 5 Hz. Si todas las placas de un piso vibraran en su modo normal (se determinó según SIMIU; SCANLAN, 1986), la emisión acústica total sería del orden de 40 dB.

### 3.3 Flujo alrededor de las placas y procesos de emisión acústica

Interesa analizar dos situaciones de interacción entre el viento y las placas de vidrio que componen el parasol, como son cuando el viento escurre paralelo a la fachada donde se ubican las placas y cuando el viento presenta una dirección cercana a la normal a dicha fachada. En la **Figura 3(a)**, se presenta el corte con un plano horizontal de algunas de las placas que se muestran en la **Figura 2 (a)**. Cuando el viento escurre alrededor de una de las placas, corriente abajo se genera lo que se denomina una capa de corte. Entre las placas y la fachada, el aire está básicamente en reposo. Cuando el viento pasa por una placa corriente abajo se produce una mezcla, debido a la existencia de la capa de corte, que hace que el aire se ponga en marcha hasta cierta distancia desde el borde exterior de la placa. Básicamente, el flujo se desarrolla por encima de la línea azul, estando en reposo por debajo, es decir que en la zona más próxima a la fachada el aire presenta menores velocidades. El flujo entonces interactuaría con una porción de la placa plana de altura "a" como se indica en la **Figura 3(a)**. Como consecuencia de esa interacción se emiten vórtices de esa escala espacial y que presentan una frecuencia de emisión que cambia con la velocidad del viento. Para velocidades de viento de 4 m/s a 7 m/s se espera una emisión de vórtices en el rango de frecuencias de 200 Hz a 500 Hz; mientras que para velocidad de viento entre 7 m/s y 11 m/s se espera una emisión de vórtices en el rango de frecuencias de 500 Hz y 800 Hz.

Cuando el viento resulta próximo a la normal al edificio, se establece un flujo alrededor de las placas cuya intensidad dependerá, entre otros aspectos, del campo de presiones que se establece sobre la fachada del edificio. En la **Figura 3 (b)**, se presenta en forma esquemática la distribución del valor medio de la presión que se establecería sobre la fachada de un edificio debido a su interacción con el viento, cuando la dirección de este es próxima a la normal a la fachada. La distribución de presión presenta un máximo a una altura del orden del 66 % de la altura del edificio (SIMIU; SCANLAN, 1986; HOLMES, 2007), lo que corresponde al piso 6 del edificio objeto de análisis.

**Figura 3 – Flujo del viento paralelo a la fachada del edificio (a); Distribución de la presión del viento sobre la fachada de un edificio debido a la interacción con el viento (b); Flujo de viento perpendicular a la fachada del edificio (c)**



Fuente: elaborado por los autores

A partir de un ángulo de ataque relativamente pequeño del flujo alrededor de las placas se podría producir la entrada en pérdida, tal como se presenta en forma esquemática en la **Figura 3 c**. Esto induce una importante producción de vorticidad, así como una contracción del flujo. Asociado a estos procesos, se producirían emisiones acústicas con frecuencias de entre 400 Hz y 700 Hz (LARATO et al. 2017).

### 3.4 Flujo a través de mallas

Cuando un flujo se desarrolla a través de una malla, se produce la formación de vórtices de diversas escalas como puede ser las dimensiones del paso de la malla o las dimensiones de las barras o hilos que componen la malla.

Este piso técnico se extiende a lo largo de todo el ancho del edificio, es decir que tiene del orden de 30 m de longitud y 65 cm de ancho. La malla está constituida por placas y alambres de 3 mm de espesor con paso de 12 cm y 6 cm. Como consecuencia del campo de presiones que se esquematiza en la **Figura 3 b** se produciría un flujo sobre la fachada en la dirección vertical que en su recorrido pasaría a través de estos pisos técnicos. La intensidad de este flujo dependería de la diferencia de presiones que a su vez depende del valor de la velocidad del viento a la altura del techo del edificio. Las frecuencias de los vórtices que se emitirían en la malla serían inferiores a 100 Hz para velocidades del viento de hasta 10 m/s, y de 1600 Hz y 2600 Hz para los emitidos por los hilos a velocidades del viento de 6 m/s y 10 m/s respectivamente.

