

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE MODIFICACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO
PARA ANÁLISIS AEROACÚSTICOS**

BRYAM STIVEN PATIÑO RINCON

JUAN PABLO ARIAS HERNANDEZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

BOGOTÁ D.C.

Agosto 2016.

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE MODIFICACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO
PARA ANÁLISIS AEROACÚSTICOS**

BRYAM STIVEN PATIÑO RINCON

JUAN PABLO ARIAS HERNANDEZ

Informe del Trabajo de Grado

Director

JOHN JAIRO VACA RIOS

FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ D.C.

2016

Dedicatoria

Bryam Patiño

Dedico este trabajo de grado, a Dios. A todos aquellos que me brindaron su apoyo, tiempo y conocimiento para que esto fuera posible. A mis padres quienes sin importar las circunstancias siempre me apoyaron, mi novia María, que siempre fue comprensiva y fuente de motivación.

Juan Pablo Arias

Dedico este trabajo de grado a mi padre Neiro Arias quien siempre me apoya incondicionalmente y me da fuerzas para cumplir todas mis metas.

Agradecimientos

Bryam Patiño

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por sus consejos, sus valores, por su incondicional apoyo y amor.

Al ingeniero John Jairo Vaca, por la orientación y ayuda que nos brindó, por su apoyo y amistad que fueron fundamentales para la realización de este proyecto.

Juan Pablo Arias

Al Ingeniero John Jairo Vaca director del presente trabajo de grado, por su esfuerzo y dedicación, quien con su experiencia, conocimientos y su motivación han logrado terminar con éxito este proyecto.

Resumen

El presente trabajo de grado realiza el análisis de factibilidad de modificación de túneles de viento teniendo como referencia el de la Fundación Universitaria los Libertadores mediante la implementación de diferentes dispositivos y una serie de adecuaciones requeridas para poder realizar estudios aeroacústicos en su interior.

El primer capítulo refiere a la dinámica de fluidos, principios básicos y su participación en el ámbito aeronáutico. El segundo capítulo describe el estado del arte de los túneles de viento, teniendo en cuenta sus componentes, clasificación y caracterizando el túnel de viento de la Fundación Universitaria los Libertadores, además de la referencia encontrada de túneles de viento que cuentan con características para el desarrollo de estudios aeroacústicos en diversas partes del mundo. El tercer capítulo trata sobre la aeroacústica, los principios básicos, la importancia de su estudio y su aplicación en el campo aeronáutico. Por último, en el cuarto capítulo planteamos las modificaciones requeridas para poder implementar las herramientas deseadas para realizar los análisis aeroacústicos y se muestran los costos de materiales y mano obra necesarios en el desarrollo del proyecto.

Las referencias analizadas permiten concluir la viabilidad de la modificación del túnel de viento, mediante las enmiendas propuestas en el texto ya que con ellas se da cumplimiento a los requisitos mínimos de normatividad en el campo aeroacústico internacional.

Abstract

This final project for graduation makes the feasibility analysis of wind tunnels modification having as reference the *University Foundation Los Libertadores* one by implementing different devices and a number of adjustments required to perform Aeroacoustics studies inside.

The first chapter relates to fluid dynamics, basic principles and their participation in the aviation field. The second chapter describes the state of the art of wind tunnels, considering its components, sorting and the description of the wind tunnel at the *University Foundation Los Libertadores*, in addition to the found reference of wind tunnels that have features for the development of aeroacoustics studies in some parts of the world. The third chapter deals aeroacoustics, the basic principles, the importance of its study, and its application in the aeronautical field. Finally, in the fourth chapter we propose the modifications demanded to implement the required tools to perform the aeroacoustics analysis and the amount of materials and workforce necessary in the project.

The references analyzed can let us conclude the feasibility of modifying the wind tunnel, through the proposed amendments in the document inasmuch as with them is fulfilled the minimum standards in the international aero-acoustic field.

Tabla de Contenido

Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
1. Capítulo Dinámica de Fluidos	20
1.1. Teoría de capa limite.....	20
1.1.1. Flujo laminar y turbulento.	21
1.1.2. Parámetros para similaridad.....	22
1.2. Numero de Reynolds.....	23
1.3. Numero Mach	24
1.4. Numero de Froude	25
2. Capítulo Túnel de viento.....	26
2.1. Funcionamiento de un túnel de viento	26
2.2. Clasificación del túnel viento por tipo de circuito	26
2.2.1. Túnel de viento de circuito cerrado.	27
2.2.2. Túnel de viento de circuito abierto.	28
2.2.3. Clasificación de túnel de viento por velocidad de operación	31
2.3. Túneles de viento referente.....	31
2.3.1. Túnel de viento aeroacústico de la universidad de Stuttgart.....	31
2.3.2. Túnel de viento a escala real de Mitsubishi Motors.	33
2.3.3. Túnel de viento de FCAAP (Florida Center For Advanced-Aero Propulsion).	35
2.4. Túnel de viento de la Fundación Universitaria los libertadores	35

2.4.1.	Túnel de viento modelo m01-125-140m.....	35
3.	Capítulo Aero Acústica.....	38
3.1.	Propagación de sonido	39
3.2.	Longitud de onda, fase y frecuencia	40
3.3.	Magnitudes del sonido	41
3.3.1.	Amplitud (A).....	41
3.3.2.	Velocidad de propagación.....	41
3.3.3.	Impedancia acústica	43
3.3.4.	Intensidad acústica	44
3.3.5.	Presión sonora o acústica	46
3.3.6.	Tono	47
3.3.7.	Timbre.....	47
3.4.	Tipos de ruidos acústicos	49
3.4.1.	Clasificación en función del tiempo	49
3.4.2.	Clasificación en función de la frecuencia	49
3.5.	Fuentes de ruido de los aviones	54
3.6.	Fenómenos de las mediciones acústicas en túneles de viento	55
3.7.	Efectos en las ondas acústicas.....	56
3.7.1.	Ensanchamiento espectral.....	56
3.7.2.	Distorsión de frecuencias.....	57
3.8.	Disminución de niveles de ruido.....	57
3.8.1.	Absorción acústica	57

3.8.2.	Aislamiento acústico.....	58
3.9.	Cámara Anecoica:.....	60
3.9.1.	Acondicionamiento acústico de la sala.....	63
3.9.2.	Acondicionamiento acústico paredes.....	63
3.9.3.	Aislamiento en la ventilación.....	64
3.10.	Cámara semianecoica.....	64
3.10.1.	Criterios de diseño	64
3.10.2.	Especificaciones para el diseño de cámara semi-anecoica	66
3.10.3.	Aislamiento total o pérdida de transmisión sonora.....	72
3.10.4.	Modelos de tratamientos absorbentes	75
4.	Capítulo Modificaciones acústicas propuestas	78
4.1.	Micrófonos.....	78
4.1.1.	Tipos de micrófonos	78
4.1.2.	Ubicación de los micrófonos	81
4.1.3.	Método de ubicación LADA (Large Aperture Directional Array)	84
4.1.4.	Método de ubicación SADA (Small Aperture Directional Array)	87
4.2.	Materiales de Absorción acústica	89
4.2.1.	Materiales compuestos.....	89
4.2.2.	Materiales de uso cotidiano	92
4.3.	Materiales de aislamiento acústico	93
4.3.1.	Materiales compuestos:.....	94
4.4.	Cámara semianecoica.....	97

4.4.1.	Selección de materiales para aislamiento acústico de la cámara	98
4.4.2.	Diseño de la cuña para el acondicionamiento acústico.....	99
4.4.3.	Puerta	101
4.4.4.	Análisis de la cámara semianecoica mediante la teoría estadística	103
4.4.5.	Calculo de superficies de la cámara semianecoica	104
4.4.6.	Tiempo de reverberación en bandas de octava	105
4.4.7.	Iluminación	108
4.4.8.	Temperatura y humedad	110
4.5.	Sistema de adquisición y análisis de datos	110
4.5.1.	Arquitectura del sistema de National Instrument.....	110
4.5.2.	Sistema Brüel & Kjær.....	111
4.6.	Costos.....	114
4.6.1.	Costo de los materiales que componen la puerta de la cámara.....	114
4.6.2.	Costos de los materiales para el acondicionamiento acústico	115
4.6.3.	Materiales para aislamiento acústico	116
4.6.4.	Micrófonos.....	118
4.6.5.	Mano de obra	119
4.7.	Costo/beneficio	121
4.8.	Conclusiones.....	122
4.8.1.	Recomendaciones	124
5.	Referencias.....	125

Lista de tablas

<i>Tabla 1: Principales características de las dos clases de túnel de viento.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2. Clasificación de los túneles de viento en base a la velocidad de operación.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3 Características del túnel de viendo de Mitsubishi Motor.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4 Velocidad de propagación del sonido</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5 : Impedancia característica de distintos elementos</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 6 Ejemplos de valores sonoros y sus efectos en el organismo.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 7 Frecuencias criticas de distintos materiales.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 8 Densidades superficiales del sistema de aislamiento.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 9 Aislamiento total en distintas frecuencias</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 10 Caracterización de micrófonos y accesorios Brüel & Kjør.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 11 Listado de micrófonos de la compañía MEMS.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 12 Coordenadas de ubicación de los micrófonos normal ISO 3745.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 13 Coordenadas de ubicación de los micrófonos sistema LADA.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 14 Coordenadas de los micrófonos, sistema SADA.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 15 Tabla de desempeño acústico material Fiber Sound.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 16 Coeficientes de absorción de diferentes materiales</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 17 Características técnicas de materiales aislantes.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 18 Coeficientes de absorción de sonido por bandas de octava de los materiales de la puerta interior.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 19 Coeficiente de absorción y tiempo de reverberación de los componentes y superficie de la sala.....</i>	<i>106</i>

<i>Tabla 20 Tiempo de reverberación en bandas de octava</i>	107
<i>Tabla 21 Costos de materiales para elaboración de la puerta</i>	115
<i>Tabla 22 Costos de materiales para el acondicionamiento acústico</i>	116
<i>Tabla 23 Costo de los materiales para aislamiento acústico</i>	116
<i>Tabla 24 Costo del sistema de National Instrument</i>	117
<i>Tabla 25 Costo del sistema de adquisición de datos Brüel & Kjaer</i>	118
<i>Tabla 26 Precio de Micrófonos</i>	119
<i>Tabla 27 Mano de obra</i>	119
<i>Tabla 28 Empresas y materiales para adquisición de artículos</i>	120

Lista de figuras

<i>Figura 1</i> Diagrama de velocidades (Ramos, 2010)	20
<i>Figura 2</i> Cinemática del flujo laminar y turbulento (Ramos, 2010).	22
<i>Figura 3</i> Configuración típica del túnel de viento de ciclo cerrado (Barlow, 1999).....	27
<i>Figura 4</i> Configuración de túnel de viento de circuito abierto (Farrarons, 2010).....	29
<i>Figura 5</i> Sección de prueba del túnel de viento (Mercedes-Benz, 2016).....	31
<i>Figura 6</i> Cabina de supresión de ruido exterior (Fram, 2016).	33
<i>Figura 7</i> Vista CAD de la instalación del túnel de viento (Mitsubishi, 2006)	34
<i>Figura 8</i> Diseño CAD del Túnel de Viento de la Fundación Universitaria los Libertadores. Autoría propia	37
<i>Figura 9</i> Túnel de Viento modelo M01-125-140M (Correa, 2010)	37
<i>Figura 10</i> Vibraciones de las partículas “P” alrededor de su posición de equilibrio en un tiempo t_0 (Sarma, 1975).....	39
<i>Figura 11</i> Variaciones de presión en el aire (condensación y rarefacción) en el caso de un movimiento armónico simple. (Maggiolo, 2016)	39
<i>Figura 12</i> Relación entre la longitud de onda y la frecuencia. (Istvan, 1992) (Onda de Sonido, 2011)	40
<i>Figura 13</i> Representación de la distribución de energía de una onda sonora en una superficie (Onda de Sonido, 2011).	41
<i>Figura 14</i> Diferenciación en el timbre de distintas ondas. (G. Rodriguez, 2011).....	48
<i>Figura 15</i> Representación del ruido blanco y rosa (Kinsler, 1995).....	51
<i>Figura 16:</i> Principales fuentes de ruido proveniente del fuselaje de las aeronaves	54

<i>Figura 17:</i> Representación esquemática de un túnel de viento para análisis de patrón de radiación acústica (Sulaiman, 2011).....	56
<i>Figura 18</i> Ensanchamiento espectral. (Sulaiman, 2011).....	57
<i>Figura 19</i> Comportamiento de onda sonora bajo incidencia de absorción acústica.....	58
<i>Figura 20</i> Comportamiento de onda sonora bajo incidencia de aislamiento acústico (Velázquez, 2009).....	59
<i>Figura 21</i> Sistema de pared doble (Waes, 2010).....	60
<i>Figura 22</i> Esquema del túnel de viento con cámara anecoica (Pascioni, 2014).....	61
<i>Figura 23</i> Curva de pérdida de transmisión según el Modelo Ley de masa a incidencia normal (Llinare J.A. Llopis, 1991).	70
<i>Figura 24</i> Comportamiento del sistema de aislamiento con respecto a distintas frecuencias Autoría propia	75
<i>Figura 25</i> Modelo de tratamiento absorbente basado en capas (Coz & D'Antonio, 2004).....	76
<i>Figura 26</i> Cuñas tipo cremer. (Coz & D'Antonio, 2004).....	76
<i>Figura 27</i> Cuñas tipo Wedge. (Coz & D'Antonio, 2004).....	77
<i>Figura 28</i> Micrófono G.R.A.S 56BD (G.R.A.S, 2014).....	81
<i>Figura 29</i> Posición de los micrófonos en la pared lateral derecha de la sección de prueba. Autoría propia	84
<i>Figura 30</i> Matriz de micrófonos sistema LADA (Humphreys, 1998)	86
<i>Figura 31</i> Coordenadas de los micrófonos, sistema SADA. (Humphreys, 1998).....	88
<i>Figura 32</i> Índice de absorción de sonido de Basotect (Plastics Portal, 2016).....	90
<i>Figura 33</i> Coeficiente de absorción de sonido de la línea FiberAcoustic. (Fibertex, 2016)	92

<i>Figura 34</i> Dimensiones de la cámara Semi-Anecoica. Elaboración propia	98
<i>Figura 35</i> Configuración de la estructura de aislamiento y acondicionamiento acústico Elaboración propia	99
<i>Figura 36</i> Dimensiones de la cuña.(Elaboración propia)	100
<i>Figura 37 a)</i> Terminación superficial de las cuñas anecoicas.	101
<i>Figura 38</i> Configuración de rejilla para las cuñas. (Perez de la Fuente & Solis Ramirez, 2015)	102
<i>Figura 39</i> Configuración propuesta para elaboración de la puerta.....	102
<i>Figura 40</i> : Tiempo de reverberación a frecuencias de octava. Autoría propia	108
<i>Figura 41 a.</i> Corte del techo de la cámara anecoica, con un orificio para iluminación,	109
<i>Figura 42</i> Hardware de National Instruments a. PXI-1042Q b. PXI-4496 (Instruments, s.f.)	111
<i>Figura 43</i> Controlador PXI-8354 (Instruments, s.f.).....	111
<i>Figura 44</i> Interfaz de usuario del sistema de prueba acústica túnel de viento.	112
<i>Figura 45</i> Interfaz del usuario que permite supervisión por medio de internet. (Kjær, 2014)..	113
<i>Figura 46</i> Programa de post procesamiento PULSE Reflex™ (Kjær, 2014).....	113
<i>Figura 47</i> Sistema de adquisición de datos LAN –XI y módulos y unidades del panel frontal (Kjær, 2014).....	114
<i>Figura 48</i> Número de publicaciones realizadas por año en la base de datos ScienceDirect.....	122
<i>Figura 49</i> Diseño CAD de configuración recomendada.	124

Introducción

Un túnel de viento es una gran herramienta para la investigación, que permite simular fenómenos y distintas condiciones para estudios en modelos a escala sobre el comportamiento del aire en aerodinámica de aeronaves, vehículos autopulsados como también en obras civiles. (Hitt, 2015)

Un túnel de viento para mediciones Aero acústicas, comprende una sección del túnel con un revestimiento anecoico con el fin de absorber y atenuar el ruido exterior de la sección de prueba para lograr una óptima realización de mediciones correspondientes al modelo a escala.

El propósito del siguiente proceso investigativo, es idear o realizar un proceso de ingeniería para formular una modificación del túnel de viento subsónico para la implementación de estudios Aero acústicos teniendo en cuenta su viabilidad económica realizando un análisis comparativo costo/beneficio, además de buscar la posibilidad de modificar el túnel que actualmente se encuentra en las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores para diversificar los procesos funcionales del túnel, con respecto al estudio en distintos procesos de investigación acústicos que hacen efecto sobre los objetos.

Planteamiento del problema

En la historia de la aviación siempre se ha buscado progresar teniendo en cuenta varios aspectos de diseño, principalmente de rendimiento y eficiencia de las aeronaves, pero ha llegado un punto en el que dicho desarrollo afecta otros aspectos que han generado inconvenientes para la industria, como la excesiva producción de ruido. (Kjær, 2014)

Tal fue el caso del jet inglés que debió salir de circulación debido a la gran concentración de ruido en sus motores; El BAC 1-11, uno de los más exitosos aviones británicos de todos los tiempos, fabricado por Hunting Aircraft y British Aircraft Corporation (BAC), fue presentado a comienzos de los años 1960 y voló durante alrededor de 30 años, hasta su jubilación en razón de las restricciones de ruido generado. (Vasconcelos, 2009)

La reducción en el ruido producido por las aeronaves que operan en las proximidades de los grandes centros urbanos es un problema importante para un crecimiento sostenible en las actividades de aviación civil.

Para lograr los estudios aeroacústicos sobre distintos modelos a escala, se debe llegar a dos formas de obtención del túnel. Estas podrían ser:

La adquisición de un túnel que ya tuviera dicha modificación o planificar e implementar una modificación, debido a la falta de dicha herramienta en Colombia, con lo que se llega a la siguiente pregunta: **¿Cuál es la factibilidad de configurar el túnel de viento cuya operación es a régimen subsónico, para diversificar su funcionalidad y puedan hacerse estudios Aeroacústicos en él?**

Justificación

Las instituciones que posean un túnel de viento y hagan una adaptación para estudios de acústica podrán ofrecer sus instalaciones para realizar estudios Aero acústicos de diferentes mecanismos que lo requieran, tales como vehículos, superficies hipersustentadoras, tren de aterrizaje, etc. Se podrá buscar acuerdos con distintas empresas que han incursionado en el tema, además será posible ampliar el área de conocimientos en la aerodinámica para los estudiantes, garantizando una mayor calidad de aprendizaje y posibles vínculos con otras universidades, como es el caso de los acuerdos existentes con la universidad de São Paulo.

En el campo comercial, un estudio acústico podrá ser incluido como herramienta de mejora de estructuras con el fin de que sean menos ruidosas y analizar posibles fallas internas que no son posibles detectar fácilmente de manera visual, sin tener que recurrir necesariamente a pruebas químicas.

Se requiere la medición del ruido generado por cada componente de gran elevación para el desarrollo de métodos de predicción de ruido que sirvan como base para nuevos conceptos de diseño aerodinámico hacia el logro de una reducción de ruido sin penalización severa sobre el rendimiento y la seguridad de las aeronaves. Una herramienta importante para los estudios de ingeniería, que permita esto de una manera cómoda, segura y óptima puede ser el túnel de viento Aero acústico, ya que no sólo tiene en cuenta la generación de ruido sino el comportamiento del aire alrededor del componente analizado.

Objetivos

Objetivo general

Estudiar la factibilidad de la modificación de un túnel de viento de régimen subsónico con la intención de que sea posible realizar estudios Aero acústicos en Colombia, teniendo como base fundamental el túnel de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Objetivos específicos

- ✓ Investigar sobre los túneles de viento Aero acústicos y sus componentes.
- ✓ Identificar las ventajas de un túnel para mediciones Aero acústicas y que componentes son indispensables para la modificación del túnel de viento subsónico.
- ✓ Trazar las distintas modificaciones a la sección de prueba del túnel de viento para implementar los instrumentos y mecanismos necesarios para realizar los estudios Aero acústicos.
- ✓ Consultar costos de los productos necesarios y mano de obra para llevar a cabo cada uno de las opciones de configuración

1. Capítulo

Dinámica de Fluidos

1.1. Teoría de capa límite

El aire forma una capa con íntimo contacto con la superficie y permanece adherida a esta, después existe un desplazamiento entre las diferentes capas, que dependiendo de la distancia a la superficie, tienen una velocidad mayor hasta un punto en el cual la velocidad de la capa de aire es igual al de la corriente libre, la distancia que existe entre la superficie del perfil y el punto de la velocidad de la corriente libre, se denomina capa límite.

El espesor de la capa límite es la distancia del punto de velocidad cero, a otro donde la velocidad es el 99% de la corriente libre

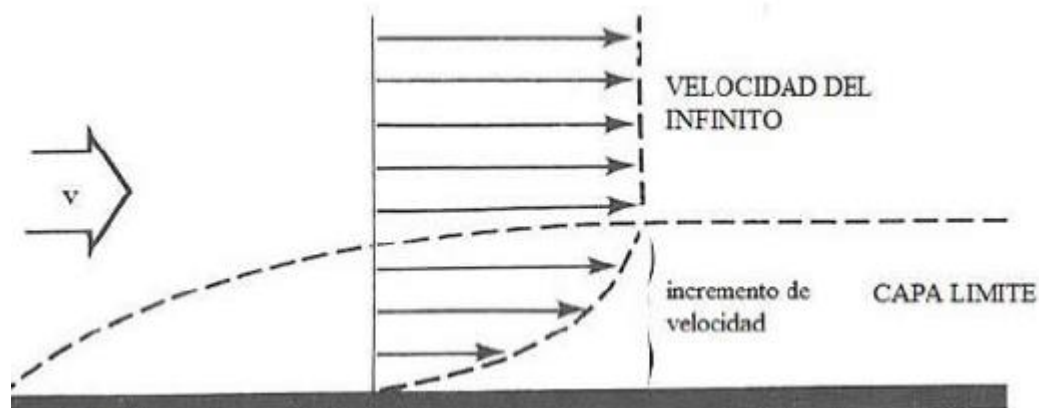


Figura 1 Diagrama de velocidades (Ramos, 2010)

En el borde de ataque la capa límite es laminar, conforme el aire en movimiento circulante se aleja del borde de ataque, las fuerzas de rozamiento disipan cada vez más la energía de la corriente de aire (Figura 1), haciendo que el espesor de la capa límite aumente gradualmente

hasta que a una distancia del borde de ataque la capa límite empieza a sufrir perturbaciones de tipo ondulatorio, que conducen a un aumento de espesor de la capa límite, y una destrucción de la corriente laminar pasando a ser turbulenta.

La capa límite tiene la propiedad de que se transmite la presión que existe en la corriente libre de aire hasta la pared, esto permite entre otras cosas determinar la medida de la velocidad, ya que se puede medir la presión estática, dentro del fenómeno de la capa límite no se puede aplicar la ecuación de Bernoulli debido a que dicho teorema no tiene en consideración la pérdida de energía que tiene lugar por el rozamiento (Barlow, 1999).

La turbulencia es un movimiento en tres dimensiones relacionado con el tiempo, en donde el vórtice de estiramiento genera fluctuaciones en la velocidad esparcidas por todas las longitudes de onda entre un mínimo determinado por las fuerzas viscosas y un máximo determinado por las condiciones de capa límite del flujo. Es el estado usual del movimiento de un fluido excepto a bajos números de Reynolds.

