

RUIDOS MOLESTOS DEBIDO A LA INTERACCIÓN DEL FLUJO DEL VIENTO CON LA FACHADA DE UN EDIFICIO

José Catalado Ottieri, Marcos Raúl Lisboa, Alice Elizabeth González

IMFIA – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República. Montevideo, URUGUAY
Correo electrónico del autor principal: jcataldo@fing.edu.uy

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de las emisiones acústicas generadas por la interacción entre el viento y la fachada de un edificio de 90 m de altura aproximadamente, ubicado en la ciudad de Montevideo. En la azotea de dicho edificio existe un helipuerto, y está rodeada por una placa calada de 4.85 m de altura. Una vez construido el edificio se manifestaron quejas por ruidos molestos por parte de los vecinos y población trabajadora en el propio edificio.

A partir de mediciones de niveles de presión sonora en el sitio y de la caracterización física de los posibles emisores acústicos presentes, se identificó que las emisiones acústicas se asociaban a un fenómeno causado por vientos de velocidades superiores a los 16 m/s y de dirección específica, generando elevados niveles de presión sonora en frecuencias superiores a los 4000 Hz, luego de su pasaje por la estructura metálica con perforaciones ubicada en el contorno de la azotea del edificio. Estos estudios fueron complementados con mediciones en túnel de viento utilizando para ello un modelo físico construido con la misma placa calada, lo cual permitió verificar los resultados obtenidos.

Palabras-clave: Interacción viento-estructuras, emisiones acústicas, mediciones acústicas

Abstract

Acoustic emissions analysis produced associated to wind-structure interaction around a 90 m high building located in Montevideo city was done. In the top of the building there is a heliport surrounded by a 4.85 m high openwork fence. After the building was built several complaints from neighbors and people working in the building were filed.

To identify and characterize possible sources from where the acoustic emissions are released, an acoustic measurement campaign was undergone. An acoustic emission associated to meteorological events with wind velocity over 16 m/s and from SOUTHWEST, was identified. This emission was characterized by very high acoustic pressure levels and frequency of 4000 Hz. The identified process was the flow across the openwork fence. These studies were completed with tests in a wind tunnel.

Keywords: wind-structure interaction, acoustic emissions, acoustic measurements

PACS no. 43.28.Ra

1 Introducción

El sonido resulta de la propagación de un movimiento oscilatorio de partículas a través de un medio material, el cual lleva asociado un campo oscilatorio de presiones. Dicho movimiento y campo de presiones oscilatorios pueden ser producidos por diversos motivos como puede ser la vibración de una superficie sólida, la implosión o explosión de burbujas de vapor o las oscilaciones de flujos debido a la ocurrencia de inestabilidades, entre otros. Una vez producido ese campo oscilatorio se muestra que el mismo se propaga a una velocidad, característica del medio en el cual se desarrolla, que se denomina velocidad del sonido. El sonido que se produce se caracteriza entonces por la frecuencia del movimiento oscilatorio y la amplitud del mismo. Como ocurre con otros movimientos oscilatorios tipo onda, como resulta el sonido, se producen procesos de interferencia constructiva y destructiva, refracción y difracción.

El movimiento oscilatorio antes mencionado da lugar a un flujo de potencia por unidad de superficie que rodea el sitio donde se produce tal movimiento o emisor, asociado a la amplitud de la fluctuación de presión y a la amplitud de la fluctuación de la velocidad a la cual se mueven las partículas que oscilan. Integrando ese flujo de potencia sobre una superficie que envuelve al emisor es posible estimar la potencia emitida, la cual suele expresarse como nivel de potencia en dB.

En este trabajo se presenta el análisis de las emisiones acústicas generadas por la interacción entre el viento y la fachada de un edificio de 90 m de altura aproximadamente, ubicado en la ciudad de Montevideo. En la azotea de dicho edificio existe un helipuerto, y está rodeada por una placa calada de 4.85 m de altura. Una vez construido el edificio, se manifestaron quejas por ruidos molestos por parte de los vecinos y población trabajadora en el propio edificio.

En efecto, de acuerdo con las quejas formuladas por la población que habita en la zona circundante al edificio, la ocurrencia de ciertos eventos meteorológicos genera emisiones sonoras de una intensidad tal que se perciben auditivamente a nivel del suelo en el entorno de dicha estructura.