### 3.5 Ruido emitido por resonadores

En el edificio de interés entre los parasoles de vidrio y la fachada se genera un espacio de 65 cm de longitud y de un ancho igual al ancho del edificio. En la **Figura 4**, se presenta una fotografía del edificio durante una etapa de la construcción, cuando aún no habían sido instalados todos los parasoles. En esa fotografía se indicó la ubicación del Piso 9, así como una viga que se ubica por encima de ese piso. Por delante de la viga, se ubican los parasoles, por debajo de la viga hay un piso técnico, pero por encima se encuentra abierto. Ese espacio así definido oficiaría de tubo abierto por ambos lados, es decir el lado de los parasoles y el lado superior. En la misma figura se señalan las dos zonas laterales del piso 9, en las cuales se formarían tubos abiertos, en este caso lateralmente hacia la zona donde se ubican los sistemas de aire acondicionado. En el resto de los pisos, el espacio entre los parasoles y la fachada actuaría como un tubo cerrado. Todos estos tubos tendrían una longitud de 65 cm de longitud. En Fernández, Sánchez, y Gilberto (2011) se presentan las características de resonadores acústicos de diversas geometrías. Un caso particular de resonadores son los tubos, cuyas frecuencias propias dependen de si son cerrados por un extremo o abiertos por ambos.

En la **Tabla 1**, se presenta la frecuencia que tendría el modo fundamental de vibración de cada tipo de tubo, así como los primeros armónicos.

Figura 4 – Detalle piso 9, edificio durante la etapa de construcción



Fuente: elaborado por los autores

Tabla 1 – Frecuencia de vibración de cada tipo de tubo (Hz)

Modo	Tubo abierto	Tubo cerrado
Fundamental	264	131
Primer armónico	528	395
Segundo armónico	791	660
Tercer armónico	1055	923

Fonte: elaborado pelos autores

## 4 Mediciones de campo

Se realizó un monitoreo de larga duración de niveles de presión sonora que se complementó con mediciones puntuales en sitios y momentos de interés. Las mediciones de niveles de presión sonora se realizaron con dos equipos analizadores de Clase 1 (según norma IEC 61672): para el monitoreo continuo se empleó un sonómetro marca Casella CEL 63-C y para las mediciones puntuales, un sonómetro marca Brüel y Kjær modelo 2250. En todos los casos se trabajó atendiendo a las precauciones y recomendaciones de rigor para medición de niveles sonoros. Las condiciones atmosféricas se tomaron según datos de la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Carrasco ubicada en altura a 10 m y aproximadamente a 1 km del edificio. Se obtuvieron medidas locales de velocidad del viento y temperatura ambiente con un equipo portátil Extech EN 300.

## 4.1 Características de los eventos de interés

Se realizaron al menos 10 campañas de medición, las cuales se basaron en registrar el mayor tiempo posible en diferentes puntos del edificio y en su entorno con el objetivo de captar el fenómeno al momento de generarse. El sonómetro Casella fue ubicado sucesivamente en tres puntos: el primero, en el piso 9, en el cual se buscó verificar si la fuente de ruido efectivamente se encontraba en este piso o próximo a él; y los otros dos puntos restantes en planta baja, sobre el estacionamiento del edificio y en el obrador, colocando el micrófono a unos 6 m de altura.

## 4.2 Medición Piso 9, sonómetro fijo

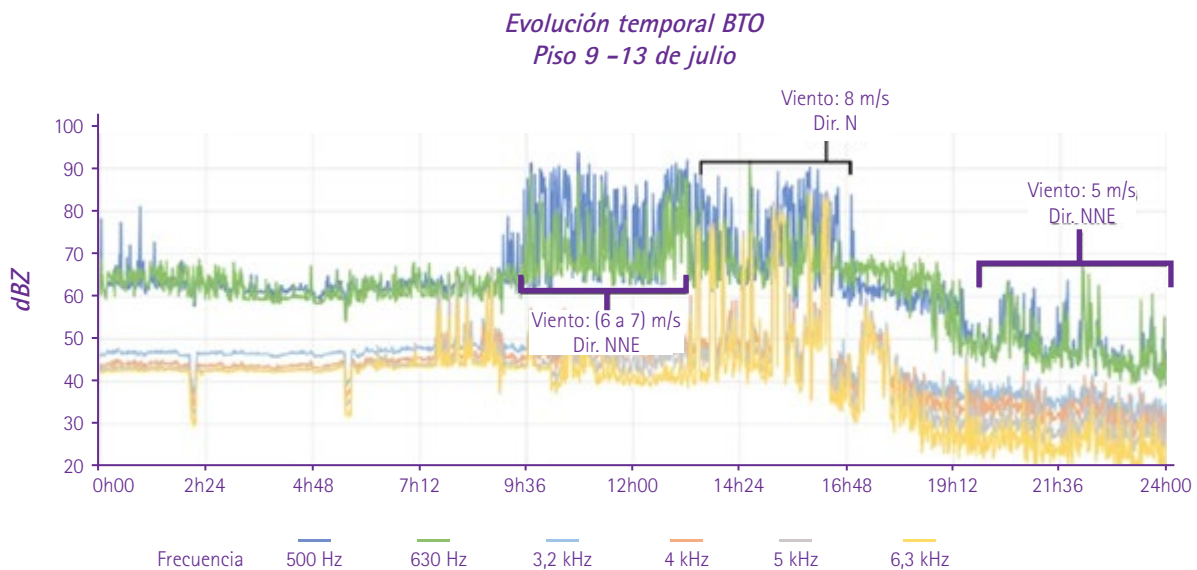
Se presentará uno de los resultados de las mediciones realizadas en el piso 9, las cuales sirven para comprender el fenómeno generado. Se presenta un registro de 9 días consecutivos, a partir del día 11 de julio hasta el día 19 de julio (inclusive) de 2017. A continuación, se presentarán algunos resultados representativos que indican las frecuencias predominantes al momento que se "dispara" el evento de ruido para diferentes condiciones ambientales.