1.1.1. Flujo laminar y turbulento.

La viscosidad juega un papel importante en la mecánica de fluidos, los cuales pueden ser clasificados por dos tipos: laminar y turbulento. Un flujo se cataloga como laminar cuando el fluido describe trayectorias en línea recta en capas paralelas, sin que exista una mezcla macroscópica entre cada una de las capas, a medida que el flujo aumenta a valores críticos el flujo laminar se rompe en un movimiento irregular, indicando una mezcla macroscópica del fluido perpendicular a la dirección de desplazamiento lo cual se conoce como turbulento. Tal como se evidencia en la *Figura 2*

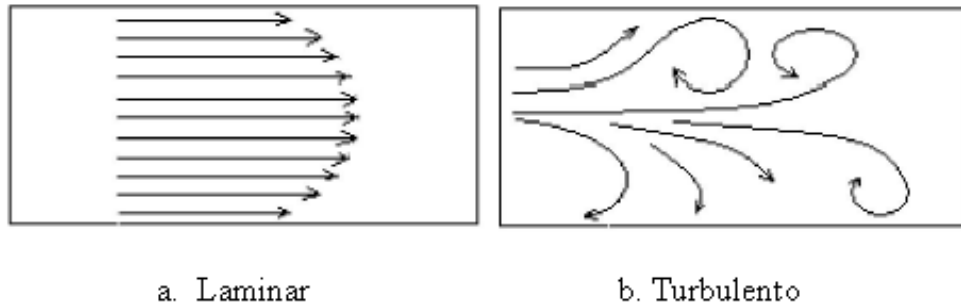


Figura 2 Cinemática del flujo laminar y turbulento (Ramos, 2010).

1.1.2. Parámetros para similitud

Las fuerzas presentes en un fenómeno en el cual un objeto se mueve a través de un fluido, se pueden distinguir como debidas a la viscosidad del medio, a su elasticidad y a la fuerza de gravedad. Se puede decir que son proporcionales a determinadas variables:

$$Fuerzas\ de\ inercia \sim \rho l^2 V^2 \quad Fuerza\ viscosa \sim \mu V L$$

$$Fuerzas\ de\ gravedad \sim \rho l^3 g \quad Fuerza\ elastica \sim \rho a^2 l^2$$

Donde ρ es la densidad, l es una dimensión característica del fenómeno, V es la velocidad, g es la aceleración de la gravedad y a es la velocidad de las ondas mecánicas en el fluido que están netamente relacionado con la elasticidad del fluido (Barlow, 1999).

Se puede relacionar dichas fuerzas para determinar condiciones aerodinámicas, y dichas relaciones se le atribuyen a quienes inicialmente tomaron la iniciativa de definirlas:

$$Numero\ de\ Reynolds = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosa}} \quad (1)$$

$$\text{Numero de Mach} = \frac{F_{inercia}}{F_{elastica}} \quad (2)$$

$$\text{Numero de Froude} = \sqrt{\frac{F_{inercia}}{F_{gravedad}}} \quad (3)$$

1.2. Numero de Reynolds

La fuerza inercial del fluido en comparación con la fuerza viscosa del mismo, lo cual se resume en la ecuación:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (4)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido

v : Velocidad del fluido

L : Longitud característica del sistema

μ : Viscosidad dinámica del fluido

Para fluidos con número de Reynolds bajo, las fuerzas viscosas son dominantes, es decir las perturbaciones en el fluido tienden a ser minimizadas resultando en un flujo laminar, a medida que el Reynolds aumenta, el amortiguamiento en el sistema disminuye, permitiendo que las perturbaciones aumenten, si el número de Reynolds es alto eventualmente el fluido es turbulento.

El número de Reynolds es el de más importancia en los fenómenos aerodinámicos de altas velocidades, cuando las fuerzas inerciales llegan a un nivel alto en comparación con las fuerzas viscosas, el flujo entra en inestabilidad y se presentan los fenómenos de turbulencia, además el número de Reynolds está implicado en las fuerzas de fricción del fluido y es importante para la descripción de pérdidas

1.3. Numero Mach

En un fluido el número de Mach corresponde a la comparación de la velocidad misma del flujo con la velocidad del sonido, este número adimensional está dado por:

$$Mach = \frac{|\mathbf{u}|}{a} \quad (5)$$

Donde \mathbf{u} es la velocidad del fluido y a la velocidad del sonido, es común asumir un flujo incompresible cuando el número Mach es menor o igual a 0.3, con respecto a número de mach menores a un cierto valor crítico no existe solución matemática en las soluciones de Navier-Stokes sin embargo a medida que la velocidad del fluido aumenta las ecuaciones sufren una transición de parabólica-elíptica a hiperbólica y las propiedades numéricas de la ecuación cambian (Hansen, 1986). La ecuación parabólica-elíptica permite un análisis de flujos incompresibles, denotados en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

Donde P es la presión, en cual la ecuación hiperbólica permite el análisis de flujos compresibles a $M_\infty > 1$ en el cual el flujo se encuentre en un estado constante y no transitorio, ya que esto llevaría a una solución mixta entre un flujo supersónico (estacionario) con una región subsónica (parabólica-elíptica).

1.4. Numero de Froude

Relaciona el efecto de las fuerzas de inercia con las fuerzas de gravedad las cuales actúan sobre el fluido, en los movimientos con superficie libre del fluido, la naturaleza del movimiento (rápido o tranquilo), depende de si el número de Froude es mayor o menor que la unidad. Para experimentos de túnel de viento es un parámetro de similitud importante solo para pruebas dinámicas en el que el modelo se encuentre en constante movimiento.

$$Froude = \sqrt{\frac{V^2}{lg}} \quad (8)$$

Donde:

V : Parámetro de velocidad

l : Longitud del modelo

g : Aceleración de la gravedad.

2. Capítulo

Túnel de viento

Es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos como aviones, misiles y edificios a escala. En el túnel se simulan las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real. (Hitt, 2015)

2.1. Funcionamiento de un túnel de viento

El aire se mueve a través del conducto mediante un ventilador. Con el fin de requerir ventiladores de menor potencia y conseguir velocidades altas, es ideal basarse en el principio de un tubo de Venturi; se hace disminuir la sección antes de la cámara de ensayos y se aumenta después de ella, con esto se logra uniformizar el flujo y asegurar una buena calidad en la sección de ensayos.

El objeto a analizar debe ser ubicado en la sección de pruebas de manera que no se mueva. El aire que se mueve alrededor del objeto aún muestra lo que sucedería si el objeto se mueve a través del aire. Una vez el aire atraviesa el modelo, vuelve a hacer el mismo circuito de manera continua. (Farrarons, 2010)

2.2. Clasificación del túnel viento por tipo de circuito

Los túneles de viento se clasifican por: túnel de viento de circuito abierto y túnel de viento de circuito cerrado.

2.2.1. Túnel de viento de circuito cerrado.

En la sección de pruebas, se genera un flujo de aire de velocidad controlada, el sistema de propulsión compuesto por un ventilador y el equipo regulador, se encarga de hacer circular el aire. Consta de difusores cuya función es uniformizar el flujo de aire. La contracción disminuye la sección de forma suave hasta la sección de pruebas, acelerando el flujo hasta cierta velocidad, y cumpliendo funciones importantes desde el punto de vista de la calidad del flujo, como son la disminución del nivel de turbulencia y la mejor uniformidad del perfil de velocidad y la dirección del flujo. Al ser un túnel de circuito cerrado, es fundamental direccionar el flujo a realizar giros, pero de manera ordenada, sin elevar más allá de lo razonable la pérdida de carga ni introducir perturbaciones en flujo (Barlow, 1999).

Un túnel de viento de circuito cerrado consta de los componentes descritos en la *Figura 3*:

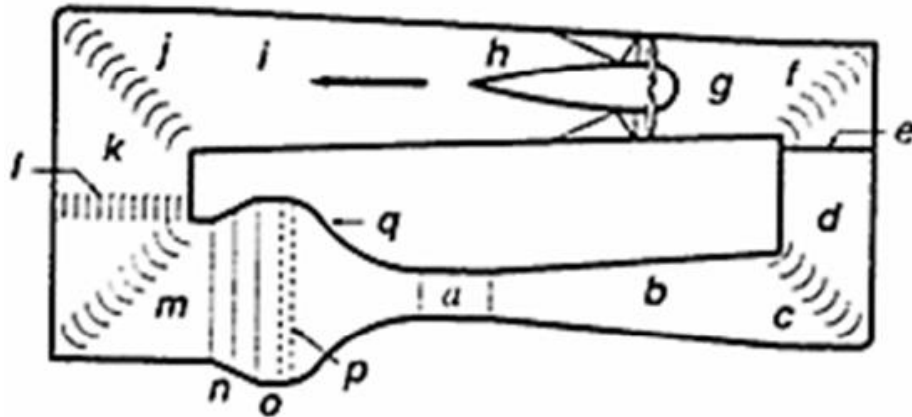


Figura 3 Configuración típica del túnel de viento de ciclo cerrado (Barlow, 1999)

- a. Sección de pruebas.
- b. Difusor.

- c. Primera esquina, acondicionadores de flujo.
- d. Sección de área constante.
- e. Malla de seguridad para el ventilador.
- f. Segunda esquina, acondicionadores de flujo.
- g. Transición de sección rectangular a circular
- h. Ventilador (sistema de propulsión).
- i. Retorno o segundo difusor.
- j. Tercera esquina, acondicionadores de flujo.
- k. Sección de área constante.
- l. Intercambiador de calor.
- m. Cuarta esquina, acondicionador de flujo.
- n. Difusor de ángulo pronunciado.
- o. Cámara de ajustes.
- p. Mallas de acondicionadoras de flujo.
- q. Contracción.

2.2.2. Túnel de viento de circuito abierto.

Para este caso el flujo saliente no recircula directamente por el túnel. Generalmente presenta las mismas partes que en el túnel de circuito cerrado, se definen en túneles de tipo soplador, donde son impulsados por un ventilador centrífugo, y tipo succión donde su sistema de impulso es un ventilador axial. Las principales partes se pueden observar en la Figura 4.

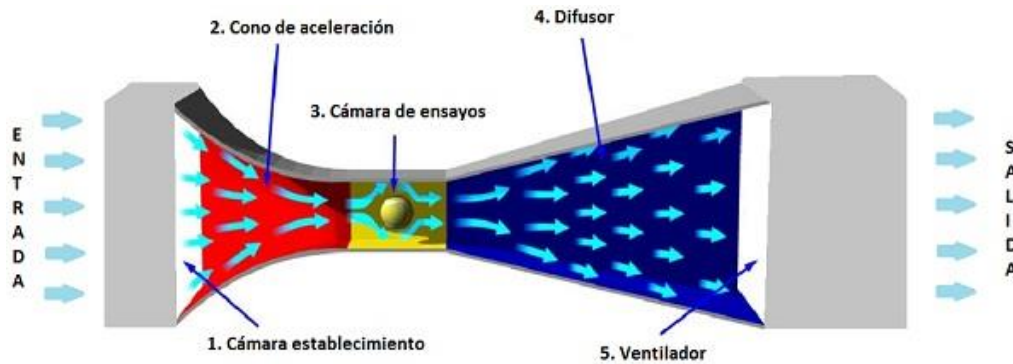


Figura 4 Configuración de túnel de viento de circuito abierto (Farrarons, 2010)

- 1) **Cámara de establecimiento:** Su objetivo es enderezar y uniformizar el flujo de aire.
- 2) **Cono de aceleración:** Su función es acelerar la velocidad del flujo manteniéndolo ordenado y uniforme para posteriormente llegar a la cámara de ensayos.
- 3) **Cámara de ensayos (sección de prueba):** Es la parte más importante del túnel. Es dónde vamos a colocar el objeto que queremos estudiar y también dónde haremos las mediciones. Es muy importante que el flujo que la atreviese sea lo más uniforme posible.
- 4) **Difusor:** Una vez el aire ya ha salido de la cámara de ensayos, el difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente. Nos interesa que el aire salga a la menor velocidad posible ya que la velocidad de salida irá relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores son las pérdidas.
- 5) **Ventilador:** Su función es crear un flujo de aire a una velocidad determinada. Normalmente llevan aparatos electrónicos para poder variar la velocidad y así realizar ensayos bajo las condiciones de flujo deseadas por los ingenieros.
- 6) **Suelo:** Es un elemento importantísimo del túnel si es usado para ensayar vehículos con ruedas. Los existen rodantes y estáticos. Los rodantes serán mucho más precisos ya que se parecen más a la realidad.

En la Tabla 1 se describen las principales ventajas y desventajas de los túneles de viento de circuito abierto y cerrado respectivamente.

Tabla 1: Principales características de las dos clases de túnel de viento.

Tipo de túnel	Ventajas	Desventajas
Circuito abierto	<p>Menor costo de construcción</p> <p>Menor espacio requerido para su fabricación y utilización</p> <p>Permite la utilización de diferentes herramientas de visualización de flujo.</p>	<p>Para un tamaño dado y una velocidad definida el túnel requiere de mayor energía para su operación.</p> <p>En general los túneles de viento de circuito abierto tienden a ser ruidosos.</p>
Circuito cerrado	<p>A través del uso de esquinas y mallas, la calidad del flujo se puede controlar y es independiente de otras actividades dentro del edificio y condiciones climáticas.</p> <p>Requiere de menos energía para un tamaño definido de la sección de pruebas y velocidad.</p> <p>Menor producción de ruido cuando está en operación</p>	<p>Costo de construcción es elevado debido a los ductos de retorno y a los acondicionadores en cada esquina.</p> <p>Si se usa continuamente para visualización de flujo, se debe implementar un sistema de purgado para evacuar la recirculación del humo.</p> <p>Si se trabaja por tiempos prolongados es necesario adecuar un sistema de refrigeración.</p>

Fuente: (Nogueira, 2006)

2.2.3. Clasificación de túnel de viento por velocidad de operación

La clasificación de los túneles de viento puede darse en base a la velocidad de operación a la que trabajan, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los túneles de viento en base a la velocidad de operación

NOMBRE	VELOCIDAD
De baja velocidad	$M < 0,6$
Subsónico	$0,6 < M < 0,85$
Transónico	$0,85 < M < 1,2$
Supersónico	$1,2 < M$
Hipersónico	$M > 5$

Fuente: (Mejía, 2012)

2.3. Túneles de viento referente.

2.3.1. Túnel de viento aeroacústico de la universidad de Stuttgart.



Figura 5 Sección de prueba del túnel de viento (Mercedes-Benz, 2016).

El túnel de viento mostrado en la *Figura 5* es un túnel construido por la Universidad de Stuttgart en asociación con Mercedes Benz para estudios aerodinámicos y Aero acústicos. Cuenta con un sistema de simulación de carretera con tolerancias de mediciones acústicas que van desde 68 dB hasta 73 dB a una velocidad máxima de 160 Km/h, en la medición de fuerzas aerodinámicas, el impulso y el ruido es medido por una serie de micrófonos situados por toda un pared en la sección de prueba del túnel, en un viento cruzado, el vehículo simplemente gira en el túnel de viento en relación con el flujo de aire para lograr un ángulo de flujo estacionario.

(Vasconcelos, Quiter Aircraft, 2009)

Para las mediciones de muestras aerodinámicas se toman tres velocidades estándar (90, 140 y 160 Km/h) con dos ángulos de flujo diferentes. Después se coloca cinta adhesiva sobre todas las articulaciones del vehículo y los conductos de ventilación ubicados dentro del panel del automóvil para lo cual las pruebas son llevadas a cabo, las tiras de cinta son gradualmente eliminadas antes de que se adopten nuevas medidas para evitar un desprendimiento el cual afecte la calidad de los datos. Para detectar niveles de sonido elevado en una de las articulaciones se elaboran pruebas sin sellar ninguna articulación y/o conducto de ventilación en lo cual si el nivel de sonido se eleva abruptamente ya se ha encontrado una fuente importante de ruido.



Figura 6 Cabina de supresión de ruido exterior (Fram, 2016).

Para el túnel de viento las mediciones y el proceso es terminado en tres minutos, dependiendo del número de cambios son necesarios para un vehículo, son aproximadamente de 70 a 100 mediciones diferentes que puede ser completado en un solo día. Este proceso es llevado a cabo en la cabina de supresión de ruido exterior mostrada en la *Figura 6*

2.3.2. Túnel de viento a escala real de Mitsubishi Motors.

Se utiliza principalmente para la medición del rendimiento aerodinámico de una carrocería (corriente de aire alrededor de la carrocería del coche, la fuerza de impacto en la carrocería del vehículo en el momento de viaje, etc.). En los últimos años, la atención se ha concentrado en no sólo rendimiento aerodinámico, sino también la medición de ruido aerodinámico que genera la carrocería del coche (viento corte de sonido, etc.). En consecuencia, el túnel de viento en sí está diseñado para obtener un rendimiento aerodinámico acústico superior (para disminuir el ruido

generado por el propio túnel de viento) y además de cumplir con los rendimiento convencionales de velocidad máxima del viento (Tabla 3) y la uniformidad corriente de aire, en la *Figura 7* se denota una vista CAD de las instalaciones del túnel de viento de Mitsubishi.

El nivel de ruido de fondo es de 50 dB o menos dependiendo de la velocidad del flujo de aire

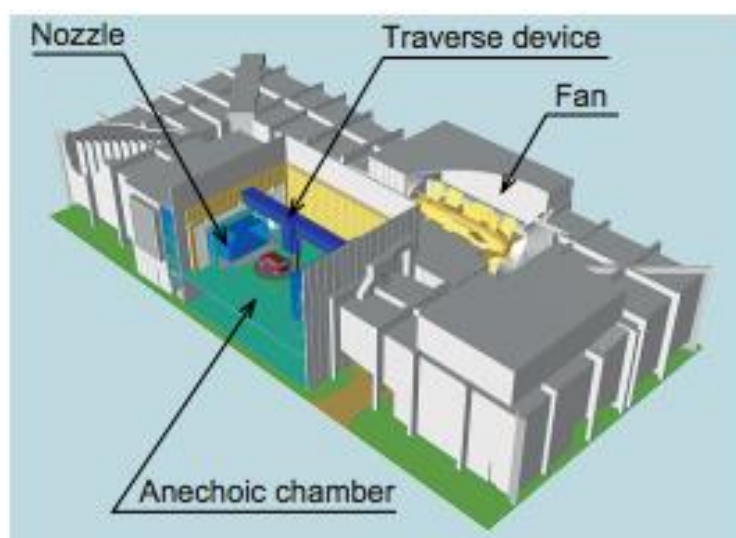


Figura 7 Vista CAD de la instalación del túnel de viento (Mitsubishi, 2006)

Tabla 3 Características del túnel de viento de Mitsubishi Motor.

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN	
Tobera	Tobera para automóvil	Tobera para motocicleta
Tamaño de salida de la tobera	5.5m (W) x 3.1m (H)	3.0m (W) x 3.1m (H)
Área de sección transversal	16.05 m ²	8.30 m ²
Velocidad Máxima	250 km/h (69.4 m/s)	
Posición para las mediciones	12 m	

Fuente: (Mitsubishi, 2006)

2.3.3. Túnel de viento de FCAAP (Florida Center For Advanced-Aero Propulsion).

2.3.3.1. Características:

- Es un túnel de viento de circuito abierto para estudios acústicos en vuelo subsónico
- Velocidad de flujo nominal de 5- 75 m/s
- RPM's mínimas de 450
- La sección de prueba tiene dimensión de 0.914x1.219x3.048 (H X W X L)
- Trabaja con una cámara anecoica (2.7x4.5x4.8 m) que rodea la sección de prueba
- Posee un silenciador en la entrada del túnel y un forro metal perforado en toda la longitud del difusor para mejorar la calidad acústica.

Dependiendo de la frecuencia, los niveles de ruido de fondo se encuentran a escala con el número de Mach entre el quinto y la potencia que van desde 80 dBA a Mach 0,17.

2.4. Túnel de viento de la Fundación Universitaria los libertadores

2.4.1. Túnel de viento modelo m01-125-140m

Con base a lo expuesto anteriormente, llegamos a la conclusión que la Fundación Universitaria los Libertadores cuenta con un túnel de viento de las siguientes características:

- Tipo circuito abierto, con una sección de prueba de 470 mm x 675 mm x 1400mm
- Tipo de operación subsónico, con una velocidad variable de 5 a 41 m/s

Este túnel de viento fabricado por TELSAT, cuenta con una sección de entrada, con una zona de contracción construido en materiales compuestos y con una pared de honeycomb en aluminio.

La zona de estabilización (Plenum) forma un alineador de flujo que permite la mitigación de cualquier remolino o torbenillos presente en el flujo a la entrada del túnel en donde se encuentra un homogeneizador de velocidad del flujo, conformado por una malla de acero inoxidable que con una relación específica entre el diámetro y el área libre, permite una uniformidad en la velocidad del viento a lo largo de la sección transversal del túnel.

Zona de contracción es la encargada de reducir el área del túnel para acelerar el flujo por medio de una curvatura que controla el gradiente de presiones.

El difusor es el encargado de reducir la velocidad del flujo y mantener la propagación de presiones desde el compensador y silenciador hasta la sección de pruebas.

La sección de potencia es la unidad que contiene el motor, un variador de velocidad; el cual puede ser modificado manualmente.

Silenciador atenúa el nivel de ruido del flujo de salida.

2.4.1.1. Características de absorción de ruido

La sección de pruebas está elaborada de methil-metacrilato que incrementa su altura aproximadamente de 1,2 mm hacia la conexión con el difusor y un espesor de cada pared aproximadamente de 12 mm que tienen características de absorción de ruidos de 70 dB o inferior. En las *Figura 8* y *Figura 9* se muestran el diseño CAD e imagen real del túnel de viento de La Fundación Universitaria Los Libertadores.

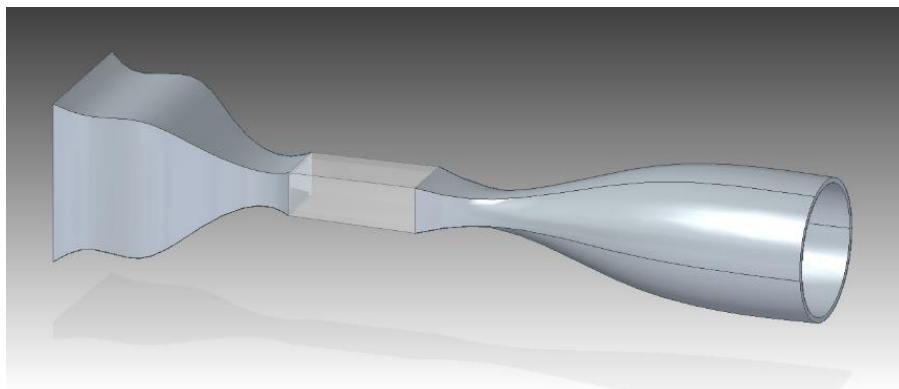


Figura 8 Diseño CAD del Túnel de Viento de la Fundación Universitaria los Libertadores.

Autoría propia



Figura 9 Túnel de Viento modelo M01-125-140M (Correa, 2010)

3. Capítulo

Aero Acústica

La Aeroacústica es la disciplina que estudia los fenómenos de generación y emisión de sonido generado aerodinámicamente con origen en la interacción entre el flujo y un cuerpo de análisis. Esta rama se basa principalmente en las leyes físicas generales para desarrollar diferentes tipos o modelos que estudian la propagación y comportamiento del sonido, y ha cobrado cada vez más importancia debido a la creciente necesidad de controlar las emisiones de ruido en aeronaves, automóviles, entre otros.

Partiendo de la teoría, es necesario entender que el sonido puede definirse como una onda de presión que transporta información y que, para que exista, necesita como mínimo una fuente y un medio físico por el cual se propague. Para ser audible debe estar dentro de la banda de frecuencia de 20 Hz a 20 kHz.

El ruido es considerado como sonido sin ningún tipo de información, molesto y no deseado, considerándose un sonido perturbador y/o dañino para quien lo percibe. Para diferenciar entre el sonido y el ruido depende de la información relativa al receptor que percibe la sensación audible. Para ello en la práctica, es el receptor el que diferencia entre el sonido y el ruido. (Hirschberg, 2004)

Entendiendo el sonido como una onda. Se pueden utilizar diferentes parámetros.

3.1. Propagación de sonido

El sonido se genera cuando un cuerpo por medio de oscilaciones pone en movimiento a las partículas de aire, líquido o sólido que lo rodean. Estas a su vez, transmiten el momento a un siguiente número finito de partículas y así sucesivamente es decir que dos parámetros deben existir para que se produzca una onda sonora; la primera es una fuente mecánica de vibración y un medio elástico a través del cual pueda propagarse la perturbación.