Ante la complejidad de un fenómeno cuyo origen no se lograba determinar en forma intuitiva in situ, se solicita al Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR, el análisis de las causas del mismo y la propuesta de medidas de mitigación. En consecuencia, se realiza una caracterización física de los posibles diferentes emisores sonoros en el edificio en estudio, describiendo físicamente el proceso de producción de sonido y estimando la frecuencia e intensidad del mismo. Además, se desarrollaron un conjunto de mediciones para caracterizar el sonido que se registra en zonas de interés del edificio y en particular, en la azotea del mismo.

En base a las caracterizaciones físicas de los emisores identificados y del resultado de las mediciones, se propone un diagnóstico así como algunas medidas de mitigación que se podrían aplicar.

2 Características de la fuente de ruido

2.1 Descripción del edificio

El lugar de emplazamiento de esta torre involucra a un complejo edilicio comprendido por varias torres de similares características. En la figura 1 puede observarse el complejo y el edificio en estudio señalado.

Cabe señalar que el edificio indicado en la figura 1(a) con el círculo más pequeño presenta una altura de 120 m y se ubica aproximadamente hacia el SUROESTE de la torre en estudio, que se identifica con el círculo mayor.

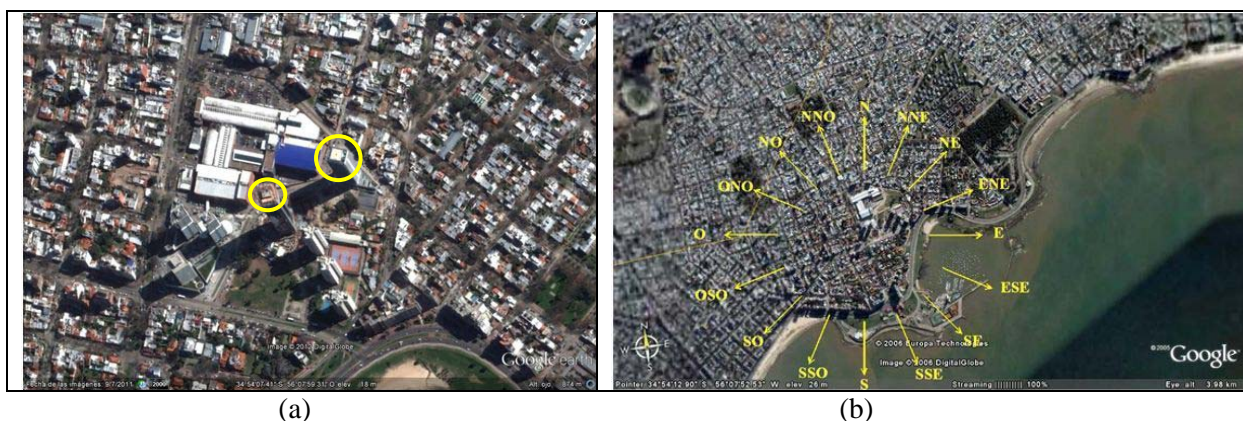


Figura 1 - Ubicación del edificio.

La torre en estudio tiene una altura total respecto a la cota del terreno circundante de aproximadamente 88 m. De éstos, 81 m aproximadamente corresponden a la diferencia de alturas entre el terreno y el nivel de piso de su azotea; ésta está rodeada por un pretil de 1.6 m de alto, por encima del cual se ubica una placa metálica calada de 4.85 m de altura apoyada en tubos verticales que dejan un vano perimetral abierto de 0.8 m entre el borde superior del pretil y el borde inferior de dicha placa. Es decir: los primeros 81 m sobre el piso corresponden al edificio propiamente dicho, seguidos por 1.6 m de pretil también de mampostería, un vano libre de 0.8 m y por último, la placa metálica calada de 4.85 m de altura [1].

En el centro de la azotea se ubica un helipuerto. En la figura 2 se aprecia una imagen del edificio.

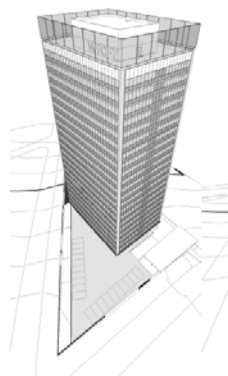


Figura 2 – Esquema del edificio (reproducido de [1]).