En la **Figura 5**, se presenta la evolución en el tiempo que presentó cada componente espectral de la intensidad sonora medida. A partir de las 9h30 los niveles de presión sonora en escala A se "disparan", superando los 90 dBA, relacionándolo efectivamente con el evento de ruido. En ese momento, la estación meteorológica del Aeropuerto de Carrasco indicó una velocidad de viento de 6 m/s (medida a 10 m de altura) con dirección NNE, o sea, prácticamente perpendicular a los parasoles del edificio, correspondiente al caso esquematizado en la **Figura 3(a)**, siendo esta velocidad suficiente para que se produzca una emisión de vórtices en ese intervalo de frecuencias mencionado en el punto 3.3. Este evento perduró hasta las 18 h aproximadamente. Se presenta el gráfico de evolución temporal de las frecuencias de interés en la **Figura 5**, en la cual se observan claramente los dos tipos de ruido que se percibían: tonos agudos relacionados a altas frecuencias, 3,2 kHz a 6,3 kHz, y otros no tan agudos, asociados a las bandas de tercio de octava (BTO) de 500 Hz y 630 Hz.

Según la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Carrasco a partir de las 9h30 hasta las 14h00 el viento presentó una dirección NNE con velocidad en el entorno de los 6 m/s y 7 m/s a 10 m de altura (Evento 1), a partir de las 14h00 el viento aumenta su velocidad a 8 m/s y rota al N (Evento 2), enfrentando con cierta inclinación a la fachada del edificio. A partir de ese horario se observa claramente cómo las altas frecuencias elevan sus niveles y las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz tienen un leve descenso, pero de todas formas persisten. Esta condición perdura hasta las 18h00, momento en que la velocidad de viento desciende a 5 m/s. A partir de las 21h00 aproximadamente, la estación meteorológica del Aeropuerto de Carrasco indica un cambio de dirección de viento a NNE, con velocidades entre 5 m/s a 6 m/s, lo que dispara el evento en las frecuencias medias, pero con menor intensidad.



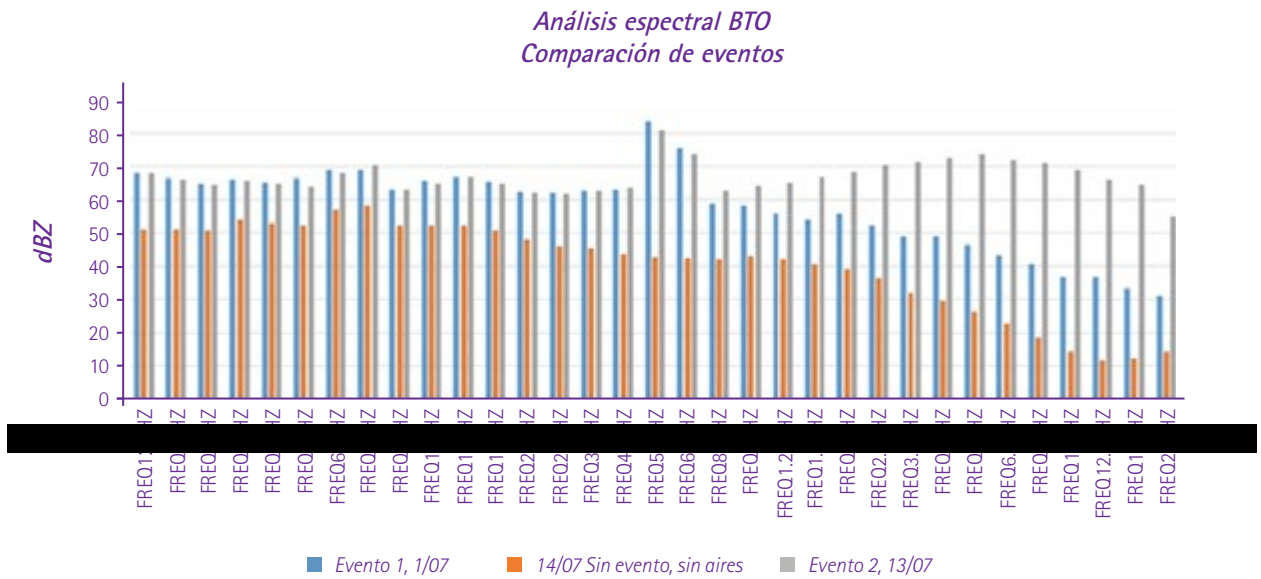
Figura 5 – Evolución temporal en BTO de interés, piso 9 (a); análisis espectral BTO (b)