El desplazamiento oscilatorio de las partículas (denominado vibración) es alrededor de su posición inicial, como se denota en la Figura 10:

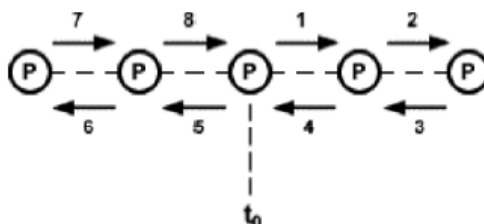


Figura 10 Vibraciones de las partículas "P" alrededor de su posición de equilibrio en un tiempo t_0 (Sarma, 1975)

El desplazamiento oscilatorio que soporta las distintas moléculas de aire, generan zonas de mayor concentración de moléculas llamadas zonas de condensación y zonas en donde se localiza una menor concentración de molecular llamadas zonas de rarefacción Figura 11.

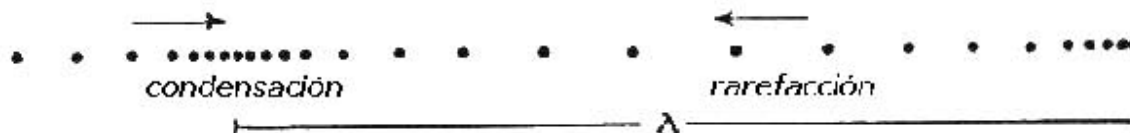


Figura 11 Variaciones de presión en el aire (condensación y rarefacción) en el caso de un movimiento armónico simple. (Maggiolo, 2016)

3.2. Longitud de onda, fase y frecuencia

La longitud de onda (λ) se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda entre dos puntos idénticos, la longitud de onda disminuye al aumentar la frecuencia.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (9)$$

Donde c es la velocidad de propagación de la onda.

La frecuencia (f) tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda, es el número de repeticiones por unidad de tiempo o el número de oscilaciones por unidad de tiempo.

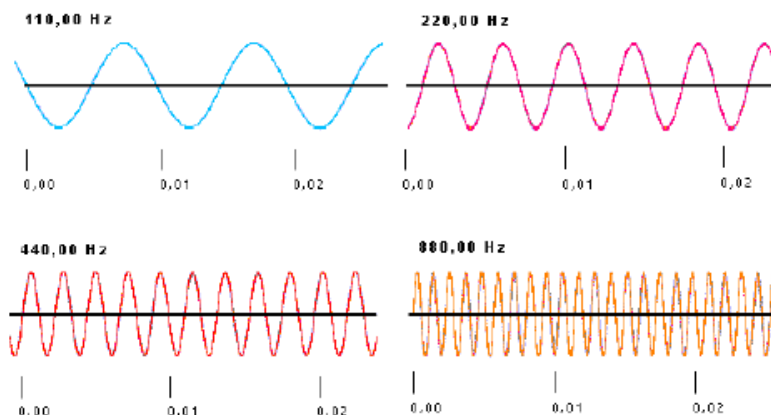


Figura 12 Relación entre la longitud de onda y la frecuencia. (Istvan, 1992) (Onda de Sonido, 2011)

Al vibrar las moléculas de aire en su posición de equilibrio se puede reconocer que el sonido no es un traslado de materia, sino una trasmisión de energía. Cuando nos alejamos de la fuente sonora escuchamos un nivel sonoro menor porque la onda se ha distribuido en una mayor superficie en el espacio, como se muestra en la Figura 13.

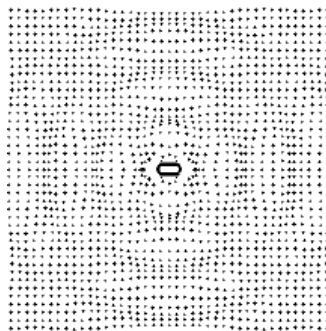


Figura 13 Representación de la distribución de energía de una onda sonora en una superficie (Onda de Sonido, 2011).

3.3. Magnitudes del sonido

3.3.1. Amplitud (A)

Es la cantidad máxima (en términos absolutos) de presión sonora que ejerce la onda sobre un medio. El valor máximo que puede adquirir la onda se conoce como cresta, si es positivo y valle si es negativo. El punto en el que la onda se anula se conoce como nodo.

3.3.2. Velocidad de propagación

La velocidad de propagación (C) es el ritmo al que se propaga la onda y depende del medio físico en el que se encuentre. Se mide en metros por segundo (m/s). Se relaciona con la longitud de onda y la frecuencia:

$$c = \lambda f \quad (10)$$

Por definición el sonido es dado que es una onda de presión, no se propaga en el vacío. La velocidad de propagación varía según el medio físico en el que se propague. Por lo tanto, la velocidad de propagación es mayor en los sólidos, menor en los líquidos y todavía más pequeña

en los gases, en la Tabla 4 se muestra las ecuaciones que definen, según el medio físico la velocidad por la cual se propaga una onda.

En la velocidad de propagación se aprecian las características:

- Depende del medio de propagación.
- No depende de la intensidad sonora.
- En el caso de un gas (como el aire) es directamente proporcional a su temperatura específica y a la presión estática e inversamente proporcional a la densidad.

Tabla 4 Velocidad de propagación del sonido

Sólidos	Líquidos	Gases
$C_g = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (11)$	$C_g = \sqrt{\frac{Q}{d}} \quad (12)$	$C_g = \sqrt{\frac{\gamma * P_0}{\rho}} \quad (13)$ $C_g = \sqrt{\frac{\gamma * R * T}{M}} \quad (14)$
<p>E = módulo de Young [Pa]</p> <p>d = densidad del sólido</p>	<p>Q = módulo de compresibilidad [Pa]</p> <p>d = densidad del líquido</p>	<p>γ = coeficiente adiabático (Aire 1.4)</p> <p>P_0 = presión del gas [Pa]</p> <p>R = constante universal de los gases (8,314 [J/gmolK])</p> <p>T = Temperatura absoluta</p> <p>M = masa molar del gas</p>

Fuente: (M. Möser, 2009)

3.3.3. Impedancia acústica

La impedancia (Z) se define como el cociente de la presión acústica (P) y la velocidad propia del movimiento vibratorio definida antes como la velocidad de propagación, y físicamente representa la resistencia de una superficie al paso de la onda acústica (M.P. López Campos, 2006).

$$Z = \frac{P}{v} \quad (15)$$

Para el caso de las ondas planas se puede expresar como:

$$Z = \rho c \quad (16)$$

Siendo ρ la densidad y c la velocidad de propagación medida en ohmios, su unidad de medida son los Rayls ($Pa \cdot S/m$) o (g/scm^2). En la Tabla 5 se plasman los valores característicos de la velocidad e impedancia para algunos elementos.

Tabla 5 : Impedancia característica de distintos elementos

Material	Velocidad (m/s)	Impedancia (Rayls)
Aire a 0 °C	331	427
Aire a 20 °C	340	414
Agua	1,493	144x10 ⁴
Madera	3.900	140 x10 ⁵
Cemento	4,000	162 x10 ⁵
Acero	5,100	390 x10 ⁵

Fuente: (M.P. López Campos, 2006)

3.3.4. Intensidad acústica

Es una magnitud, en parte subjetiva, y es la energía transportada por la onda que atraviesa, en la unidad de tiempo y de superficie perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. Permite determinar si un sonido es fuerte o débil, esta cualidad se mide con un sonómetro y los resultados se expresan en decibelios [dB].

Se encuentra relacionada con la presión sonora que es objetivamente medible. Sin embargo, dos sonidos de igual presión sonora y de distinta frecuencia no producen la misma intensidad, por último con la potencia y la intensidad (Manuel, 2001).

Analíticamente está definido como:

$$\vec{I}(t) = p(t)\vec{u}(t) \quad (17)$$

Para:

$I(t)$ = vector de intensidad sonora.

$p(t)$ = presión sonora.

$U(t)$ = vector de velocidad de las partículas en movimiento.

La principal propiedad de la intensidad sonora es que faculta la diferenciación del campo sonoro que se propaga, la parte activa, y la parte que no se propaga. La presión sonora no posee esta propiedad por lo cual un medidor de intensidad sonora solo responde a la parte activa del campo sonoro (Antoni, 1998).

El nivel de intensidad acústico se define como:

$$L_I = NI = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (18)$$

Para:

I: La intensidad sonora de la medición

I_0 : Intensidad de referencia de 10^{-12} W/m^2

Potencia sonora o acústica

Valora la energía que una fuente sonora radia al medio exterior, en la unidad de tiempo. Una parte de esta potencia fluye a través de cada elemento de superficie del medio que rodea a la fuente. Sea W la potencia acústica radiada por la fuente en Vatios. Si en el medio no hay pérdidas, toda la potencia radiada atravesara cualquier superficie que encierre a la fuente. Cuanto mayor sea su área menor será la potencia por unidad de área que atraviere cualquier elemento de superficie.

Si la fuente es omnidireccional, es decir que radia uniformemente en todas las direcciones, su potencia sonora total es el producto de la intensidad sonora por el área de la superficie cerrada:

$$W = IS \quad (19)$$

Donde I es en $\frac{W}{m^2}$, y S en m^2 . Si la fuente sonora es direccional, es decir no radia uniformemente en todas las direcciones. La intensidad sonora variara sobre la superficie considerada y su potencia sonora total se obtienen integrando sobre la superficie:

$$W = \int_{S_0}^S I_s dS \quad (20)$$

Donde I_s es la componente de la intensidad que atraviesa cada elemento de área dS de la superficie cerrada, de área total S .

La potencia medida producida por un ser humano al hablar ronda de unos 10^{-5} , pudiendo alcanzar 10^{-3} W en los gritos.

El nivel de potencia sonora (NWS, en inglés PWL) se da en decibelios. La referencia para el control de potencia es de 10^{-12} , la fórmula para el cálculo de nivel de potencia es:

$$NWS = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} ; [dB] \quad (21)$$

Donde 10^{-12} vatios corresponde a un nivel de -120 dB; la fórmula anterior también está expresada como (Kinsler, 1995):

$$NWS = 10 \log W + 120 \quad (22)$$

3.3.5. Presión sonora o acústica

Es el producto de la propagación del sonido, representa la diferencia entre la presión total instantánea en un punto determinado, en presencia de una onda acústica, y la presión estática en un punto, la unidad de medida es el pascal (M. Möser, 2009).

La presión sonora (SPL), está definido por la siguiente ecuación:

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right); [dB] \quad (23)$$

Para:

P: presión sonora en Pascales

P_{ref} : Presión de referencia “ 2×10^{-5} Pascal”

3.3.6. Tono

La potencia del sonido se caracteriza entre agudos o graves en función de su frecuencia. Suele ser utilizado como sinónimo de altura (los términos tono o altura se refieren a la cualidad de la sensación sonora que permiten distinguir entre un sonido grave (bajo) de otro agudo (alto)) lo cual le permite al tono ser directamente proporcional a la frecuencia determinado por la frecuencia fundamental de las ondas sonoras, y es lo que distingue entre sentidos graves, agudos o medios.

El tono es medido en Hertz (Hz), para:

- Tonos graves (frecuencias bajas de 20 a 300 Hz)
- Tonos medios (frecuencias medias de 300 a 2000 Hz)
- Tonos agudos (frecuencias altas de 2000 hasta 20000 Hz)

3.3.7. Timbre

Es la cualidad que permite distinguir dos sonidos de igual frecuencia e intensidad pero con distinta forma de onda es decir que con distinta fase.

El sonido no se compone de un solo tono (onda sinusoidal), sino de la superposición de ondas sinusoidales simples que forman el espectro del sonido. Generalmente los sonidos que se perciben no son tonos puros, sino que son una combinación de frecuencias relacionadas armónicamente, por ejemplo los sonidos producidos por un instrumento musical. La composición de un sonido viene determinado por un análisis espectral que relaciona amplitudes en función de la frecuencia, lo que define un timbre. Un ejemplo de la diferencia entre timbres a una frecuencia de onda variada se muestra en la *Figura 14*.

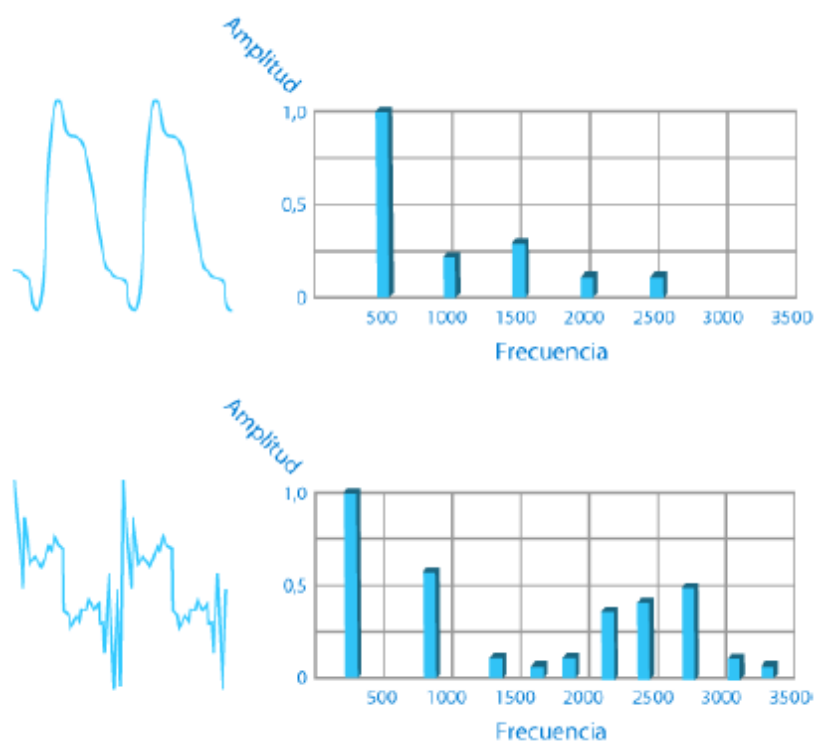


Figura 14 Diferenciación en el timbre de distintas ondas. (G. Rodriguez, 2011)

3.4. Tipos de ruidos acústicos

3.4.1. Clasificación en función del tiempo

3.4.1.1. *Ruido continuo.*

La presión acústica y respuesta de frecuencia permanece constante o presenta pequeñas fluctuaciones a través de un tiempo t . Las fluctuaciones son menores a 5 dB durante el periodo de examinación (Kinsler, 1995).

3.4.1.2. *Ruido fluctuante.*

El nivel de presión acústica y respuesta de frecuencia varía a lo largo del tiempo. Las variaciones pueden ser periódicas o aleatorias.

3.4.1.3. *Ruido impulsivo*

El nivel de presión acústica se presenta por impulsos. Se caracteriza por un ascenso brusco del ruido y una duración total del impulso muy breve en relación al tiempo que transcurre entre impulsos, estos impulsos pueden presentarse repetitivamente en tiempos iguales o aleatoriamente.

3.4.2. Clasificación en función de la frecuencia

Se denota tres tipos de ruido acústico que son: ruido blanco, ruido rosa y ruido marrón. Además existen fuentes de ruido artificiales o generadores de ruido que emiten ruido blanco o

rosa, estos generadores de ruido son utilizados en acústica para realizar ciertas mediciones como aislamiento acústico, insonorización, reverberación, etc.

El ruido se define como todo sonido indeseado que interfiere con la señal que se desea percibir, en este apartado se aborda una clasificación genérica del ruido en dominios del tiempo y la frecuencia.

3.4.2.1. Ruido blanco

Se caracteriza por tener una densidad espectral de potencia plana, lo que significa que el ruido contiene todas las frecuencias y que tienen la misma potencia. El ruido blanco se utiliza en el procesamiento de la señal por ejemplo, para determinar la función de transferencia de cualquier sistema lineal e invariante en el tiempo (Kinsler, 1995).

Tiene una distribución uniforme en el espectro audible (20 Hz hasta 20 kHz) es decir, es un ruido que tiene una respuesta plana, lo que significa que su intensidad es constante para todas las frecuencias.

3.4.2.2. Ruido rosa

El ruido rosa es aquel en el que la densidad de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia. Es decir, el ruido rosa disminuye a la mitad de cada octava. Por lo tanto, también se puede definir como aquel que tiene densidad de potencia constante por ancho de banda, de este modo, el perfil del espectro de un ruido rosa es plano cuando el eje de frecuencias sigue una escala logarítmica. Se utiliza para ecualizar salas y equipos de grabación, entre otras cosas.

El procedimiento es el siguiente: se genera un ruido rosa entre 20 Hz -20 kHz y se utiliza un micrófono que recoge el sonido de la sala. Este sonido se pasa por una analizador de espectros y se ecualiza hasta que todas las bandas se encuentren en el mismo nivel. De este modo, se garantiza que no hay ninguna pérdida ni ganancia para ninguna frecuencia (Kinsler, 1995).

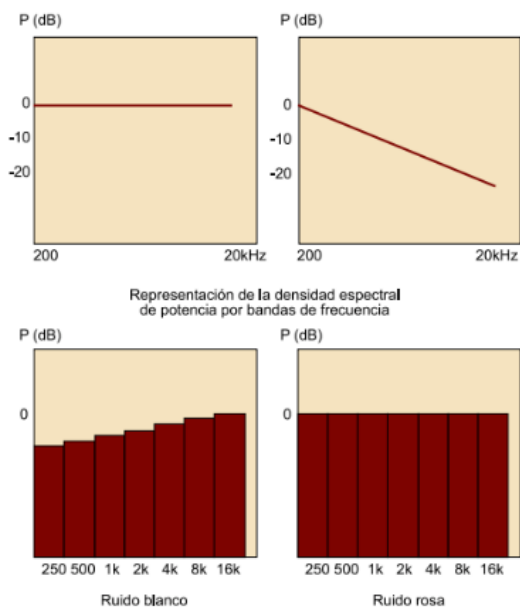


Figura 15 Representación del ruido blanco y rosa (Kinsler, 1995).

El ruido puede ser experimentado de diversas formas y es considerado en la actualidad como uno de los contaminantes más invasivos que existen, afectando de forma negativa la salud y el bienestar humano, algunos de los inconvenientes producidos por el ruido son la pérdida auditiva, el estrés, la alta presión sanguínea, la pérdida de sueño, la distracción y la pérdida de productividad, así como una reducción general de la calidad de vida y la tranquilidad.

Las causas principales por contaminación auditiva son las relacionadas con actividades humanas tales como: la implementación de equipos electrodomésticos como aspiradores, procesadores de alimentos o secadores de cabello; el transporte, actividades de la industria,

construcción de edificios y obras públicas; así como las que provienen de fuentes móviles como motos, trenes, aviones y vehículos en general. (Pollution, 2012)

La medición de presión sonora se realiza mediante un instrumento llamado Sonómetro, el cual utiliza un filtro para captar sonidos al igual que lo hace el oído humano. El ruido como sonido, es medido en decibelios [dB] (García, 2015)

En el caso de los túneles de viento, la medición de presión sonora se realiza mediante micrófonos que cuentan con una serie de características.

Basado en lo anterior, y de acuerdo a los valores recomendados por la *OMS (Organización Mundial de la Salud, 2009)* se observa en la Tabla 6, los efectos generados en personas por exposición al ruido y las fuentes que lo producen:

Tabla 6 Ejemplos de valores sonoros y sus efectos en el organismo.

Presión Sonora	Ambientes o Actividades	Sensación / Efectos en el oído
140-160	Explosión de petardo a 1 m	Daños permanentes inmediatos del oído, rotura de tímpano
130	Avión en despegue a 10 m, disparo de arma de fuego	
120	Motor de avión en marcha, martillo neumático pilón (1 m)	Umbral de dolor
110	Concierto de rock Motocicleta a escape libre a 1 m	Daños permanentes del oído a exposición de corta duración
100	Sierra circular a 1m, Discoteca, Sirena ambulancia a 10 m	Sensación insoportable y Necesidad de salir del ambiente

90	Calle principal a 10 m Taller mecánico	Sensación molesta, daños permanentes al oído a exposición a largo plazo
80	Bar animado, Calle ruidosa a 10m	
70	Coche normal a 10m, Aspirador a 1m, Conversación en voz alta	Dificultad para la comunicación verbal
60	Conversación animada, Televisión a volumen normal a 1m	
50	Oficina, Conversación normal	Ruido de fondo agradable para la vida social
40	Biblioteca, Conversación susurrada	
30	Frigorífico silencioso, Dormitorio	Nivel de fondo necesario para descansar
20	Habitación muy silenciosa, Rumor suave de las hojas de un árbol	
10	Respiración tranquila	

Fuente: (OMS, 1999)

Dentro del marco de la contaminación por ruido generada por el funcionamiento de los aeropuertos, la operación que deriva de éste, genera un nivel de ruido superior a los 150 decibeles, rango que sale de toda cuantificación y que como se ha expuesto en la tabla de la OMS comprueba que una larga y constante exposición a éste tipo de ruido, generaría una pérdida de la audición progresiva.

Los valores de ruido soportados por la población conjunta al aeropuerto derivadas de la operación aérea (150 dB), sobrepasan el denominado “umbral del dolor” (120 dB); valor que es realmente alarmante; pues los problemas de salud que pueden adquirir conviviendo tan cerca del

clima aeroportuario, generarían una degradación en su aspecto físico y psicológico, con efectos nocivos que van desde la dificultad de conciliar el sueño, el estrés, la fatiga, la pérdida de concentración, hasta problemas cardiacos, dolores de cabeza y complicaciones gástricas.

(Aristizábal, 2014)

3.5. Fuentes de ruido de los aviones

Una fuente importante de ruido son las turbinas de los motores. Sin embargo, en la maniobra de aterrizaje las superficies hipersustentadoras del avión enfrentadas con el aire producen tanto ruido como el que hacen los motores. (Dobrzynski, 2007) Presentan una extensa revisión bibliográfica respecto al ruido proveniente del fuselaje de las aeronaves, listando las fuentes de ruido no propulsivas, en orden de intensidad, como: Trenes de aterrizaje, Slotted slats, puntas de los flaps y slats. La Figura 16 representa algunas de las fuentes de ruido de un avión convencional durante el aterrizaje. Existen sin embargo otras fuentes potenciales de ruido aerodinámico, como las puntas de las alas, capas límite turbulentas, cavidades y flujos de aire alrededor de detalles únicos de construcción para cada aeronave, entre otros.

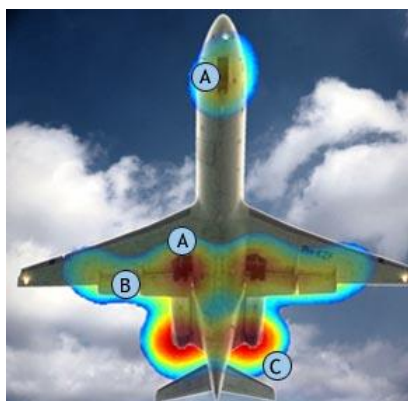


Figura 16: Principales fuentes de ruido proveniente del fuselaje de las aeronaves
(Dowling, 2008)

3.6. Fenómenos de las mediciones acústicas en túneles de viento

La reducción de las emisiones de ruido es un factor crítico de diseño para el fabricante de aviones, por lo que varias herramientas de análisis, empíricos y numéricos existen para ayudar en el desarrollo de aeronaves más silenciosas. Dada la complejidad de los mecanismos de las fuentes de ruido, las mediciones Aero acústicas en túneles de viento se utilizan para proporcionar contribuciones vitales para la comprensión y la mitigación de estos fenómenos.

La contaminación acústica, eficiencia de combustible y bajas emisiones de carbono son factores claves para el diseño de las aeronaves en el siglo XXI, por la combinación de criterios como: el incremento de la tasas de aterrizaje, criterios de certificación de ruido para las aeronaves y de garantías sobre la producción de ruido en fuselajes, motores y en el tren de aterrizaje, la tarea de los fabricantes es de asegurar el desarrollo de tecnología para la reducción de emisiones de ruido siguiendo una herramienta de investigación viable como es, por ejemplo, por medio de túneles de viento Aero acústicos.

Los túneles de viento normalmente consisten en una gran toma de aire situada en una cámara sellada, el modelo a escala se ubica en la sección de prueba de tal modo que choque con el flujo de aire con el fin de que se pueda determinar el patrón de radiación acústica del modelo, una serie de micrófonos (*Figura 17*) son ubicados fuera de la corriente de aire con el propósito disminuir el margen de error causado por la obtención de ruidos extraños o por interacción entre los micrófonos (Sulaiman, 2011), posteriormente los datos son analizados por medio de un software en la escala de decibelios (dB).