La placa calada ubicada en la parte superior del edificio es de Aluzinc de 0.5 mm de espesor, con pliegues horizontales, cada 4 cm aproximadamente, dando una apariencia trapezoidal tal como se observa en la figura 3(b). Cada placa se compone de cuatro tramos, dos de 5.24 m de ancho y dos de 6.24 m de ancho y todos de 4.85 m de alto. Los apoyos están constituidos por tubos verticales de aproximadamente 5 m de longitud y de sección recta rectangular de 50 mm por 100 mm. En la figura 3(a) se aprecia la forma en la cual se sujeta esta placa.

El calado de la placa consiste en orificios circulares de 2.5 mm de diámetro ubicados en filas separadas 5 mm y en cada fila la separación entre orificios es de 5 mm.

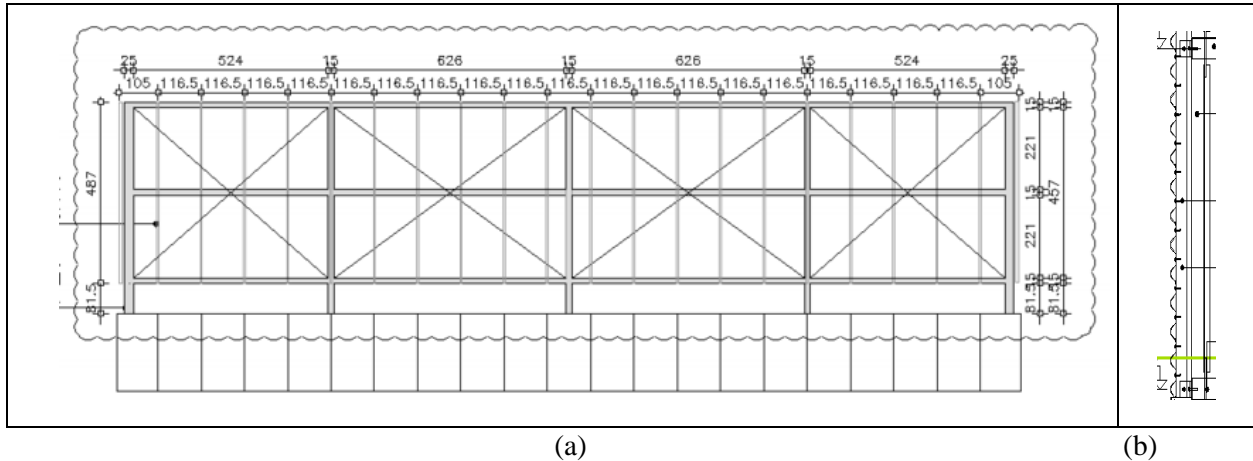


Figura 3 – Alzado de una placa: (a) vista frontal; (b) corte (reproducido de [1]).

En la azotea, en el espacio alrededor del helipuerto se encuentran instaladas dos torres de enfriamiento del sistema de aire acondicionado, así como las bombas y ventiladores asociados a su operación. Asimismo, en esa zona se identifican algunas impulsiones del sistema de ventilación.

A nivel de calle se identifican otras descargas del sistema de ventilación.

2.2 Posibles fuentes emisoras

En la descripción realizada en la sección anterior se identifican diversos sitios donde podrían ocurrir emisiones acústicas.

2.2.1 Flujo alrededor de la estructura

Como consecuencia de la interacción entre el flujo y una estructura se puede producir la emisión de vórtices de dimensiones o escalas similares a la de la estructura [2]. Los vórtices se emiten con una frecuencia característica de la geometría del obstáculo y que resulta proporcional a la velocidad del flujo incidente sobre el obstáculo.

Si D es el ancho del obstáculo, U la velocidad del viento incidente y f la frecuencia de emisión de vórtices, se define el número de Strouhal [3] como:

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

2.2.2 Emisiones acústicas en tubos de soporte

Los tubos de sección recta rectangular que soportan la placa calada pueden actuar como emisores en caso que se establezcan las condiciones para que ocurra un flujo fluctuante en su interior. Cuando el viento escurre alrededor del tubo y se produce un cambio en la velocidad, dependiendo de las condiciones de frontera que se imponen al tubo, como podría ser un extremo abierto y otro cerrado, esta onda permanece moviéndose en su interior. La frecuencia de la onda que se produciría dentro de cada tubo depende de la longitud del mismo y de la velocidad a la cual se mueven las ondas. Esta velocidad de la onda o celeridad, para un gas ideal -como en este caso puede asumirse que se comporta el aire-, depende de la temperatura.