**Fuente:** elaborado por los autores

En el gráfico de la **Figura 6**, se presenta un análisis espectral de los dos eventos de ruido generados el domingo 13 de julio. Los mismos se comparan con un periodo de tiempo registrado el día 14 de julio donde no hubo otras fuentes de ruido (ni de obra, ni de aire acondicionado). Se consideró como ruido de fondo, la madrugada del 14 de julio. En ese período la Estación Meteorológica de Carrasco registró una velocidad de viento cercana a los 4 m/s con dirección WSW la cual fue rotando, hasta posicionarse de dirección S alrededor de las 5 h. Durante todo el día la dirección predominante del viento fue del S y SE. En estas situaciones no se registraron eventos que pudieran dar lugar al fenómeno acústico. En el gráfico se observa que el evento 1 (barras azules) presenta elevados niveles (entre 75 dBZ y 85 dBZ) en las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz. Cuando la dirección del viento cambia al N con velocidad de 8 m/s, se observa un leve descenso en los niveles de 500 Hz y 630 Hz y un aumento considerable en los niveles de las frecuencias más altas (lo que explica el ruido más agudo).

Figura 6 – Comparación de eventos



Fuente: elaborado por los autores

En la **Tabla 2**, se presenta el nivel equivalente ponderado en escala A junto con los niveles máximos y mínimos de cada evento. Además se presentan las características del viento dadas por la estación meteorológica del Aeropuerto.

Tabla 2 – Niveles medidos para cada evento identificado (dBA)

13 de julio 2017	Evento 1	Evento 2	14 de julio (base)
$L_{Aeq}$	81,2	83,2	51,7
$L_{AFMax}$	97,8	97,4	71
$L_{AFMin}$	64,4	55,7	35,3
Caract. del viento	Vel. 6 m/s a 7 m/s Dir. NNE	Vel. 8 m/s Dir. N	Vel. 4 m/s Dir. S y SE

Fuente: elaborado por los autores

### 4.3 Análisis de registros

Se realizó una caracterización de las diferentes fuentes de emisión de ruido vinculadas a la interacción entre el viento y el edificio. Como fue mencionado, entre estas fuentes de emisión de ruido se identificaron unas de tipo sincrónica y otras de tipo resonante. Las primeras cambiarían su frecuencia con, por ejemplo, la velocidad de viento, en tanto las segundas presentarían una frecuencia constante. En la **Figura 7**, se resumen las frecuencias predominantes según la dirección del viento sobre la fachada principal, presentándose además el nivel de presión sonora en escala A registrado para una velocidad de viento medida a 10 m de altura.