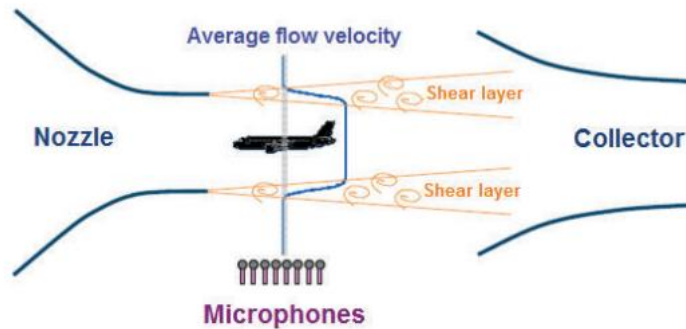


Figura 17: Representación esquemática de un túnel de viento para análisis de patrón de radiación acústica (Sulaiman, 2011).

3.7. Efectos en las ondas acústicas

Además del intenso cizallamiento en la capa límite que induce turbulencia, esta turbulencia tiene dos efectos en las ondas acústicas que son: el ensanchamiento espectral y la distorsión de frecuencia entre los distintos micrófonos que se encuentran fuera del flujo de aire.

3.7.1. Ensanchamiento espectral

El ensanchamiento espectral es un fenómeno producido por el flujo turbulento sobre el modelo, lo cual puede producir en algunas secciones del modelo campos de distorsión del sonido debido por la capa de cizalladura (diferencia de la velocidad de aire y su dirección entre dos puntos) ocasionado una pérdida de energía del tono emitido, que se distribuye en un rango de frecuencias, es también conocido como “haystacking” debido a la forma de la distribución espectral (Sulaiman, 2011). En la figura 18 se denota el comportamiento de la señal de entrada (a) y después cuando el flujo interactúa, hay una variación de amplitud producida por un diferencial de presiones sobre un punto del modelo.

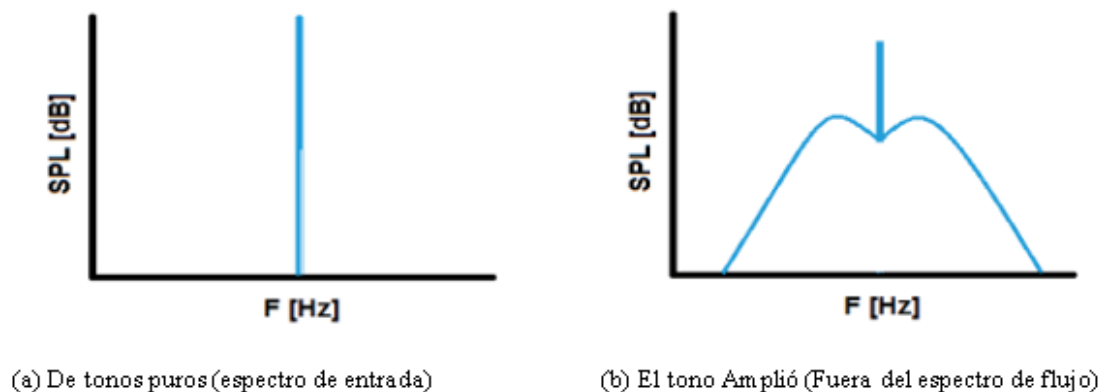


Figura 18 Ensanchamiento espectral. (Sulaiman, 2011)

3.7.2. Distorsión de frecuencias

La distorsión de la frecuencia es inducida por la turbulencia que actúa sobre el objeto en el flujo de aire, aunque depende de la posición de los micrófonos, la frecuencia a la cual emitan y la velocidad del túnel de viento.

3.8. Disminución de niveles de ruido

La forma más inmediata para obtener una disminución de ruido es mediante la interposición de una masa suficiente entre la fuente emisora y el recinto receptor. Además existen materiales que aportan flexibilidad y estanqueidad al aire. Si no es factible alcanzar una suficiente, entonces es conveniente complementar el aislamiento acústico con materiales que aporten absorción acústica.

3.8.1. Absorción acústica

Se refiere a la absorción acústica como la absorción de ondas de sonido y la disipación de parte de la energía en forma de energía térmica. (Teixeira, 2015) Cuando una onda de sonido

golpea una de las superficies de una habitación, parte de la energía del sonido se refleja y otra parte penetra en la superficie. Parte de la energía de la onda de sonido es absorbida convirtiéndose en energía calorífica en el material, y el resto se transmite alrededor. El nivel de energía convertido en energía calorífica depende de las propiedades absorbentes de sonido del material. (Velázquez, 2009)

Las propiedades absorbentes de sonido de un material se expresan en el coeficiente de absorción de sonido, α , (alfa) en función de la frecuencia. α oscila de 0 (reflexión total) a 1.00 (absorción total)

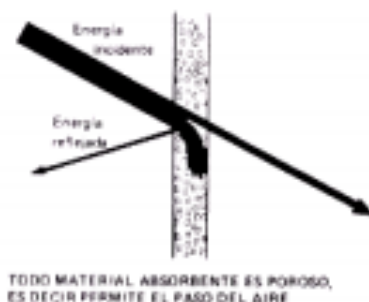


Figura 19 Comportamiento de onda sonora bajo incidencia de absorción acústica
(Velázquez, 2009)

3.8.2. Aislamiento acústico

(Velázquez, 2009) Se refiere al aislamiento acústico como la forma en él que se impida la propagación de la energía acústica incidente. El aislamiento acústico se logra mediante la proporción de protección al recinto contra la transmisión de ruido generado, este puede ser Aislamiento acústico a ruido aéreo o a ruido de impacto, el objetivo para el caso del aislamiento acústico a ruido aéreo es que las ondas sonoras pierdan mayor cantidad de energía posible al atravesar el cerramiento mientras que en el caso del aislamiento acústico a ruido de impacto su

objetivo es cortar el camino de transmisión de vibraciones mediante la interposición de materiales elásticos. Por ello, la función de los materiales aislante dependiendo de donde se encuentren, pueden reflejar la mayor parte de la energía que reciben (en el exterior) o bien por el contrario absorberla.

3.8.2.1. *Diseño del aislamiento acústico*

Para lograr una alta pérdida de transmisión, el método más óptimo es el sistema de pared doble debido a que el sistema de pared simple aunque se utiliza espesores elevados, es propenso a sufrir vibraciones cuando superan la frecuencia crítica del material implementado. La pared doble está formada por dos paredes simples, iguales o diferentes, separadas por una cavidad que puede estar vacío o relleno de un material absorbente (M. Möser, 2009).

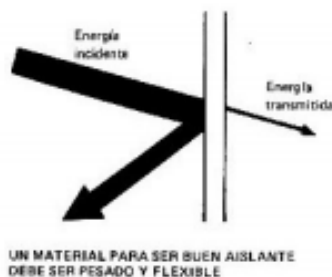


Figura 20 Comportamiento de onda sonora bajo incidencia de aislamiento acústico
(Velázquez, 2009)

Lo que ocurre con la onda sonora en un sistema de pared doble, es que se encuentra en un cambio de medio el cual la energía transmitida decrece y por lo tanto la onda sonora transmitida es menor que la onda sonora incidente cumpliendo así la ley de masas (*Figura 23*), como se muestra en la *Figura 21*.

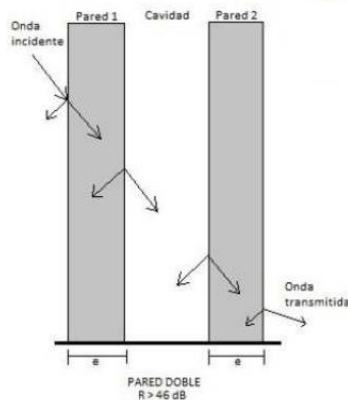


Figura 21 Sistema de pared doble (Waes, 2010)

3.9. Cámara Anecoica:

Consiste en una superficie especialmente diseñada para minimizar las reflexiones del sonido y los ruidos procedentes del exterior. De esta forma, los experimentadores pueden grabar o reproducir un sonido sin ningún tipo de distorsión.

Esto se realiza mediante la adecuación de las paredes para que exista un campo sonoro similar al que existiría en una atmósfera libre, sino hubiera cambios de densidad y temperatura; este campo existe cuando el sonido se propaga libremente en un medio y no hay reflexiones por obstáculos o superficies en el medio. En una cámara anecoica ideal no hay reflexiones de sonido de las paredes, techo o piso; en tal caso, el nivel de presión sonora de una fuente simple radiando esféricamente, obedece la ley inversa: el nivel de presión sonora decrece en 6 dB cada vez que la distancia a la fuente se duplica (Cunefare Kenneth, 2003); Mediante el cubrimiento de las paredes con miles de piezas de forma laminar fabricadas con fibra de vidrio u otro material amortiguador de las ondas sonoras. Asimismo, el suelo se insonoriza con baldosas aislantes.

La efectividad de una cámara anecoica se mide en dB de rechazo (la relación entre el sonido directo y el sonido reflejado dentro de un recinto). Una cámara debería proporcionar un rechazo mayor a 80 dB entre 80 Hz y 20kHz. Normalmente la cámara tiene forma rectangular, aislado de vibraciones del piso con material absorbente (desde el punto de vista acústico) que recubre su interior.

Uno de los túneles de viento de referencia (Figura 22) ,es el de FCAAP (Florida Center for Advanced-Aero Propulsion) que cuenta con una cámara anecoica en la sección de prueba de 2.7×4.5×4.8 m (H×W×L) de punta a punta de cada cuña, está cubierta con una tela de fibra de vidrio se montado en paredes de bloques de grava verticales y el techo con un patrón alternativo para la optimización de la absorción acústica, la cubierta de la punta tiene una longitud (34,3 cm) es de aproximadamente un cuarto de longitud de onda de una onda acústica 250 Hz a temperatura y presión estándar, la definición de la frecuencia de corte nominal de cámara.

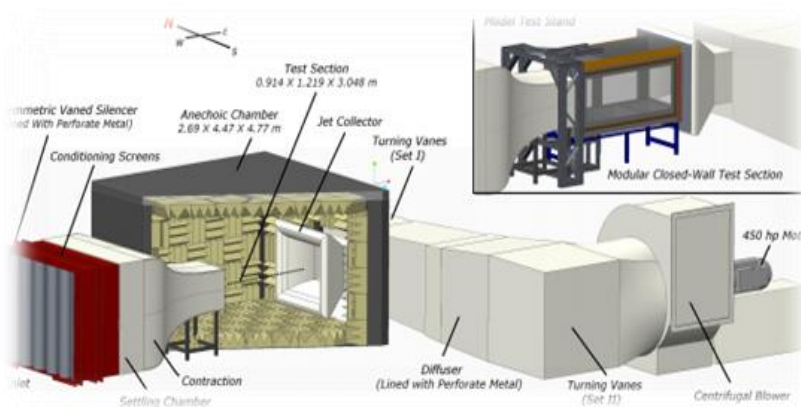


Figura 22 Esquema del túnel de viento con cámara anecoica (Pascioni, 2014)

Las mediciones acústicas se contemplan con o sin flujo: para el caso de que no halla suficiente flujo, las mediciones de sonido se centran en la capacidad de la cámara anecoica para sintetizar un ambiente de campo libre. En el caso de que se presente un flujo de aire estable, el

túnel proporcionara mediciones de referencia de ruido de fondo que se comparan con las distintas mediciones de ruido que se tomen, esto permitirá mantener la coherencia entre cada medición, la presión de referencia acústica utilizada a lo largo de esta sección de prueba para calcular los niveles de ruido [dB] es de $20 \mu\text{Pa}$.

La cámara anecoica, además de tener en su interior un campo libre, debe cumplir con otros requisitos: debe estar aislada de los ruidos externos y de vibraciones, y debe tener temperatura y humedad estables (condición que se da netamente por el material absorbente y el espesor de las paredes). Con el cumplimiento de los anteriores requisitos, a la cámara anecoica permite llevar a cabo mediciones de niveles de presión sonora y potencia acústica emitida por los modelos a analizar, medir patrones de radiación, umbrales auditivos.

Se encuentran dos tipos de cámara anecoica de uso general, la cámara anecoica completa, denotada con las características dichas anteriormente, y la cámara semianecoica, en la cual el piso es reflejante y las paredes y techo son absorbentes. Esta cámara se usa para medir niveles de presión, directividad y potencia radiada por fuentes que son muy pesadas o grandes, y que por lo tanto es más complejo en una cámara anecoica, es ideal para análisis aeroacústicos de distintos componentes hipersustentadores y/o etapa crítica en las aeronaves, como es la etapa de aterrizaje.

La cámara semianecoica incorpora un piso reflejante de varios centímetros de grosor y de concreto para soportar equipo pesado. Por lo tanto, generalmente estas cámaras existen en ambiente de investigación industrial. El comportamiento de la cámara con respecto al cumplimiento de la ley inversa (6 dB de reducción cada vez que se dobla la distancia) es diferente a la de la cámara anecoica.

Por lo cual la variación del nivel de presión acústica con la distancia muestra de picos y valles que son debidos a la interferencia entre la fuente y su imagen, localizada a la misma distancia debajo de la fuente con respecto al plano del piso.

En correlación a las dimensiones se tienen requerimientos similares a los de la cámara anecoica, pero se recomienda que la superficie reflejante (piso de concreto) absorba o regrese una onda más allá del punto de medición.

La norma ISO-3745 decreta que el coeficiente de absorción de energía en incidencia normal de la superficie reflejante, no debe ser mayor 0,06 a cualquier frecuencia dentro del intervalo de interés.

3.9.1. Acondicionamiento acústico de la sala

Acondicionamiento acústico techo

La técnica más eficaz para aislar techos es el techo suspendido. Un techo suspendido se coloca generalmente sobre resortes, aumenta su aislamiento si se deja una capa de aire entre el techo y el suelo aproximadamente de 100 mm, para obtener aún más aislamiento acústico se complementa las ranuras de apoyo del techo con las paredes usando material elástico por ejemplo con cauchos o gomas.

3.9.2. Acondicionamiento acústico paredes

Para llevar a cabo mediciones óptimas es necesario que los niveles de ruido de fondo se encuentren en los niveles más bajos posibles. Para garantizar las mediciones necesariamente se debe aislar la cámara del ruido exterior, evitando el enmascaramiento de la señal de análisis. El

aislamiento es proporcional al tipo de materiales de las paredes, piso y techo que se utilice en la construcción, se debe escoger materiales diferentes los cuales tengan su frecuencia de coincidencia muy diferente de un material a otro, abarcando el aislamiento de todas las frecuencias posibles.

3.9.3. Aislamiento en la ventilación

Se debe proveer de un sistema de extracción de aire, que facilite la recirculación de aire para mantener un ambiente controlado en el interior de la cámara en menor tiempo posible. Esto es esencial si se trabaja con motores. Generalmente se coloca una capa de material acústico absorbente en el ducto para eliminar el ruido que producen los motores de extracción

3.10. Cámara semianecoica

3.10.1. Criterios de diseño

3.10.1.1. Dimensiones de la cámara

De acuerdo a la norma de certificación ISO 3745 el volumen ideal de la cámara tiene que ser 200 veces mayor que el volumen de la fuente cuyo nivel de potencia sonora va a ser determinado. Es decir, si consideramos a la cámara y al objeto de prueba como arista de longitud L y T respectivamente, se debe cumplir que:

$$T^3 / L^3 = 0,005 \quad (24)$$

$$L \geq 5,88T \quad (25)$$

De esta relación se deduce que si el objeto de prueba es voluminoso, como es el caso de un vehículo, las dimensiones de la cámara resultarían dispendiosas y con unos costos altos. Para ello se opta por seguir otro camino con mayor viabilidad y garantizando un buen funcionamiento. La norma ISO da como parámetro con respecto al campo cercano sea a partir de un metro en relación al objeto de prueba, y a partir de una distancia de un cuarto de longitud de onda respecto la pared absorbente.

A partir de estos parámetros la norma ISO 3745 determinar las siguientes ecuaciones:

$$L = l + \lambda/2 + 2 \quad (26)$$

$$W = w + \lambda/2 + 2 \quad (27)$$

$$H = h + \lambda/4 + 1 \quad (28)$$

Donde:

L, W: mínima longitud o anchura útil de la cámara [m].

l, w: máxima longitud o anchura del objeto de prueba [m]

λ : longitud de onda de la frecuencia de corte [m]

H: mínima altura útil de la cámara [m]

h: máxima altura del objeto de prueba [m]

3.10.2. Especificaciones para el diseño de cámara semi-anechoica

El diseño de la cámara esta intrínsecamente relacionado con el tipo de pruebas a realizar o el campo de utilización que se le dispondrá a la misma por lo que es importante conocer de manera global los criterios y parámetros de diseño, se deben considerar los siguientes aspectos:

- ✓ Tipo de mediciones que se realizaran
- ✓ Rango de frecuencias
- ✓ Tamaño de la cámara (su volumen)
- ✓ Geometría
- ✓ Tipo de material que se dispondrá en la construcción de la cámara tanto para su aislamiento (insonorización) como para el acondicionamiento acústico.
- ✓ Equipos de medición.
- ✓ Conexión: debe ser una red monofásica, de corriente continua.

(Antoni, 1998)

Además se debe considerar los siguientes parámetros.

- a) La frecuencia de corte =250 Hz
- b) El aislamiento a vibraciones externas
- c) Aislamiento de ruido aéreo
- d) Un coeficiente de absorción con un valor 1 (ideal)
- e) Un tiempo de reverberación igual a 0 (lo más cercano posible)
- f) La longitud de la cuña debe estar en función de la absorción deseada

- g) Volumen aproximado de 125 m³ el cual debe considerar valores de las longitudes de onda dentro del campo audible que oscilan entre menores de 0.025 m (1 pulg.) hasta aproximadamente 17 m (56 ft).

(ISO, 2003)

3.10.2.1. Ley de masa de una pared doble a incidencia normal

El sistema de pared doble consiste en dos paredes simples separadas por un material elástico o aire, el comportamiento de la transmisión sonora dependerá del comportamiento acústico de cada pared el acoplamiento entre ellas y la absorción acústica del medio elástico en la cavidad. La ley de masa para el sistema de pared doble divide el comportamiento acústico del panel doble en tres regiones bajo la frecuencia de resonancia del sistema de masa-aire-masa entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de transmisión y sobre la frecuencia de transición (Llinare J.A. LLopis, 1991).

3.10.2.1.1. Frecuencia de resonancia

En un sistema mecánico como es el sistema de pared doble masa-aire-masa (masa-cavidad-masa), la resonancia mecánica se define como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ [Hz]} \quad (29)$$

Donde:

K: Rigidez de la cavidad

M: Masa del sistema equivalente

$$M = \frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2} \quad (30)$$

Es decir que tanto la frecuencia de resonancia a incidencia aleatoria está definida por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 (m_1 + m_2)}{d m_1 m_2}} \text{ [Hz]} \quad (31)$$

La frecuencia de resonancia para incidencia normal será aquella en la cual $\theta=0^\circ$, en esta frecuencia al incidir en las ondas en dirección normal, la reactancia de masa del panel iguala a la reactancia de rigidez del espacio del aire. Por lo tanto, es la primera frecuencia en la cual la atenuación del sistema es nula, existen ángulos de incidencia en los cuales ocurre el fenómeno de coincidencia (en los cuales la atenuación provista por el panel también es cero), lo cual resulta de una disminución de la predicción teórica del aislamiento para incidencia normal (Istvan, 1992).

3.10.2.1.2. Frecuencia de transición

La frecuencia de transición depende del espesor de la cavidad y se obtiene al intersectar las rectas de la segunda y tercera región de la curva de ley de masa (Figura 23) a incidencia normal.

$$f_1 = \frac{2c}{\pi d} \text{ [Hz]} \quad (32)$$

Donde

C: velocidad del sonido en el aire

d: espesor de la cavidad

La pérdida de transmisión a través del modelo, se refiere a dos paredes iguales (masas $m_1=m_2=m$), separadas por un espesor.

a) Frecuencia de resonancia bajo

En frecuencias de baja resonancia, las longitudes de onda proporciona un acoplamiento prácticamente rígido y por lo tanto, las paredes se comportan como una unidad, de masa igual a la suma de las masas individuales. Luego, utilizando la ley de masa para un panel simple:

$$TL = 10 \log \left(\frac{2m\pi f}{\rho_0 c} \right)^2 \quad [dB] \quad (33)$$

Donde

m: masas superficiales de los paneles (para efectos prácticos $m = [m_1 m_2 / (m_1 + m_2)]$)

b) Entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de transición

En esta región existe un acoplamiento elástico entre las paredes y la cavidad, por lo cual las paredes acopladas influyen en el aislamiento acústico proporcionado por el sistema.

Denotada por:

$$TL = 10 \log \left(\frac{2m\pi f}{\rho_0 c} \right)^2 + 40 \log \left(\frac{f_0}{f} \right) \quad [dB] \quad (34)$$

Las longitudes de onda comienzan a ser del orden del espesor de la cavidad, y por lo tanto las paredes se comportan como dos paredes simples desacopladas. Corresponde a la máxima atenuación posible que se obtiene de las paredes simples separadas por una gran distancia. Esta

recta se encuentra bajo los picos, al asumir las resonancias en la cavidad como alternadas, las caídas corresponden a las resonancias, mientras que los picos corresponderán las anti resonancias (zonas donde la frecuencia es menor a la frecuencia de resonancia). Es decir que hay una región de pérdida de transmisión, denotada por:

$$TL = 10 \log \left(\frac{2m\pi f}{\rho c} \right)^2 + 6 \text{ (dB)} \quad (35)$$

De la curva final, se puede denotar que la curva está compuesta por tres líneas, las cuales al doblar la frecuencia, aumentaran 6dB/oct, 18 dB/oct y 12 dB/oct, respectivamente, como se muestran en la Figura 23.

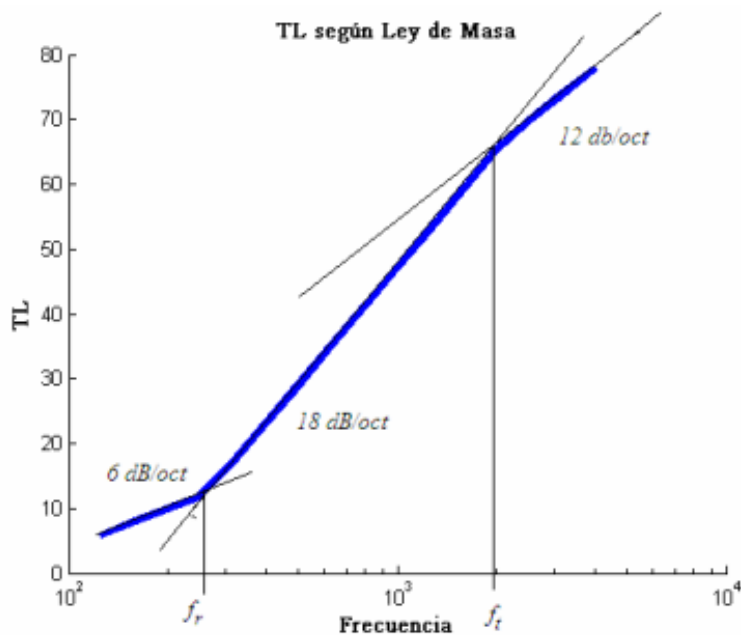


Figura 23 Curva de pérdida de transmisión según el Modelo Ley de masa a incidencia normal (Llinare J.A. Llopis, 1991).

3.10.2.1.3. *Análisis de aislamiento acústico*

Para el análisis del sistema de pared doble, se debe comenzar con la frecuencia de resonancia f_0 , el cual punto en donde transmisión acústica se reduce radicalmente, y define si el planteamiento del sistema aislante es efectivo, por lo cual f_0 debe estar por debajo de las frecuencias de interés, normalmente por debajo de los 100 Hz, y tan baja como sea posible (ISO, 2003).

Es una frecuencia natural de vibración determinada por los parámetros físicos del objeto vibrante, para un sistema masa-cámara-masa es en función de ambas masa y del espesor de la cámara “**d**” entre las masas superficiales.

Tomando como la cavidad de forma mixta conformado por un aislante (Vibrocell) y un absorbente (Espuma de poliuretano) y teniendo en cuenta la masa de los componentes del sistema de aislamiento que son:

- Ladrillo visto pintado : 6 kg
- Malla metálica: 1,20 kg
- Lamina de yeso: 81.54 Kg
- Espuma de Poliuretano: 102 kg
- Vibrocell: 0,16 kg

Aplicando la Fórmula (31), se obtuvo una frecuencia de resonancia de 79,61 Hz es decir que el sistema cederá a la presión sonora de que ocasione vibraciones que afecten al sistema de aislamiento desde el exterior hacia el interior del acondicionamiento acústico, es una frecuencia baja lo cual permite que este fenómeno no se de forma espontánea.