2.2.3 Vibraciones de las placas caladas

El flujo de aire que escurre alrededor de las placas caladas resulta turbulento, motivo por el que se produce una carga fluctuante sobre las placas que presentará una respuesta no estacionaria y en consecuencia se establecerá una vibración inducida por la acción del viento.

A los efectos de caracterizar la componente turbulenta de velocidad se halla la intensidad de turbulencia como:

$$I = \frac{\sqrt{w^2}}{v} \quad (2)$$

A la altura donde se ubica la placa la intensidad de turbulencia sería 0.25.

2.2.4 Flujo a través de los orificios.

Cuando el flujo escurre alrededor del edificio se establece sobre su envolvente un campo de presiones. Si P es la diferencia entre la presión en un punto de la envolvente y U es la velocidad media del viento a la altura del edificio, se define el coeficiente de presión de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (3)$$

Tanto la frecuencia con la cual se emiten los vórtices como el nivel de intensidad sonora que se generará, dependerán del valor de la velocidad del aire.

Cada orificio de la placa calada podría ser considerado un foco de emisión de ruido. Cuando el viento sopla del SUROESTE o del SURSUROESTE, sólo una parte de la placa estaría afectada por el viento; se trata de un sector en el que se tienen aproximadamente 500.000 orificios.

3 Trabajo de campo

En cuanto a niveles de presión sonora, primeramente se realizó un monitoreo continuo de larga duración el cual se complementó con mediciones puntuales en el sitio y durante los momentos de interés, en los días de ocurrencia de eventos cuyas quejas debido a los ruidos molestos por parte de la población trabajadora en el edificio y las que habitan en la zona eran más acentuadas.

En la imagen satelital mostrada en la figura 4 se identifican los 4 puntos principales de medición ubicados en la azotea del edificio, abarcando por tanto las 4 zonas definidas por su geometría.

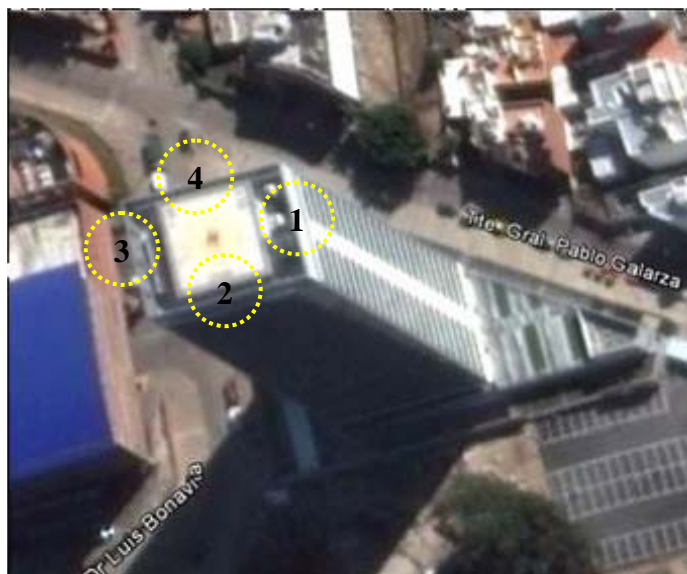


Figura 4 – Principales puntos de medición en la azotea del edificio.

3.1 Relevamiento inicial: mediciones sonoras puntuales

Durante las mediciones realizadas al iniciar los trabajos de campo se registró en el sitio una temperatura de 25 °C y velocidad del viento máximo de 1,2 m/s. Una síntesis de los resultados obtenidos en esa primera jornada de mediciones puntuales se muestra en la tabla 1.

El punto 2', ubicado en la zona 2 de la azotea del edificio, se corresponde con el lugar donde se encuentran las dos rejillas de ventilación de los equipos de aire acondicionado.

En esta campaña de medición inicial se constató que en todas las zonas de la azotea -en concordancia con las ubicaciones de las salidas de ventilación de los aires acondicionados- la existencia de un tono en 8000 Hz correspondiente al funcionamiento de dichos equipos.