**Figura 7** – Frecuencias predominantes emitidas para diferentes condiciones de viento



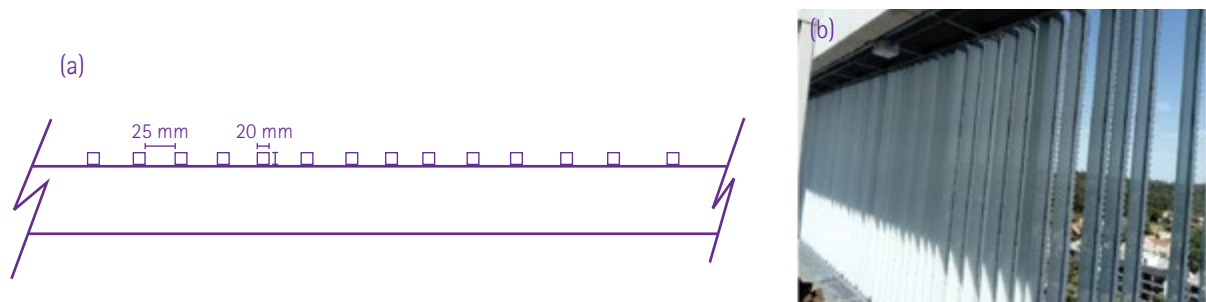
*Fuente: elaborado por los autores*

Como se observa, existe una simetría para la emisión de ruido con un eje imaginario que pasa en forma perpendicular a la fachada principal del edificio. Para direcciones de viento entre NNE (prácticamente paralelo a la fachada principal) y N, las frecuencias que se perciben son las de 500 Hz y 630 Hz; para dirección del viento en el rango N al NNW, aparece, además de la emisión de ruido del caso anterior, el denominado "pitido" el cual corresponde a frecuencias más altas (3,2 kHz, 4 kHz, 5 kHz y 6,3 kHz); con vientos prácticamente perpendiculares a la fachada, o sea en el rango con dirección NNW a dirección O, nuevamente el ruido que se percibe se vincula a las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz.

## 5 Medida de mitigación empleada y resultados

A partir de las posibles fuentes de emisión de ruido vinculadas a esta interacción se identificaron unas de tipo sincrónica y otras de tipo resonante. La forma de modificar el resonador sería obturando la entrada de la señal fluctuante al tubo. Para esto se podría disponer una placa apoyada en los parasoles, en principio, en la zona de la viga superior y en las zonas laterales del piso 9. A los efectos de modificar el excitador se recomendó instalar generadores de vorticidad sobre el borde exterior de cada placa de vidrio (**Figura 8**). Este generador de vorticidad estaría compuesto de piezas cúbicas o de alguna forma alternativa, de 2 cm de lado. El espacio entre piezas cúbicas, sería de 25 mm. El dimensionado de estos elementos se vinculó a la escala de los vórtices que deberían ser generados a los efectos de disipar los vórtices causantes de las dimensiones acústicas.

**Figura 8 -** Generador de vorticidad propuesto, esquema (a) y fotografía una vez instalado (b)



**Fuente:** elaborado por los autores

La segunda recomendación fue la seleccionada y puesta en práctica. Los dispositivos generadores de vorticidad se instalaron en la totalidad del piso 9 y sobre la viga superior (**ver Figura 8 b**). A partir del mes de octubre, una vez instalada la medida de mitigación recomendada, se comenzaron con mediciones de niveles de presión sonora de larga duración, tanto en planta baja (zona del obrador y estacionamiento) como en el piso 9. Durante todas las campañas de medición realizadas en el periodo de dos meses se encontraron varios eventos en los cuales el viento predominante adquirió direcciones y velocidades de interés. En ninguna de estas situaciones se produjo el fenómeno.

## 6 Conclusiones

En base al resultado de las mediciones y a su análisis realizado, se puede afirmar que las emisiones acústicas registradas en el edificio eran debidas a la interacción entre el flujo de viento y los parasoles ubicados en la fachada principal. Se encontró que existe una simetría para la emisión de ruido con un eje imaginario que pasa en forma perpendicular a la fachada principal. Las frecuencias identificadas se pueden agrupar en dos categorías: frecuencias bajas a medias (500 Hz y 630 Hz), y frecuencias altas (3,2 kHz a 6,3 kHz).

Fueron registrados altos niveles de presión sonora durante ciertos eventos, por ejemplo para la condición de viento con dirección del NNW y velocidad 8 m/s (29 km/h) se registraron niveles máximos de 97 dBA en el piso 9, siendo esta energía suficiente para que se perciba, al menos desde planta baja, con una alta intensidad.

Dados estos resultados y según lo presentado, las medidas de mitigación se orientaban en eliminar al resonador y/o al excitador. Se decidió actuar sobre el excitador, instalando un generador de vorticidad en la totalidad de los parasoles del piso 9, con características recomendadas. En los siguientes, dos meses se realizaron mediciones de larga duración en el edificio y en su entorno, no encontrando indicios de que el fenómeno se haya generado nuevamente.

## 7 Referencias

FERNÁNDEZ, D.; SÁNCHEZ, I.; GILBERTO, L. **Análisis, diseño y aplicación de resonadores acústicos**. Córdoba: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Córdoba, Argentina, 2011.

HOLMES, J. D. **Wind loadings of structures**. 2. ed. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2007.

LARATO, A.; ARJOMANDI, M.; CAZZOLATO, B.; KELSO, R. Self-noise and directivity of simple aerfolis during stall: an experimental comparison. **Applied Acoustic**, v. 127, p. 133-146, 2017.

SIMI, E.; SCANLAN, R. **Wind effects on structures**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.