3.10.3. Aislamiento total o pérdida de transmisión sonora

Antes de llevar a cabo el cálculo del aislamiento total del sistema se debe tener en cuenta ciertos conceptos, que permitirán el desarrollo óptimo en la solución de las ecuaciones:

Frecuencia crítica: todos los materiales tienen fallas en su comportamiento, por lo cual a cierta frecuencia disminuye la insonoridad (aislamiento), la frecuencia se expresa por centímetro de espesor del material que se trata.

Tabla 7 Frecuencias criticas de distintos materiales.

<i>Material</i>	<i>Frecuencia critica por 1 cm de Espesor [Hz]</i>
Ladrillo	2500-5000
Hormigón	1800
Bloques de cemento	2700
Yeso	4000
Vidrio	1200
Madera	6000-18000
Acero	1000
Plomo	8000
Poliestireno	14000
Corcho	18000
Goma	85000

Fuente: Laboratorio de acústica del L.E.M.I.T

Densidad superficial: Cantidad de masa que posee un material por unidad de área, lo cual está definida por la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{m}{A} \quad (36)$$

Teniendo en cuenta la arquitectura del recinto a aislar se determinó las densidades de los elementos del sistema aislantes mostrados en la Tabla 8:

Tabla 8 Densidades superficiales del sistema de aislamiento.

<i>Material</i>	<i>δ [Kg/m³]</i>
Ladrillo visto pintado	300
Lamina de yeso	1,55
Malla metálica	0,23
Vibrocell	14

Fuente: Laboratorio de acústica del L.E.M.I.T

El aislamiento total de sistema está dado para dos casos, el primero está dada para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia f_0 (cuya longitud de onda sea doble de la distancia de separación de las capas), el aislamiento total será la suma de los aislantes (Everest, 1989), dado por:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 - 10 \log \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{4} \right) [dB] \quad (37)$$

Donde:

d: distancia entre las capas

α' : $K \cdot \alpha$

K: factor de rigidez, para

K=0.1 para d=0.1 m

K=0.2 para d=0.2

$K = 0.5$ área $0.3 < d < 0.5$ m

h, b: dimensiones del parámetro a aislar.

3.10.3.1. *Aislamiento de cada material*

Para el cálculo de R_1 , R_2 y R_3 , se toma cada uno de los materiales como una pieza homogénea, lo cual permite una aproximación por la “ley de masas” a razón de 6 dB por cada duplicación de masa que corresponde a la siguiente ecuación:

$$R = 20 \log f * \delta - 48 \text{ dB} \quad (38)$$

Aplicando los datos expuestos en las Tabla 7 y Tabla 8, tenemos que para el ladrillo tiene un aislamiento de 55 dB, Vibrocell de 57.84 dB y para la lámina de yeso de 27.84 dB.

3.10.3.2. *Comportamiento del sistema de aislamiento*

En los dos casos, el sistema de aislamiento se comporta de manera exponencial, teniendo una variación entre la frecuencia de corte y la frecuencia de resonancia, esto permite afirmar que tiene un funcionamiento óptimo a altas frecuencias, en la Tabla 9 se muestra el aislamiento total en variación de la frecuencia.

Tabla 9 Aislamiento total en distintas frecuencias

<i>Frecuencia [Hz]</i>	<i>Aislamiento superiores a f_0 [dB]</i>	<i>Aislamiento entre 79,61-250 Hz [dB]</i>
125	132	114
250	136	118
500	139	122
1000	140	122,21
2000	140	123
4000	140	123

Autoría propia

Con respecto a los datos de Tabla 9, se denota que hay un comportamiento de ceder en una cantidad mínima a la presión acústica de la fuente exterior, pero teniendo en cuenta que un avión en fase de despegue produce un ruido de 130 dB y un auto produce aproximadamente entre 70-80 dB, es decir que es un sistema óptimo, con una variación de comportamiento estable como se muestra en la Figura 24

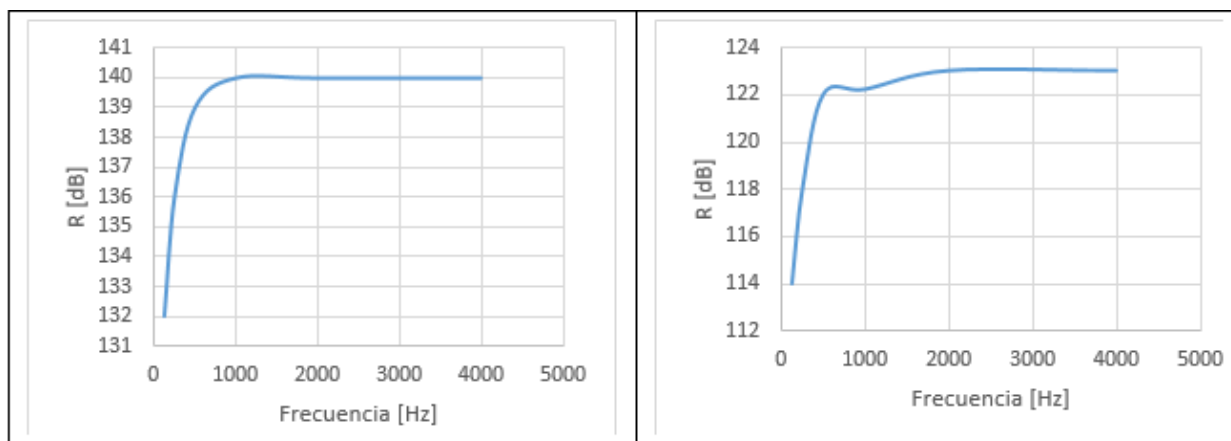


Figura 24 Comportamiento del sistema de aislamiento con respecto a distintas frecuencias

Autoría propia

3.10.4. Modelos de tratamientos absorbentes

Existen dos tipos de modelos para el tratamiento de absorbente acústico, a continuación se detallan dos modelos, el primero conformado por múltiples capas y el segundo conformado por cuñas.

3.10.4.1. Modelo basados en capas:

Los cerramientos se recubren de varias capas de tejido con un incremento de densidad de dentro hacia fuera, como se denota en la Figura 25

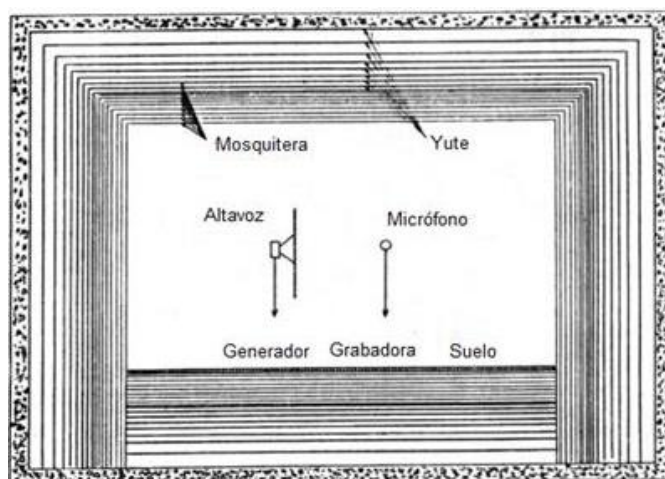


Figura 25 Modelo de tratamiento absorbente basado en capas (Coz & D'Antonio, 2004)

3.10.4.2. Modelo basado en cuñas

3.10.4.2.1. Cuñas tipo cremer:

El tratamiento absorbente consiste en una capa sólida de fibra de vidrio cerca de la pared seguida de unas cuñas formadas por cubos fonoabsorbentes (material poroso, cuya función es atenuar el sonido a un rango de frecuencias específico) de lana de vidrio de diferentes densidades, como se muestra en la *Figura 26* (Coz & D'Antonio, 2004).

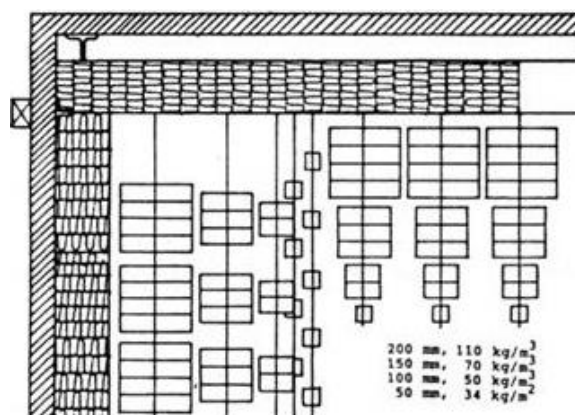


Figura 26 Cuñas tipo cremer. (Coz & D'Antonio, 2004)

3.10.4.2.2. *Cuñas tipo Wedge*

Son cuñas con el mismo material en la base y en la punta y con la misma densidad en todos los puntos. Es el modelo más empleado para la construcción de cámaras anecoicas, ya que presentan una mayor facilidad de montaje, mayor facilidad de distribución, menor coste económico y mejor comportamiento en bajas frecuencias (*Figura 27*).

Las dimensiones de la cuña anecoica serán las que determinen la frecuencia de la cámara anecoica, es decir la frecuencia a partir la cual la sala tenga un comportamiento anecoico, a partir de la cual las reflexiones en los cerramientos sean nulos o imperceptibles.

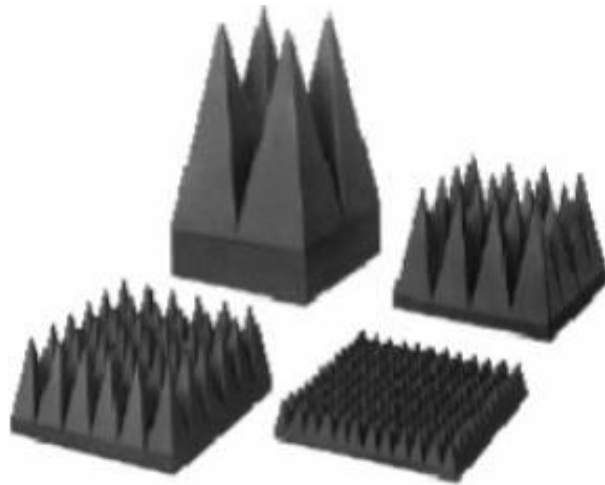


Figura 27 Cuñas tipo Wedge. (Coz & D'Antonio, 2004)

4. Capítulo

Modificaciones acústicas propuestas

4.1. Micrófonos

4.1.1. Tipos de micrófonos

4.1.1.1. *Micrófonos Brüel & Kjaer*

Las pruebas aeroacústicas en cámaras de ensayo anecoicas suele utilizar micrófonos posicionados en el campo libre. En los túneles de viento habitualmente emplean redes en fase de micrófonos colocados al ras de la pared de la sección de pruebas. Sin embargo, los micrófonos también se pueden instalar en la superficie de la fuente emisora de ruido, o se colocan en el campo de flujo. Entre los micrófonos de la empresa Brüel & Kjaer, encontramos los especificados en la Tabla 10. (Kjær, 2014)

Tabla 10 Caracterización de micrófonos y accesorios Brüel & Kjaer

<i>Tipo número</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Tipo</i>	<i>Preamplificador Sugerido</i>	<i>Características Generales</i>	<i>Soporte TEDS</i>	<i>Soporte CIC</i>
4948-B	Plano	CCLD (Constant Current Line Drive)	CCLD, Incorporado	Micrófono de superficie robusta de alta frecuencia	SI	SI
4948-W-005	Plano	CCLD (Constant Current Line Drive)	CCLD, Incorporado	Micrófono de superficie robusta de alto SPL	SI	NO
4938-W-001	1/4"	Ext. Polarizado	Clásico 2670-W-001	Optimizado para altas variaciones en presión estática	NO	SI
4939-W-001	1/4"	Ext. Polarizado	Clásico 2670-W-001	Filtro HP de 100 Hz	NO	NO

4944-W-005	1/4"	Pre Polarizado	CCLD, Integral	Para temperaturas criogénicas Con montaje empotrado (con adaptador DP-1059)	SI	NO
4944-W-006	1/4"	Pre Polarizado	CCLD, Integral	Optimizado para altas variaciones en presión estática	SI	NO
4944-W-010	1/4"	Pre Polarizado	CCLD, Integral		SI	NO

Fuente: (Kjær, 2014)

4.1.1.2. *Micrófonos MEMS*

Los micrófonos MEMS se dirigen a todas las aplicaciones de audio de pequeño tamaño, ofrecen sonido de alta calidad, la fiabilidad y la asequibilidad. Estos micrófonos tienen un principio de funcionamiento basado en la tecnología de sensores de Omron, los cuales son caracterizados en la *Tabla 11* (MEMS Microphone, 2014)

Tabla 11 Listado de micrófonos de la compañía MEMS

<i>Parte Numero</i>	<i>Descripción General</i>	<i>Tipo de salida</i>	<i>Sensibilidad (dBFS)</i>	<i>Frecuencia de respuesta</i>
MP34DT01	MEMS sensor de audio estéreo omnidireccional micrófono digital	Digital	-26	20Hz-20Khz
MP34DT01-M	MEMS sensor de audio estéreo omnidireccional micrófono digital	Digital	-26	20Hz-20Khz
MP34DB02	MEMS sensor de audio estéreo omnidireccional micrófono digital	Digital	-26	20Hz-20Khz

MP34DB01	MEMS sensor de audio omnidireccional de micrófono digital	Digital	-26	20Hz-20Khz
MP33AB01	MEMS Montaje superficial de audio en superficie de silicio inferior puertos con salida analógica	Análoga	-38	-
MP33AB01H	MEMS Montaje superficial de audio en superficie de silicio inferior puertos con salida analógica	Análoga	-38	-
MP34DT02	MEMS sensor de audio estéreo omnidireccional micrófono digital.	Digital	-26	20Hz-20Khz
MP23AB01DM	Sensor de audio MEMS de alto desempeño: completamente diferencial analógica del micrófono abajo hacia el puerto	Análoga	-38	-
MP34DT04	MEMS sensor de audio estéreo omnidireccional micrófono digital	Digital	-26	20Hz-20Khz
MP23AB02B	MEMS Sensor de audio de alto desempeño analógico abajo hacia el puerto	Análoga	-38	-

Fuente: (MEMS Microphone, 2014)

4.1.1.3. *Micrófonos G.R.A.S*

Los micrófonos empleados en el túnel de viento de la universidad de Sao Paulo (*Figura 28*) son de $\frac{1}{4}$ [Pulg] de tipo 46BD fabricados por la compañía G.R.A.S Sonido y Vibración. Estos micrófonos tienen un alcance de hasta 70 dB y una frecuencia habitual del rango dinámico en torno a 168 dB, con preamplificadores integrados y transductores que permiten programar a cada micrófono por separado. (G.R.A.S, 2014)



Figura 28 Micrófono G.R.A.S 56BD (G.R.A.S, 2014)

El tipo de micrófonos que más se acopla a las necesidades del túnel de viento de la Fundación Universitaria Los Libertadores son los micrófonos *Mems MP34DT01-M* ya que aparte de cumplir con los requerimientos básicos de calidad en la obtención de los datos, son de un asequible costo.

4.1.2. **Ubicación de los micrófonos**

Para una idónea obtención de referencias, los micrófonos deben tener una disposición adecuada que garantice la calidad de los datos arrojados, se ha encontrado principalmente que la

configuración debe generar una forma de espiral ya que permite que no haya interferencia entre sí, ni redundancia.

4.1.2.1. Ubicación por normatividad ISO 3745

4.1.2.1.1. Criterios generales

Para obtener el nivel de presión sonora de la superficie de ensayo, se debe seguir los siguientes requerimientos:

- Una matriz de micrófonos fijos en posición sobre la superficie de ensayo debe tener una forma esférica o semiesférica.
- Solo un micrófono puede estar en movimiento a lo largo de múltiples trayectorias circulares, sobre la sección de pruebas. Alternativamente, el modelo se puede hacer girar 360° o múltiplos del mismo.
- Un solo micrófono se puede mover a lo largo de múltiples arcos espaciados del área esférica (o semiesférica) de los demás micrófonos
- Un solo micrófonos se puede mover a los largo de un camino en espiral, alrededor del eje vertical de la sección de pruebas.

Forma Semiesfera (para mediciones en cuartos semianecoicos)

Se deberá utilizar un conjunto de 20 posiciones para cada uno de los micrófonos que se denotan en la Figura 29. En general el número de posiciones de los micrófonos es suficiente si la diferencia en decibelios entre los niveles superiores e inferior de la presión sonora censados en cualquier posición y en cualquier banda de frecuencias es numéricamente menor al número de posiciones del micrófono.

La ubicación de los puntos con áreas iguales en la superficie de la semiesfera de radio r (tomando como referencia el ancho de la sección de pruebas de 0.20 m), las coordenadas de las ubicaciones (x, y, z) con el origen centrado en la proyección del centro acústico (modelo a escala) que da la fuente sobre el plano. En la Tabla 12 se muestran las coordenadas para la ubicación de los micrófonos recomendada teniendo como referencia la norma ISO 3745:

Tabla 12 Coordenadas de ubicación de los micrófonos normal ISO 3745

Número	x (mm)	Y	Z
1	-200	0	5
2	100	-172	15
3	100	172	25
4	-98	170	35
5	-98	-168	45
6	192	0	55
7	94	164	85
8	-186	0	95
9	90	-156	105
10	176	0	115
11	-86	148	105
12	-82	-142	115
13	78	-136	125
14	74	128	135
15	-138	0	145
16	-64	-110	155

17	114	0	165
18	-48	84	175
19	-76	0	185
20	22	-38	195

Fuente: Norma ISO 3745

Con los datos arrojados por la *Tabla 12* se muestra gráficamente cuál sería la ubicación de los micrófonos en la *Figura 29*.

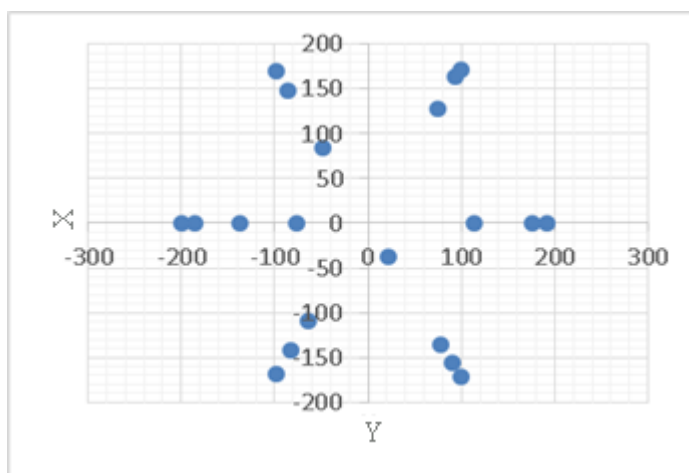


Figura 29 Posición de los micrófonos en la pared lateral derecha de la sección de prueba.

Autoría propia

4.1.3. Método de ubicación LADA (Large Aperture Directional Array)

Desarrollado para identificar fuente de ruido de alta resolución espacial a lo largo de una superficie aerodinámica, ubicados a una distancia máxima de 1.5 metros. La disposición de los micrófonos consiste en 5 espirales compuestas cada una de 7 micrófonos, los micrófonos

internos deben tener un diámetro máximo de 2 pulgadas (0,05 m) y los ubicados al extremo de un máximo de 17 pulgadas (0,43 m) de diámetro.

Para cada agrupación de sub-matrices de diferentes radios se utiliza un θ_{DA} que define el tamaño de la matriz en términos del ángulo para cada una de las espirales con respecto a la posición de la fuente. El tamaño de las sub matrices es $\theta_{DA}= 2.0^\circ, 9.9^\circ, 16.9^\circ, 25.5^\circ$, y 31.6° , dentro del área definida de 5, 10, 15,25 y 35 micrófonos respectivamente. (Humphreys, 1998)

En la Tabla 13 se denota las coordenadas típicas para la ubicación de micrófonos por el método LADA.

Tabla 13 Coordenadas de ubicación de los micrófonos sistema LADA

# Mic	X(in)	Y(in)	# Mic	X(in)	Y(in)
1	0.03	-1.02	19	-9.99	5.66
2	0.97	-0.32	20	-8.47	-7.78
3	0.61	0.80	21	10.57	-8.60
4	-0.57	0.81	22	11.44	7.37
5	-0.93	-0.30	23	-3.47	13.14
6	-5.13	0.88	24	-13.56	0.75
7	-2.42	-4.63	25	-4.89	-12.69
8	3.67	-3.75	26	14.55	-5.15
9	4.71	2.30	27	9.39	12.22
10	-0.73	5.17	28	-8.73	12.68
11	-2.34	-8.63	29	-14.74	-4.38

12	7.50	-4.91	30	-0.39	-15.42
13	6.99	5.59	31	17.01	-1.12
14	-3.16	8.35	32	6.32	15.81
15	-8.92	-0.42	33	-13.08	10.89
16	4.80	-10.49	34	-14.39	-9.09
17	11.45	1.30	35	4.21	-16.52
18	2.31	11.28			

Fuente: (Humphreys 1998)

La *Figura 30* muestra la ubicación de los micrófonos alineados en referencia a la configuración del sistema LADA

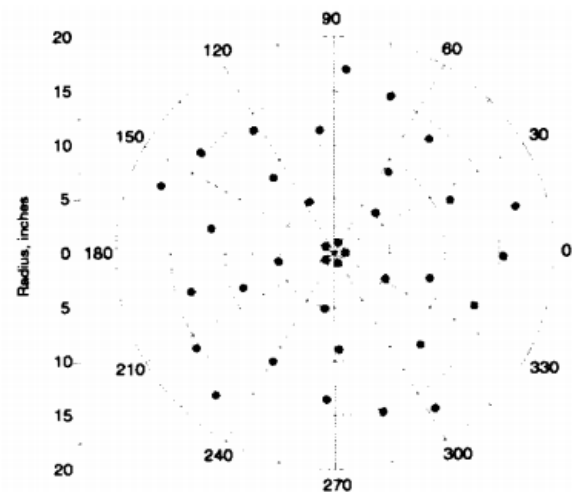


Figura 30 Matriz de micrófonos sistema LADA (Humphreys, 1998)

Este sistema de ubicación de micrófonos es óptimo para el análisis estructuras aerodinámicas fijas, sin ninguna parte móvil por motivos de procesamiento de la información, para análisis de superficies móviles, se utiliza el sistema SADA.

4.1.4. Método de ubicación SADA (Small Aperture Directional Array)

Proporciona directividad en la información espectral en función de la posición alrededor del modelo analizado. El espaciamiento de la matriz se mantiene pequeño con la intención de mantener todos los micrófonos en la misma directividad de la fuente, independientemente de la elevación o posición azimuth del modelo (Thomas F. Brooks, 1999).

El sistema SADA consiste de un número máximo de micrófonos de 33, ubicados en 4 círculos irregulares de 8 micrófonos dentro de una pared plana, correspondiente al centro de la matriz, cada círculo debe tener un máximo radio de 11 metros, teniendo un aumento de 5.25% sobre la superficie máxima implementado en el sistema LADA, como se evidencia en la gráfica de la *Figura 31* elaborada a partir de los datos mostrados en la *Tabla 14*.

Tabla 14 Coordenadas de los micrófonos, sistema SADA.