Tabla 1 – Síntesis de resultados: primeras mediciones puntuales

Punto de Muestreo	$L_{AFm\acute{a}x}$	L_{Aeq}	$L_{AFm\acute{i}n}$	L_{AF10}	L_{AF50}	L_{AF90}
Punto 1	78,0	65,0	63,0	65,6	64,8	64,3
Punto 2	73,7	66,8	64,4	68,3	66,3	65,4
Punto 2'	75,2	73,9	72,8	74,3	73,9	73,5
Punto 3	75,3	60,9	58,0	62,5	60,1	59,3
Punto 4	83,8	67,4	63,6	69,4	65,4	64,8

3.2 Monitoreo Continuo

A partir del relevamiento inicial y durante los próximos 11 días, se registraron los niveles de presión sonora en el punto 4, con el objetivo de obtener datos en período de tiempo extendido como para permitir valorar acústicamente el fenómeno en estudio. Para ello se instaló un sonómetro marca Casella CEL-633C, adecuado para el monitoreo ambiental continuo, en la sección media de la zona correspondiente a dicho punto y enfrente a un vano abierto entre apoyos de la placa calada.

En base al análisis de datos relevados, y observaciones de personas que trabajan en el lugar, pudo verificarse que el evento objeto de estudio no ocurrió, por lo que estas mediciones se adoptaron como base comparativa para la evaluación frente a las mediciones del fenómeno en cuestión.

3.3 Registro del evento de interés

Durante las observaciones de campo realizadas in situ (en la azotea), se pudo apreciar eventos que podrían ser una causa potencial de las molestias a nivel de planta baja. Velocidades de viento que en ocasiones alcanzaron los 19 m/s, generaban sonidos agudos al encontrar a su paso la placa metálica calada. En particular, pudo apreciarse que dicho sonido se generaba concretamente en el vértice correspondiente a los lados de las zonas 4 y 3 de la azotea (Punto 5) cuando el viento alcanzaba una velocidad de por lo menos 16 m/s en dirección SUROESTE. Los resultados de esta medición se presentan en la figura 5 y en las tablas 2 y 3.

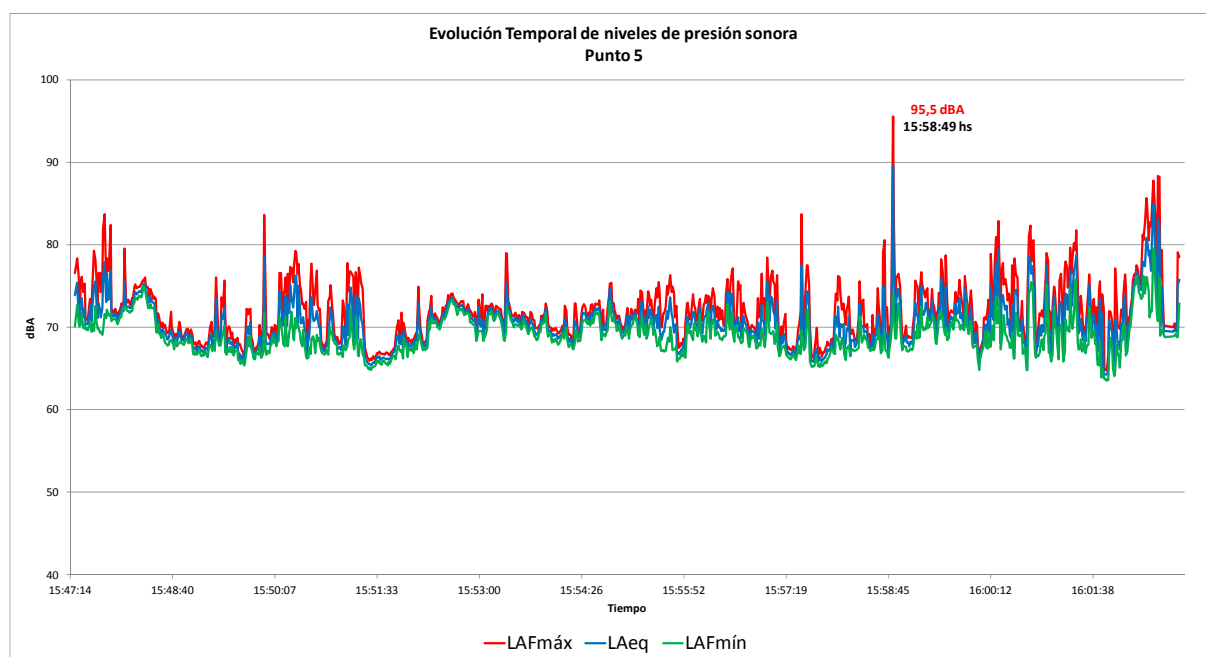


Figura 5: Evolución temporal de niveles de presión sonora en Punto 5 registrados durante el evento de interés.

