



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE MECÁNICA DE LOS FLUÍDOS E
INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental
Estudio Acústico de la interacción entre el
viento y las edificaciones

Autor: Pablo Gianoli Kovar

Tutores:

José Cataldo Ottieri

Alice Elizabeth González

Montevideo, Uruguay

2019

PÁGINA DE APROBACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba la tesis de investigación:

Título:

Autor:

Tutores:

Carrera: Maestría en Ingeniería Ambiental

Puntaje:

.....
.....
.....

Tribunal:

Profesor

.....

(Nombre y firma)

Profesor

.....

(Nombre y firma)

Profesor

.....

(Nombre y firma)

Fecha

.....

Tabla de contenido

RESUMEN	7
Palabras clave.....	7
INTRODUCCIÓN	15
1 SECCIÓN I - MARCO TEÓRICO -	17
1.1 El viento atmosférico	17
1.1.1 Ecuación de movimiento del viento.....	18
1.1.2 Aproximaciones del flujo atmosférico	20
1.1.2.1 Aproximación Geostrófica.....	20
1.1.2.2 Aproximación Gradiente	20
1.1.3 Capa de Ekman.....	21
1.2 Capa límite.....	22
1.3 Concepto de turbulencia.....	24
1.3.1 Origen de la turbulencia.....	26
1.3.2 Expresión de magnitudes en flujos turbulentos y mecanismos de producción de turbulencia	27
1.4 Conceptos de niveles de presión sonora	36
1.4.1 Hipótesis de la acústica lineal.....	37
1.4.2 El sonido	39
1.4.3 Ondas estacionarias en tubos	41
1.5 Aeroacústica	42
1.5.1 Ecuación de Lighthill.....	43
2 -SECCIÓN II- Procesos y fenómenos de generación de ruido	47
2.1 Interacción entre un flujo de aire y diferentes obstáculos	47
2.2 Actualidad -el viento y las edificaciones-	54
2.3 Diferentes abordajes al problema.....	58
2.4 Comentarios y síntesis.....	93
3 Sección III -Casos de estudio en Uruguay-	94
3.1 Equipamiento utilizado	94
3.2 Casos de estudio en Uruguay	95
3.2.1 Introducción al problema, Caso I	95
3.2.2 Descripción del edificio	96
3.2.3 Procesos generadores de ruidos en el edificio.....	98
3.2.4 Trabajo de campo.....	103

3.2.5	Estudio en túnel de viento	109
3.2.6	Análisis del clima de viento en la zona del edificio	113
3.2.7	Conclusiones.....	114
3.3	Caso II, introducción al problema	115
3.3.1	Descripción del edificio	115
3.3.2	Procesos generadores de ruidos en el edificio.....	118
3.3.3	Trabajo de campo.....	123
3.3.4	Conclusiones.....	132
3.3.5	Medidas de mitigación propuestas	134
4	Líneas de trabajo a futuro	139
5	Referencias Bibliográficas	141

RESUMEN

El ruido es un agente contaminante muy fácil de producir ya que se requiere muy poca energía para generarlo y, sin embargo, es muy difícil de combatir. Principalmente porque las medidas para combatirlo son costosas al requerir alternativas ingenieriles y arquitectónicas sofisticadas, pero, sobre todo, la mayoría de las veces también requiere la modificación de hábitos, usos y costumbres de la población, lo que no es nada fácil de lograr.

La evolución de las técnicas constructivas ha llevado a que los diseños de las estructuras sean cada vez más complejos, lo que resulta en una mayor ocurrencia de ruidos inducidos por su interacción con el viento, lo que puede ser una molestia para los receptores sensibles en la misma construcción o en su entorno. Por lo general, el ruido es inducido por el viento que fluye sobre los diferentes elementos edilicios, como puede ser la fachada. A pesar de esto, este fenómeno a menudo se pasa por alto en el diseño de estas estructuras.

El Departamento de Ingeniería Ambiental junto con la Sección Hidromecánica y Eolodinámica del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), en los últimos años ha trabajado en dos problemas de emisiones acústicas entre la interacción del viento con nuevas construcciones en Uruguay y teniendo además consultas internacionales sobre el tema.

Dado que la bibliografía en el tema es escasa y se continúa con el desarrollo de nuevas técnicas constructivas, ocasionado un aumento de casos de emisiones sonoras debidas a la interacción entre el viento y estas estructuras, no solo a nivel internacional sino que también a nivel Nacional, se decidió presentar en esta Tesis de Maestría un análisis exhaustivo de este problema. Además, se presentarán los casos de estudio desarrollados por el IMFIA en Uruguay.

Palabras clave

Aeroacústica. Ruido en estructuras. Acústica ambiental. Niveles de presión sonora. Molestia por ruido.

SUMMARY

Noise is a very easy pollutant to produce since very little energy is required to generate it. However, it is very difficult to control it, mainly because the measures to combat it are costly by requiring complex engineering and architectural alternatives, but mostly because it also requires changing the habits, usages and customs of the population; this is not easy to achieve.

The evolution of construction techniques has led to the designs of the structures becoming increasingly complex, resulting in a greater occurrence of noise induced by their interaction with the wind, which can be a nuisance for sensitive receptors in the same construction or in its environment. In general, the noise is induced by the wind that flows over the different building elements, such as the facade. This phenomenon is often overlooked in the design of these structures.

The Department of Environmental Engineering together with the Hydromechanical and Eolodynamic Section of the Institute of Fluid Mechanics and Environmental Engineering of the Faculty of Engineering (IMFIA, Faculty of Engineering, UdelaR), have worked in recent years on two problems of acoustic emissions related by the interactions of wind with new constructions in Uruguay. They have also received several international consultations on the subject.

Bibliography on the subject is scarce and the development of new construction techniques continues. This is the cause of an increase in cases of noise emissions due to the interaction between the wind and these structures, not only at the international level but also at the national level.

An exhaustive analysis of this problem is presented in this Master's Degree Thesis. In addition, the case studies developed by IMFIA (UdelaR) in Uruguay are also discussed.

Tabla de Figuras

Figura 1-1. Sistemas de circulación de aire a gran escala en la atmósfera (Fuente: https://lageografia.com/geografia-fisica/viento)	17
Figura 1-2. Sistema de coordenadas solidario a la Tierra (Fuente: Cataldo, J, 2015).	18
Figura 1-3. Isolíneas de presión para cada hemisferio (Fuente: Redibujado de Cataldo,J, 2015).	20
Figura 1-4. Esquema de flujo en un ciclón y anticiclón para cada hemisferio (Fuente: Redibujado de Cataldo,J, 2015).	21
Figura 1-5. Estructura vertical de la capa límite planetaria. Fuente: Facultad de Ciencias y Matemáticas de la Universidad de Chile.....	21
Figura 1-6. Espiral de Ekman. Fuente: Facultad de Ciencias y Matemáticas de la Universidad de Chile.....	22
Figura 1-7. Distribución de velocidad sobre una placa plana. (Cataldo, 2016).	22
Figura 1-8. Experiencia de Reynolds (Fuente: Universidad de Valladolid. http://www.uva.es/export/sites/uva/).....	24
Figura 1-9. Flujo sobre una placa plana. (Schlichting, 1968).	25
Figura 1-10. A) Perturbación en la capa de corte. B) Evolución de la inestabilidad de la capa de corte (Fuente: Universidad de Valladolid. http://www.uva.es/export/sites/uva/).....	26
Figura 1-11. Obstáculo que se encuentra inmerso en un flujo de viento. (Cataldo, 2015).	28
Figura 1-12. Mecanismos de producción turbulenta de origen termodinámicos. (Cataldo, 2015).	28
Figura 1-13. Distribución de temperatura en altura. (Cataldo, 2015).	29
Figura 1-14. Ley de estado de la atmósfera. (Cataldo, 2015).	29
Figura 1-15. Evolución temporal de velocidad y temperatura (Parque Eólico, San José) Fuente: Gianoli (2015).....	31
Figura 1-16. Distribución media de la velocidad media en altura. (Extraído de Simiu and Scanlan, 1989).	32
Figura 1-17. Perfiles de intensidad de turbulencia longitudinal. (Extraído de Simiu and Scanlan, 1989).	33
Figura 1-18. Espectro de potencia de la velocidad del viento para diferentes tipos de terreno. (Cataldo, 2015).	33
Figura 1-19. Espectro de potencia adimensional (Cataldo, 2015).	34
Figura 1-20. Parámetros de la curva de ajuste de escala integral (Counhian, 1969).	35
Figura 1-21. Vibración de partículas "P" alrededor de su posición de equilibrio en un tiempo t_0 . (Extraído de Arias Hernández, J, 2016)	39
Figura 1-22. Variaciones de presión en el aire (compresión y rarefacción) en el caso de un movimiento armónico simple (Maggiolo, 2004).	40
Figura 1-23. (a) Primeros 3 modos de vibración, tubo abierto. (b) Primeros 3 modos de vibración, tubo cerrado.	41
Figura 1-24. Separación del campo de flujo real. (Argüelles Díaz et al, 2004)	44
Figura 2-1. Diagrama de retroalimentación, generación del sonido aerodinámico. R. Chanaud (1970)	49
Figura 2-2. Desprendimiento de vórtices debido a la interacción de un fluido en movimiento y un cilindro. Redibujado de Chanaud (1970).....	50
Figura 2-3. Sonido clase II; tono de borde (Chanaud, 1970).....	51

Figura 2-4. Corriente de aire de alta presión a través de un paso estrecho (Hobert C. Chanaud, 1970).	51
Figura 2-5. Generación de sonido aerodinámico clase III (Chanaud, 1970).	52
Figura 2-6. Silbato Francis Galton (Fuente imagen a): http://dicci-eponimos.blogspot.com/2010/04/silbato-de-galton.html/ Fuente imagen b) "Oddities of Sound" in The Electrical Experimenter magazine, The Experimenter Publishing).....	53
Figura 2-7. Problemas típicos de generación de sonido debido al desprendimiento de vórtices. Adaptado de Howe (2003).	54
Figura 2-8. Beetham Tower. Manchester, Reino Unido (Fuente imagen: https://www.manchestereveningnews.co.uk/).....	55
Figura 2-9. Estructura en forma de cuchilla en la azotea de Beetham Tower. (Fuente imagen: https://www.manchestereveningnews.co.uk/).....	55
Figura 2-10. Beetham Tower. Manchester, Reino Unido (Fuente imagen: https://www.manchestereveningnews.co.uk/).....	56
Figura 2-11. Edificios de gran porte de La Haya en los Países Bajos (Fuente imagen: Google)..	56
Figura 2-12. Pasos elevados peatonales de la autopista Eastlink en Melbourne, Australia (Fuente imagen: Google Earth).	57
Figura 2-13. Paso peatonal elevado de la autopista Eastlink en Melbourne, Australia en el 2019 (Fuente imagen: Google).....	57
Figura 2-14. Generación de ruido debido al pasaje de un flujo de aire a través de una cavidad, de encastre o sección típica, o cierre por contacto. (Rofail and Tonin, 2000).....	58
Figura 2-15. Espectro en BTO. Abertura de 30 cm con una velocidad de viento de 8 m/s. (Rofail y Tonin, 2000).....	59
Figura 2-16. Espectro en BTO. Abertura de 1 cm con una velocidad de viento de 8 m/s (Sección típica). (Rofail y Tonin, 2000).	60
Figura 2-17. Espectro en BTO. Abertura de 1 cm con una velocidad de viento de 8 m/s (Sección de contacto). (Rofail y Tonin, 2000)	60
Figura 2-18. Nivel de presión sonora del tono generado para diferentes condiciones de velocidad y ancho de espacio. (Editado de Rofail y Tonin, 2000)	61
Figura 2-19. Nivel de presión acústica vs ancho de separación. (Editado de Rofail y Tonin, 2000).	61
Figura 2-20. Resultado de pruebas en marco de ventana. (Parthasarathy et al, 1985)	62
Figura 2-21. Paso peatonal autopista en Eastlink, Melbourne. Mitchell et al. (2010).	66
Figura 2-22. Primer espectro registrado en uno de los pasos peatonales en la autopista de Eastlink en Melbourne (Editado de Mitchell et al. 2010).....	66
Figura 2-23. Sección transversal detallada en vista en planta que ilustra los parámetros físicos de la balastrada y el modelo propuesto para el mecanismo de generación de ruido. (Editado de Mitchell et al., 2010).	67
Figura 2-24. Diagrama de mecanismo de retroalimentación para la generación de ruido. Redibujado basado en Mitchell (2010).	69
Figura 2-25. Medida propuesta por Mitchell et al. (2010). Serie de aletas más profundas espaciadas a lo largo de la balastrada.....	70
Figura 2-26. Modelo a escala 1:2 de 6 aletas en el túnel de viento anecoico de la Universidad de Adelaida, Mitchell et al. (2010).	70
Figura 2-27. Espectro de ruido correspondiente al modelo en túnel. Velocidad del flujo incidente 17,5 m/s a 26 °, Mitchell et al. (2010).....	71
Figura 2-28. Prueba de la medida seleccionada. Aletas dentadas Mitchell et al. (2010).	72

Figura 2-29 Espectro de ruido correspondiente al modelo en túnel para la medida seleccionada con aletas dentadas. Velocidad del flujo incidente 17,5 m/s a 26 °, Mitchell (2010).	73
Figura 2-30. (a) velocidad local de flujo en la superficie de una torre a escala, modelo sin accesorios. (b) escenario donde una alta velocidad Vbh incide directamente sobre un accesorio de la fachada. Redibujado de Fricke (2010).	74
Figura 2-31. Relación entre la velocidad del viento y Número de Reynolds con diferentes dimensiones transversales de aleta de fachada. Extraído de Coppa (2015)	77
Figura 2-32. Rango potencial de frecuencias emitidas para diferentes espesores y velocidades de viento. Extraído de Coppa (2015).....	78
Figura 2-33. Esquema de sincronización de frecuencia y nivel de presión sonora relacionado durante la condición de bloqueo. Extraído de Coppa (2015).	79
Figura 2-34. Modelo Estudiado por Paduano et al. Redibujado de Paduano et al. (2012).....	80
Figura 2-35. Esquema de fachada con parasoles, incidencia del viento, oscilacion del flujo transversal inducido y desprendimiento de vórtices. Redibujado de Coppa (2015)	81
Figura 2-36. (a) Evolución temporal del C_p evaluado en la aleta flujo abajo. (b) FFT de la C_p . Extraído de Coppa (2015).....	82
Figura 2-37. Espectro de C_p con condiciones establecidas durante el bloqueo, desencadenando la producción de resonancia aeroacústica. Extraída de Coppa (2015)	83
Figura 2-38. Campo de vorticidad a 25 m / s y $\theta = 67^\circ$ sin excitación acústica. Extraído de Coppa (2015).	84
Figura 2-39. Campo de vorticidad a 25 m/s, $\theta = 67^\circ$ con excitación de $A = 10\% V_{viento}$ (es decir, 2,5 m/s) y $f_{exc} = 212$ Hz. Extraído de Coppa (2015).	85
Figura 2-40. Muestra del elemento de fachada de la planta baja y muestras de elementos de protección solar montados en el edificio. Bublic et al. (2016).....	86
Figura 2-41. Rosa del viento, estación meteorológica de Zagreb-Maksimír. Bublic (2016)	87
Figura 2-42. Montaje del parasol corto en escala 1:1 en túnel de viento. Bublic et al. (2016) ..	87
Figura 2-43. Elemento perforado a ubicarse en planta baja. Bublic et al. (2016)	88
Figura 2-44. Estructura con dos protectores solares perforados. Bublic et al. (2016)	88
Figura 2-45. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 5 m/s (Bublic, 2016). 89	
Figura 2-46. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 10 m/s. Bublic et al. (2016).	89
Figura 2-47. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 20 m/s. Bublic et al. (2016)	90
Figura 2-48. Análisis de FFT para una velocidad de 20 m/s y un ángulo de incidencia de 100° . Bublic et al. (2016)	90
Figura 2-49. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 20 m/s – Caso de dos parasoles - (Bublic et al., 2016).....	91
Figura 2-50. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 20 m/s – Caso del elemento de la fachada en planta baja- (Bublic et al. 2016)	92
Figura 3-1. Esquema del túnel de viento (dimensiones en mm).	95
Figura 3-2. Rosa de vientos en zona de estudio. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	96
Figura 3-3. Edificio estudiado. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	97
Figura 3-4. (a) Vista de la placa en perfil. (b) Vista frontal de una placa. Extraído de Cataldo et al. (2012)	97
Figura 3-5. Equipos de aire del edificio. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	98
Figura 3-6. Tubos soporte en azotea. Extraído de Cataldo et al. (2012)	99
Figura 3-7. Apoyos de placa calada. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	100

Figura 3-8. Campo de presiones sobre fachada frontal para viento del SUROESTE. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	102
Figura 3-9. Campo de presiones sobre la fachada corriente abajo para viento del SUROESTE. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	102
Figura 3-10. Flujo por un orificio. Extraído de Cataldo (2012).....	103
Figura 3-11. Puntos de registro. Editado a partir de Cataldo et al. (2012).....	104
Figura 3-12. Puntos de registro. Editado a partir de Cataldo et al. (2012).....	105
Figura 3-13. Puntos de registro. Editado a partir de Cataldo et al. (2012).....	105
Figura 3-14. Punto de registro del evento puntual. Editado a partir de Cataldo et al. (2012).....	107
Figura 3-15. Evolución temporal L_{Aeq} del evento puntual. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	108
Figura 3-16. Análisis espectral en BTO. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	108
Figura 3-17. Rosa de viento eventos con velocidad superior a 25 m/s. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	109
Figura 3-18. Esquema del túnel de viento durante los ensayos. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	109
Figura 3-19. Espectro correspondiente a una velocidad del flujo de aire de 2,6 m/s. Extraído de Cataldo et al. (2012).....	111
Figura 3-20. (a) Rosa de los vientos para frecuencias relativas de direcciones. (b) Rosa de los vientos para frecuencias relativas de direcciones y para velocidades medias horarias superiores a 20 m/s. Ambas en la azotea del edificio. Extraído de Cataldo et.al (2012).....	113
Figura 3-21. Ubicación edificio en estudio. Imagen extraída del Google Earth.....	116
Figura 3-22. Fachada principal del edificio. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	116
Figura 3-23. Plano, planta piso 9. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	117
Figura 3-24. Detalle parasoles de vidrio. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	117
Figura 3-25. Esquema del flujo alrededor de cada placa. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	119
Figura 3-26. Distribución de la presión del viento sobre la fachada de un edificio debido a la interacción con el viento. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	120
Figura 3-27. Esquema del flujo alrededor de placa para la condición de entrada en pérdidas. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	120
Figura 3-28. Piso técnico entre pisos. Extraído de Gianoli et al., 2017.....	121
Figura 3-29. Indicación de tubos. Extraído de Gianoli et al. (2017).....	122
Figura 3-30. Ubicación sonómetro CASELLA. (a) Azotea. (b) Planta baja, estacionamiento. Gianoli et al. (2017).....	123
Figura 3-31. Evolución temporal L_{Aeq} , 13 de julio. Gianoli et al. (2017).....	125
Figura 3-32. Evolución Temporal de L_p en BTO. Equipos de aire. Gianoli et al. (2017).....	125
Figura 3-33. Evolución Temporal de L_p en BTO. Evento de ruido. Gianoli et al. (2017).....	126
Figura 3-34. Análisis espectral en BTO. Comparación de eventos, 13 de julio. Gianoli et al. (2017).....	127
Figura 3-35. Evolución temporal de L_{Aeq} , 15 de julio. Gianoli et al. (2017).....	128
Figura 3-36. Evolución temporal de L_p en BTO, 15 de julio. Gianoli et al. (2017).....	128
Figura 3-37. Análisis espectral en BTO. Comparación de eventos, 15 de julio. Gianoli et al. (2017).....	129
Figura 3-38. Evolución temporal de L_{Aeq} , 16 de julio. Gianoli et al. (2017).....	130
Figura 3-39. Evolución Temporal BTO, 16 de julio. Gianoli et al. (2017).....	130
Figura 3-40. Análisis espectral comparativo en BTO, evento del 16 de julio. Gianoli et al. (2017).....	131
Figura 3-41. Mapa de ruido para diferentes situaciones atmosféricas. Gianoli et al. (2017).....	132
Figura 3-42. Diseño del generador de vorticidad propuesto. Gianoli et al. (2017).....	134

Figura 3-43. Dispositivos de vorticidad instalados en el piso 9. Gianoli et al. (2017).....	135
Figura 3-44. Evolución temporal BTO de interés. Casella en planta baja. Gianoli et al. (2017)	136
Figura 3-45. Evolución temporal de L_{Aeq} . Casella en planta baja. Gianoli et al. (2017).....	136
Figura 3-46. Evolución temporal BTO de interés. Casella en planta baja. Gianoli et al. (2017)	137
Figura 3-47. Comparación de L_{Aeq} antes y después de la medida de mitigación empleada en piso 9. Gianoli et al. (2017)	138

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores José Cataldo y Elizabeth González, por impulsarme a realizar este trabajo y su constante motivación y dedicación.

A Nicolás Rezzano por permitirme compatibilizar el día laboral con este trabajo de tesis y a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Ambiental por su interés y apoyo.

A Carolina y Luciana por su constante motivación, la cual se hizo sentir día a día durante este camino.

A mi familia por el apoyo incondicional y una dedicación muy especial a mi abuela Isabel y a mi abuela Olga, las cuales fueron, son y serán muy importantes en mi vida.

INTRODUCCIÓN

La información e investigaciones, en relación a la evaluación de las emisiones acústicas debido la interacción entre el viento y los edificios y/o de sus elementos que forman parte de los mismos, actualmente resulta acotada. Este tipo de estudio se encuentra concentrado principalmente en los tonos del paso de las palas de los aerogeneradores frente a la torre y en la aeroacústica en automóviles. En los últimos años se han construido estructuras edilicias con diseños audaces, ya sean con elementos incluidos sobre fachadas o intersticios en una estructura. El viento fluye a través de estos y en determinadas condiciones se genera un fenómeno acústico denominado por algunos autores como tono eólico o resonancia aeroacústica, teniendo la intensidad suficiente como para generar molestia en el entorno de la estructura, que, en algunos casos, esa distancia puede llegar a ser de kilómetros.

La función del ingeniero en estos casos, es prever los problemas potenciales con dichos componentes y diseñar una prueba para garantizar que todos los problemas de ruido se mitiguen antes de la construcción del edificio.

El objetivo general de esta tesis es contribuir a profundizar el desarrollo de la ingeniería del viento y su relación con la acústica ambiental. Particularmente se busca que el estudio de emisiones sonoras generadas por este fenómeno se tenga presente al momento de la realización de un estudio aerodinámico en estructuras.

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los diferentes eventos reportados recientemente a nivel mundial y las metodologías de abordaje de los diferentes autores citados en este trabajo.
- Analizar el fenómeno de emisión acústica en estructuras debido a la interacción viento/edificaciones ocurrido en nuestro país.

Se abordará el tema definiendo conceptos sobre el viento y el ruido, los cuales convergen en una línea de trabajo denominada aero-acústica, la cual tuvo como pionero al matemático James Lighthill. Dicho matemático incursionó en el tema alrededor de los años cincuenta del pasado siglo. Su teoría del ruido generado aerodinámicamente se basa en un desarrollo matemático y la introducción de una hipótesis física que se mencionará en este informe, siendo éste el puntapié inicial a futuros estudios a desarrollar sobre el tema.

Una vez realizada la introducción de conceptos, se plantearán los fenómenos acústicos ocurridos a nivel internacional, realizando un análisis de alguno de ellos, presentando, además, los diferentes métodos de abordaje al problema planteados por sus respectivos investigadores/autores. Además, se presentará el análisis de los casos de estudio realizados en Uruguay, donde se planteará la caracterización del problema, el desarrollo de la medida de mitigación y los resultados obtenidos al haber aplicado tales medidas.

La presente tesis incluye en una serie de secciones temáticas, donde se aborda los distintos aspectos relevantes de la investigación realizada. Éstas se desarrollan según la siguiente disposición y contenido:

Sección I: Marco teórico.

En esta sección se presentarán:

- Características del viento atmosférico. Los procesos y fenómenos que generarían la emisión de ruido entre la interacción del viento y estructuras.
- Metodologías para caracterizar el ruido, definiciones, parámetros utilizados y otros conceptos básicos.

Sección II: Presentación de los casos de estudio a nivel internacional.

- Diferentes abordajes al fenómeno.
- Estudios realizados a nivel internacional.

Sección III: Casos de estudio en Uruguay. El análisis de los procesos que origina el ruido entre la interacción del viento con edificaciones se abordaran con mediciones de campo en cada caso de estudio. Se presentarán medidas de mitigación para cada problema, con su respectiva evaluación.

Se presentarán las conclusiones finales del estudio así como futuras líneas de investigación a futuro.

1 SECCIÓN I - MARCO TEÓRICO -

En esta sección se describirá el viento como fenómeno y se introducirán los conceptos de capa límite y turbulencia. Además, se desarrollarán los conceptos de acústica, los cuales en conjunto con los primeros serán relevantes para el abordaje del tema central de este trabajo.

1.1 El viento atmosférico

Al momento de diseñar una estructura de gran porte se deben considerar las posibles afectaciones por parte de la naturaleza sobre la construcción. Por ejemplo, en países con alta actividad sísmica, es necesario considerar estos aspectos al momento del diseño tanto de estructuras medianas como de gran porte. Un aspecto que no suele dejarse de lado, es la carga que se establece como consecuencia de la interacción entre el viento y la estructura. Comparándola con actividades sísmicas, los efectos del viento sobre estructuras han generado aproximadamente la misma cantidad de daños, a pesar que los terremotos suelen aparecer con menos frecuencia que las fuertes tormentas de viento (Holmes, 2007).

El viento es el movimiento de aire relativo a la Tierra, impulsado por diferentes tipos de fuerzas, especialmente las generadas por diferencias de presión en la atmósfera, debido a un calentamiento diferencial de la superficie terrestre, lo que se le suma, además, las fuerzas debidas a la rotación de la Tierra, en especial la fuerza de Coriolis. Las diferencias en la radiación solar entre los polos y el ecuador producen diferencias de temperatura y presión, que en conjunto con la rotación de la Tierra, dan lugar a sistemas de circulación a gran escala en la atmósfera como se muestra en la Figura 1-1.

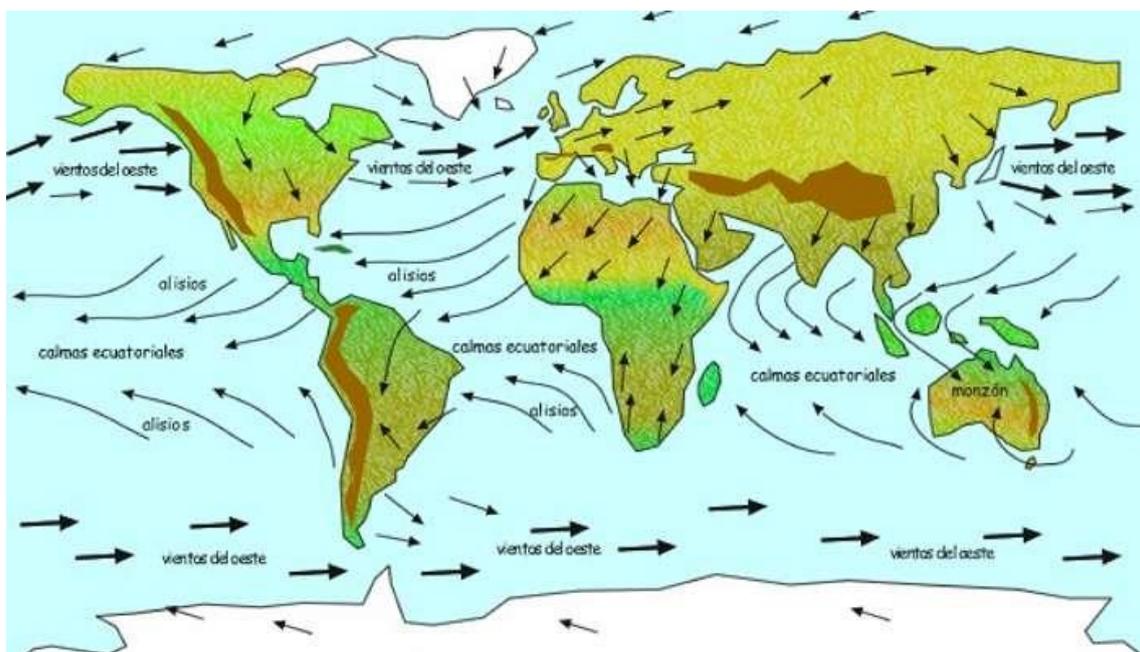


Figura 1-1. Sistemas de circulación de aire a gran escala en la atmósfera (Fuente: <https://lageografia.com/geografia-fisica/viento>)

1.1.1 Ecuación de movimiento del viento

Para comprender cómo se mueven las masas de aire en la atmósfera se presenta un breve análisis físico, con el cual se pretende entender el comportamiento del viento tanto a grandes alturas como sobre la superficie terrestre, siendo este último el más relevante para este trabajo.

Considerando una parcela de aire de masa m a la cual se le aplica una fuerza F , la misma experimenta una aceleración a , referido a un sistema de coordenadas inercial. Si se aplica la primera cardinal se obtendrá:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1.1)$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1.2)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_v + \vec{F}_g = -\nabla p + \mu \cdot \Delta \vec{v} - \rho \cdot g \cdot \vec{k} \quad (1.3)$$

Siendo F_p las componentes de la fuerza debida a la presión, F_v la fuerza debida a la viscosidad del aire y F_g la fuerza debida a la gravedad. μ es la viscosidad dinámica del aire y ρ la densidad del aire. En estas ecuaciones ∇p es el vector gradiente de presiones y $\Delta \vec{v}$ es el laplaciano del vector velocidad.

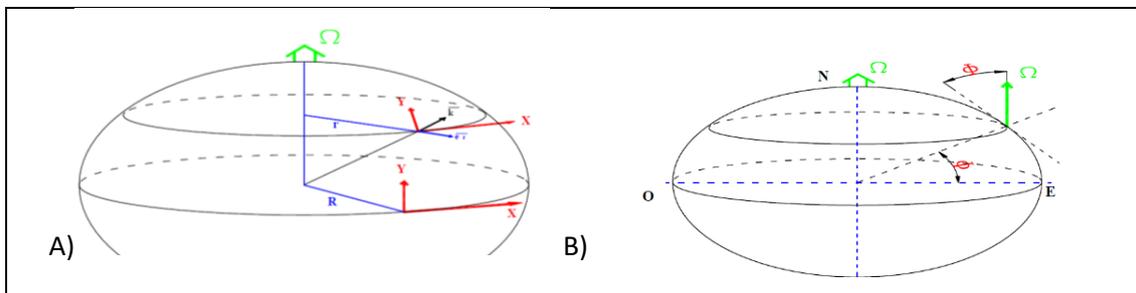


Figura 1-2. Sistema de coordenadas solidario a la Tierra (Fuente: Cataldo, J, 2015).

La velocidad del viento es la velocidad que adoptan las partículas de aire respecto a un referencial solidario a la Tierra. La Tierra rota con una velocidad angular de 7.3×10^{-5} rad/s, por lo que la velocidad absoluta se puede descomponer como la suma vectorial de la velocidad relativa (\vec{v}_R) y de la velocidad de transporte $\Omega \cdot r \cdot \vec{e}_x$. Por lo tanto, considerando el sistema de coordenadas solidario a la Tierra según la Figura 1-2 (A), la aceleración se expresa como:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}_R}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v}_R - \nabla \left(\frac{\Omega^2 r^2}{2} \right) \quad (1.4)$$

Donde el primer término representa a la aceleración relativa, el segundo a la aceleración de Coriolis y el tercero a la aceleración de transporte.

La ecuación (1.1) adopta la siguiente forma:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + 2\bar{\Omega} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial z} - \vec{g}^* \quad (1.5)$$

La resolución de esta ecuación permitiría deducir el vector velocidad relativa del aire respecto a la superficie de la Tierra, es decir, que permitiría determinar la velocidad del viento. Esta ecuación no tiene una solución general, pero presenta soluciones particulares que permiten describir el flujo atmosférico en muy diversas situaciones.

A los efectos de simplificar su resolución, se introducen escalas de las diferentes magnitudes que intervienen como sigue:

- L escala de longitud: $x, y, z = L.x^*, L.y^*, L.z^*$
- Ω escala de velocidad de giro: $\Omega = \Omega.w^*$
- P escala de presión: $p = P.p^*$
- V escala de velocidad: $v = V.v^*$

Las variables acompañadas de un asterisco (*) resultan del orden unidad y adimensionales. Sustituyendo cada variable en la ecuación (1.5) se tiene:

$$\frac{dv^*}{dt^*} + \frac{2\Omega L}{V} w^* \Lambda v^* = -\frac{P}{\rho V^2} \nabla^* p^* + \frac{\mu}{\rho L V} \frac{\partial v^*}{\partial z^*} - \frac{g^* L}{V^2} g^{**} \quad (1.6)$$

Este análisis permite identificar los términos que tienen mayor significación en diferentes procesos que ocurren en la atmósfera. Se analizarán procesos de diferente escala. Previo a esto se define el parámetro de Coriolis de la siguiente forma:

$$f = 2.\Omega.\text{sen}(\phi) \quad (1.7)$$

Si se toma el sistema de coordenadas tal cual lo indica la Figura 1-2 (B) la aceleración de Coriolis tendría signo positivo para sitios ubicados en el hemisferio Norte de la Tierra y negativo para el Sur. Si se introduce la aceleración de Coriolis y se realiza una descomposición según los ejes definidos anteriormente se obtiene:

$$\text{Según } x: \frac{du}{dt} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (1.8)$$

$$\text{Según } y: \frac{dv}{dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (1.9)$$

$$\text{Según } k: g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.10)$$

1.1.2 Aproximaciones del flujo atmosférico

Según el tipo de proceso y las hipótesis a considerar, a continuación se presenta un conjunto de eventos de significación para la caracterización y determinación del viento.

1.1.2.1 Aproximación Geostrófica

Esta aproximación implica suponer que el flujo es horizontal, o prácticamente paralelo al plano xy , donde se supondrá además que la fricción es despreciable y no existe aceleración.

Con estas hipótesis las ecuaciones (1.8) y (1.9) se aproximan con las siguientes expresiones respectivamente.

$$\text{Según } x: fV_g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.11)$$

$$\text{Según } y) fU_g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.12)$$

Como consecuencia el viento presenta una dirección igual a las isolíneas de presión como se muestra en la Figura 1-3.

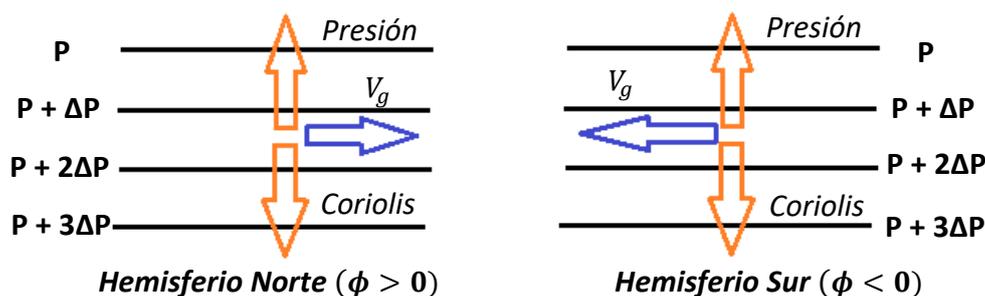


Figura 1-3. Isolíneas de presión para cada hemisferio (Fuente: Redibujado de Cataldo,J, 2015).

1.1.2.2 Aproximación Gradiente

Dado que las líneas de igual presión presentan formas cuasi-circulares, que encierran regiones de relativamente baja presión (ciclones) o de relativamente elevada presión (anticiclones) la hipótesis de flujo geostrófico debería modificarse, por lo que en este caso se debería considerar que en realidad el flujo experimenta una aceleración.

A continuación se presenta un esquema que indica la dirección que adoptaría el flujo en un ciclón y en un anticiclón para el hemisferio Norte y para el hemisferio Sur.

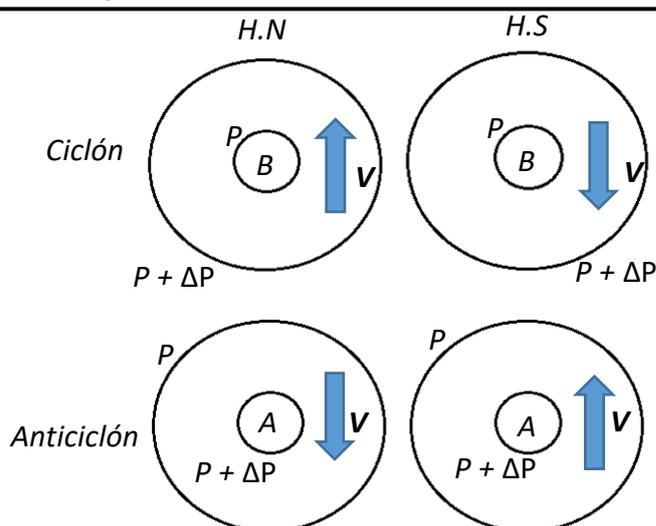


Figura 1-4. Esquema de flujo en un ciclón y anticiclón para cada hemisferio (Fuente: Redibujado de Cataldo,J, 2015).

1.1.3 Capa de Ekman

Conforme la altura aumenta, la fuerza de fricción, debida a la influencia de la superficie terrestre, disminuye, permitiendo que el viento real se aproxime más a la magnitud y dirección del viento geostrófico o del viento gradiente, acercándose a la dirección de las isobaras. Este fenómeno se conoce como el efecto de la Capa de Ekman.

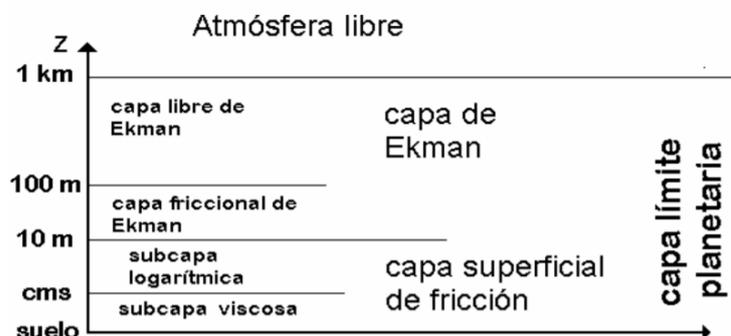


Figura 1-5. Estructura vertical de la capa límite planetaria. Fuente: Facultad de Ciencias y Matemáticas de la Universidad de Chile.

En la capa de Ekman, el balance está dado por la suma de las fuerzas de Coriolis, la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de fricción; para alturas menores la fuerza de fricción se hace dominante, mientras que en la parte superior el balance geostrófico es el que domina, por lo que se puede esperar que la dirección del viento vaya variando conforme la altura aumenta. Cuando se tienen condiciones ideales, esta variación del viento con la altura forma un giro que se conoce como la espiral de Ekman. En la espiral de Ekman, el viento sopla cruzando las isobaras de la alta a la baja presión, mostrando un ángulo máximo ($\sim 45^\circ$) cerca de la superficie gira hacia la derecha, en el hemisferio norte, conforme la altura aumenta. Este andamio se presenta en la Figura 1-6.

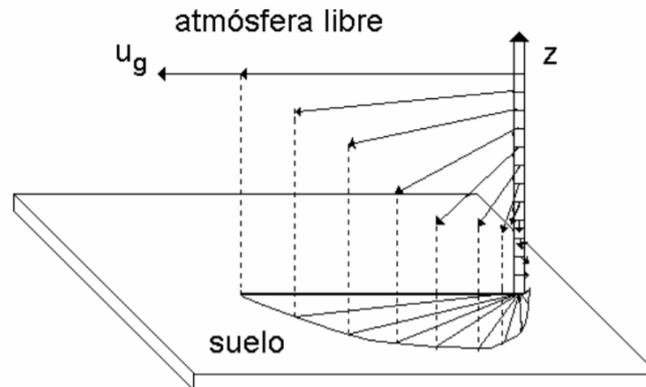


Figura 1-6. Espiral de Ekman. Fuente: Facultad de Ciencias y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Se puede concluir que las fuerzas que intervienen en el balance geostrofico y en el balance gradiente, son las de mayor importancia en el establecimiento del viento. Con ellos, se puede dar una primera explicación de los distintos fenómenos de escala sinóptica y planetaria en la atmósfera.

1.2 Capa límite

En un flujo que escurre sobre una superficie sólida se establece una región en la cual resultan significativos los efectos viscosos y en la cual la velocidad se reduce para posiciones más próximas a la superficie sólida. (Cataldo, J, 2016).

Considerando un flujo sobre una placa plana, la distribución de velocidades adopta la forma que se presenta en la Figura 1-7. Se observa que en una región próxima a la superficie la velocidad se reduce desde una cierta altura y para posiciones más próximas a la placa. Además, esta región presenta alturas mayores a medida que el sitio considerado se aleja en la dirección corriente abajo.

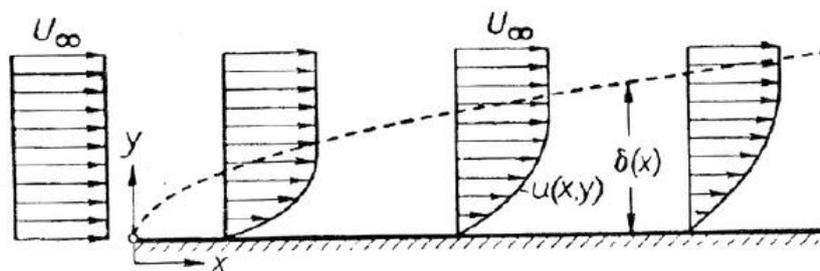


Figura 1-7. Distribución de velocidad sobre una placa plana. (Cataldo, 2016).

La zona donde la velocidad se reduce respecto al flujo alejado a la placa plana se denomina capa límite y su profundidad se denomina altura de la capa límite (δ). En el flujo atmosférico la región que se desarrolla próxima al suelo, lugar donde se producen

la mayor parte de los intercambios de cantidad de movimiento, calor y masa, adopta una estructura similar a la de una capa límite y se denomina capa límite atmosférica.

En la capa límite atmosférica y sobre la superficie terrestre se distingue una primera región, en la cual se encuentran los obstáculos que producen la rugosidad del suelo. A esta capa se la denomina subcapa rugosa tal cual se presenta en la Figura 1-5. En esta región el flujo depende de la ubicación del punto considerado tanto en planta como en altura, percibiéndose los efectos de los obstáculos. Superando esta región se encuentra la capa de superficie, donde se define la escala de longitud como ν/u^* siendo u^* la velocidad de fricción, la cual se define como $\sqrt{\tau_o/\rho}$ donde ρ corresponde a la densidad del aire y τ_o , tensión rasante que produce el suelo sobre el flujo.

Utilizando la escala de longitudes mencionada (ν/u^*), para posiciones más próximas a la placa y δ para posiciones más próximas al borde superior de la capa límite en lo que se denomina la región del núcleo, la distribución de velocidad de viento en altura en esa zona se expresaría de la siguiente forma:

$$\frac{U}{u^*} = f\left(\frac{zu^*}{\nu}\right) \quad (1.13)$$

$$\frac{U_\delta - U}{U_\delta} = F\left(\frac{z}{\delta}\right) \quad (1.14)$$

A partir de un análisis asintótico es posible deducir que, donde ambas distribuciones serían válidas, la distribución de velocidad en altura que mejor ajustaría sería de tipo logarítmica, con la siguiente forma:

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{k} * \text{Ln}\left(\frac{z}{\delta}\right) + B \quad (1.15)$$

Por lo tanto, la región donde valdría esta expresión es la denominada sub capa inercial o subcapa logarítmica (siendo B una constante aditiva), la cual se extiende hasta una determinada altura, donde a partir de ella la expresión (1.15) podría aproximarse por una expresión del tipo potencial.

Las expresiones siguientes representarían el comportamiento de la velocidad media del viento en los primeros metros de altura.

$$U = \frac{u^*}{k} * \text{Ln}\left(\frac{z-d}{Z_0}\right) \quad (1.16)$$

$$U = U_{\text{ref}} \left(\frac{z}{Z_{\text{ref}}}\right)^n \quad (1.17)$$

Donde k es una constante universal denominada componente de Von Karman y vale 0.41, Z_0 es la longitud de rugosidad, d la altura del plano de deslizamiento nulo y n un coeficiente empírico que depende de Z_0 . Tanto Z_0 como d son parámetros

característicos de la rugosidad del suelo. Para el caso de una ciudad o zona urbana, d sería del orden de 20 metros y se podría aproximar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$d = h - \frac{z_0}{k} \quad (1.18)$$

Donde h es la altura media de los elementos de rugosidad.

1.3 Concepto de turbulencia.

Para definir el concepto de turbulencia resulta conveniente describir la denominada “experiencia de Reynolds”. La experiencia de Reynolds consiste en hacer circular por un tubo un flujo a muy baja velocidad e inyectar un chorro de tinta. En esas condiciones el chorro permanece inalterado en su recorrido a lo largo del tubo, a este fenómeno se le denomina movimiento laminar (Figura 1-8 a). Si la velocidad del flujo se elevará, se comienza a apreciar que el chorro de tinta, luego de un corto recorrido, presenta perturbaciones y termina mezclándose con el flujo del tubo (Figura 1-8 b). Al subir aún más la velocidad del flujo el chorro inyectado se mezcla ni bien ingresa al tubo (Figura 1-8 c y d), a ese fenómeno se le denomina movimiento turbulento.

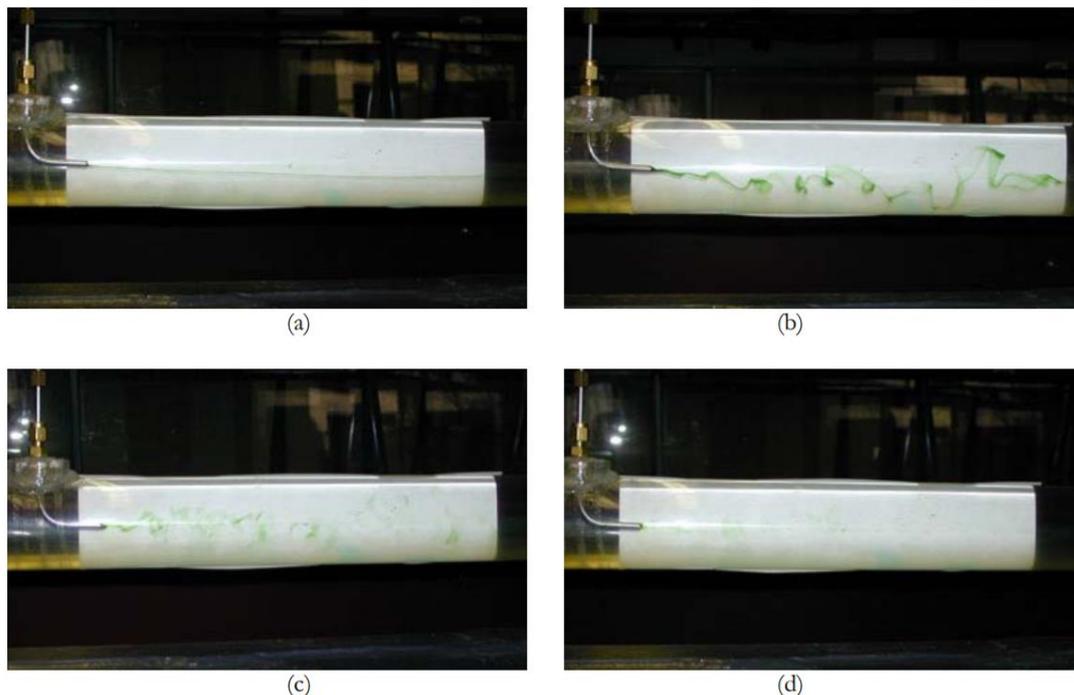


Figura 1-8. Experiencia de Reynolds (Fuente: Universidad de Valladolid.
<http://www.uva.es/export/sites/uva/>)

Otro ejemplo que no puede pasarse por alto, es el pasaje de un flujo sobre una placa plana. Este caso es presentado por Schlichting (1968), se utiliza al humo como trazador y se inyecta próximo a la placa. En la vista en planta (imagen superior) se observa en forma sucesiva una primera zona en la cual el flujo se comportaría como el caso (a) de la Figura 1-8, luego una zona como en el caso (b) y finalmente muy similar al caso (c).

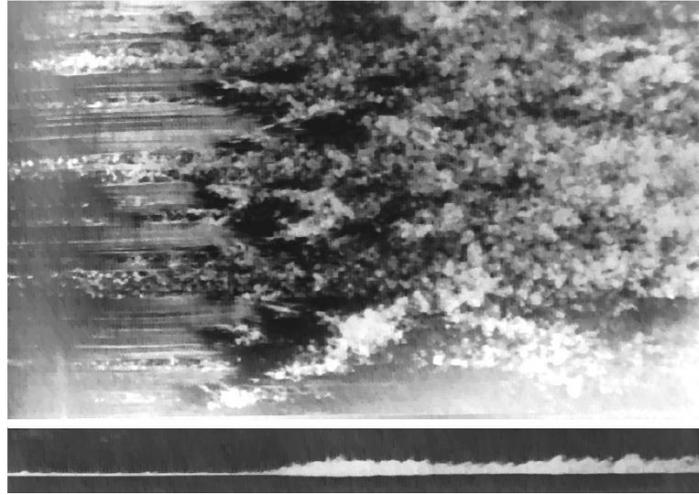


Figura 1-9. Flujo sobre una placa plana. (Schlichting, 1968).

Ante la carencia de una definición precisa de turbulencia, se podría describirlo a través de sus propiedades más destacadas que poseen los flujos turbulentos. Según se detallan en las notas del curso de Mecánica de los Fluidos de la Universidad de Valladolid, la turbulencia presenta al menos 5 características.

La característica más evidente para un observador sería la **irregularidad del flujo**. La irregularidad se presenta tanto en el espacio como en el tiempo y de magnitudes fluidodinámicas tales como la velocidad, la presión, temperatura y la composición. Los flujos turbulentos presentan irregularidades, caóticas e impredecibles, lo que justifica el uso de métodos estadísticos para su estudio.

Los flujos turbulentos se caracterizan por presentar **altos números de Reynolds** ($Re = D * V/\nu$). Uno de los parámetros que se utilizan para distinguir entre flujo laminar y turbulento es el número de Reynolds. La turbulencia frecuentemente se origina como una inestabilidad de los flujos laminares. A partir del análisis de la estabilidad de soluciones de flujos laminares se evidencia que la solución se hace inestable a partir de un cierto valor del número de Reynolds, denominado valor crítico.

En un flujo turbulento los **fenómenos de transporte** de masa, cantidad de movimiento y energía se ven amplificados. Esto se debe a las fluctuaciones del movimiento turbulento.

Los flujos turbulentos siempre dan lugar a elevada **disipación**; una vez que el flujo se ha constituido en turbulento, la turbulencia tiende a mantenerse, aunque para ello se necesita un aporte continuo de energía. Esta energía se extrae de la energía cinética del flujo medio. Los flujos turbulentos requieren de una transferencia continua de energía para reponer las pérdidas viscosas. Si no existe suministro de energía, la turbulencia se disipa rápidamente.

Los movimientos turbulentos son siempre **rotacionales y tridimensionales**. La turbulencia se caracteriza por altos niveles de fluctuación de la vorticidad. Las fluctuaciones aleatorias de la vorticidad en las escalas más grandes de la turbulencia son fundamentalmente bidimensionales. Sin embargo, a medida que se desciende en el

tamaño de las escalas dentro del amplio espectro que caracteriza a la turbulencia, se encuentra que el movimiento asociado a estas escalas pequeñas es siempre tridimensional.

1.3.1 Origen de la turbulencia

El flujo de un fluido viscoso y homogéneo en un conducto es laminar si, el número de Reynolds es menor que un cierto valor crítico, en cuyo caso permanece estable ante pequeñas perturbaciones. Cuando esto último no se satisface, si pequeñas perturbaciones se introducen en el flujo, éstas comienzan a amplificarse espontáneamente. En algunos casos este crecimiento es continuo, hasta establecerse una nueva condición de estabilidad. Finalmente, el flujo se convierte en una superposición de varias perturbaciones aleatorias, alcanzando una condición caótica que se conoce como turbulencia.

Una de las causas más frecuentes de inestabilidad de un flujo que da lugar a la turbulencia es la inestabilidad que se produce en una “capa de corte” o inestabilidad de Kelvin-Helmholtz. La capa de corte se da en una región muy delgada con grandes gradientes de velocidad, por ejemplo alrededor de una superficie en que los flujos resultan opuestos como se muestra en la Figura 1-10 (A). Si se agregara una perturbación entre ambas regiones, la misma incrementaría la velocidad del fluido sobre los puntos A, B', C y D' mientras que disminuiría ligeramente sobre los puntos A', B, C' y D. Si se considerara un flujo estacionario y se aplicará la ecuación de Bernoulli, éste indicaría que una fuerza neta de presión actúa amplificando las perturbaciones, por lo que la capa de corte será inestable y tenderá a enrollarse. La onda comenzará a distorsionarse a medida que avanza el tiempo, convirtiéndose finalmente en un vórtice (Figura 1-11 (B)).

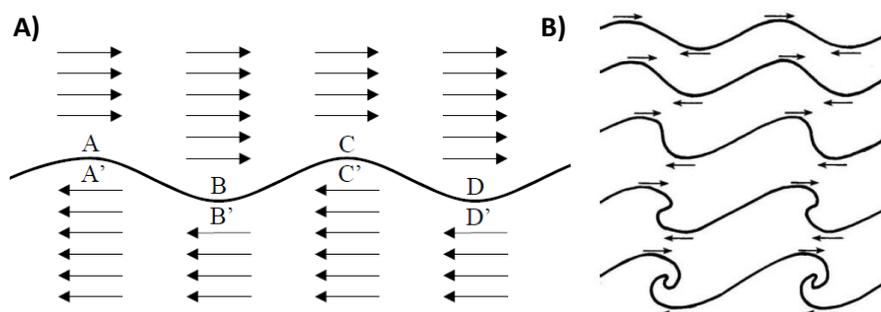


Figura 1-10. A) Perturbación en la capa de corte. B) Evolución de la inestabilidad de la capa de corte (Fuente: Universidad de Valladolid. <http://www.uva.es/export/sites/uva/>)

Este proceso de formación de vórtices aparece cuando el número de Reynolds supera un valor crítico que, para superficies de corte, suele ser muy bajo. Para números de Reynolds bajos la acción de la viscosidad tiende a disipar o estabilizar la discontinuidad. Por lo general, los vórtices formados de esta forma son inestables, y tienden a dividirse en pequeños vórtices. Este proceso continúa hasta que la escala o dimensión de los vórtices sea tan pequeña que los efectos viscosos sean significativos y entonces se disipan.

1.3.2 Expresión de magnitudes en flujos turbulentos y mecanismos de producción de turbulencia

Siguiendo la propuesta de Reynolds se hace un análisis de los flujos atmosféricos, considerando en dicho análisis las diferentes magnitudes que caracterizan un flujo turbulento, como la velocidad del fluido, la temperatura, la presión. Estas magnitudes se expresan como la suma de dos componentes.

En este caso, como la magnitud de estudio es la velocidad del viento ($V(t)$), se define el valor medio de acuerdo a la ecuación en el supuesto que el fenómeno es ergódico¹

$$\bar{V} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(\tau) d\tau \quad (1.19)$$

Luego la magnitud se expresa como la suma de este valor medio y una componente denominada fluctuante o turbulenta.

$$V(t) = \bar{V} + v'(t) \quad (1.20)$$

Se destaca que el valor medio en el tiempo de la componente fluctuante es nulo. A los efectos de caracterizar la componente fluctuante se calcula el valor medio de la energía cinética turbulenta como expresa a continuación.

$$\sigma_V^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (V(\tau) - \bar{V})^2 d\tau \quad (1.21)$$

Realizando el cociente entre la media cuadrática σ_V y el valor de la velocidad media, se define la **intensidad de turbulencia** I_u . Para zonas poco pobladas la intensidad de turbulencia se aproxima a 0.20, a una altura de 30 m, mientras que para zonas urbanas el valor esperado ronda entre 0.30 y 0.40.

En la atmósfera aparecen básicamente dos mecanismos de producción turbulenta que son uno de **(a) origen mecánico** y otro de **(b) origen termodinámico**.

(a) de origen mecánico: la producción de turbulencia ocurre en regiones del flujo donde se establece un gradiente de velocidad media, como presentaba el flujo en la sección anterior. Por ejemplo, un obstáculo que se encuentra inmerso en un flujo de viento, tal cual se muestra en la Figura 1-11.

¹ En general, un sistema ergódico «olvida» su estado inicial y muestra siempre el mismo comportamiento (estadístico y cualitativo) en promedio temporal cuando se le permite variar durante largos períodos de tiempo, sin importar las condiciones iniciales. (Fuente: <https://es.glosbe.com/es>)

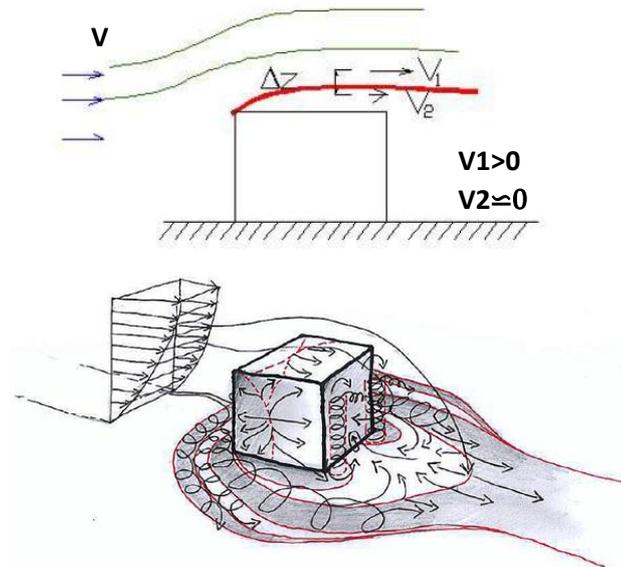


Figura 1-11. Obstáculo que se encuentra inmerso en un flujo de viento. (Cataldo, 2015).

(b) de origen termodinámico: en un medio como la atmósfera la transferencia de calor se realiza a través de diferentes procesos de transferencia térmica como son la radiación, convección y conducción. La radiación se debe al transporte de energía que realizan determinadas ondas electromagnéticas; la conducción es un proceso en que la transferencia de calor se produce a nivel molecular y la convección está asociada a la transmisión de calor que se tiene cuando masas de un fluido se traslada sobre una superficie sólida o bien en el seno de otro fluido.

La radiación solar en parte llega directamente a la atmósfera y en parte es absorbida por la atmósfera. La Tierra entonces recibe energía directamente del sol y de la atmósfera. Además, la Tierra perderá energía hacia el espacio y hacia la atmósfera. Finalmente, la atmósfera recibirá calor del sol y de la Tierra.

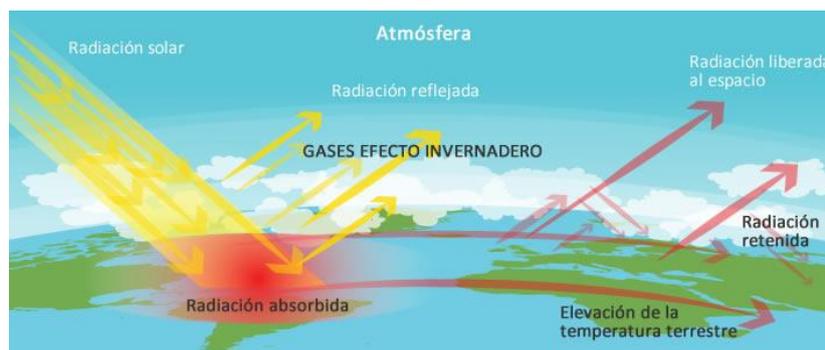


Figura 1-12. Mecanismos de producción turbulenta de origen termodinámicos. (Cataldo, 2015).

Como consecuencia de este balance térmico en la atmósfera, que se muestra en la Figura 1-12, se establece una distribución de temperatura en altura como la que se muestra en el gráfico de la Figura 1-13.

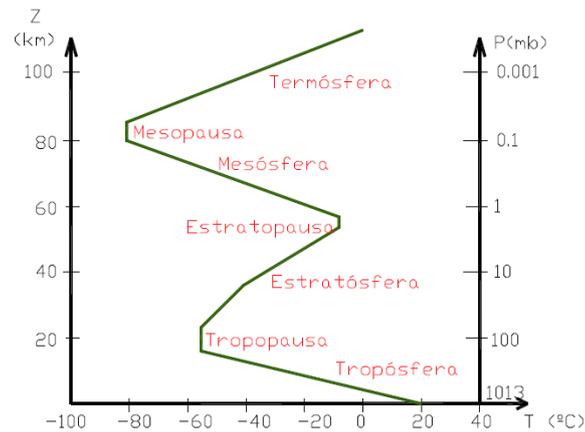


Figura 1-13. Distribución de temperatura en altura. (Cataldo, 2015).

Se observa que esta distribución se ordena en capas de gradiente de temperatura de signo constante. En especial para este trabajo interesará considerar lo que ocurre en los primeros metros de la **tropósfera**.

Si se hace una visión más detallada de la distribución de temperatura en altura en la tropósfera, se podría ver algo como se observa en el gráfico de la Figura 1-14.

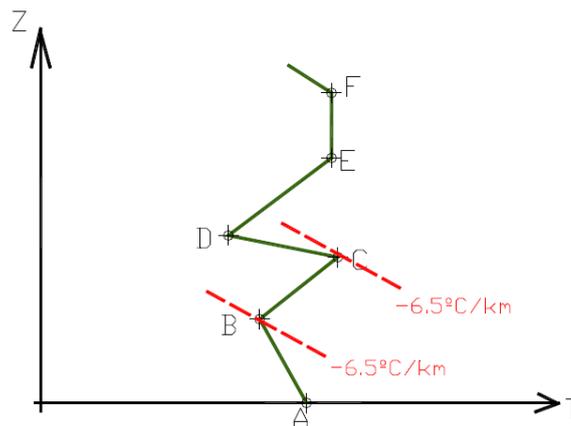


Figura 1-14. Ley de estado de la atmósfera. (Cataldo, 2015).

El gradiente de temperatura deducido a partir de esta curva se define como γ . Es de destacar que la distribución de temperatura en altura presenta zonas con gradientes mayores a la media (tramo AB), zonas con pendientes menores (tramo CD). Las zonas donde el gradiente es positivo (tramos BC y DE) se denominan **capas de inversión** y a los puntos B y D, **puntos de inversión**. Esta distribución de temperatura en altura que se establece en la tropósfera se denomina curva de estado de la baja atmósfera.

Es posible mostrar, tal como presenta Cataldo (2015), que una parcela de aire que se mueve verticalmente por acción de la turbulencia, sigue un proceso y su temperatura cambia a razón de -10 K/km .

Este gradiente se denomina gradiente adiabático seco (Γ) y sería el que experimentaría una parcela de aire exenta de humedad cuando evoluciona verticalmente en la atmósfera.

Entonces, si una parcela de aire cambiara de posición vertical, la temperatura del interior cambiaría de acuerdo a Γ en tanto que la temperatura del aire exterior cambia de acuerdo a γ . Por tal motivo, la temperatura interior y exterior a la parcela podrían presentar valores diferentes. Como consecuencia, sobre la parcela se ejercería un empuje además de su peso.

Si la fuerza vertical resultante fuera de sentido opuesto al desplazamiento, la parcela retornaría a su posición original y en dicho caso se habla de **Estado Estable de la atmósfera**.

Por otro lado, si la fuerza resultante presentara el mismo sentido que el del desplazamiento de la parcela, ésta se apartaría más de su posición original. Este comportamiento es denominado **Estado Inestable de la atmósfera**.

Existen diferentes métodos para determinar la estabilidad que presenta la atmósfera en los diferentes momentos del día. Un método está basado en el signo que adopta el número de Richardson, el cual resulta una escala del cociente entre la fuerza de empuje y la fuerza inercial:

$$Ri = \frac{\text{Empuje}}{\text{Inercia}} = \frac{g}{\theta} * \frac{\frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2} \quad (1.22)$$

Donde θ es la temperatura potencial, $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ es el gradiente vertical de dicha magnitud y U la velocidad media. La temperatura potencial se define como el valor que adoptaría la temperatura de una parcela que, a través de un proceso adiabático, alcanza una presión de 100.000 Pa. Para calcular este número adimensional es necesario conocer el perfil de velocidad media en altura, así como el perfil de temperatura potencial en altura, a los efectos de determinar el gradiente de dichas magnitudes. Estos perfiles deberían ser conocidos al menos a través de un conjunto discreto de valores obtenidos a determinadas alturas, de manera de aproximar el valor de las derivadas por el cociente entre el valor de las diferencias.

Una vez determinado este valor, la definición del estado de la atmósfera sería como sigue:

- Si $Ri = 0$; Atmósfera Neutra ($\gamma = \Gamma$)
- Si $Ri > 0$; Atmósfera Estable ($\gamma > \Gamma$)
- Si $Ri < 0$; Atmósfera Inestable ($\gamma < \Gamma$)

Cuando la atmósfera presenta un estado INESTABLE, las perturbaciones que se introducirían en el flujo se amplificaría incrementándose así el nivel de turbulencia. Si la atmósfera fuera ESTABLE, cualquier perturbación se amortiguaría y el nivel de

turbulencia decrecería. Cuando la atmósfera es NEUTRA la turbulencia se generaría sólo por medios mecánicos.

Durante la noche la atmosfera usualmente es ESTABLE mientras que durante el día la atmosfera resulta INESTABLE.

En la Figura 1-15 se presenta la evolución de la temperatura y de la velocidad del viento a 100 metros y 10 metros de altura. Este resultado fue extraído de Gianoli. P (2015). Los registros de viento y temperatura se realizaron en un Parque Eólico en el Departamento de San José.

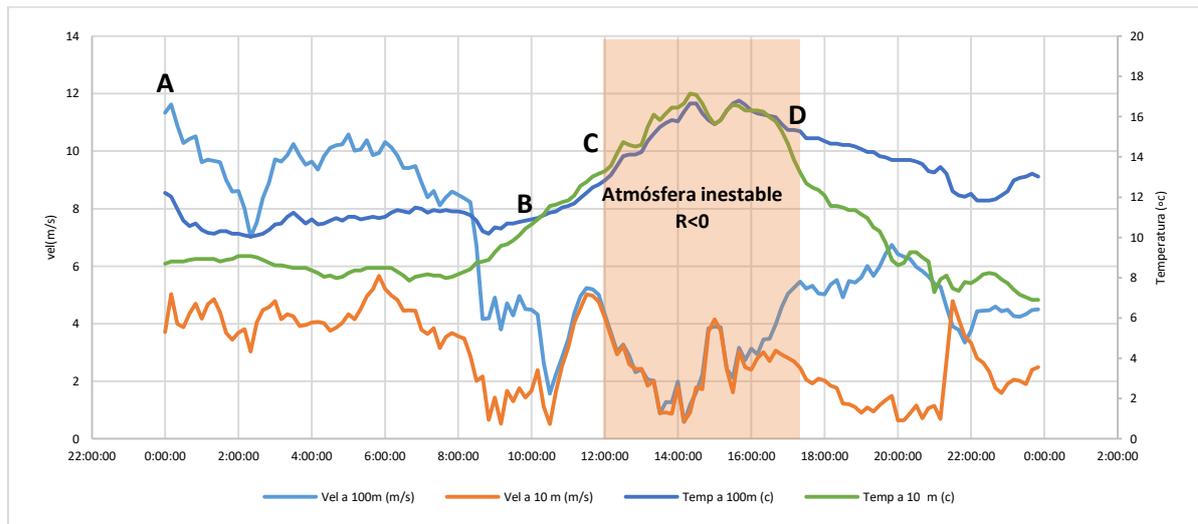


Figura 1-15. Evolución temporal de velocidad y temperatura (Parque Eólico, San José) Fuente: Gianoli (2015)

Analizando el gráfico y aproximando los gradientes de temperatura potencial por lo de temperatura, se tiene que los valores de R_i determinados a partir del punto A, son valores iguales o mayores a 0 hasta el punto B, por lo que se puede afirmar que de la hora 0 hasta la hora 10 se tiene una atmósfera levemente estable a neutra. Alrededor de las 7 de la mañana el sol ya estaba calentando la superficie terrestre, se eleva entonces la temperatura de su superficie y se transmite calor por convección y conducción al aire. Este evento se logra percibir claramente a partir de las 8 horas, cuando la temperatura registrada a los 10 metros de altura comienza a elevarse aproximándose a la temperatura registrada a los 100 metros de altura. En el punto B, se puede observar que al menos la columna de aire de 100 metros de altura presenta la misma temperatura, evento que perdura hasta las 17 horas (punto D).

Durante el tramo BC, la atmósfera comienza a tener una leve inestabilidad, presentando valores de R_i menores a cero o muy próximos a cero. A partir del punto C, se establece una inestabilidad completa de la atmósfera con valores de R_i menores a cero. Éste estado perdura hasta el punto D, aproximadamente hasta las 17 horas, momento en cual el valor de R_i comienza a aproximarse a cero y valores positivos, pero muy próximos a cero, indicando que la atmósfera (al menos en esa columna de 100 metros) tiende a estabilizarse. A partir de las 18 horas el sol comienza a ocultarse, por lo que la superficie terrestre comienza a enfriarse; entonces, la Tierra comienza a irradiar calor hacia la

bóveda celeste. Por este motivo baja la temperatura del suelo y comienza a haber una transmisión de calor por convección y conducción del aire al suelo. Esto lleva a que la temperatura del aire, cerca al suelo, descienda, apareciendo una capa de inversión. A eso de la hora 24 se estableció una **capa de inversión** profunda, al determinar los valores de R_i , se obtuvieron números positivos indicando una atmósfera estable.

Con lo visto hasta el momento y considerando una atmósfera neutra, en la Figura 1-16 se presenta distribuciones de velocidad media en altura para diferentes tipos de terrenos. Para atmósferas estables o inestables se sigue cumpliendo la ley logarítmica, solo que aparece un nuevo término, Ψ_m , el cual es una función que depende de los efectos termodinámicos que se producen en atmósfera, es decir, dichos efectos comienzan a ser relevantes en la disminución o producción de turbulencia.

$$U = \frac{u^*}{k} * \left(\text{Ln} \left(\frac{Z}{Z_0} \right) - \Psi_m \right) \quad (1.23)$$

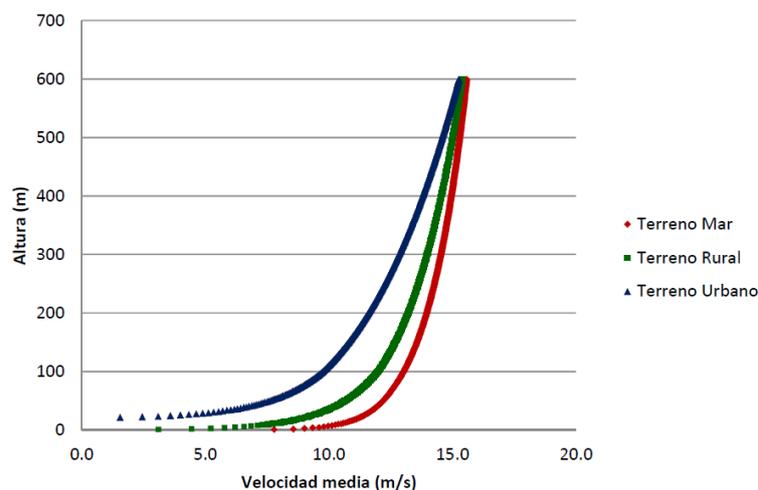


Figura 1-16. Distribución media de la velocidad media en altura. (Extraído de Simiu and Scanlan, 1989).

La componente fluctuante o turbulenta de la velocidad de viento se suele caracterizar a través de la energía cinética. La componente longitudinal de la turbulencia, es decir la colineal a la componente media de la velocidad, se caracteriza a través de su media cuadrática (σ_u), la cual es proporcional a la energía cinética ($\sigma_u = \sqrt{u'^2}$) o bien al cociente entre este parámetro y el valor de la velocidad media ($I_u = \sigma_u/U$), al cual se denomina intensidad de turbulencia, como se anticipó en 1.3.2.

En el gráfico de la Figura 1-17 se presenta la distribución de intensidad de turbulencia longitudinal, la cual sigue la siguiente expresión (Simiu and Scanlan, 1989) para cada tipo de terreno estudiado:

$$I(Z) = k \cdot \frac{\sqrt{\beta}}{\ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right)} \quad (1.24)$$

Donde $k \cdot \sqrt{\beta}$ dependen de las características del terreno en estudio a partir de la rugosidad del terreno, Z_0 .

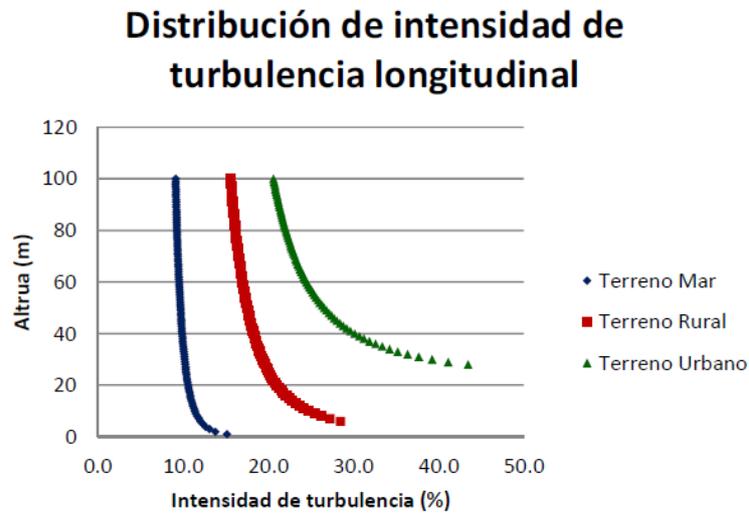


Figura 1-17. Perfiles de intensidad de turbulencia longitudinal. (Extraído de Simiu and Scanlan, 1989).

La componente turbulenta, presenta fluctuaciones de diversas escalas temporales y espaciales. Por tal motivo, presentará un **espectro de potencia asociado**, el cual muestra la forma en la cual se distribuye la potencia de la componente fluctuante entre estructuras turbulentas de diferente escala temporal o de frecuencia. En la Figura 1-18 se observa la forma que presenta este espectro para diferentes terrenos.

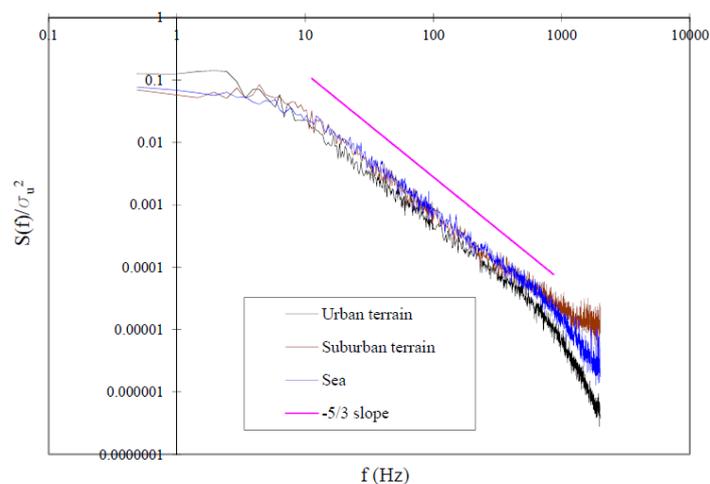


Figura 1-18. Espectro de potencia de la velocidad del viento para diferentes tipos de terreno. (Cataldo, 2015).

En tanto en la Figura 1-19 se presenta en forma esquemática la geometría que presenta el espectro cuando cada componente espectral es multiplicada por la frecuencia correspondiente.

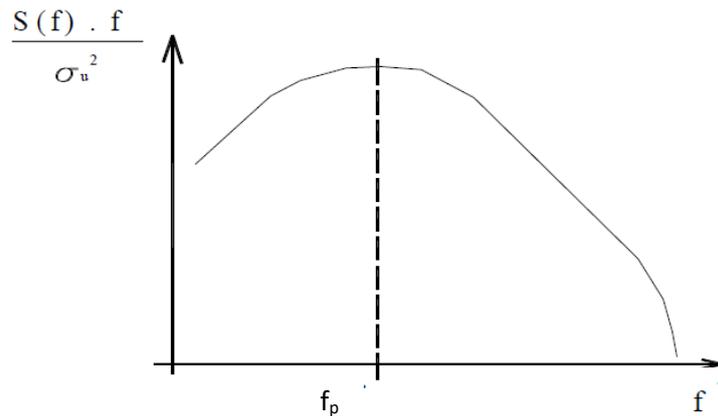


Figura 1-19. Espectro de potencia adimensional (Cataldo, 2015).

En la Figura 1-19 se aprecia la existencia de un pico espectral, el cual se presenta para una frecuencia pico f_p o periodo pico T_p que es el inverso de la anterior. Las estructuras turbulentas que presentan esta peculiaridad son las de mayor contenido de energía y la escala especial correspondiente se estima como:

$$L_u^x = \frac{U}{f_p} \quad (1.25)$$

Y se denomina la escala integral de la turbulencia.

Se cuentan con diversos modelos que describen la forma del espectro presentado como en la Figura 1-19. En particular el espectro de **von Karman**, aproxima el espectro de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f \cdot \frac{S(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \cdot X}{(1 + 70.8X^2)^{\frac{5}{6}}} \quad (1.26)$$

Donde la variable X se define como: $X = f \cdot \frac{L_u^x}{U}$

Se tiene además que el valor de la escala integral cambia con la altura sobre el suelo, para dicho parámetro se puede aproximar con la expresión (1.27):

$$L_u^x = C \cdot Z^m \quad (1.27)$$

Donde los parámetros C y m varían con la longitud de rugosidad de acuerdo al gráfico de la Figura 1-20.

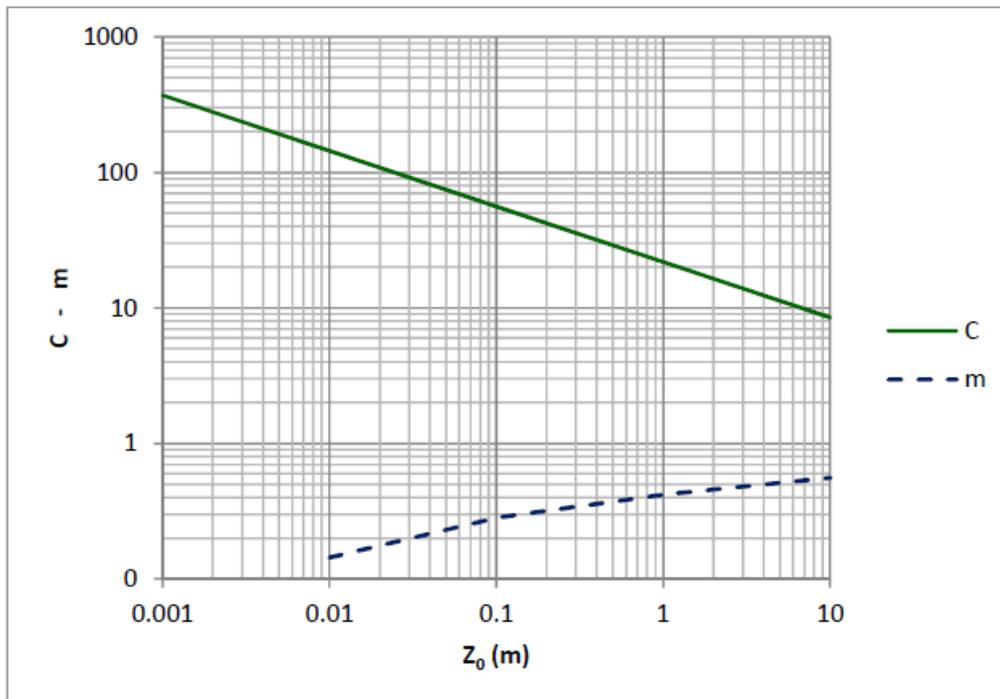


Figura 1-20. Parámetros de la curva de ajuste de escala integral (Counhian, 1969).

Hasta el momento como concepto importante que se debe adquirir es que en la atmósfera, la turbulencia se produce básicamente por dos mecanismos como son la interacción entre el viento y los obstáculos (“producción mecánica”) y debido al estado termodinámico de la turbulencia (“producción térmica”). Mientras que el primer mecanismo da lugar a una producción efectiva de turbulencia, el segundo mecanismo puede dar lugar tanto a una producción adicional como a una reducción de la turbulencia.

En cuanto a la estabilidad atmosférica, al presentarse una atmósfera estable, ocurrirá una disminución de la turbulencia; en tanto, si se trata de una atmósfera inestable, la turbulencia se verá incrementada.

Por lo general, para días claros sin nubes, se puede afirmar que la atmósfera se vuelve inestable, lo que favorece el incremento de la turbulencia. En tanto, en horarios nocturnos o durante las madrugadas, es de esperar que se establezcan atmósferas levemente estables a neutras, atenuando la posible turbulencia sobre las capas más próximas a la superficie terrestre.

1.4 Conceptos de niveles de presión sonora

En este capítulo se definirán algunos conceptos de niveles de presión sonora, desarrollando la hipótesis de la acústica lineal, la cual es considerada para la interpretación de los registros realizados en el trabajo de campo de este estudio. Además, se definirán los parámetros más representativos en un intervalo de tiempo de registro de niveles de presión sonora.

Basándose en el desarrollo realizado por Parrales (2001) (e-Reding² Universidad de Sevilla), una onda acústica es la propagación a una velocidad finita de una perturbación a través de un medio físico. Estas perturbaciones son definidas como desviaciones respecto al estado de equilibrio inicial. Si, en particular, el fluido parte de un estado de equilibrio homogéneo y en reposo, definido por una velocidad nula, presión p_0 , densidad ρ_0 , temperatura T_0 y entropía s_0 , una perturbación en alguna de estas magnitudes hace que el estado del fluido pase a definirse por las siguientes expresiones:

$$\tilde{u} = u \quad (1.28)$$

$$\tilde{p} = p_0 + p \quad (1.29)$$

$$\tilde{\rho} = \rho_0 + \rho \quad (1.30)$$

$$\tilde{T} = T_0 + T \quad (1.31)$$

$$\tilde{s} = s_0 + s \quad (1.32)$$

La evolución y distribución de estas magnitudes se regirán por las ecuaciones de Navier-Stokes definidas en el dominio del fluido, y por dos ecuaciones termodinámicas de estado. Todas ellas forman las ecuaciones constitutivas para la propagación de ondas acústicas. La ecuación de conservación de masa y conservación de la cantidad de movimiento se representan con las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho} \tilde{u}) = 0 \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\tilde{\rho} \tilde{u}) + (\tilde{u} \cdot \nabla) \cdot (\tilde{\rho} \tilde{u}) = -\nabla \tilde{p} + \nabla \cdot \overline{\tilde{\tau}} + \tilde{\rho} g \quad (1.34)$$

siendo $\overline{\tilde{\tau}}$ el tensor de esfuerzos viscosos y g el vector gravedad. La ecuación del primer principio de la termodinámica, se escribe por conveniencia haciendo uso de la definición de entropía. Obviando el balance de energía mecánica, asumido a partir de la ecuación 1.33, se obtiene:

$$(\tilde{\rho} \tilde{T}) \frac{d\tilde{s}}{dt} = \overline{\tilde{\tau}} : \nabla \tilde{u} + \nabla \cdot (K \nabla \tilde{T}) + Q_r + Q_q \quad (1.35)$$

² e-REdING, elaborado por la Biblioteca de Ingeniería que recoge trabajos académicos (proyectos fin de carrera, fin de máster, etc.) presentados en la ETSI de la Universidad de Sevilla desde 1972 y que da acceso al texto completo en formato electrónico de la mayor parte de los defendidos desde 2001.

Siendo K la conductividad térmica del fluido, Q_r el calor transferido por radiación y Q_q el calor generado por reacción química. Finalmente, las ecuaciones termodinámicas de estado para la presión y la temperatura son, respectivamente:

$$\tilde{p} = \tilde{p}(\tilde{\rho}, \tilde{s}) \quad (1.36)$$

$$\tilde{T} = \tilde{T}(\tilde{\rho}, \tilde{s}) \quad (1.37)$$

1.4.1 Hipótesis de la acústica lineal

Los análisis de los distintos fenómenos de propagación acústica que se detallarán a continuación se hará, utilizando aire como medio de propagación. Antes de comenzar con el análisis, se define velocidad del sonido C_0 como $C_0 = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}(\rho_0, s_0)}$, es decir, es la velocidad del sonido medida en las condiciones del estado de equilibrio inicial. C_0 Se puede interpretar como la velocidad de propagación de las ondas mecánicas longitudinales, producidas por variaciones de presión del medio. Estas variaciones de presión cuando tienen ciertas frecuencias e intensidades, generan en el cerebro la sensación de sonido.

Las hipótesis que permiten definir al aire como medio acústico lineal se definen a continuación:

En primer lugar, es común establecer que la variación característica de las magnitudes del fluido respecto a sus valores en el estado de equilibrio inicial es muy pequeña. Esta condición define la hipótesis de pequeñas perturbaciones. Por otro lado, las fuerzas viscosas y gravitatorias serán consideradas despreciables frente al término de variación local de cantidad de movimiento, ya que:

$$\frac{\nabla \cdot \bar{\tau}}{\frac{\partial}{\partial t}(\tilde{\rho}\tilde{u})} \sim \frac{vw_0}{c_0^2} \ll 1 \quad (1.38)$$

$$\frac{\tilde{\rho}g}{\frac{\partial}{\partial t}(\tilde{\rho}\tilde{u})} \sim \frac{g}{w_0c_0} \ll 1 \quad (1.39)$$

Donde v es la viscosidad cinemática del fluido, g es la aceleración de la gravedad, y $w_0 = 2\pi f_0$.

En tanto la ecuación de cantidad de movimiento, asumiendo lo anterior, quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\tilde{\rho}\tilde{u}) + (\tilde{u} \cdot \nabla) \cdot (\tilde{\rho}\tilde{u}) = -\nabla \tilde{p} \quad (1.40)$$

Unido a esta hipótesis de pequeñas perturbaciones, la disipación calorífica viscosa $(\tilde{\rho}\tilde{T}) \frac{d\tilde{s}}{dt} = \bar{\tau}' : \nabla \cdot \tilde{u} + \nabla \cdot (K\nabla\tilde{T}) + Q_r + Q_q$ resulta ser un término cuadrático y por tanto despreciable frente a cualquiera de los términos lineales presentes en la ecuación del Primer Principio. En cuanto a los efectos de transferencia de calor por conducción,

estos serán despreciables frente al término de variación local de energía térmica, debido a que

$$\frac{\nabla \cdot (K \nabla \tilde{T})}{\tilde{\rho} \tilde{T} \frac{\partial}{\partial t} \tilde{s}} \sim \frac{v w_0}{c_0^2 P_r} \ll 1, \quad (1.41)$$

Donde $P_r = \rho_0 v c_p / K$ es el número de Prandtl, siendo c_p el calor específico del fluido. Por último, el término de transferencia de calor por radiación Q_r y el término de generación de calor por reacción química Q_q , serán considerados nulos.

La ecuación de energía, asumiendo lo anterior, quedaría de la siguiente forma:

$$(\tilde{\rho} \tilde{T}) \frac{D \tilde{s}}{D t} = \tilde{\tau}^T : \nabla \cdot \tilde{u} \quad (1.42)$$

Finalmente, se considera que la ecuación termodinámica de estado para la presión la cual sigue una ley lineal con respecto a sus dos variables. Para ello, se truncará el desarrollo de Taylor de la presión, alrededor del estado de equilibrio inicial, en el término de primer orden:

$$\tilde{p} \cong p_0 + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{\rho}}(\rho_0, s_0) * (\tilde{\rho} - \rho_0) + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{s}}(\rho_0, s_0) * (\tilde{s} - s_0) \quad (1.43)$$

1.4.1.1 Ecuaciones de la acústica lineal

Implementando las ecuaciones de Navier-Stokes y las hipótesis expuestas por Parrales (2001), se obtienen las ecuaciones de la acústica lineal. Para ello se despreciarán los términos cuadráticos por resultar muy pequeños que aparecen en los productos entre magnitudes perturbadas, frente a los términos lineales. La ecuación de conservación de masa y de cantidad de movimiento queda respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot u = 0 \quad (1.44)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot p = 0 \quad (1.45)$$

Por otro lado, la ecuación de la energía se reduce a:

$$\frac{ds}{dt} = 0 \quad (1.46)$$

Lo cual nos indica que la propagación de una onda en un medio lineal es un proceso isentrópico³. Por último, la ecuación de estado para la presión se podrá escribir como:

³ Es aquel proceso en el cual la entropía (s) permanece constante.

$$p = c_0^2 \rho \quad (1.47)$$

El sistema de ecuaciones de la acústica lineal se compone, en tanto, de cuatro ecuaciones diferenciales en derivadas parciales acopladas (1.44) y (1.45), y dos ecuaciones algebraicas (1.46) y (1.47).

Como se puede comprobar, las perturbaciones de presión y densidad están ligadas de forma lineal mediante la ecuación (1.47). Esto permitirá escribir una única ecuación diferencial parcial desacoplada para la perturbación de presión si se consigue eliminar la velocidad del sistema definido por (1.44) y (1.45). Efectivamente si se toma la derivada parcial con respecto al tiempo en (1.44) y respecto a la posición en (1.45), se obtiene, haciendo uso de (1.47), la siguiente ecuación de ondas para la perturbación de presión:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.48)$$

Si se considera que la perturbación de presión sigue una evolución armónica en el tiempo con frecuencia w , es decir $p(r, t) = p(r) \exp(-iwt)$, el término de amplitud-fase de la onda $p(r)$, deberá satisfacer la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1.49)$$

Siendo $k = w/c_0$ el número de onda.

1.4.2 El sonido

El **sonido** es una perturbación de la presión de equilibrio de un medio material elástico, que se propaga como una onda de presión y que potencialmente puede, de acuerdo con su frecuencia y amplitud, generar sensación auditiva en las personas. Dado que este trabajo presenta un problema relacionado a la aeroacústica, solamente se considerará el caso de propagación del sonido vía aérea (Arias Hernández, J, 2016).

El desplazamiento oscilatorio de las partículas, o vibración, se produce alrededor de una posición inicial, como se muestra en la Figura 1-21.

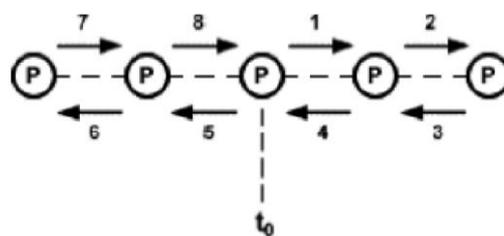


Figura 1-21. Vibración de partículas "P" alrededor de su posición de equilibrio en un tiempo t_0
(Extraído de Arias Hernández, J, 2016)

Ese desplazamiento oscilatorio que soportan las distintas moléculas de aire, generan zonas de mayor concentración de moléculas llamadas zonas de compresión y las zonas

en donde se localiza una menor concentración de moléculas que se denominan zonas de rarefacción (ver Figura 1-22).

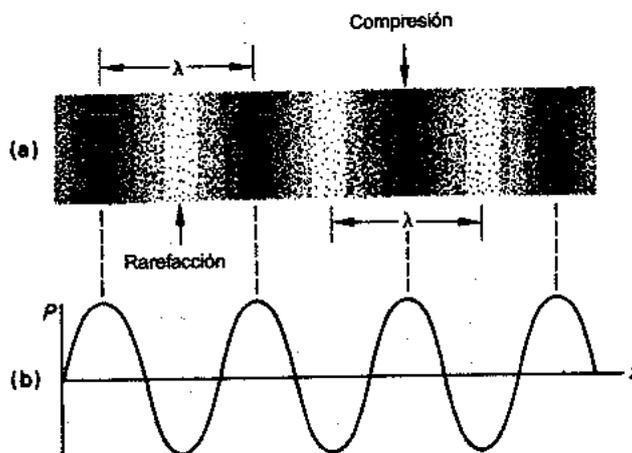


Figura 1-22. Variaciones de presión en el aire (compresión y rarefacción) en el caso de un movimiento armónico simple (Maggiolo, 2004).

Si en un punto cualquiera se produce una perturbación del aire que implique allí un aumento momentáneo de la presión, la diferencia entre las presiones en el punto perturbado y en el aire que lo circunda hace que el aire a mayor presión tienda a descomprimirse lo cual se produce debido al transporte de moléculas desde dicho sitio (zona de rarefacción), modificando a su vez la presión en el aire a su alrededor. Así, siguiendo la perturbación inicial, se va desplazando o propagando en el medio. Una **fente** o **emisor sonoro** resulta ser cualquier agente capaz de producir la perturbación mecánica inicial que se acaba de describir. La mayor parte de los sonidos reales son el resultado de una serie de perturbaciones sucesivas y no de una sola. Las nuevas perturbaciones no modifican la propagación de las anteriores (Maggiolo, 2004).

Los atributos principales de las ondas sonoras son su **frecuencia** y su **amplitud**. Esta última está relacionada con la presión sonora y, en consecuencia, con la energía que transporta la onda. Otra variable de gran interés es el tiempo, en lo que se refiere a la evolución, permanencia y variabilidad de los sonidos. La **longitud de onda** de un sonido, corresponde a la distancia perpendicular entre dos frentes de onda en la misma fase (tal cual se muestra en la Figura 1-22). Velocidad del sonido

El sonido se puede considerar como una onda plana, donde la presión en cada instante es constante sobre cada plano perpendicular a la dirección de propagación. La onda se desplaza con cierta velocidad c , de tal modo que al cabo de un tiempo t las variaciones de presión llegan a una distancia $d = c * t$ del punto en que se inició el fenómeno. La velocidad de propagación c de la onda es mucho mayor que la velocidad con que se mueven las partículas del medio con respecto a su posición de equilibrio.

En un medio gaseoso, c depende del peso molecular del gas y de su temperatura; para un mismo gas crece a mayor temperatura y, a igual temperatura, decrece para gases

más pesados. Para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente ($t = 20\text{ °C}$), la velocidad de propagación del sonido en el aire es de $c = 343\text{ m/s}$. En aire es válida la siguiente aproximación:

$$V_s \approx 331.4 + 0.606 * t \quad (1.50)$$

Donde $331,4\text{ m/s}$ es la velocidad del sonido en el aire a 0 °C y t se expresa en °C (Acústica Urbana Módulo II, Convenio MVOTMA-UdelaR, 2008).

1.4.3 Ondas estacionarias en tubos

Dadas las características de este estudio, es necesario conocer cómo se propaga una onda dentro de tubos, ya que cualquier perturbación en uno de sus extremos podría llegar a generar un sonido intenso si esta cavidad entra en resonancia acústica. El ejemplo más claro son los instrumentos musicales aerófonos.

Si un tubo se encuentra abierto en ambos extremos, el aire vibra con su máxima amplitud en ambos extremos. En la Figura 1-23 se presentan los tres primeros modos de vibración. Las frecuencias de los distintos modos, para esta configuración, se determinan con la siguiente expresión:

$$f = \frac{(2n - 1)v_s}{4L} \quad (1.51) \text{ con } n = 1,2,3 \dots$$

Siendo v_s la velocidad del sonido y L la longitud total del tubo.

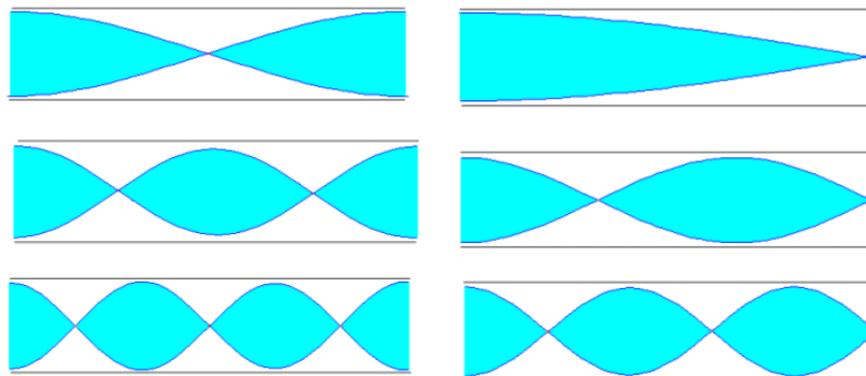


Figura 1-23. (a) Primeros 3 modos de vibración, tubo abierto. (b) Primeros 3 modos de vibración, tubo cerrado.

Por otro lado, si uno de los extremos del tubo se encuentra cerrado, las frecuencias de los distintos modos, se determinan con la siguiente expresión:

$$f = \frac{(2n + 1)v_s}{4L} \quad (1.52) \text{ con } n = 1,2,3 \dots$$

1.5 Aeroacústica

Los conceptos centrales desarrollados anteriormente en los capítulos 1.1, 1.2 y 1.4 convergen en una disciplina científica denominada: **aeroacústica**. Esta disciplina estudia el sonido generado aerodinámicamente y como tal, se puede considerar como una parte de la mecánica de los fluidos. En ella se desarrolla una teoría general de la generación aerodinámica de ondas sonoras a partir de diferentes formulaciones. Algunas consideran una resolución directa de las ecuaciones de la mecánica de fluidos, mientras que otras optan por un enfoque más teórico que deduce un sistema general de ecuaciones y aplica una serie de analogías acústicas para combinar el enfoque teórico con el computacional.

El pionero de esta disciplina fue el matemático James Lighthill, el cual incursionó en el tema alrededor de los años cincuenta del pasado siglo. Además de sus contribuciones a la aeroacústica, Lighthill realizó otros aportes en el ámbito de la mecánica de fluidos y el estudio matemático de la propagación de ondas. Su teoría del ruido generado aerodinámicamente se basa en un desarrollo matemático y la introducción de una hipótesis física.

El primero consiste en una formulación de las ecuaciones de mecánica de fluidos como una ecuación de onda en donde los procesos no lineales del flujo se identifican con las fuentes acústicas, aunque para ello hay que establecer desde un punto de vista físico cuál es la variable acústica. Tal ecuación no puede resolverse analíticamente pues para ello habría que conocer soluciones analíticas generales de la ecuación de Navier-Stokes.

La segunda es la que se conoce como analogía acústica y establece una analogía entre el problema de generación de ondas sonoras y uno simplificado, en el que resuelven los procesos de generación de las ondas sonoras con respecto a los de propagación de éstas. Para ello se supone que todos los procesos asociados con la generación del sonido están confinados en un dominio del espacio acotado (en esa región no se impone ninguna restricción a las fluctuaciones de presión y densidad). En el exterior de dicho dominio de generación se recupera la propagación de ondas sonoras en las condiciones que establece la acústica física. Esto permite realizar la hipótesis donde se supone que las fuentes en la zona de generación pueden modelarse como fuentes clásicas. Es la analogía acústica, la que facilita la resolución de la ecuación de onda.

La aeroacústica tiene un rango amplio de aplicaciones en ámbitos muy diversos que van del estudio del ruido aerodinámico generado por aerogeneradores o ventiladores de uso industrial al estudio de la fonación humana o el ruido generado por volcanes. En mayor medida el desarrollo de la disciplina se produce en torno al ámbito de la ingeniería de fluidos, pero existen interesantes cuestiones no resueltas desde el punto de vista de la física básica, en lo que se puede denominar mecánica de fluidos teórica.

1.5.1 Ecuación de Lighthill

Las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan la dinámica de fluidos viscosos compresibles, fueron reagrupadas por Lighthill en una ecuación de onda no homogénea, logrando así una conexión entre la mecánica de fluidos y la acústica. En este subcapítulo se presentarán dichas ecuaciones, su reagrupación y el resultado obtenido, el cual se denomina comúnmente “analogía de Lighthill”. En este trabajo de tesis no se analizará la ecuación de Lighthill ni su resolución, siendo esta expresión un punto de partida a profundizar a futuro. De todas formas, se presentan algunos comentarios sobre los términos que forman parte de dicha ecuación.

El objetivo de la analogía aeroacústica de Lighthill es estimar el sonido generado por un campo de flujo fluctuante, empleando para ello una metodología consistente en la separación del problema en dos partes: una primera parte dirigida a la caracterización del campo de flujo fluctuante a partir de principios de la Mecánica de Fluidos que no guarden relación con la propagación de perturbaciones acústicas en el medio y una segunda parte dirigida a la estimación del sonido generado por dicho campo de flujo.

Como consecuencia de la separación del problema de aeroacústica en dos partes, la analogía no puede aplicarse a todos aquellos fenómenos en los que el sonido producido pueda a su vez tener una influencia significativa sobre el campo de flujo fluctuante que lo genera. No obstante, dado que las perturbaciones acústicas son de magnitud bastante inferior a las perturbaciones del movimiento que las provoca, dicha influencia sólo será importante cuando en las proximidades de la región de flujo existan dispositivos amplificadores del sonido (Argüelles Díaz et al. 2004).

Lighthill considera un campo de flujo fluctuante limitado a una cierta región pequeña de un volumen de fluido, de forma que el resto del fluido permanezca en reposo. Una vez planteada esta configuración es posible realizar una comparación entre las ecuaciones de las fluctuaciones de densidad en el flujo real con las correspondientes a un campo acústico uniforme en reposo que coincidirá con dicho flujo real fuera de la región fuente (Argüelles Díaz, 2004). Se debe aclarar que Lighthill en su formulación original escogió derivar la ecuación de ondas para las fluctuaciones de densidad en lugar de fluctuaciones de presión. En procesos isoentrópicos, ambas fluctuaciones se relacionan directamente a través de la velocidad del sonido.

La analogía aeroacústica consiste en una reformulación de las ecuaciones de la mecánica de los fluidos que permite separar los mecanismos de generación de sonido de los mecanismos de propagación del mismo. La parte del flujo en el que se genera el sonido se denomina región fuente, mientras que la parte del flujo en el que se propaga el sonido y donde se coloca el punto de observación se denomina región de propagación o flujo de referencia. En la Figura 1-24 se pueden ver las dos regiones comentadas anteriormente.

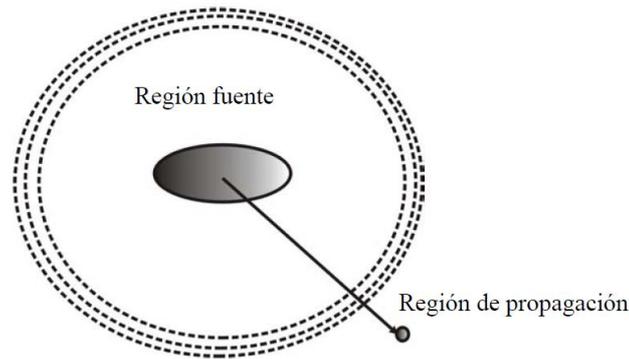


Figura 1-24. Separación del campo de flujo real. (Argüelles Díaz et al, 2004)

La diferencia entre ambos conjuntos de ecuaciones puede considerarse como el efecto de un campo de fuerzas externas fluctuantes actuando sobre el medio acústico uniforme en reposo. Si el campo de fuerzas externas fluctuantes se determina a priori a partir del estudio del campo de flujo real mediante procedimientos fluidodinámicos, y dicho campo actúa sobre el medio acústico uniforme en reposo, el sonido radiado estará gobernado por las leyes de la Aeroacústica (Argüelles Díaz et al., 2004).

Se reformulan entonces las ecuaciones de la Mecánica de Fluidos con el propósito de derivar una ecuación de ondas. Las ecuaciones exactas de conservación de la masa y del momento en ausencia de términos fuente son (Lighthill, 1952):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1.53)$$

$$\frac{\partial(v\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1.54)$$

Donde $\sigma = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}$, es el tensor de tensiones, siendo p la presión estática y τ_{ij} el tensor de tensiones viscosas. Por otro lado, ρ y v representan la densidad y la velocidad del fluido, con variabilidad espacial y temporal.

Si se toma la derivada temporal de la ecuación (1.53) y se le resta la divergencia de la ecuación (1.54), se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2(\rho v_i v_j - \tau_{ij})}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1.55)$$

Si en la ecuación se resta a ambos lados de la igualdad el término $c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2}$, donde c_0 es una velocidad constante, la ecuación no varía, y se obtiene así un operador de ondas actuando sobre el lado izquierdo de dicha ecuación:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2(\rho v_i v_j - \tau_{ij})}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2(p - c_0^2 \rho)}{\partial x_i^2} \quad (1.56)$$

La clave consiste en comparar la ecuación previa con la que se obtendría, bajo condiciones normales, para un medio acústico uniforme y en reposo en el que se introducen las perturbaciones.

$$\rho' = \rho - \rho_0 \quad (1.57)$$

$$p' = p - p_0 \quad (1.58)$$

$$v_i' = v_i - v_{i0} \quad (1.59)$$

Donde ρ_0 , p_0 y v_{i0} , son respectivamente la densidad, la presión y la velocidad en la región de propagación de las ondas que se considera como la región de referencia. Pero por tratarse de un medio acústico uniforme y en reposo se cumple que $v_{i0} = 0$ y la densidad ρ_0 , y la presión p_0 , son constantes. Introduciendo las perturbaciones en la ecuación, se obtiene la ecuación de Lighthill:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1.60)$$

Donde T_{ij} es el tensor de tensiones de Lighthill, se define como:

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + (p' - c_0^2 \rho') \delta_{ij} - \tau_{ij} \quad (1.61)$$

La ecuación de Lighthill es una ecuación de ondas aplicable a las fluctuaciones de densidad, $\rho' = \rho - \rho_0$. Cuando sea aplicable a un problema real de aeroacústica la ecuación (1.60) se reduce a una ecuación de ondas homogénea a distancias alejadas de la región fuente, puesto que todos los términos del lado derecho se anulan. De acuerdo a las hipótesis relacionadas con la propagación de ondas acústicas, el término $\rho v_i v_j$, conocido como tensor de tensiones fluctuantes de Reynolds, puede despreciarse en el campo acústico que rodea la región fuente, así como también pueden despreciarse las pérdidas debidas a la fricción, τ_{ij} , y la conducción de calor, para distancias de propagación comparables a la longitud de onda. En la aproximación lineal la contribución $(p' - c_0^2 \rho')$ se anula cuando se identifica la velocidad constante c_0 , con la velocidad isoentrópica del sonido en esa región: $c_0^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s$ (Lighthill, 1952).

El término que aparece en el lado derecho de la ecuación de Lighthill define las fuentes acústicas equivalentes correspondientes a un medio acústico uniforme y en reposo en la posición del observador y para la variable acústica ρ' . Dependiendo del problema a estudiar es posible realizar una elección diferente del flujo de referencia y de la variable acústica. Por ejemplo, para el medio acústico uniforme y en reposo es posible escribir la ecuación de Lighthill para la presión en lugar de la densidad (Argüelles Díaz, 2004).

$$\frac{\partial^2 p'}{c_0^2 \partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 (\rho v_i v_j - \tau_{ij})}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 \left(\frac{p'}{c_0^2} - \rho'\right)}{\partial t^2} \quad (1.62)$$

Esta ecuación también es directamente aplicable a las fluctuaciones de presión acústica, $p' = p - p_0$. No obstante, la ecuación (1.62) es menos habitual que la ecuación (1.60), puesto que las fluctuaciones de densidad están relacionadas directamente con los efectos de compresibilidad, mientras que las fluctuaciones de presión pueden existir para compensar aceleraciones inerciales en el fluido (Argüelles Díaz et al., 2004).

Si se realiza un análisis del tensor de Lighthill, T_{ij} , se puede ver que éste incorpora tres procesos aeroacústicos básicos que resultan en la generación de sonido. Por una parte la convección con el flujo a través de las fuerzas no lineales descritas por el tensor de tensiones fluctuantes de Reynolds, $\rho v_i v_j$, por otra la disipación gradual del sonido por la viscosidad a través del tensor de tensiones viscosas, τ_{ij} y finalmente, la desviación de un comportamiento isentrópico del sonido a través del término $(p' - c_0^2 \rho')$. Matemáticamente el tensor de Lighthill corresponde a una distribución de cuadrupolos acústicos (Argüelles Díaz et al., 2004).

Existen dos razones fundamentales que llevaron a Lighthill en su formulación original a adoptar esta metodología. En primer lugar, puesto que no se considera la influencia del sonido sobre el campo de flujo que lo genera, puede considerarse el sonido como forzado por un campo de fuerzas externas fluctuantes, de modo análogo a lo que ocurre con una oscilación forzada. En segundo lugar, si el campo libre se toma como el medio acústico uniforme en reposo, no es necesario considerar las modificaciones que sobre el sonido resultante ejercería el movimiento del medio (convección con la turbulencia, propagación a velocidad variable, etc.), que por lo general son difíciles de cuantificar, pero que de esta forma son reemplazadas por términos fuente equivalentes (Lighthill, 1952).

Por otro lado Lighthill propuso algunas simplificaciones basándose en el hecho de que el mecanismo dominante en la generación de sonido es la mezcla del flujo, especialmente a números de Reynolds elevados. Cuando el número de Reynolds del flujo es elevado, es decir, cuando el flujo es muy turbulento, los efectos viscosos son mucho menos importantes que los efectos inerciales, de modo que el tensor de tensiones viscosas puede despreciarse frente a las tensiones fluctuantes de Reynolds, $\rho v_i v_j$ (Lighthill, 1952).

En el tensor de Lighthill el término $(p' - c_0^2 \rho')$ representa todos los efectos debidos a las no uniformidades de la entropía. Puede tener gran relevancia para chorros calientes con gradientes elevados de temperatura pero si por el contrario se enfatiza el ruido de mezcla y la temperatura se mantiene prácticamente uniforme, se sostendrá la hipótesis de que el flujo es isentrópico y por tanto, $p' - c_0^2 \rho' = 0$ (Polifke, 2004).

Por otro lado, el campo acústico tiene una contribución en las tensiones fluctuantes de Reynolds. Si se tiene un número de Mach⁴ bajo, asegura que el flujo se desarrolle prácticamente como incompresible, de modo que el orden de magnitud de las

⁴ Es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto.

fluctuaciones de velocidad asociadas con las ondas acústicas es mucho menor que el orden de magnitud de las velocidades en el flujo turbulento y se cumple que $\rho v_i v_j = \rho_0 v_i v_j$. Por lo tanto el tensor de tensiones de Lighthill se reduce a la forma:

$$T_{ij} = \rho_0 v_i v_j$$

Donde \vec{v} es el campo de velocidades de la parte acústica.

2 -SECCIÓN II- Procesos y fenómenos de generación de ruido

En este capítulo se presentarán los procesos y fenómenos que explican la generación de ruido debido a la interacción del flujo de viento con un obstáculo.

2.1 Interacción entre un flujo de aire y diferentes obstáculos

En dispositivos tales como un tambor o una guitarra, el sonido se da cuando un sistema mecánico vibra y perturba el aire. En un sonido aerodinámico el sistema vibratorio es el aire mismo. La generación de sonido aerodinámico ha sido objeto de experimentos y estudios por más de un siglo. En el curso de estas investigaciones han sido descubiertos diferentes tipos de sonidos y varias descripciones matemáticas han sido desarrolladas, por ejemplo, la teoría del ruido generado aerodinámicamente basada en un desarrollo matemático y la introducción de una hipótesis física desarrollada por el matemático James Lighthill (1952).

Los sonidos aerodinámicos pueden tomar diversas formas. Sin embargo, todos los sonidos aerodinámicos presentan, básicamente, similares características: en cada "silbido", se debe establecer un flujo constante de fluido. Debajo de cierta velocidad, el flujo es laminar y estable; por encima de esa velocidad, alguna perturbación puede causar que en la corriente se formen vórtices espaciados periódicamente generando oscilaciones en el entorno del fluido. Si la frecuencia de las oscilaciones está entre 20 Hz y 20.000 Hz (el rango de audición humana), se escucha un sonido. Si la frecuencia es mayor o menor, se generan campos acústicos ultrasónicos o subsónicos difíciles de percibir por el oído humano.

Los elementos básicos de dichos sonidos: (1) un medio de amplificación y (2) un medio que alimente la energía amplificada devuelta para sostener y controlar el proceso. En un sonido aerodinámico una pequeña perturbación en la corriente de aire fluyendo a través de un obstáculo puede ser amplificada en un sonido más intenso por la propia inestabilidad del flujo, que permite además que la energía se convierta en energía oscilatoria. Parte de la energía de la perturbación amplificada se realimenta aguas arriba, donde el flujo es más inestable, y si tiene la frecuencia y amplitud apropiadas, se adiciona a la perturbación original explicando que el fenómeno se mantenga en el tiempo.

En un sonido aerodinámico hay una cantidad de energía en el flujo, de modo que, para un conjunto dado de condiciones, el sonido alcanza una amplitud constante. Este estado estacionario se logra en el curso de varios ciclos de retroalimentación. Cada vez que el ciclo se completa la amplitud del sonido aumenta. La tasa de aumento disminuye hasta que llega a cero; en ese punto prácticamente toda la energía disponible contenida en el flujo constante ha sido desviada para amplificar la perturbación original.

Según Chanaud (1970) los sonidos aerodinámicos se pueden dividir en tres clases según los medios de retroalimentación. Si la retroalimentación del sonido consiste principalmente en oscilaciones hidrodinámicas, se definen como sonidos clase I o sonidos hidrodinámicos. Si la retroalimentación de la región de inestabilidad la realizan directamente las ondas emitidas, son de Clase II o “acústica de silbido”. Sonidos de clase III se distinguen por el hecho de que la retroalimentación se logra por ondas de sonido reflejadas, o sea, que retornan a la región de la inestabilidad desde alguna estructura auxiliar.

Se debe tener en cuenta que la clasificación de sonidos aerodinámicos es totalmente arbitraria, ya que un mecanismo de este tipo puede ser tan complejo que pueden suceder dos o los tres fenómenos de sonido al mismo tiempo.

En la Figura 2-1 se presenta el diagrama de retroalimentación, en que se resume las tres clases de generación del sonido aerodinámico.

Una pequeña perturbación inducida en un flujo estacionario, podría amplificarse si el flujo resulta inestable. A medida que esta perturbación se mueve a través del fluido se generan vibraciones acústicas las cuales, según sus características, pueden ser percibidas por el oído humano. Parte de esta energía generada por la inestabilidad del flujo es la que retroalimenta el fenómeno, es decir, alimenta la perturbación “flujo arriba”. A este fenómeno se lo clasifica como clase I.

Si la retroalimentación consiste en que el sonido emitido actúa directamente sobre el flujo, al fenómeno se lo denomina clase II. En cambio, si el ciclo de retroalimentación se produce por una reflexión, superficie o por un resonador, se denomina fenómeno de clase III.

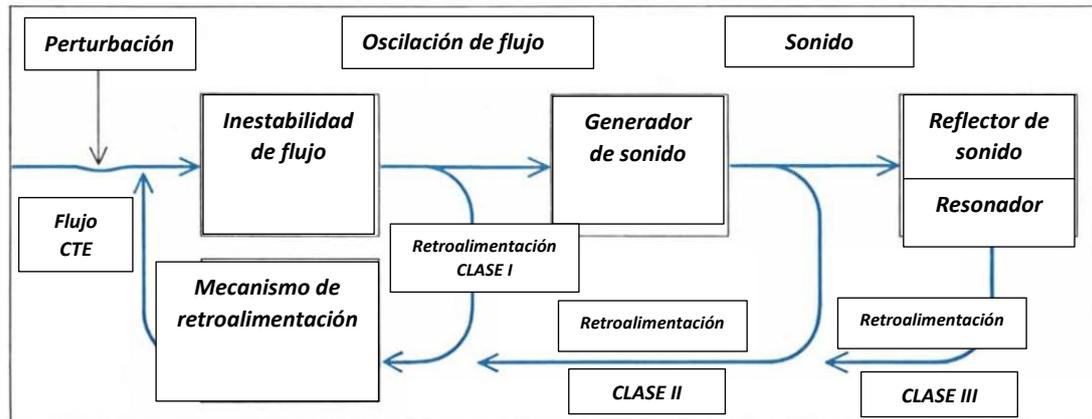


Figura 2-1. Diagrama de retroalimentación, generación del sonido aerodinámico. R. Chanaud (1970)

Los sonidos clasificados como clase I son los que se encuentran comúnmente, en particular en la naturaleza como puede ser el pasaje del flujo del viento alrededor de cables de electricidad y de ramas.

Si se considera un cilindro largo y delgado inmerso en una corriente de aire (u otro fluido), por encima de cierto número de Reynolds, se desarrollarán dos vórtices simétricos en la región de la estela, los cuales son estables. Si el Reynolds del flujo aumenta por encima de cierto valor y uno de los vórtices es perturbado por una onda de presión de sonido, el vórtice oscilará en torno a su posición estable y, finalmente, se separará del cilindro y se moverá flujo abajo (ver Figura 2-2). Ese vórtice “desprendido” da lugar a la inestabilidad del vórtice siguiente. Como resultado de este fenómeno se genera una cadena de vórtices alternos que se emiten flujo abajo del cilindro. El sonido clasificado como clase I es un subproducto del desarrollo de vórtices. Los vórtices pueden desarrollarse sin generar sonido audible. Para que sean percibidos por el oído humano se deben dar las condiciones apropiadas, como características del obstáculo y velocidad del flujo, entre otras, de manera que el sonido se emita en una frecuencia dentro del rango audible y con una intensidad suficiente para ello.

A veces, este proceso de generación de sonido hace que el cilindro (u objeto) vibre; este movimiento puede contribuir al sonido, pero no es esencial para su producción.

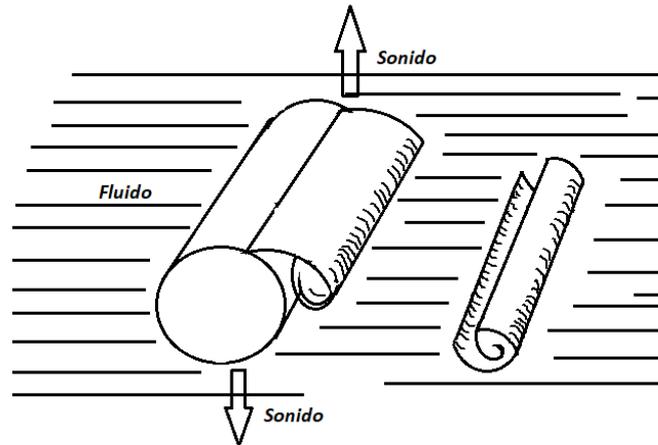


Figura 2-2. Desprendimiento de vórtices debido a la interacción de un fluido en movimiento y un cilindro. Redibujado de Chanaud (1970)

Strouhal observó que el sonido emitido por el flujo alrededor de un cilindro no se generaba hasta que determinada velocidad era alcanzada. Por encima de esa velocidad, el sonido generado se relacionaba directamente con la velocidad del fluido y con el diámetro del cilindro. Strouhal encontró que, en general, la frecuencia era más alta para cilindros más pequeños y más bajas para los más grandes. La relación podría ser descrita en términos de una magnitud adimensional, que es el producto de la frecuencia del sonido por el diámetro del cilindro dividido la velocidad del flujo. Este número se denomina actualmente como el número de Strouhal y puede ser usado para describir los sonidos clasificados como clase I (Chanaud, 1970).

Los sonidos aerodinámicos clasificados como Clase II son más numerosos que aquellos denominados Clase I. Los sonidos aerodinámicos Clase II son muy estudiados en la aeronáutica, dado que estas oscilaciones, en muchas ocasiones, son muy intensas y pueden producir fatiga de metal y fallas en motores.

Uno de los más antiguos y conocidos de los sonidos Clase II se llama **tono de borde**. El tono de borde, que puede ser generado por flujos a baja velocidad y supersónicos, generalmente tiene asociados un tono puro, sonido que a altas intensidades puede ser doloroso para el oído. Un tono de borde se produce cuando el aire se dirige hacia un borde, tendiendo a moverse hacia un lado formando vórtices. La trayectoria del flujo asociadas con el campo de sonido de tono de borde se asemeja al patrón de limaduras de hierro alrededor de un imán tal cual se puede observar en la Figura 2-3. A medida que el sonido se propaga de nuevo hacia el borde, donde el flujo es más inestable, se refuerza la inestabilidad causando un desplazamiento lateral del chorro que da lugar a vórtices flujo abajo; estos vórtices encuentran el objeto (generalmente una cuña afilada) y causan más emisión de sonido (Chanaud, 1970).

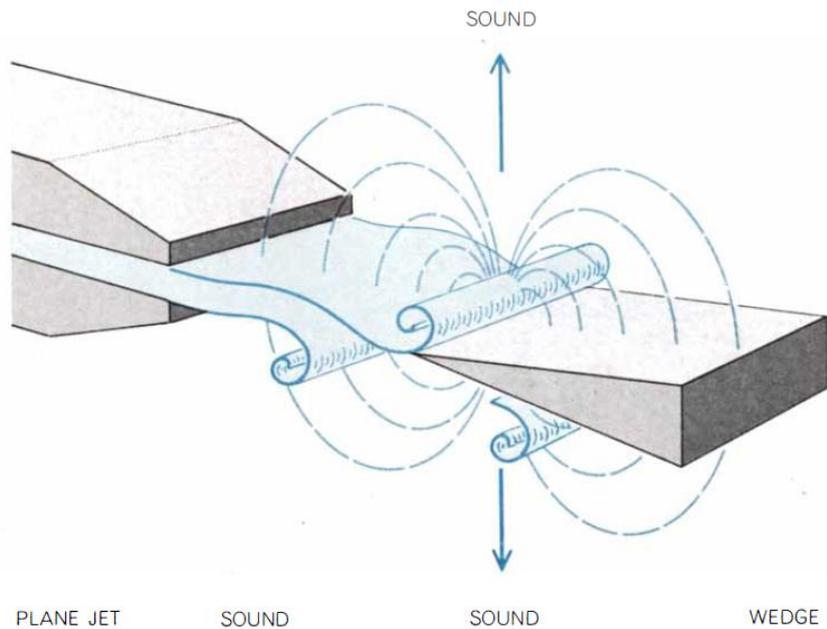


Figura 2-3. Sonido clase II; tono de borde (Chanaud, 1970).

El estudio de esta clase de sonido aerodinámico debido a su generación en el rubro de la aeronáutica ha llevado a investigar un sonido clasificado como clase II. Consiste en una corriente de aire de alta presión a través de un paso estrecho. El intenso sonido producido por este fenómeno resulta del hecho de que cuando el aire ingresa en una sección restringida, como una boquilla, a una presión más alta que la presión atmosférica, no puede avanzar por la boquilla más rápido que la velocidad de sonido. Como consecuencia, el aire no puede volver a la presión atmosférica hasta después que se haya escapado de la boquilla (Figura 2-4). En este caso la retroalimentación se da a partir del flujo que no ingresa al orificio, aumentando la inestabilidad del flujo incidente y que posteriormente ingresará al orificio.

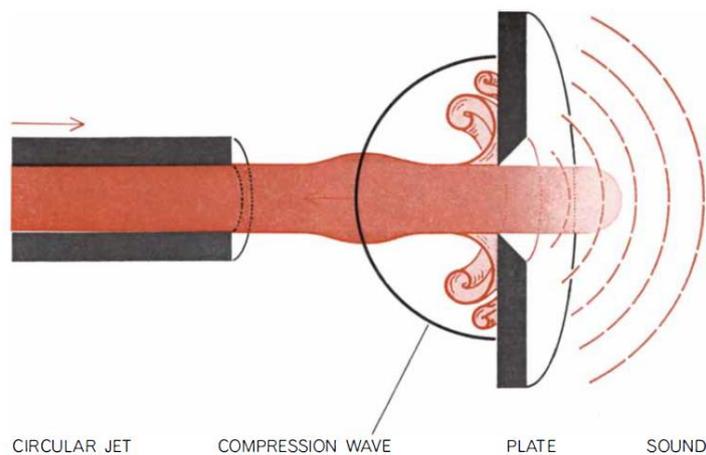


Figura 2-4. Corriente de aire de alta presión a través de un paso estrecho (Hobert C. Chanaud, 1970).

La mayoría de los sonidos aerodinámicos clasificados como **clase I y clase II** se pueden producirlos soplando por la boca en un dispositivo de geometría adecuada. Este fenómeno es el principio de funcionamiento de los instrumentos de viento.

Los sonidos aerodinámicos Clase III, por el contrario de los sonidos aerodinámicos clasificados como clase I y clase II, presentan una estructura resonante o reflejante que controla la retroalimentación. Un ejemplo conocido donde se genera este fenómeno es en los instrumentos de viento (Figura 2-5), en los cuales se realiza un acoplamiento de vibraciones producidas en una rendija, un borde y una columna de aire. Cuando se construye tal instrumento, la frecuencia está determinada principalmente por las frecuencias resonantes de la columna de aire, que controlará la velocidad de la oscilación del aire a través del borde. El efecto de tono de borde en tales instrumentos, sirve para dar inicio y mantener el tono, y también hacer la transición de la columna de aire hacia un armónico superior. La flauta suena cuando un chorro de aire se sopla desde la boca a través de un orificio en el costado del instrumento, el flujo incide en el borde opuesto del orificio para crear un tono de borde. El tono de borde, sin embargo, hace que la columna de aire en el tubo del instrumento resuene a una frecuencia propia; dicha frecuencia queda determinada por el flujo de aire incidente y de la longitud del tubo. Las ondas sonoras formadas en la columna de aire son lo suficientemente intensas como para anular la frecuencia de retroalimentación del tono de borde y, por lo tanto, la primera predominará en la emisión de sonido. Es este mismo fenómeno el que habilita a los tubos de un órgano a funcionar como instrumentos musicales. Si uno desea cambiar el tono basta con colocar tubos de diferentes longitudes, como en el caso de los órganos, o destapando o tapando orificios para el caso de una flauta (Chanaud, 1970).

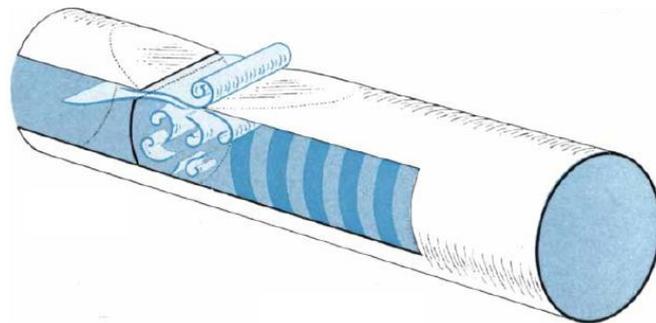


Figura 2-5. Generación de sonido aerodinámico clase III (Chanaud, 1970).

Este principio de sonidos aerodinámicos fue utilizado por Sir Francis Galton en 1876, quien desarrolló una especie de silbato para estudiar la capacidad auditiva en humanos y en animales. El silbato de Galton (ver Figura 2-6) posee una cavidad resonante de pequeñas dimensiones, de profundidad regulable, que contiene aire. Se excitan las vibraciones soplando aire a presión a la entrada de la cavidad. Con algunos perfeccionamientos, se han podido obtener con tales aparatos vibraciones ultrasónicas, cuyas frecuencias sobrepasan los 100.000 Hz. El chorro de aire ingresa en forma de anillo que produce un sonido cuando el flujo de aire incide en el borde y en una cavidad resonante. El sonido puede variar no sólo en intensidad sino que también de bajas a

altas frecuencias. Con este silbato, Galton estudió la pérdida auditiva en personas adultas, dado que el primer silbato tenía la capacidad de emitir sonidos con frecuencia de hasta 23.000 Hz. En la actualidad, este estudio se realiza con un audiómetro.

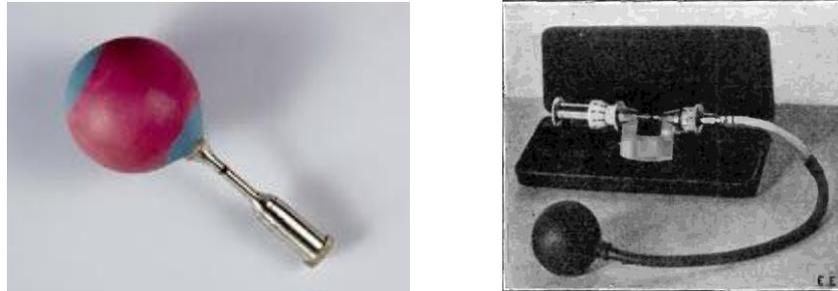


Figura 2-6. Silbato Francis Galton (Fuente imagen a): <http://dicci-eponimos.blogspot.com/2010/04/silbato-de-galton.html/> Fuente imagen b) "Oddities of Sound" in The Electrical Experimenter magazine, The Experimenter Publishing).

Por otro lado, Howe (2003) afirma que el sonido generado por el desprendimiento de vórtices es un subproducto de movimientos inestables de fluidos como se muestra en la Figura 2-7. La teoría actual del sonido aerodinámico fue iniciada por James Lighthill a principios de la década de 1950, tal cual fue presentada en el capítulo 1.5.1. Lighthill buscaba entender los mecanismos de generación de ruido por los motores a reacción de los aviones de pasajeros, los cuales estaban a punto de entrar en servicio en esa década. Según Howe (2003), actualmente se reconoce que cualquier mecanismo que produce un sonido, se puede formular como un problema de sonido aerodinámico.

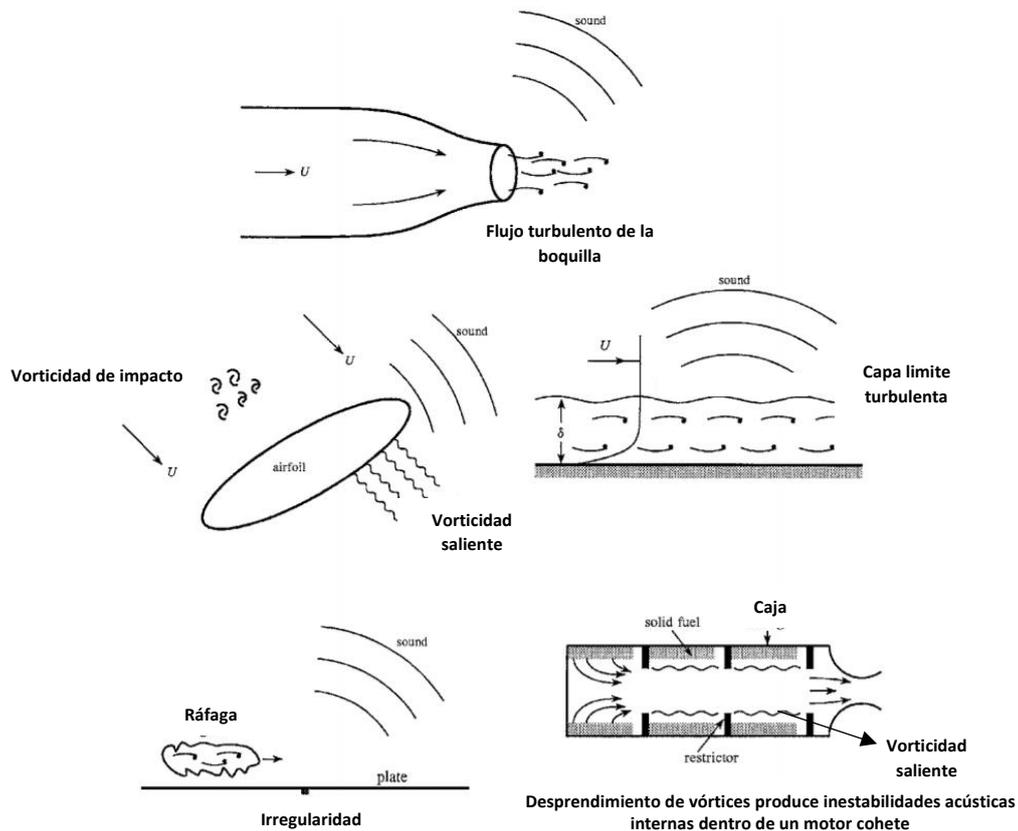


Figura 2-7. Problemas típicos de generación de sonido debido al desprendimiento de vórtices. Adaptado de Howe (2003).

2.2 Actualidad -el viento y las edificaciones-

El ruido inducido por el viento a menudo se pasa por alto en el diseño de edificios. Este ruido puede ser generado por el viento que fluye sobre los elementos de la fachada o a través de intersticios dentro de los edificios. El ruido generado por los elementos de la fachada sobre los que incide el viento, especialmente a velocidades del viento más altas, ha recibido una mayor atención en los últimos años.

El ejemplo más notable es uno de los edificios residenciales más altos de Europa en Manchester, Inglaterra, conocido como "**Beetham Tower**", que recibió amplia publicidad cuando se completó su construcción en el 2006 (Figura 2-8), según lo informado por Leeming (2006). Beetham Tower es un rascacielos de 47 pisos de uso mixto situado en el centro de la ciudad de Manchester, en Inglaterra. Fue diseñado por el arquitecto inglés Ian Simpson, quien vive en el piso superior de la torre. Con una altura de 168 metros, Beetham Tower es el rascacielos más alto de Manchester y el noveno más alto en el Reino Unido.



Figura 2-8. Beetham Tower. Manchester, Reino Unido (Fuente imagen: <https://www.manchestereveningnews.co.uk/>)

La delgada estructura del rascacielos la hace estar entre los rascacielos más esbeltos del mundo; de hecho fue diseñada para destacar por esa característica. Una estructura en forma de cuchilla actúa como prolongación de la fachada sur de la torre, lo que acentúa su forma y actúa como pararrayos (ver Figura 2-9).



Figura 2-9. Estructura en forma de cuchilla en la azotea de Beetham Tower. (Fuente imagen: <https://www.manchestereveningnews.co.uk/>)

La torre es conocida por emitir un sonido muy peculiar, tipo zumbido, en ciertos rangos de intensidades de vientos. Dicho zumbido se ha percibido en al menos 3 kilómetros a la redonda.



Figura 2-10. Beetham Tower. Manchester, Reino Unido (Fuente imagen: <https://www.manchestereveningnews.co.uk/>).

Baker (2015) informó que el trabajo para reducir o erradicar el ruido se llevó a cabo en 2007 con almohadillas de espuma instaladas en los bordes de las cuchillas y otros trabajos no divulgados completados en febrero de 2010. Los intentos de erradicar el ruido permanentemente no han tenido éxito.

Ploemen et al. (2011) proporcionan evidencia de dos edificios de gran porte de La Haya en los Países Bajos (Figura 2-11), que se hicieron notorios por el ruido generado a velocidades del viento de alrededor de 12-15 m/s, y se afirma que las rejillas de acero que poseen sus fachadas son la fuente de ruido.



Figura 2-11. Edificios de gran porte de La Haya en los Países Bajos (Fuente imagen: Google)

Otros ejemplos recientes incluyen el ruido generado por las barandillas de los pasos elevados peatonales de la autopista Eastlink de 40 km en Melbourne, Australia, instalados en seis ubicaciones a lo largo del proyecto (Mitchell et al, 2010). Se informó que en algunas ocasiones los niveles de ruido en las propiedades residenciales cercanas

son 40 dB mayores que el nivel de ruido de fondo (o ambiente). En la Figura 2-12 se pueden observar dos pasos peatonales de dicha autopista, los cuales se encuentran a escasos metros de la zona residencial. En tanto, en la Figura 2-13 se presenta uno de los pasos peatonales, en los cuales se pueden observar las barandillas en donde se generaba un fenómeno acústico que se desarrollará más adelante según un estudio realizado por Mitchell et al. (2010).



Figura 2-12. Pasos elevados peatonales de la autopista Eastlink en Melbourne, Australia (Fuente imagen: Google Earth).

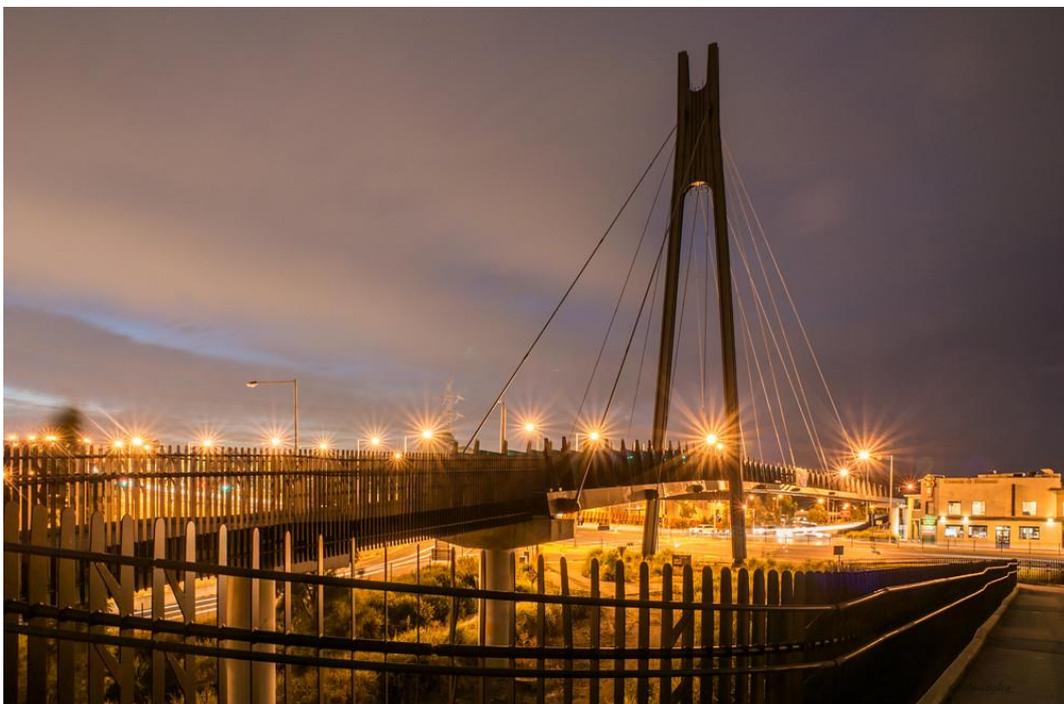


Figura 2-13. Paso peatonal elevado de la autopista Eastlink en Melbourne, Australia en el 2019 (Fuente imagen: Google).

2.3 Diferentes abordajes al problema

En esta sección se presentarán estudios realizados a problemas puntuales inducidos por la interacción entre el viento y las edificaciones que se han dado alrededor del mundo. Se presentará en orden cronológico los estudios y casos particulares que reporta la bibliografía en los últimos 20 años sobre este fenómeno.

Actualmente, el ruido inducido por el viento se pasa por alto en el diseño de edificios y en los diferentes accesorios que se colocan en sus fachadas o azoteas. Por tal motivo, se verá que cada autor o cada técnico que ha afrontado este problema, presenta una forma diferente de abordaje.

Rofail y Tonin (2000) presentaron por primera vez el tema del "ruido del viento" en los edificios. Se realizaron mediciones en túnel de viento con flujo a través de una ventana y puerta corrediza con huecos en extrusiones de aluminio (ver Figura 2-14). Los resultados indicaron que la velocidad del viento que coincide con el inicio de la generación de tonos eólicos depende del ancho del espacio, y la frecuencia del tono depende de la velocidad del viento incidente. Se encontró que el nivel de presión acústica aumenta con la velocidad del viento y, para la misma velocidad del viento, disminuye con el ancho del espacio.

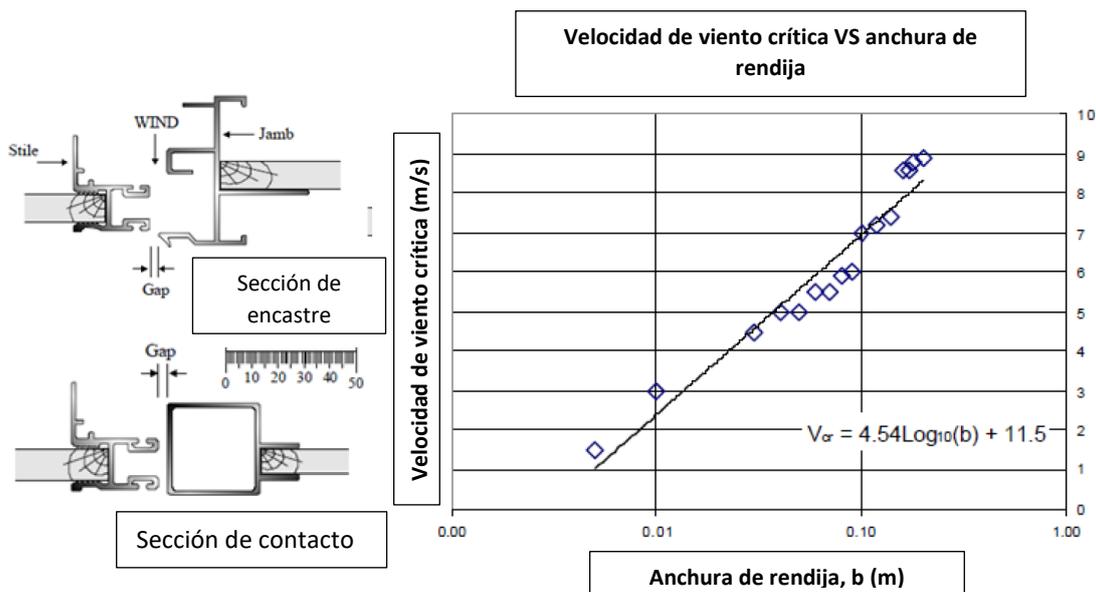


Figura 2-14. Generación de ruido debido al pasaje de un flujo de aire a través de una cavidad, de encastre o sección típica, o cierre por contacto. (Rofail and Tonin, 2000)

Observando el gráfico de la Figura 2-14, se tiene una expresión para la velocidad crítica de la forma:

$$V_{cr} = 4.54 \log_{10}(b) + 11.5 \quad (2.1)$$

Donde b corresponde a la separación de la ranura. Por ejemplo, para un ancho de ranura de 10 centímetros, se espera que la velocidad crítica sea 6,9 m/s. La velocidad crítica se define como la velocidad a partir la cual, para de la separación b , se percibe un sonido debido al pasaje del flujo a través de dicha cavidad.

Algunos resultados obtenidos por Rofail y Tonin (2000) son presentados a continuación. En el gráfico de la Figura 2-15 se presenta el espectro en bandas de tercio de octava para una abertura de 30 centímetros y una velocidad de viento de 8 m/s. Dicho resultado se obtuvo restando el espectro del ruido generado por el túnel de viento, para ello Rofail y Tonin (2000) realizaron una primera medición de niveles de presión sonora sin el objeto en estudio, para caracterizar el ruido generado por el ventilador. Los puntos azules representan los niveles en escala lineal, mientras que los puntos oscuros representan los niveles ponderados en escala A. Según los niveles presentados en dicho gráfico, se tiene un L_{Aeq} de esa medición de 53 dBA.

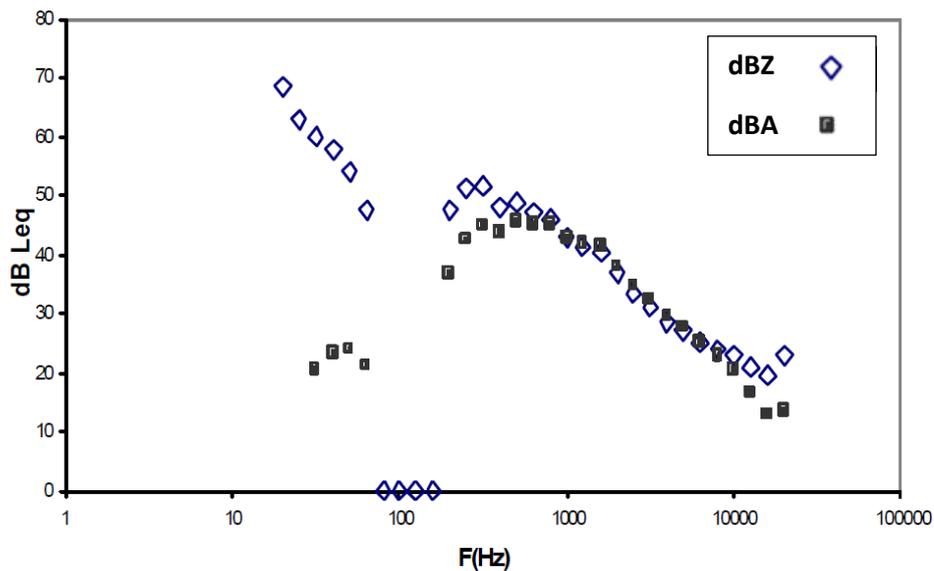


Figura 2-15. Espectro en BTO. Abertura de 30 cm con una velocidad de viento de 8 m/s. (Rofail y Tonin, 2000).

En el gráfico de la Figura 2-16 se presenta el espectro en bandas de tercio de octava para una abertura de 1 cm y una velocidad de viento de 8 m/s. Al igual que el gráfico anterior, se restó el espectro del ruido generado por el ventilador del túnel de viento. Según los niveles presentados en dicho gráfico, se tiene un L_{Aeq} de esa medición de 68 dBA.

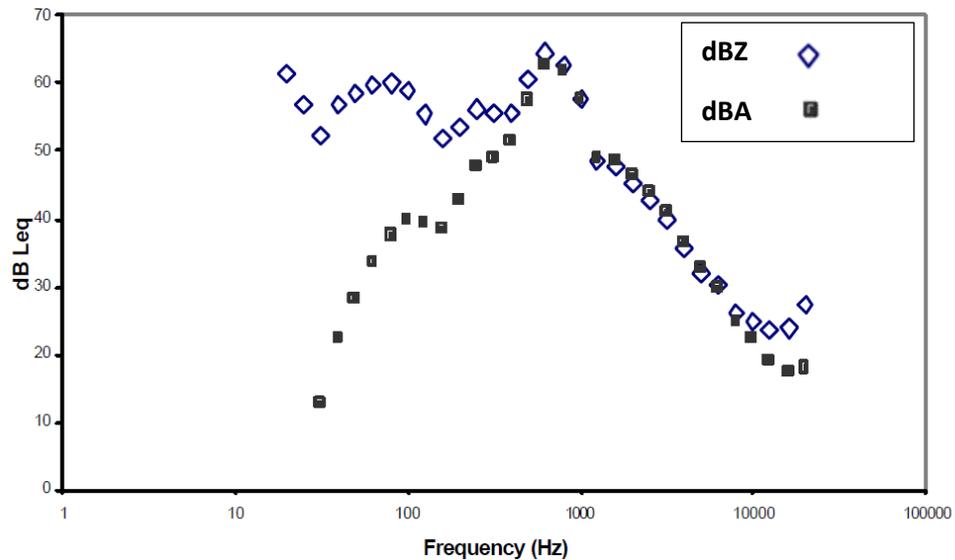


Figura 2-16. Espectro en BTO. Abertura de 1 cm con una velocidad de viento de 8 m/s (Sección típica). (Rofail y Tonin, 2000).

En la Figura 2-17 se muestra el resultado para una sección de contacto. Para este caso, según Rofail y Tonin (2000), el inicio de los tonos eólicos no se produce para separaciones superiores a 10 mm, mientras que con la sección típica, los tonos se identificaron hasta los 50 mm de abertura. Rofail y Tonin (2000) concluyen además que cuando existen bordes afilados se facilita la generación de tonos eólicos.

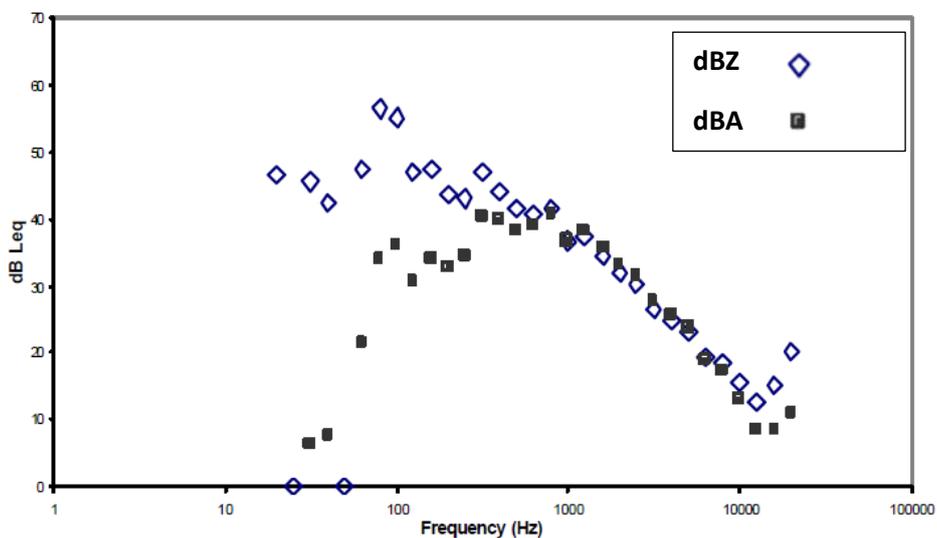


Figura 2-17. Espectro en BTO. Abertura de 1 cm con una velocidad de viento de 8 m/s (Sección de contacto). (Rofail y Tonin, 2000)

En la Figura 2-18 Rofail y Tonin (2000) muestran que el nivel de presión acústica (SPL) del tono generado aumenta con la velocidad del viento y, para la misma velocidad del viento, aumenta con la reducción del ancho del espacio. Por otro lado, en la Figura 2-19 los autores presentan que para pequeños anchos de separación (menores a 50 mm) el nivel de ruido general está dominado por tonos eólicos, sin embargo, para separaciones

mayores a 50 mm, el ruido es generado por la turbulencia, donde predomina la energía en baja frecuencia (por debajo de 63 Hz).

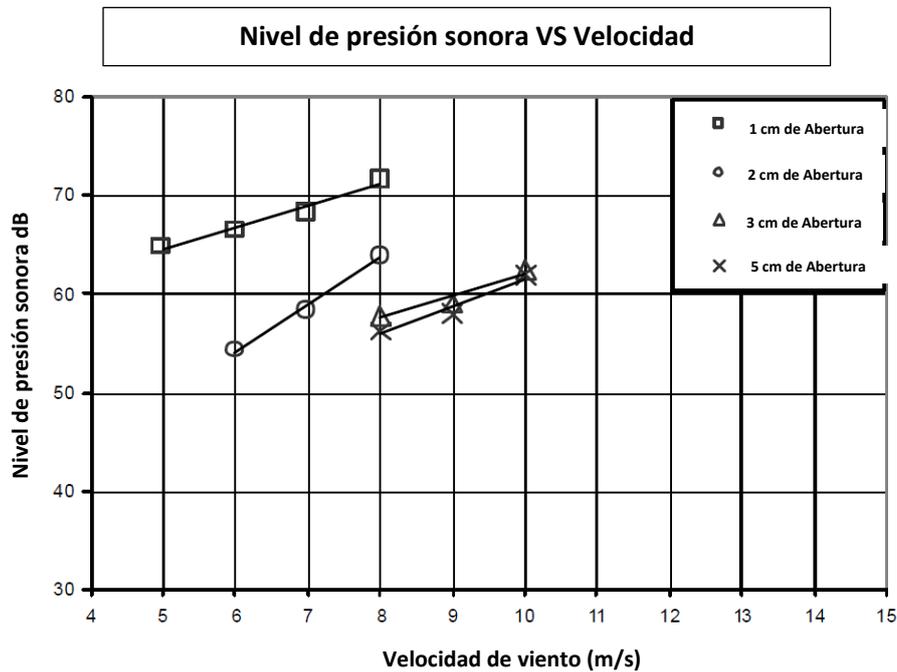


Figura 2-18. Nivel de presión sonora del tono generado para diferentes condiciones de velocidad y ancho de espacio. (Editado de Rofail y Tonin, 2000)

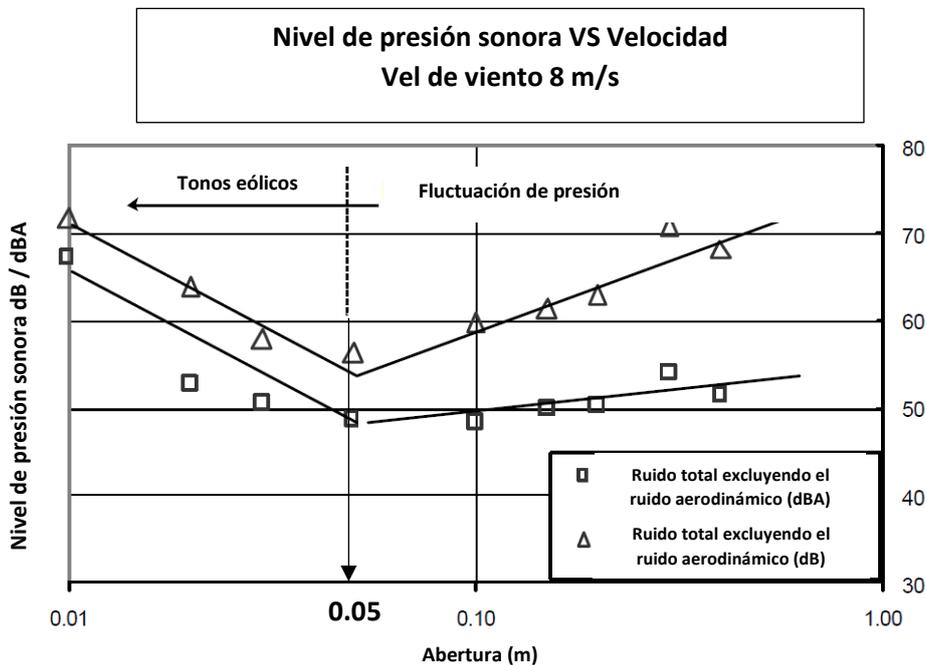


Figura 2-19. Nivel de presión acústica vs ancho de separación. (Editado de Rofail y Tonin, 2000).

Parthasarathy et al (1985) observaron, a partir de ensayos en túnel de viento, que la intensidad de sonido máxima de una cavidad cilíndrica, de 51 mm de diámetro y 100 mm de profundidad, ocurría para un número de Strouhal de 0,5. Los números de

Strouhal para las pruebas realizadas por Rofail y Tonin (2000) oscilaron entre 0,6 y 1,6. Los resultados de las pruebas de marco de ventana realizados por Parthasarathy et al (1985) indican que los niveles de sonido máximos se producen para los números de Strouhal de 0,8 (ver Figura 2-20).

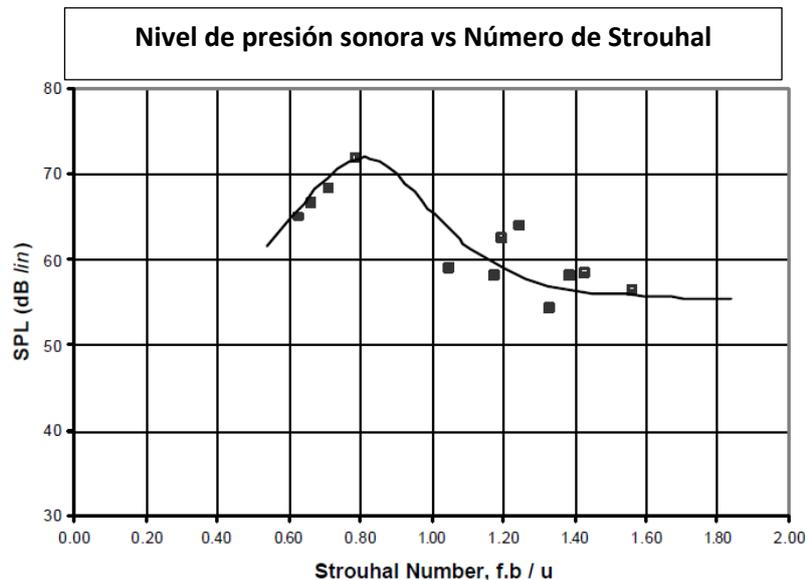


Figura 2-20. Resultado de pruebas en marco de ventana. (Parthasarathy et al, 1985)

Por otro lado, Moloney et al. (2010) plantea una discusión general sobre ensayos y evaluación del ruido asociado a la interacción entre el viento y un edificio. Dicho autor presenta una breve descripción de los tipos de ruidos generados por el viento, el cual utiliza como punto de partida, para desarrollar la evaluación, realizar el análisis de los diferentes fenómenos que se producen y el posible abordaje de esos problemas.

Según Moloney et al. (2010), en la mayoría de los problemas de ruido ocasionados por la interacción viento/estructuras, se producen a partir de fluctuaciones del campo de presiones o de velocidad. Dichas fluctuaciones pueden producir resonancia audible en componentes estructurales o generar ondas audibles. Algunos mecanismos de generación de ruido pueden ser:

- Tonos eólicos: estos ocurren cuando se genera un vórtice de alta frecuencia, como, por ejemplo, el pasaje de un flujo de aire por un cable o un perfil aerodinámico.
- Resonador de Helmholtz: esto se genera cuando el volumen de aire en una cavidad aumenta o disminuye periódicamente. Por ejemplo, en un tubo de aire, donde las fluctuaciones resultantes se pueden amplificar y vibrar en un tono audible.
- Vibración estructural: el movimiento y la fricción entre varios componentes de una estructura, generado por el pasaje del viento.
- Capa de corte: la fricción entre los límites del flujo de aire y/o el aumento de la velocidad, como puede ser el pasaje del viento entre espacios estrechos, pueden producir sonidos muy similares a un silbido.

Para la evaluación del ruido producido por el flujo de viento, Moloney et al. (2010) mencionan algunos métodos que fueron utilizados en casos que se presentan más adelante en este capítulo.

Como punto de partida, los ensayos de laboratorio pueden llevarse a cabo en componentes a gran escala de un edificio y/o en secciones representativas para predecir la posible aparición de ruido de viento. Es importante saber que la modelación debe atender no sólo el elemento a evaluar sino también el flujo que se desarrolla a su alrededor, para predecir la posible aparición de ruido generado por el viento.

Otros métodos pueden ser:

i) Evaluación en túnel de viento: si se cuenta con esta instalación, la prueba en el túnel de viento siempre será un método adecuado para probar los prototipos a escala. Se puede, además, utilizar para identificar dónde se genera el tono y en qué condiciones, cuantificando la magnitud del posible ruido.

ii) Compresor de aire: utilizando este método se corre el riesgo de no representar las condiciones adecuadas para la aparición del ruido, dado que el flujo de aire es constante en todo momento. La ventaja de este método es que se puede lograr un flujo de aire silencioso, estrecho y direccionado hacia el elemento de estudio, facilitando la ubicación donde se genera el fenómeno.

iii) Cámara de presión: banco de ensayo donde se puede modificar su presión interior. Pequeñas aperturas en la fachada pueden ocasionar “silbidos” generados por el pasaje de aire. Moloney et al. (2010) comentan que la aparición de este tipo de sonido en ranuras rectangulares puede ocurrir para presiones de alrededor de 450 Pa a 500 Pa.

iv) Evaluación en sitio: permite la medición de los niveles de presión sonora generados por el fenómeno y la identificación del ruido a diferentes velocidades y direcciones de viento. Este método permite medir el impacto del ruido de viento dentro y alrededor del edificio. La desventaja de este método es que se puede llegar a pasar por alto algunas condiciones críticas del fenómeno.

El autor remarca, en la discusión, que muchas de estas técnicas son complementarias y se debe tener cuidado a la hora de la simulación, dado que se puede tener una representación inadecuada del fenómeno. Al predecir la aparición de ruido del viento, es muy importante simular la condición del mismo (velocidad, dirección y turbulencia) y la condición de fijación del componente bajo prueba.

Moloney et al. (2010) comentan algunas medidas a considerar al momento que se presenta un fenómeno de esta índole. Las medidas contra el ruido generado por el viento no siempre son de fácil implementación; la prevención mediante la identificación de problemas potenciales es el mejor método para anticiparse a las correcciones posteriores a la instalación.

En caso de tener un elemento con orificios, el método más obvio es bloquear los orificios y sellar los huecos. Otra opción es aumentar o reducir el tamaño de los huecos o la dimensión de los elementos. Por lo general, tiende a haber un ancho de pasaje crítico que produce tonos audibles tal cual lo presentado por Rofail y Tonin (2000). Otro tipo de solución planteada por el autor se basa en alterar la estela afectando la separación, por ejemplo, modificando los bordes del elemento. También se puede considerar añadir elementos de amortiguación, incluidas pinturas amortiguadoras o componentes vibrantes, que pueden disminuir completamente algunas fuentes de ruido resonante.

Moloney et al (2010) finalizan la discusión comentando algunos de los casos que se ha dado en diferentes partes del mundo y algunas medidas implementadas. Así es el caso de un edificio de 27 pisos en Melbourne, Australia, de los cuales del 2do al 4to piso se instalaron pantallas de metal con orificios. En el sitio se observó que el panel producía fuertes tonos durante brisas moderadas. Se realizaron mediciones de niveles de presión sonora y se realizó un ensayo en laboratorio de una muestra de la placa de aproximadamente 2,5 m x 1,5 m. El panel perforado de aluminio presentaba orificios circulares de 5 mm de diámetro y con un mismo espesor. La separación entre orificios era de 10 mm.

En laboratorio, el panel fue instalado en un túnel de viento, encontrando un tono en 5 kHz por encima de los 7 m/s. Aunque parezca trivial, se encontró que, obturando algunos orificios, el ruido tipo silbido, disminuía. Se intentó colocar un deflector con el fin de desviar el flujo de aire, pero no necesariamente se detuvo el fenómeno. Cuando se probó el panel utilizando un chorro de aire de 200 mm de diámetro, no se produjo ningún silbido en los agujeros, en base a este resultado se dedujo que el mecanismo de ruido del viento en este caso era de los tonos eólicos producidos por el vórtice desprendido de cada perforación. La presión fluctuante detrás de cada orificio produjo una resonancia en todo el panel. Identificado el problema, se propusieron y probaron numerosas soluciones. Finalmente se solucionó aplicando una capa de pintura amortiguadora de sonido a cada pantalla, lo que permite que el aire fluya a través del panel a la vez que amortigua las vibraciones de altas frecuencias.

Otro caso mencionado por el autor trata sobre un edificio artístico el cual se pretendía colocar una pantalla con espacios estrechos y bordes afilados en su fachada. Este elemento se identificó como una potencial fuente de ruido. La pantalla fue fabricada de aluminio; la misma presenta hojas de 200 mm con tres cortes en cada hoja y colocadas en un ángulo específico. Dichas hojas fueron espaciadas y ensayadas en un rango de 1 mm a 70 mm. El panel se probó con un chorro de aire angosto y silencioso para detectar posibles silbidos, no encontrando ruidos tonales significativos para ninguna combinación de ángulos, velocidad o separación de hojas. Se realizó un estudio en túnel de viento descubriendo que la vibración de las hojas y posterior fricción contra el panel podrían ocasionar ruidos indeseables. Dicha evaluación mostró la necesidad de aumentar los anchos de corte para evitar las posibles vibraciones.

Moloney et al. (2010) comentan un último caso el cual sucedió en un edificio de gran altura en la ciudad de Auckland. Para este caso, nuevamente se aisló una muestra (de 1500 mm² aproximadamente) y se colocó en una plataforma móvil la cual permitió rotar

dicha muestra para cambiar el ángulo de ataque del chorro de aire aplicado. Se aplicaron velocidades de viento típicas del lugar. Además, se instaló un micrófono en el montante de la fachada del edificio con el objetivo de medir algún episodio de ruido a lo largo de la fachada y así predecir la transmisión al interior del mismo. Para este caso, el ruido generado por el viento fue debido a la formación de un vórtice en los bordes afilados de la fachada. Se lograron registrar amplitudes de 110 dB centradas en la banda de 125 Hz para una velocidad de viento de 15 m/s. Se aisló la muestra en una cámara de presión y curiosamente no se registraron tonos, implicando una dependencia de la velocidad del flujo y sus fluctuaciones para la generación del ruido.

Para este último caso planteado por los autores, se resaltó la necesidad de identificar la condición de la generación de ruido, tomar medidas para mantener la trayectoria del ruido y luego combinar los datos de velocidad de viento con criterios de nivel de ruido para decidir si el ruido sería un problema o no. La solución para este problema se centró en la instalación de deflectores dentro de los elementos de la fachada.

Se puede concluir de esta discusión que el fenómeno de ruido ocasionado por la interacción del viento y las estructuras edilicias u objetos pertenecientes a las fachadas de los mismos, ha aumentado su aparición en los últimos 10 años, lo que ha llevado a varios autores a estudiar dicho problema. Moloney et al (2010) plantean algunas formas de identificación y abordaje del problema según los casos estudiados. Recomiendan prestar atención a las posibles fuentes de ruido de un edificio tales como espacios estrechos en su fachada, pantallas con orificios y, pantallas con perfiles afilados entre otros. Al momento de estudiar el problema, los autores recomiendan abordarlo con dos o más métodos de prueba, para evitar que se pase por alto algún aspecto crítico del fenómeno. Aplicados dichos métodos, se podrá identificar el mecanismo de generación de ruido. La utilización de algún método para predecir la intensidad sonora dentro y fuera de los edificios, permitiría definir si existe la posibilidad de que los habitantes o los transeúntes se vean afectados por este fenómeno.

Como fue presentado en el punto 2.2, durante la construcción de seis pasos peatonales en una autopista en Melbourne en el año 2008, debido al diseño de dichos pasos peatonales y en determinadas condiciones de viento, se generaba un tono que podía ser percibido en el entorno, superando en 40 dB el ruido de fondo habitual de la zona. Dichos pasos peatonales contaban con balaustas⁵ con aletas rectangulares igualmente espaciadas a lo largo de su recorrido. Cada aleta tiene un largo de 2 metros, ancho de 125 mm y 6 mm de espesor (ver Figura 2-21).

⁵ Según la RAE **balaustre o balaústre**. ‘Columnilla de las varias que forman una barandilla o antepecho’.



Figura 2-21. Paso peatonal autopista en Eastlink, Melbourne. Mitchell et al. (2010).

Mitchell et al (2010) presentan los resultados obtenidos en el estudio realizado por los autores en la Universidad de Adelaida en Australia. En dicho estudio se caracterizó el ruido generado en los pasos peatonales ubicados en la autopista de Eastlink en Melbourne. Dada las denuncias por ruidos molestos generados en ciertas condiciones de viento, el equipo de trabajo colocó un sonómetro en uno de los pasos peatonales registrando el espectro de la Figura 2-22.

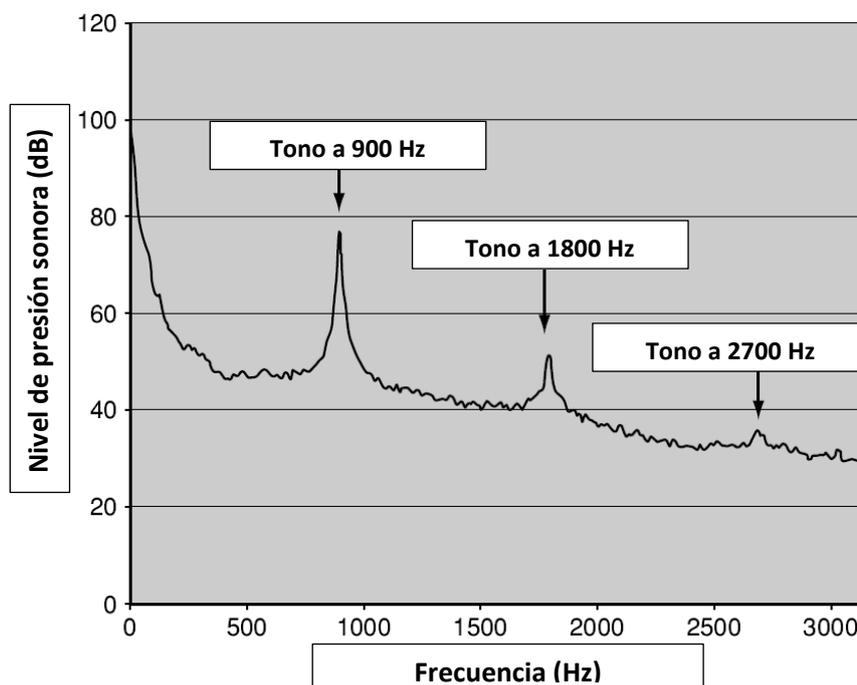


Figura 2-22. Primer espectro registrado en uno de los pasos peatonales en la autopista de Eastlink en Melbourne (Editado de Mitchell et al. 2010).

En el espectro presentado se puede ver un tono en 900 Hz seguido de sus armónicos en 1800 Hz y 2700 Hz. Hay que mencionar que no se registraron ni velocidad ni dirección de viento en esta primera instancia de estudio. Una vez identificado el evento se procedió a registrar dirección y velocidad de viento. Se encontró que el evento de ruido se “disparaba” entre los 25° y 30° con respecto a las balaustras con velocidades de viento de 6 a 7 m/s (promediados en 10 minutos) con ráfagas de 10 m/s.

Según Mitchell et al. (2010), la fuente más reconocida de ruido aerodinámico a menudo se asocia con el desprendimiento de vórtices, cuya frecuencia está determinada en gran medida por el número de Strouhal característico, que generalmente es de alrededor de 0,2 para el tipo de perfil estudiado. Mitchell et al. (2010), consideran el espesor de cada placa (6 mm) para determinar la frecuencia de desprendimiento de vórtice debido a la interacción del flujo de viento con este tipo de elemento. Dicha frecuencia, para las condiciones de viento típicas del lugar, no se vinculan a este fenómeno, por lo que los autores concluyen que la frecuencia de desprendimiento de vórtices es independiente de la velocidad del flujo de viento incidente y no es el motivo del fenómeno aeroacústico.

Los autores en ningún momento mencionan el fenómeno de bloqueo que se genera en este tipo de ruido aerodinámico. Más adelante, en este informe se presenta el análisis de este fenómeno. El fenómeno de bloqueo se puede describir como el proceso en el cual la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia del modo acústico transversal de un espacio que oficia de resonador. Durante el bloqueo, a medida que la velocidad del flujo crece, dicha igualdad entre frecuencias permanece constante, en tanto, la frecuencia de desprendimiento de vórtices independiente de la velocidad del flujo. Es posible que Mitchell et al. (2010) seguramente se refieran a esta modificación del campo hidrodinámico, lo cual no desarrolla. Sin embargo, Mitchell et al (2010) plantean que, basándose en un análisis bidimensional del flujo alrededor de uno de los perfiles tal cual se observa en la Figura 2-23, durante el fenómeno, se generaba un acoplamiento entre las capas de corte que se originaban desde la esquina afilada en los bordes de ataque de las aletas. Para el análisis bidimensional, el ancho W es la distancia entre dos aletas y la profundidad D corresponde al ancho de los paneles, que para este caso son del mismo tamaño.

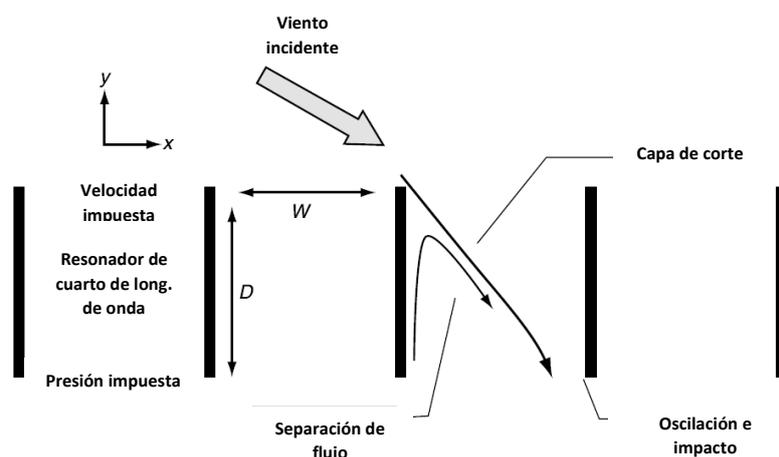


Figura 2-23. Sección transversal detallada en vista en planta que ilustra los parámetros físicos de la balastrada y el modelo propuesto para el mecanismo de generación de ruido. (Editado de Mitchell et al., 2010).

Mitchell et al. (2010) plantean que con un bajo número de Reynolds, la capa límite experimenta una transición del flujo laminar al turbulento a lo largo de la distancia que separa dos aletas (Figura 2-23). Este mecanismo de transición es extremadamente

sensible y un potente mecanismo de amplificación para perturbaciones externas en un cierto rango de frecuencias, que se inducirían en el perfil de velocidad de la capa de corte. Mitchell et al. (2010) argumentan que la perturbación que conduce a una respuesta inestable de la capa de corte es causada por una resonancia acústica que se genera en el volumen de aire que separa los pares de aletas adyacentes, tal cual se puede observar en la Figura 2-23. Analizando la situación, Mitchell et al. proponen observar el sistema formado por el volumen de aire que está delimitado por los pares de perfiles, lo cuales imponen una condición de velocidad de pasaje de flujo de aire. Las caras abiertas entre los pares de perfiles, imponen una condición de presión. Por último, se tiene que la capa de corte que se forma en la cara interior de cada placa, impone otra condición de velocidad a través del desarrollo de inestabilidades de flujo que se producen en ese sector.

Mitchell et al. (2010) se basan en las frecuencias de sonido medidas en el sitio, a partir de las cuales, concluye que ocurre un fenómeno de resonancia a lo largo de la profundidad de cada cavidad formada entre dos perfiles, y esa resonancia es retroalimentada por las inestabilidades del flujo en determinadas situaciones de viento.

De acuerdo con la clasificación realizada por Chanaud (1970), estaría ocurriendo un fenómeno denominado por el autor como clase III. Los sonidos aerodinámicos Clase III, presentan una estructura resonante o reflejante la cual controla la retroalimentación. Según Mitchell et al. (2010) la frecuencia aproximada de estas resonancias se determina mediante la siguiente ecuación:

$$D = \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{4}\right)\lambda \quad (2.2)$$

Donde $n=1,2,3\dots$ λ es la longitud de onda acústica a la frecuencia de interés y D la profundidad de cada perfil. Para este caso de estudio $D = 125$ mm.

Analizando la ecuación planteada por Mitchell et al. se puede construir la siguiente tabla, la cual indicaría a priori, las frecuencias de resonancias del sistema:

Tabla 2-1. Resultados esperados a partir de la ecuación (2.2)

n	0	1	2
Frec (Hz)	700	2000	3400

Se puede observar que los tres primeros modos se obtienen frecuencias de resonancias que van desde los 700 Hz hasta los 3400 Hz.

Mitchell et al. (2010) resumen en la Figura 2-24 el circuito de retroalimentación responsable de los tonos identificados en la tabla anterior. El esquema planteado por Mitchell es muy similar al planteado por Chanaud (1970) para los tonos clase III. Dicho esquema se basa en la ocurrencia de una perturbación la cual genera una inestabilidad en flujo, repercutiendo en la capa de corte que se forma sobre cada placa. En dicha cavidad y por la inestabilidad producida entre las placas, se genera una resonancia

acústica en la cavidad formada entre cada par de placas, dicha resonancia acústica contribuye a la perturbación aleatoria lo que alimenta nuevamente la inestabilidad que se genera en la cavidad. Según Mitchell et al. (2010), el fenómeno solo se esperaría en números bajos de Reynolds y en condiciones tales que el flujo de la capa de corte se acople con las resonancias acústicas de las cavidades. Con esto último planteado por Mitchell, se interpreta que se está refiriendo al fenómeno de bloqueo, el cual no es desarrollado en el artículo. En el caso que aumente la velocidad de flujo Mitchell afirma que el flujo se vuelve turbulento, cortándose la retroalimentación, dicha afirmación es consistente con las mediciones realizadas en el sitio por los autores del trabajo.

Analizando la expresión de Strouhal, si ocurre un aumento en la velocidad del flujo incidente, ocurre un aumento en la frecuencia de desprendimiento de vórtices, por lo que dicha frecuencia no coincidiría a priori, con la frecuencia de resonancia de la cavidad, ni con un armónico de la misma.

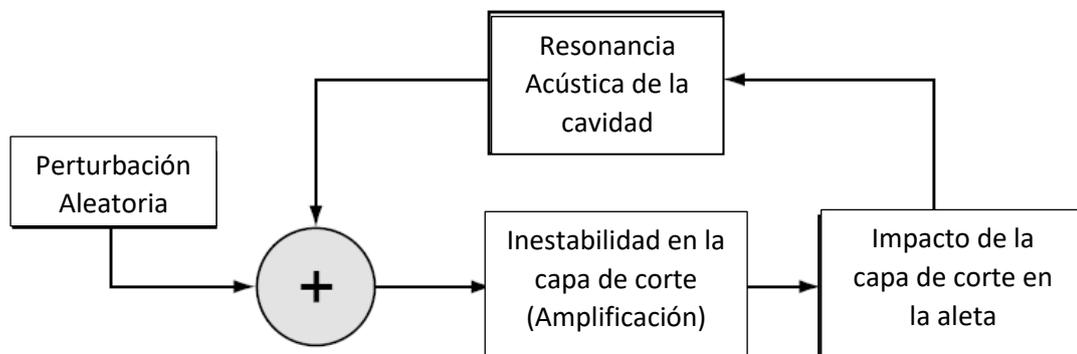


Figura 2-24. Diagrama de mecanismo de retroalimentación para la generación de ruido. Redibujado basado en Mitchell (2010).

En base a la afirmación realizada por Mitchell et al. (2010), que asegura que, al aumentar la turbulencia del sistema, se corta la retroalimentación del fenómeno de resonancia acústica se desarrollan algunas medidas de mitigación. La solución planteada por los autores para el caso de estudio se basa en la utilización de un borde de aleta irregular para la producción de turbulencia, asegurando un aumento de la frecuencia de desprendimiento de vórtices del sistema y, sobre todo, asegurando un flujo que no mantendría un patrón de vorticidad organizado.

Mitchell et. al (2010), apoyándose en su afirmación, propone seis medidas de mitigación para el fenómeno acústico generado en los pasos peatonales. Las medidas de mitigación se basaron todas en producir turbulencia, entre los pares de las 12.000 aletas. Para lograr esto, las medidas se centraron en agregar elementos en dichas aletas o previo a ellas. Los elementos propuestos fueron desde plásticos hasta elementos de caucho, tal cual fue una de las medidas propuestas para la Beetham Tower en Manchester, la cual no tuvo éxito. Otras de las medidas propuestas por los autores fue de redondear los vértices de cada aleta o agregar un elemento de goma con el fin de modificar el flujo de ingreso al espacio entre cada aleta. Varias de estas propuestas no fueron consideradas por los responsables de la obra dado que introducían un costo adicional a la misma, no solo de materiales, sino que también de mano de obra.

Otras medidas propuestas por Mitchell et al. (2010), se orientaron a agregar otro tipo de elementos, como pueden ser mallas de alambre o directamente colocar enredaderas de vegetales. Colocar una malla de alambre fue descartado, dado que a pesar de esperar que esto eliminaría el problema de ruido existente, introdujo el riesgo de que la malla pueda crear un ruido de desprendimiento de vórtice cuando el viento fuera perpendicular a la balastrada y a la malla.

La última opción, sugerida por Mitchell et al. (2010) se basó en construir una serie de aletas más profundas, tal cual se puede observar en la Figura 2-25, distribuidas a lo largo de la barandilla. El objetivo principal es modificar el flujo de viento incidente sobre las aletas no modificadas.

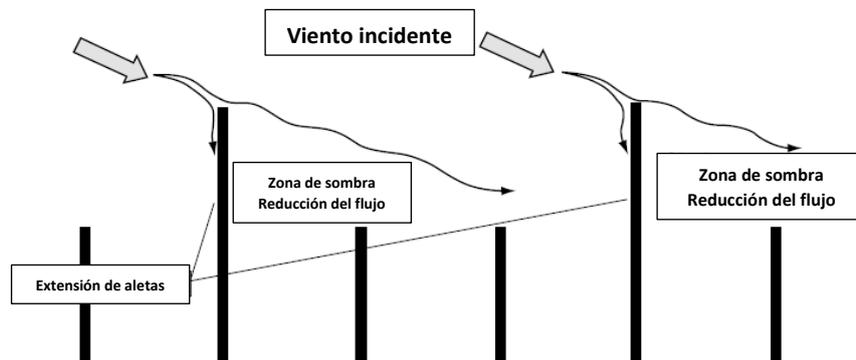


Figura 2-25. Medida propuesta por Mitchell et al. (2010). Serie de aletas más profundas espaciadas a lo largo de la balastrada.

Algunas de las medidas propuestas por el grupo de trabajo fueron ensayadas en un túnel de viento, para así establecer su efectividad e identificar cualquier nuevo problema que las soluciones puedan crear. Se utilizó una sección considerando 6 aletas con la mitad del tamaño de las aletas reales, tal cual se puede observar en la Figura 2-26.

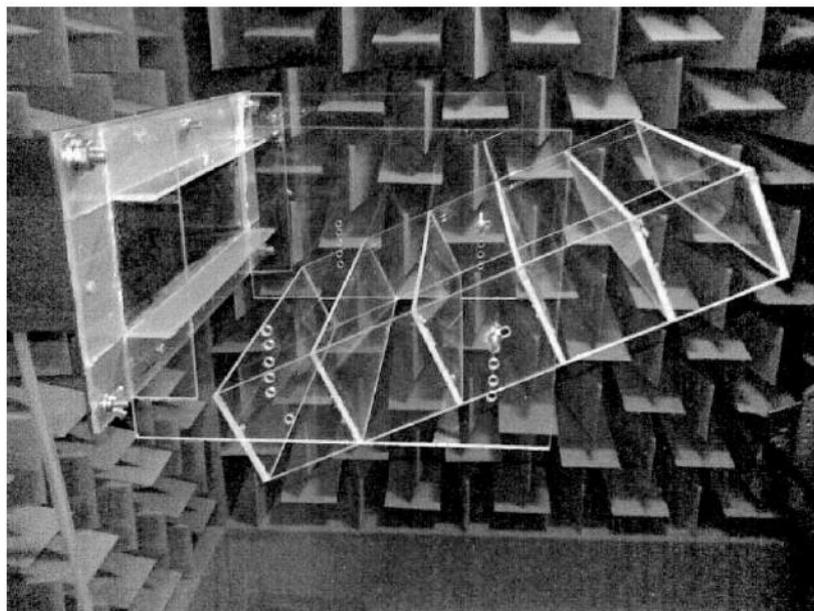


Figura 2-26. Modelo a escala 1:2 de 6 aletas en el túnel de viento anecoico de la Universidad de Adelaida, Mitchell et al. (2010).

En la Figura 2-27 se presentan los resultados del estudio realizado en el túnel de viento. Dichos resultados corresponden al ensayo realizado al modelo a escala $\frac{1}{2}$ con una velocidad de viento de 17,5 m/s y a una inclinación de 26° con respecto al panel, donde se obtuvieron los primeros tonos, en 1800 Hz y en 3600 Hz. Según Mitchell et al. (2010), tanto la velocidad modelada en el túnel como los armónicos obtenidos son exactamente el doble que los registrados en campo. Los cuatro colores indicados en el gráfico de la Figura 2-27 corresponden a los cuatro equipos de medición ubicados en diferentes posiciones cercanas al modelo.

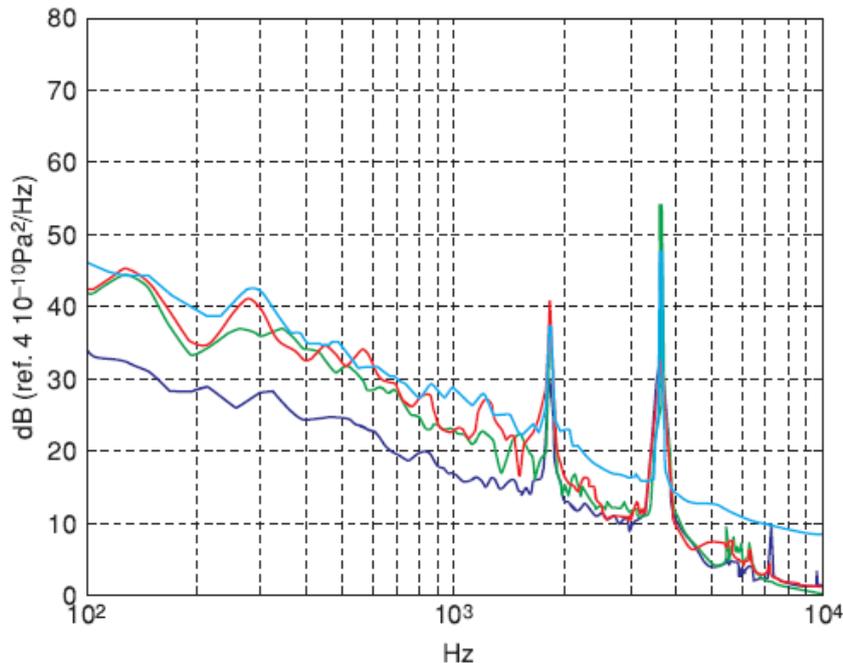


Figura 2-27. Espectro de ruido correspondiente al modelo en túnel. Velocidad del flujo incidente 17,5 m/s a 26° , Mitchell et al. (2010).

Realizando un análisis dimensional, considerando Strouhal constante para el fenómeno, y conociendo que:

- $e_L = 1/2$
- $e_V = 2$

$$S_t = \frac{L_0}{V_0 * T_0} = Cte = \frac{L_F}{V_F * T_F} \rightarrow e_T = 1/4$$

Por lo tanto, se tiene que:

- $e_F = 4$

Lo que estaría indicando que la escala de velocidad no es la declarada (o directamente no es la considerada) por los autores en dicha publicación, asumiendo que la escala de longitud es la declarada. Los resultados presentados por Mitchell et al. (2010) serían coherentes si la escala de velocidad fuera igual a 1, en ese caso, las frecuencias obtenidas en el modelo coincidirían con el doble de las frecuencias registradas en campo.

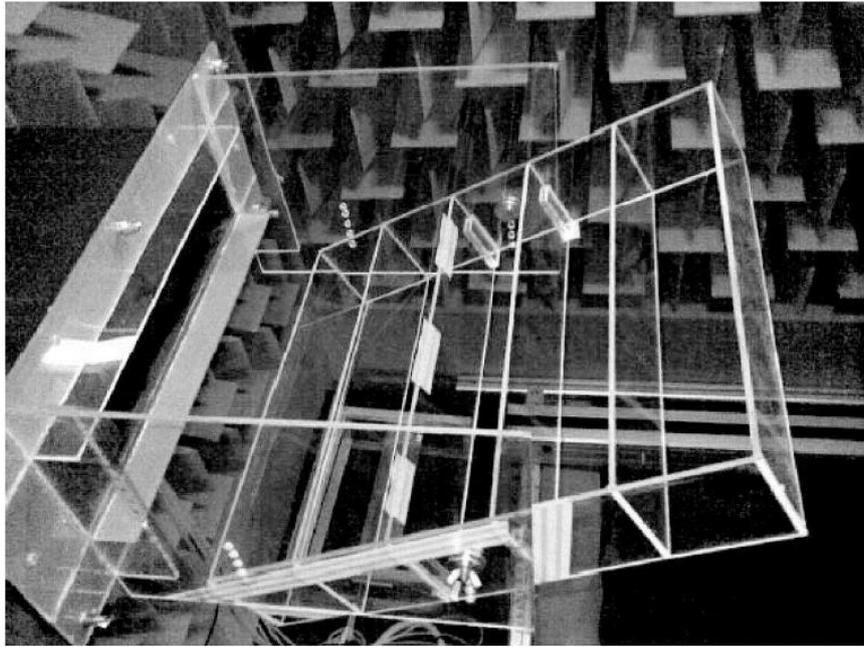


Figura 2-28. Prueba de la medida seleccionada. Aletas dentadas Mitchell et al. (2010).

Al analizar todas las medidas de mitigación propuestas por Mitchell et al. (2010) y en base a sus resultados obtenidos en el túnel de viento de la universidad, se decidió implementar una de ellas. La misma consistió en agregar un elemento irregular en el borde de cada aleta. Se utilizaron pestañas de 50 mm de largo con un espacio de 50 mm, que se extiende 5 mm más allá del borde de la aleta. En la Figura 2-28 se presenta el modelo a escala ensayado en el túnel de viento, mientras que en la Figura 2-29 se presenta el espectro obtenido de los ensayos para esta medida de mitigación, en el cual se puede observar que la medida es bastante efectiva para la eliminación de los tonos acústicos generados.

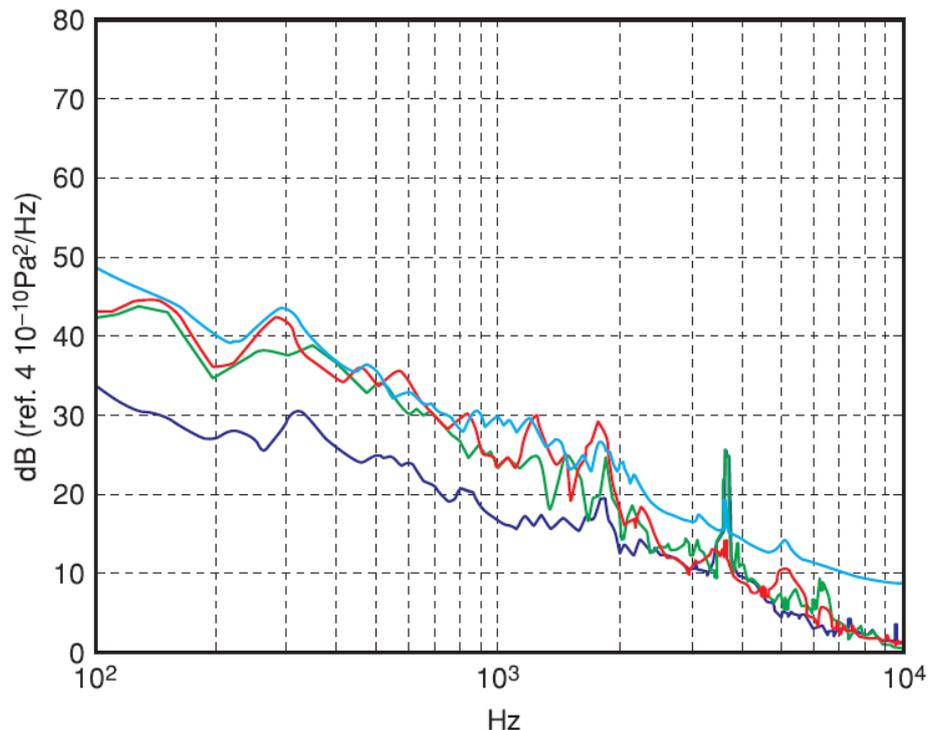


Figura 2-29 Espectro de ruido correspondiente al modelo en túnel para la medida seleccionada con aletas dentadas. Velocidad del flujo incidente 17,5 m/s a 26 °, Mitchell (2010).

Otros estudios abordan las posibles técnicas para la estimación de las velocidades de viento incidente sobre las fachadas de los edificios y sobre sus accesorios, tales como persianas de protección solar y aletas rompe vientos. Fricke (2010) presenta una discusión sobre estas posibles técnicas de estimación.

En efecto, en los últimos años, torres residenciales de gran altura han centrado los esfuerzos en la reducción del consumo de energía, por lo que los técnicos que diseñan los edificios se han inclinado al uso de ventilación natural. Además, existe una tendencia a instalar áreas de recreación al aire libre, tanto a nivel de suelo como en techos y balcones, con el fin de crear una zona agradable, en la cual el viento juega un rol importante. Para satisfacer estas demandas de consumo de energía y clima, ha habido un aumento en el uso de elementos montados externamente en edificios, como pueden ser persianas de protección solar para reducir la radiación solar, aletas verticales de rotura de viento en las fachadas y torres para reducir las condiciones de viento en áreas ocupadas.

Existe una gran cantidad de datos experimentales sobre las presiones en superficies de las fachadas de edificios, pero pocos se centran en el estudio de la velocidad del viento sobre esa superficie y menos sobre las intensidades de turbulencia, aspecto a tener en cuenta a la hora de estudiar la posibilidad de ocurrencia de ruido.

En un experimento realizado por Fricke (2010) sobre un modelo a escala 1/100 de una torre de 100 metros de altura, se indicó que en la parte superior la relación de velocidad máxima local (V_{local}) a la velocidad en la altura máxima del edificio (V_{bh}) es aproximadamente 1.3, es decir:

$$\frac{V_{local}}{V_{bh}} = 1,3 \quad (2.3)$$

Donde V_{local} fue medida a 1 metro a escala de prototipo desde el borde del techo y la fachada, tal cual se puede observar en la Figura 2-30.

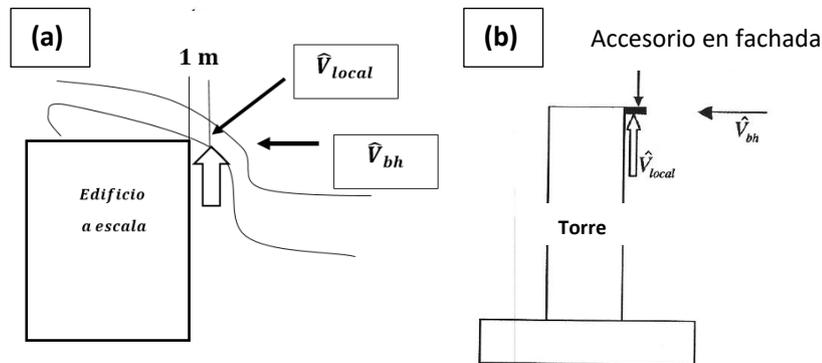


Figura 2-30. (a) velocidad local de flujo en la superficie de una torre a escala, modelo sin accesorios. (b) escenario donde una alta velocidad V_{bh} incide directamente sobre un accesorio de la fachada. Redibujado de Fricke (2010).

En Fricke (2010) se presenta además una estimación de las desviaciones estándar en el cálculo de estas velocidades que resultaron $\sigma_v=0,17$ para la velocidad incidente y $\sigma_v=0,20$ para la velocidad local; con estos valores la relación de $\frac{V_{local}}{V_{bh}}$ podría alcanzar un valor de 1,5.

Fricke (2010) concluye que el Código de Viento Australiano no presenta un método claro para la determinación de la velocidad de viento en fachadas y sobre los accesorios en las mismas. En cuanto a la prueba de laboratorio realizada por el autor, se concluyó que hubo un aumento significativo en las velocidades en sitios próximos al edificio a gran altura, sobre la velocidad de referencia debido a la distorsión del flujo alrededor de la estructura. Dependiendo del edificio, del entorno y de los elementos que presente la fachada, en algunos casos puede ser demasiado conservador suponer que estas velocidades sean tan elevadas, ya que las velocidades en una fachada con un número significativo de parasoles, balcones o cualquier otro elemento, pueden ser relativamente bajas debido a la formación de una capa límite generada por los propios elementos.

Uno de los objetivos del autor es estudiar cómo es el campo de velocidades sobre la fachada de un edificio, especialmente si cuenta con accesorios, como por ejemplo parasoles. Comenta, además, sobre la tendencia que existe a la ventilación natural, redirigiendo el flujo de aire. A pesar de darle énfasis a la necesidad de trabajar en un modelo para comprender cómo es el flujo sobre estas estructuras en ningún momento se menciona la posible ocurrencia de emisiones acústicas provocadas por esta interacción viento/accesorios. En cambio, no es el caso del estudio realizado por Coppa (2015) quien plantea un proceso para evaluar el potencial de los elementos de una fachada en generación de ruido.

Como se ha mencionado anteriormente, los diseños de fachadas en edificios son cada vez más complejos o introducen elementos que en interacción con el viento son factibles de generación de ruido en frecuencias audibles con altas intensidades. Los parasoles utilizados en edificios habitacionales, por lo general, son aletas que se repiten con una secuencia determinada, ubicados a una distancia de la fachada del edificio formando una especie de ducto donde el viento puede fluir generando una serie de inestabilidades a través de ellos. Estas inestabilidades a su vez, generan vórtices que dan lugar a alguna de las clases de sonidos aerodinámicos definidas por Chanaud (1970). Dependiendo de las características de los obstáculos e intensidad de viento en la ubicación de la estructura se desarrollará o no generación de ruido debida a esta interacción.

Actualmente no se ha desarrollado una metodología de estudio de este fenómeno previo a la construcción de una estructura y el escaso conocimiento que existe no es aplicado en la práctica. Sin embargo, en los últimos años se ha despertado cierto interés por algunos autores para tratar de explicar el fenómeno y definir al menos algunas pautas generales sobre los efectos del viento sobre estructuras.

Según la clasificación de los sonidos aerodinámicos presentados en este capítulo se vio que generar sonidos en frecuencias audibles a altas intensidades es posible. Por tal motivo, es probable que se genere ruido inducido por el flujo en cualquier estructura y/o edificio o parte de él que esté expuesto al viento. Bajo ciertas condiciones, el flujo de viento a través de los obstáculos edilicios puede adoptar tonos característicos, que, si son suficientemente fuertes y con determinada periodicidad en el tiempo, pueden causar molestias no sólo a sus habitantes sino también a su entorno.

Según Coppa (2015) el ruido tonal de la fachada de un edificio puede ser el indicador de un fenómeno físico conocido como "**resonancia aeroacústica**", que ocurre cuando un flujo canalizado produce vórtices con frecuencias muy cercanas a los modos propios del ducto.

A fin de evaluar la probabilidad de que se produzca ruido generado por el viento, las guías de orientación existentes han sido utilizadas por Arup Acoustics⁶ durante los últimos 20 años y hasta el momento no ha sido probadas para confirmar sus recomendaciones (ver Tabla 2-2).

⁶ Empresa internacional la cual brinda servicios de diseño acústico, servicios de arquitectura, construcción, transporte y acústica ambiental. <https://www.arup.com/expertise/services/technical-consulting/acoustic-consulting>

Elemento/Apertura	Dimensión	Comentarios
Ranuras, aberturas y elementos expuestos no sellados dentro de la fachada	>100 mm	Para elementos expuestos, es necesario la introducción de tratamientos de amortiguación de vibraciones Para cavidades y aberturas, se recomienda cerrar todas las aberturas y entradas para evitar la creación de cavidades resonantes.
Alambres, cables circulares, elementos tubulares o secciones huecas	>50 mm	Si no se puede incluir una dimensión mayor de 50 mm, proporcione un tratamiento de amortiguación especial
Elementos de la matriz	>100 mm	En el caso de un conjunto regular de elementos, se debe evitar una dimensión más pequeña de las aberturas o proporcionar una amortiguación especial
Construcciones	> 100 mm	Las construcciones irregulares se deben utilizar para dividir las formaciones de conductos de vórtices.

Tabla 2-2. Proceso de diseño para evaluar el potencial del ruido del viento en elementos de fachada. Extraído de Coppa (2015).

En la última década hubo un aumento del uso de placas en fachadas como uso estético o con fines de sombreado solar. Según Coppa (2015), Arup Acoustics ha tenido que desarrollar una metodología de trabajo frente a los fenómenos de emisiones acústicas que se les han presentado en sus diseños de fachadas. La empresa actualmente suele realizar dos categorías o define dos grupos a la hora de afrontar temas como este.

La primera categoría o grupo suele considerar aquellos proyectos que se estudian en gabinete o realizando un modelado computacional de la dinámica de fluidos. Dependiendo de los elementos que tenga el caso de estudio se determina la probabilidad de que se genere el fenómeno de emisión acústica a partir de la interacción del viento con los elementos de la fachada. Como resultado de este trabajo de gabinete se clasifica la fachada en términos de “bajo, medio o alto nivel” de probabilidad de generación de ruido. En estos estudios no se realizan mediciones en campo ni pruebas en túnel de viento. Por lo general se suelen utilizar ábacos como los presentados en la Figura 2-31 y Figura 2-32, los cuales dependen directamente de la evaluación del Número de Reynolds y de las características de los obstáculos, en este caso, de las placas diseñadas por la empresa. Dichos gráficos fueron tomados por Coppa de un trabajo publicado por Paduano (2012).

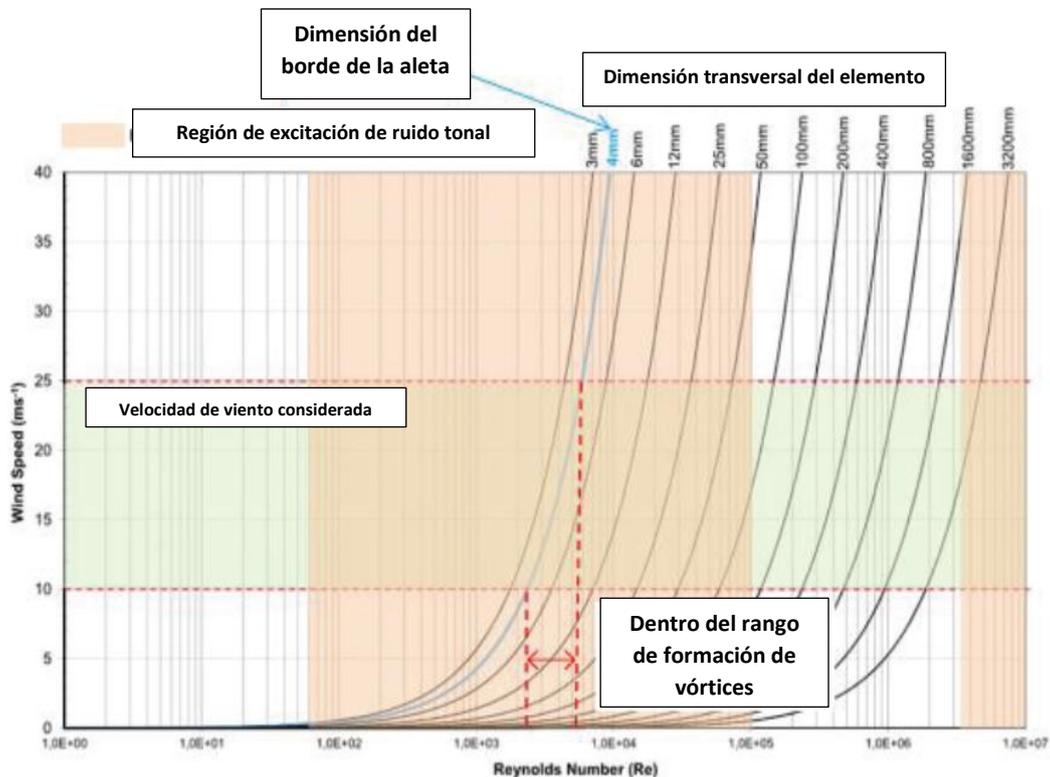


Figura 2-31. Relación entre la velocidad del viento y Número de Reynolds con diferentes dimensiones transversales de aleta de fachada. Extraído de Coppa (2015)

En el gráfico de la Figura 2-31 se presenta el uso del ábaco, extraído de Coppa (2015). Para la utilización de dicho ábaco se deben conocer las dimensiones del obstáculo y un rango de números de Reynolds. Considerando los parasoles diseñados por la empresa, con un espesor de 4 mm y un intervalo de velocidad de entre 10 m/s y 25 m/s, se obtienen números de Reynolds entre $2,8 \times 10^3$ y 7×10^3 los cuales caen dentro de la región donde la generación de vórtices regulares podría disparar el fenómeno de emisión de ruido.

Por otro lado, en el gráfico de la Figura 2-32, Coppa (2015) presenta un ábaco desarrollado por la empresa Arup Acoustics, que indicaría el rango potencial de frecuencias emitidas para el ejemplo considerado. Para velocidades entre 10 m/s y 25 m/s el rango potencial de frecuencias se ubicaría entre 500 Hz y 1250 Hz.

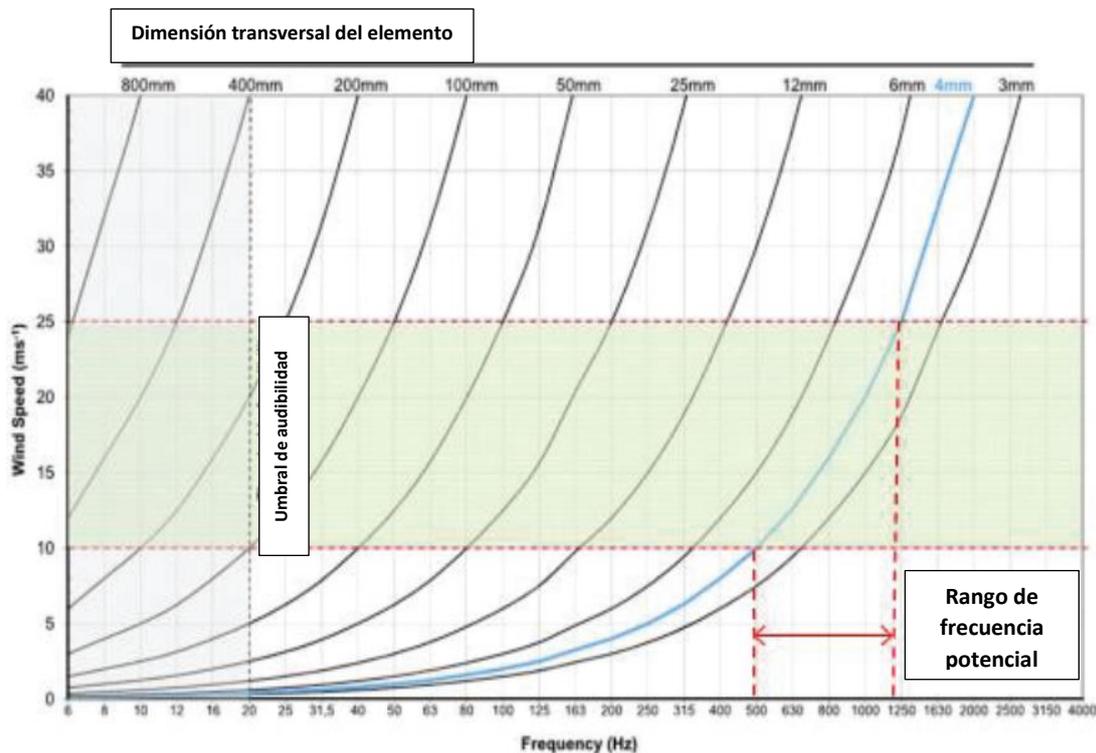


Figura 2-32. Rango potencial de frecuencias emitidas para diferentes espesores y velocidades de viento. Extraído de Coppa (2015).

Aquellos proyectos clasificados en un segundo grupo, por lo general son proyectos más complejos para los cuales se suelen realizar pruebas en túnel de viento, donde se brinda además la probabilidad y las condiciones en la cual se genera el fenómeno acústico.

A partir de las notas existentes presentadas en la Tabla 2-2, Coppa (2015) comenta algunos estudios realizados por Arup Acoustics. Según las notas, cuando se presenta un conjunto de elementos sobre la fachada, se recomienda que el espaciado entre la fachada y estos elementos sea mayor a 100 mm. En un estudio realizado, se presenta una fachada con aletas (parasoles rectangulares) espaciadas de la fachada principal unos 150 mm. En dicho caso y en determinadas condiciones, se percibía un ruido no muy intenso debido a la interacción del flujo de viento con estos elementos. Como medida de control se construyeron una serie de elementos irregulares instalados entre los perfiles, con el objetivo de interferir directamente en los vórtices generados en el borde de las aletas.

Según Coppa (2015) la denominada resonancia aeroacústica se experimenta cuando un flujo ingresa a un ducto formado entre elementos adicionales y la fachada del edificio. La frecuencia del desprendimiento de vórtices de los elementos adicionales se acerca a la frecuencia acústica del ducto, donde en varias ocasiones se dispara el fenómeno acústico. A medida que el flujo pasa por el elemento, los vórtices se desprenden periódicamente en una frecuencia, que crece linealmente con la velocidad del flujo de aire. Coppa (2015) caracteriza esta relación según el número de Strouhal ($St = f * \frac{d}{v}$), siendo d el espesor del elemento que introduce la perturbación. Durante la “resonancia aeroacústica”, el campo acústico modifica el campo hidrodinámico donde la frecuencia

del vórtice desprendido coincide con la frecuencia resonante del ducto, no sólo a una velocidad única del flujo, sino que en un intervalo de velocidades. A este fenómeno, según Howe (2003), se le denomina “bloqueo”. Durante el “bloqueo”, la frecuencia de desprendimiento de vórtices permanece constante a medida que la velocidad del flujo se incrementa, hasta un determinado valor, en el cual la resonancia disminuye y el proceso es dominado nuevamente por el número de Strouhal (ver Figura 2-33).

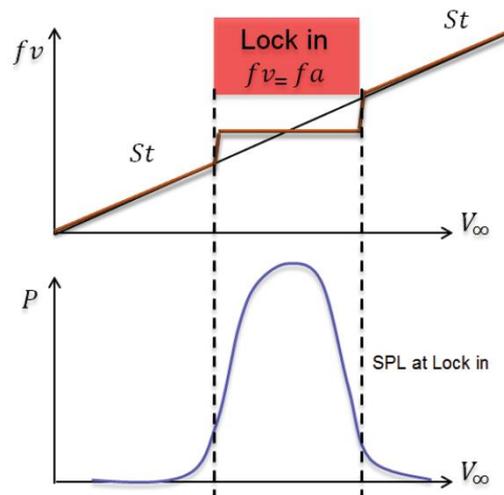


Figura 2-33. Esquema de sincronización de frecuencia y nivel de presión sonora relacionado durante la condición de bloqueo. Extraído de Coppa (2015).

Paduano et al. (2012) sostienen que el fenómeno de bloqueo es un aspecto crítico de la resonancia aeroacústica en cuerpos ubicados en flujos canalizados en los que el campo acústico puede modificar la frecuencia del desprendimiento de vórtices para retroalimentar y sostener la resonancia acústica. Esto ocurre, tal cual lo mencionado anteriormente, cuando la frecuencia de emisión de vórtices (f_v) se acerca a la frecuencia de resonancia del conducto (f_a). Según Paduano et al. (2012), la capacidad del campo acústico para modificar la frecuencia de desprendimiento del vórtice hidrodinámico depende de la intensidad del campo acústico y la relación de frecuencia (f_a/f_v). Sin embargo, la frecuencia de desprendimiento de vórtices depende de la velocidad del flujo, por lo que, para una geometría de conducto dada, los autores han examinado un rango bastante estrecho de velocidades y, por lo tanto, de números de Reynolds. Como se desarrollará más adelante en este capítulo, la condición de bloqueo se modela numéricamente con un software computacional de dinámica de fluidos. Los resultados de los ábacos ilustrados anteriormente, se basan en una serie de ensayos en los cuales se colocan una cantidad determinada de cilindros en un conducto por el cual se hace circular un flujo de aire a diferentes velocidades. A continuación, se presentan algunos resultados de los ensayos realizados por Paduano et al. (2012) considerando dos cilindros iguales dentro de un conducto (Figura 2-34). Los cilindros, introducen una perturbación al flujo de aire incidente, estando separados entre sí una distancia L/D y el primer cilindro se utiliza a $5 D$ de sección de ingreso al conducto, siendo L y D , el largo y diámetro de cada cilindro.

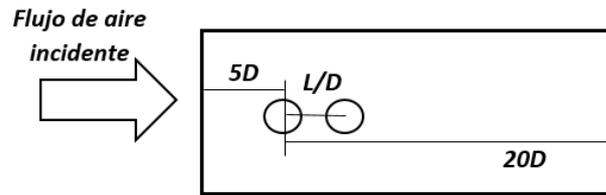


Figura 2-34. Modelo Estudiado por Paduano et al. Redibujado de Paduano et al. (2012)

Paduano et al. (2012) simularon dos condiciones de bloqueo para este caso, la primera considerando una relación de frecuencias (f_a/f_v) de 1,2 y la segunda considerando una relación 0,85. Ambas condiciones se simularon en 12 números de Reynolds en el rango de $1,1 \times 10^4$ a $3,6 \times 10^4$. Según los autores, con esta experiencia, se ha demostrado que el fenómeno de bloqueo ocurre sólo en los números más altos de Reynolds por encima de un umbral de $2,7 \times 10^4$. Si bien esta dependencia de Reynolds y el valor umbral son particulares de esta geometría, Paduano et al. recomiendan que se realicen trabajos adicionales considerando elementos con diferentes geometrías, para validar estos ábacos o desarrollar nuevos, que permitan identificar previamente si se generará o no el fenómeno acústico según la geometría estudiada.

Coppa (2015), en base a los estudios realizados por Paduano et al., propone una metodología para estudiar el fenómeno, con el objetivo de investigar el potencial de una fachada con parasoles de generar ruido como consecuencia del "bloqueo". Para que esto se produzca, debe haber un desprendimiento de vórtices de los parasoles y dichos vórtices deben excitar el modo acústico del ducto formado entre estos dispositivos y la fachada del edificio. Si estas condiciones son verificadas, es probable que ocurra la denominada "resonancia aeroacústica". Afirma además que, comprendiendo este proceso y desarrollando una metodología de abordaje, se podrían realizar recomendaciones de cada diseño, con tan solo variar las dimensiones de los parasoles o el influir en el ducto formado entre éstos y la fachada.

Según Howe (2003), la frecuencia del modo acústico transversal de un conducto de sección rectangular puede calcularse usando la siguiente fórmula:

$$f_a = \frac{nc}{2w} \quad (2.4)$$

Donde c es la velocidad del sonido, w el ancho del conducto y n el número del modo transversal considerado en el conducto formado entre los parasoles y la fachada del edificio.

Tan et al. (2003) proponen una analogía hidrodinámica en la que el campo acústico se representa como una condición de frontera de velocidad de flujo transversal oscilante aplicada a un flujo incompresible. Una excitación acústica sinusoidal de la forma $A \cdot \text{sen}(2\pi f_a t)$ se aplica perpendicularmente a la dirección del viento como se muestra en la Figura 2-35, donde A representa la amplitud de la velocidad de las partículas. Según Tan et al. (2003), esta analogía es conocida, ya que se ha aplicado con éxito para el modelado de la resonancia en flujos canalizados.

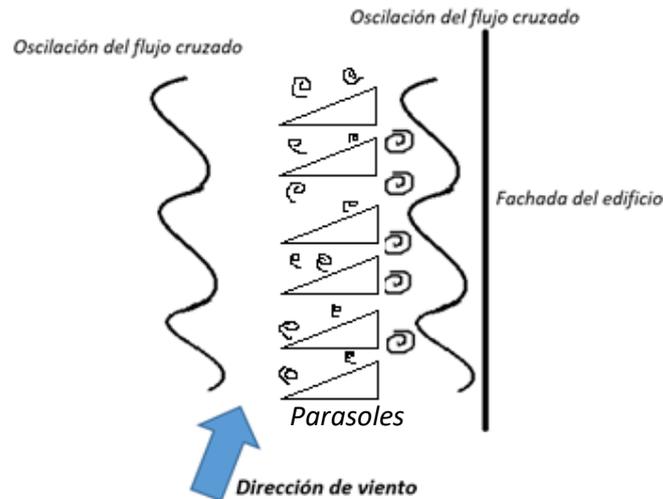


Figura 2-35. Esquema de fachada con parasoles, incidencia del viento, oscilación del flujo transversal inducido y desprendimiento de vórtices. Redibujado de Coppa (2015)

Coppa (2015) propone la realización de simulación con un modelo computacional de dinámica de fluidos (CFD⁷) para resolver el flujo alrededor de una secuencia típica de parasoles sobre la fachada de un edificio, considerando diferentes configuraciones de viento. Para verificar la posible generación de sonido se implementaron los siguientes pasos:

1- Evaluación del desprendimiento de vórtices en las aletas de la fachada. El objetivo de esta instancia fue verificar si se puede formar un desprendimiento periódico de vórtices desde los parasoles en varias condiciones de viento. Los flujos de viento ensayados por Coppa (2015) cumplieron las siguientes características:

- Velocidades: 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s y 25 m/s
- Ángulos de incidencia para cada amplitud de velocidad: 0 °, 22 °, 45 °, 67 °.

Para cada uno de los parasoles ensayados se determinan los coeficientes de presión (C_p) y se instaló una sonda en el ducto formado entre la separación de los parasoles y lo que sería la fachada principal del edificio, la cual es capaz de registrar las variaciones en el tiempo de la velocidad del flujo a través de ella. Con estos registros de C_p y velocidades en el ducto, se realizó un análisis espectral con el objetivo de investigar el contenido de energía en diferentes frecuencias. Es importante aclarar que cuando se establece un flujo alrededor de un edificio o de un modelo a escala, se establece un campo de presiones. Si P es la diferencia entre la presión que se establece sobre un punto de la envolvente con la presión atmosférica y U es la velocidad media del viento a la altura del edificio en estudio o el obstáculo, entonces se define el coeficiente de presión de acuerdo a la siguiente expresión:

⁷ <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.5)$$

Tal cual se observa en la Figura 2-36 el desprendimiento periódico de vórtices presentó una sola frecuencia de aproximadamente 30 Hz. Para las velocidades ensayadas por Coppa (2015), para el caso en estudio, el contenido energético se concentró entre 30 Hz y 40 Hz.

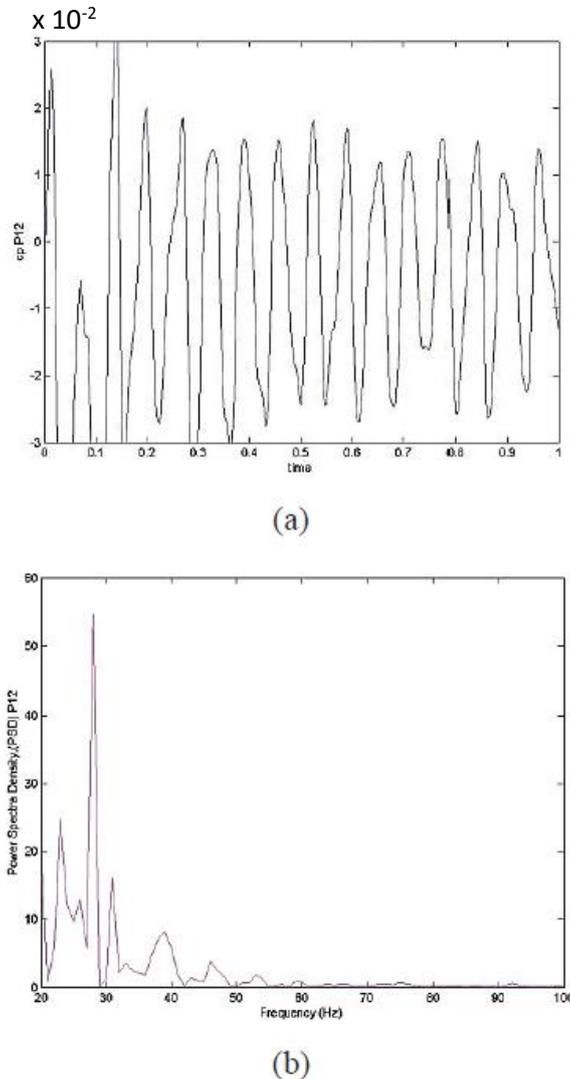


Figura 2-36. (a) Evolución temporal del C_p evaluado en la aleta flujo abajo. (b) FFT de la C_p .
Extraído de Coppa (2015)

2- Como segunda instancia, Coppa (2015) presentó una verificación del riesgo que se produzca resonancia aeroacústica debido a la coincidencia entre las frecuencias del primer modo acústico (f_a) del conducto, utilizando la ecuación (2.4). Se verifica el denominado fenómeno de resonancia aeroacústica si la frecuencia de desprendimiento de vórtices obtenida alrededor de los perfiles de los parasoles es similar a la frecuencia acústica que podría tener el conducto formado por los parasoles y la fachada real del edificio. Para el ejemplo estudiado por Coppa (2015), utilizando la ecuación (2.4) para la determinación de la frecuencia del primer modo acústico del conducto, se tuvo que $f_a = 212 \text{ Hz}$. La falta de coincidencia entre las frecuencias anteriores no garantiza la no

producción de ruido tonal que se emite desde la fachada. El fenómeno de bloqueo, de hecho, se puede provocar en un rango amplio de frecuencias.

3- Según Coppa (2015), se debe realizar una verificación del riesgo de que ocurra la resonancia aeroacústica debido al fenómeno de bloqueo. Para lograr esto, se debería estudiar el rango en el cual se da el fenómeno de bloqueo. Particularmente se estudia el caso en el cual las frecuencias de desprendimiento de vórtices son capaces de generar el fenómeno de bloqueo a partir de la configuración de los obstáculos y el ducto de la fachada.

En el modelo utilizado (CFD) se introduce una excitación acústica es introducida como una condición de borde; esto ocasiona que la velocidad del flujo oscile una vez instalado el fenómeno acústico. Dicha condición de borde se representa mediante la forma $A \cdot \text{sen}(2\pi f_{exc} t)$.

Se propone determinar la frecuencia de excitación (f_{exc}) a partir de una relación con la frecuencia f_a , los autores, propusieron que estuviera en el intervalo de 0,5 y 1,5, en tanto, la amplitud A , se eligieron valores de entre 5 % y 10 % de la velocidad del flujo de viento incidente.

A partir de la velocidad fluctuante considerada, se determinó el espectro del coeficiente de presiones C_p tal cual muestra el gráfico de la Figura 2-37. Si el sistema permaneciera en condiciones de no resonancia, entonces las dos frecuencias aparecerían en los espectros (la de desprendimiento de los vórtices y la acústica), indicando que los dos fenómenos periódicos pueden coexistir en forma desacoplada.

En la Figura 2-37 se puede observar que la frecuencia pico se da por encima de los 200 Hz (con los valores de f_{exc} y A considerados) muy próximo a la frecuencias del primer modo acústico del conducto, ocasionando la denominada resonancia aeroacústica. El fenómeno no se produciría si la onda acústica no fuera capaz de auto-sostenerse en el tiempo.

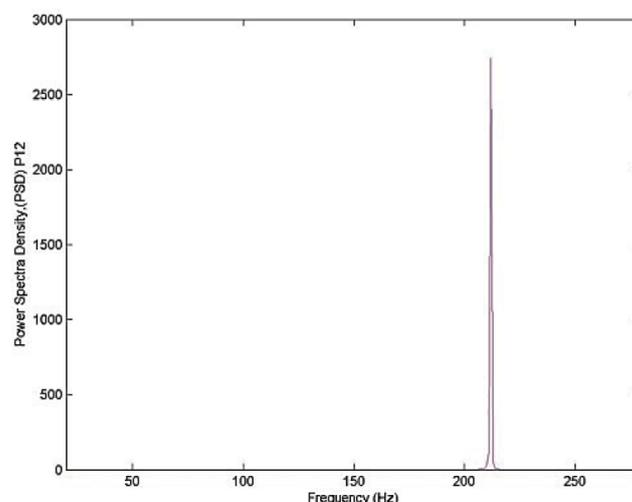


Figura 2-37. Espectro de C_p con condiciones establecidas durante el bloqueo, desencadenando la producción de resonancia aeroacústica. Extraída de Coppa (2015)

Para la simulación con el software CFD se consideraron los siguientes datos: una longitud de aleta de 300 mm, y aletas ubicadas aleatoriamente a partir de la relación L/d de 2 a 5, siendo d la distancia entre los bordes exteriores de los parasoles. Se considera un espacio detrás de los parasoles de 800 mm. Además, para el modelado, se supone un flujo estándar incompresible con una densidad $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 1,78 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$

En una primera instancia se realizó un ensayo sin introducir la señal acústica, considerando los rangos de velocidad y los ángulos de incidencia mencionados. Se logró verificar que para prácticamente todas las condiciones se produce un desprendimiento periódico de vórtices de los parasoles. Para las velocidades de flujo simuladas, la frecuencia de desprendimiento de vórtices se encontró en un intervalo entre 30 Hz y 40 Hz, similares a las frecuencias determinadas experimentalmente. En la Figura 2-38 se presenta un gráfico de vorticidad cuando el flujo de viento aplicado es de 25 m/s con un ángulo de inclinación de 67° .

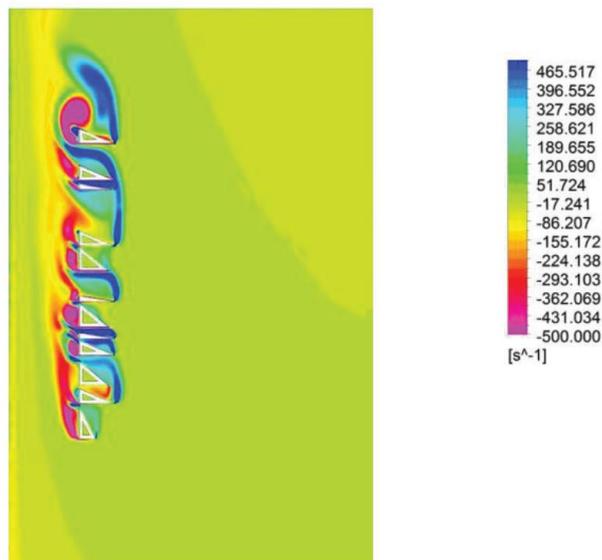


Figura 2-38. Campo de vorticidad a 25 m / s y $\theta = 67^\circ$ sin excitación acústica. Extraído de Coppa (2015).

En base a la hipótesis de bloqueo, (es decir, durante la resonancia aeroacústica el campo acústico modifica el campo hidrodinámico y la frecuencia del vórtice desprendido coincide con la frecuencia de resonancia del ducto), Coppa (2015) propuso excitar el sistema con un pulso acústico de la forma $A \cdot \text{sen}(2\pi f_{exc} t)$ perpendicular a la velocidad incidente de viento. Para cada velocidad de viento y ángulo de ataque, se le agregó al sistema una excitación acústica. Según los resultados obtenidos en el modelo, durante el bloqueo se observa una reducción del contenido de vorticidad. En la Figura 2-39 se muestra el resultado para un flujo de viento de 25 m/s, para un ángulo de ataque de 67° , con una frecuencia de excitación aplicada (f_{exc}) de 212 Hz y una amplitud de 10 % de la velocidad de viento incidente.

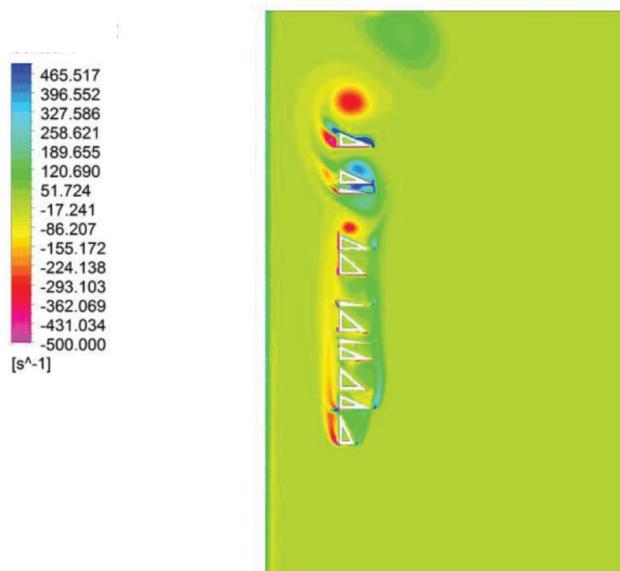


Figura 2-39. Campo de vorticidad a 25 m/s, $\theta = 67^\circ$ con excitación de $A = 10\% V_{\text{viento}}$ (es decir, 2,5 m/s) y $f_{\text{exc}} = 212$ Hz. Extraído de Coppa (2015).

En la Tabla 2-3 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad de viento de 25 m/s y un ángulo de ataque de 67° , con y sin excitación acústica. Para la primera situación, se determina la frecuencia de desprendimiento de vórtices en cada una de las 12 aletas, para la velocidad y ángulo de ataque estudiado; dichas frecuencias se ubicaron entre los 25 Hz y los 55 Hz. Para esa situación no se instaló el fenómeno de bloqueo, en cambio, una vez introducida la excitación acústica, el sistema entra en resonancia (generándose el fenómeno de bloqueo) y se instala la denominada "resonancia aeroacústica", que se retroalimenta de la energía entregada por los vórtices desprendidos desde los parasoles.

	25 m/s $\Theta=67^\circ$ Sin excitación		25 m/s $\Theta=67^\circ$ Con excitación $A=10\% * V_{\text{viento}}$ $f_a=212$ Hz	
	C_p	f_v (Hz)	C_p	f_v (Hz)
Aleta 1	No periódico	-	No periódico	-
Aleta 2	Periódico	25	Periódico	Bloqueo
Aleta 3	Periódico	35	Periódico	Bloqueo
Aleta 4	Periódico	42	Periódico	Bloqueo
Aleta 5	Periódico	35	Periódico	Bloqueo
Aleta 6	Periódico	39	Periódico	Bloqueo
Aleta 7	Periódico	40	Periódico	Bloqueo
Aleta 8	Periódico	23	Periódico	Bloqueo
Aleta 9	Periódico	25	Periódico	Bloqueo
Aleta 10	Periódico	55	Periódico	Bloqueo
Aleta 11	Periódico	25	Periódico	Bloqueo
Aleta 12	Periódico	25	Periódico	Bloqueo

Tabla 2-3. Resumen de resultados de análisis de espectros. Extraído de Coppa (2015).

La simulación realizada por Coppa (2015), para el caso presentado, ha demostrado que para todas las velocidades de flujo ensayadas se produce un desprendimiento de vórtices de los parasoles. Ante determinadas características del flujo incidente, la energía entregada por los vórtices es suficiente como para excitar el sistema, causando la ocurrencia de una resonancia aeroacústica.

La metodología aplicada podría ser utilizada para verificar las condiciones en las cuales se produce el bloqueo, determinando así el rango de velocidades de viento en el cual se produciría el fenómeno acústico con la configuración estructural diseñada. En el caso de producirse, si se está en una etapa de diseño, se podría modificar la fachada de tal forma que se reduzca dicha probabilidad o se plantee una alternativa constructiva.

En Bublic et al. (2016) se presenta el análisis de un caso de emisión acústica debido a la interacción con el viento. En Zagreb se construyó un edificio con una fachada que cuenta con varios elementos de interés a ser analizados y que se muestran en la Figura 2-40. Dichos elementos, que presentan perforaciones circulares de diferentes diámetros fueron objeto de estudio debido a la posible generación de ruido con la interacción del viento.

La intención de Bublic et al. (2016) era determinar en qué condiciones se produce ruido resultante del flujo del viento alrededor de los parasoles; registrar y cuantificar cualquier otro fenómeno acústico que pueda ocurrir como resultado de dicho pasaje por los elementos de planta baja.



Figura 2-40. Muestra del elemento de fachada de la planta baja y muestras de elementos de protección solar montados en el edificio. Bublic et al. (2016)

El ruido resultante se puede escuchar a varios cientos de metros del lugar de emisión y puede causar contaminación acústica no sólo en el edificio, sino que también en el entorno. Por esta razón, la investigación presentada se llevó a cabo para evitar futuros gastos en medidas correctivas costosas. Bublic et al. (2016) afirman que el ruido de banda ancha es causado por el flujo de aire turbulento el que puede provocar un zumbido y silbido muy desagradables. El ruido tonal se asocia más comúnmente con la resonancia acústica de cavidades individuales o estructurales de componentes flexibles, causados por el mecanismo de emisión de vórtices. Esta resonancia crea el efecto

equivalente al de un instrumento musical aerófono, como puede ser, una flauta o el órgano de tubos, que generan tonos dependiendo de la velocidad y la dirección del flujo de aire.

La Figura 2-41 muestra que desde el NNE se producen vientos moderadamente fuertes, aproximadamente de 11 m/s a una altura de 10 metros. Si bien la velocidad de viento de diseño del edificio fue de 22 m/s, los parasoles se ensayaron hasta una velocidad de viento de 20 m/s y los elementos de la fachada ubicados a nivel del suelo, hasta una velocidad de 10 m/s.

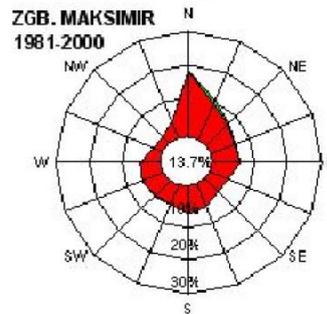


Figura 2-41. Rosa del viento, estación meteorológica de Zagreb-Maksimir. Public (2016)

Public et al. (2016) ensayaron cuatro elementos de fachada (uno corto, dos elementos del parasol y un elemento a ubicarse en planta baja) en túnel de viento. Los mismos fueron probados en tamaño real (escala 1: 1). Tal cual lo muestra la Figura 2-42, se cerraron los extremos, superior e inferior, para no generar ruido adicional y se montó en un soporte para poder cambiar el ángulo de ataque.



Figura 2-42. Montaje del parasol corto en escala 1:1 en túnel de viento. Public et al. (2016)

Una vez montada la sección de 50 cm, se midió el nivel de presión sonora para diferentes ángulos de incidencia de viento y velocidades. El parasol y la estructura soporte se giraron en relación al flujo incidente. En tanto, las mediciones de niveles de presión sonora se realizaron frontales al flujo de aire. Se obtuvieron registros de mediciones de niveles de presión sonora con y sin el elemento instalado en el túnel, con el objetivo de

contar con el registro del ruido de fondo y poder realizar dicha comparación energética. Los ángulos de incidencia del flujo de aire sobre los elementos se fueron incrementando de a 5 ° hasta 130 °.



Figura 2-43. Elemento perforado a ubicarse en planta baja. Public et al. (2016)



Figura 2-44. Estructura con dos protectores solares perforados. Public et al. (2016)

En la segunda serie de pruebas, se montó una estructura con dos protectores solares perforados, ambos distanciados a una distancia igual a lo previsto por el proyecto (Figura 2-44).

La tercera serie de pruebas se llevó a cabo en elementos perforados planos (elementos de fachada) que se montaron en la planta baja (Figura 2-43). Estos elementos se ensayaron para diferentes ángulos de incidencia.

Public et al. (2016) presentaron los resultados más relevantes obtenidos en el ensayo. En la Figura 2-45 se presentan las mediciones de inmisión acústica, para el elemento de 50 cm de altura aislado, y para una velocidad del aire de 5 m/s. La línea azul indica la presión del sonido medida cerca del protector solar, la línea roja muestra los valores registrados por el micrófono fuera del túnel de viento, mientras que la línea morada

indica el nivel del ruido ambiental resultante del funcionamiento del motor eléctrico y el flujo de aire a través del túnel de viento. La diferencia aritmética entre los niveles de la línea morada y la línea azul indica el nivel de ruido generado por el parasol, y en las condiciones consideradas asciende a un promedio aritmético de 6,5 dB, considerando todas las direcciones. El mayor valor de aumento de ruido a una velocidad del viento de 5 m/s se midió en ángulos de incidencia de aproximadamente 60°.

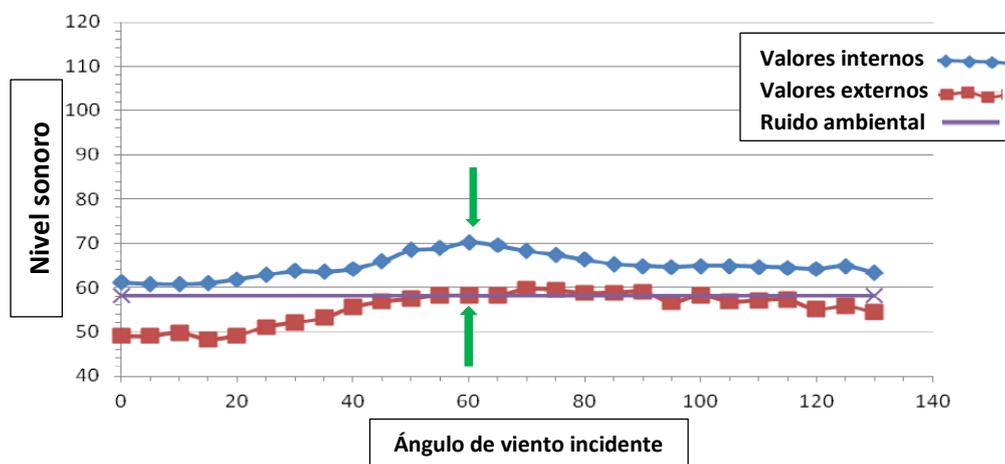


Figura 2-45. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 5 m/s (Bublic, 2016)

Al aumentar la velocidad del viento a 10 m/s, los niveles de presión sonora también aumentan (Figura 2-46), tanto dentro del túnel (líneas azul y púrpura) como fuera de él (línea roja). En estas condiciones, el nivel de ruido es más bajo cuando el viento actúa perpendicularmente a la fachada, es decir, en la dirección del eje del parasol. El promedio aritmético de la diferencia entre la línea azul (próxima al parasol en las condiciones de viento establecidas) y la línea morada (sin parasol en las condiciones de viento establecidas) es de 12 dB. Se obtuvo un aumento de ruido para estas condiciones tal que prácticamente todo el ruido audible es debido a los parasoles.

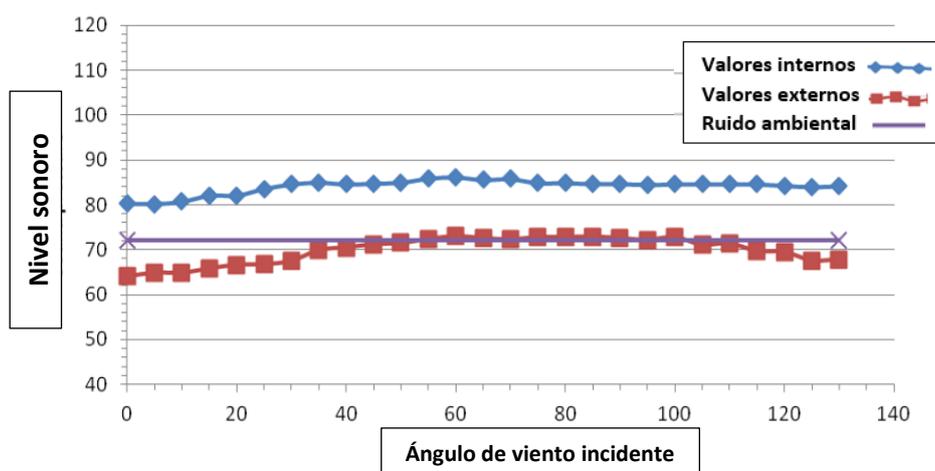


Figura 2-46. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 10 m/s. Bublic et al. (2016).

Con un aumento adicional en la velocidad del viento hasta el valor promedio de 20 m/s, el nivel del ruido también aumenta (Figura 2-47), y el aumento promedio aritmético del ruido generado por el parasol es de 13,5 dB. Además de las mediciones de nivel de intensidad de ruido, también se realizó el análisis espectral. La aparición de componentes tonales dentro del espectro se puede notar en ciertos ángulos de incidencia. Por ejemplo, a una velocidad del viento de 15 m/s se identificaron componentes tonales, pero no con la suficiente energía como para que sean audibles. En cambio, para una velocidad de viento de 20 m/s, aparecen componentes tonales más pronunciados y audibles, tal cual se puede observar en la Figura 2-48. Los tonos identificados en el espectro se dan en una frecuencia cercana a 80 Hz, cercana a 200 Hz y en 1600 Hz.

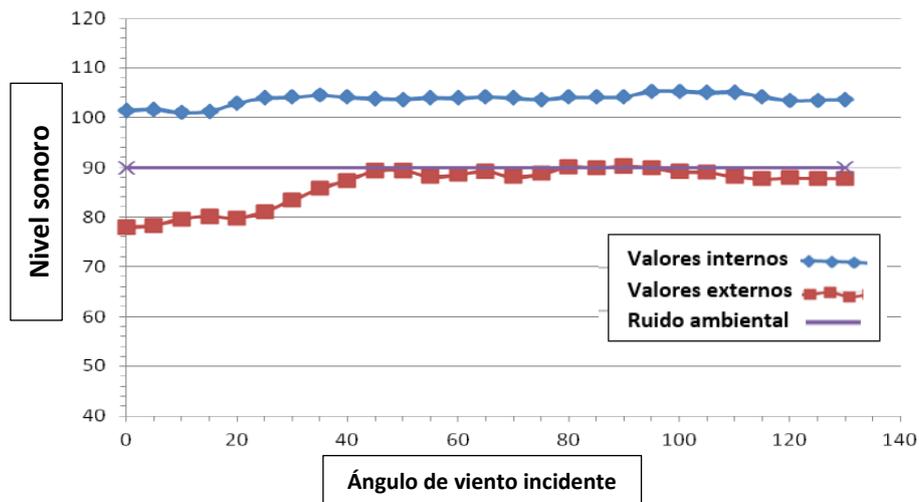


Figura 2-47. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 20 m/s. Bublic et al. (2016)

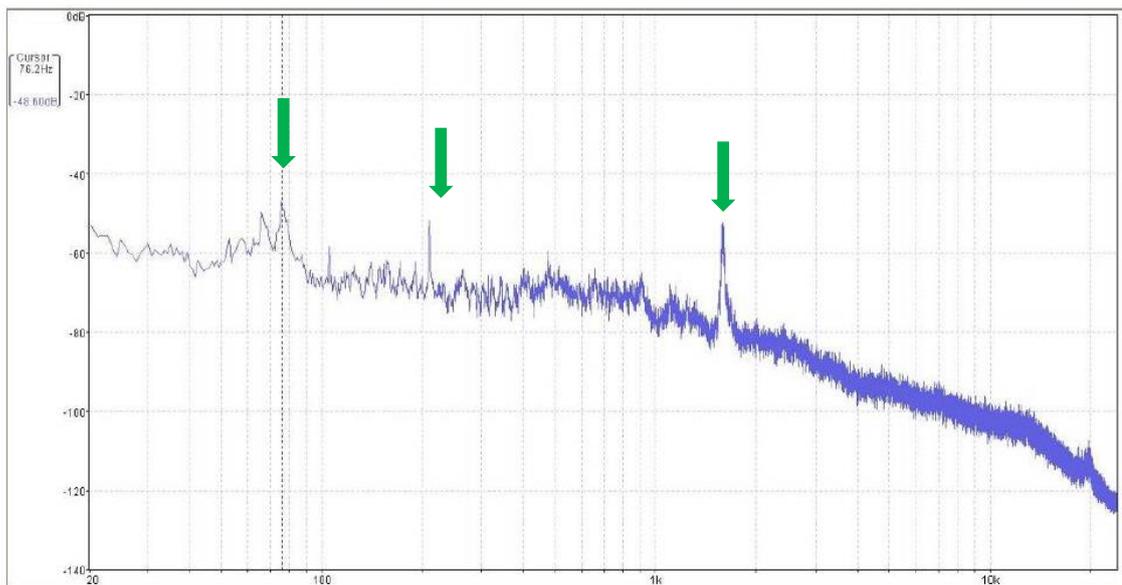


Figura 2-48. Análisis de FFT para una velocidad de viento de 20 m/s y un ángulo de incidencia de 100°. Bublic et al. (2016)

Después de la prueba de un solo segmento, los autores (Bublic et al. 2016) realizó la medición del ruido generado por dos segmentos espaciados a una distancia de 110 cm para evaluar su posible interacción.

Los resultados de la medición se presentan en la Figura 2-49 y muestran que no hay interacción negativa de las pantallas solares en la generación de ruido.

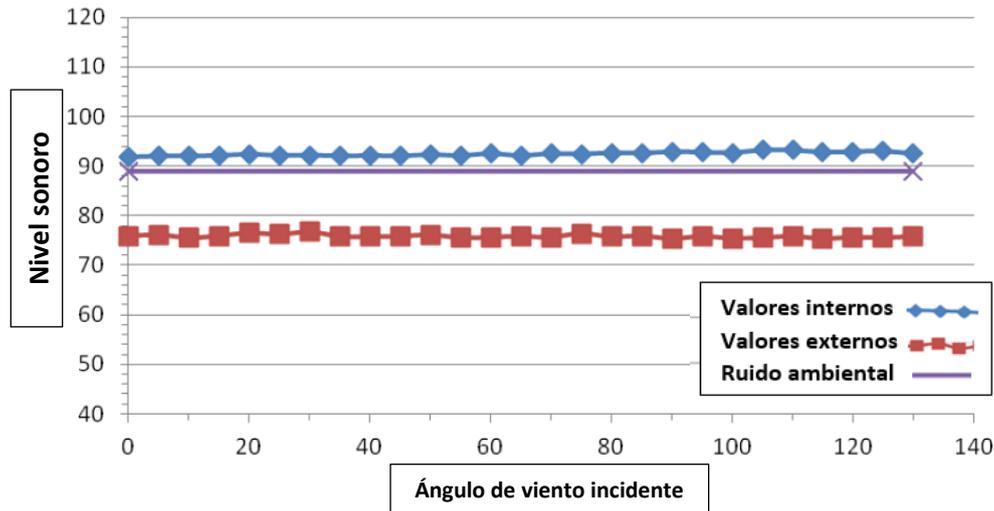


Figura 2-49. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 20 m/s – Caso de dos parasoles - (Bublic et al., 2016)

Sobre la base de la experiencia y los resultados de las mediciones, Bublic, 2016 afirma que la interacción entre dos protectores solares es favorable en determinados ángulos de incidencia del viento, ya que debido a su proximidad y a la formación de la capa límite, las velocidades del flujo de viento cercano a las placas es menor a la velocidad de viento incidente.

Luego de estudiar los parasoles en sus diferentes configuraciones, se procedió a analizar un elemento de fachada de la planta baja (ver Figura 2-43). Los resultados de las mediciones se presentan en la Figura 2-50. La línea azul representa los niveles de presión sonora con el elemento de fachada de la planta baja presente en la sección de trabajo del túnel de viento, la línea morada representa los niveles de ruido en la sección de trabajo del túnel de viento vacío.

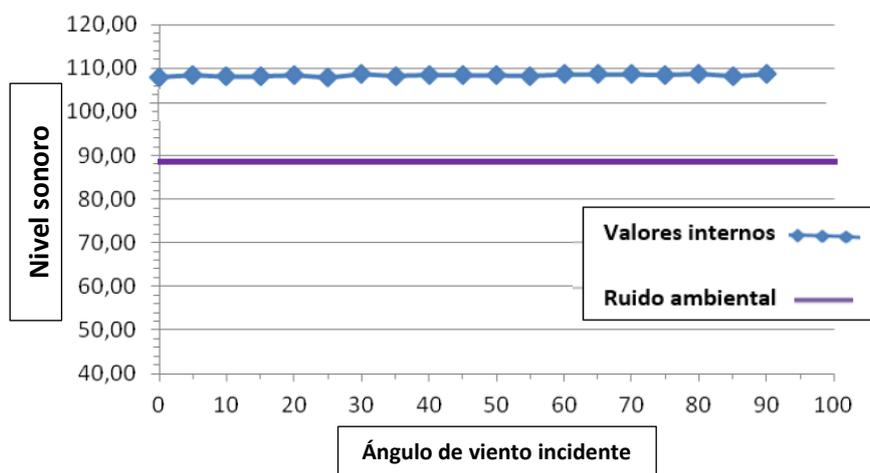


Figura 2-50. Niveles de presión sonora para una velocidad de viento de 20 m/s – Caso del elemento de la fachada en planta baja- (Bublic et al. 2016)

Según los resultados de esta experiencia publicados por Bublic et al. (2016) se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados de las mediciones en el túnel de viento muestran que los elementos de fachada ensayados incrementa el nivel de emisión sonora, para velocidad del viento de 20 m/s, principalmente en el intervalo entre 10 dB y 15 dB, y que no hay un aumento significativo en el ruido debido a la interacción de dos protectores solares (hasta una velocidad de 10 m/s). Las pruebas mostraron cierta correlación entre los niveles de ruido y el ángulo de incidencia del viento, y una clara correlación entre los niveles de ruido y la velocidad del viento.
- Los elementos se ensayaron en las condiciones en que el viento actúa perpendicularmente a la fachada, que es un ángulo de 0° con respecto al eje del parasol hasta el ángulo de 130° entre el eje del parasol y la dirección del viento. Bublic (2016) concluye que, en las proximidades del parasol ensayado, habrá niveles de ruido significativos causados por el viento a una velocidad de 20 m/s. El ruido de banda ancha generado por esta interacción aumenta conforme con la velocidad del viento.
- Además, Bublic et al. (2016) encontraron en los ensayos que dichas mediciones mostraron la aparición de componentes tonales en el espectro en ciertos ángulos de incidencia del viento. Estos componentes tonales aparecen en el espectro, tanto para 15 m/s como para 20 m/s, la diferencia es que para el primer valor de velocidad no son audibles, en cambio, se hicieron muy pronunciados y audibles para una velocidad de 20 m/s.
- A partir de los datos meteorológicos disponibles presentados por Bublic et al. (2016) se puede concluir que para ciertas velocidades de viento se generará un nivel de ruido significativo, el cual podrá ser percibido en el entorno de la edificación. Bublic et al. (2016) aseguran que el fenómeno se producirá al menos una vez al mes, en los parasoles ubicados en los pisos más altos.
- La interacción entre dos parasoles es favorable, ya que en ciertos ángulos se reduce la velocidad de viento en las proximidades de su superficie, no

generándose un nivel de ruido significativo. En cuanto a los elementos ubicados en planta baja, no estarán expuestos a altas velocidades de viento, por lo cual se concluye que no causarán un aumento en los niveles de presión sonora del entorno.

2.4 Comentarios y síntesis

Se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva de los fenómenos acústicos que genera el viento al incidir en estructuras, dependiendo de las características del mismo y de las estructuras. Se le denomina tono eólico o resonancia aeroacústica, a la producción de una emisión acústica perceptible para el oído humano y en muchos casos capaz de generar molestia por ruidos intensos en el entorno, debido a dicha interacción.

Como se ha visto, la información disponible es relativamente escasa, en tanto que los estudios que abordan este problema, que ha tomado gran importancia en el diseño de estructuras en los últimos años, no abundan. Los elementos, cavidades y accesorios que son implementados en fachadas, para el caso de edificios, son cada vez más complejos y por lo que se concluye, solamente tienen un propósito estético.

Según los casos estudiados por cada uno de los autores citados en este informe, de una forma u otra, se basan en los conceptos desarrollados por Chanaud (1970), el cual fue el pionero en los fenómenos aeroacústicos generados debido a esa interacción entre un elemento y el viento. Dicho autor se centra en los primeros estudios en aeroacústica realizados por Lighthill, que incursionó en el tema en la década del '50. Por lo estudiado hasta el momento, el fenómeno se puede generar en dos situaciones bien diferentes. La primera, en cavidades u orificios en estructuras, lugar donde se genera una contracción del flujo incidente. En dicha contracción ocurre un cambio brusco de presión, con este cambio y dependiendo de la velocidad de flujo de aire y las características de los orificios, es cuando se produce el "tono acústico" en una frecuencia tal que se vincula directamente con el número de Strouhal (frecuencia de desprendimiento de vórtices). Las medidas de mitigación para este caso, se han centrado en modificar las condiciones de los orificios (como ser el diámetro o la separación entre orificios) o directamente eliminarlos para aquellos casos donde la probabilidad elevada de la ocurrencia del fenómeno acústico.

Por otro lado, se analizaron casos típicos como la incidencia del viento en parasoles sobre fachadas o aletas en estructuras. Se tienen dos situaciones bien diferenciadas que generan el mismo resultado y el fenómeno es prácticamente el mismo. Esto se puede ver en el caso de los pasos peatonales en Melbourne o las "cuchillas" ubicadas en la azotea de Beetham Tower, donde se tiene una estructura construida con aletas de sección rectangular distanciadas entre sí en forma aleatoria. En este caso, en determinadas condiciones de velocidad de viento, ocurre un desprendimiento de la capa límite dentro de cada aleta generando una transición de flujo laminar al turbulento, esta transición perturba el volumen de aire formado entre dos aletas, entrando en resonancia. Si dicha frecuencia se encuentra en el rango audible y la intensidad es la apropiada, el fenómeno puede ser percibido fácilmente. El segundo caso es muy similar, pero la resonancia se da en el espacio generado entre las aletas (o parasoles) y la fachada principal de un edificio. Este fenómeno fue estudiado y presentado por Coppa (2015) y

es el fenómeno que se generó en uno de los casos de estudio en Uruguay, que será presentado más adelante en esta tesis.

La ocurrencia de este fenómeno acústico se puede resumir con el proceso presentado tanto por Chanaud (1970) y por Mitchell et al. (2010). Ambos autores lo describen como un circuito de retroalimentación el cual se basa en la ocurrencia de una perturbación del flujo, produciendo una inestabilidad que repercute directamente en la capa de corte que se forma sobre cada placa. Tanto en la cavidad de aire formada entre placas o en la cavidad formada entre estas aletas y la fachada principal de un edificio, se genera una resonancia acústica y esa resonancia es retroalimentada debido al desprendimiento de la capa de corte. Una vez que se dispara el ruido, ingresa al problema el fenómeno de bloqueo, el cual explicaría por qué se mantiene el sonido en el tiempo con velocidades de viento que varían constantemente en cuestión de segundos.

Las diferentes medidas de mitigación se han centrado en la modificación del flujo generado en las placas, con el objetivo de disipar previamente el ingreso del flujo inestable al resonador. En algunos de los casos presentados se ha tenido éxito, pero en otros no, como es el caso de Beetham Tower, donde en determinadas condiciones de viento (velocidad y dirección) se dispara el fenómeno acústico estudiado.

3 Sección III -Casos de estudio en Uruguay-

En esta sección se presentarán dos casos del fenómeno estudiado en esta Tesis, los cuales ocurrieron en los últimos años en Uruguay. El primer caso se aborda el problema de una chapa con orificios instalada en la azotea de un edificio ubicado en una zona próxima a la Rambla de Montevideo. El segundo caso de estudio, se presenta el problema de la interacción de viento con parasoles de determinadas características instalados en un edificio en la zona limítrofe entre el Departamento de Canelones y el Departamento de Montevideo.

En ambos casos se siguió la misma línea de trabajo, la cual se basó en la realización de mediciones de larga duración in situ, no solo de los niveles de presión sonora. También se fue recabando información de los datos de viento (dirección y velocidad), los cuales no fueron medidos in situ, con el fin de determinar la probabilidad de ocurrencia del evento y sus condiciones de generación. Simultáneamente se realizó el estudio del fenómeno en gabinete comparándolo con los resultados procesados de los registros realizados en campo.

Se desarrollaron medidas de mitigación para cada caso, las cuales fueron aplicadas y monitoreadas por un periodo de tiempo posterior a su implementación, teniendo éxito en ambos casos.

3.1 Equipamiento utilizado

Para las campañas de medición realizadas en ambos estudios se utilizaron sonómetros de precisión clase 1 según la norma IEC 61672. Para mediciones puntuales se empleó un sonómetro marca Brüel&Kjær modelo 2250 y para mediciones de larga duración se utilizó un sonómetro marca Casella CEL 63-C. Cada uno de los equipos de medición de

niveles de presión sonora es capaz de realizar análisis en bandas de tercio de octava en tiempo real. Antes y después de cada medición se verificó su precisión con un calibrador de campo Quest tipo 1, el cual emite tonos puros en 250 Hz y 1000 Hz a 94 dB y a 114 dB. Adicionalmente se obtuvieron medidas locales de velocidad de viento y temperatura ambiente mediante el empleo de un equipo portátil Extech EN 300.

En cada medición se registró un conjunto de valores que estos instrumentos obtienen en forma simultánea y en tiempo real, en respuestas temporales rápidas, lenta e impulsiva, en escalas de ponderación en frecuencia A y C y en bandas de tercios de octava normalizadas, con ponderación en frecuencia Z. A su vez, el sonómetro Bruel almacenan la evolución temporal de los niveles sonoros segundo a segundo tanto en escala A como en bandas de tercios de octava, lo que permite contar con un muy buen registro también en ese sentido. En tanto, el sonómetro Casella almacena los niveles sonoros en bandas de tercio de octava, mientras que los niveles en escala A los almacena segundo a segundo.

A los efectos de verificar el comportamiento de placa calada como emisor acústico del primer caso de estudio, se realizó un ensayo en un túnel de viento de la Facultad de Ingeniería. 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 la entrada al túnel de viento 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 el extremo corriente abajo se dispone un ventilador axial que succiona desde el interior del túnel de viento. En la Figura 3-1 se presenta un esquema de dicho túnel de viento, donde además se pueden observar los puntos de medición de presión utilizados para el primer caso en estudio, que se desarrollará más adelante en este capítulo.

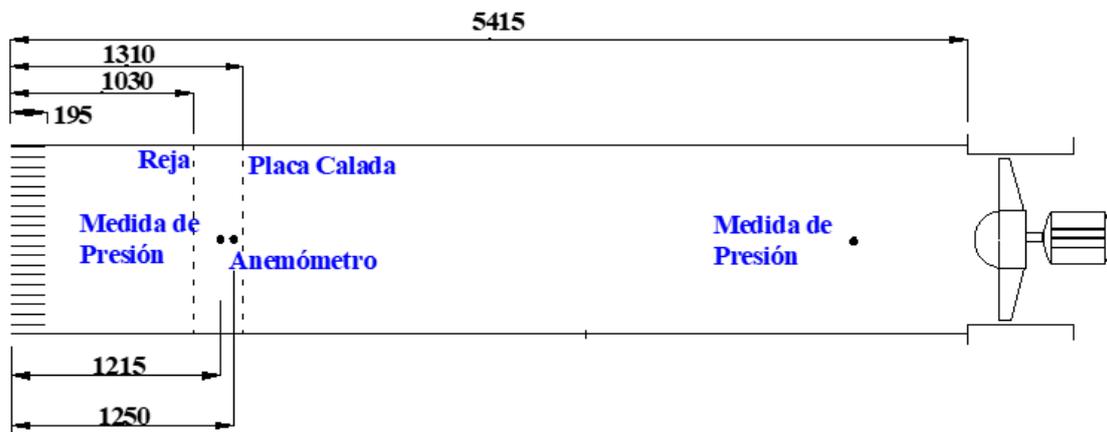


Figura 3-1. Esquema del túnel de viento (dimensiones en mm).

3.2 Casos de estudio en Uruguay

3.2.1 Introducción al problema, Caso I

El primer caso de estudio se dio en un edificio de gran altura, en el cual en la totalidad de sus pisos se encuentran oficinas administrativas de diferentes empresas. Dicho edificio se ubica próximo a la rambla de Montevideo. El Instituto de Mecánica de los

fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) fue contactado por la empresa constructora responsable de la obra, declarando percibir ruidos intensos provenientes de la azotea del edificio. Según lo detallado, dicho evento ocurría en determinadas condiciones de viento (dirección y velocidad), no sólo afectando el ambiente laboral de los oficinistas sino también a los habitantes de los edificios linderos.

En la Figura 3-2 se presenta la zona de estudio con una rosa de vientos, la cual será muy útil al momento de analizar las características del viento en la zona y vincularlo directamente con el fenómeno acústico generado en este caso.



Figura 3-2. Rosa de vientos en zona de estudio. Extraído de Cataldo et al. (2012)

3.2.2 Descripción del edificio

El edificio estudiado se encuentra a 300 metros de la rambla de Montevideo, y su azotea se encuentra a 81 metros del suelo. Está rodeada por un pretil de 1,6 m de alto y luego de un espacio de 0,8 m de ancho se ubica una chapa calada en el perímetro del edificio de 4,8 m de altura. El edificio tiene aproximadamente una altura de 88 metros de altura total. En el centro de la azotea se ubica un helipuerto.

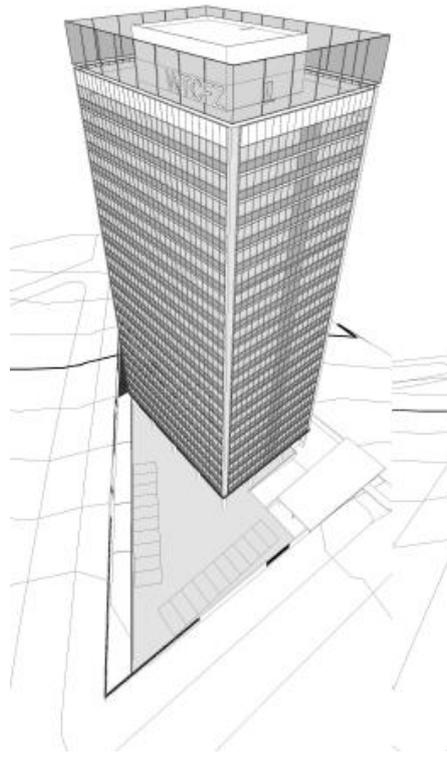


Figura 3-3. Edificio estudiado. Extraído de Cataldo et al. (2012)

La placa calada que se ubica en la parte superior del edificio de 0,5 mm de espesor, con pliegues horizontales cada aproximadamente 4 cm, lo que da una apariencia trapezoidal tal como se observa en la Figura 3-4.



Figura 3-4. (a) Vista de la placa en perfil. (b) Vista frontal de una placa. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Cada placa se compone de cuatro tramos, dos de 5,24 m de ancho y dos de 6,24 m de ancho y todos ellos 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.

Se realizó un relevamiento de fuentes externas ubicadas en la azotea con el objetivo de identificarlas al momento del procesamiento de datos registrados de niveles de presión

sonora en dicha zona. 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.



Figura 3-5. Equipos de aire del edificio. Extraído de Cataldo et al. (2012)

3.2.3 Procesos generadores de ruidos en el edificio

En base a lo descrito anteriormente, se identificaron diversos sitios donde podrían registrarse emisiones acústicas. Como consecuencia de la interacción entre el flujo de viento y una estructura, según lo visto en la sección II, se puede producir la emisión de vórtices de dimensiones o escala similares a la de la estructura. Siguiendo la expresión de Strouhal, las características de cada obstáculo y la velocidad del flujo de viento, se puede determinar la frecuencia de emisión de vórtices.

Dadas las características del edificio, el número de Strouhal presenta un valor de 0,12 (Holmes 2007), por lo que la frecuencia de emisión de vórtices sería inferior a 1 Hz.

3.2.3.1 Emisiones acústicas en tubos soporte

Los tubos que sirven de sostén de las placas perforadas son de sección recta rectangular (ver Figura 3-6), con una sección de 50 x 100 mm. Como se presentó en el capítulo 1.4.3, la frecuencia de la onda que se producirá dentro de cada tubo depende de la longitud del mismo y de la velocidad a la cual se mueven las ondas. Considerando el caso de un gas ideal como el aire y suponiendo una temperatura de 15°C, la frecuencia de las ondas que se moverían en el interior del tubo en su primer modo normal sería, de acuerdo con la ecuación 1.54, de 18 Hz.



Figura 3-6. Tubos soporte en azotea. Extraído de Cataldo et al. (2012)

El viento ingresa al tubo generando una excitación, es decir, produce una variación de presión debido a la fluctuación de velocidad. Asumiendo que esa fluctuación es tal que logra excitar el primero modo normal del aire (18 Hz) es que el tubo podría llegar a emitir un sonido. Se determinó el espectro de potencia de dicha fluctuación considerando diferentes velocidades de viento. A partir del espectro de potencia se determina la potencia acústica emitida debido a la resonancia de cada tubo y así se estima el nivel de presión sonora esperado en planta baja, considerando una propagación cuadrática. En la Tabla 3-1 se presentan los niveles de presión sonora esperados en planta baja en caso de que un tubo y todos entren en resonancia acústica.

Tabla 3-1. Niveles de presión sonora estimados en los tubos soporte

V_v (m/s)	L_p (dBZ) 20 tubos	L_p (dBZ) un tubo
3	45	32
5	50	37
7	53	40
9	56	43
11	58	45
13	60	47
20	65	52

En dicha tabla, se puede observar que para una velocidad de 20 m/s el nivel de presión sonora esperado en planta baja vinculado a la resonancia acústica del tubo sería de 65 dBZ. Dado que la intensidad no es lo suficientemente alta y 18 Hz prácticamente no se encuentra en el rango audible, no es esperable que este sonido sea percibido, pero si podría llegar a elevar el nivel de algún armónico, haciendo perceptible este fenómeno acústico. Se realizaron mediciones en planta baja registrando el ruido ambiente (predominando el ruido de tránsito) dado que durante los registros, la velocidad del

viento en planta alta fue menor a 20 m/s para que el fenómeno acústico proveniente de los tubos soporte sea percibido o al menos sea identificado un armónico de 18 Hz.

3.2.3.2 Vibraciones de las chapas caladas

La placa calada que se presenta en la Figura 3-7 presenta un apoyo cada 1,2 m y los extremos de cada tramo se encuentran en voladizo con una luz del mismo orden. Cada tramo de placa, entre apoyos consecutivos, presenta una masa de aproximadamente 11,5 Kg, siendo el módulo de elasticidad de 193 GPa. La frecuencia del primer modo de vibración del tramo de placa apoyada en sus dos extremos sería de 30 Hz. En tanto, el voladizo presentaría una frecuencia de su primer modo normal de 26 Hz.



Figura 3-7. Apoyos de placa calada. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Dada la altura del edificio en estudio (80 m) y su ubicación (zona urbana), se considera una intensidad de turbulencia de 27 %, según el gráfico de la Figura 1-17.

Tabla 3-2. Niveles de presión sonora esperados

Tipo de placa	Tipo de Terreno	Velocidad del viento (m/s)	Frecuencia Propia (Hz)	Presión RMS (N/m ²)	L _w (dBZ)	L _{wT} *(dBZ)	L _p dBZ esperado en PB por placa	L _p dBZ esperado en PB total de placas
Placas intermedias	Urbana	20	30	34716	84	96	47	55
Placas voladizo	Urbana	20	26	39990	86	97	48	56

*Corresponde al nivel de potencia sonora esperado, emitido por el total de placas

El flujo de aire que escurre alrededor de las placas resulta turbulento, motivo por el cual se produce una carga fluctuante sobre las placas que, como consecuencia, genera una respuesta no estacionaria, es decir, ésta vibrará. Para determinar dicha carga se utiliza el coeficiente de presión C_p definido en la expresión (2.5). Junto con la carga ejercida sobre cada placa se determina la deformación considerando una placa apoyada en dos de sus extremos y una ménsula. Con estas consideraciones, el nivel de presión sonora esperado en planta baja debido a la vibración de la totalidad de las chapas sería del

orden de 56 dBZ. A pesar de que 30 Hz se encuentra en el rango audible, la intensidad no es lo suficientemente elevada para su percepción. Se podría esperar una elevación de niveles de presión sonora de algún armónico haciendo perceptible este fenómeno.

3.2.3.3 Flujo a través de los orificios

Para el estudio del flujo a través de los orificios se realizó un modelo a escala que fue ensayado en el Túnel de Viento de la Facultad de Ingeniería, para obtener los campos de presiones que se establecerían sobre el edificio para viento de diversas direcciones y velocidades.

En las figuras Figura 3-8 y Figura 3-9 se presentan las curvas de igual valor de coeficiente de presión en una cara expuesta y en una cara corriente abajo del edificio en estudio, cuando sopla el viento del SUROESTE. A la altura donde se ubican las chapas caladas, la diferencia entre los coeficientes de presión en la cara corriente arriba y la cara corriente abajo resulta de 1,89 para viento de dirección SURSUROESTE y de 1,02 para viento de dirección SUROESTE.

Asociada a esta diferencia de presiones que se establece sobre las caras del edificio se producirá un flujo a través de los orificios así como de la ranura (o espacio) que existe entre la placa calada y el pretil de la azotea. Este flujo presentaría un desprendimiento de capa límite asociada a la cual se emitirían vórtices, tal como se presenta en forma esquemática en la Figura 3-10, con una dimensión similar a la del orificio o la ranura, es decir 2,5 mm y 85 cm respectivamente.

Para la determinación de la velocidad en orificios se sabe que en cada punto a evaluar se tiene:

$$\frac{P-P_0}{\gamma} = C_p * \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.1)$$

$$\frac{P-P_0}{\gamma} = k * \frac{V_{orif}^2}{2g} \quad (3.2)$$

Siendo V_1 la velocidad del viento de referencia incidente sobre el edificio, V_{orif} la velocidad en el orificio a determinar, C_p coeficiente de presión y k el coeficiente de pérdida de carga. Igualando las expresiones (3.1) y (3.2) se obtienen los valores presentados en la Tabla 3-3 para la velocidad en los orificios, en el caso en estudio.

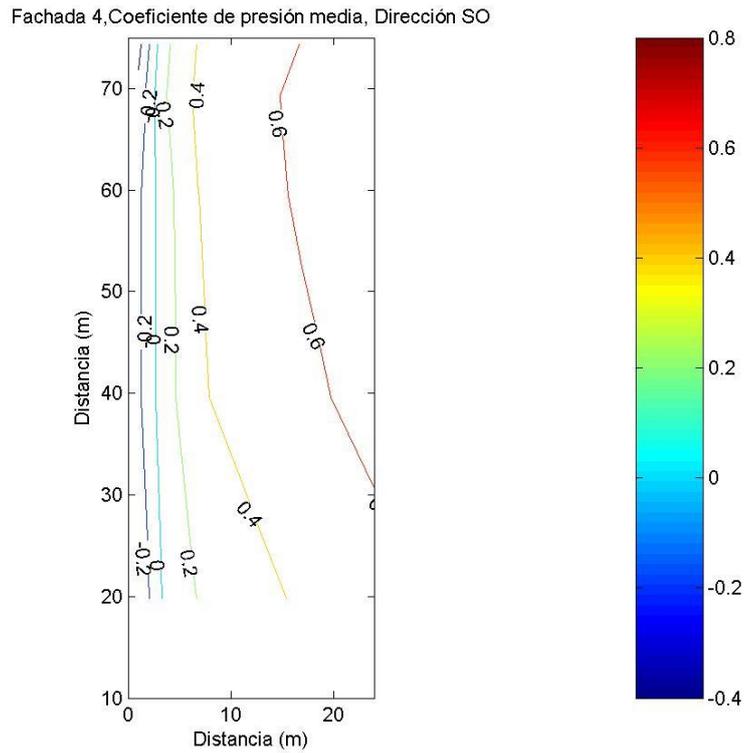


Figura 3-8. Campo de presiones sobre fachada frontal para viento del SUROESTE. Extraído de Cataldo et al. (2012)

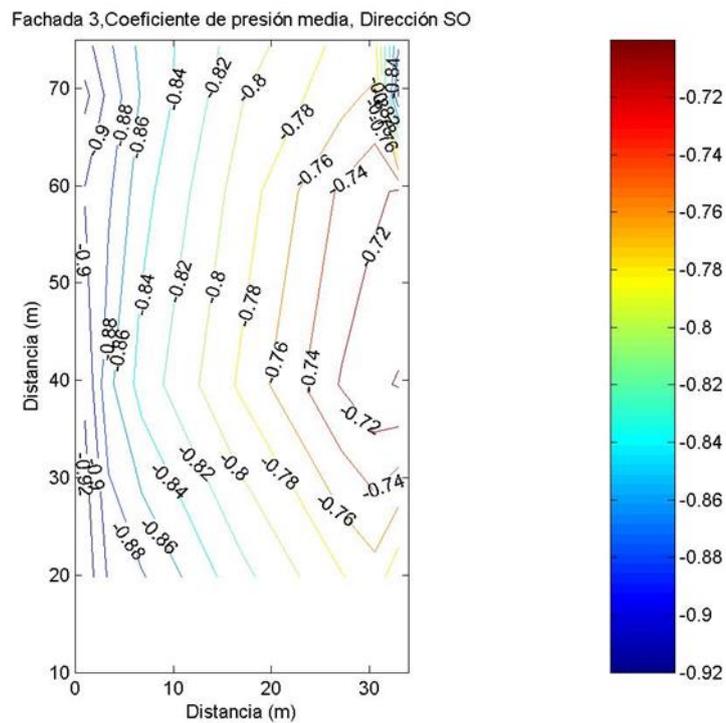


Figura 3-9. Campo de presiones sobre la fachada corriente abajo para viento del SUROESTE. Extraído de Cataldo et al. (2012)



Figura 3-10. Flujo por un orificio. Extraído de Cataldo (2012)

A partir de una velocidad media de viento se determina la velocidad por los orificios, considerando un coeficiente de pérdida de carga para ello, dado que ocurre una contracción del flujo. Determinando la diferencia de presión inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del orificio se determina la potencia emitida por el flujo de aire circulando por cada orificio.

Una vez determinada la potencia, se halla el nivel de potencia emitido por los 500.000 orificios los cuales, sumados, poseen un área total de 2,7 m². Para una velocidad de 20 m/s se espera un nivel de presión sonora de 95 dBZ, mientras que para la misma situación se estima un nivel de 46 dBZ en planta baja. Para esta velocidad el fenómeno de emisión acústica se espera que sea perceptible en la frecuencia de 4800 Hz, o sea en las bandas de tercio de octava de 4000 Hz y/o 5000 Hz.

Tabla 3-3. Niveles de presión sonora estimados, emitidos desde los orificios de placas.

U (m/s)	V _{or} (m/s)	Frec (Hz)	Δ P (Pa)	Q (m ³ /s)	W (watt)	L _w (dB)	L _p (dBZ)	L _p a 10 metros (dBZ)	L _p a 80 metros (dBZ)
5	3,0	1214	9,5	1,5E-05	1,4E-04	81,5	77	46	28
10	6,1	2428	38,1	3,0E-05	1,1E-03	90,5	86	55	37
15	9,1	3642	85,6	4,5E-05	3,8E-03	95,8	91	60	42
20	12,1	4856	152,2	6,0E-05	9,1E-03	99,6	95	64	46
25	15,2	6070	237,8	7,4E-05	1,8E-02	102,5	98	67	49

3.2.4 Trabajo de campo

Se realizó una visita con el objetivo de reconocer el lugar y las posibles fuentes de ruido, seleccionado la ubicación apropiada para llevar a cabo una medición de larga duración y la ubicación de las zonas para la realización de las mediciones puntuales en la azotea del edificio. Se realizaron mediciones ambientales de forma de obtener niveles de base y así posteriormente comparar con los distintos registros de datos relevados en diferentes condiciones.

Se identificaron cuatro zonas, definidas por la geometría del edificio, tal cual se puede ver en la Figura 3-11.

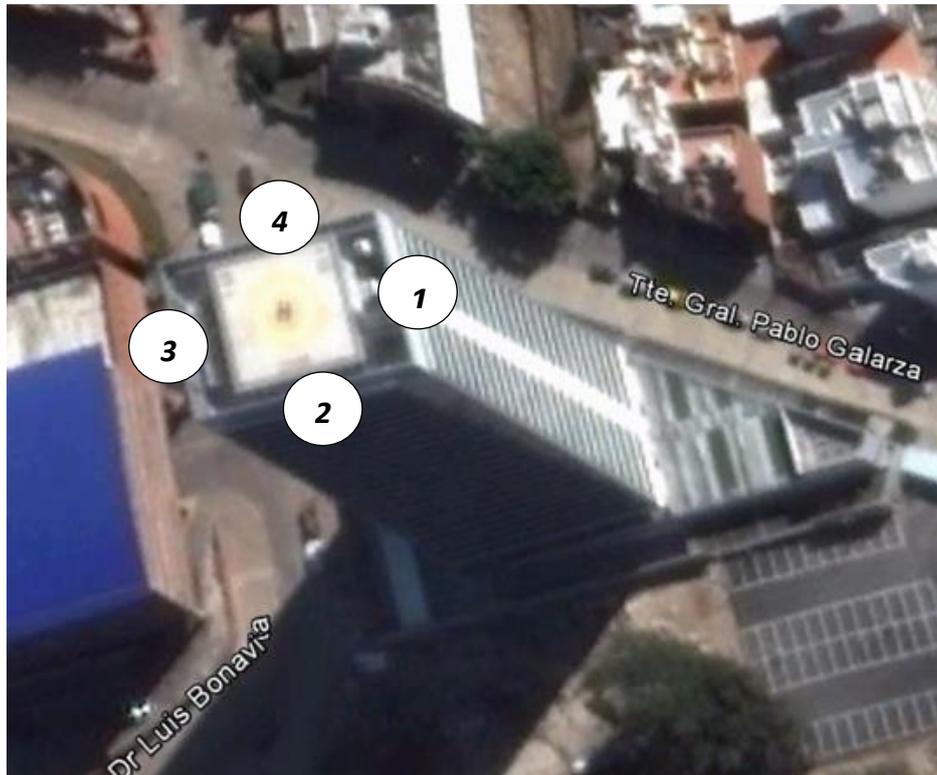


Figura 3-11. Puntos de registro. Editado a partir de Cataldo et al. (2012)

Se identificaron en sitio otras fuentes particulares las cuales contribuyen al ruido de base o ruido ambiental de la zona de estudio, por ejemplo, el flujo de aire a través de las persianas de ventilación de los equipos de aire acondicionado del edificio, y bombas del sistema de enfriamiento.

En la Figura 3-12 se presenta la ubicación del punto 1 y de la zona 2 de registro; en esta última se realizaron dos mediciones (punto 2 y punto 2'). En el punto 2' se buscó registrar el ruido proveniente del flujo de aire por las persianas de ventilación. En tanto, en la Figura 3-13 se presentan los puntos de medición 3 y 4.

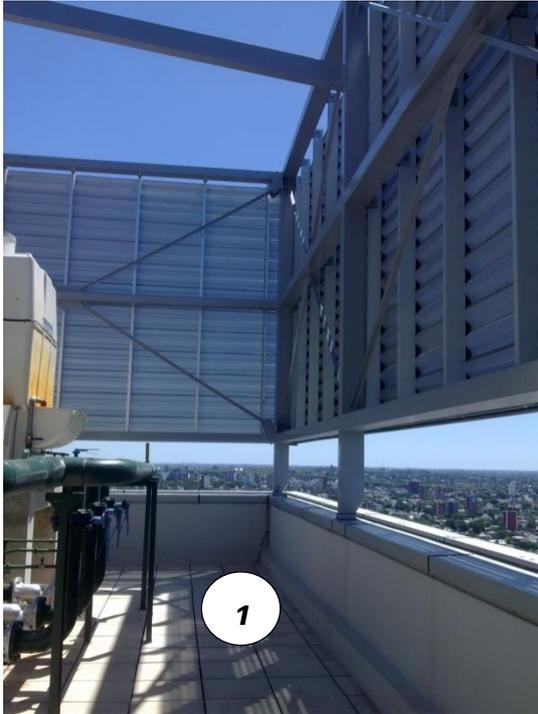


Figura 3-12. Puntos de registro. Editado a partir de Cataldo et al. (2012)

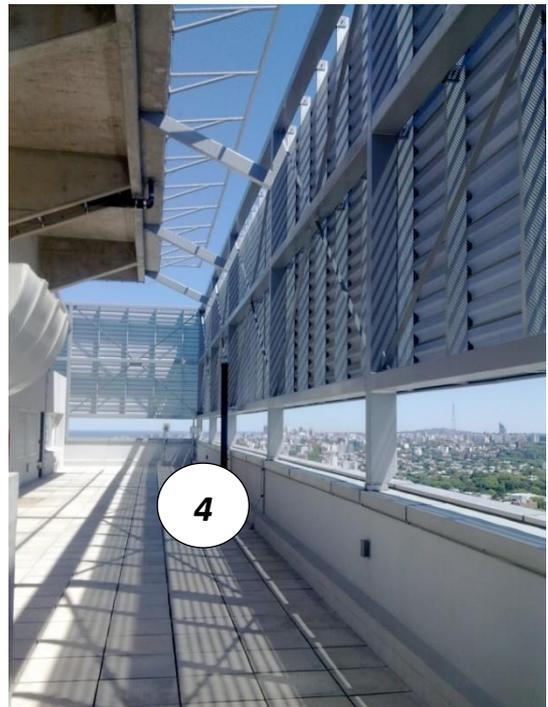
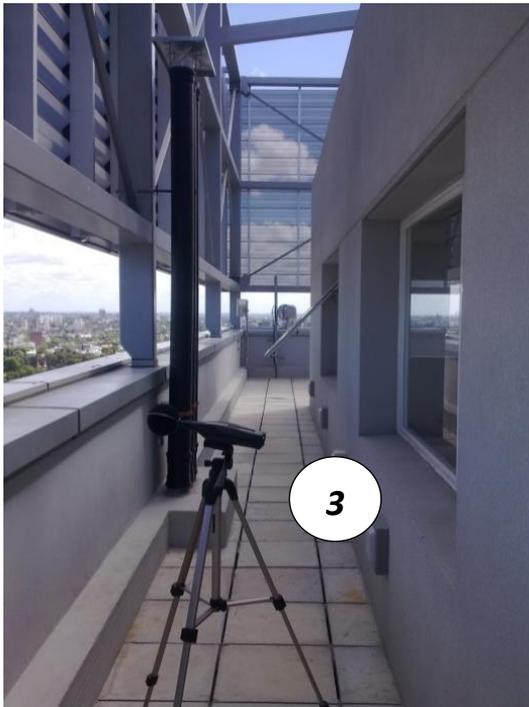


Figura 3-13. Puntos de registro. Editado a partir de Cataldo et al. (2012)

En la Tabla 3-4 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en las cuatro zonas de estudio, en la azotea del edificio.

Tabla 3-4. Resumen de resultados de medición en azotea. A partir de Cataldo et al. (2012)

Punto de Muestreo	L _{Aeq}	L _{AFmin}	L _{AF10}	L _{AF50}	L _{AF90}
Punto 1	65,0	63,0	65,6	64,8	64,3
Punto 2	66,8	64,4	68,3	66,3	65,4
Punto 2'	73,9	72,8	74,3	73,9	73,5
Punto 3	60,9	58,0	62,5	60,1	59,3
Punto 4	67,4	63,6	69,4	65,4	64,8
Punto de Muestreo	L _{Alaq} -L _{Aeq}	L _{Ceq} -L _{Aeq}	Bajas Frecuencias	Tonos puros	
Punto 1	1	5	No	315 Hz	
				4000 Hz	
				8000 Hz	
Punto 2	1	9	No	8000 Hz	
Punto 2'	1	8	No	8000 Hz	
				12500 Hz	
Punto 3	3	18	SI	8000 Hz	
Punto 4	4	6	No	4000 Hz	
				8000 Hz	
Punto de muestreo	Inicio de la medición	Duración	Observaciones de campo		
Punto 1	14/03/2012 - 11:06	31 min	1 bomba encendida - ventiladores apagados. Gente trabajando en el lugar		
Punto 2	14/03/2012 - 11:39	8 min	Compresor de aire en obra civil de edificio próximo. Aires acondicionados.		
Punto 2'	14/03/2012 - 11:48	3 min	Medida tomada frente a salida de ventilación aire acondicionado		
Punto 3	14/03/2012 - 11:52	5 min	Ruido urbano. Ruido de obra en edificio próximo.		
Punto 4	14/03/2012 - 12:01	24 min	Personal trabajando en andamios.		

Tal cual se observa en la Tabla 3-4, se identificó un tono en 8000 Hz, lo cual corresponde directamente al funcionamiento de los equipos de ventilación de aire acondicionado.

Complementando el estudio puntual realizado en una campaña de medición se decidió instalar el sonómetro Casella durante 11 días, con el fin de captar en algún momento el sonido agudo declarado por los responsables del edificio. Dicho sonómetro fue ubicado en el punto 4 de estudio. Durante ese periodo de tiempo, en base al análisis de resultados y las observaciones de los operarios que trabajaron en el lugar, pudo verificarse que el fenómeno acústico no ocurrió en ningún momento, por lo que estas

mediciones se consideraron como base comparativa para la evaluación frente a las mediciones del fenómeno en cuestión.

Días posteriores al monitoreo continuo, el equipo de trabajo del IMFIA es informado que se estaba generando el fenómeno en ese preciso momento, por lo que se tuvo que asistir de forma inmediata al lugar para registrar el evento y poder así realizar una caracterización del mismo.

De las observaciones de campo in situ, se pudo apreciar los sucesos ocurridos en la azotea los que serían potencial factor de molestias a nivel de planta baja y en las oficinas del edificio. Se registraron velocidades de viento que alcanzaron los 19 m/s, generando sonidos agudos al encontrar a su paso la placa metálica perforada. En particular pudo apreciarse que dicho sonido se generaba cuando el viento alcanzaba una velocidad de 16 m/s en cierta dirección.

Para el registro se selecciona un nuevo punto de medición (punto 5) tal cual se puede observar en la Figura 3-14.

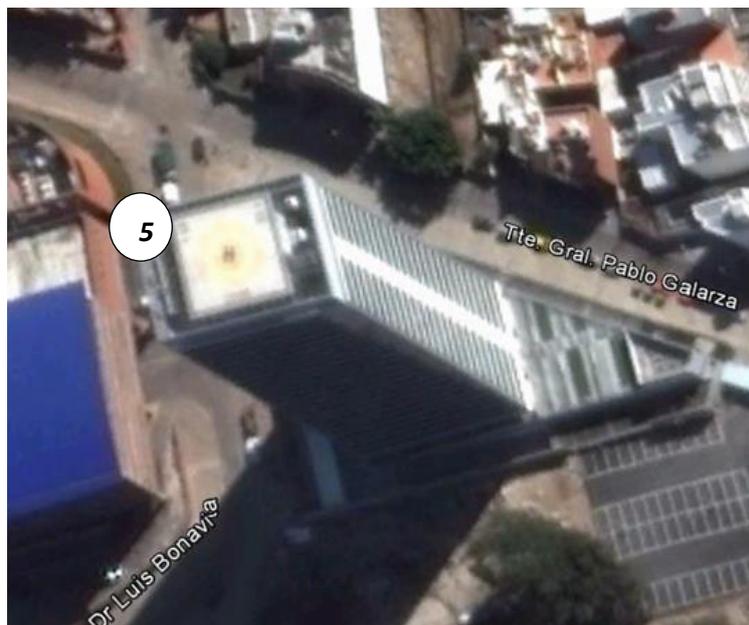


Figura 3-14. Punto de registro del evento puntual. Editado a partir de Cataldo et al. (2012)

En el gráfico de la Figura 3-15 se puede apreciar la evolución temporal del nivel de presión sonora ponderado en escala A. Alrededor de las 16 horas se puede apreciar un pico con una intensidad de 95,5 dBA, que se vincula directamente con el fenómeno acústico.

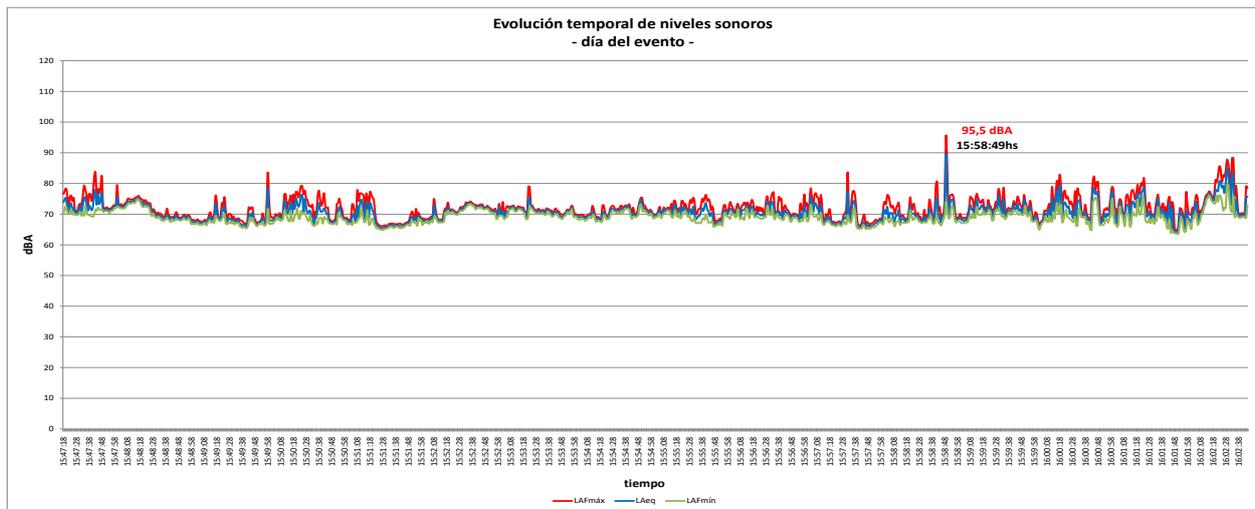


Figura 3-15. Evolución temporal L_{Aeq} del evento puntual. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Por otro lado, en el gráfico de la Figura 3-16 se presenta la composición espectral en bandas de tercio de octava correspondiente a todo el registro. Los niveles más elevados en las altas frecuencias ocurren en 4000 Hz y 5000 Hz.

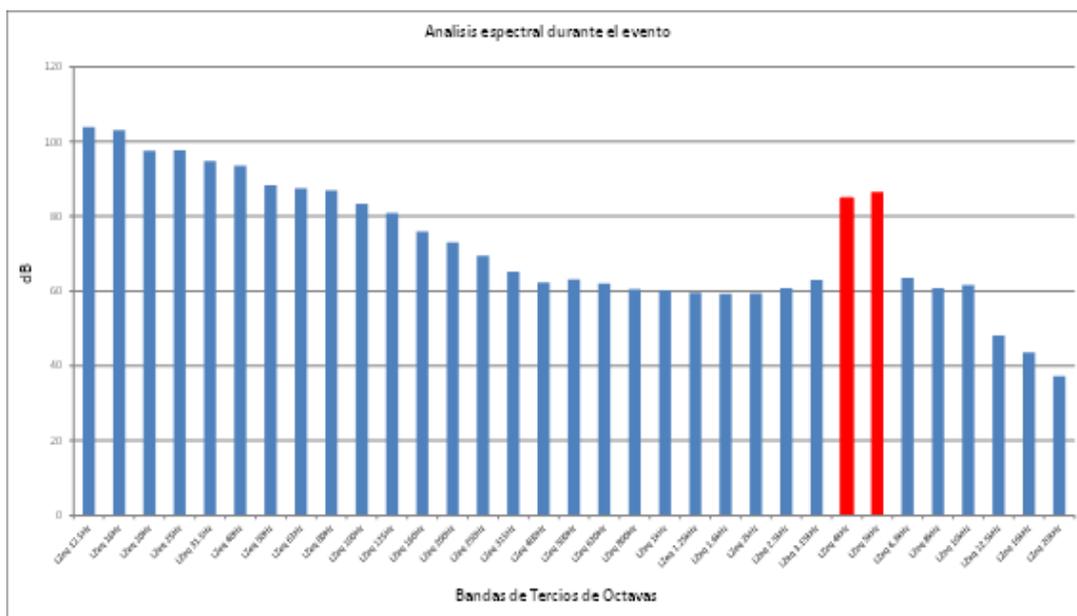


Figura 3-16. Análisis espectral en BTO. Extraído de Cataldo et al. (2012)

En base al evento puntual registrado, se analizaron los eventos de viento con velocidades superiores a 25 m/s, siendo esta una velocidad suficiente para que se genere el fenómeno. Estas velocidades son alcanzadas principalmente de direcciones SUR y SURSUROESTE, tal cual se puede observar en la rosa de viento de la Figura 3-17.

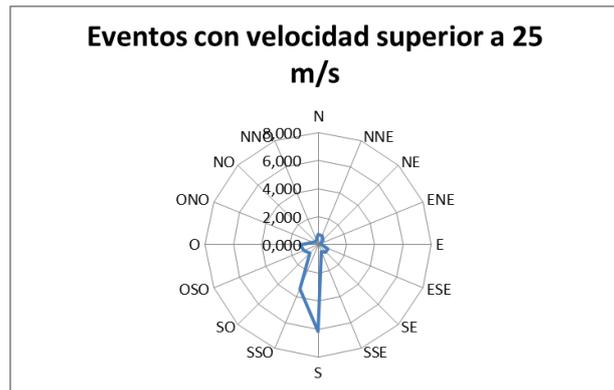


Figura 3-17. Rosa de viento eventos con velocidad superior a 25 m/s. Extraído de Cataldo et al. (2012)

3.2.5 Estudio en túnel de viento

Como estudio complementario, se realizó un ensayo en el túnel de viento, colocando la placa calada en cuestión en la zona de trabajo del túnel. En la Figura 3-18 se identifican los puntos de medición de presión. Esta medición de presión se realizó en cuatro tomas ubicadas sobre paredes, piso y techo de la zona de trabajo del túnel de viento, en dos secciones diferentes. En cada sección se determinó la presión media entre los cuatro sitios de medición. Además, se indica la posición donde se introdujo el sensor del anemómetro de hilo caliente, habiéndoselo ubicado en el centro de la sección recta del túnel de viento. Las líneas punteadas indican la ubicación de la placa objeto de estudio (placa calada) y de una reja destinada a la producción de turbulencia. La instrumentación utilizada se completó con el sonómetro marca Bruel & Kaejer localizado dentro del túnel de viento en la posición indicada en la Figura 3-18, en el centro de la sección recta y un sonómetro marca Casella modelo CEL 63-C ubicado 2 m corriente abajo de la salida del túnel de viento. En forma complementaria, se midió la velocidad del aire en el sitio donde se ubicó el sensor del sonómetro Casella con un anemómetro manual marca Extech modelo EN300.

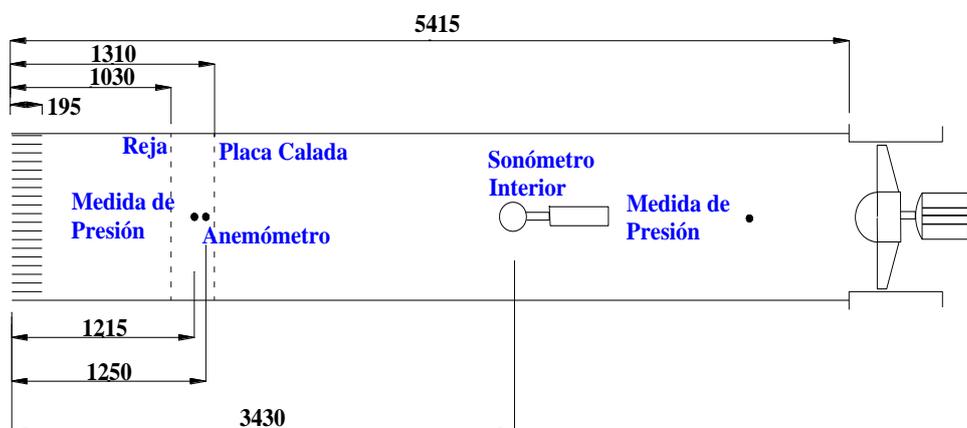


Figura 3-18. Esquema del túnel de viento durante los ensayos. Extraído de Cataldo et al. (2012)

En esta instalación se efectuaron tres ensayos en tres condiciones de trabajo diferentes. En la condición inicial, denominada condición de base, se realizó el ensayo sin reja ni placa calada y fue utilizado a los efectos de determinar el ruido de base.

La condición de base se caracterizó, para cada condición de funcionamiento especificada en la Tabla 3-5, determinando la velocidad del aire dentro del túnel de viento, fuera del túnel y la medición del sonómetro ubicado dentro del túnel de viento. En la Tabla 3-5 se presenta el valor de la velocidad dentro y fuera del túnel de viento, así como el nivel de intensidad acústica expresado en dBA en el interior del túnel.

Tabla 3-5. Caracterización de la condición de base. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Frecuencia indicada en regulador de frecuencia (Hz)	Velocidad interior (m/s)	Velocidad exterior (m/s)	L _{eq} (dBA)
20	2,6	2,0	79,7
30	4,0	4,3	79,8
40	5,3	5,6	89,4
50	6,5	5,9	93,5
60	7,7	7,2	96,7
70	8,9	8,4	103,3

En gráfico de la Figura 3-19, a modo de ejemplo, se presenta el espectro obtenido dentro del túnel para una frecuencia de giro de 20 Hz. Se señala que aparece una componente tonal a una frecuencia de aproximadamente 6000 Hz, la cual se visualiza especialmente para velocidades del ventilador inferior a 60 Hz. Esa componente espectral se asociaría a la frecuencia de la señal transportadora del variador de frecuencia con el cual se ajusta la velocidad de rotación del ventilador. En dicha figura, P1 identifica la condición base, P2 la condición en que solo se instala la placa y P3 con la placa y la reja.

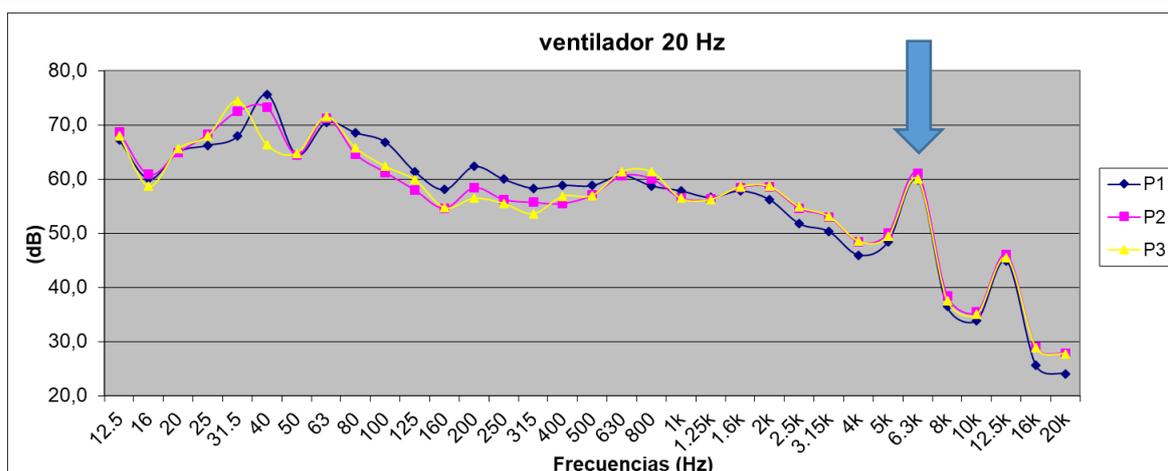


Figura 3-19. Espectro correspondiente a una velocidad del flujo de aire de 2,6 m/s. Extraído de Cataldo et al. (2012)

En la Tabla 3-6 se presenta para cada condición de trabajo la diferencia de presión medida a los lados de la placa, la velocidad del aire medida en el túnel de viento y la velocidad que el flujo de aire presentaría al circular por los orificios de la placa.

Tabla 3-6. Resultado de la medición de velocidad en el interior del túnel de viento. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Frecuencia indicada en regulador de frecuencia (Hz)	Diferencia de presión (mmH ₂ O)	Velocidad medida en el túnel de viento (m/s)	Velocidad calculada en orificios (m/s)
20	2,3	1,04	5,3
30	5,1	1,48	7,6
40	9,1	1,94	9,9
50	14,2	2,38	12,1
60	19,7	2,78	14,2
70	23,6	3,02	15,4

A los efectos de caracterizar las emisiones acústicas que no estarían asociadas a la operación del ventilador, a la potencia acústica obtenida para el caso con placa y con placa y reja se le restó la potencia acústica correspondiente a la Condición de Base para condición de funcionamiento correspondiente.

En la Tabla 3-7 se presenta, para cada condición de operación del ventilador y para cada situación ensayada el valor de la frecuencia donde se ubica el pico espectral y la amplitud del mismo en dB.

Tabla 3-7. Características del pico espectral. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Frecuencia indicada en regulador de frecuencia (Hz)	Placa		Placa y Reja	
	Frecuencia (Hz)	L (dBZ)	Frecuencia (Hz)	L (dBZ)
30	2500	64,6	2000	63,8
40	3150	69,0	3150	69,0
50	4000	71,3	4000	71,3
60	5000	72,3	5000	72,3
70	6300	72,8	6300	72,8

Los valores de frecuencia del pico espectral identificado cuando se dispone la placa resultan proporcionales a la velocidad del aire dentro del túnel de viento.

A partir de la velocidad del aire en los orificios se estimó un valor de frecuencia característica de la emisión acústica, las cuales se presentan en la Tabla 3-8. Estos valores de frecuencia resultan similares a los determinados a partir de la medición. Asimismo, en la Tabla 3-8 se consigna una estimación del nivel de intensidad de ruido. En este caso, al igual que en el ejemplo antes citado, se obtienen valores superiores a los medidos pero que guardan una relación similar con la medida en cada caso. Por otro lado, se observa un crecimiento del nivel de intensidad acústica con la velocidad en el orificio similar al determinado durante la medición.

Tabla 3-8. Frecuencias deducidas a partir de velocidad del aire en orificios. Extraído de Cataldo et al. (2012)

Frecuencia indicada en regulador de frecuencia (Hz)	V _{or} (m/s)	Frecuencia (Hz)	L _p (dBZ)
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

3.2.6 Análisis del clima de viento en la zona del edificio

Se seleccionó una serie de datos de velocidad y dirección de viento de un periodo de 8 años de la estación meteorológica de Carrasco. En base a las características del terreno que rodea a ésta y al edificio en estudio se infirió una serie histórica de datos horarios de velocidad y de dirección de viento en el sitio de implantación del edificio a la altura de su azotea.

Como se ha expuesto, se verifica que para la generación de tonos puros en las frecuencias de interés debido a la emisión de vórtices por los orificios de la placa calada, Tabla 3-9, se requiere de la ocurrencia de eventos meteorológicos con vientos cuya velocidad mínima sea de 16 m/s, a nivel de la azotea del edificio (88 m de altura). Se analiza la ocurrencia de eventos meteorológicos con vientos de intensidades superiores a dicho valor mínimo, a 88 m de altura en el sitio de implantación del edificio objeto de estudio, y en particular, considerando aquellos vientos de intensidades superiores a 20 m/s, de acuerdo con los datos obtenidos a partir de caracterización física, mediciones de campo y resultados en Túnel de viento. En la Figura 3-20 (a) se presentan las rosas de los vientos para la zona de estudio.

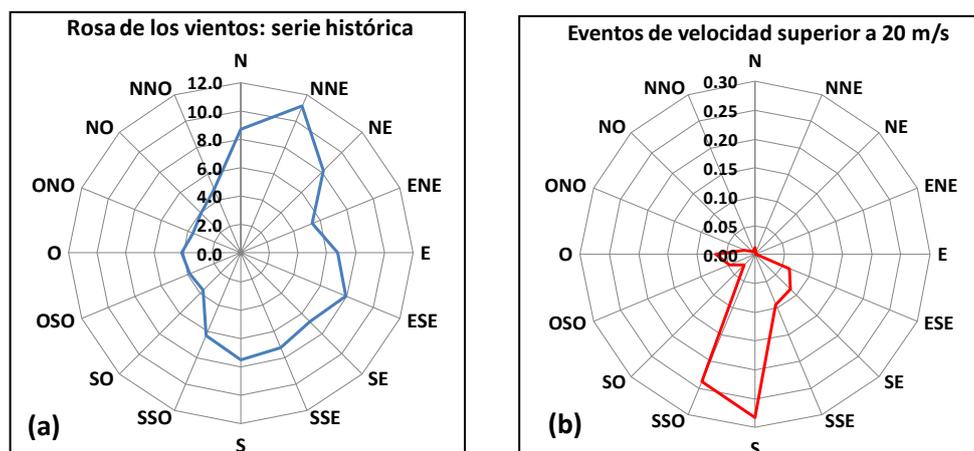


Figura 3-20. (a) Rosa de los vientos para frecuencias relativas de direcciones. (b) Rosa de los vientos para frecuencias relativas de direcciones y para velocidades medias horarias superiores a 20 m/s. Ambas en la azotea del edificio. Extraído de Cataldo et.al (2012)

En la Figura 3-20 (b) se expresa la rosa de los vientos para los eventos meteorológicos con velocidad media del viento en una hora superior a 20 m/s, y que serían los eventos que potencialmente podrían dar lugar a emisiones acústicas en la banda de octava de 4000 Hz. La cantidad total de estos eventos sería del orden del 0,96 %, que equivaldría a alrededor de 7 eventos mensuales en promedio. Se aprecia una mayor probabilidad de ocurrencia de estos vientos en las direcciones S y SSO, que significan un 54 % de los posibles casos de interés.

Tabla 3-9. Proporción del tiempo con velocidad superior a 20 m/s. (Valores graficados en Figura 3-20 (b)) Extraído de Cataldo et al. (2012)

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
0.012	0.002	0.001	0.004	0.001	0.063	0.084	0.093	0.283	0.238	0.026	0.047	0.067	0.021	0.009	0.006

Ubicado hacia SUROESTE-SURSUROESTE respecto al edificio en estudio otro edificio de 120 m de altura que protege a dicho edificio de los vientos en estas direcciones, por tanto la cantidad total de los eventos con potencial de generar molestias serían de 0,53 %, lo que equivaldría en promedio a 5 eventos por mes.

3.2.7 Conclusiones

Se presentó un el análisis de las emisiones acústicas generadas por la interacción entre el viento y la fachada de un edificio. La ocurrencia de ciertos eventos meteorológicos genera emisiones sonoras de una intensidad tal que se perciben auditivamente, pudiendo resultar en una potencial causa de molestias en los entornos del edificio en estudio.

A partir de los resultados de las mediciones en campo y en Túnel de viento, se puede inferir que estas emisiones acústicas son generadas por la emisión de vórtices a través de los orificios de la placa calada instalada, debido a los flujos de viento con velocidad superior a 20 m/s a nivel de la azotea del edificio (88 m de altura). Estos resultados están asociados además a las quejas por ruidos molestos formuladas por la población que habita y/o trabaja en la zona de estudio.

En estas condiciones, las características de los espectros sonoros de los eventos de interés señalan un comportamiento similar, presentando tonos puros fuertes en la banda de octava de 4000 Hz. Estos ruidos, que, se perciben como un sonido agudo en la azotea del edificio. Esto puede causar sensación de molestia, dado que por su frecuencia e intensidad generarían una percepción análoga a la de un sonido de banda ancha de intensidad $L_{Aeq} + 6$ dBA de acuerdo a la norma ISO 1996-2:2007, siendo L_{Aeq} el nivel de presión sonora del sonido de banda ancha real.

De acuerdo al análisis del clima de vientos para los eventos meteorológicos que potencialmente podrían dar lugar a estas emisiones acústicas y que podrían generar molestias en la población existente en la zona de estudio, tendría una probabilidad de ocurrencia en promedio de entre 5 y 7 eventos por mes.

Con el objetivo de mitigar estas emisiones sonoras se plantea la instalación de una placa de policarbonato sobre la placa metálica calada existente en la fachada del edificio, a fin de evitar el flujo del viento a través de sus orificios. Si inicialmente se instalara dicha placa sobre las fachadas que se orientan hacia las direcciones SUR y OESTE respectivamente, los eventos de ruido que potencialmente pudieran generar molestias en la población que habita y/o trabaja en la zona de estudio serían reducidos en un 96,3 %.

La medida de mitigación fue empleada y hasta el año 2019 no se han tenido quejas con respecto a la aparición del fenómeno acústico.

3.3 Caso II, introducción al problema

El estudio de Arquitectura responsable del proyecto, del edificio que se designará como caso II, planteó al Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, el análisis de la ocurrencia de eventos de emisiones acústicas en el edificio ubicado en las proximidades del Aeropuerto Internacional de Carrasco. Estas emisiones, de acuerdo al planteo, resultan de una intensidad tal que se perciben ruidos asociados, no solo en las habitaciones del edificio sino que también a nivel del suelo en el entorno del referido edificio.

Según sus características, el sonido resulta de un espacio entre los parasoles de vidrio y la fachada propia del edificio, tal espacio podría actuar como resonador. Un resonador es cualquier sistema que es capaz de comportarse de manera resonante, lo cual quiere decir que oscila a una determinada frecuencia con una amplitud mayor que las demás. Para que este espacio se comporte como tal debe existir un excitador. Este excitador podría ser el flujo que se desarrolla alrededor de las placas de vidrio (parasoles) los cuales generan diferentes situaciones según sea la incidencia del viento sobre la fachada principal del edificio, tanto en dirección como en velocidad.

A continuación se presentará una caracterización física de los posibles diferentes emisores de sonido que se identifican en este edificio. Esta caracterización se realiza describiendo físicamente el proceso de producción de sonido y estimando la frecuencia e intensidad del mismo en cada caso. Además, se realizó un conjunto de mediciones para caracterizar el sonido, las cuales se ubicaron en el piso 9 y en el estacionamiento del edificio en planta baja. En base a la caracterización física de los emisores identificados y el resultado de las mediciones, se propone un diagnóstico así como algunas medidas de mitigación que se podrían seguir.

Una vez instalada una de las medidas de mitigación, se procedió a realizar un seguimiento de la misma, ubicando uno de los equipos de medición en planta baja y en el piso 9, con el objetivo de verificar la eliminación del fenómeno.

3.3.1 Descripción del edificio

En el Departamento de Canelones, sobre la Avenida de las Américas a orillas del Lago Calcagno, muy próximo al Aeropuerto Internacional de Carrasco, se construyó un edificio con una altura de aproximadamente 36 metros y una sección rectangular de aproximadamente 35 m por 20 m de lado. En la Figura 3-21 se presenta una imagen aérea de la zona, extraída de Google Earth, en la cual se superpuso la rosa de los vientos a los efectos de orientar sobre los puntos cardinales.



Figura 3-21. Ubicación edificio en estudio. Imagen extraída del Google Earth.

Este edificio presenta, sobre su fachada principal parasoles de vidrio compuestos por placas de 16 mm de espesor, y 19 cm de ancho en tramos de la altura de cada piso, del orden 3,2 m. Los mismos se encuentran ubicados perpendicularmente a la fachada, en forma aleatoria a lo largo y ancho de la misma, tal cual lo muestra la Figura 3-22, con una separación de entre 7 cm y 25 cm, siendo en promedio de 20 cm.

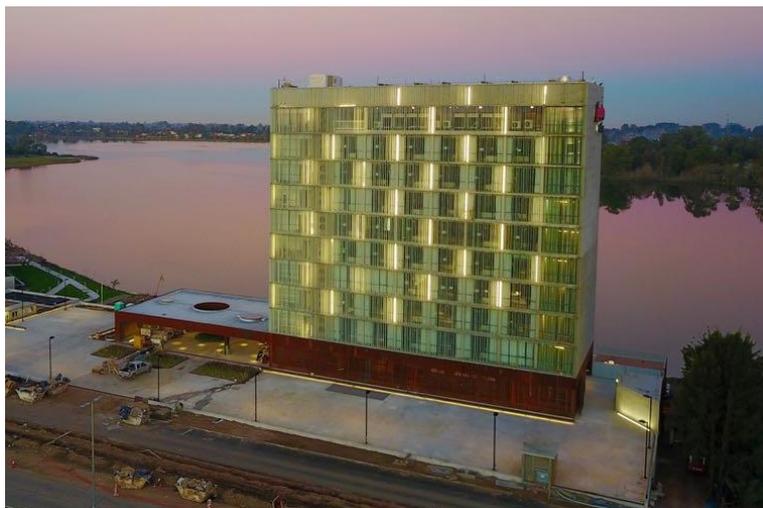


Figura 3-22. Fachada principal del edificio. Extraído de Gianoli et al. (2017).

Una vez avanzado el proceso constructivo, a punto de su culminación, se percibieron emisiones acústicas provenientes, aparentemente, del piso 9. A fines del mes de abril y a principios del mes de junio de 2017 se culminó con la colocación de estos parasoles en toda la fachada del edificio. Según lo comentado por los responsables de la obra, el 19 de junio se percibió claramente el sonido proveniente del piso 9. Como información adicional, la estación meteorológica del Aeropuerto de Carrasco, ese día registró vientos de hasta 11 m/s (medidos a 10 metros de altura) con dirección que varió desde SO al O a lo largo del día.

Se debe destacar, que la geometría de este piso, es diferente a la de los demás pisos, ya que en esa zona se ubican los equipos de aire acondicionado de todo el edificio. En la Figura 3-23 se presenta un plano de la planta del piso 9.

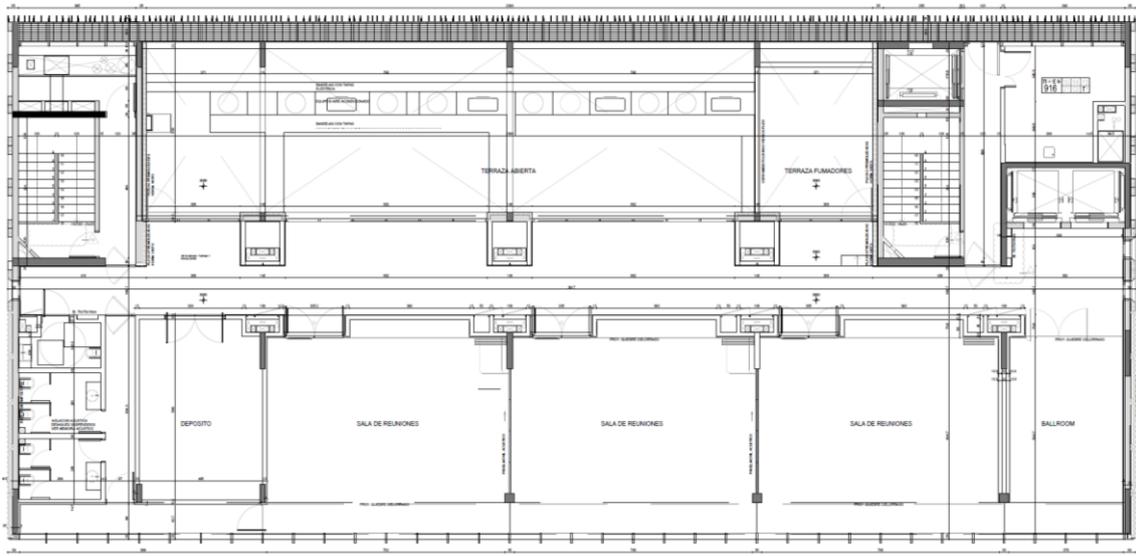


Figura 3-23. Plano, planta piso 9. Extraído de Gianoli et al. (2017).

En la Figura 3-24 (a), se observa en detalle los parasoles de vidrios instalados en el edificio. Los mismos, como fue mencionado anteriormente, se encuentran a lo largo y ancho de toda la fachada principal del edificio, con separaciones aleatorias entre ellos. En la Figura 3-24 (b) se observa un detalle con las separaciones de los parasoles, tales medidas van desde los 7 cm hasta los 25 cm.

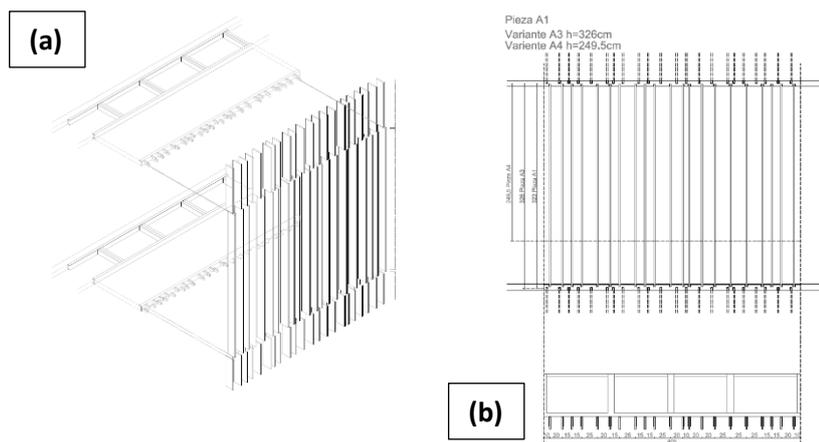


Figura 3-24. Detalle parasoles de vidrio. Extraído de Gianoli et al. (2017).

3.3.2 Procesos generadores de ruidos en el edificio

En emisiones acústicas, se puede distinguir entre las de banda ancha, en cuyo caso la potencia acústica se distribuye en componentes de diversas frecuencias, y las de banda angosta, o tonales, en cuyo caso la potencia acústica se concentra en una componente espectral definida.

Entre los ruidos de banda angosta podrían considerarse aquellos en que la frecuencia de la componente espectral cambia con alguna variable característica, como podría ser la velocidad del viento, en cuyo caso se habla de ruido sincrónico. Los ruidos de banda angosta cuya frecuencia no cambia con variable alguna se asocian a resonancias.

En un edificio puede tenerse diversas fuentes de emisión de ruido como puede ser la maquinaria que opera durante la construcción, los equipos de ventilación, la vibración de componentes estructurales o la interacción con el viento.

3.3.2.1 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. 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.

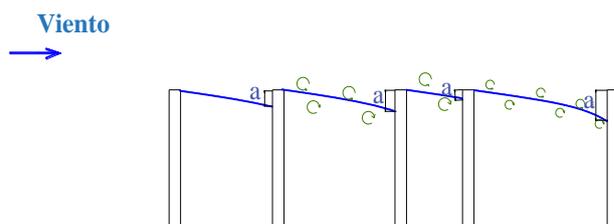
Si se supone que las placas de vidrio se encuentran doblemente empotradas, con una luz de 3,2 m, un ancho de 19 cm y un espesor de 16 mm, que el vidrio presenta un módulo de elasticidad de 71.900 kPa, un coeficiente de amortiguamiento de 0.01, tal como se presenta en Rodríguez et al. (2010), y una densidad de 2490 kg/m³, se estimó que la frecuencia propia sería del orden de 5 Hz.

Si todas las placas de un piso vibraran en su modo normal, el nivel de presión de potencia sería del orden de 40 dB. La amplitud del movimiento del modo normal se realizó de acuerdo a Simiu and Scanlan (1986).

3.3.2.2 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.

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 movimiento hasta cierta distancia desde el borde exterior de la placa. Esta zona donde el aire se pone en movimiento se presenta esquemáticamente en la Figura 3-25.



Fachada

Figura 3-25. Esquema del flujo alrededor de cada placa. Extraído de Gianoli et al. (2017).

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 presentaría menores velocidades. El flujo entonces interactuaría con una porción de la placa plana de altura "a" como se indica en la Figura 3-25. 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. En la Tabla 3-10 se presenta, para diferentes valores de la velocidad del viento, el intervalo de frecuencias que presentaría la emisión de dichos vórtices a partir de Lesieur (1997).

Tabla 3-10. Emisión de vórtices en parasoles

Velocidad del viento a la altura considerada (m/s)	Intervalo de frecuencia de emisión de vórtices (Hz)
3,6	171 a 277
6,7	319 a 515
9,8	467 a 754
10,6	505 a 815

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 3-26 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.

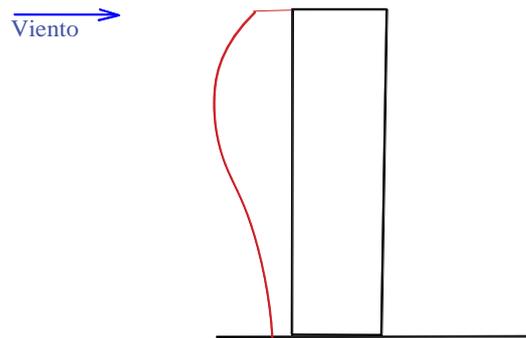


Figura 3-26. Distribución de la presión del viento sobre la fachada de un edificio debido a la interacción con el viento. Extraído de Gianoli et al. (2017).

La distribución de presión presenta un máximo a una altura del orden del 66 % de la altura del edificio, tal como se presenta en Simiu and Scanlan, 1985 y en Holmes (2007) lo cual ocurriría en el piso 6 del edificio objeto de análisis. Respecto al flujo alrededor de las placas, a partir de un ángulo de ataque relativamente pequeño, el mismo entraría en pérdida es decir, ocurrirían subpresiones tal como se presenta en forma esquemática en la Figura 3-27.

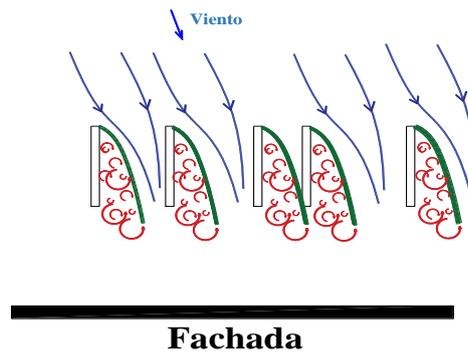


Figura 3-27. Esquema del flujo alrededor de placa para la condición de entrada en pérdidas. Extraído de Gianoli et al. (2017).

Tal como se observa en la Figura 3-27 al producirse la entrada en pérdida habría una importante producción de vórtices, así como una contracción del flujo. Asociado a estos procesos, tal como se presenta en Laratro et al. (2017) se producirían emisiones acústicas con frecuencias de entre 400 Hz y 700 Hz. El autor realizó una serie de ensayos en un perfil aerodinámico con ángulos de ataques pequeños, como resultado de estos ensayos, las frecuencias de producción de vórtices se encuentran en el rango mencionado.

Si se utiliza el ábaco de la Figura 2-32 presentado por Coppa (2015) y considerando las dimensiones de los parasoles de este caso de estudio (espesor 16 mm) la frecuencia de emisión de vórtices esperadas se encuentra en un rango de 125 Hz a 250 Hz para velocidades de 10 m/s a 20 m/s. Según estos resultados, son frecuencias menores a las estimadas anteriormente y a las registradas en el trabajo de campo, lo que demuestra

que cada caso debe ser abordado de manera independiente y que seguramente dichos ábacos hayan sido desarrollados específicamente para los diseños de Arup Acoustics.

3.3.2.3 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. En la Figura 3-28 se presenta la malla que compone el piso técnico que se ubica entre cada piso.



Figura 3-28. Piso técnico entre pisos. Extraído de Gianoli et al., 2017.

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 tiene un paso de 12 cm y 6 cm y está construida por placas y alambres de 3 mm de espesor.

Como consecuencia del campo de presiones que se esquematiza en la Figura 3-26 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.

En la Tabla 3-11 se presenta para diferentes valores de la velocidad del viento a la altura del techo del edificio el valor de la frecuencia de los vórtices que se emitirían en la malla.

Tabla 3-11. Frecuencia de vórtices emitidos en piso técnico. Gianoli et al. (2017).

Velocidad del viento a la altura del techo del edificio (m/s)	Frecuencia malla 1 (Hz)	Frecuencia malla 2 (Hz)	Frecuencia hilos (Hz)
3,5	45	22	900
6,0	78	38	1600
10,0	131	64	2600

3.3.2.4 Ruido emitido por resonador

En el edificio de interés entre los parasoles de vidrio y la fachada se genera un espacio de 65 cm de longitud y de ancho igual al ancho del edificio. En la Figura 3-29 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 de 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 officaría 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.



Figura 3-29. Indicación de tubos. Extraído de Gianoli et al. (2017).

En la Tabla 3-12 se presenta la frecuencia que tendría el modo fundamental de vibración de cada tipo de tubo, así como los primeros armónicos a partir de las expresiones (1.53) y (1.54).

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

Tabla 3-12. Frecuencia en Hz del modo fundamental y armónicos de un resonador tipo tubo.

3.3.3 Trabajo de campo

Inicialmente se realizó una visita de reconocimiento del lugar, con el fin de seleccionar la ubicación apropiada para llevar a cabo una medición de larga duración. Paralelamente se realizaron medidas ambientales de forma tal de obtener niveles de base y así posteriormente comparar con los distintos registros de datos relevados en diferentes condiciones.

El sonómetro CASELLA se utilizó para la realización de mediciones de larga duración, para registrar los L_p durante dos semanas en dos puntos diferentes. El primer punto en el cual se realizó una medición de larga duración fue en el piso 9, tal cual lo muestra la Figura 3-30 (a); en esa posición permaneció durante 9 días. Con este punto se buscó verificar si la fuente de ruido efectivamente se encontraba en este piso; además esta ubicación permitió identificar la o las frecuencias en la cual se emite el ruido, para así caracterizar el fenómeno.

El segundo punto de medición de larga duración fue en el área de estacionamiento del edificio, tal cual lo muestra la Figura 3-30 (b); en este punto permaneció durante 5 días. La selección de este punto se basó en poder determinar si el fenómeno se generaba en los pisos más cercanos a la planta baja y ver como repercutía el sonido generado en los niveles más altos del edificio a nivel de suelo.

El sonómetro Brüel&Kjær se utilizó para realizar mediciones puntuales, tales como para caracterizar los niveles de presión sonora en el piso 9 al momento de instalar el CASELLA y particularmente se utilizó para captar el evento el cual sucedió la noche del 28 de julio alrededor de las 21 horas; tal evento se analizará más adelante.

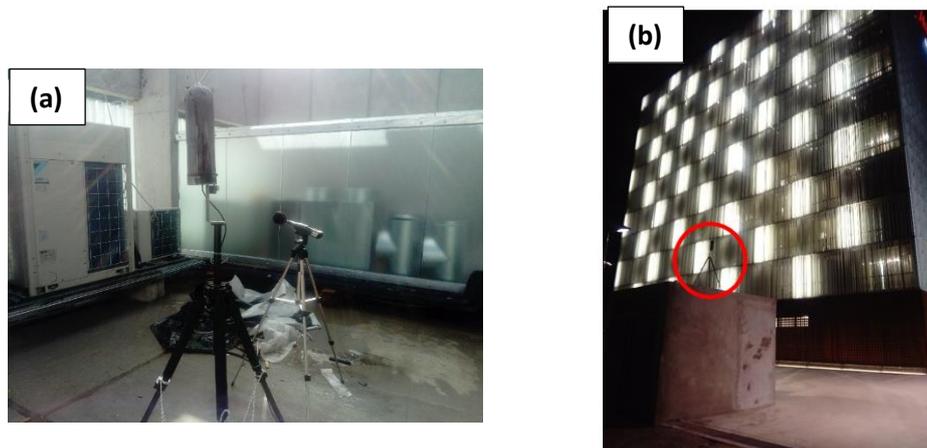


Figura 3-30. Ubicación sonómetro CASELLA. (a) Azotea. (b) Planta baja, estacionamiento.
Gianoli et al. (2017)

Se identificaron en sitio otras fuentes particulares contribuyentes al ruido ambiental, como son los equipos de aire acondicionado ubicados en el piso 9 y el funcionamiento de diferentes herramientas utilizadas por el personal de obra. Para el análisis de las mediciones de larga duración se consideró el horario del personal, que es entre las 8:00

horas hasta las 17:00 horas de lunes a jueves, de 8:00 horas hasta las 16:00 horas los viernes y de 8:00 horas hasta las 12:00 horas los sábados.

Dada la cantidad importante de registros con que se cuenta, se enfatizará en aquellos resultados que efectivamente muestren el fenómeno generado.

3.3.3.1 Medición Piso 9, sonómetro fijo

En este punto se lograron registrar 9 días de forma continua, a partir del día 11 de julio hasta el día 19 de julio (inclusive). En este punto no solo se obtuvo un importante registro de evolución temporal de los niveles de presión sonora a lo largo de esos 9 días, sino que además se logró obtener una aproximación al problema planteado.

A continuación, se presentan algunos resultados significativos que indican las frecuencias predominantes al momento que se “dispara” el evento de ruido.

3.3.3.2 Evento del 13 de julio

En el gráfico de la Figura 3-31 se presenta la evolución temporal en LA_{eq} del día 13 de julio. En este registro se logran identificar varios sucesos de relevancia. Se puede observar que desde la madrugada los niveles de presión sonora de fondo en escala A, presentan prácticamente un comportamiento constante hasta las 15:00 horas aproximadamente, esto es debido al sistema de aire acondicionado del edificio, el cual estuvo encendido efectivamente hasta esa hora. En el gráfico de la Figura 3-32 se presenta la evolución temporal de las bandas de 125 Hz (frecuencia relacionada a los equipos de aire según características técnicas brindadas por la empresa constructora) y la frecuencia de 50 Hz (frecuencia relacionada a la corriente eléctrica), las cuales efectivamente descienden sus niveles a partir de la hora mencionada.

Por otro lado, a partir de las 9:30 los niveles de presión sonora en escala A se incrementan, 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 metros de altura) con dirección NNE, o sea, prácticamente perpendicular a los parasoles del edificio, correspondiente al caso esquematizado en la Figura 3-25, siendo esta velocidad suficiente para que el resonador entre efectivamente en resonancia, tal como puede concluirse de la observación de las Tabla 3-10 y Tabla 3-12. Este evento perduró hasta las 18 horas aproximadamente.

Analizando ese intervalo de tiempo, en el gráfico de la Figura 3-33, se observan claramente los dos tipos de ruido declarado por el personal de la obra. En dicho gráfico, se presenta la evolución temporal de las frecuencias 500 Hz, 630 Hz, 3.2 kHz, 4 kHz, 5 kHz y 6.3 kHz

De 9:30 hasta las 14:00 horas el viento presentó una dirección NNE con velocidad en el entorno de los 6 y 7 m/s (Evento 1), a partir de las 14:00 horas el viento no solo aumenta su velocidad a 8 m/s sino que cambia su dirección desde el N (Evento 2), en ese

momento el viento toma una cierta inclinación con respecto 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, con estos niveles elevados, perdura hasta las 18 horas, momento en el cual la velocidad de viento desciende a los 5 m/s.

A partir de las 21:00 horas aproximadamente, la estación meteorológica del Aeropuerto de Carrasco indica un cambio de dirección de viento a NNE, con velocidades entre 5 a 6 m/s, momento en el cual se dispara el evento en las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz, pero con menor intensidad.

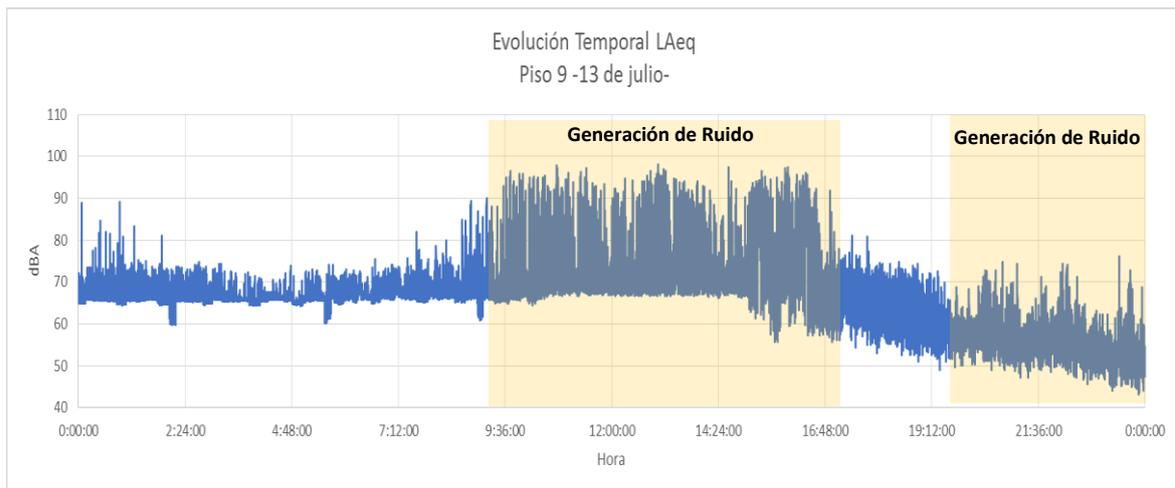


Figura 3-31. Evolución temporal LAeq, 13 de julio. Gianoli et al. (2017)

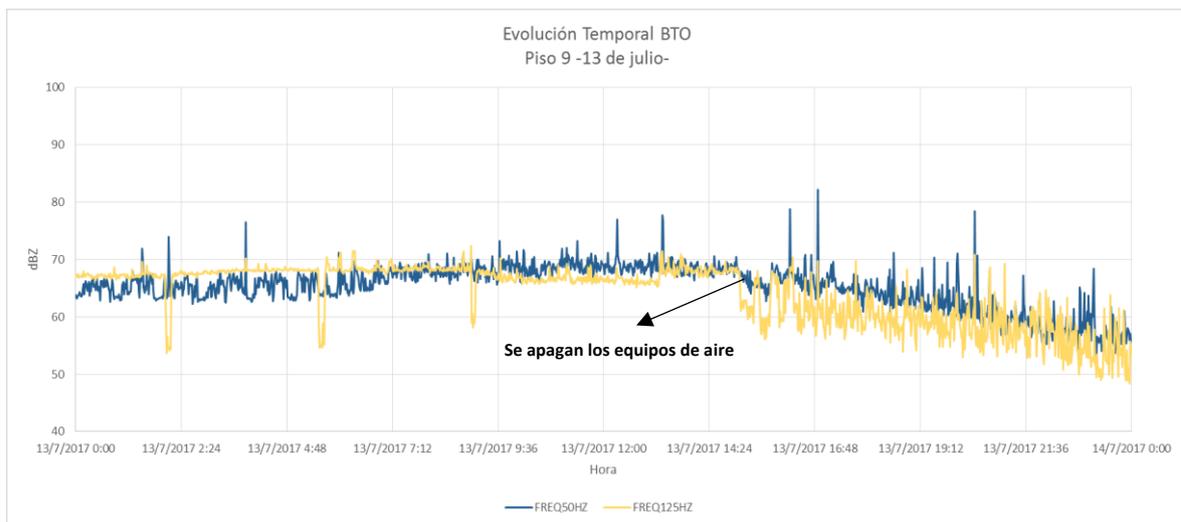


Figura 3-32. Evolución Temporal de Lp en BTO. Equipos de aire. Gianoli et al. (2017).

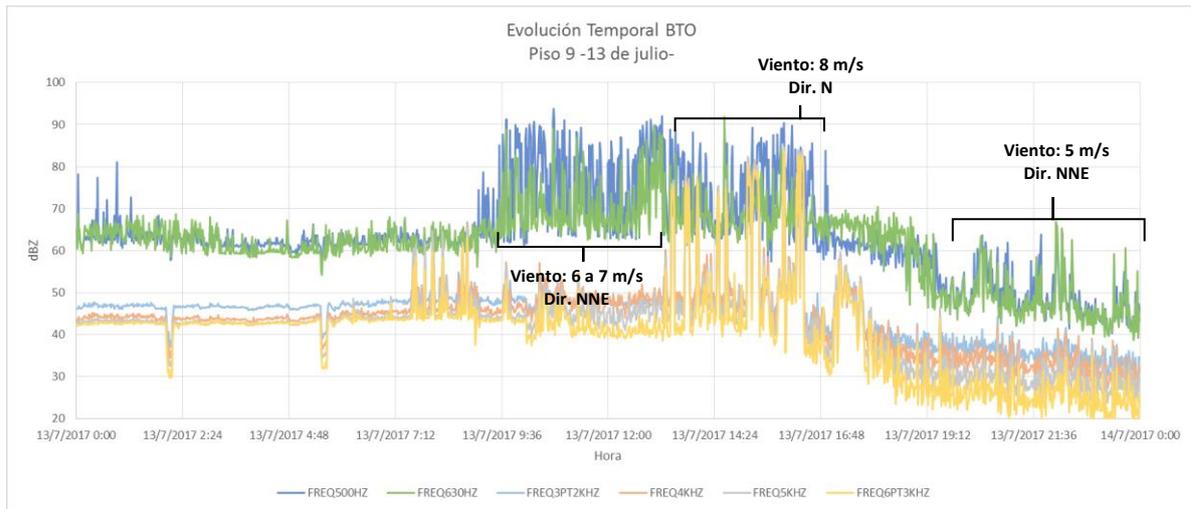


Figura 3-33. Evolución Temporal de L_p en BTO. Evento de ruido. Gianoli et al. (2017).

En el gráfico de la Figura 3-34 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 momento la Estación Meteorológica de Carrasco registró una velocidad de viento cercana a los 4 m/s con dirección OSO la cual fue rotando, hasta posicionarse de dirección S alrededor de las 5:00 horas. Durante todo el día la dirección predominante del viento fue del S y SE. Es decir que en estas situaciones no se registraron eventos que pudieran dar lugar a un ruido que se pudiera percibir.

En dicho gráfico se puede observar claramente que el evento 1 (barras azules) presenta elevados niveles (entre 75 y 85 dBZ) en las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz (momento en el cual el viento presentaba una dirección del NNE y velocidad de 6 a 7 m/s). Por otro lado, cuando la dirección del viento cambia, dirección del N con velocidad de 8 m/s, se observa un leve descenso en los niveles de 500 y 630 Hz y un aumento considerable en los niveles de las frecuencias más altas (lo que explicaría el ruido más agudo).

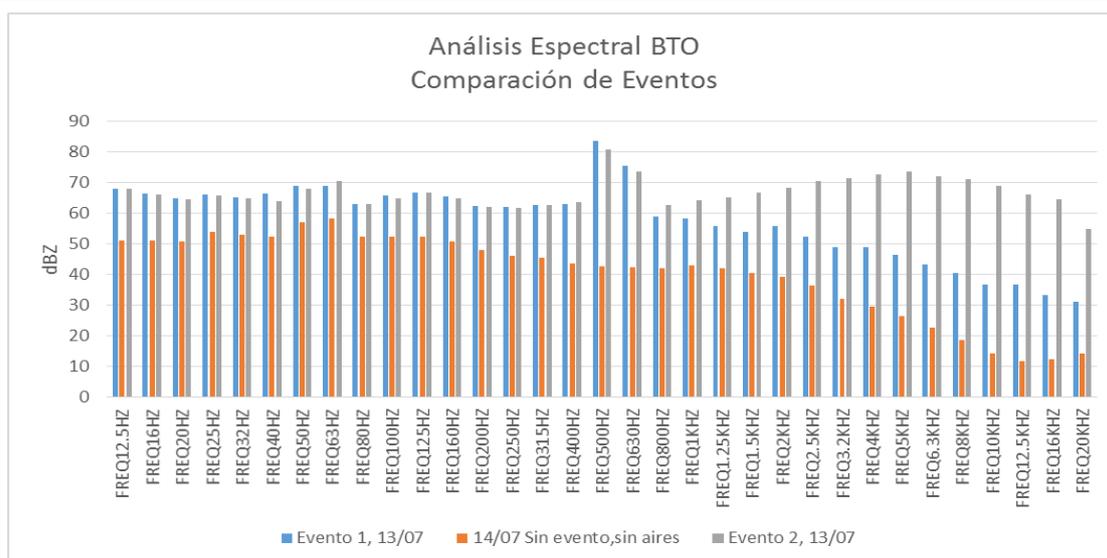


Figura 3-34. Análisis espectral en BTO. Comparación de eventos, 13 de julio. Gianoli et al. (2017)

Tabla 3-13. Principales parámetros registrados en los diferentes eventos de ruido 13 de julio. Gianoli et al. (2017)

13 de julio 2017	Evento 1	Evento 2	14 de julio (base)
L_{Aeq} (dBA)	81.2	83.2	51.7
L₁₀ (dBA)	88.6	88.6	55
L₉₀ (dBA)	66	66	41.3
L₁₀-L₉₀	22.6	22.6	14
L_{AFMax} (dBA)	97.8	97.4	71
L_{AFMin} (dBA)	64.4	55.7	35.3
Tono (f,Hz)	500 Hz	500 Hz	---
Caract. Del Viento	Vel. 6 a 7 m/s Dir. NNE	Vel. 8 m/s Dir. N	Vel. 4 m/s Dir. S y SE

3.3.3.3 Evento del 15 de julio

A continuación, se presenta un análisis del día 15 de julio, en el cual nuevamente aparece el evento de ruido. En el gráfico de la Figura 3-35 se presenta la evolución temporal de los niveles de presión sonora en escala A, nuevamente se observa el comportamiento continuo de niveles de fondo debido a los equipos de aire acondicionado. En este día el evento se “dispara” alrededor de las 10:00 horas, en ese momento la estación meteorológica del Aeropuerto de Carrasco marcaba una velocidad de viento de 7,9 m/s con una dirección del NNE. Observando dicho gráfico se tiene que en el correr del día se generan dos eventos de ruido.

El gráfico de la Figura 3-36, se muestra nuevamente como las componentes espectrales de frecuencias de 500 Hz, 630 Hz, 3.2 kHz, 4 kHz, 5 kHz y 6.3 kHz van tomando cierto protagonismo para diferente comportamiento del viento (tanto dirección como velocidad). Durante el primer evento, el cual duró entre las 10:00 horas hasta las 15:00 horas, el viento presentó dirección NNE con velocidades en el entorno a los 5 m/s. A partir de las 15:00 horas el viento comenzó a rotar hasta tener una dirección SO, o sea,

prácticamente perpendicular a los parasoles del edificio. Luego a partir de las 18:00 horas se instala en esa dirección y aumenta su velocidad a unos 8,7 m/s, nuevamente en esta condición, las frecuencias que toman “protagonismo” son las bandas de 500 Hz y 630 Hz.

Se debe mencionar, además, que en la madrugada del día 15 de julio el viento presentaba una dirección del E al SE con velocidades a los 5 m/s, por lo que en ningún momento se “disparó” el evento de ruido.

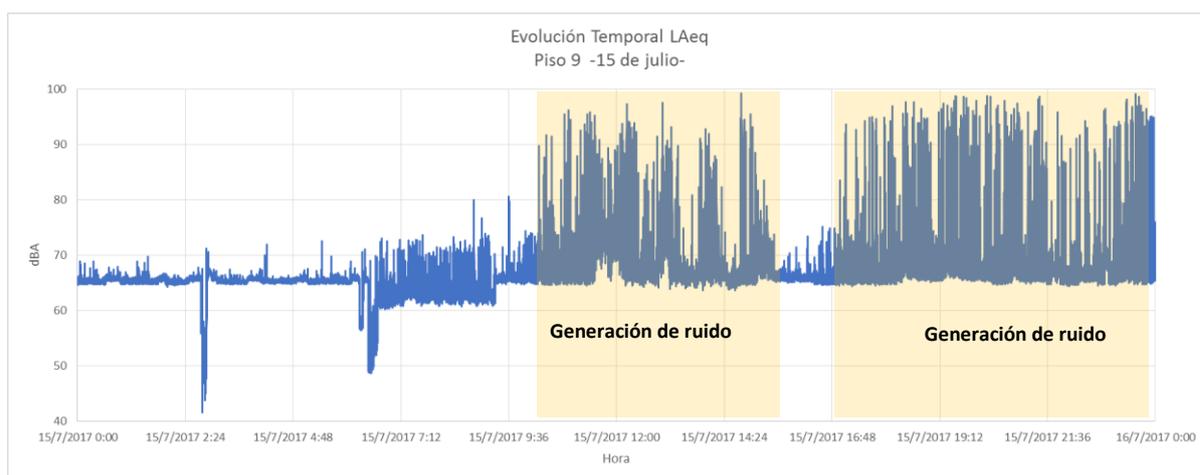


Figura 3-35. Evolución temporal de L_{Aeq} , 15 de julio. Gianoli et al. (2017)

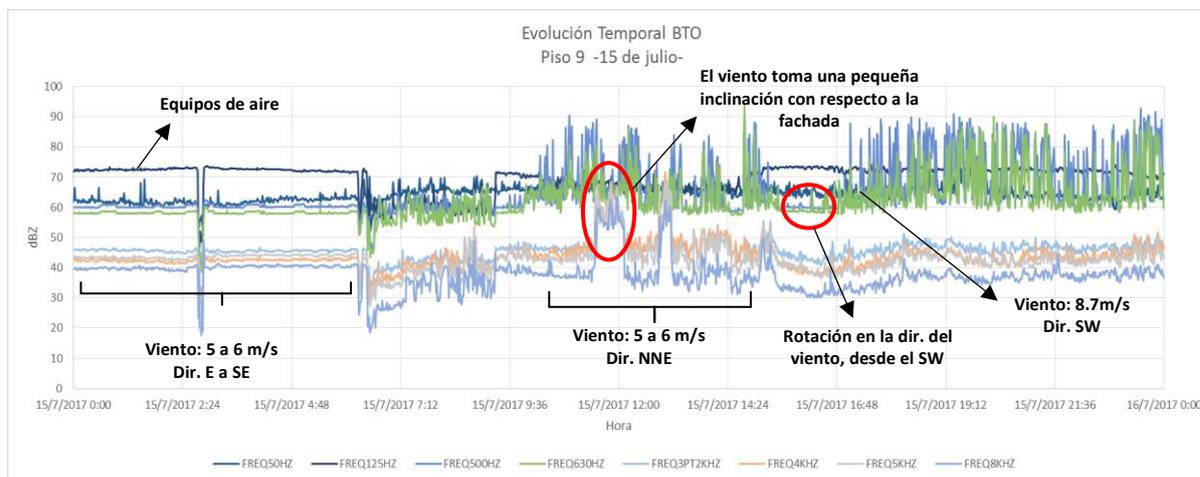


Figura 3-36. Evolución temporal de L_p en BTO, 15 de julio. Gianoli et al. (2017)

En el gráfico de la Figura 3-37 se presenta el análisis espectral del evento del 15 de julio, comparado con la situación de base del 14 de julio. Como se indica el dicho gráfico, se puede ver el tono en 500 Hz y el elevado nivel sonoro en la banda de 630 Hz.

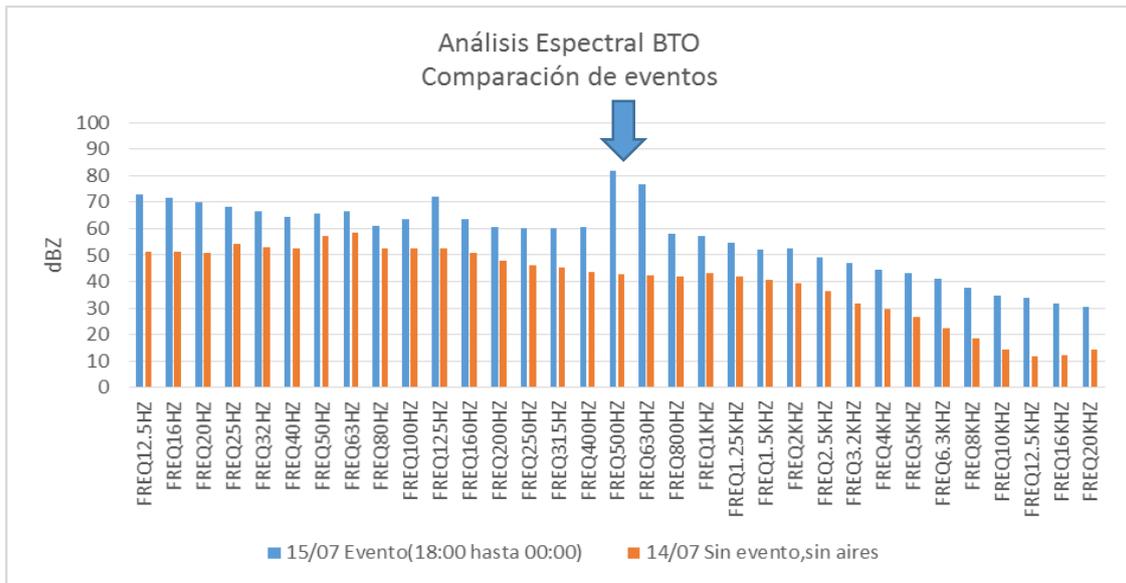


Figura 3-37. Análisis espectral en BTO. Comparación de eventos, 15 de julio. Gianoli et al. (2017)

15 de julio 2017	Evento	14 de julio (base)
L_{Aeq} (dBA)	80.2	51.7
L₁₀ (dBA)	74.9	55
L₉₀ (dBA)	65.4	41.3
L₁₀-L₉₀	9.5	14
L_{AFMax} (dBA)	99.1	71
L_{AFMin} (dBA)	64.4	35.3
Tono (f,Hz)	500 Hz	---
Caract. Del Viento	Vel. 8 a 8.7 m/s Dir. SW	Vel. 4 m/s Dir. S y SE

Tabla 3-14. Principales parámetros registrados en el evento de ruido del 15 de julio. Gianoli et al. (2017)

3.3.3.4 Evento del 16 de julio

Se presenta a continuación un evento particular el cual se generó el domingo 16 de julio, por lo que no existe en ningún momento ruidos provenientes de la obra. Durante toda la jornada el viento predominante fue de dirección O, con algunos leves cambios de dirección (rotación de la dirección del viento del NNO y N hasta el mediodía) y con velocidades que alcanzaron los 9,2 m/s en la estación Carrasco. El evento de ruido se generó de manera intermitente pero constante durante todo el día. En el gráfico de la Figura 3-38 se presenta la evolución temporal de los niveles de presión sonora en escala A, mientras que en la Figura 3-39 se presenta la evolución temporal en las bandas analizadas anteriormente. Nuevamente las frecuencias que tomaron “protagonismo” para esta jornada de medición fueron las bandas de 500 Hz y 630 Hz.

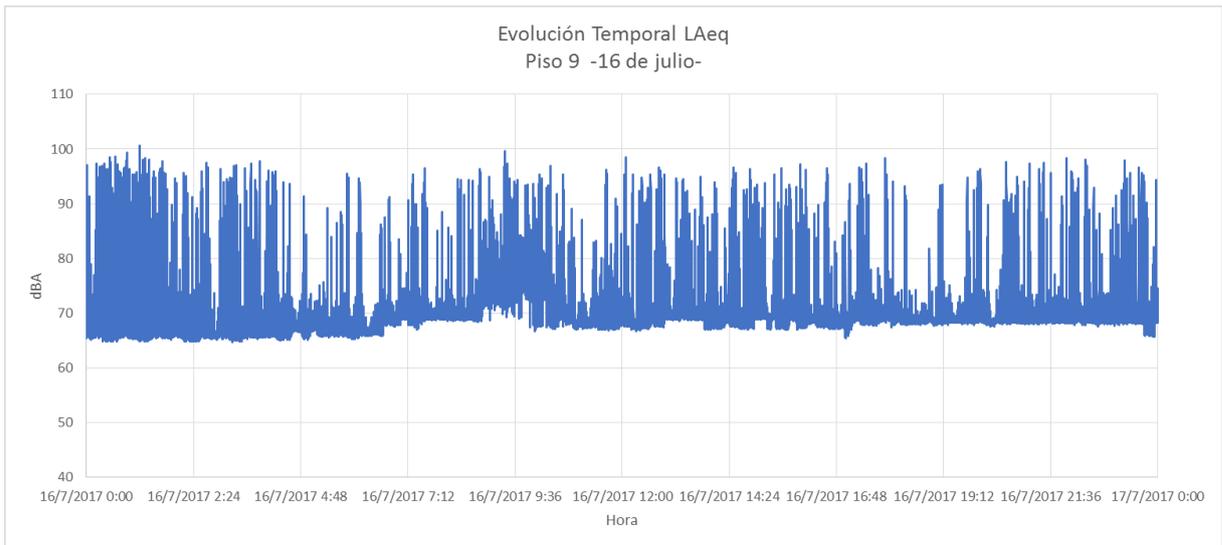


Figura 3-38. Evolución temporal de L_{Aeq} , 16 de julio. Gianoli et al. (2017)

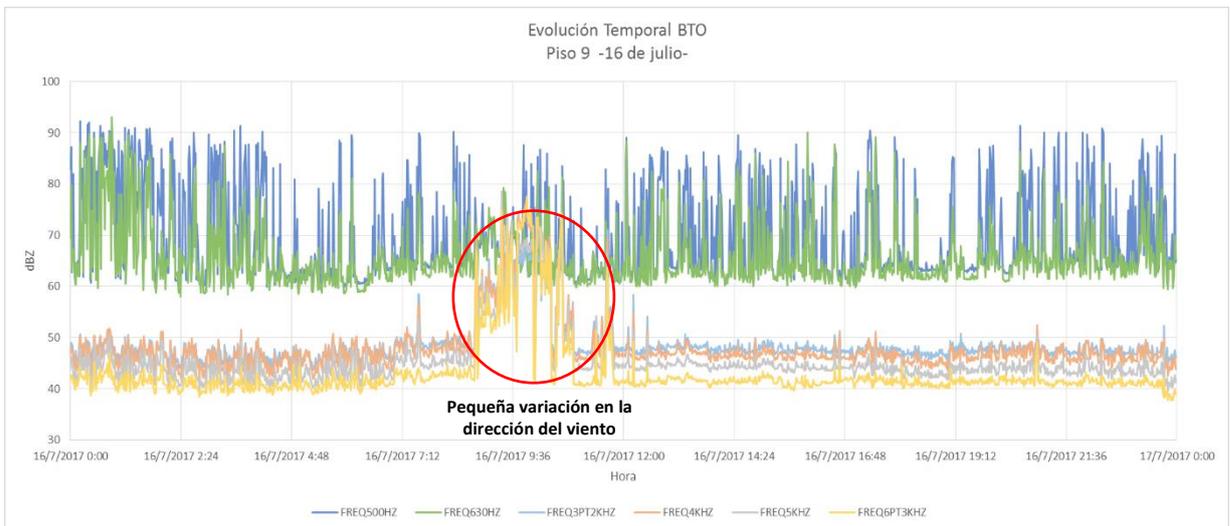


Figura 3-39. Evolución Temporal BTO, 16 de julio. Gianoli et al. (2017)

En el gráfico de la Figura 3-40 se presenta un análisis espectral de los dos eventos de ruido generados el domingo 16 de julio, los mismos se comparan con un periodo de tiempo registrado el día 14 de julio donde no hubieron otras fuentes de ruido (ni de obra, ni de aire acondicionado).

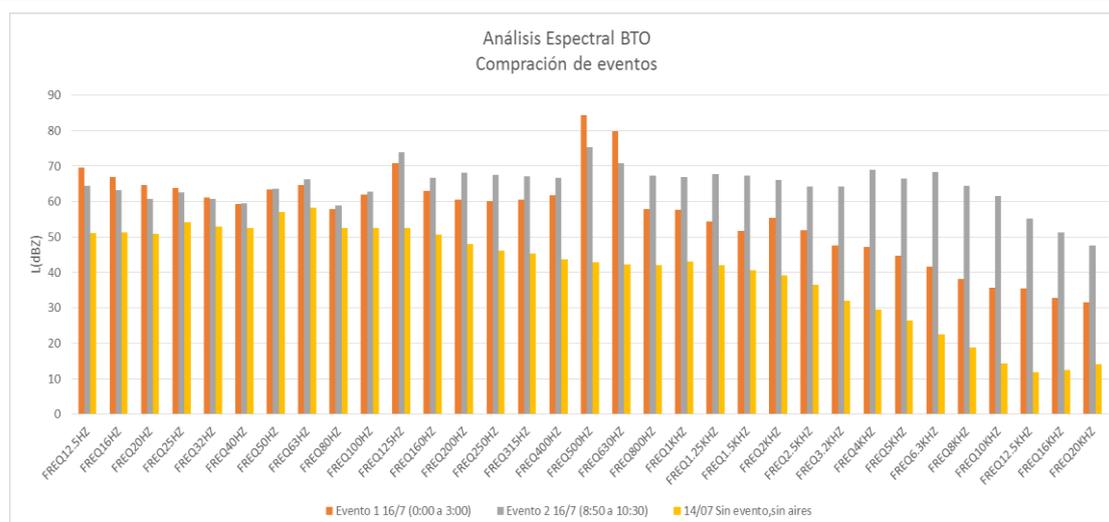


Figura 3-40. Análisis espectral comparativo en BTO, evento del 16 de julio. Gianoli et al. (2017)

16 de julio 2017	Evento 1	Evento 2	14 de julio (base)
L_{Aeq} (dBA)	82,9	79,5	51,7
L₁₀ (dBA)	86,5	81,3	55
L₉₀ (dBA)	66,5	69	41,3
L₁₀-L₉₀	20	12	14
L_{AFMax} (dBA)	100,7	99,7	71
L_{AFMin} (dBA)	64,8	66,7	35,3
Tono (f,Hz)	500 Hz	500 Hz 4kHz	---
Caract. Del Viento	Vel. 8,3 m/s Dir. 0	Vel. 5 m/s Dir. NN0 / N	Vel. 4 m/s Dir. S y SE

Tabla 3-15. Principales parámetros registrados en el evento de ruido del 16 de julio. Gianoli et al. (2017)

3.3.3.5 Mediciones en el estacionamiento del edificio

El segundo punto seleccionado fue sobre una garita en el estacionamiento del Hotel, el equipo se instaló el 24 de julio y permaneció allí una semana. Durante esa semana, según los datos registrados por la estación Meteorológica del Aeropuerto de Carrasco, los vientos predominantes fueron del S y SE por lo que los eventos de ruido no fueron muy frecuentes.

Se debe mencionar que la ubicación del equipo de medición no fue la óptima, ya que se ubicó a pocos metros de Av. De Las Américas, por lo que el ruido de tránsito es el principal contaminante acústico en esta campaña de medición. Es importante aclarar que fue el mejor lugar encontrado sobre planta baja, tanto por la seguridad del equipo como por proximidad de la fachada principal.

El análisis de estas mediciones se basó en la experiencia obtenida en la medición anterior, en el piso 9; dadas las condiciones ambientales de esa semana y al no haber un operario en todo momento en el punto de medición e identificar si el evento de ruido efectivamente se generó o no.

Durante la medición puntual realizada en la noche del 28 de julio en el piso 9, momento en el cual se estaba generando levemente y en forma intermitente el evento de ruido (dirección de viento NNE) se logró registrar la velocidad del viento sobre esa planta, siendo esta al momento de cada emisión de 5 m/s o superior. Por lo tanto, en cuanto a la velocidad, se puede decir que para velocidades de viento aproximadamente a 5 m/s sobre los niveles más altos, el evento de emisión de ruido se genera.

Se destaca que, durante las mediciones realizadas, las componentes espectrales identificadas que aportarían en la producción de una emisión acústica que se percibiría presentaron siempre la misma frecuencia, es decir de entre 500 Hz y 630 Hz y entre 3.2 kHz y 6 kHz. Este peculiar comportamiento llevaría a concluir que el ruido que se percibe es debido a la vibración de un resonador acústico. Es de señalar que las frecuencias de las componentes espectrales detectadas resulta próximas a la frecuencia de resonancia de los diferentes tubos identificados sobre la fachada del edificio.

Para que un resonador se active, debería ser excitado, es decir que debería aparecer un proceso oscilatorio que presente una componente espectral que aporte la suficiente energía en la frecuencia propia del resonador. Es de destacar que como consecuencia de la interacción entre los parasoles de vidrio y el viento se produciría vibraciones en el flujo con la frecuencia del resonador.

En base al resultado de las mediciones y a su análisis, se puede afirmar que las emisiones acústicas registradas en el edificio serían debidas a la interacción entre el flujo de viento y los parasoles ubicados en la fachada principal.

A partir de las posibles fuentes de emisión de ruido vinculadas a esta interacción se identificaron unas de tipo sincrónico y otras de tipo resonante. Las de tipo resonante, las cuales son percibidas en el lugar y fueron las identificadas en las mediciones, presentan una frecuencia constante al momento de establecerse las distintas condiciones de viento. 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, el primer grupo (frecuencias bajas a medias) está formado por 500 Hz y 630 Hz, y el segundo grupo (frecuencias altas o más agudas) conformado por las frecuencias de bandas de octava entre 3.2 kHz y 6.3 kHz.

Fueron registrados altos niveles de presión sonora al momento de ocurrir el evento, por ejemplo para la condición de viento con dirección del NNO y velocidad 8 m/s (29 km/h) se registraron niveles de 83 dBA en el piso 9, siendo esta energía suficiente para que se perciba, al menos en planta baja, con una alta intensidad.

Dados estos resultados, las medidas de mitigación se orientarán en eliminar al resonador y/o al excitador.

3.3.5 Medidas de mitigación propuestas

Las medidas de mitigación que se proponen se orientan a modificar, en principio en forma alternativa, el resonador y el excitador.

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 las tres zonas identificadas en la Figura 3-29, es decir en la zona de la viga superior y en las zonas laterales del piso 9.

A los efectos de modificar el excitador se podría instalar un generador de vorticidad sobre el borde exterior de cada placa de vidrio. 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. En la Figura 3-42 se presenta un esquema de esta solución.

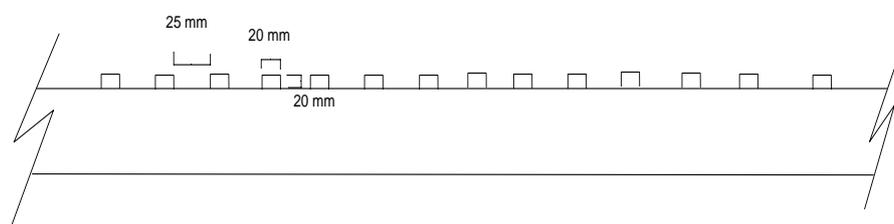


Figura 3-42. Diseño del generador de vorticidad propuesto. Gianoli et al. (2017)

La primera medida de mitigación fue implementada y evaluada a través de nuevos registros en el piso 9. Para ello se colocó un acrílico entre un 50 % y 60 % de la abertura de dicha planta. Con esta medida se buscó obturar la entrada de la señal al tubo. Según las mediciones realizadas con la primera medida de mitigación recomendada, se identificó un descenso de los niveles sonoros provocados por la interacción viento-parasoles, especialmente para direcciones de viento provenientes desde el rango **N** al **OSO**. Para este rango mencionado, no se encontró la presencia de las altas frecuencias, entre 3.2 kHz y 6 kHz, las cuales eran responsables del ruido agudo que se generaba antes de la implementación de esta medida de mitigación. Sin embargo, para direcciones de viento del **SO** y **NNO** (direcciones de viento prácticamente paralelas a la fachada del edificio) y velocidades superiores a los 5 m/s, se percibieron y registraron niveles de presión sonora elevados en las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz, siendo estos perceptibles tanto en las habitaciones del edificio como en planta baja.

Dado que no se obtuvo el resultado esperado obturando la entrada de la señal fluctuante, se procedió a quitar los paneles de acrílico, para instalar los dispositivos generadores de vorticidad recomendados, tal cual se muestra en Figura 3-43. Los mismos fueron ubicados en la totalidad del piso 9 en la zona de la viga superior.



Figura 3-43. Dispositivos de vorticidad instalados en el piso 9. Gianoli et al. (2017)

3.3.5.1 Verificación de la medida implementada

A fines del mes de octubre se procedió a instalar el sonómetro Casella en el obrador ubicado en planta bajo del edificio, ubicando el micrófono a 6 metros de altura. En este periodo de tiempo los dispositivos generadores de vorticidad se encontraban instalados en la totalidad del piso 9 y sobre la viga superior. El equipo permaneció instalado en ese lugar durante 10 días. Durante esta campaña de medición se encontraron varios momentos en los cuales el viento predominante fue de direcciones de interés.

Durante el primer día de registro, el viento predominante fue del N al NNE (prácticamente paralelo a la fachada) hasta aproximadamente las 15 horas. El periodo de tiempo que abarca, desde la instalación del equipo (9:30 AM) hasta las 15 horas, no se registraron indicios de la aparición del fenómeno. En dicho periodo de tiempo las velocidades de viento apenas superaron los 5 m/s. A continuación se presenta la evolución temporal en bandas de octavas críticas para ese día.

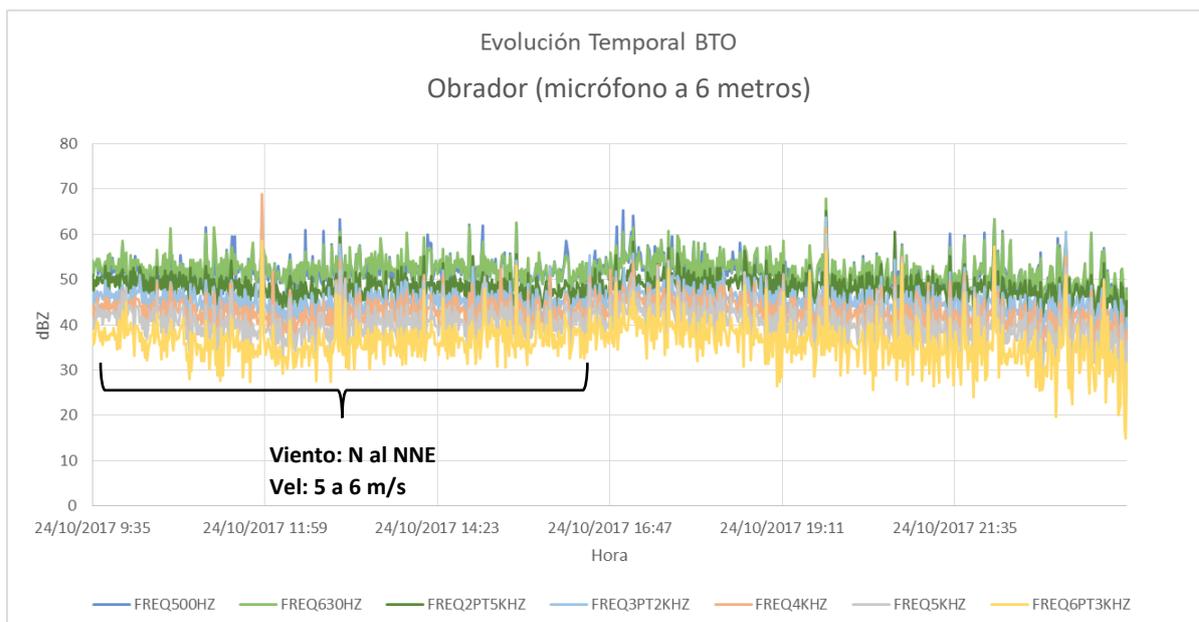


Figura 3-44. Evolución temporal BTO de interés. Casella en planta baja. Gianoli et al. (2017)

Se presenta la evolución temporal del nivel de presión sonora ponderada en escala A registrado. Se puede observar que los niveles se encuentran en una “franja” entre 50 y 70 dBA, la cual permanece constante durante todo el día. Se observan además unos picos de 80 a 90 dBA, los cuales, dada la ubicación del sonómetro, seguramente sean de ruido de tránsito o por la obra lindera al edificio.

No existe diferencia de niveles entre el periodo de tiempo en el cual el viento predominante fue del N al NNE, con el periodo de tiempo restante, en el cual el viento predominante fue de dirección E.

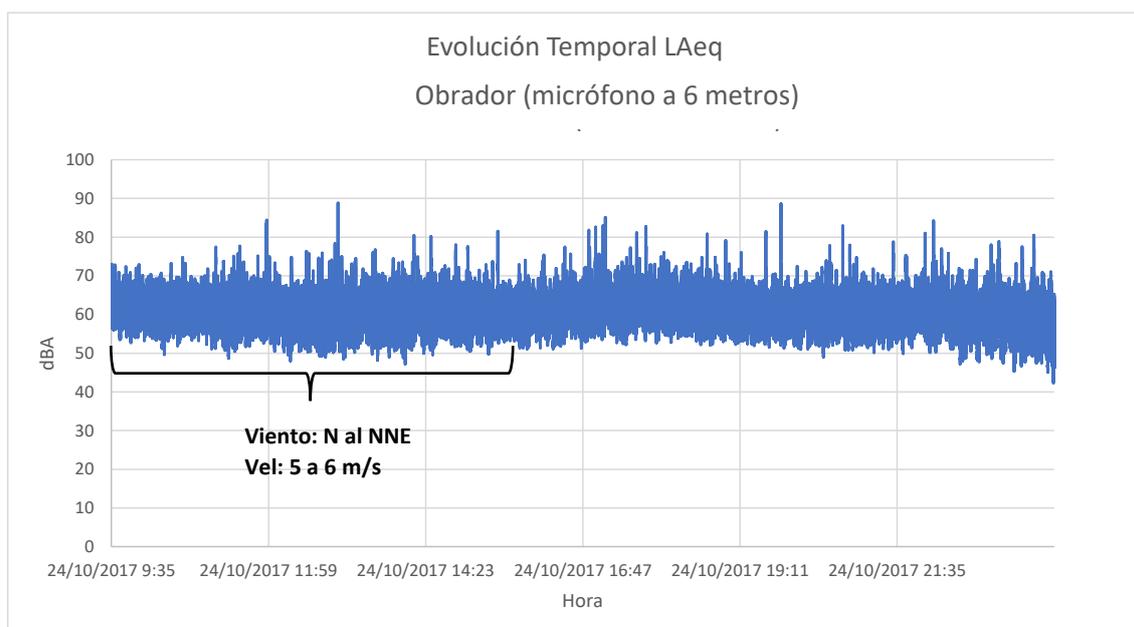


Figura 3-45. Evolución temporal de LAeq. Casella en planta baja. Gianoli et al. (2017)

Durante el mes de noviembre, el sonómetro Casella fue instalado en el piso 9. El objetivo principal era registrar si efectivamente el fenómeno generado entre el viento y los parasoles volvía a ocurrir luego de haber implementado la segunda medida de mitigación propuesta.

En esta semana se logró registrar algunos periodos de tiempo en los cuales se presentaron direcciones críticas con velocidades superiores a 5 m/s. Como se presentará a continuación, en el gráfico de la Figura 3-46, en ningún momento se identificó el fenómeno ocasionado por la interacción entre los parasoles y el viento.

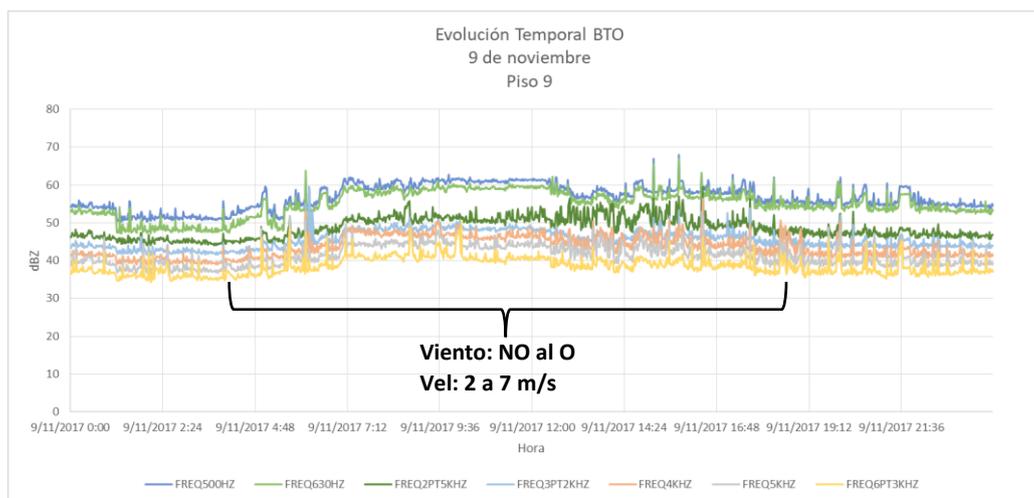


Figura 3-46. Evolución temporal BTO de interés. Casella en planta baja. Gianoli et al. (2017)

A continuación, se presenta la evolución temporal del registro tomado el 16 de julio, momento en que no había instalado sistema de mitigación alguno, en el piso 9, donde la dirección predominante de viento fue del O, con velocidades que en ese día alcanzaron los 9 m/s. Se puede ver la diferencia de niveles en las bandas de interés, mientras que para el registro del 16 de julio los niveles en las bandas de 500 Hz y 630 Hz alcanzaban los 90 dBZ, para la medición de noviembre los niveles sonoros en estas bandas apenas alcanzan los 65 dBZ. Es muy importante observar el comportamiento del gráfico en el registro del 16 de julio (Figura 3-47), donde efectivamente se generó el ruido durante todo el día, con niveles que alcanzaron los 83 dBA al momento del evento. En cambio, los niveles para las bandas de interés en el registro de noviembre se ven muy estables con un comportamiento distinto al de la medición del 16 de julio. Durante la jornada de medición el L_{Aeq} registrado fue de 65 dBA.

A continuación se presenta la comparación de las evoluciones temporales del L_{Aeq} para ambas campañas de medición. En dicha comparación, para vientos de direcciones similares y velocidades similares, se observa la presencia del ruido durante el 16 de julio, mientras que en el gráfico del 9 de noviembre no existen indicios del fenómeno, al menos no con las intensidades registradas en la campaña anterior.

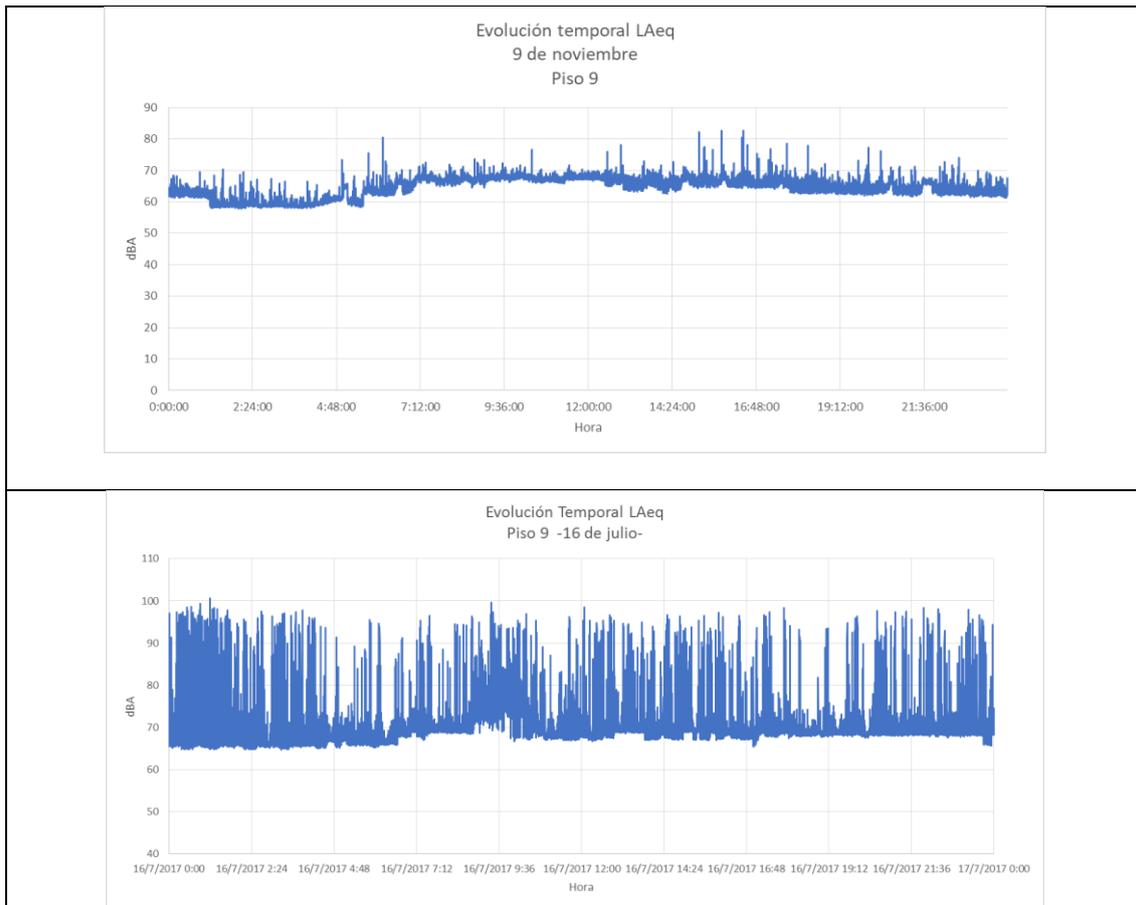


Figura 3-47. Comparación de L_{Aeq} antes y después de la medida de mitigación empleada en piso 9. Gianoli et al. (2017)

Una vez instalado el sistema de mitigación constituido por los generadores de vorticidad se llevaron adelante dos campañas de medición de nivel de presión sonora en dos sitios que fueron el piso 9 y el techo del obrador de la empresa constructora, ubicado a nivel de calle próximas al edificio.

Los ensayos de medición de niveles de presión sonora realizados una vez instalados los generadores de vorticidad permitieron constatar los siguientes resultados:

- En los dos sitios de medición se obtuvo un cambio en el patrón para las direcciones de vientos en las cuales se habían tenido emisiones acústicas como son entre NNE y SSO, pasando por el OESTE. Este cambio implicó que las componentes de 500 Hz, 630 Hz y 3.2 kHz a 6.3 kHz adoptaron una forma similar a las demás componentes espectrales.
- El nivel de energía registrado en las componentes espectrales 500 Hz, 630 Hz y 3.2 kHz a 6.3 kHz se redujeron en el orden de 30 dBZ, para velocidades de viento superiores a 5 m/s y direcciones de viento para las cuales se tenían emisiones acústicas.
- En los registros se observaron picos que se deben a otros emisores apartándose del comportamiento que presenta el ruido asociado al viento.

- Los niveles de presión sonora equivalente se redujeron sensiblemente si se los compara con la situación sin mitigación.

En base a estos resultados los generadores de vorticidad parecen haber actuado en forma efectiva como medida de mitigación de las emisiones acústicas que se tenían en el edificio. Hasta la fecha no se han reportado quejas relacionadas al fenómeno.

4 Líneas de trabajo a futuro

Se ha presentado un tema que en los últimos 10 años ha tenido una repercusión a nivel nacional como internacional, dados los diseños edilicios (o estructuras) desarrollados por los arquitectos en esta última década, ya sean con un objetivo estético o de confort. En algunos casos, se presenta un fenómeno aeroacústico el cual genera niveles de presión sonora elevados, ocasionando molestias en los entornos de dichas estructuras. Este fenómeno se instala debido al pasaje de viento entre intersticios de elementos que conforman las estructuras o en el pasaje del flujo de viento entre las estructuras mismas.

A partir de una revisión bibliográfica exhaustiva, se ha visto que el fenómeno aeroacústico está presente, pero no han sido muchos los autores e investigadores que han desarrollado e incursionado en el tema. Según lo desarrollado en este trabajo de Tesis, en algunos casos se ha modelado e identificado correctamente el fenómeno, pero en otros casos, a pesar de tener las herramientas para identificarlo, no se ha llegado a la caracterización correcta ni completa, y por lo tanto, las medidas de mitigación no han sido del todo efectivas.

Como fue comentado, el pionero en la disciplina de aeroacústica fue James Lighthill, el cual incursionó en el tema, alrededor de los años cincuenta. Su teoría se basa en una formulación de las ecuaciones de mecánicas de los fluidos como una ecuación de ondas en donde se identifican en las fuentes acústicas procesos no lineales. Dado que estas ecuaciones no han sido resueltas hasta el momento, es necesario conocer soluciones analíticas generales de la ecuación de Navier-Stokes. La analogía acústica que propone Lighthill facilita la resolución de la ecuación de onda, simplificando el tratamiento de los términos fuentes en dicha ecuación. Las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales gobiernan la dinámica de fluidos viscosos comprensibles, fueron reagrupadas por Lighthill en una ecuación de onda no homogénea, logrando así una conexión entre la Mecánica de Fluidos y la Acústica. En el capítulo 1.5.1 se presentaron dichas ecuaciones, su reagrupación y el resultado obtenido, el cual se denomina comúnmente “analogía de Lighthill”. Como línea de trabajo a futuro se propone un análisis de la ecuación de Lighthill y su resolución.

Se busca como objetivo estimar el sonido generado por un campo fluctuante, empleando para ello una metodología consistente. Se deberá caracterizar el campo fluctuante a partir de principios de la Mecánica de los Fluidos que no guarden relación con la propagación de perturbaciones acústicas en el medio y además se deberá estimar el sonido generado por dicho campo de flujo.

El Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental cuenta con las instalaciones adecuadas para ensayos en túnel de viento, con la capacidad de caracterizar los fenómenos que ocurren al momento del pasaje del flujo de viento por los elementos a estudiar. Además se cuenta con equipos de medición de niveles de presión sonora, siendo estos adecuados para estos estudios de precisión. Se propone como línea de trabajo a futuro, como tema de abordaje en mi Tesis Doctoral, desarrollar protocolos para el estudio en gabinete y para el procesamiento de datos obtenidos en ensayos en túnel de viento de diferentes accesorios que actualmente existen en plaza y que se utilizan en nuevas edificaciones.

Se propone además, una metodología de trabajo que permita evaluar el comportamiento del viento en la zona a construir una edificación o estructura, correlacionando estos datos con los materiales o accesorios a emplear para dicha construcción y evaluar si existe la probabilidad de que aparezcan fenómenos aeroacústicos.

Se han presentado varios casos que han preocupado a las autoridades locales y a los inversionistas de las obras edilicias a nivel nacional e internacional. En cuanto a nivel nacional, si se recorre la ciudad en muchas de las últimas construcciones se les han agregado elementos como pueden ser placas metálicas perforadas, sin ir más lejos, las nuevas Seccionales Policiales del país cuentan con este tipo de fachada; o perfiles rectangulares de vidrio, como los utilizados en el edificio de estudio del caso 2, o el edificio recientemente inaugurado sobre la Rambla República Argentina, los cuales son factibles a la generación de fenómenos aeroacústicos.

Se entiende que con este trabajo de Tesis de Maestría se ha recopilado información fundamental y además se cuenta con las herramientas suficientes como para profundizar en el tema en mi trabajo de Tesis Doctoral en Ingeniería Ambiental.

5 Referencias Bibliográficas

Argüelles Díaz. K.A, (2004). Ruido Aerodinámico tonal radiado por un ventilador axial en campo lejano: mecanismos de generación y propagación del mismo. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, España. Fuente: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle>

Public et al. (2016) “Wind tunnel acoustic testing of wind generated noise on building facade elements” Inter.noise: Hamurgo 2016

Cataldo, J (2016). Notas del curso de “Contaminación Atmosférica”.

Cataldo, J; Lisboa, Marcos; González, Elizabeth. “Análisis de emisiones acústicas en el edificio World Trade Center Free Zone”. Facultad de Ingeniería, Udelar. Montevideo, Uruguay, 2012.

Chanaud (1970). “Aerodynamic whistles”

Coppa, F. and Paduano, C. (2015) “Design Process to Evaluate Potential of Wind Noise at Façade Elements”, EuroNoise 2015, Maastricht

Counihan. “Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel”, y Atmos. Environ., 7 (1973) 673-689.

Facultad de Ciencias y Matemáticas de la Universidad de Chile. “Capa de Ekman” (Fuente: <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/>)

Fricke H.W (2010) “Criteria for façade element testing”

Gianoli P. (2015) “Obtención del Espectro Sonoro de vientos de diferente velocidad, para aplicaciones Ambientales”. Programa ANII de Becas de Iniciación a la Investigación.

Gianoli P. et al. (2017). “Análisis de emisiones acústicas en el edificio Hotel Hampton by Hilton”

Gianoli P. et al. (2017). “Análisis de medidas de mitigación en el edificio Hotel Hampton by Hilton”

González, A.E. (2008); Indarte Bonifacino, E.; Lisboa, M.R. Acústica Urbana Módulo II, Convenio MVOTMA-Udelar “Acústica Urbana Módulo II”.

González, A.E, (2012) “Contaminación sonora y derechos humanos”

Hernández et al. (2016) “Estudio de factibilidad de modificación de un túnel de viento para análisis aeroacústicos” Ingeniería Aeronáutica, Bogotá

Holmes, J (2007). Wind Loading of Structures. Second Edition.

Howe, M.S. “Theory of vortex sound”, Cambridge University Press, 2003.

xLaratro, et al. (2017) “Self-noise and directivity of simple airfoils during stall:

An experimental comparison”

Lesieur (1997) “Turbulence in Fluids”

Lighthill, M.J. (1952). «On Sound Generated Aerodynamically II. Turbulence as a Source of Sound».

Maggiolo, D.(2004). Apuntes de acústica. (Fuente:
<http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/prp.html>)

Mitchell, A., Leclercq, D., Stead, M. (2010). “Control of Aeolian Noise Generated by the Finned Balustrade of a Freeway Pedestrian Overpass”, Noise notes, Vol 9(4), pp. 35-48

Moloney, D., Peoples, D. and Mantophani, H. (2010) “Testing and Assessment of Wind Noise around Buildings”, AWES Workshop, Canberra

ORGIMET. Datos de velocidad y dirección de viento en Montevideo. Extraído de:
<https://www.ogimet.com/gsodc.phtml>.

Parrales, M. Ángel. “Fundamentos de la Acústica lineal”. (e-Reding⁸ Universidad de Sevilla) (Fuente:<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70206/fichero/4+-+Cap%C3%ADtulo+2.pdf>)

Rodríguez et al. (2010) “Análisis del comportamiento dinámico de vigas de vidrio laminado”

Rofail y Tonin (2000).“An exploration of wind-noise in buildings”

Schlichting (1968), “Boundary Layer Theory”

Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1986) “Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering”.

Tan et al. (2003) “Sources of acoustic resonance generated by flow around a long rectangular plate in a duct”

Universidad de Valladolid, España. “Introducción al Movimiento Turbulento”. Notas de curso de Mecánica de los Fluidos.

⁸ e-REdING, elaborado por la Biblioteca de Ingeniería que recoge trabajos académicos (proyectos fin de carrera, fin de máster, etc.) presentados en la ETSI de la Universidad de Sevilla desde 1972 y que da acceso al texto completo en formato electrónico de la mayor parte de los defendidos desde 2001.