# Mic	X(in)	Y(in)	# Mic	X(in)	Y(in)
1	0.00	0.00	18	0.00	-1.80
2	0.00	-0.45	19	1.37	-1.37
3	0.34	-0.34	20	1.80	0.00
4	0.45	0.00	21	1.37	1.37
5	0.34	0.34	22	0.00	1.80
6	0.00	0.45	23	-1.37	1.37
7	-0.34	0.34	24	-1.80	0.00
8	-0.45	0.00	25	-1.37	-1.37

9	-0.34	-0.34	26	-1.80	-3.60
10	0.00	0.45	27	-1.37	-2.75
11	0.69	-0.69	28	0.00	0.00
12	0.90	0.00	29	2.75	2.75
13	0.69	0.69	30	3.60	3.60
14	0.00	0.90	31	-2.75	2.75
15	-0.69	0.69	32	-3.60	0.00
16	-0.90	0.00	33	2.75	-2.75
17	-0.69	-0.69			

Fuente: (Humphreys, 1998)

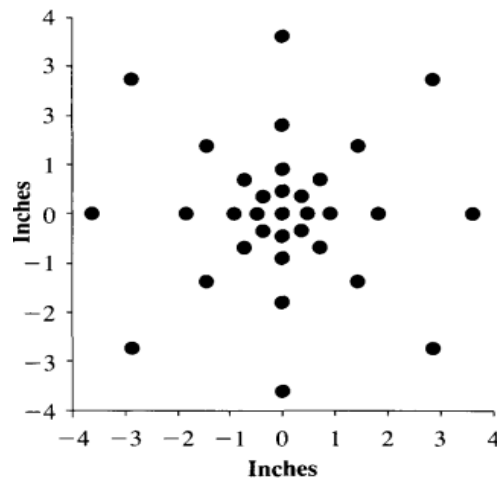


Figura 31 Coordenadas de los micrófonos, sistema SADA. (Humphreys, 1998)

Se identifica que configuración más aconsejable a implementar es la normatividad ISO 3745, ya que permite dar una introducción a la medición con modelos aerodinámicos esenciales como el ala infinita, cilindros y esferas. Pero para modelos aerodinámicos con una geometría más compleja, se recomienda el uso del sistema de distribución de micrófonos SADA, ya que emplea

un mayor número de micrófonos con una distribución en forma de espiral que permite que la toma de datos se adapte a la propagación de ruido ocasionado por la fuente emisora.

4.2. Materiales de Absorción acústica

4.2.1. Materiales compuestos

4.2.1.1. *Basotect*

En base a los artículos consultados, se encontró por ejemplo que la cámara anecoica que fue desarrollada por el ingeniero Sarradj, tenía una cubierta elaborada en un material llamado Basotect.

(Plastics Portal, 2016) Argumenta que Basotect es una solución flexible de celdas abiertas, hecha de resina de melanina, un polímero estable. Una característica de este material es su estructura tridimensional, que consiste en filamentos delgados que permiten ser fácilmente flexionados. La *Figura 32* muestra el índice de absorción de sonido del material en las presentaciones que es comercializado, las cuales varían en grosor. Este material es utilizado, por ejemplo, como amortiguador de sonido o el aislamiento térmico en edificios, coches y trenes.

Entre sus características encontramos:

- Alta capacidad de absorción de sonido
- Bajo peso
- Buenas propiedades de aislamiento térmico
- Flexibilidad a muy baja temperatura

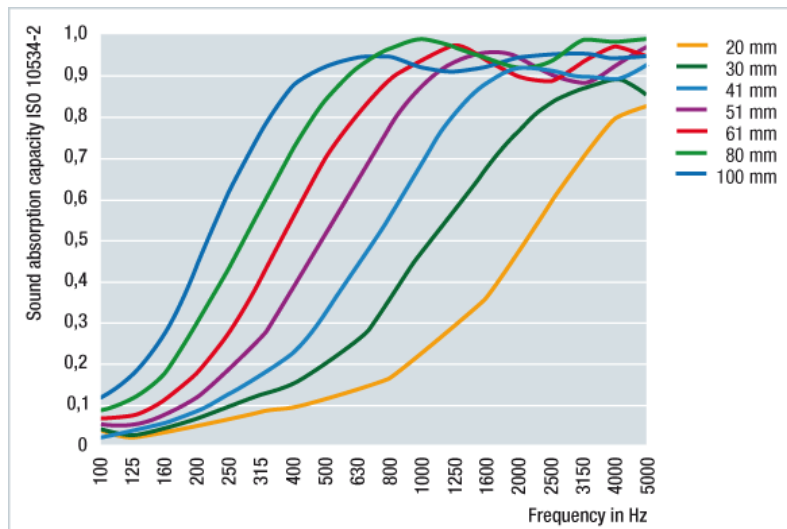


Figura 32 Índice de absorción de sonido de Basotect (Plastics Portal, 2016)

4.2.1.2. Material Fibersound

Es un material compuesto de láminas diseñadas especialmente para aplicación acústica, elaboradas en una combinación de fibra de vidrio de alta densidad y espuma fonoabsorbente flexible de poliuretano auto extingible, para uso en cielos rasos y sistemas de control acústico, en diferentes diseños geométricos: *Domes*, *Cubes*, *Waves* y *Pyramid*.

Puede ser instalado como cielo raso y sobre paredes, para aplicaciones en la industria, salas de grabación de radio y televisión, auditorios, escenarios deportivos, salones donde se desarrolle actividad electro-acústica, como cuartos de control de salas de grabación, cuartos o salas de reproducción de audio y video en general y adecuación de *Home Theaters*. La *Tabla 15* muestra el coeficiente de absorción del material Fiber Sound (Fibersound, 2009)

Tabla 15 Tabla de desempeño acústico material Fiber Sound

Producto	Coefficiente de absorción promedio
Fiber Sound Waves 35 mm	0,58
Fiber Sound Domes 50 mm	0,72
Fiber Sound Cubes 70 mm	0,91
Fiber Sound Pyramid 70 mm	0,91

Fuente: (Fibertex, 2016)

4.2.1.3. Material Fiber Acoustic

FiberAcoustic es una línea de productos de alto rendimiento acústico, cada uno con propiedades únicas y sonido de absorción de rendimiento para una amplia gama de aplicaciones.

El espacio detrás de FiberAcoustic es esencial para el rendimiento acústico, ya que controla la frecuencia a la que se obtiene la máxima absorción de sonido (Figura 33). Un amplio espacio proporciona una absorción a bajas frecuencias; espacio estrecho proporciona una absorción a altas frecuencias.

Cuando una onda de sonido ha entrado en la superficie, la impedancia acústica de este material garantiza que las ondas de sonido se encapsulan en el espacio detrás. La energía de sonido se disipa como resultado del choque de las ondas sonoras entre una superficie sólida y las celdas de FiberAcoustic. (Fibertex, 2016)

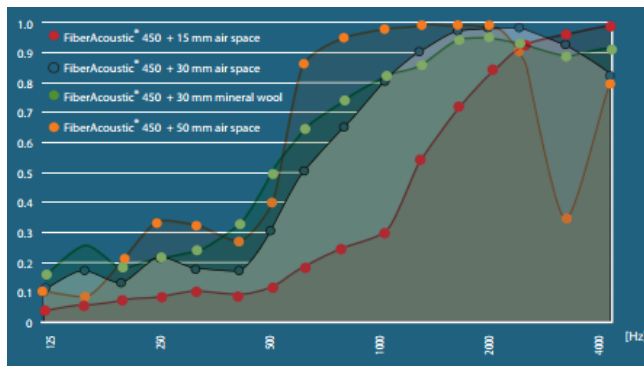


Figura 33 Coeficiente de absorción de sonido de la línea FiberAcoustic. (Fibertex, 2016)

4.2.2. Materiales de uso cotidiano

Es un conjunto de elementos que se utilizan de distintas tareas de construcción y/o otras actividades específicas, según su proceso de fabricación obtienen la característica de absorción acústica, el cual permite que sean considerados como base para llevar a cabo el acondicionamiento acústico en un recinto, en la *Tabla 16* se muestra el coeficiente de absorción de distintos materiales de uso cotidiano en frecuencias de octava.

Tabla 16 Coeficientes de absorción de diferentes materiales

Material	Coeficiente de absorción (a) a la frecuencia					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón Pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso 12mm a 10 cm	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Madera en paneles (a 5cm de la pared)	0,3	0,25	0,2	0,17	0,15	0,1
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,5	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,1
Alfombra de lana 1,2kg/m ²	0,1	0,16	0,11	0,3	0,5	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m ²	0,17	0,18	0,21	0,5	0,63	0,83
Cortina 338 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Espuma de poliuretano - 35mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,9	0,97
Espuma de poliuretano - 50 mm	0,15	0,25	0,5	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano - 75 mm	0,85	0,97	0,99	1	1	1
Lana de vidrio (fieltro 14kg/m ³) 25 mm	0,15	0,25	0,4	0,5	0,65	0,7
Lana de vidrio (fieltro 14kg/m ³) 50 mm	0,25	0,45	0,7	0,8	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35kg/m ³) 25 mm	0,2	0,4	0,08	0,9	1	1
Lana de vidrio (panel 35kg/m ³) 50 mm	0,3	0,75	1	1	1	1
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04
Panel cielorraso - 19 mm		0,8	0,71	0,86	0,68	
Panel cielorraso - 4 mm		0,7	0,61	0,7	0,78	

Fuente: (Llinare J.A. Llopis, 1991)

4.3. Materiales de aislamiento acústico

Aislar acústicamente supone proteger un recinto contra la penetración de sonidos que interfieran la actividad que se planea realizar, mediante el recubrimiento de la zona que se desea proteger, esto se logra con la implementación adecuada de materiales.

Los materiales que disponibles para realizar el aislamiento acústico son:

- El plomo es el mejor aislante de todos ya que aísla del sonido y de las vibraciones. Sin embargo actualmente está prohibido su utilización, porque se utilizan láminas pesadas y flexibles fabricadas a base de caucho, asfalto, betún, etc.
- Los materiales usados generalmente en la construcción como hormigón y acero por ejemplo, son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser buenos aislantes gracias a que se rigen por la ley de masas.
- Las cámaras de aire (un espacio de aire hermético) entre paredes. Si se agrega, además material absorbente en el espacio entre los tabiques (celulosa, lana de roca o lana de vidrio), el aislamiento mejora notoriamente. Para un efectivo aislamiento acústico, apenas es importante la densidad del material absorbente instalado en la cámara. Lo que es esencialmente relevante es que la resistividad al flujo de aire (AFr) de dicho material sea mayor de 5 kPa.s/m², cumpliendo este parámetro se obtienen los mismos resultados de aislamiento acústico independientemente de la densidad del material utilizado.
- El caucho y los elastómeros son materiales capaces de amortiguar el sonido.

4.3.1. Materiales compuestos:

Material amortiguante-absorbente A1: compuesto de fibras textiles entrelazadas entre ellas por resinas especiales, que proporcionan una estructura porosa con una gran capacidad absorbente y vibratoria, en función de su espesor puede presentar características absorbentes y anti vibratorias variables.

Vibrocell: es un material compuesto por una lámina de poliuretano expandido absorbente (Acusticell), dotado de una gran capacidad absorbente y de un estrato de material anti-vibratorio con capacidades de amortiguación (Damp).

En consecuencia este compuesto constituye una solución simple para dos problemas diferentes al actuar como absorbente y amortiguante. Se encuentra disponible en versión autoadhesiva, siendo de fácil aplicación en superficie curvas. La capa absorbente puede ser suministrada en distintos espesores y acabados superficiales.

Lamina acústica aislante LA: compuesto bituminoso producido con aditivos especiales, flexibles y pesados, que lo dotan de las características adecuadas para la reducción de vibraciones de superficie, por su densidad y flexibilidad la lámina acústica aislante es un elemento esencial para el refuerzo en el aislamiento de cualquier tipo de conductos de fluidos (tuberías o canales de ventilación), reduciendo notablemente el ruido transmitido hacia el exterior.

Aislante Greenglue: compuesto formado por material viscoso y elástico indicado para colocar entre placas de yeso laminado, consiguiendo altos índices de aislamiento y amortiguación de ruidos, indicado tanto para paredes como para techos; es de aplicación rápida y se aplica mediante el uso de pistola inyectora. Cuenta con un tiempo de aplicación de 30 min (Max.), el secado total se produce entre 7 y 10 días.

Lamina acústica LAMAC: aislante libre de asfaltos, aplicado en conductos de fluidos a canales de ventilación. También puede ser complemento ideal en el diseño de paneles multicapa tipo sándwich

En la *Tabla 17* se muestran las características técnicas de los materiales aislantes mencionados.

Tabla 17 Características técnicas de materiales aislantes

Material	Características
Material amortiguante-absorbente A1	Densidad : 80 Kg/m ³ Espesor : 15 a 18 mm Formato: 1x50 mm
Vibrocell	Formato : 1000 x 1400 mm Amortiguación: 75 dB/seg Espesor Damp : 1,5 mm Espesor Acusticell: 6,13,19 y 15 mm Peso: 1.6 Kg/m ²
Lamina acústica aislante LA	Tipos : LA-3,5, LA-5, LA-10 Espesor: 2,3 y 5 mm Peso: 3,5 , 5 y 10 Kg/m ² Formato LA-3,5 : Rollos de 1000 x 7000mm y planchas autoadhesivas de 1400 x 1000mm Formato LA-5 y LA-10: Rollos de 1000 x 5000 mm y planchas autoadhesivas de 1400 x 1000mm
Greenglue	Color : verde claro Olor: leve temporalmente. Contenido del tubo: 828 ml/tubo Rendimiento: aproximadamente 2 m ² por tubo. Presentación: cajas de 12 tubos
LAMAC	Espesor: 1,7 mm Peso : 3 Kg/m ² Aislamiento acústico : 20 dB Formato: 1000 x 7000 mm

Fuente: (Carlos, 2011)

4.4. Cámara semianecoica

Debido al material del que se encuentra hecha la superficie sobre la que se encuentra el túnel de viento, el acondicionamiento requerido para dicho espacio es el desarrollo de una cámara semianecoica, en el cual se considera como objeto de prueba la sección de pruebas del túnel de viento de la Fundación Universitaria los Libertadores de 470 mm x 675 mm x 1400 mm. Se denominan dimensiones útiles porque son entre puntas de cuña, es decir, que las dimensiones incluyendo el tratamiento absorbente de las paredes son mayores. Según la norma ISO 3745 la profundidad teórica del tratamiento absorbente es de $\lambda/4$, por las dimensiones son:

Para el cálculo de la longitud de onda con la ecuación (9) se denomina como la frecuencia de corte es de 250 Hz. con lo estipulado en la norma ISO 3745 la cual nos da como resultado una longitud de onda de 1,367 m.

$$L = 1,4 + 1.367/2 + 2 = 4,083[m] \quad (39)$$

$$W = 0.675 + 1.367/2 + 2 = 3.363 [m] \quad (40)$$

$$H = 0.470 + 1.367/2 + 2 = 3.153 [m] \quad (41)$$

Dimensiones útiles totales de la cámara semi-anechoica

Profundidad aproximada de la cuña ($\lambda/4$)

$$\lambda/4 = 1,367/4 = 0,341 m \quad (42)$$

$$L' = 3.303 + 0.341 * 2 = 4,8 [m] \quad (43)$$

$$W' = 3.363 + 0.341 * 2 = 4,5 [m] \quad (44)$$

$$H' = 3.153 + 0.341 * 2 = 3.8 [m] \quad (45)$$

La dimensiones totales 4,8 x 4.5 x 3.8 m, pero debido a longitud del túnel, el largo debe ser modificado a 10 m, el cual no afecta las condiciones de aislamiento y/o absorción acústica. En la Figura 34 puede observarse un esquema de las dimensiones.

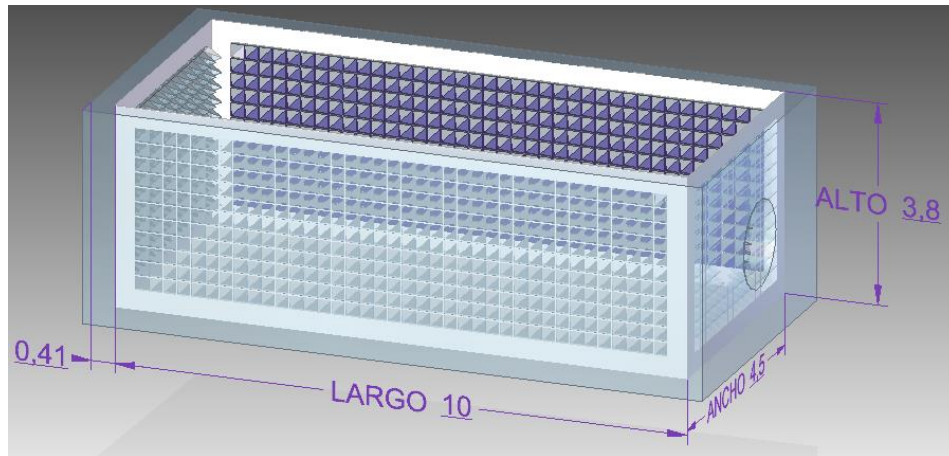


Figura 34 Dimensiones de la cámara Semi-Anecoica. Elaboración propia

4.4.1. Selección de materiales para aislamiento acústico de la cámara

El éxito en el diseño acústico de la cámara semianecoica radica en la elección de los materiales más adecuado para utilizar como revestimiento del mismo con objeto de obtener tiempos de reverberación óptimos.

Se seleccionó los siguientes materiales de la Tabla 16 y Tabla 17 para el aislamiento de la cámara semianecoica:

- Ladrillo visto pintado
- Vibrocell.

- Malla metálica.
- Espuma de poliuretano.
- Lámina de Yeso.

En la Figura 35 se muestra el espesor y la ubicación de cada uno de los materiales para llevar a cabo un aislamiento óptimo.

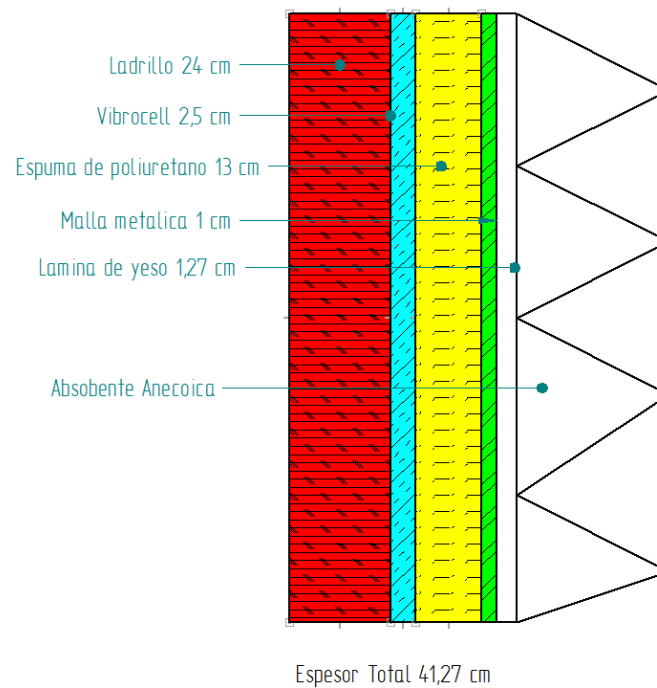


Figura 35 Configuración de la estructura de aislamiento y acondicionamiento acústico

Elaboración propia

4.4.2. Diseño de la cuña para el acondicionamiento acústico

Las dimensiones de la cuña están determinadas por la frecuencia de cortes, es decir la frecuencia a partir de la cual la sala tenga un comportamiento anecoico, al cual las reflexiones en los cerramientos sean nulas o imperceptibles. Según los estudios realizados por Beranek, la profundidad total de la cuña debe ser aproximadamente $\frac{1}{4}$ de la longitud de una onda,

estandarizada a 250 Hz a temperatura y presión estándar (Linares & Llopis, 1996) teniendo en cuenta que la ciudad de Bogotá tiene una temperatura promedio de 19°C y aplicando la ecuación (14), se obtuvo que la velocidad de propagación del sonido es de 342.4 m/s .

Así que la longitud de la cuña será la siguiente:

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{342.4 \text{ [m/s]}}{250 \text{ Hz}} = 1,37 \text{ [m]} \quad (46)$$

$$h = \frac{1}{4}\lambda = 34,25 \text{ [cm]} \quad (47)$$

La medida de la de la cuña no afectara la efectividad de la cámara, como en el caso de su altura está directamente proporcional con la frecuencia de la cámara. Como se puede evidenciar en la Figura 36, se propone una base de 23,5 x 23,5 cm con esta medida, el peso y la altura de la cuña no se verán afectados por inestabilidad y/o que pueda romperse, esto se dedujo con los datos de la cuña plasmados en el documento del Florida Center for Advanced-Aero Propulsion (FCAAP).

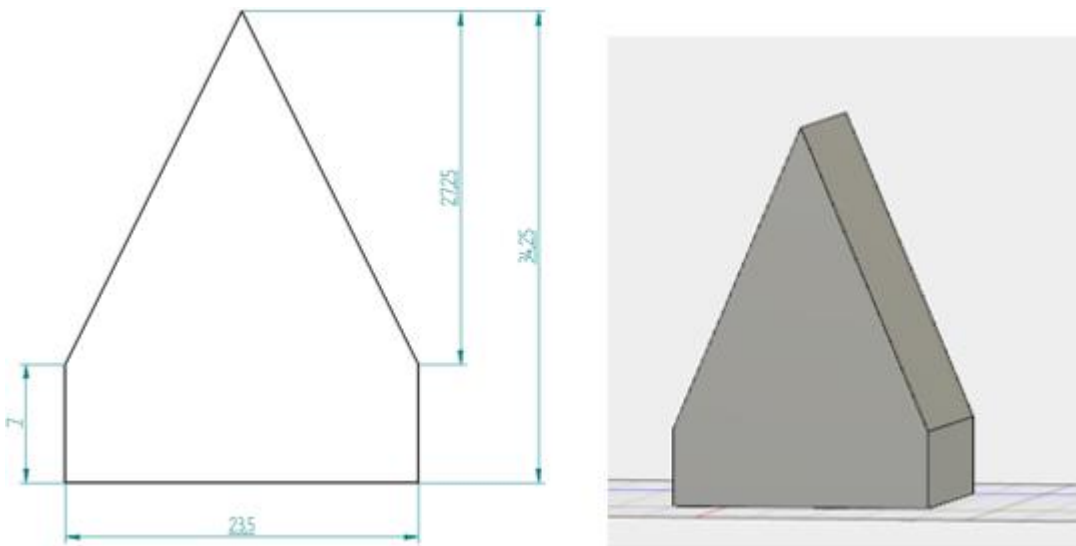


Figura 36 Dimensiones de la cuña.(Elaboración propia)

El material elegido para la construcción de las cuñas es la espuma de poliuretano, el cual tiene una alta eficiencia en frecuencias medias y altas, en donde coinciden las longitudes de onda con el espesor de la cuña, lo cual le permite tomar comportamiento de trampa de sonido, en donde el sonido que incide sobre la superficie de la cuña es reflejado varias veces en esa cuña y en la contigua. Esta forma de cuña da como resultado, un aumento de la superficie efectiva de tres veces o más, tal como se muestra en la *Figura 37*. (Linares & Llopis, 1996)

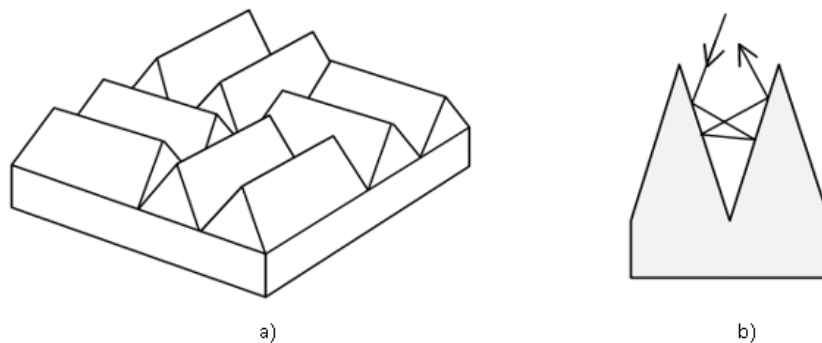


Figura 37 a) Terminación superficial de las cuñas anecoicas.

b) Mecanismo por el cual las cuñas anecoicas logran absorción sonora (Waes, 2010)

4.4.3. Puerta

Para el mecanismo de la puerta se propone un sistema de rejilla con una puerta con marco de madera, la puerta en forma de rejilla estará elaborada de varillas delgadas de metal, en el cual estarán sostenidas las cuñas ya que el momento de abrir la puerta de la cámara, no se podrá abrir con todo y cuñas debido a que éstas pueden ocasionar interferencias con el marco de la puerta y no habrá suficiente espacio para ingresar a la cámara, es por el cual la puerta en forma de rejilla

se abrirá hacia el interior para poder ingresar y no maltratar las cuñas, este sistema es descrito en la Figura 38.