El evento problema, que auditivamente se percibió como un silbido agudo muy breve al registrarse una velocidad de viento de 16 m/s, corresponde al pico de 96 dBA que aparece en el registro temporal de la Figura 5. Este silbido se caracteriza espectralmente en la figura 6(b). Nótese la presencia de un tono puro claramente identificable en 5000 Hz.

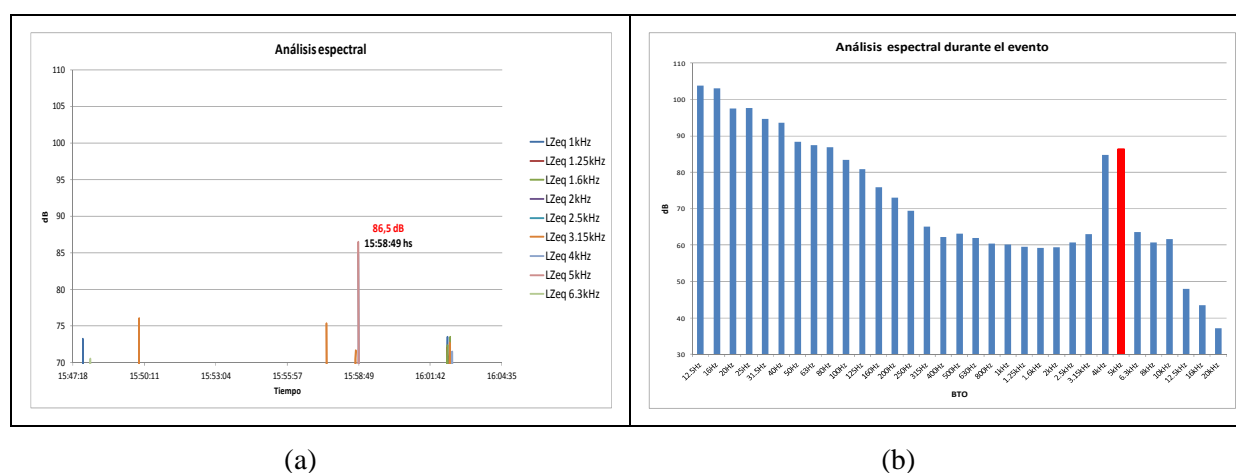


Figura 6 – (a) Niveles de presión sonora en el Punto5 durante el evento problema, en BTO [dBZ]; sólo se presentan los niveles superiores a 70 dBZ. (b) Composición espectral en BTO del evento problema (L_{Zeq}).

Se destaca que los eventos de viento con velocidad superior a 25 m/s resultan principalmente de direcciones SUR y SUSUROESTE, tal como se observa en la figura 7.

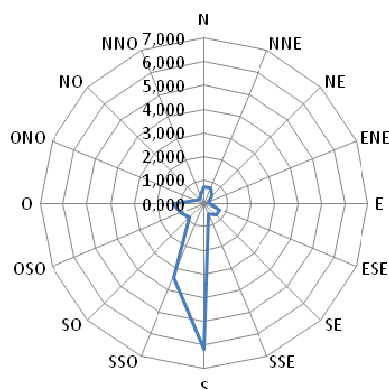


Figura 7 – Rosa de los vientos de eventos con velocidad superior a 25 m/s.

Tabla 2 - Valores de los principales parámetros medidos en el Punto 5

Punto 5	$L_{AFmáx}$	L_{Aeq}	$L_{AFmín}$	L_{AF10}	L_{AF50}	L_{AF90}
registro del evento	95,5	71,9	63,5	74,0	70,1	67,1

Tabla 3 - Caracterización del evento de interés medido en el Punto 5

Punto 5	$L_{A1eq}-L_{Aeq}$	Impulsos	$L_{Ceq}-L_{Aeq}$	Bajas Frecuencias	Tonos Puros
registro del evento	4	Sí	20	Sí	5000 Hz

4 Análisis de resultados

A partir de la caracterización de las diferentes fuentes de emisión de ruido que pudieron ser identificadas, fueron obtenidas diferentes frecuencias características y diferentes niveles de intensidad sonora. En la tabla 4 se resumen estos resultados.

Tabla 4 – Emisores acústicos caracterizados

Posible fuente de emisión acústica	Frecuencia (Hz)	$L_{z,p}$ (dB)
Flujo alrededor del edificio	1	---
Tubo de soporte (velocidad del viento 25 m/s)	36	73
Vibración de la placa calada	112	57
Vano bajo la placa calada (velocidad del viento 25 m/s)	19	---
Orificios (en 10 m de placa y velocidad de viento 25 m/s)	4800	101

Estas emisiones producirían niveles de presión sonora a nivel de suelo en el entorno del edificio del orden de 49 dB, inferiores a los establecidos en la tabla 4.

Entre las emisiones acústicas caracterizadas, la asociada al flujo a través de esos orificios es la que podría dar lugar a una emisión acústica que podría ser claramente perceptible por una persona a nivel del suelo en el entorno del edificio y con niveles sonoros equivalentes del orden de 53 dBA. Asimismo, y en base a los resultados obtenidos en mediciones de campo, tanto los niveles sonoros como la frecuencia característica de ese ruido se asemejan también a las características del ruido que se podría asociar al flujo a través de los orificios de la placa calada.

5 Ensayo en laboratorio: túnel de viento

A los efectos de verificar el comportamiento de placa calada como emisor acústico, se realizó un ensayo en un túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, cuyo esquema se muestra en la figura 8. Este túnel de viento tiene una zona de trabajo de 0.9 m de ancho, 1.0 m de alto y 4 m de longitud. En su entrada se ubica un enderezador de flujo tipo panal de abeja constituido por tubos de sección recta hexagonal de 26 mm de lado y con un área libre del 86.2 % del área total de pasaje. En la figura 8, las líneas punteadas refieren a la ubicación de la placa objeto de estudio (placa calada) y de una reja destinada a la producción de turbulencia. Los puntos indican las ubicaciones en que se realizaron mediciones.

Las mediciones de niveles de presión sonora se realizaron con sonómetros de tipo 1: un sonómetro Brüel & Kjaer 2250 localizado dentro del túnel de viento en la posición indicada en la figura 8, en el centro de la sección recta, y con otro sonómetro Casella CEL-633C, ubicado en el exterior, 2 m corriente abajo de la salida del túnel de viento. En forma complementaria, se midió la velocidad del aire con un anemómetro manual, en el sitio donde se ubicó el micrófono del sonómetro en el exterior del túnel.

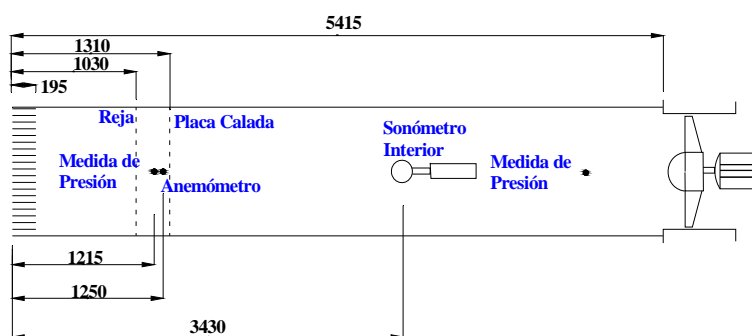


Figura 8 – Esquema del túnel de viento

Se efectuaron tres ensayos en tres condiciones de trabajo diferentes. En la condición inicial, denominada “condición de base” (ver tabla 5), se realizó el ensayo sin rejilla ni placa calada, a los efectos de determinar el ruido de base. En la segunda condición se instaló sólo la placa calada, y en la tercera condición se agregó a la anterior, la rejilla para producción de turbulencia, de paso de 16 mm y diámetro de hilo de 2 mm (ver tabla 6).

Tabla 5 – Caracterización de la Condición de Base.

Frecuencia impuesta al regulador de frecuencia (Hz)	Velocidad de giro del ventilador (rpm)	Velocidad del aire en el interior (m/s)	Velocidad del aire en el exterior (m/s)	L_{Zeq} (dB)
20	400	2.6	2.0	79.7
30	600	4.0	4.3	79.8
40	800	5.3	5.6	89.4
50	1000	6.5	5.9	93.5
60	1200	7.7	7.2	96.7
70	1400	8.9	8.4	103.3

En la tabla 6 se presenta, para cada condición de operación del ventilador y para cada situación ensayada, la frecuencia donde se ubica el máximo registrado en el espectro y el nivel correspondiente a la amplitud del mismo en dBZ. Nótese que la frecuencia mencionada es proporcional a la velocidad del aire dentro del túnel de viento cuando se trabaja con la placa calada colocada.

Tabla 6 – Frecuencia en que ocurre el máximo nivel de presión sonora para distintas frecuencias de giro del ventilador

Frecuencia impuesta al regulador de frecuencia (Hz)	Velocidad de giro del ventilador (rpm)	Placa calada		Placa calada y Reja	
		Frecuencia (Hz)	L (dBZ)	Frecuencia (Hz)	L (dBZ)
30	600	2500	64.6	2000	63.8
40	800	3150	69.0	3150	69.0
50	1000	4000	71.3	4000	71.3
60	1200	5000	72.3	5000	72.3
70	1400	6300	72.8	6300	72.8

A partir de la velocidad del aire en los orificios se estimó el valor de la frecuencia característica de la emisión acústica para las diferentes velocidades de giro del ventilador consideradas, las que se

presentan en la tabla 7. Nótese que los valores de frecuencia resultan similares a los determinados a partir de la medición.

Asimismo, en la tabla 7 se consigna una estimación de la intensidad sonora obtenida por aplicación del modelo de flujo a través de orificios. En este caso, los niveles estimados son superiores a los medidos, pero muestran un comportamiento similar. Por otro lado, se observa un crecimiento del nivel de intensidad sonora con la velocidad en el orificio similar al determinado durante la medición.

Tabla 7 – Frecuencias deducidas a partir de la velocidad del aire en orificios.

Frecuencia impuesta al regulador de frecuencia (Hz)	V_{orificio} (m/s)	Frecuencia (Hz)	L (dB)
30	7.6	3030	77.8
40	9.9	3957	80.8
50	12.1	4838	83.1
60	14.3	5723	85.0
70	15.5	6197	85.9

6 Conclusiones

En base a los desarrollos de caracterización presentados y a los resultados de las mediciones en campo y en túnel de viento, las emisiones acústicas que se registran en el edificio en estudio se corresponden con el fenómeno esperable debido al flujo del aire en los orificios de la placa calada.

La frecuencia e intensidad de dicha emisión resulta creciente con la velocidad del viento.

Para una velocidad de viento de 25 m/s a nivel de la azotea del edificio, la frecuencia de la emisión se estima en el orden de 5000 Hz y el nivel de intensidad sonora perceptible a nivel del suelo resulta del orden de 53 dBA. Se destaca que si la velocidad del viento se reduce a 20 m/s, el nivel de intensidad sonora resulta inferior a 50 dBA.

Los eventos de viento de más de 25 m/s resultan con mayor probabilidad de ocurrencia de dirección SUR y SURSUROESTE.

Para las mencionadas direcciones, el edificio próximo al de estudio (de 120 m de altura) lo protege del viento, tal como se observa en la figura 7, a excepción en una zona de la cara expuesta al OESTESUROESTE. La parte no protegida sería aproximadamente un cuarto del ancho que se ubica más sobre el NORTE.

Para reducir los niveles sonoros perceptibles a nivel del suelo y asociados con el fenómeno analizado, se propone reducir las emisiones que resultan del flujo de aire en los orificios de la placa calada instalada en la azotea del edificio estudiado. Concretamente, como medida inicial se plantea cubrir los orificios situados en el cuarto NORTE de la cara de dicha placa expuesta al OESTESUROESTE.

Agradecimientos

A los arquitectos Ernesto Kimelman y Ruben Flom por la confianza depositada en nuestro Instituto, y a la empresa SACEEM que efectuó la consulta que dio lugar a este trabajo.

Referencias

- [1] Cataldo, José; Lisboa, Marcos; González, Elizabeth. *“Análisis de emisiones acústicas en el edificio World Trade Center Free Zone”*. Montevideo, Uruguay, 2012.
- [2] Simiu and Scanlan, *“Wind Effects on structures: An introduction to wind engineering”*, John Wiley & Sons, 1986.
- [3] Cataldo, José; Acosta, Álvaro; González, Elizabeth; Usera, Gabriel; Jorysz, Andrés; Rivero, Susana; Díaz, Verónica; Krecl, Patricia; Martínez, Silvana; López, Carlos; Spangenberg, Ana; Targino, Admir. *“Programa de Evaluación de Calidad del Aire aplicado a la República Oriental del Uruguay”*. Informe Final. Convenio MVOTMA – UROU (Facultad de Ingeniería), 2000.