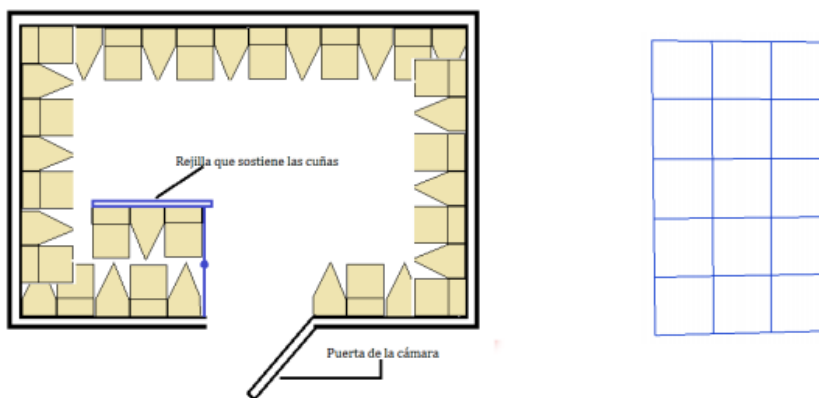


Figura 38 Configuración de rejilla para las cuñas. (Perez de la Fuente & Solis Ramirez, 2015)

La puerta estará formada por un marco de madera de 30 cm de ancho sobre el cual estará montado una estructura por placas de acero debido su buena reflexión, es decir refleja la mayor partes del sonido impidiendo que este entre en el recinto o salga de él, procedida de un panel de madera aglomerada y espuma de poliuretano como absorbente. Terminando por un panel de madera aglomerada y fibra de vidrio, las medidas finales de la puerta serán 2 x 1,30 x 0,30 m. Como se muestra en la Figura 39

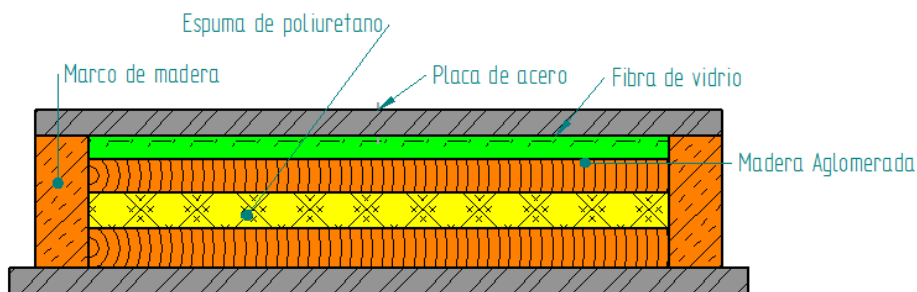


Figura 39 Configuración propuesta para elaboración de la puerta.

En la Tabla 18 se denota los coeficientes de absorción de cada material utilizado en la puerta.

Tabla 18 Coeficientes de absorción de sonido por bandas de octava de los materiales de la puerta interior

<i>Materiales</i>	<i>Espesor</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>
Madera aglomerada	5 cm	0,3	0,52	0,5	0,55	0,58	0,63
Placa de acero	5 cm	0,13	0,22	0,24	0,32	0,38	0,42
Madera Pino	8 cm	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Espuma de poliuretano	5 cm	0,15	0,25	0,5	0,94	0,92	0,99
Fibra de vidrio	5 cm	0,30	0,50	0,80	0,90	0,80	0,75

Fuente: (Beranek & Sleeper, 1990)

4.4.4. Análisis de la cámara semianecoica mediante la teoría estadística

Mediante el modelo de la teoría estadística, se realiza el análisis de reverberación de la cámara. La reverberación es un factor indispensable en el acondicionamiento acústico ya que determina la permanencia del sonido después de suprimir la fuente acústica que lo produjo. Se mide por medio del tiempo de reverberación, que es el tiempo que tarda en atenuarse la energía sonora en el interior de la cámara.

Para determinar el tiempo de reverberación en el diseño utilizamos la fórmula de Sabine (Linares & Llopis, 1996) que se define como:

$$TR = \frac{0.161V}{A} \text{ [seg]} \quad (48)$$

Donde V es el volumen local medido en m³, A es la absorción loca medida en m².

Para condiciones reales, el coeficiente promedio de absorción sonora se encuentra calculado en un valor relativo del área de cada unidad mediante la fórmula:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (49)$$

Donde α : refiere al coeficiente de absorción promedio de la cámara, S_1, S_2, \dots, S_n , son las áreas de las distintas unidades no uniformes; $\alpha_1 S_1, \alpha_2 S_2$, son las absorciones de cada unidad, S es el área total de todas las superficies de la cámara.

Dependiendo de la absorción acústica promedio de la cámara, es decir, que si la cámara es muy absorbente o muy reverberante, se analiza bajo las siguientes condiciones:

$$A = S \cdot \bar{\alpha} \quad \text{si } \bar{\alpha} < 0,2 \text{ (Reverberante)} \quad (50)$$

$$A = -S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad \text{si } \bar{\alpha} > 0,2 \text{ (Absorbente)} \quad (51)$$

4.4.5. Cálculo de superficies de la cámara semianecoica

Determinación del área de las cuñas, para llevar a cabo el cálculo se tomara la superficie de la cuña como un tetraedro regular:

Basándose en las dimensiones expuestas en la Figura 36, se determinan los siguientes datos:

$$\text{Hipotenusa} = \sqrt{23,5^2 + 34,4^2} = 41,66 \quad (52)$$

$$\text{Area}_{\text{cara1}} = \frac{bxh}{2} = 404,2 \text{ cm}^2 \quad (53)$$

$$\text{Area cuña} = 404,2 * 4 = 2021 \text{ cm}^2 \quad (54)$$

$$\# \text{ De cuñas de la cámara: } 1687 \quad (55)$$

$$\text{Superficie total} = 340,94 \text{ m}^2 \quad (56)$$

Seguidamente se determina las superficies del piso y los cuadros localizados en los vértices de las paredes, considerando las respectivas medidas expuestas en la Figura 34 , teniendo en cuenta el aislamiento acústico.

$$\text{Pared frontal} = 4,5 * 0,34 * 2 = 6,12 \text{ m}^2 \quad (57)$$

$$\text{Pared lateral} = 10 * 0,34 * 2 * 2 = 13,5 \text{ m}^2 \quad (58)$$

$$\text{Verticales} = 2,83 * 0,40 * 2 * 4 = 9,06 \text{ m}^2 \quad (59)$$

$$\text{Superficie total} = 29,24 \text{ m}^2 \quad (60)$$

4.4.5.1. Superficie del piso

$$S_p = 10 * 4,5 = 45 \text{ m}^2 \quad (61)$$

$$S_T = 340,94 + 29,24 + 45 = 415,18 \text{ m}^2 \quad (62)$$

4.4.6. Tiempo de reverberación en bandas de octava

Para el cálculo del tiempo de reverberación, se toma primordialmente el coeficiente de absorción del material con el cual se fabricara la cuña (para nuestro caso espuma de poliuretano) y el recubrimiento del piso (tapete de goma) denotadas en la Tabla 16 y aplicando las ecuaciones (48), (49) y (50):

$$\bar{\alpha}_{f125 \text{ Hz}} = \frac{0,855[340,94 \text{ m}^2 + 29,24 \text{ m}^2] + 0,04[45 \text{ m}^2]}{415,18} = 0,76 \quad (63)$$

$$A = -S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad \text{si } \bar{\alpha} > 0,2 \text{ (Absorbente)} \quad (64)$$

$$A = -415,18 \cdot \ln(1 - 0,76) = 592,52 \text{ m}^2 \quad (65)$$

$$TR = \frac{0,161 * 157,5 \text{ m}^3}{592,52} = 0,042 \text{ s} \quad (66)$$

En la Tabla 19, se exponen, el coeficiente de absorción a las diferentes bandas de octava, con la descripción de la superficie rectangular de la sala del túnel de viento y con el número de cuñas necesarias para la cámara.

Tabla 19 Coeficiente de absorción y tiempo de reverberación de los componentes y superficie de la sala

<i>Elemento</i>	<i>α</i>	<i>S (m²)</i>	<i>$\alpha * S$</i>
<i>125 Hz</i>			
Cuñas	0,855	340,94	291,50
Paredes	0,855	29,24	25
Piso	0,04	45	1,8
<i>250 Hz</i>			
Cuñas	0,973	340,94	331,734
Paredes	0,973	29,24	28,458
Piso	0,04	45	1,8
<i>500 Hz</i>			
Cuñas	0,99	340,94	337,53
Paredes	0,99	29,24	28,94
Piso	0,99	45	4,05

1000 Hz			
Cuñas	1	340,94	340,94
Paredes	1	29,24	29,24
Piso	0,12	45	5,4
2000 Hz			
Cuñas	1	340,94	340,94
Paredes	1	29,24	29,24
Piso	0,03	45	1,35
4000 Hz			
Cuñas	1	340,94	340,94
Paredes	1	29,24	29,24
Piso	0,1	45	4,5

Autoría Propia

Los datos expresados en la Tabla 20 son obtenidos a partir el cálculo de tiempo de reverberación (TR), teniendo en cuenta los datos de la Tabla 19 y aplicando las ecuaciones (48), (49) y (50) para cada banda de octava.

Tabla 20 Tiempo de reverberación en bandas de octava

<i>Frecuencia [Hz]</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>
Sumatoria $\alpha *S$	317,8	362	370	375,58	371,53	374,68
S total (m^2)	415,18	415,18	415,18	415,18	415,18	415,18
(α) promedio	0,76	0,871	0,887	0,9046	0,8946	0,902
Absorción de la sala (m^2)	592,52	850,264	905,36	975,53	934,15	964,37
Volumen de sala (m^3)	157,52	157,52	157,52	157,52	157,52	157,52
<i>TR (s)</i>	<i>0,042</i>	<i>0,02982</i>	<i>0,02800</i>	<i>0,02599</i>	<i>0,0271</i>	<i>0,02629</i>

Autoría Propia

La reverberación es un fenómeno sonoro derivado de la reflexión del sonido; el cual consiste en una ligera prolongación del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo, este indica el tiempo transcurrido desde que se produce un determinado sonido, hasta que la intensidad de ese sonido disminuye 60 dB de la energía que recibe el receptor. La cámara semianecoica diseñada, según los datos calculados aplicando el análisis mediante la fórmula Sabine (Linares & Llopis, 1996) tiempo de reverberación (TR) se encuentra en un rango entre 0,042-0,02629 s, lo cual define que la calidad acústica de la sala es óptima debido a que hay un menor tiempo de propagación de la onda sobre el recinto, ya que puede ocasionar que las mediciones acústicas obtenidas por los micrófonos no se vean afectadas por dicha perturbación que se encuentra en el entorno, en la *Figura 40* se expresa decrecimiento que produce la cámara sobre una perturbación acústica a diferentes bandas de frecuencia, en lo que permite definir que la cámara tiene un efecto reverberante a un tiempo menor que 1 segundo.

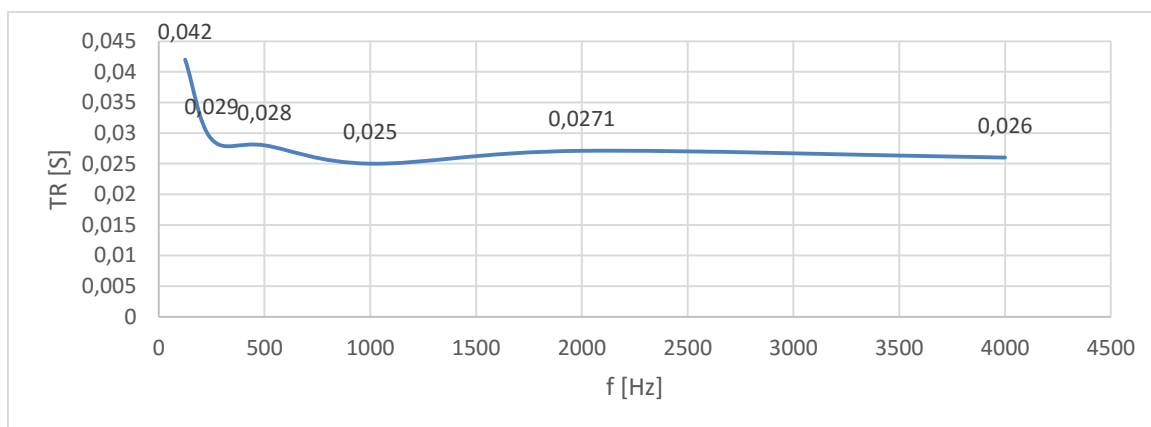


Figura 40 : Tiempo de reverberación a frecuencias de octava. Autoría propia

4.4.7. Iluminación

Debe existir una mínima cantidad de objetos ajenos al túnel de viento, así que se debe prevenir que no haya una cantidad considerable de lámparas dentro de ella debido a que irradiar

calor y ruido que afecte las pruebas, también se debe evitar que haya conductos pues estos podrían causar resonancia a ciertas frecuencias. Se propone que dentro de la cámara solo exista un conducto vertical delgado en el techo por donde salgan los cables necesarios para instalar la iluminación, el resto de la instalación sería externa a través de canaletas.

El conducto por donde se ubica los cables puede ser un medio por el cual puede ingresar sonidos indeseables, como se evidencia en la *Figura 41*, las tuberías utilizadas deben ser aisladas con sistemas anti-vibratorios de caucho u otro material aislante como el *Basotect* de 61 mm en formar *gasket* que permitirá evitar algún tipo de resonancia. Una de las opciones más viables es la iluminación por medio de lámparas LED, porque presentan un ahorro en energía eléctrica, la reducción de calor dentro de la cámara. Los tubos fluorescentes presentan ventajas similares, sin embargo en ocasiones estos pueden producir ruidos que perjudicarían en gran medida alguna prueba.

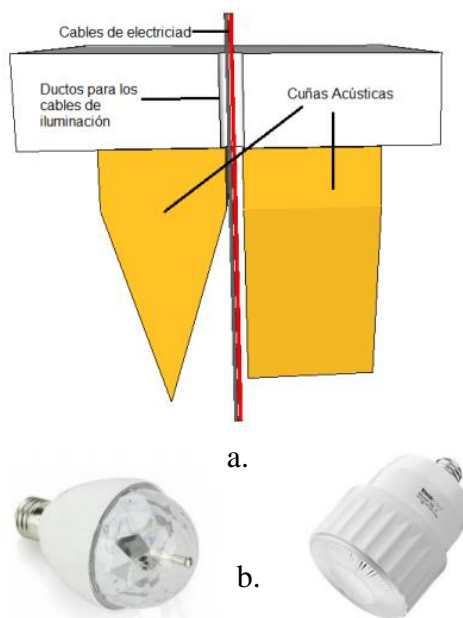


Figura 41 a. Corte del techo de la cámara anecoica, con un orificio para iluminación,

b. Ejemplo de lámparas LED (Perez de la Fuente & Solis Ramirez, 2015)

4.4.8. Temperatura y humedad

La temperatura de la cámara debe permanecer dentro de un rango de 15°C a 30°C de este modo se puede despreciar las variaciones de humedad que se puede llegar a producir.

4.5. Sistema de adquisición y análisis de datos

El objetivo principal de la aplicación del túnel de viento aeroacústico es obtener registros de datos de calidad sin complicaciones en las pruebas, con facilidad de uso y a un tiempo oportuno, en el mercado encontramos una variedad de empresas que ofrecen distintas configuraciones para la adquisición de y procesamiento de los datos, tales como:

4.5.1. Arquitectura del sistema de National Instrument

La arquitectura del sistema de datos acústicos diseñado por National Instrument compone un chasis PXI-1042Q(diseñado para bajas emisiones acústicas de 43 dB) con capacidad de 8 slots, al cual irán acopladas dos placas de adquisición de datos PXI-4496. Cada placa posee 16 canales analógicos de 24 bits, operando con un rango dinámico de 114 dB, tasa de muestreo de 204,8 kS/s por canal (1 [kS/s]= 1000 muestras por segundo), equipados con un filtro *anti-aliasing* (filtro pasa-bajo que limpia la señal antes de la conversión analógica-digital, elimina toda presencia de la frecuencias superiores a $F_e/2$, (Instruments, s.f.) donde F_e es la frecuencia de muestreo). Su corriente de polarización es de 4 mA *IEPE* (*Integrated Electronic Piezoelectric*) y pudiendo efectuar lectura de *TEDS* (*Transducer Electronic Data Sheet*) para micrófonos y acelerómetros, por ejemplo, almacena la información técnica del sensor, tal como el número de serie y la sensibilidad. La interface PXI-PCO8336 es la responsable de la transmisión de datos, por fibra óptica, entre el chasis PXI-1042Q y el controlador PXI-8354.



Figura 42 Hardware de National Instruments a. PXI-1042Q b. PXI-4496 (Instruments, s.f.)

La máxima tasa de transmisión del PXI-PCI 8336 es de 132 MB/s, y 78 MB/s, el controlador PXI-8354 está equipado con un procesador Intel Core i7-860 Quad-core de 2.8 GHz, 16 GB de memoria RAM y cuatros discos solidos SATA HDDs con 500 GB de almacenamiento cada uno, en la Figura 43 se muestra la arquitectura del sistema de adquisición de datos con el chasis PXI-1042Q y la placa PXI-4496.



Figura 43 Controlador PXI-8354 (Instruments, s.f.)

4.5.2. Sistema Brüel & Kjær

La aplicación se organiza con una secuencia de fichas que proporcionan orientación del flujo de trabajo a través de las diversas etapas de configuración, calibración, registro, análisis, gestión de datos y elaboración de informes.

La interfaz de usuario del sistema proporciona sin sentido el acceso a la información del sistema de prueba vital y control de la grabadora, como se puede evidenciar en la Figura 44

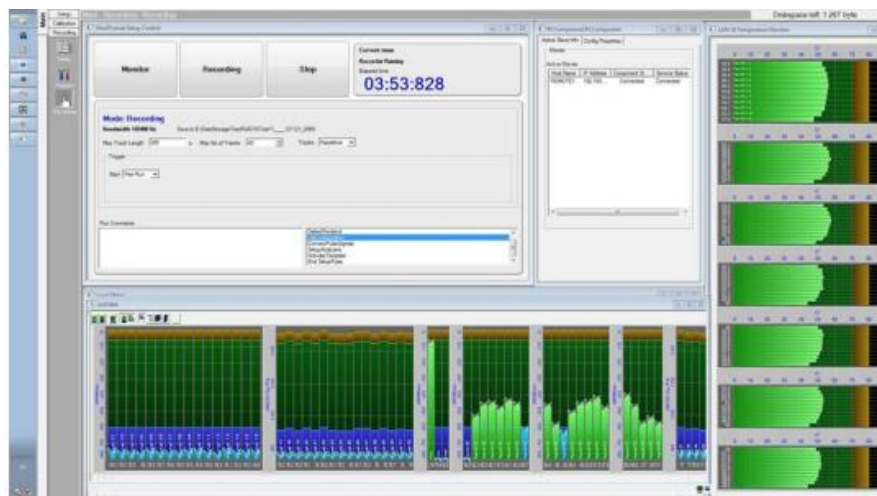


Figura 44 Interfaz de usuario del sistema de prueba acústica túnel de viento.

(Kjær, 2014)

Durante la prueba de túnel de viento, los datos acústicos se graban en el disco para análisis secundarios. Durante la grabación real, que puede ser un beneficio para monitorizar ciertos canales de adquisición individuales, para suministrar información instantánea sobre la calidad del ensayo y la validez de los datos.

Los datos de prueba se pueden analizar en tiempo real a través de una estación de monitoreo remoto que proporciona el nivel en tiempo real, el tiempo, la *FFT (Fast Fourier Transform)* y / o análisis de octava. Los datos de proceso del sistema de control del túnel de viento también se pueden mostrar, y un conjunto de canales acústicos perceptibles a través de auriculares.

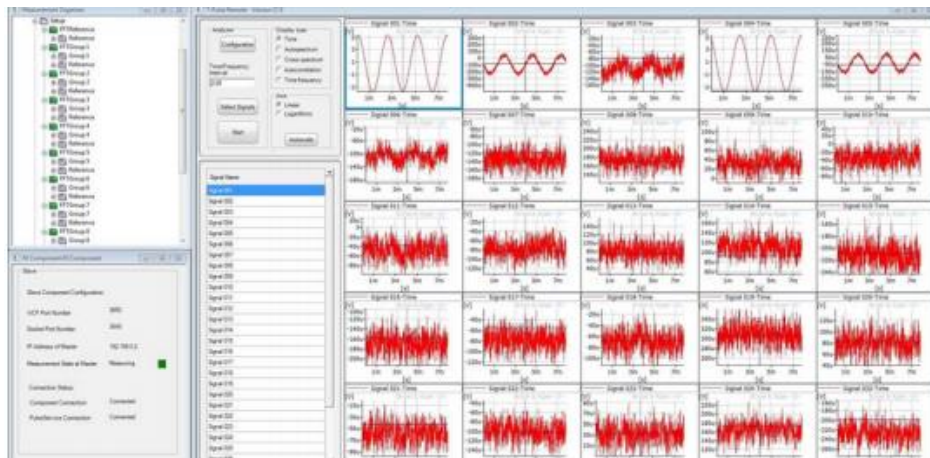


Figura 45 Interfaz del usuario que permite supervisión por medio de internet. (Kjær, 2014)

La información registrada puede analizarse utilizando el software de PULSE Reflex™. Este programa reúne una serie de herramientas de post procesamientos genéricos para análisis fuera de línea y el procesamiento de datos en tiempo real.

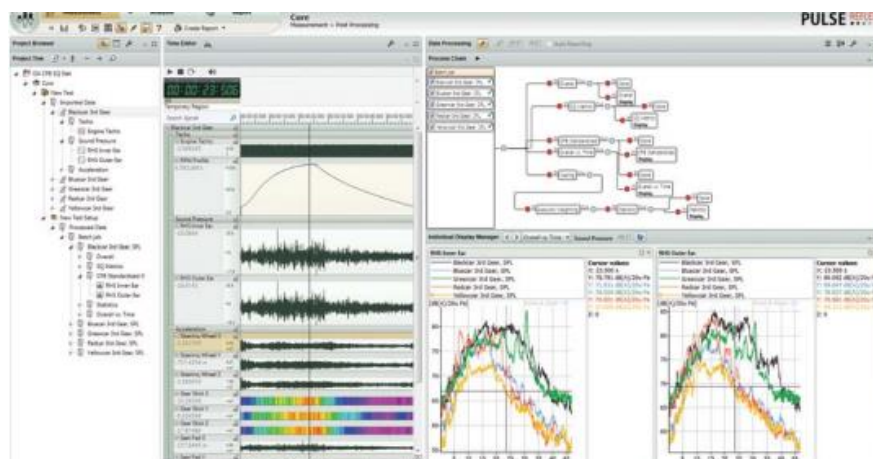


Figura 46 Programa de post procesamiento PULSE Reflex™ (Kjær, 2014)

El sistema de adquisición de datos modular LAN-XI se puede configurar para manejar fácilmente el gran número de canales que se encuentran típicamente en los sistemas de túnel de viento. La herramienta LAN-XI de adquisición de datos es un sistema versátil de hardware modular que se puede utilizar como un extremo delantero de un solo módulo autónomo, como

parte de una configuración de módulo de distribución, o se recoge en 5 o 11 módulos marcos, como se muestra en la Figura 47.

LAN-XI proporciona un sistema extremadamente flexible: escalable de 2 a más de 1000 canales, con un rango de frecuencia de hasta 204,8 kHz, y con una transferencia de datos sólo limitada por la capacidad de la estación de trabajo.

Cuando se utiliza en una arquitectura distribuida, los módulos LAN-XI se pueden colocar cerca o dentro del túnel de viento.

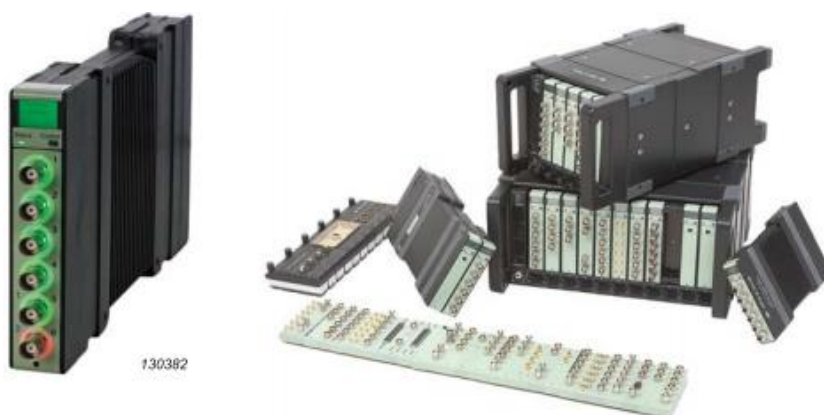


Figura 47 Sistema de adquisición de datos LAN –XI y módulos y unidades del panel frontal (Kjær, 2014)

4.6. Costos

4.6.1. Costo de los materiales que componen la puerta de la cámara

En la Tabla 21 se expresan los costos de los materiales requeridos para llevar a cabo la construcción de la puerta de la cámara según el diseño establecido en el numeral 4.4.3.

Tabla 21 Costos de materiales para elaboración de la puerta

<i>Material</i>	<i>Dimensiones [m]</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario [COP]</i>	<i>Precio total [COP]</i>
Madera aglomerada	1,20 x2,0 x0,019	4	55.600	222.400
Acero inoxidable	1,20 x2,0x0,05	2	185.000	370.000
Espuma de poliuretano	1,20x2,0x0,05	1	200.000	200.000
Fibra de vidrio	1,20 x2.0x 0.05	2	147.900	295.900
Marco de madera	0,08 x0,30x0,08	1	127.000	127.000
Malla de metal para la puerta de la cámara	1.2 x 2m	1	211.579	211.579
Total			1'426.879	

4.6.2. Costos de los materiales para el acondicionamiento acústico

Teniendo en cuenta el número de cuñas necesarias para el recubrimiento del área funcional de la cámara dentro de la cual se encuentra el túnel de viento, y la cantidad requerida del material Basotect para la cobertura de zonas donde no se pueden adecuar las cuñas por razones de espacio y seguridad respecto al mantenimiento del túnel, los costos para la elaboración del sistema de acondicionamiento acústico propuesto en el numeral 4.4.2 están expresados en la Tabla 22, en la cual se muestran las dimensiones, cantidad requerida y precio de cada uno de los materiales.

Tabla 22 Costos de materiales para el acondicionamiento acústico

<i>Material</i>	<i>Dimensiones [m]</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario COP</i>	<i>Precio total COP</i>
Espuma de poliuretano	1,20 x1,90x0,20	310	176.710	54'780.000
Basotect	1,20 x 0,60 x 0,03	47	40.275	1'893.000
Total			56'673.000	

4.6.3. Materiales para aislamiento acústico

El objetivo principal del aislamiento acústico es brindar un recubrimiento óptimo para evitar perturbaciones dentro del recinto de pruebas a la hora de llevar a cabo un proceso de adquisición de datos, para el cumplimiento de dicha labor se hace necesaria su fabricación con los materiales mencionados en el numeral 4.4.1; en la *Tabla 23* se especifica la cantidad de materiales requeridos y el costo de su adquisición.

Tabla 23 Costo de los materiales para aislamiento acústico

<i>Material</i>	<i>Dimensiones [m]</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario COP</i>	<i>Precio total COP</i>
Ladrillo	0,06x0,12x0,24	4550	950	4'322.500
Lamina Vibrocell	1 x1,4x0,0,25	42	113.164	4'752,800
Espuma de poliuretano	2 x 1,20x0,13	22	210.000	4'620.000
Malla metálica	1,2 x 2	7	211.579	1'269.474
Lamina de yeso	1,22 x 2,44x 0,0127	14	15.800	189.600
Total			15'154.374	

Sistema de adquisición de datos

Para la determinación del sistema de adquisición de datos se analizaron dos posibles sistemas, tomando como referencia el de la Universidad de São Paulo específicamente plasmado en el documento escrito por Filipe Ramos de “*Efeito Aeroacustico de Excresecencias Bidimensionais na Cova de um Eslate*” en el cual se caracteriza el sistema de medición de *National Instruments* para el análisis de ruido, al medir el nivel de presión acústica (SPL).

El segundo es el expuesto en artículo escrito por Sarradj denominado “*Acoustic and aerodynamic design and caracterizarion of small-scale aeroacoustic wind tunnel*”, en el que se describe el sistema de la empresa Brüel & Kjær; en la Tabla 24 y Tabla 25, se revela el costo de cada uno de los dos sistemas.

Tabla 24 Costo del sistema de National Instrument

<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>
Placa de adquisición de datos PXI-4492	2	18'636.000
Interface PXI-PCI8331	1	839.970
Controlador PXI-8354	1	14'675.000
Chasis PXI-1042Q	1	10'598.000
Software Labview	Licencia	20'390.000
<i>Total</i>		<i>65'138.970</i>

Fuente: (Instruments, s.f.)

Tabla 25 Costo del sistema de adquisición de datos Brüel & Kjaer

<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>
Placa adquisición de datos LAN - XI	4	48'600.000
Compartimiento de arquitectura distribuida	1	470.000
Software PULSE Reflex™	Licencia	27'780.000
<i>Total</i>		76'850.000

Fuente: (Brüel & Kjaer, 2016)

Teniendo en cuenta que la calidad de los sistemas de medición de datos es equivalente entre ambas compañías, se recomienda la adquisición del sistema de la empresa *National Instrument*, sin embargo es aconsejable adquirir o fabricar un sistema de compartimiento de arquitectura distribuida con el fin de disminuir costos en cableado del transductor de alta calidad, menor complejidad de configuración y errores de medida debidos a la reducción de infraestructura por cable y una mejor calidad de la señal.

4.6.4. Micrófonos

En la Tabla 26 se indica los costos de los micrófonos más adecuados de cada compañía para el cumplimiento de los requerimientos básicos para la toma de datos del túnel aeroacústico.

Tabla 26 Precio de Micrófonos

<i>Componente</i>	<i>Precio Unitario COP</i>
<i>Mems MP34DT01-M</i>	6.186
<i>G.R.A.S 26CB</i>	1'876.000
<i>Briel & Kjaer</i>	3'200.000

4.6.5. Mano de obra

Para la mano de obra del proyecto se consultan dos empresas, *Hierros Diseño S.A.S* y *A.C.I Proyectos S.A.S*, las cuales brindan diferentes servicios de análisis de planos y acompañamiento de la obra; el costo del servicio de cada compañía es expuesto en la Tabla 27.

Tabla 27 Mano de obra

<i>Empresa</i>	<i>Tiempo estimado</i>	<i>Precio COP</i>
<i>Hierros diseño S.A.S</i>	15 días	8'000.000
<i>A.C.I Proyectos S.A.S</i>	20 días	25'000.000

4.6.5.1. Selección de equipos y mano de obra

Conforme a los costos de los productos consultados y teniendo en cuenta las especificaciones en los equipos, se recomienda los modelos de artículos y mano de obra descritos en la Tabla 28.

Tabla 28 Empresas y materiales para adquisición de artículos

Equipo	Modelo recomendado	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Micrófonos	Mems MP34DT01-M	33	6.186	204.138
Adquisición de datos	National Instrument	1	65'138.970	65'138.970
Materiales para la construcción		Valor Total		
Acondicionamiento acústico		56'673.000		
Aislamiento acústico		15'154.374		
Puerta		1'426.879		
Mano de obra		Valor Total		
A.C.I Proyectos S.A.S		25'000.000		
Otros costos		Valor total		
Iluminación + cableado 60x60 (x2)		320.000		
Costo total del proyecto (COP)		163'917.361		

Se han elegido dichas opciones teniendo en cuenta como principal factor determinante, los costos de su adquisición, ya que a nivel industrial el desempeño y características que ofrece cada empresa son muy parejos entre sí; adicional a ello se recomienda la adquisición de un compartimiento de arquitectura distribuida para módulos de adquisición de datos o en su defecto, la fabricación de un elemento que cumpla el cumplimiento de dicha tarea. Para la mano

de obra, se ha elegido a la empresa A.C.I Proyectos S.A.S ya que ofrece el análisis previo de los planos por parte del personal adecuado para ello, lo que brinda mayor margen de seguridad para el desarrollo del proyecto.

4.7. Costo/beneficio

En los últimos años el campo de la Aeroacústica como línea de investigación ha tomado relevancia por cuestiones ambientales, militares, aeronáuticas etc. Teniendo en cuenta como eje central el índice de las fuerzas aerodinámicas que interactúan con un sólido asociado a las fluctuaciones de vorticidad que son la principal fuente de emisión de ruido. El túnel de viento que cuente con análisis aeroacústico es una gran herramienta para la investigación e innovación en este campo que ha tratado la problemática de mitigación de ruido en aeronaves desde los años 50 debido al uso emergente de motores a reacción en aeronaves comerciales y en vehículos que permitan mayor comodidad en el área urbana.

Al nivel global los estudios en esta materia en los últimos años ha tomado una mayor relevancia hasta tal punto que en bases de datos como ScienceDirect, AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), en la búsqueda de la palabra clave “Aeroacoustic” muestra un importante crecimiento en el número de artículos publicados cada año. Esto indica que la aeroacústica es una línea de investigación objetiva, dinámica y sobre todo emprendedora que ha cobrado importancia a nivel mundial en los últimos años a razón de que por medio de un análisis experimental pueda llevar a una solución mediática a distintos problemas que respectan a la industria en general. Como muestra de ello, la Figura 48 muestra el número de publicaciones realizadas respecto a dicho tema en los últimos años.

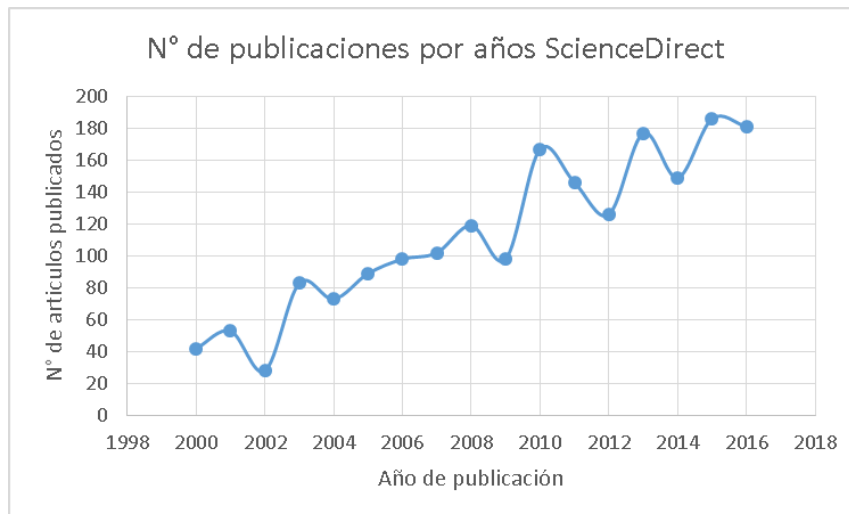


Figura 48 Número de publicaciones realizadas por año en la base de datos ScienceDirect

4.8. Conclusiones

Es factible llevar a cabo el desarrollo de éste proyecto en las instalaciones de la Fundación Universitaria los Libertadores, ya que los estudios realizados por el ingeniero Sarradj recomiendan que para un óptimo desempeño de la cámara semianecoica empleada con fines de análisis aeroacústicos, debe cumplirse con una frecuencia de corte del ambiente de 250Hz para dar cumplimiento a la norma establecida y dicha frecuencia es aplicable en el espacio predispuesto en las instalaciones de la universidad.

El diseño de la cámara semianecoica se asemeja lo mejor posible a los factores de diseño dispuestos por la norma ISO 3745, por lo cual la cámara cumple con las necesidades en el concepto de acondicionamiento para el desarrollo de análisis aeroacústico, fue un desafío acoplar los requerimientos establecidos por la norma en el espacio disponible con el que cuenta la universidad para la ubicación del túnel, teniendo en cuenta que habrá que hacer modificaciones y

refuerzos en la parte del tejado para poder acoplar la parte superior del recubrimiento de la cámara semianecoica.

Se recomienda la implementación de un compartimiento de arquitectura distribuida para los módulos de adquisición de datos, ya que representa un importante ahorro de costos en cableado del transductor de alta calidad, menor complejidad de configuración y errores de medida debidos a la reducción de infraestructura por cable y una mejor calidad de la señal como cables cortos reducen al mínimo el riesgo de la adición de ruido a los datos de medición

Teniendo en cuenta los distintos métodos en que se puede ubicar los micrófonos dentro de la sección de pruebas para llevar a cabo las mediciones, se sugiere la utilización de la configuración de la norma ISO 3745, ya que permite dar una introducción a la medición con modelos aerodinámicos esenciales como el ala infinita, cilindro y esfera. Pero para modelos aerodinámicos con una geometría más compleja, la utilización del sistema de distribución de micrófonos SADA, debido a la utilización número mayor de micrófonos con una distribución en formar de espiral que permite que la toma de datos se adapte a la propagación de ruido ocasionado por la fuente emisora, teniendo en cuenta las dimensiones de los micrófonos propuestos en la Tabla 28.

El sistema de aislamiento está diseñado con los principios de pared doble, que por sus características de cambio de medio permitió plantear el diseño con un espesor asequible y que no comprometiera el diseño de la cámara semianecoica.

Como es posible observar en la *Figura 49*, se sugiere que la sección del difusor y el ventilador, se encuentren por fuera de la cámara semianecoica, ya que el flujo de aire que produce el túnel de viento genera niveles de ruido considerables que pueden interferir en los datos arrojados por los micrófonos en las mediciones.

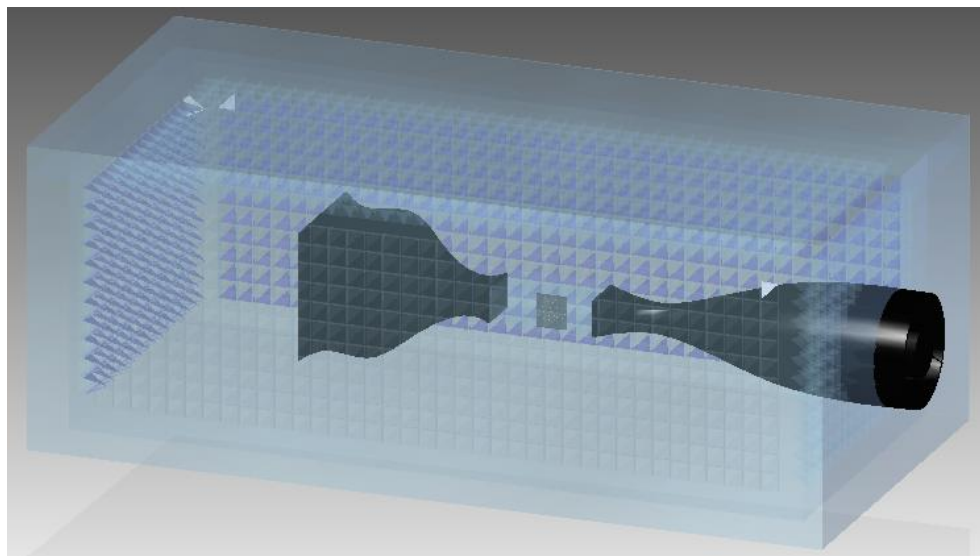


Figura 49 Diseño CAD de configuración recomendada.

4.8.1. Recomendaciones

La cámara semi-anechoica diseñada en el presente documento cumple con las pautas establecidas por la normatividad ISO, teniendo en cuenta que la cámara, según los cálculos del numeral 4.4.6 tiene un funcionamiento óptimo. Se recomienda seguir estudiando la eficiencia del acondicionamiento acústico con la ayuda de los programas ODEON que permite simular el comportamiento de una propagación sonora y ANSYS para análisis de ruido, tomando como fuente de emisión sonora la sección de pruebas

Los software propuestos en el sistema de adquisición de datos, son un factor fundamental para el post-análisis de la información, pero también tienen un precio elevado la adquisición de su licencia, tomando como referencia documentos que se consultaron a lo largo de la realización de este documento, se observó la utilización del programa MATLAB para la obtención de datos, se recomienda una investigación más a fondo iniciando con la función Welch (pwelch) para obtener fácilmente el espectro de radiación.

5. Referencias

- Antoni, C. (1998). *Diseño Acústico de Espacion Arquitectónicos*. España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Aristizábal, S. E. (2014 de Marzo de 2014). *Universidad Militar*. Obtenido de <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11805/1/Monograf%C3%ADa%20de%20Grado.pdf>
- Barlow, J. B. (1999). Low-speed wind tunnel testing. En J. B. Barlow, *Low-speed wind tunnel testing* (pág. 713). New York, USA: John Wiley & sons.
- Beranek, L. L., & Sleeper, H. P. (1990). *The Design and Construction of Anechoic Sound Chambers*. The journal of Acoustical Society of America.
- Brüel & Kjaer. (2016). *Brüel & Kjaer*. Obtenido de <https://store.bksv.com/pc-software/150-dirac-room-acoustics-software.html>
- Carlos, A. (2011). *Materiales Aislantes para Contruccion*. La Paz, Bolivia: EMI "Escuela Militar de Ingenieria".
- Correa, J. F. (09 de Marzo de 2010). *Epicos*. Obtenido de http://www.epicos.com/epcompanyprofileweb/content/aeronautica_avanzada/wind_tunnel.pdf
- Coz, T. J., & D'Antonio, P. (2004). *Acoustic absorbers and difusers*. London: Spon Press.
- Cunefare Kenneth, B. V. (2003). Anechoic Chamber Qualification: Traverse method, inverse square law analysis method, and nature of test signal. *JASA*, 881-892.

- Dobrzynski, W. (13 de Noviembre de 2007). *Research at DLR towards airframe noise prediction and reduction*. (R. Ewert, M. Pott-Pollenske, M. Herr, & J. Delfs, Edits.) Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/sci-hub.bz/science/article/pii/S127096380700123X>
- Dowling, A. (22 de Mayo de 2008). *The Royal Aeronautical Society*. Obtenido de http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2008_05_27_SilentAircraft.pdf
- Everest, F. A. (1989). *The Master Handbook of Acoustics*. Blue Ridge Summit: McGraw-Hill .
- Farrarons, R. (20 de NOVIEMBRE de 2010). *F1 AL DIA*. Obtenido de <http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
- Farrarons, R. (Noviembre de 2010). *F1 Al Día*. Recuperado el Enero de 2016, de <http://www.f1aldia.com/10680/tuneles-de-viento-ii.html>
- Fibersound. (Agosto de 2009). *Acustitienda*. Obtenido de http://www.acustitienda.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=8&category_id=3&option=com_virtuemart&Itemid=2
- Fibertex. (20 de Mayo de 2016). *Fibertex*. Obtenido de <http://www.fibertex.com/en-GB/business-areas/Acoustics/Theory/Pages/default.aspx>
- Fram. (7 de 2 de 2016). *Taller Actual*. Obtenido de <http://talleractual.com/informes-tecnicos/consejos-utiles/102-sabia-usted/720-los-automoviles-actuales-y-los-aspectos-aerodinamicos-6>
- G. Rodriguez, A. E. (2011). *Rediseño de las camaras anecoica y reverberante (ecoica) de la esime zacatenco*. Mexico D.F: Instituto Politecnico Nacional.
- G.R.A.S, S. a. (06 de Octubre de 2014). Obtenido de <http://www.gras.dk/46bd.html>

- García, M. E. (6 de Julio de 2015). *Acustica Course*. Obtenido de <http://www.ehu.es/acustica/espanol/ruido/inmes/inmes.html>
- Hansen, A. G. (1986). Mecanica de fluidos. En A. G. Hansen, *Mecanica de fluidos* (pág. 251). Mexico: Limusa.
- Hirschberg, S. R. (2004). *An introduction to aeroacoustics*. Eindhoven.
- Hitt, D. (16 de Septiembre de 2015). NASA. Obtenido de <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-58.html>
- Humphreys, W. T. (1998). *Design and Use of Microphone Directional arrays for Aeroacoustic Measurements*. Hampton, VA: NASA Langley Research Center.
- Instruments, N. (s.f.). *Sine.ni*. Obtenido de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/13909>
- ISO. (2003). *3745, Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure-Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms*. International Standard.
- Istvan, L. B. (1992). *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. Berlin: Springer.
- Kinsler, F. A. (1995). *Fundamentos de acustica*. Mexico : Limusa.
- Kjær, B. &. (Enero de 2014). Recuperado el 20 de Junio de 2016, de <http://www.bksv.com/doc/bu3100.pdf>
- Linares, G. J., & Llopis, R. A. (1996). *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

- Llinare J.A. Llopis, J. S. (1991). *Acustica arquitectonica y urbanistica*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- M. Möser, J. B. (2009). *Ingenieria Acustica*. Berlin, Heidelberg: 2009.
- M.P. López Campos, P. B. (2006). *Diseño y construccion de una camara anecoica para la Facultad de Ingenieria Electronica*. Quito: Universidad de la Fuerzas Armadas.
- Maggiolo, D. (13 de 5 de 2016). *Apuntes de acustica*. Obtenido de <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/prp.html>
- Manuel, R. (2001). *Acondicionamiento acustico*. España: Paraninfo.
- Mejía, A. M. (2012 de Octubre de 2012). *DISEÑO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL PARA*. Madrid, Españaa: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.
- MEMS Microphone. (8 de Julio de 2014). *ST.COM*. Obtenido de http://www.st.com/content/st_com/en/products/audio-ics/mems-microphones.html?querycriteria=productId=SC1564
- Mercedes-Benz. (05 de 4 de 2016). *Innovation Mercedes*. Obtenido de <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/der-neue-klima-windkanal-von-mercedes-benz-video/>
- Mitsubishi. (2006). Full-Scale Aeroacoustic Wind-tunnel. *Machinery & steel structures headquarters , Businness development department*, 43-45.
- Nogueira, I. P. (Diciembre de 2006). Obtenido de https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1383
- OMS. (1999). *Guidelines for community noise*. Obtenido de <http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>

- Onda de Sonido*. (2011). Obtenido de <http://4.bp.blogspot.com>
- Pascioni, K. (2014). Characterization of an Aeroacoustic Wind Tunnel Facility. *Inter Noise 2014*, (pág. 2). Florida State University, USA.
- Perez de la Fuente, C. E., & Solis Ramirez, J. A. (2015). *Diseño de cámara anecoica para laboratorio de acústicas*. Mexico D.F: Escuela superior de ingeniería mecánica.
- Plastics Portal. (08 de Febrero de 2016). *Basotect*. Obtenido de http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~es_ES/portal/show/content/products/foams/basotect_properties
- Pollution, N. (10 de Octubre de 2012). *Noise Pollution Clearinghouse*. Obtenido de <http://www.nonoise.org/aboutno.htm>
- Ramos. (10 de 01 de 2010). *Capa Limite Superficial*. Madrid, España: Universidad Politecnica de Madrid.
- Sarma, K. B. (1975). Delineation of the intimate details of the backbone conformation of pyridine nucleotide coenzymes in aqueous solution. *Biochem Biophys*, 1173-1179.
- Sarrad, E., & Fritzsche, C. (11 de Abril de 2009). *Science Direct*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X09000577>
- Sulaiman, Z. (11 de 2011). Effect of Open-Jet Shear Layers on Aeroacoustic Wind Tunnel Measurements. *Effect of Open-Jet Shear Layers on Aeroacoustic Wind Tunnel Measurements*. Alemania: Delft University of Technology, Aerospace Engineering, and Dutch National Aerospace Laboratory .

- Teixeira, P. (8 de Noviembre de 2015). *Ecophon*. Obtenido de <http://www.ecophon.com/es/soluciones-acusticas/Banco-de-conocimientos-acustica/Acustica-basica/Absorcion-acustica/>
- Thomas F. Brooks, W. M. (1999). *Effect of directional array size on the measurement of airframe noise components*. Bellevue, Washington : NASA Langley Research Center.
- Vasconcelos, Y. (Enero de 2009). *Aeroacoustic wind tunnel*. Obtenido de <http://revistapesquisa.fapesp.br/en/2009/01/01/quieter-aircraft/>
- Vasconcelos, Y. (Enero de 2009). *Pesquisa*. Obtenido de <http://revistapesquisa.fapesp.br/es/2009/01/01/aviones-mas-silenciosos/>
- Velázquez. (Junio de 2009). Soluciones de aislamiento acústico. *Materiales andimat*. Obtenido de <http://www.andimat.es/wp-content/uploads/soluciones-de-aislamiento-acustico-andimat-jun09.pdf>
- Waes, M. H. (2010). *Guía de ingeniería acústica*.
- William M. Humphreys Jr, Q. A. (25 de Mayo de 2005). Application of MEMS Microphone Array Technology to airframe Noise Measurement. Monterey , California, Estados Unidos: 11th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference.