

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ACÚSTICA DE PANTALLAS PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR RUIDO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

JAVIER ALEJANDRO BRAVO NARVÁEZ
narva30@hotmail.com

DIRECTOR: Ph.D. Carlos Fabián Ávila Vega
cavila67@yahoo.com

Quito, Noviembre del 2015

DECLARACIÓN

Yo, Javier Alejandro Bravo Narváez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Javier Alejandro Bravo Narváez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Javier Alejandro Bravo Narváz, bajo nuestra supervisión.

PhD. Carlos Ávila
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Ricardo Soto
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Tras la culminación de este trabajo quiero agradecer a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo durante la realización de este proyecto. Principalmente al PhD. Carlos Ávila por guiarme con sus conocimientos en este proceso. De manera especial quiero agradecer a la empresa Lambda Acoustics S.A y su gerente general Ing. Paul Lozada por el apoyo prestado en la etapa validación de resultados.

También mis más sinceros agradecimientos a la empresa AGP Soluciones y su gerente Ing. Oscar Ampudia por la colaboración brindada durante la etapa de construcción del prototipo.

Mi agradecimiento también está dirigido a mis Maestros universitarios que han sabido impartir sus conocimientos en el aula de clase y a toda mi familia por ofrecerme su apoyo incondicional.

Javier

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que siempre han estado conmigo, a mis padres: Jaime y Dominga que siempre han confiado en mí y me han guiado en cada etapa de mi vida. A mis Hermanas: Yadira y Marjorie que han sido un ejemplo y una guía constante en mi vida. A Rosita y Estefany por estar a mi lado cuando más las he necesitado, por enseñarme a ser perseverante en la vida y porque ha sido un gran apoyo durante toda esta etapa. Sin su apoyo incondicional nada de esto hubiese sido posible, A todos ellos les agradezco infinitamente y de todo corazón dedico este trabajo.

Javier

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
CONTENIDO DE GRÁFICOS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
PRESENTACIÓN	XIV
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3 ALCANCE	1
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5 METODOLOGÍA	5
CAPITULO 2	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE RUIDO EN TRÁFICO VEHICULAR	7
2.2 GENERACIÓN DE RUIDO DEBIDO A LA INTERACCIÓN LLANTA PAVIMENTO.....	8
2.2.1 MECANISMOS VIBRATORIOS	8
2.2.2 MECANISMOS AERODINÁMICOS	9
2.3 FUNDAMENTOS Y TERMINOLOGÍA BÁSICA DE ACÚSTICA	10
2.3.1 NIVEL DE PRESIÓN SONORA	11
2.3.3 TIPOS DE FUENTES SONORAS	13
2.3.4 BANDAS DE OCTAVA.....	15
2.4 BARRERAS ACÚSTICAS.....	16
2.4.1 COMPORTAMIENTO DE UNA BARRERA ACÚSTICA FRENTE A UNA ONDA SONORA	17
2.4.2 INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA BARRERA ACÚSTICA	17
2.4.3 CLASIFICACIÓN DE BARRERAS ACÚSTICAS.....	17
2.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS Y MODELAMIENTO	22
2.5.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	22
2.5.2 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA.....	23
2.6 SIMULACIÓN ACÚSTICA	24
CAPÍTULO 3	26

ESTUDIO NUMÉRICO	26
3.1 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ACÚSTICA	26
3.1.1 GEOMETRÍA DEL MODELO DEL SIMULACIÓN	26
3.1.2 ALTERNATIVAS DE PANTALLAS ACÚSTICAS	27
3.1.3 ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	30
3.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO NUMÉRICO.....	39
3.3.4 ESTUDIO ESTRUCTURAL DEL PANEL FRONTAL.....	42
CAPÍTULO 4	45
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE CAMPO.....	45
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	45
4.1.1 PANEL FRONTAL PERFORADO	46
4.1.2 PANEL POSTERIOR	47
4.1.3 MATERIAL ABSORBENTE.....	48
4.1.4 REFUERZO ACÚSTICO	48
4.1.5 CUBIERTA SUPERIOR E INFERIOR.....	48
4.1.6 CUBIERTA LATERAL DERECHA E IZQUIERDA.....	48
4.2 MONTAJE DEL PROTOTIPO.....	49
4.3 ANÁLISIS DE COSTOS.....	51
4.3.1 COSTOS DIRECTOS.....	51
4.3.2 COSTOS INDIRECTOS.....	54
4.3.3 COSTOS TOTALES DE FABRICACIÓN	56
4.4 PRUEBAS DE CAMPO.....	56
4.4.1 PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAMPO.....	57
4.4.2 EQUIPOS DE MEDIDA Y PROGRAMAS UTILIZADOS	59
CAPITULO 5	60
ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRIMERA EVALUACIÓN.....	60
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SEGUNDA EVALUACIÓN	61
5.2.1 EVALUACIÓN SIN EL PROTOTIPO P4	61
5.2.2 EVALUACIÓN CON LA INSERCIÓN DEL PROTOTIPO P4.....	62
5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO POR PUNTOS DE LAS PERDIDAS POR INSERCIÓN DEL PROTOTIPO.....	65
CAPITULO 6	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
6.1 CONCLUSIONES	73
6.2 RECOMENDACIONES.....	75

BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXO 1. ATENUACIÓN DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS ESTUDIADAS.	80
ANEXO 2. PLANOS DE CONJUNTO Y DE TALLER DEL PROTOTIPO DE PANTALLA ACUSICA	87
ANEXO 3. HOJAS DE PROCESO	88
ANEXO 4. HOJA DE DATOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO	89
ANEXO 5. POST-PROCESADO DEL ESTUDIO DE LA PANTALLA ACÚSTICA P4	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Porcentajes de emisión sonora en carretera	8
Tabla 2. 2 Correspondencia entre presión sonora y niveles de presión sonora ...	12
Tabla 2. 3 Bandas de octavas y tercio de octavas	16
Tabla 3. 1 Configuración de las pantallas acusicas.....	29
Tabla 3. 2 Propiedades de los materiales usados como refuerzo acústico	30
Tabla 3. 3 Propiedades del material absorbente	30
Tabla 3. 4 Distribución de los diferentes puntos de evaluación.....	32
Tabla 3. 5 Pérdidas por inserción de la pantalla.....	40
Tabla 4.1 Costos de materia prima	51
Tabla 4.2 Costos de elementos normalizados.....	52
Tabla 4. 3 Costos de mecanizado	53
Tabla 4. 4 Costos de Ensamblado	53
Tabla 4. 5 Costos Directos Totales	53
Tabla 4. 6 Costos de Ingeniería	54
Tabla 4. 7 Costos de Materiales Indirectos	55
Tabla 4. 8 Gastos de Imprevisto.....	55
Tabla 4. 9 Costos Indirectos.....	56
Tabla 4. 10 Costos de Fabricación.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Ruido producido por diferentes fuentes sonoras	7
Figura 2. 2 Vibraciones radiales debido al contacto con el pavimento	9
Figura 2. 3 Fenómenos por adhesión entre la llanta-pavimento.....	9
Figura 2. 4 Aire bombeado dentro y fuera de los canales del neumático	10
Figura 2. 5 Efecto diedro producido en la banda de rodadura.....	10
Figura 2. 6 Umbrales de audición en función de la frecuencia y presión sonora..	11
Figura 2. 7 Propagación del sonido de una fuente puntual	14
Figura 2. 8 Propagación del sonido de una fuente lineal.....	14
Figura 2. 9 Zona de sombra producida por la pantalla acústica	16
Figura 2. 10 Propagación de la onda sonora de la fuente al receptor	17
Figura 2. 11 Influencia del viento en la zona de sombra	17
Figura 2. 12 Pantallas acústicas transparentes.....	18
Figura 2. 13 Pantalla acústica de hormigón con superficie reflectante.....	19
Figura 2. 14 Pantalla acústica con panel perforado	20
Figura 2. 15 Pantallas acústicas de madera	21
Figura 2. 16 Pantalla delgada y distancias fundamentales entre fuente y receptor	21
Figura 2. 17 Pantalla gruesa y distancias fundamentales entre fuente y receptor	22
Figura 3. 1 Barrera acústica standard	26
Figura 3. 2 Geometría del modelo de simulación	27
Figura 3. 3 Estudio Estructural del Panel sin Perforar	43
Figura 3. 4 Estudio Estructural del Panel sin Perforar	44
Figura 4. 1 prototipo de pantalla acústica.....	45
Figura 4. 2 Lámina de acero galvanizado marcada.....	46
Figura 4. 3 Panel frontal perforado.....	47
Figura 4. 4 Panel posterior	47
Figura 4. 5 Cubierta superior e inferior.....	48
Figura 4. 6 Cubierta lateral izquierda y derecha.....	49
Figura 4. 7 Montaje del panel frontal, refuerzo acústico y material absorbente ...	50

Figura 4. 8 Proceso de Soldadura del Prototipo de Pantalla Acústica	50
Figura 4. 9 Locación uno Escuela Politécnica Nacional	57
Figura 4. 10 Locación 2 Conjunto San Emilio	57
Figura 4. 11 Ubicación de los puntos de evaluación	58
Figura 4. 12 Calibración del sonómetro.....	58
Figura 4. 13 Esquema para ubicación del prototipo	59

CONTENIDO DE GRÁFICOS

Gráfico 3. 1 Nivel de presión sonora sin pantalla	31
Gráfico 3. 2 Nivel de presión sonora con la pantalla P1	32
Gráfico 3. 3 Pérdidas por inserción de la pantalla P1	33
Gráfico 3. 4 Nivel de presión sonora con la pantalla P2	33
Gráfico 3. 5 Pérdidas por inserción de P2	34
Gráfico 3. 6 Nivel de presión sonora con la pantalla P3	35
Gráfico 3. 7 Pérdidas por inserción de la pantalla P3	35
Gráfico 3. 8 Nivel de presión sonora con la pantalla P4	36
Gráfico 3. 9 Pérdidas por inserción de la pantalla P4	36
Gráfico 3. 10 Nivel de presión sonora con la pantalla P5	37
Gráfico 3. 11 Pérdidas por inserción de la pantalla P5	37
Gráfico 3. 12 Nivel de presión sonora con la pantalla P6	38
Gráfico 3. 13 Pérdidas por inserción de la pantalla P6	38
Gráfico 3. 14 Nivel de ruido sin pantalla vs con pantalla P4 en el punto 4	40
Gráfico 3. 15 Nivel de ruido sin pantalla vs con pantalla P4 en el punto 5	41
Gráfico 3. 16 Nivel de ruido sin pantalla vs con pantalla P4 en el punto 6	41
Gráfico 3. 17 Tensión de Von Mises para el Panel sin Perforar	43
Gráfico 3. 18 Tensión de Von Mises para el Panel Perforado	44
Gráfico 5. 1 Nivel de Presión Sonora vs Frecuencia sin el prototipo P4	62
Gráfico 5. 2 Atenuación del Nivel de Presión Sonora en el punto 4	63
Gráfico 5. 3 Atenuación del Nivel de Presión Sonora en el punto 5	64
Gráfico 5. 4 Atenuación del Nivel de Presión Sonora en el punto 6	65
Gráfico 5. 5 Simulación de atenuación del prototipo P4	66
Gráfico 5. 6 Nivel de Presión Sonora en el punto 4 simulado y medido	67
Gráfico 5. 7 Nivel de Presión Sonora en el punto 5 simulado y medido	68
Gráfico 5. 8 Nivel de Presión Sonora en el punto 6 simulado y medido	68
Gráfico 5. 9 Atenuación medida vs atenuación simulada	69
Gráfico 5. 10 Atenuación medida vs atenuación simulada	70
Gráfico 5. 11 Atenuación medida vs atenuación simulada	70

RESUMEN

En este proyecto se realiza la optimización estructural y acústica de barreras anti-ruido con el fin de disminuir los niveles de contaminación sonora producida por el tráfico vehicular. Para ello se han elaborado seis capítulos, los mismos que están encaminados a fortalecer y sustentar la estructura de este documento.

La tesis presenta una introducción acerca de los mecanismos de generación de ruido de automóviles, así como los conceptos básicos de acústica y los tipos de pantallas anti-ruido. También se muestra información sobre el método de elementos finitos y simulación acústica de interacción fluido-estructura.

Luego, utilizando el método de elementos finitos, se obtiene el nivel de ruido atenuado y se elige la mejor alternativa basada en los resultados de la simulación. A continuación, se construye el prototipo en base a los resultados del estudio numérico.

A continuación, se realiza una nueva simulación acústica siguiendo las características del prototipo y los resultados de la simulación se comparan con los que se obtuvieron en los ensayos de campo, de esta forma se valida el método numérico utilizado para que el mismo pueda ser aplicado en futuras investigaciones.

Finalmente, el sexto capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones de los cuales se destaca que la atenuación del prototipo, obtenida en las pruebas de campo y en las simulaciones, aumenta con la frecuencia. Por lo tanto, se concluye que una mayor atenuación se produce para frecuencias más altas que 400 Hz debido a la longitud de onda de estas frecuencias a disminuir, mientras que la frecuencia aumenta más cerca del espesor del prototipo.

ABSTRACT

This project carries out the acoustic and structural optimization of noise barriers to reduce the levels of noise pollution caused by traffic. It has been developed six chapters which are aimed to strengthen and sustain the structure of this document to accomplish this purpose.

The thesis presents an introduction about automotive noise generation mechanisms, as well as basic concepts of acoustics and types of anti-noise screens. There is also information concerning the method of finite elements and acoustic simulation of fluid-structure interaction.

Then, using the finite element method, the level of attenuated noise is obtained and the best alternative based on the results of the simulation is chosen. Next, the prototype is built based on the results of the numerical study.

After a new acoustic simulation is made following the characteristics of the prototype and simulation results are compared with those that were achieved in the field trials, so that the numerical method used is validated to be applied in future researches.

Finally, the sixth chapter presents conclusions and recommendations of which stands out that the attenuation of the prototype, obtained in field trials and in simulations, increases with the frequency. Therefore, it is concluded that greater attenuation occurs for higher frequencies than 400 Hz because the wavelength for these frequencies decrease, meanwhile the frequency increases closer to the thickness of the prototype.

PRESENTACIÓN

El desarrollo de nuevas barreras acústicas ha crecido en los últimos años, de la misma manera, han sido implementadas como una solución para disminuir los altos niveles de ruido causados por el incremento del parque automotor y las obras civiles en vías públicas.

Sin embargo, en nuestro país aún no se ha utilizado este tipo de alternativa para el control de ruido proveniente de las fuentes ya mencionadas, esto crea una gran desventaja con relación a otros países que ya utilizan estas alternativas de solución.

Por este motivo el presente proyecto busca implementar nuevas alternativas para el control de ruido producido por los automotores in situ (en el sitio) y la construcción de un prototipo de barrera acústica. Además, se busca sentar las bases para futuros proyectos encaminados a la utilización de barreras acústicas.

Con el fin de llegar a cumplir con el objetivo planteado en este proyecto, se realiza el estudio por elementos finitos de 6 alternativas de barreras acústicas para luego seleccionar la mejor alternativa de solución, en función de la cual se procederá a construir el prototipo de barrera acústica. Para corroborar los resultados obtenidos con el programa de elementos finitos se realizara evaluaciones en campo abierto con y sin la presencia del prototipo.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar y simular el comportamiento estructural y acústico de pantallas para la reducción de contaminación sonora y construir un módulo didáctico (Prototipo) para la validación de los resultados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir dos alternativas de aislamiento acústico utilizadas en la construcción de pantallas acústicas.
- Modelar y simular el comportamiento acústico del sistema diseñado para reducir la contaminación por ruido.
- Construir un módulo didáctico (Prototipo) de barreras acústicas para la reducción de contaminación sonora y validar los resultados obtenidos de la simulación numérica.
- Determinar la mejor alternativa de solución para la construcción de barreras de protección contra ruido, en base a un análisis costo - beneficio.

1.3 ALCANCE

- Se obtendrá la configuración de las pantallas acústicas a partir de una revisión bibliográfica especializada y de la disponibilidad de estos elementos en el mercado local.
- Se utilizará herramientas informáticas comercial o libre que implementa tecnología de elementos finitos en las etapas de modelamiento y simulación, para determinar la configuración óptima.

- Se construirá un módulo de validación que responderá a un ejercicio didáctico. Por lo tanto, las dimensiones del mismo responderán a las de un prototipo, el mismo que permitirá validar los resultados obtenidos en la etapa de simulación y optimización.
- Se realizará un análisis de costos para determinar la mejor alternativa de solución, en función de los resultados obtenidos en la etapa de simulación.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto propone la optimización estructural y acústica de pantallas para la reducción de contaminación sonora y la construcción de un prototipo utilizando materiales existentes en el mercado ecuatoriano.

El objetivo primordial de una barrera anti ruido es reducir los niveles de contaminación sonora, producida tanto por tráfico vehicular como por fuentes sonoras puntuales. En la actualidad existen estudios que analizan el comportamiento acústico de una barrera anti ruido uno de ellos es el realizado por Felipe Álvarez “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA”. En este se presenta una idea clara sobre las consideraciones que se deben tomar, para el modelamiento por elementos finitos de una barrera acústica tipo sándwich en un recinto cerrado (Álvarez, 2009). El trabajo realizado por Francisco Segura “DISEÑO DE PANTALLAS ACÚSTICAS PARA REDUCIR COSTES DE FABRICACIÓN” muestra el estudio en campo abierto por elementos finitos de una pantalla de hormigón en 2 dimensiones y la pérdidas por inserción de dicha pantalla (Segura, 2013). La investigación realizada por Amirmohamed Muradali “GEOMETRIC MODELS TO MODEL ACOUSTIC BARRIERS INCLUDING ATMOSPHERIC” prueba que no existe gran diferencia entre los resultados obtenidos en estudios por elementos finitos en 2 y 3 dimensiones (Muradali, 1997). Trabajos más recientes como el realizado por Sergio Espinosa y Daniel Jaramillo “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BARRERA ACÚSTICA PARA

REDUCIR LA CONTAMINACIÓN AUDITIVA GENERADA POR UNA PERFORADORA DE CONCRETO EN VÍAS PÚBLICAS” , en el cual se investiga las propiedades de diferentes materiales, para utilizarlos como relleno se una barrera acústica. Además para verificar la eficiencia de estos materiales, se realiza la evaluación en campo abierto de la barrera acuática diseñada (Espinosa & Jaramillo, 2012).

Los trabajos mencionados anteriormente, se enmarcan en determinar la atenuación del nivel de presión sonora y el comportamiento acústico, de barreras diseñadas para atenuar un tipo de fuente específica y de aquellas cuyas características ya están definidas por los fabricantes. Sin embargo, hasta la fecha en nuestro país, no existe referencias de estudios realizados que vayan encaminados al estudio de barreras anti ruido tipo sándwich fabricadas con materiales absorbentes comunes y de fácil acceso en el mercado local como son: corcho, gypsum y lana mineral de roca.

En este contexto, este proyecto pretende dar respuesta a dos preguntas fundamentales:

- ¿Cómo varia la atenuación del nivel de presión sonora en función del espesor y del material de relleno de la pantalla acústica?
- ¿Qué efectos produce en la atenuación del nivel de presión sonora, al utilizar un panel frontal perforado?

En base a los diferentes trabajos ya mencionados, se propone un estudio numérico – experimental para la optimización estructural y acústica de pantallas para la reducción de contaminación sonora y la construcción de un módulo didáctico para la validación de resultados, con el fin de responder a las preguntas planteadas y proporcionar estrategias que permitan mejorar el desempeño de dichas barreras.

A demás la tasa de crecimiento en la zona urbana de Quito es de 2.07% por año, mientras que en las zonas suburbanas es de 4.68% por año. Esto implica que

para el 2025 Quito contará con 2,843.417 habitantes, de los cuales 2,060.903 estarán en la zona urbana y 782.514 en las áreas suburbanas (Mosquera, 2010). Esta dinámica de crecimiento poblacional favorece al incremento del parque automotor ya que, al volcarse la población a la periferia de la ciudad, es más difícil proveer un servicio de transporte público eficaz que cubra toda el área urbana. Según el Plan Maestro de Movilidad 2008-2025, el parque automotor crece en un promedio de 40,000 unidades por año CON EL CONSIGUIENTE IMPACTO AMBIENTAL Y EL PERJUICIO a la salud de la población (Mosquera, 2010).

En el Ecuador existe una normativa estipulada en la LEY ORGÁNICA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL en la cual se indican los límites permisibles de presión sonora en decibelios según la tipología del uso de suelo. Sin embargo no existen estudios previos en el país que permitan primero adaptar esta normativa a nuestra realidad y segundo generar nuevas alternativas para disminuir los niveles de contaminación sonora.

La meta de este proyecto es generar una línea de investigación que permita estudiar la disminución de contaminación sonora en carreteras de la ciudad de Quito.

La primera etapa de este estudio utilizará simulaciones estructurales y acústicas, con el fin de optimizar el diseño de pantallas para la reducción de contaminación sonora proveniente tráfico vehicular. En una segunda etapa, se construirá un prototipo en el cual se pueda disponer varias configuraciones de pantallas acústicas. A dicho prototipo se aplicara una fuente de ruido y con la ayuda de un sonómetro se caracterizará al ruido que atraviesa la pantalla.

La etapa experimental proveerá resultados para enfrentar la etapa de validación de los modelos numéricos propuestos, y además generar un módulo didáctico que facilite los procesos de enseñanza-aprendizaje relacionados a la temática del proceso.

1.5 METODOLOGÍA

El desarrollo del presente proyecto de tesis se llevará a cabo en varias etapas. En primer lugar, se estudiarán los diferentes tipos de pantallas acústicas y la disponibilidad de estos elementos en el mercado local. Luego se procederá con la etapa de simulación estructural y acústica, con el fin de identificar cuál de las pantallas estudiadas presenta mayor eficiencia por medio de elementos finitos. Para ello se realizará una revisión bibliográfica especializada, que permita conocer como están estructuradas dichas pantallas y su funcionamiento. Una vez identificada la pantalla acústica con la mejor configuración, se iniciará la etapa de construcción del prototipo, con el cual se validaran los resultados obtenidos en la etapa de simulación, en esta etapa se someterá al prototipo a una fuente de ruido y con la ayuda de un sonómetro se obtendrá la atenuación producida por el prototipo.

Finalmente, se hará un análisis de costos en función de los resultados obtenidos en la simulación. Para ello se tomaran en cuenta los costos generados en la instalación, mantenimiento e imprevistos.

ACTIVIDAD 1: Estudio de Pantallas acústicas.

- Investigar los tipos de pantallas acústicas que existen.
- Estudiar los diferentes materiales que se usan en la fabricación de pantallas acústicas.
- Identificar la disponibilidad de estos materiales en el mercado local.
- Desarrollar varias configuraciones de pantalla acústicas con los materiales disponibles en el mercado y determinar el tipo de panel frontal a utilizar en la Pantalla Acústica.

ACTIVIDAD 2: Simulación Estructural y Acústica.

- Identificar las propiedades mecánicas y acústicas de los materiales que se usaran para desarrollar las diferentes configuraciones de pantallas acústicas.
- Definir dos tipos de panel frontal a utilizar en la pantalla acústica.
- Realizar un estudio numérico usando tecnología de elementos finitos e identificar las perdidas por inserción de cada una de las pantallas acústicas estudiadas.
- Identificar la pantalla acústica que presente mayor atenuación.
- Realizar el estudio estructural del panel frontal de las pantallas acústicas estudiadas.

ACTIVIDAD 3: Etapa de Construcción del Prototipo

- Adquirir los materiales y elementos necesarios para la construcción de un prototipo de pantalla acústica.
- Desarrollar los planos de taller para la construcción de prototipo.
- Elaborar las hojas de procesos de las partes mecanizadas y conformadas.
- Mecanizar y conformar las partes en función de cada una de las hojas de procesos y los planos.
- Ensamblar cada uno de los componentes de la Barrera Acústica.

ACTIVIDAD 4: Análisis de costos.

- Calcular los costos directos e indirectos
- Calcular el costo total del prototipo de pantalla acústica en función de los costos directos e indirectos.

ACTIVIDAD 5: Etapa de Validación de Resultados.

- Someter el prototipo de Barrera Acústica a fuente de ruido de 80 dB.
- Evaluar con un sonómetro la atenuación producida por el prototipo.
- Sintetizar los resultados y analizarlos.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE RUIDO EN TRÁFICO VEHICULAR

El ruido generado en carreteras por vehículos livianos es producido básicamente por cuatro fuentes:

- Motor – Transmisión;
- Sistema de escape;
- Aerodinámica;
- Interacción llanta – carretera.

Las fuentes sonoras dependen de las condiciones de operación de los vehículos. La Figura 2.1 muestra las fuentes de ruido a distintas velocidades; siendo el ruido producido por el neumático, la fuente predominante para velocidades superiores a los 50 km/h (“Transportation Noise Mesures and Countermeasures”, 2002).

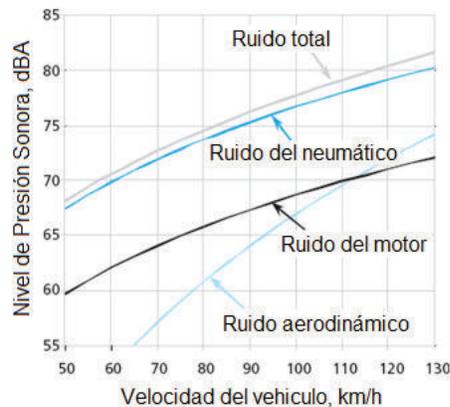


Figura 2. 1 Ruido producido por diferentes fuentes sonoras

Fuente: (“Transportation Noise Mesures and Countermeasures”, 2002)

A continuación en la Tabla 2.1 se indica los porcentajes de los distintos tipos de fuentes de emisión sonora, para vehículos livianos y pesados (Pacheco, 2010).

Fuente de Ruido	v = 50 [km/h]		v = 80 [km/h]	
	Vehículos	Vehículos	Vehículos	Vehículos
	Livianos	Pesados	Livianos	pesados
Motor	20-50 %	10-80 %	15-35%	50-70 %
Transmisión	5-35 %			
Tubo de escape	15-35%	20-60%		
Ventilador/radiador	0-30%	0-65%		
Admisión/escape	10-35%	0-10%		
Neumático	10-15%	10-15%	65-85 %	30-50 %

Tabla 2. 1 Porcentajes de emisión sonora en carretera
Fuente: (Borjas & Salazar, 2007)

La totalidad de ruido producido por el motor y la transmisión, es constante a velocidades inferiores a los 50 km/h. Esto se da tanto para vehículos pesados (aquellos que tienen una carga útil mayor a 3.5 Ton), y vehículos livianos (Borjas & Salazar, 2007).

2.2 GENERACIÓN DE RUIDO DEBIDO A LA INTERACCIÓN LLANTA PAVIMENTO

Los mecanismos de generación de ruido, debido al contacto de la llanta con el pavimento se los puede clasificar en vibratorios y aerodinámicos (Pacheco, 2010).

2.2.1 MECANISMOS VIBRATORIOS

Se producen por el impacto y la deformación del neumático contra el pavimento. Las vibraciones producidas pueden ser radiales o tangenciales.

Las vibraciones radiales tienen su origen en la banda de rodadura del neumático, ya que al entrar en contacto con el pavimento esta se comprime y descomprime repetidamente. Este tipo de vibraciones depende de la rigidez y la velocidad con la que gira el neumático (Pacheco, 2010).

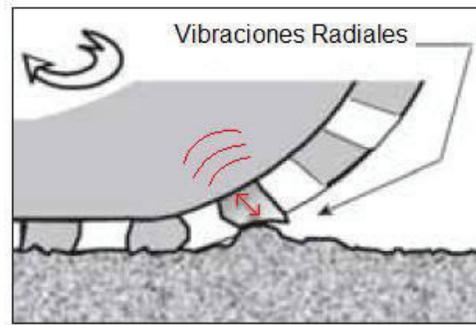


Figura 2. 2 Vibraciones radiales debido al contacto con el pavimento

Fuente: ("Transportation Noise Mesures and Countermeasures", 2002)

Las vibraciones tangenciales se originan por la deformación de la banda de rodadura en dirección del giro del neumático; también existen vibraciones producidas en las caras laterales del neumático, debido a la carga sobre los ejes. Este tipo de vibraciones es producido por el fenómeno llamado *stick-snap* o pegado – despegado y el *stick-slip* o derrape ligero, que se producen cuando la banda de rodadura entra en contacto con el pavimento. Aun tomando en cuenta todos estos aspectos, este tipo de vibraciones producen menor energía sonora que la vibraciones radiales (Pacheco, 2010).

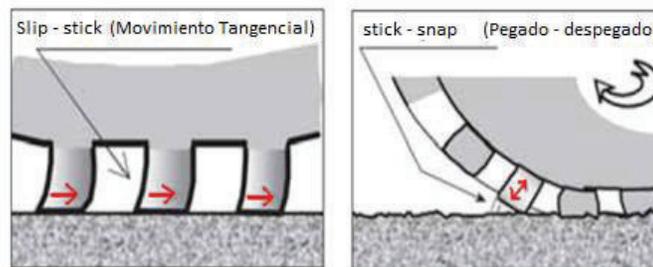


Figura 2. 3 Fenómenos por adhesión entre la llanta-pavimento

Fuente: ("Transportation Noise Mesures and Countermeasures", 2002)

2.2.2 MECANISMOS AERODINÁMICOS

Los mecanismos aerodinámicos se producen debido a que el aire es atrapado entre los canales de la llanta y la superficie de contacto, produciéndose así una compresión y expansión del aire, el mismo que es bombeado dentro y fuera de los canales de la banda de rodadura; a este fenómeno se lo conoce como *air pumping* o bombeo de aire, que es un sonido similar a aplaudir. El ruido generado

es amplificado tal y como muestra la Figura 2.5, debido al fenómeno *horn effect* o efecto bocina que es el responsable del aumento o disminución de las emisiones sonoras (Pacheco, 2010).

Los niveles de ruido aumentan cuando la banda de rodadura es liza y disminuyen cuando la capa de rodadura es rugosa.

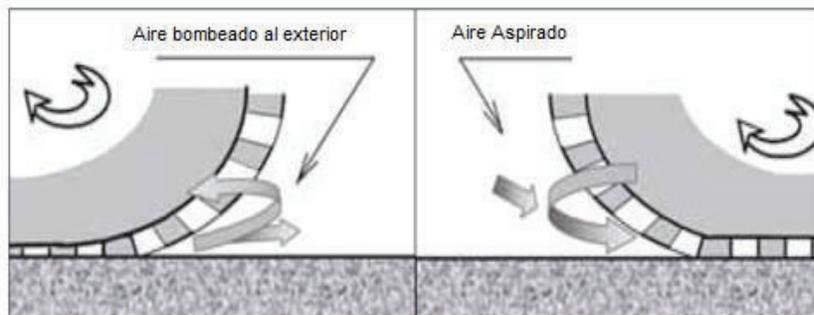


Figura 2. 4 Aire bombeado dentro y fuera de los canales del neumático
Fuente: ("Transportation Noise Measures and Countermeasures", 2002)

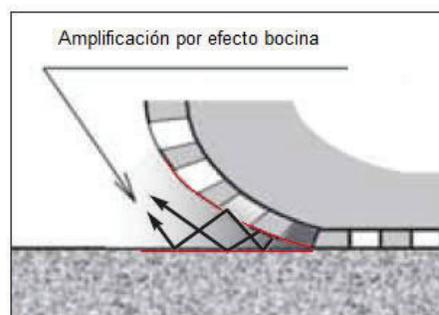


Figura 2. 5 Efecto diedro producido en la banda de rodadura
Fuente: ("Transportation Noise Measures and Countermeasures", 2002)

2.3 FUNDAMENTOS Y TERMINOLOGÍA BÁSICA DE ACÚSTICA

La acústica es la parte de la física que estudia el movimiento y comportamiento de las ondas sonoras en el espacio y cualquier otro medio físico. Las ondas sonoras se desplazan produciendo vibraciones, que provocan cambios en la presión del aire o del medio físico. La amplitud de las ondas sonoras depende de la distancia a la que se encuentre la fuente de origen (Serway & Kirkpatrick, 2008).

Según el intervalo de frecuencia las ondas sonoras se clasifican en:

- Ondas Infrasonicas, son aquellas que presentan frecuencias inferiores a 20 Hz, algunos animales como los elefantes usan ondas infrasonicas para comunicarse entre ellos (Serway & Kirkpatrick, 2008).
- Ondas Audibles, están en el intervalo de frecuencia de 20 a 20.000 Hz, este tipo de onda es generada por instrumentos musicales, voces humanas, automotores, etc. La Figura 2.6 muestra los umbrales de audición en función de la frecuencia (Serway & Kirkpatrick, 2008).
- Ondas Ultrasonicas, son aquellas que tienen frecuencias superiores a 20.000 Hz. Un ejemplo claro de este tipo de ondas son las producidas por los silbatos “silenciosos”, que generalmente se usan para llamar a los perros (Serway & Kirkpatrick, 2008).

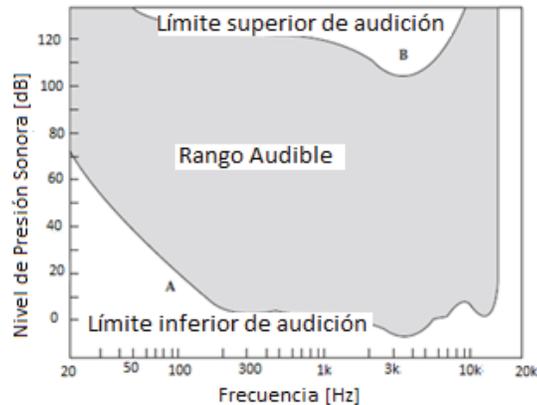


Figura 2. 6 Umbrales de audición en función de la frecuencia y presión sonora

Fuente: (Everest & Pohlmann, 2009)

2.3.1 NIVEL DE PRESIÓN SONORA

El nivel de presión sonora o NPS indica la intensidad de un campo sonoro producido por una fuente, se mide en decibelios (dB) y se expresa como (Möser & Barros, 2009):

$$NPS = 10 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 \quad (dB) \quad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

P = Presión sonora en Pa

P_{ref} = Presión de referencia para el aire 2×10^{-5} Pa

El oído humano puede detectar una presión sonora mínima de 20×10^{-5} Pa, y una presión sonora máxima de 60 Pa, siendo éste valor para el umbral de dolor. El término decibel dB no es una unidad de medida, más bien indica que se ha utilizado una función logarítmica, para emular el comportamiento del oído humano (Möser & Barros, 2009).

La Tabla 2.2 muestra niveles de presión sonora en situaciones normales que van desde los 0 dB hasta 140 dB.

Presión efectiva	Nivel de presión	Situación
[N/m ²]	[dB]	
2×10^{-5}	0	Mínimo perceptible
2×10^{-4}	20	Bosque con poco viento
2×10^{-3}	40	Biblioteca
2×10^{-2}	60	Oficina
2×10^{-1}	80	Calle con tránsito
2×10^0	100	Sirena, martillo neumático
2×10^1	120	Arranque de motor a reacción
2×10^2	140	Umbral de dolor

Tabla 2. 2 Correspondencia entre presión sonora y niveles de presión sonora

Fuente: (Möser & Barros, 2009)

2.3.2 Divergencia geométrica

La atenuación por divergencia geométrica para una fuente sonora lineal o cilíndrica en espacio libre, para el caso en que la fuente este sobre una superficie reflectante esta expresada como sigue (Möser & Barros, 2009).

$$A = 10 \log \frac{d}{d_0} + 7,9 \quad dB \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

d = Distancia fuente - receptor, medida en metros;

d_0 = Distancia de referencia, se considera igual a 1 m.

La Norma ISO 9613 indica que la atenuación A_{bar} de una barrera está dada por la pérdida de inserción de la misma (Norma ISO9613-2, 1996).

2.3.3 TIPOS DE FUENTES SONORAS

Existen dos tipos de fuentes sonoras en la propagación de ruido en campo libre, estas son: Fuentes Sonoras Puntuales y Fuentes Sonoras Lineales.

2.3.3.1 Fuentes puntuales

Son aquellas cuya intensidad está concentrada en un punto, un ejemplo claro de fuentes puntuales son las maquinas estáticas o cualquier actividad que este restringida a una zona determinada. El ruido producido por una fuente puntual se propaga en forma de ondas esféricas, la Figura 2.7 muestra cómo se propaga el sonido proveniente de una fuente puntual. La intensidad de una fuente puntual está dada por la siguiente ecuación (Estellés, 2007).

$$I = \frac{W}{2\pi r^2} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Dónde:

W = Potencia medida en watios

r = Distancia del centro de la fuente medida en metros

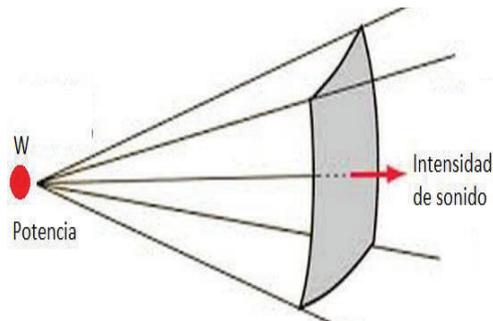


Figura 2. 7 Propagación del sonido de una fuente puntual
Fuente: (Estellés, 2007)

2.3.3.2 Fuentes lineales

Una fuente lineal es la unión de varias fuentes puntuales, el sonido proveniente de una fuente lineal se propaga en forma de ondas cilíndricas como se muestra en la Figura 2.8; Se considera fuentes lineales a las vías ferroviarias y carreteras. La intensidad de una fuente lineal está dada por la siguiente ecuación (Estellés, 2007).

$$I = \frac{W}{2\pi r} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Dónde:

W = Potencia medida en wattios

r = Distancia del centro de la fuente medida en metros

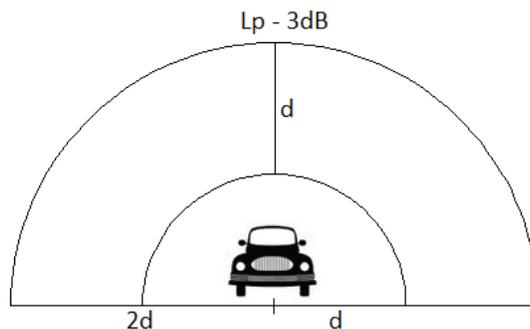


Figura 2. 8 Propagación del sonido de una fuente lineal
Fuente: (Propia)

2.3.4 BANDAS DE OCTAVA

Los niveles de atenuación de las barreras acústicas se manifiestan en función de la frecuencia expresada en bandas de octavas.

El espectro audible está dividido en diez bandas de frecuencia; cada uno de estos valores es el doble del anterior y la mitad del posterior y se los conoce como bandas de octava. Las bandas de octava son intervalos de frecuencias para el oído humano y cada banda toma el nombre de la frecuencia central. La Tabla 2.3 muestra el espectro de bandas de octavas y bandas en tercio de octavas (Camacho & Altabella, 2013).

Numero de Banda	Banda de octava frecuencia central	Tercio de octava frecuencia central	Límites de banda	
			Bajo	Alto
14	31,5	25	22	28
15		31,5	28	35
16		40	35	44
17	63	50	44	57
18		63	57	72
19		80	72	88
20	125	100	88	113
21		125	113	141
22		160	141	176
23	250	200	176	225
24		250	225	283
25		315	283	353
26	500	400	353	440
27		500	440	565
28		630	565	707
29	1000	800	707	880
30		1000	880	1130
31		1250	1130	1414
32	2000	1600	1414	1760
33		2000	1760	2250
34		2500	2250	2825
35	4000	3150	2825	3530
36		4000	3530	4400
37		5000	4400	5650
38	8000	6300	5650	7070

39		8000	7070	8800
40		10000	8800	11300
41	16000	12500	11300	14140
42		16000	14140	17600
43		20000	17600	22500

Tabla 2. 3 Bandas de octavas y tercio de octavas

Fuente:(Bies & Hansen, 2009)

2.4 BARRERAS ACÚSTICAS

Una barrera acústica es cualquier estructura, diseñada para reducir los niveles de presión sonora entre la fuente y el receptor, de tal forma que detrás la barrera se forma una área de sombra con niveles bajos de presión sonora tal y como se muestra en la Figura 2.9. La principal función de las barreras acústicas es disminuir los niveles de ruido a bajas y medias frecuencias debido a que son las que presentan mayor longitud de onda y por lo tanto su recorrido es mayor (Porta, 2011).

“Las pantallas deben su eficacia a dos parámetros básicos de la física: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción acústica. El primero es responsable de la cantidad de energía acústica que atraviesa la pantalla hacia la zona protegida por la misma, y el segundo parámetro consiste en la cantidad de energía producida por la onda sonora que se refleja hacia la fuente del ruido. Para que la eficacia de las barreras acústicas sea elevada, los dos parámetros deben ser máximos, es decir, la cantidad de energía reflejada de onda acústica, así como la energía que atraviesa la capa de material de aislamiento de la pantalla debe ser lo menor posible” (Porta, 2011).



Figura 2. 9 Zona de sombra producida por la pantalla acústica

Fuente: (Polygal Sud S.A., 2013)

2.4.1 COMPORTAMIENTO DE UNA BARRERA ACÚSTICA FRENTE A UNA ONDA SONORA

Al incidir la onda sonora sobre la barrera una parte de la onda es absorbida, reflejada y difractada por la barrera acústica. La Figura 2.10 muestra el camino que sigue la onda sonora después de incidir sobre la pantalla (Olmos, 2002).

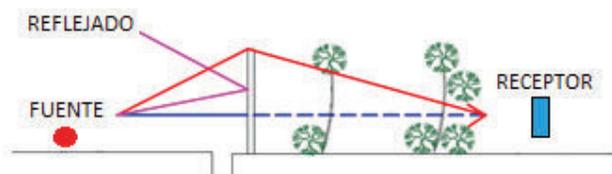


Figura 2. 10 Propagación de la onda sonora de la fuente al receptor
Fuente: (Polygal Sud S.A., 2013)

2.4.2 INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA BARRERA ACÚSTICA

La influencia del viento sobre la onda sonora, causa que la onda se deforme en la dirección del viento tal y como se muestra en la Figura 2.11, provocando que la zona de sombra disminuya producto de la curvatura que causa el viento sobre esta zona.

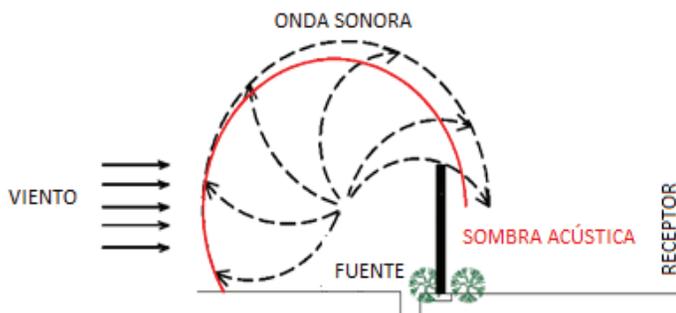


Figura 2. 11 Influencia del viento en la zona de sombra
Fuente: (Polygal Sud S.A., 2013)

Estudios realizados muestran que los niveles de presión sonora tras la barrera, pueden variar en 10 dB en una situación con viento o sin viento (Olmos, 2002).

2.4.3 CLASIFICACIÓN DE BARRERAS ACÚSTICAS

En la actualidad existen varias clases de pantallas acústicas, cuyo diseño y fabricación depende principalmente de los niveles de ruido a atenuar, de la frecuencia a tratar y de los costos de fabricación. Sin embargo, se pueden clasificar según sus características geométricas y por la clase de material que las conforman.

2.4.3.1 Tipos de barreras acústicas según los materiales de fabricación

2.4.3.1.1 Pantallas acústicas transparentes

Son pantallas reflectantes fabricadas de planchas principalmente de: policarbonato, polimetacrilato, PMMA o vidrio, pueden tener longitudes hasta de 5 m y un espesor que va desde 15 a 20 mm este tipo de pantallas ofrece una atenuación a ruido aéreo superior a los 25 dBA. La Figura 2.12 muestra una pantalla acústica transparente. Las principales ventajas que tienen este tipo de pantallas son:

- Ofrecen un amplio campo de visión.
- Tienen una excelente apariencia.
- Se adaptan fácilmente al entorno.
- Se pueden deformar o curvar según sea la necesidad. (López, 2010)



Figura 2. 12 Pantallas acústicas transparentes

Fuente: (Alegre & Domínguez, 2004)

2.4.3.1.2 Pantallas acústicas de hormigón

Son pantallas compuestas de hormigón armado de hasta 6 cm de espesor, pueden ser de tipo absorbente y reflectante según la necesidad. Las barreras

absorbentes pueden ser, de forma plana o curva y están compuestos por una placa de hormigón armado, sobre la cual se ubica una capa de hormigón poroso, que otorga altas propiedades absorbentes y excelente aspecto estético; este tipo de barrera ofrece índices de absorción de 4 a 5 dBA.

Las pantallas reflectantes están formadas por una superficie dentada (Figura 2.13), la cual ayuda a que se cumpla la Ley de Reflexión acústica, logrando que las reflexiones producto del ruido directo se dividan y se descompongan logrando así mayor atenuación. La utilización de estas pantallas presentan ventajas como: durabilidad, fácil mantenimiento y buen aislamiento acústico (Quirós, 2013).

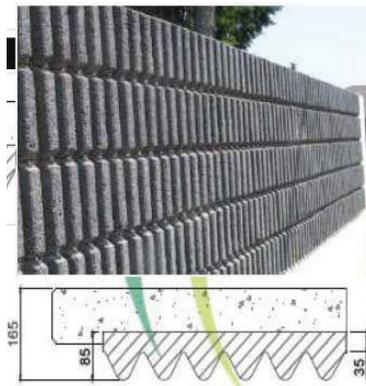


Figura 2. 13 Pantalla acústica de hormigón con superficie reflectante

Fuente: (Quirós, 2013)

2.4.3.1.2 Pantallas acústicas metálicas con relleno

Son pantallas formadas por módulos metálicos, cuyo interior está relleno de material acústico absorbente que puede ser: lana mineral de roca, lana de vidrio y espuma de baja densidad. Las pantallas pueden estar compuestas de un panel frontal perforado lo que garantiza que la absorción acústica sea máxima en determinadas frecuencias. La absorción acústica de los paneles perforados obedece a las propiedades de resonancia de Helmholtz (Quirós, 2013).

Para la construcción del panel perforado se usan las ecuaciones que describen el comportamiento del resonador de Helmholtz (Fernandez & Sánchez, 2011).

$$f_o = 5480 \sqrt{\frac{P}{D' d}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$D' = D + 1.6 a \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$P = \frac{\pi a^2}{D_1 D_2} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Dónde:

P = Porcentaje de perforaciones del panel en tanto por uno.

D' = Longitud efectiva de los orificios.

d = Distancia del panel frontal al material absorbente en cm.

D = Espesor del panel en cm.

a = Radio de la perforaciones

D_1 = Distancia horizontal entre centro y centro de la perforación.

D_2 = Distancia vertical entre centro y centro de la perforación.

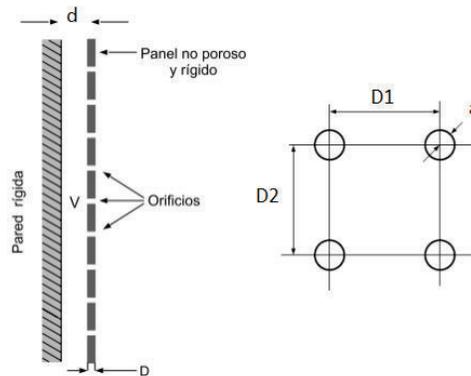


Figura 2. 14 Pantalla acústica con panel perforado

Fuente: (Fernandez & Sánchez, 2011)

Entre las ventajas que tienen las pantallas metálicas con rellenos tenemos, buen desempeño ante el impacto, poca reflexión de ondas sonoras y poco peso. Este tipo de barreras garantiza altos índices de absorción acústica que van desde 13 a 14 dBA (Alegre & Domínguez, 2004).

2.4.3.1.3 Pantallas acústicas de madera

Están construidas por paneles naturales, pueden ser de tipo reflectante o absorbente según el tipo de revestimiento que se coloque en la superficie expuesta al tráfico. Se caracterizan por tener un aislamiento acústico perfecto, gracias al cierre hermético de las juntas, con este tipo de pantallas se puede tener una atenuación de 8 dBA (Alegre & Domínguez, 2004).



Figura 2. 15 Pantallas acústicas de madera
Fuente: (Alegre & Domínguez, 2004)

2.4.3.2 Tipos de pantallas acústicas según la geometría

Según la geometría las pantallas acústicas se clasifican en: pantallas acústicas delgadas y pantallas acústicas gruesas.

2.4.3.2.1 Pantallas acústicas delgadas

Están formadas por vallas o muros simples Figura 2.16, este tipo de pantallas atenúan el ruido por difracción o absorción según el tipo de pantalla. (Muradali, 1997)

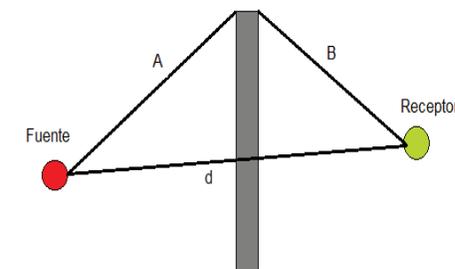


Figura 2. 16 Pantalla delgada y distancias fundamentales entre fuente y receptor
Fuente: (Muradali, 1997)

2.4.2.2.2 Pantallas acústicas gruesas

Se considera gruesa a una pantalla acústica, cuando su espesor es aproximadamente 3 m y atenúan el ruido mediante difracción doble, como ejemplo de este clase de pantalla están, los edificios, diques o muros de tierra, como se puede ver en la Figura 2.17.

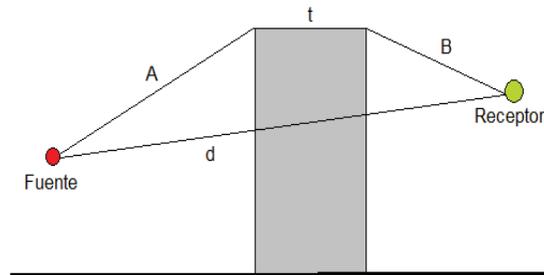


Figura 2. 17 Pantalla gruesa y distancias fundamentales entre fuente y receptor

Fuente: (Muradali, 1997)

Se debe tener claro que si el espesor t de la pantalla es menor a 3 m, la pantalla se considera gruesa para longitudes de onda inferiores a $t/5$. Si estas condiciones no se dan, entonces se considera que la pantalla es delgada.

2.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS Y MODELAMIENTO

2.5.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

“El Método de los Elementos Finitos se utiliza para resolver ecuaciones en derivadas parciales, y requiere la discretización del dominio en subregiones o celdas. Por ejemplo, un dominio bidimensional se puede dividir y aproximar con un sistema de triángulos (las celdas). En cada una de las celdas, la función se aproxima con una función característica o una combinación de funciones de forma o funciones de aproximación. Por ejemplo, se puede aproximar con una función lineal para cada triángulo. El método se puede aplicar a un amplio rango de problemas físicos e ingenieriles, con tal de que puedan ser expresados como EDPs” (Álvarez, 2009).

Antes de realizar un modelo con elementos finitos, se debe identificar el dominio, las condiciones de contorno y las variables a calcular. A continuación se definirán cada una de ellas.

2.5.1.1 Dominio

Se conoce como dominio al espacio geométrico en el cual se va realizar el estudio del sistema, para analizar su comportamiento. Para ello se divide al dominio en múltiples elementos, los cuales puede ser puntos (caso lineal), líneas (caso bidimensional) y superficies (caso tridimensional) (Fish & Belytschko, 2007),(González, 2012).

2.5.1.2 Condiciones de contorno

Son todas las variables conocidas que van a restringir el comportamiento del sistema, pueden ser de diferente clase: temperatura, cargas mecánicas, restricciones de desplazamiento, fuentes de calor, etc. (Fish & Belytschko, 2007).

Las condiciones de contorno para este proyecto son de orden acústico y mecánico, las cuales están definidas en el Capítulo 3.

2.5.1.3 Variables

Se obtienen después de que las condiciones de contorno hayan actuado sobre el sistema. Las variables al igual que las condiciones de contorno son de diferente clase, según el tipo de problema analizado pueden ser: temperatura, cargas mecánicas, restricciones de desplazamiento, fuentes de calor, etc. (Fish & Belytschko, 2007).

2.5.2 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

En la actualidad existen varias formulaciones de elementos finitos que son útiles en el estudio de la interacción fluido- estructura y aplicables en la caracterización de fenómenos acústicos (Álvarez, 2009).

Entre las más importantes se tienen:

- Formulación de desplazamiento potencial y presión;
- Formulación de desplazamiento, presión y momento de vorticidad;
- Formulación en desplazamiento como variable para definir el fluido acústico.

El programa utilizado para el presente trabajo utiliza la formulación del desplazamiento como variable para definir el fluido acústico. En esta formulación los desplazamientos del fluido son considerados como la única variable nodal, logrando que el acoplamiento de todos los elementos acústicos se haga directamente con los elementos estructurales sin necesidad de condiciones especiales (Álvarez, 2009).

2.6 SIMULACIÓN ACÚSTICA

La simulación acústica por elementos finitos debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Definir la geometría del modelo para el estudio a realizar, esta puede ser en 2 o 3 dimensiones. Se define a una parte del modelo como capas perfectamente adaptadas o PML, con el fin de simular la propagación de ruido en campo libre.

Las capas perfectamente adaptadas o PML se ocupan de absorber toda la radiación incidente sobre ellas. La utilización de las PML demanda que se establezca la velocidad de onda de referencia, en este caso el valor de referencia es 343 m/s que es la velocidad del sonido en el aire (Segura, 2013). En la Figura 3.2 se indica la geometría del modelo utilizado en la simulación

2. Identificar el estudio, de acuerdo al tipo de problema que se dese analizar; para el presente trabajo, se realizará el análisis en el dominio de la frecuencia.

3. Establecer los materiales y las propiedades físicas para el modelo a estudiar.
4. Definir las condiciones de contorno como: presión atmosférica, temperatura e impedancia acústica.
5. Determinar las cargas o fuentes activas del campo.
6. Especificar el tipo de malla a utilizar, para resolver las diferentes ecuaciones de estado. En el presente trabajo se utilizará una malla triangular libre, el tamaño de la malla depende de la longitud de onda más pequeña; como en este caso el dominio de la frecuencia va desde los 50 Hz hasta los 2500 Hz, la longitud de onda más pequeña pertenecerá a la frecuencia más alta.

Para que la malla tenga la densidad suficiente para explicar con exactitud la propagación de las ondas sonora, se consideró que la cantidad de elementos por cada longitud de onda deber ser mínimo de 5 elementos (Álvarez, 2009).

$$T_{max} = \frac{v}{f * n} \quad Ec. \quad 2.8$$

Dónde:

T_{max} = Tamaño máximo del elemento de malla.

v = Velocidad del sonido en el aire.

f = Frecuencia.

n = Número mínimo de elementos por longitud de onda.

7. Resolver el problema utilizando el software por elementos finitos y encontrar la solución al problema estudiado.
8. Analizar la solución al problema, representando gráficamente el postprocesado y analizando las distintas variables estudiadas.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO NUMÉRICO

3.1 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ACÚSTICA

Para la optimización estructural y acústica se partió de un panel acústico, formado por:

- Dos placas de hierro galvanizado
- Lana mineral de roca de 80 kg/m^3

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de esta barrera acústica y las partes que la conforman.

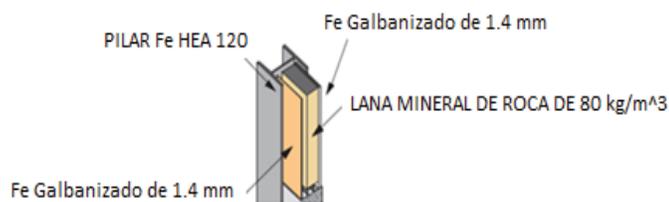


Figura 3. 1 Barrera acústica standard
Fuente: (*Barrera Acústica 3200*, 2000)

3.1.1 GEOMETRÍA DEL MODELO DEL SIMULACIÓN

Para definir la geometría del modelo se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- La altura de una barrera acústica varía entre 2 y 5 m, por este motivo se consideró que todas las barreras acústicas estudiadas tendrán una altura de 2.4 m (Arango & Molina, 2010).
- De acuerdo con el instituto ecuatoriano de normalización INEN, el ancho del carril para una carretera cuya velocidad máxima de circulación sea de 90 km/h es de 3.8 m o superior (Arango & Molina, 2010).

- Para caracterizar la propagación de ruido en campo abierto, se usan capas perfectamente adaptadas o PML tal y como se muestra en la Figura 3.2; las mismas que se definieron en el apartado 2.6.

En base a lo detallado, se ubicada la fuente a 6 m de la pantalla y a 1.5 m de altura del suelo, con el fin de simular el comportamiento de flujo vehicular en una carretera de 4 carriles de circulación. Los niveles de presión sonora se evaluaran en 6 puntos ubicados tal y como se muestra en la Figura 3.2 y la Tabla 3.4.

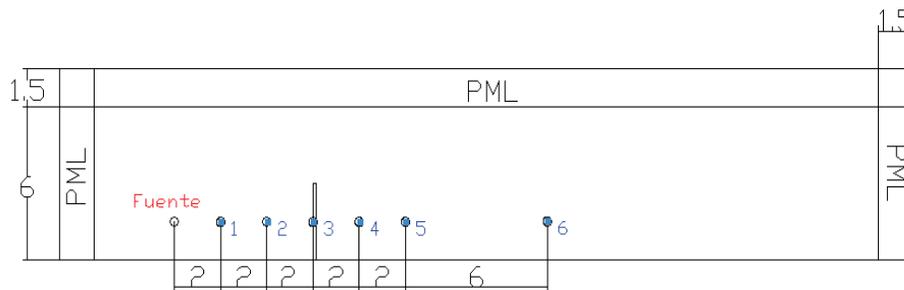


Figura 3. 2 Geometría del modelo de simulación

Fuente: (Propia)

Las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes materiales usados en la simulación acústica y estructural se muestran en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

3.1.2 ALTERNATIVAS DE PANTALLAS ACÚSTICAS

Existen un gran número de combinaciones de materiales que nos garantizan la disminución del nivel de presión sonora, los mismos que fueron seleccionados por su desempeño acústico, durabilidad y disponibilidad en el mercado ecuatoriano.

3.1.2.1 Material absorbente

Lana mineral de roca de 50 mm y 80 kg/m³. Está compuesta por fibras largas y flexibles obtenidas de roca volcánica. La lana mineral de roca ofrece buenas propiedades acústicas, térmicas, además de ser un producto no inflamable; motivo por el cual es ampliamente utilizada (Calorcol S.A, 2004).

El material absorbente garantiza que el capo energético no incremente y de esta manera no afecte a la actividad diaria de las personas.

3.1.2.2 Refuerzo acústico

Los materiales seleccionados como refuerzo acústico son:

- Plancha de gypsum de 15 mm: es un elemento no combustible construido a base de roca de yeso pulverizada y recubierto con una lámina fina de cartón. Son construidos para atenuar frecuencias altas, medias y bajas, la adición de materiales aislantes como lana de vidrio o lana mineral de roca; producen un incremento considerable en la reducción de contaminación acústica. Es así que un panel de 15 mm de espesor aporta una reducción de 41 dB aproximadamente (Soto, 2012).
- Lamina de corcho de 8 mm: es un producto natural y duradero, su estructura formada por celdas llenas de aire, crea una superficie ideal para la absorción de ondas sonoras. De esta manera se evita que las ondas sean transmitidas a través del corcho (Del Río, 2005).

3.1.2.3 Material reflectante

Como material reflectante se usará tol de acero galvanizado de 1.4 mm, para los paneles frontal, posterior y cubiertas laterales, por ser resistente a la intemperie y presentar buenas propiedades mecánicas.

En la Tabla 3.1 se muestran las diferentes configuraciones de pantallas acústicas estudiadas en este trabajo.

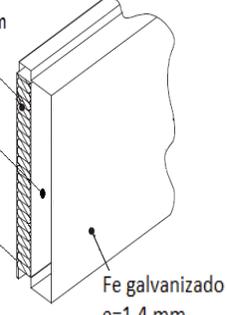
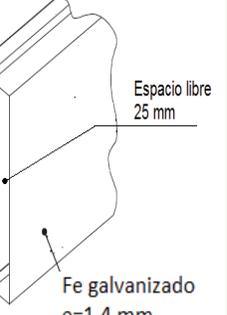
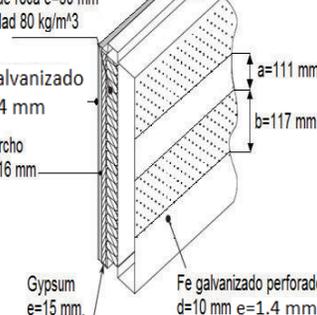
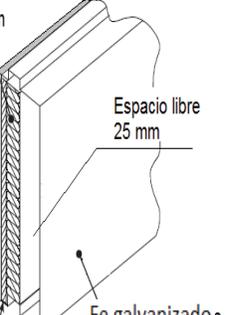
PANTALLA	ESQUEMA	PANTALLA	ESQUEMA
P1	<p>Lana de roca e=50 mm Densidad 80 kg/m³</p> <p>espacio libre de 25 mm</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p>  <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p>	P4	<p>Lana de roca e=50 mm densidad 80 kg/m³</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> <p>Corcho e=16 mm</p> <p>Gypsum e=15 mm.</p> <p>Fe galvanizado perforado d=10 mm e=1.4 mm</p> <p>Espacio libre 25 mm</p> 
P2	<p>Lana de roca e=50 mm densidad 80 kg/m³</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> <p>Gypsum e=15 mm.</p> <p>Espacio libre 25 mm</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> 	P5	<p>Lana de roca e=50 mm densidad 80 kg/m³</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> <p>Corcho e=16 mm</p> <p>Gypsum e=15 mm.</p> <p>Fe galvanizado perforado d=10 mm e=1.4 mm</p> <p>a=111 mm b=117 mm</p> 
P3	<p>Lana de roca e=50 mm densidad 80 kg/m³</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> <p>Corcho e=16 mm</p> <p>Gypsum e=15 mm.</p> <p>Espacio libre 25 mm</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> 	P6	<p>BARRERA CON BORDE SUPERIOR INCLINADO</p> <p>Fe galvanizado perforado d = 10 mm; e = 1.4 mm</p> <p>Lana de roca e=50 mm densidad 80 kg/m³</p> <p>Fe galvanizado e=1.4 mm</p> <p>Corcho e=16 mm</p> <p>Gypsum e= 20 mm</p> <p>Parte superior inclinada</p> <p>109 100</p> 

Tabla 3. 1 Configuración de las pantallas acústicas

Fuente: (Propia)

En todas las pantallas acústicas analizadas, se dejó una cámara de aire de 25 mm, debido a que una cámara de aire de 25 mm atenúa un promedio de 3 a 5 dB (Soto, 2012).

En las Tablas 3.2 y 3.3 se especifican las propiedades mecánicas y físicas de los materiales usados en la etapa de simulación.

MATERIALES USADOS COMO REFUERZO ACÚSTICO			
MATERIAL	DENSIDAD	MODULO DE YOUNG	COEFICIENTE DE POISSON
	[kg/m³]	[Pa]	[v]
Acero galvanizado	7850	200e9	0.33
Gypsum	760	2.1e9	0.24
Corcho	250	0.1e9	0.15

Tabla 3. 2 Propiedades de los materiales usados como refuerzo acústico

Fuente: (Bies & Hansen, 2009)

MATERIAL ABSORBENTE			
MATERIAL	DENSIDAD	MODULO DE YOUNG	COEFICIENTE DE POISSON
	[kg/m³]	[Pa]	[v]
Lana mineral de roca	80	5.44e5	0.123

Tabla 3. 3 Propiedades del material absorbente

Fuente:(Wang, Deng, & Huang, 2013)

3.1.3 ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Para el estudio de las pantallas se procede tal y como se indica en el apartado 2.6, con las siguientes consideraciones:

- Radiación de onda cilíndrica y presión incidente de 0.3 Pa en la fuente
- Impedancia acústica de $3.49 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$
- Restricción fija en la base de la pantalla.
- Las frecuencias analizadas corresponden a la banda de tercios de octava distribuidas tal y como se muestra en la Tabla 2.4, el dominio de estudio está entre los 50 y 2500 Hz.
- El número de elementos por longitud de onda es de 6. Por lo tanto el Tamaño máximo del elemento de maya es de:

$$T_{max} = \frac{343 \frac{m}{s}}{2500 \text{ Hz} * 6} = 0.0228 \text{ m} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Los resultados del estudio previo sin pantalla son mostrados en el Gráfico 3.6, en el observamos el comportamiento de la onda sonora en el dominio de la frecuencia, para los puntos de evaluación que se muestran en la Tabla 3.7

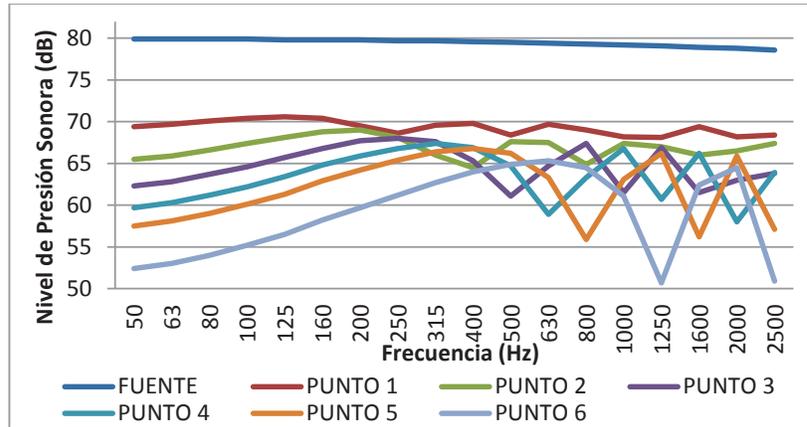


Gráfico 3. 1 Nivel de presión sonora sin pantalla
Fuente: (Propia)

En el estudio sin pantalla la reducción del nivel de presión sonora, corresponde a la atenuación por divergencia geométrica Ecuación 3.2. Por tal motivo cada vez que la distancia se duplica con respecto a la fuente se reducen aproximadamente 11 dB, estos resultados se muestran en el Tabla 1 del Anexo 1.

$$NPS = 10 \log_{10} r + 7.9 \quad dB \quad \text{Ec. 3.2}$$

Dónde:

r = Distancia del receptor a la fuente

No Puntos	DISTANCIA A LA FUENTE
Punto 1	2 m
Punto 2	4 m
Punto 3	6 m
Punto 4	8 m

Punto 5	10 m
Punto 6	16 m

Tabla 3. 4 Distribución de los diferentes puntos de evaluación

Fuente: (Propia)

A continuación se presentan los estudios realizados con la inserción las barreras acústicas que se muestran en la Tabla 3.1.

3.1.3.1 Pantalla acústica P1

La pantalla P1 es de 2.4 m de altura, compuesta por 50 mm de lana mineral de roca de 80 kg/m³ y una cubierta de hierro galvanizado de 1.4 mm de espesor. Los niveles de presión sonora en el receptor y las pérdidas por inserción de la pantalla P1, se muestran en los Gráficos 3.2 y 3.3 respectivamente.

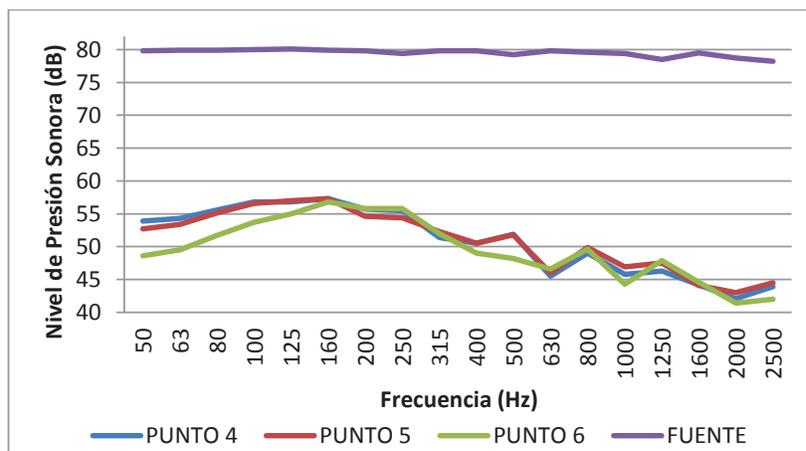


Gráfico 3. 2 Nivel de presión sonora con la pantalla P1

Fuente: (Propia)

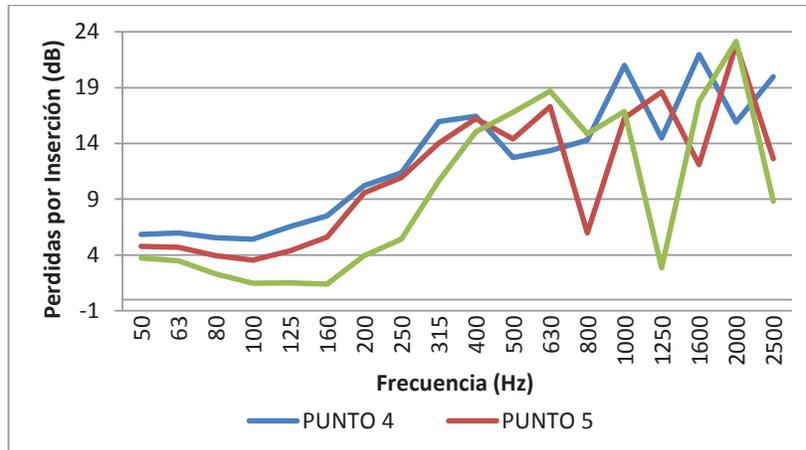


Gráfico 3. 3 Pérdidas por inserción de la pantalla P1

Fuente: (Propia)

3.1.3.2 Pantalla acústica P2

La pantalla P2 lleva en su interior 50 mm de lana mineral de roca de 80 kg/m³ y una plancha de gypsum de 15 mm; todo esto contenido en una carcasa de hierro galvanizado de 1.4 mm de espesor, todos los elementos que forman la pantalla acústica P2 están distribuidos tal y como se muestran en la Tabla 3.1. Una vez finalizado el estudio de la pantalla P2, se calculó la pérdida por inserción cuyos resultados se muestran en el Gráfico 3.5.

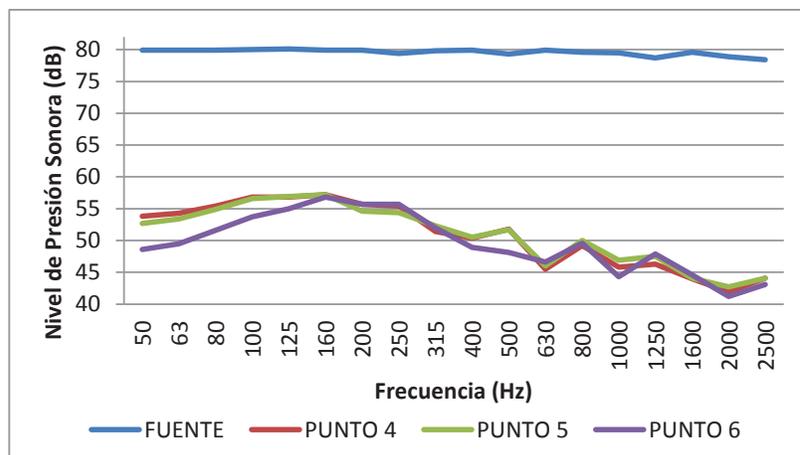


Gráfico 3. 4 Nivel de presión sonora con la pantalla P2

Fuente: (Propia)

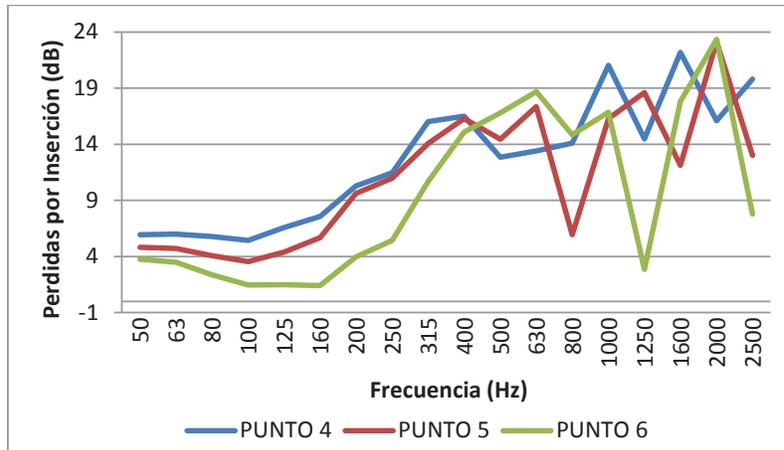


Gráfico 3. 5 Pérdidas por inserción de P2

Fuente: (Propia)

3.1.3.3 Pantalla acústica P3

La pantalla P3 está formada por 50 mm de lana mineral de roca de 80 kg/m^3 , el refuerzo acústico está compuesto de una plancha de gypsum y corcho de 15 y 16 mm de espesor respectivamente; la cubierta es de hierro galvanizado de 1.4 mm, todos los elementos que forman la pantalla acústica P3 están distribuidos tal y como se muestran en la Tabla 3.1.

Los niveles de ruido en el receptor y las pérdidas por inserción de la pantalla P3, se muestran en los Gráficos 3.6 y 3.7 respectivamente. La Tabla 3.7 muestra la de atenuación en bandas de octava conseguida con la pantalla P3 en el estudio acústico-estructural.

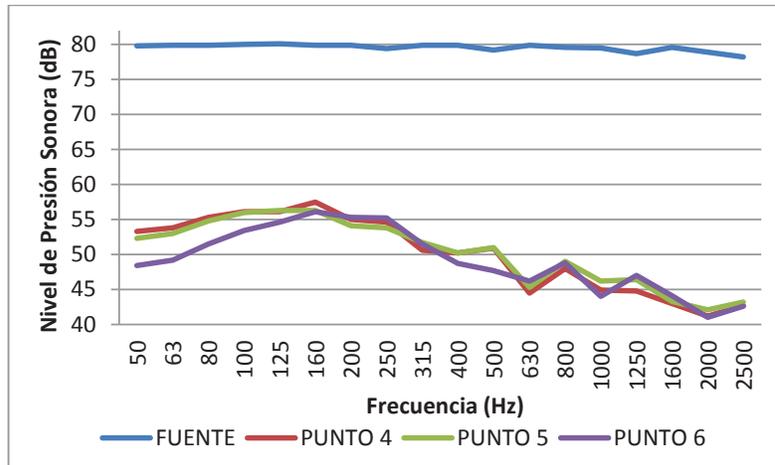


Gráfico 3. 6 Nivel de presión sonora con la pantalla P3

Fuente: (Propia)

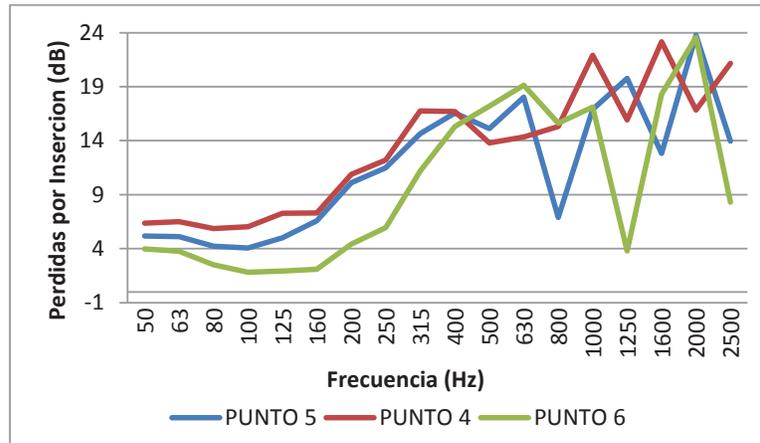


Gráfico 3. 7 Pérdidas por inserción de la pantalla P3

Fuente: (Propia)

3.1.3.4 Pantalla acústica P4

La pantalla P4 se trata de una barrera de 2.4 m de altura. En su interior lleva 50 mm de lana mineral de roca de 80 kg/m^3 , el refuerzo acústico está formado por una plancha de gypsum y corcho de 15 y 16 mm de espesor respectivamente; la cubierta frontal es de hierro galvanizado perforado de 1.4 mm de espesor, con perforaciones de 10 mm de diámetro. En la Tabla 3.1 se detalla la distribución de los elementos que forman la pantalla P4.

A continuación en el Gráfico 3.8 se observa la reducción de los niveles de ruido con la pantalla P4 y las pérdidas por inserción de la pantalla P4 en el Gráfico 3.9.

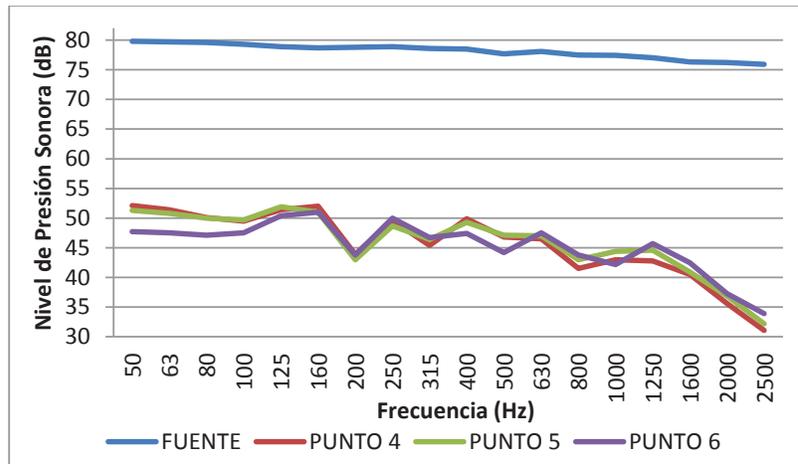


Gráfico 3. 8 Nivel de presión sonora con la pantalla P4

Fuente: (Propia)

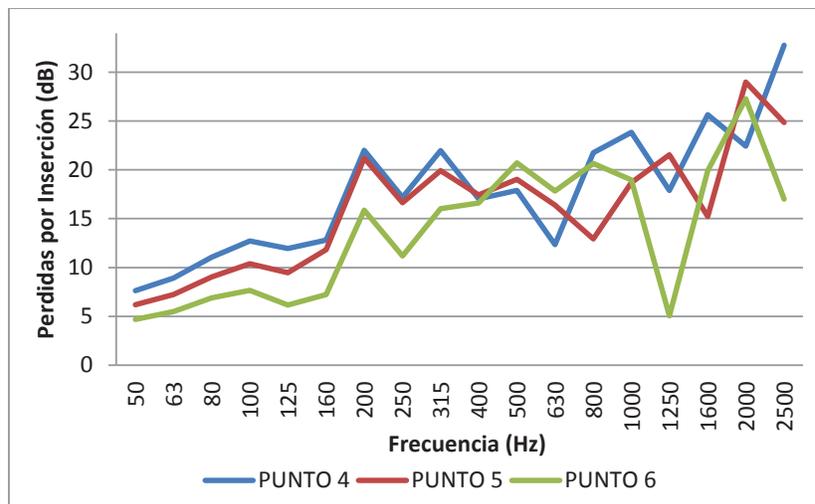


Gráfico 3. 9 Pérdidas por inserción de la pantalla P4

Fuente: (Propia)

3.1.3.5 Pantalla acústica P5

La cubierta frontal de la pantalla P5 es de hierro galvanizado semi-perforado de 1.4 mm de espesor, el diámetro de las perforaciones es de 10 mm, la barrera tiene 2.4 m de altura; en su interior lleva lana mineral de roca de 80 kg/m³. El

refuerzo acústico está formado por una plancha de gypsum y corcho, en la Tabla 3.1 se detalla la distribución y detalle de los elementos que forman la pantalla P5.

Los niveles de ruido en el receptor junto con las pérdidas por inserción de la pantalla P5 en el dominio de la frecuencia, se muestran en los Gráficos 3.10 y 3.11.

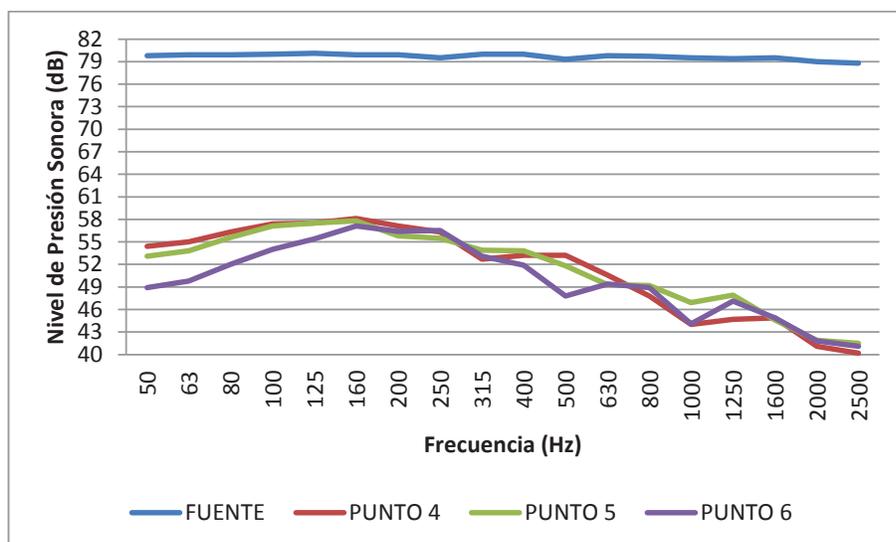


Gráfico 3. 10 Nivel de presión sonora con la pantalla P5
Fuente: (Cálculos propios)

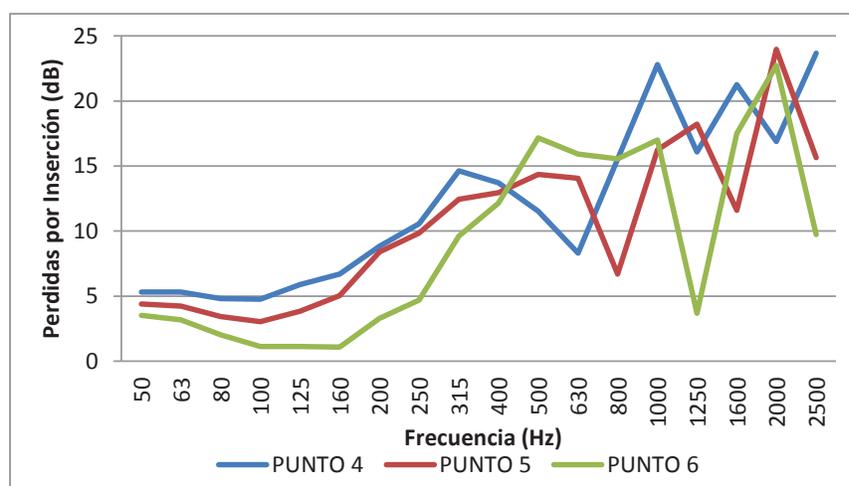


Gráfico 3. 11 Pérdidas por inserción de la pantalla P5
Fuente: (Propia)

3.1.3.5 Pantalla acústica P6

Esta barrera acústica posee los mismos elementos que la pantalla P5, la diferencia radica en el cambio de geometría en la parte superior de la barrera acústica tal y como se muestra en la Tabla 3.1.

El Gráfico 3.12 muestra los niveles de ruido en el receptor, con la presencia de la pantalla acústica.

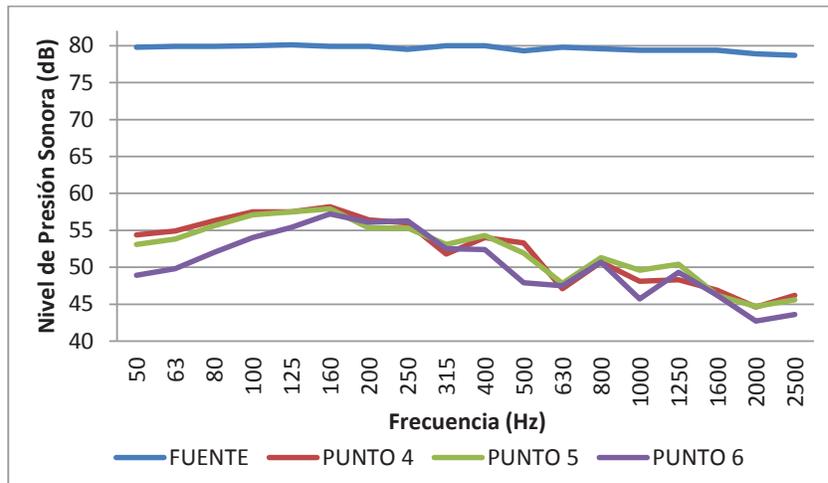


Gráfico 3. 12 Nivel de presión sonora con la pantalla P6

Fuente: (Propia)

En el siguiente gráfico, se exponen las pérdidas por inserción de la pantalla P6; los mismos que fueron calculados en base a los resultados del Gráfico 3.13

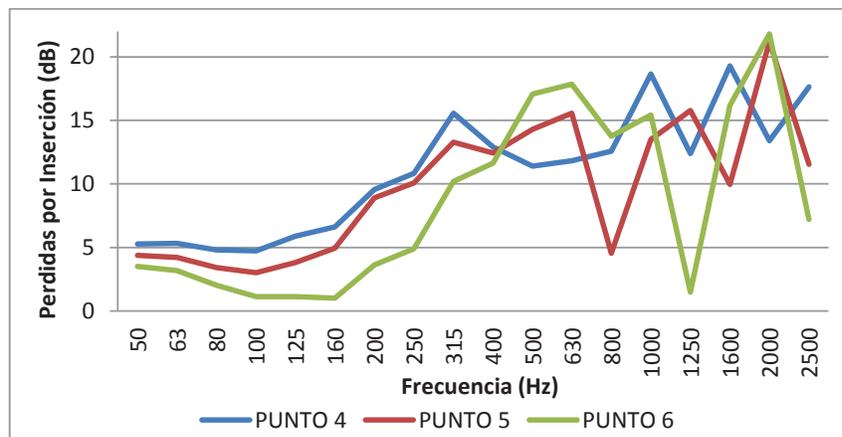


Gráfico 3. 13 Pérdidas por inserción de la pantalla P6

Fuente: (Propia)

3.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO NUMÉRICO

En los Gráficos 3.2, 3.4, 3.6, 3.10 Y 3.12; los puntos 4, 5 y 6 tienen un comportamiento homogéneo con variaciones mínimas de 0.8 dB a 4.2 dB, esto en el rango de frecuencias que va desde 50 Hz a 400 Hz. Para frecuencias mayores a 400 Hz, el nivel energético decrece y muestran pequeños picos que se deben en gran parte a la inserción de la pantalla y al comportamiento de la fuente en dichas frecuencias.

El Gráfico 3.8 es relativamente plano, en el intervalo de frecuencias de 50 Hz a 160 Hz, para frecuencias mayores a 160 Hz se observa un comportamiento no homogéneo con picos en cada frecuencia que indican el alto desempeño de la pantalla en frecuencias graves.

Los Gráficos 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 y 3.13 muestran que las pérdidas por inserción de la pantalla son mínimas en el rango de frecuencias de 50 Hz a 160 Hz. De los 160 Hz a 2500 Hz se dan las máximas perdidas por inserción; Los distintos picos muestran la frecuencia en la cual las pérdidas por inserción son máximas o mínimas.

Una vez analizados los resultados de la simulación y después de haber realizado los cálculos respectivos, obtuvo la pérdida por inserción en bandas de octava que produce cada pantalla acústica en los diferentes puntos de evaluación; estos resultados son mostrados en la Tabla 3.5

PTOS. EVALUACIÓN	FRECUENCIA	PANTALLAS					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
PUNTO 4	63	5.8	5.9	6.2	9.2	5.1	5.1
	125	6.6	6.7	7	12.5	5.9	5.9
	250	12.2	12.2	12.9	19.7	11	11.6
	500	14.5	14.6	15.3	16.6	12.1	12.2
	1000	17.1	17	18.1	21.8	18.5	15.1
	2000	20.3	20.4	21.4	26.5	21.2	17.8
	63	4.4	4.5	4.7	7.5	3.9	3.9
	125	4.6	4.7	5.4	10.6	4.1	4.1
	250	11.5	11.5	12.1	18.8	10.2	10.7

PUNTO 5	500	15.6	15.7	16.2	17.7	13.6	13.6
	1000	15.1	15.7	16	19.3	15.3	12.9
	2000	18.2	18.4	19.1	24	19.2	16.5
PUNTO 6	63	3	3.1	3.3	5.7	2.8	2.8
	125	1.4	1.4	2	6.9	1.1	1.1
	250	6.5	6.6	7	13.8	5.8	6.1
	500	16.8	16.8	17.1	18.2	14.8	14.9
	1000	13.7	13.7	14.4	17.3	14.3	12.4
	2000	19	18.8	19.2	22.7	19	17.5

Tabla 3. 5 Pérdidas por inserción de la pantalla

Fuente: (Propia)

Los resultados de la Tabla 3.5 revelan, que las máximas pérdidas por inserción son ocasionadas por pantalla P4; la baja perdida por inserción de las diferentes pantallas a bajas frecuencias se debe al tamaño de la longitud de onda. Los Gráficos 3.14, 3.15 y 3.16 muestran el nivel de ruido con pantalla vs sin pantalla en tercios de octava.

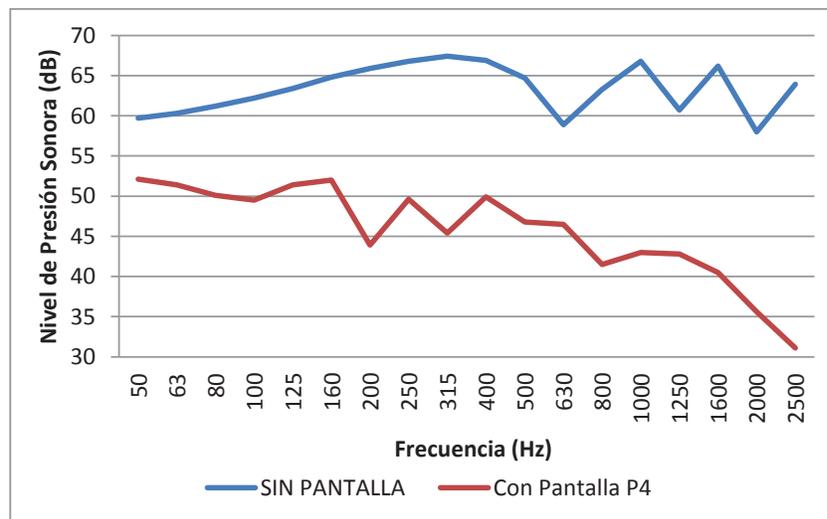


Gráfico 3. 14 Nivel de ruido sin pantalla vs con pantalla P4 en el punto 4

Fuente: (Propia)

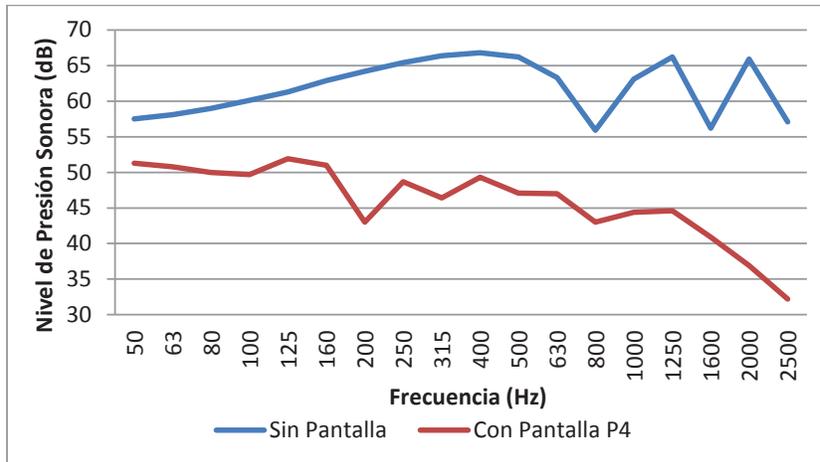


Gráfico 3. 15 Nivel de ruido sin pantalla vs con pantalla P4 en el punto 5
Fuente: (Propia)

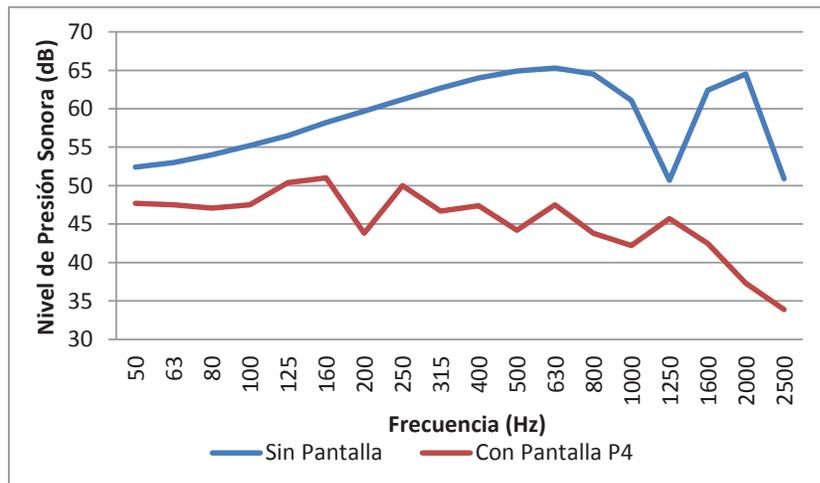


Gráfico 3. 16 Nivel de ruido sin pantalla vs con pantalla P4 en el punto 6
Fuente: (Propia)

En los Gráfico 3.14, 3.15 y 3.16 se observa que el nivel de ruido decae a medida que aumenta la frecuencia. A bajas frecuencias se advierte que la diferencia entre el nivel de ruido con y sin pantalla es mínimo, debido a que la longitud de onda en estas frecuencias es mayor que el espesor de la pantalla; a frecuencias medias y altas, ocurre todo lo contrario logrando atenuar gran parte del ruido.

Una vez finalizado el estudio de cada una de las pantallas y de comparar las pérdidas por inserción de cada una de las barreras acústicas, se llegó a la conclusión que la mejor alternativa se solución es la pantalla P4, por mostrar un mejor desempeño en todo el rango de frecuencia analizado. Por esta razón el

prototipo se lo construirá con las características presentes en la pantalla acústica P4. En el Anexo 3 se muestran el postprocesado de la pantalla P4 con el fin de visualizar los efectos que produce la inserción de la pantalla acústica.

3.3.4 ESTUDIO ESTRUCTURAL DEL PANEL FRONTAL

En vista de que panel frontal de la pantalla acústica, es el que estará expuesto tanto a las cargas producidas por el viento como al campo de presión incidente de ruido; se realizó el estudio estructural en el dominio de la frecuencia únicamente al panel frontal de la pantalla acústica. Para ello se consideró que la velocidad promedio máxima en la ciudad de Quito es de 51.5 km/h o 32 mph, este dato fue obtenido de la página web de la Agencia Espacial Civil Ecuatoriana.

Para determinar la carga producida por la acción del viento se utilizó la siguiente ecuación (McComarc, 1991).

$$Q = 0.002558 * v^2 \quad \text{Ec. 3.3}$$
$$Q = 0.002558 * (32 \text{ mph})^2 = 2.619 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$$
$$Q = 125.35 \text{ Pa}$$

Como se puede apreciar en el Gráfico 3.17 el Esfuerzo de Von Mises es mucho menor que el límite de elasticidad del material que es de 235 MPa, por lo tanto el panel frontal soportará la carga producida por la acción del viento. En la Figura 3.3 se observa que la mayor cantidad de energía se concentra en el centro del panel y disminuye en los extremos del mismo.

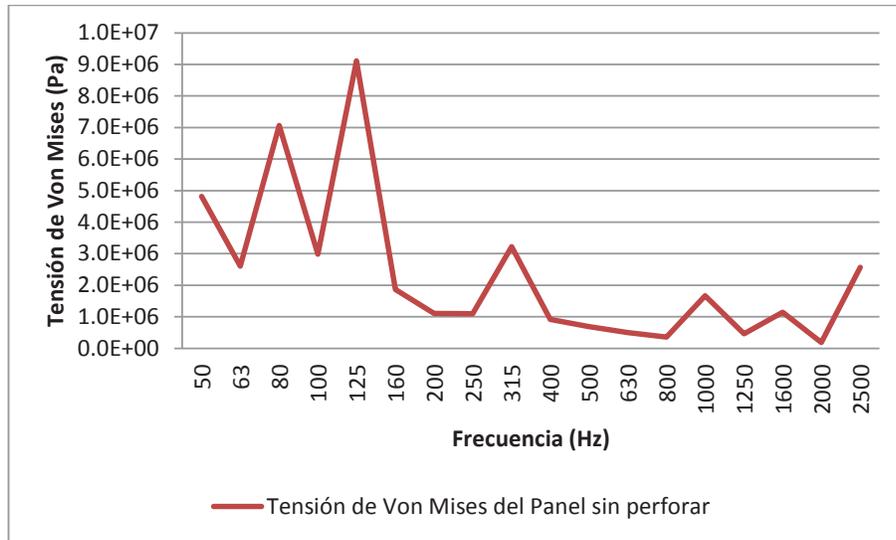


Gráfico 3. 17 Tensión de Von Mises para el Panel sin Perforar
Fuente: (Propia)

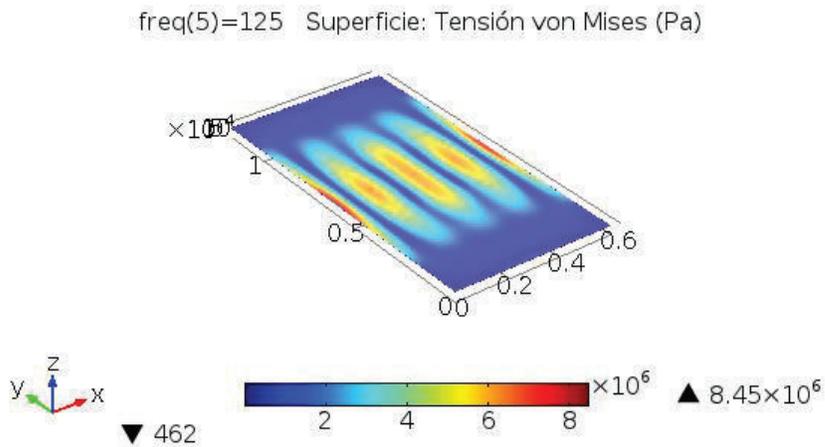


Figura 3. 3 Estudio Estructural del Panel sin Perforar
Fuente: (Cálculos Propios)

En el Grafico 3.18 se muestra el Esfuerzo máximo de Von Mises, con el rediseño del panel frontal. Hay que tomar en cuenta que el estudio del panel frontal mostrado en el Grafico 3.17, indica que el Esfuerzo máximo de Von Mises es de 23.4 MPa el mismo que no se supera el límite elástico de deformación. La Figura 3.4 indica que el esfuerzo máximo se concentra en la parte central del panel .

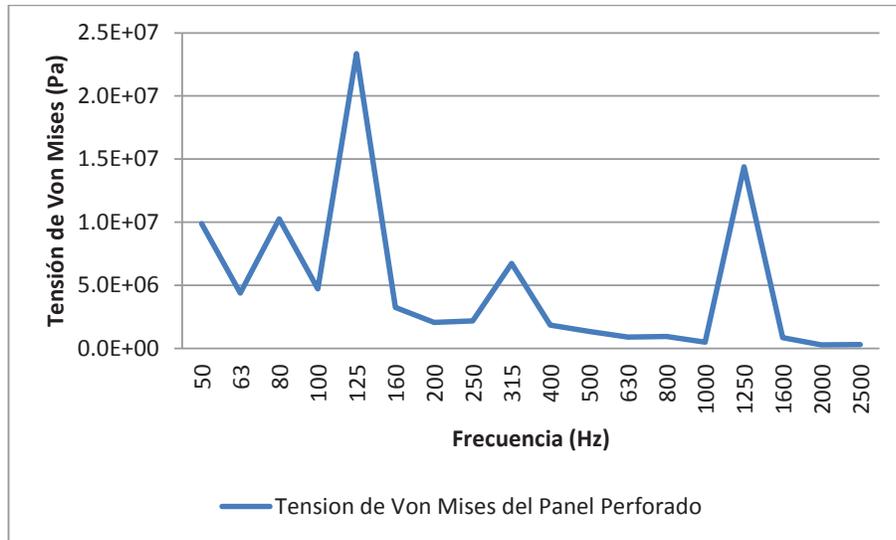


Gráfico 3. 18 Tensión de Von Mises para el Panel Perforado

Fuente: (Propia)

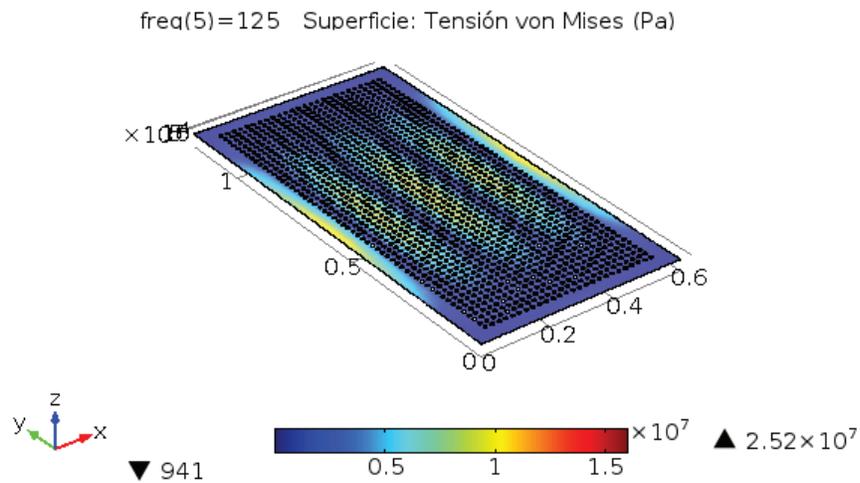


Figura 3. 4 Estudio Estructural del Panel sin Perforar

Fuente: (Cálculos Propios)

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE CAMPO

En este capítulo se realiza una descripción de los aspectos técnicos, empleados para la construcción del prototipo de la pantalla acústica seleccionada en el capítulo anterior. También se describen las pruebas de campo destinadas a verificar los valores de atenuación obtenidos en la simulación acústica y estructural de la pantalla.

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

El proceso de fabricación del prototipo de pantalla acústica, se lo ha realizado en el taller industrial de la empresa AGP soluciones, el mismo que cuenta con las herramientas necesarias para la construcción del prototipo.

La fabricación del prototipo presenta limitantes como: la disponibilidad de la materia prima en el mercado y el aspecto económico, por este motivo se debe elegir el proceso más adecuado; que facilite la construcción del prototipo a un costo conveniente. Los detalles del prototipo se muestran en los planos del Anexo 2, la Figura 4.1 muestra el prototipo de la pantalla acústica a construir.

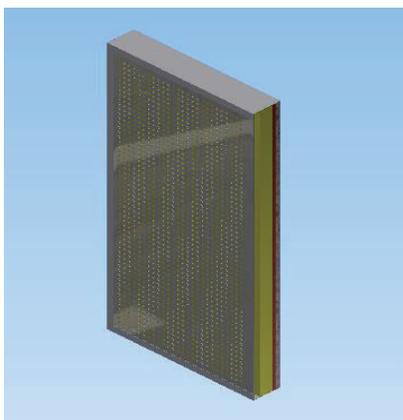


Figura 4. 1prototipo de pantalla acústica

Fuente: (Propia)

4.1.1 PANEL FRONTAL PERFORADO

La construcción del panel perforado, se la realizo según las hojas de procesos 1.1 y 1.2 del Anexo 3. Dicho panel está construido de una lámina de acero galvanizado de 1,4 mm de espesor.

Para la fabricación del panel frontal se partió de una lámina de acero galvanizado de 1.2 x 0.6 m. Debido al gran número de perforaciones que posee el panel, se dibujó una cuadrícula sobre la plancha metálica; para luego proceder a realizar dichas perforaciones tal y como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4. 2 Lámina de acero galvanizado marcada.

Fuente: (Propia)

Una vez finalizadas todas las perforaciones, se limpió la superficie para dar por terminado la construcción del panel frontal (Figura 4.3).

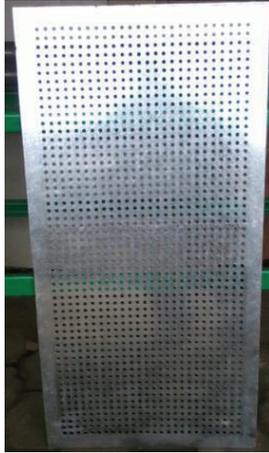


Figura 4. 3 Panel frontal perforado

Fuente: (Propia)

4.1.2 PANEL POSTERIOR

El panel fue construido siguiendo la hoja de proceso 2.1 del Anexo 3, en ella se detalla todos los pasos a seguir para la construcción del panel que se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4. 4 Panel posterior

Fuente: (Propia)

4.1.3 MATERIAL ABSORBENTE

La capa absorbente está formada por una plancha de lana mineral de roca de 1.2 x 0.6 m y 80 kg/m³ de densidad. Las dimensiones de la plancha es de 1 x 0.6 m; por lo tanto para cubrir la superficie total del prototipo fueron necesarias dos planchas de lana mineral de roca con las características ya mencionadas.

4.1.4 REFUERZO ACÚSTICO

El refuerzo acústico está formado por una capa de corcho y una capa de gypsum de 16 y 15 mm respectivamente. Las dimensiones del refuerzo acústico son de 1.2 x 0.6 m.

4.1.5 CUBIERTA SUPERIOR E INFERIOR

Está cubierta fue construida siguiendo las especificaciones de las hojas de proceso 3.1 y 3.2 del Anexo 3, después de haber realizado el proceso de doblado se realizaron 6 perforaciones de 3 mm de diámetro cada una; las que posteriormente se usaran para ensamblar el prototipo. En la Figura 4.5 se muestra la cubierta ya terminada.

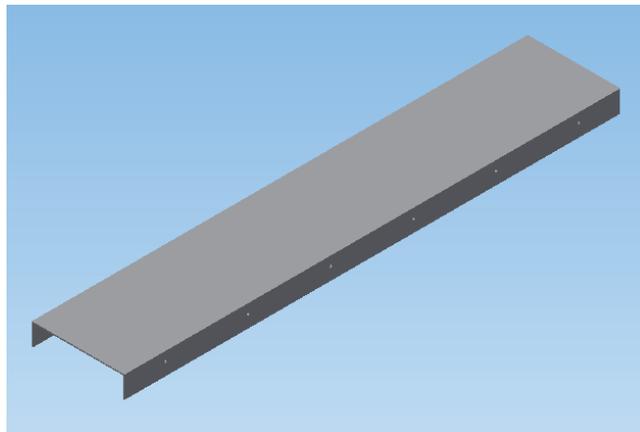


Figura 4. 5 Cubierta superior e inferior

Fuente: (Propia)

4.1.6 CUBIERTA LATERAL DERECHA E IZQUIERDA

La construcción de esta cubierta se la realizo siguiendo el procedimiento de la hoja de proceso 4.1 y 4.1 del Anexo 3. El plano número 4, hay que recalcar que

para el proceso de fabricación se empleó el mismo procedimiento indicado en el apartado 4.1.5

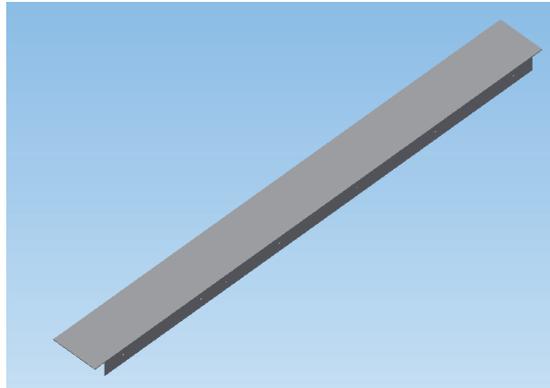


Figura 4. 6 Cubierta lateral izquierda y derecha

Fuente: (Propia)

4.2 MONTAJE DEL PROTOTIPO

Antes de realizar el montaje es necesario contar con cada una de las partes que forman el prototipo, para evitar inconvenientes en el ensamble del mismo. El montaje del prototipo de pantalla acústica se lo realiza de la siguiente forma:

- Verificar que se cuente con el número adecuado tornillos, remaches y herramientas para evitar tener complicaciones por la falta de estos elementos.
- Para el montaje del material absorbente y el refuerzo acústico, se fija el panel posterior a las cubiertas laterales y a la cubierta superior tal y como se muestra en la Figura 4.7. Se fijó la plancha de gypsum, la capa de corcho se la fijo sobre el gypsum con pegamento de contacto y finalmente se colocó la capa de material absorbente. En la Figura 4.7 se observa el prototipo con el material absorbente en su interior.



Figura 4. 7 Montaje del panel frontal, refuerzo acústico y material absorbente

Fuente: (Propia)

- Luego de haber colocado el material absorbente y el refuerzo acústico, se fija la cubierta superior al panel posterior.
- Usando remaches se fija el panel perforado a la cubierta superior y laterales.
- Para finalizar se coloca la cubierta inferior, asegurándola con remaches y se sueldan cada una de las esquinas; tal y como se muestran en la Figura 4.8



Figura 4. 8 Proceso de Soldadura del Prototipo de Pantalla Acústica

Fuente: (Propia)

4.3 ANÁLISIS DE COSTOS

Antes de la construcción de la pantalla acústica seleccionada, es necesario cuantificar los costos necesarios para la fabricación de dicha pantalla. El valor total dependerá de los costos directos e indirectos.

4.3.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos dependen de los siguientes factores:

- Materia prima.
- Elementos normalizados.
- Costo de mecanizado
- Costos de ensamblado.

4.3.1.1 Costos de materia prima

La materia prima son todos los materiales usados en la construcción de las diferentes partes que forman el prototipo de pantalla acústica. A continuación en la Tabla 4.1 se muestra la lista de materiales usados.

MATERIA PRIMA			
MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Plancha de tol galvanizado 1220 X 2440 X1.4 mm	1	32.8	32.8
Lamina de corcho 1200 X 1200 X 8 mm	1	32	32
Plancha de Gypsum 1220 X 2440 X 15 mm	1	13.6	13.6
Lana Mineral de Roca 600 X 1000 X 50 mm y 80 kg/m ³	2	19.6	39.2
SUBTOTAL			117.6

Tabla 4.1 Costos de materia prima

Fuente: (Propia)

4.3.1.2 Costos de elementos normalizados

Se considera elementos normalizados, aquellos componentes que ya han sido construidos y que se los puede adquirir en los centros ferreteros. Los costos de estos componentes se los detalla en la Tabla 4.2

ELEMENTOS NORMALIZADOS			
MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Tornillo negro 1/2 X 6	12	0.03	0.36
Remache 1/8 X 1/2	60	0.05	3
SUBTOTAL			3.36

Tabla 4.2 Costos de elementos normalizados

Fuente: (Propia)

4.3.1.3 Costos de Mecanizado

Son aquellos que están íntimamente relacionados con la mano de obra directa, necesaria para operar las diferentes máquinas utilizadas en la construcción del prototipo de pantalla acústica. Estos costos ya incluyen la mano de obra y se los muestra en la Tabla 4.3; son calculados en función del tiempo de operación de los equipos usados en cada proceso de construcción.

COSTOS DE MAQUINADO			
MAQUINA	COSTO DE MAQUINADO	TIEMPO	COSTO
	(USD/h)	(h)	(USD)
Amoladora	3.5	1	3.5
Cortadora Neumática Manual	7	1	7
Cortadora de Disco	3.5	1	3.5
Compresor	2.5	1	2.5
Dobladora de tol	2.5	1	2.5
Esmeril	2.5	1	2.5
Taladro Manual	3	32	96

Soldadora de Arco Eléctrico	8	1	8
SUBTOTAL			125.5

Tabla 4. 3 Costos de mecanizado

Fuente: (Propia)

4.3.1.4 Costos de Ensamblado

Son los costos que incurren por motivos de ensamblado del prototipo y pruebas de campo.

COSTOS DE ENSAMBLADO				
PERSONAL	CANTIDAD	TIEMPO	COSTO/HORA	COSTO TOTAL
		(h)	(USD/h)	(USD)
Egresado de Ing. Mecánica	1	30	3	90
SUBTOTAL				90

Tabla 4. 4 Costos de Ensamblado

Fuente: (Propia)

4.3.1.5 Total de Costos Directos

A continuación en la Tabla 4.5 se muestra el total de los costos directos.

RUBRO	VALOR
Materia Prima	117.6
Elementos Normalizados	3.36
Costos de Maquinado	125.5
Costos de Ensamblado	90
TOTAL	336.46

Tabla 4. 5 Costos Directos Totales

Fuente: (Propia)

4.3.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos dependen de los siguientes factores:

- Costos de ingeniería.
- Gastos imprevistos.
- Materiales indirectos.

4.3.2.1 Costos de Ingeniería

Los costos de ingeniería se los obtuvieron en base a la tabla de salarios mínimos sectoriales del ministerio de trabajo.

COSTOS DE INGENIERÍA		
ACTIVIDAD	TIEMPO	COSTO
	(h)	(USD)
Definición del problema	3	9
Investigación del tema	160	480
Modelación y simulación	360	1080
Selección de alternativas	3	9
Elaboración de planos	40	120
Desarrollo de la memoria escrita	800	2400
SUBTOTAL		4098

Tabla 4. 6 Costos de Ingeniería

Fuente: (Propia)

4.3.2.2 Costos de Materiales Indirectos

COSTOS DE MATERIALES INDIRECTOS			
MATERIAL	CANTIDAD	V. UNITARIO	COSTO
Broca HSS 1/8 in	2	0.83	1.66
Broca HSS 10 mm	1	0.26	0.26
Broca HSS 3/8 in	1	2.01	2.01
Broca HSS 1/4 in	1	2.52	2.52

Broca HSS 17/64 in	1	2.73	2.73
Brocha de 1 in	1	0.6	0.6
Cemento de contacto	4	0.9	3.6
Cinta multiuso	2	1.15	2.3
Disco de pulir	1	3.5	3.5
Disco de corte Dewal	1	3.96	3.96
Tapones auditivos	2	0.65	1.3
SUBTOTAL			24.44

Tabla 4. 7 Costos de Materiales Indirectos

Fuente: (Propia)

4.3.2.3 Gastos Imprevistos

Los gastos de imprevistos comprenden, todos los costos generados por transporte y movilización, impresión de planos, impresión de documentos y gastos varios. Todos estos costos se muestran en la Tabla 4.7.

GASTOS DE IMPREVISTOS	
ÍTEM	VALOR
Transporte y Movilización	50
Impresión de Planos	10
Impresión de Documentos	25
Gastos varios	25
SUBTOTAL	110

Tabla 4. 8 Gastos de Imprevisto

Fuente: (Propia)

4.3.2.4 Total de Costos Indirectos

Los costos indirectos se indican en la Tabla 4.9

RUBRO	VALOR
Costos de Ingeniería	4098
Costos de Materiales	24.44

Indirectos	
Gastos de Imprevistos	110
TOTAL	4232.44

Tabla 4. 9 Costos Indirectos

Fuente: (Propia)

4.3.3 COSTOS TOTALES DE FABRICACIÓN

Una vez calculados los costos directos e indirectos, se suma estos valores y se obtiene los costos totales de fabricación. Los mismos que se muestran en la Tabla 4.10.

COSTOS TOTALES DE FABRICACIÓN	
COSTOS DIRECTOS	336.46
COSTOS INDIRECTOS	4232.44
TOTAL	4568.9

Tabla 4. 10 Costos de Fabricación

Fuente: (Propia)

4.4 PRUEBAS DE CAMPO

Posterior al ensamblado del prototipo se realizaron las pruebas de campo, en dos locaciones tal y como se puede apreciar en la Figura 4.9 y Figura 4.10. La primera evaluación se la realizó en los predios de la Escuela Politécnica Nacional en la cancha de la facultad de Ingeniería Mecánica, la cual no cumplía con las condiciones de campo abierto ya que existían varias superficies reflejantes (piso y paredes). Una segunda evaluación se la realizo en la cancha del conjunto residencial San Emilio, ubicado en el barrio Miravalle de Puengasi; en donde la única superficie reflejante era el piso de concreto.



Figura 4. 9 Locación uno Escuela Politécnica Nacional

Fuente: (Propia)



Figura 4. 10 Locación 2 Conjunto San Emilio

Fuente: (Propia)

4.4.1 PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas con el prototipo se las realizaron siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Ubicar seis puntos de medición siguiendo el esquema de la Figura 4.11.

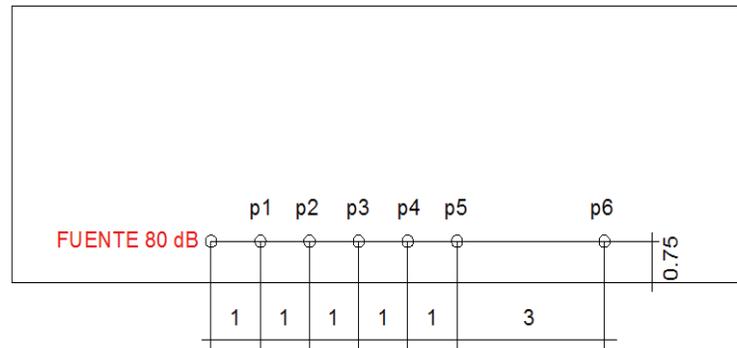


Figura 4. 11 Ubicación de los puntos de evaluación

Fuente: (Propia)

2. Colocar la fuente de ruido a 1 m del primer punto de evaluación.
3. Medir las condiciones ambientales; velocidad del viento y temperatura.
4. Calibrar el equipo de medida, tal y como se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4. 12 Calibración del sonómetro

Fuente: (Propia)

5. Medir el nivel de ruido de fondo, el mismo que debe ser al menos 10 dB menos al nivel de presión sonora de la fuente.
6. Calibrar la fuente hasta los 80 dB aproximadamente.
7. Medir los niveles de presión sonora en cada punto, ubicando el sonómetro a 0.75 m del suelo.
8. Ubicar el prototipo en el punto tres tal y como se muestra en el esquema de la Figura 4.13.

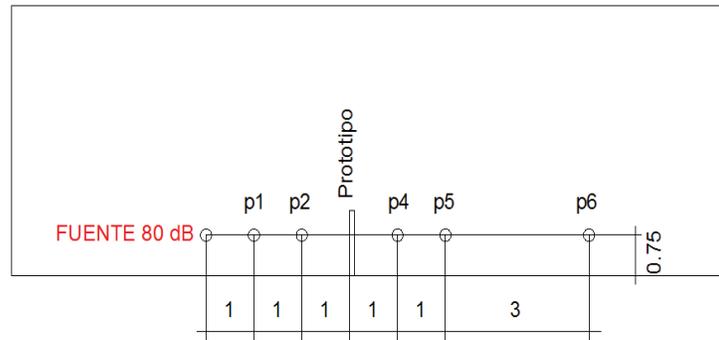


Figura 4. 13 Esquema para ubicación del prototipo

Fuente: (Propia)

9. Medir los niveles de presión sonora con la presencia del prototipo.

10. Llenar la hoja de datos del Anexo 4 y Anexo 5.

4.4.2 EQUIPOS DE MEDIDA Y PROGRAMAS UTILIZADOS

Los equipos utilizados en las pruebas de campo fueron facilitados por la empresa Lambda Acoustics S.A. Los mismos que se indican a continuación.

- Sonómetro tipo 1 SVANTEK modelo SVAN979.
- Calibrador de niveles sonoros Larson Davies modelo CAL200.
- Generador de tonos TONE PORT UX2.
- Amplificador TAPCO TRUMP 1500 w
- Software SPECTRAPLUS 32 bits.
- Software SVANTEK 979 32 bits.
- Anemómetro SPEED TECH SM-18.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se detallaran los resultados obtenidos en las pruebas de campo, los mismos que serán comparados con los datos obtenidos en el estudio numérico.

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRIMERA EVALUACIÓN

En la Tabla 5.1 se indican los valores globales de nivel de presión sonora obtenidos en la primera evaluación. Estos resultados fueron obtenidos siguiendo el procedimiento indicado en el punto 4.4.1

Condiciones ambientales y acústicas	
Velocidad del viento	1.2 m/s
Temperatura	24.8 °C
Ruido de Fondo	79.2 Db

Tabla 5. 1 Condiciones ambientales acústicas de la primera evaluación

Fuente: (Propia)

EVALUACIÓN SIN EL PROTOTIPO P4						
N. de Presión Sonora (dB)	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
	80.7	77.3	72.31	71.2	70.3	68.7
EVALUACIÓN CON EL PROTOTIPO P4						
N. de Presión Sonora (dB)	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
	69.9	72.8	69.7

Tabla 5. 2 Resultados de la primera evaluación en la primera locación

Fuente: (Propia)

La evaluación se la realizo con un nivel de ruido de fondo de 79.2 dB, es por este motivo que se realizó una segunda evaluación, ya que las condiciones acústicas no eran las más óptimas para llegar a cumplir con el procedimiento ya especificado.

5.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SEGUNDA EVALUACIÓN

5.2.1 EVALUACIÓN SIN EL PROTOTIPO P4

Para la segunda evaluación se buscó un lugar, en el cual las condiciones acústicas sean las más cercanas a las propuestas en el estudio numérico.

A continuación en la Tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación sin el prototipo P4. Como se puede observar en el Gráfico 5.1 los niveles de presión sonora medidos disminuye, a medida que el sonómetro se aleja de la fuente en todo el rango de frecuencia; esta rebaja se produce mayormente por la atenuación por divergencia geométrica. En ciertas frecuencias se ve un incremento de estos niveles debido a los constantes cambios en la dirección del viento.

Condiciones ambientales y acústicas	
Velocidad del viento	2.3 m/s
Temperatura	24 °C
Ruido de Fondo	49.7 dB

Tabla 5. 3 Condiciones ambientales acústicas de la segunda evaluación

Fuente: (Propia)

FRECUENCIA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
50	74.4	70	67	64.6	62.4	56
63	76.7	70.6	66.6	67.1	66	59.4
80	76.3	72.3	68.9	63.9	61.8	62.6
100	75.4	70.2	66.7	65.1	63.6	58.9
125	73.6	69.2	66.2	63.1	61.1	59.1
160	71.3	66.3	63.8	62.2	59.8	57
200	69.9	65	64.5	61.3	60.9	54.9
250	72.7	70.3	67.4	65.5	62.8	61.2
315	72.1	71.5	67.5	65.3	64.4	59.7
400	68.3	66.7	65.3	63.6	61.4	58.2
500	62.7	65.3	63.4	61.3	59.7	55.6
630	68.8	61.7	62.8	62.1	60.8	57.3
800	69.6	58.4	61.3	61.4	60.7	57.3
1000	70.1	55.9	58	59.1	58.8	55.9

1250	67.2	62.7	50.7	54.5	55.9	54.1
1600	67.2	66.5	56.7	53.2	56.2	55.9
2000	69.7	67	60.2	53.8	54.9	53.2
2500	69.4	63.2	63	48.7	55.9	52.5

Tabla 5. 4 Atenuación por divergencia geométrica sin el prototipo P4

Fuente: (Propia)

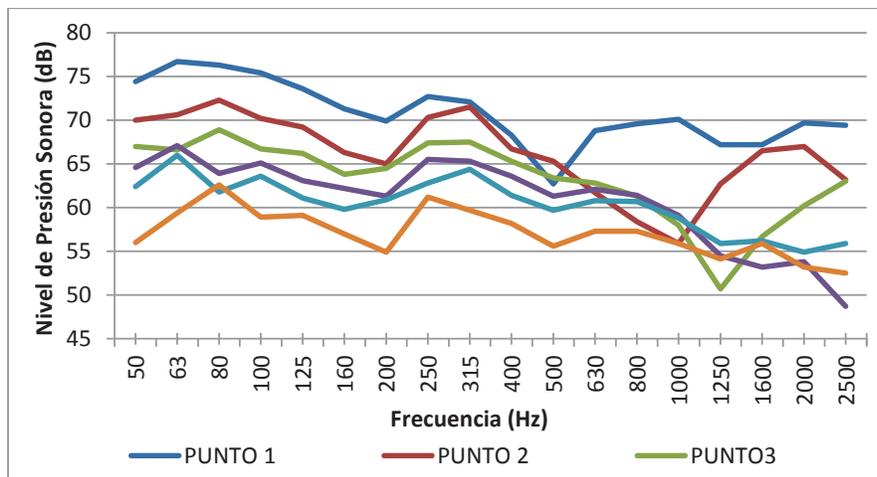


Gráfico 5. 1 Nivel de Presión Sonora vs Frecuencia sin el prototipo P4

Fuente: (Propia)

5.2.2 EVALUACIÓN CON LA INSERCIÓN DEL PROTOTIPO P4

Para la evaluación con la inserción del prototipo P4 se siguió el procedimiento ya descrito anteriormente, estos resultados se muestran en la Tabla 5.6.

Después de la inserción del prototipo, se midió los niveles de presión sonora únicamente en los puntos 4, 5 y 6. A partir de los datos mostrados en la Tabla 5.5 y el Gráfico 5.2, 5.3 y 5.4 se nota una clara disminución de los niveles de presión sonora a partir de los 250 Hz atenuando así sonidos graves y medios. Para frecuencias menores a 250 Hz no se aprecia una atenuación alguna debido a que la longitud de onda en bajas frecuencias es mayor.

Condiciones ambientales y acústicas	
Velocidad del viento	2.5 m/s
Temperatura	24 C
Ruido de Fondo	49.7 dB

Tabla 5. 5 Condiciones ambientales acústicas

Fuente: (Propia)

PRUEBA CON PROTOTIPO P4			
FRECUENCIA	PUNTO4	PUNTO 5	PUNTO 6
50	64.6	61.8	55.5
63	67.1	66.4	59.2
80	64.6	62.7	62.8
100	66.1	64.1	60
125	64.2	62.3	59.3
160	63.3	61.2	58.2
200	61.9	60.5	56.5
250	64	62.1	61
315	63.5	61.4	58.3
400	60.2	59	55.4
500	55.5	55.5	52.5
630	57.6	56.6	54.1
800	55.8	55.9	53.9
1000	51.8	53.3	52.3
1250	49.5	48	48.1
1600	50.8	50.4	49.4
2000	46.8	49.4	46.6
2500	41.4	49.8	45.1
NPS Global	74.6	73	69.7

Tabla 5. 6 Nivel de presión sonora con la inserción del prototipo P4

Fuente: (Propia)

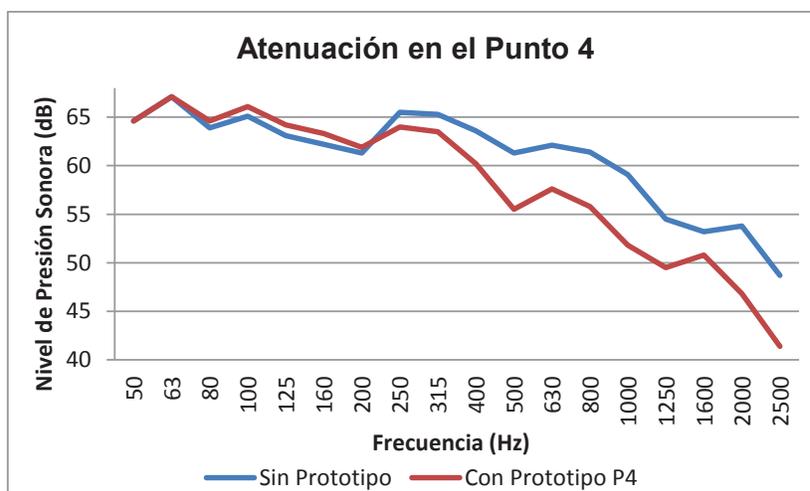


Gráfico 5. 2 Atenuación del Nivel de Presión Sonora en el punto 4

Fuente: (Propia)

Como se puede ver en Gráfico 5.2 el nivel de ruido en el punto 4 con y sin el prototipo presenta un comportamiento similar con variaciones mínimas en el rango de frecuencias de 50 Hz a 200 Hz. A partir de los 200 Hz se aprecia que el nivel energético con pantalla decae a medida que la frecuencia aumenta, llegando a atenuar hasta 7.3 dB.

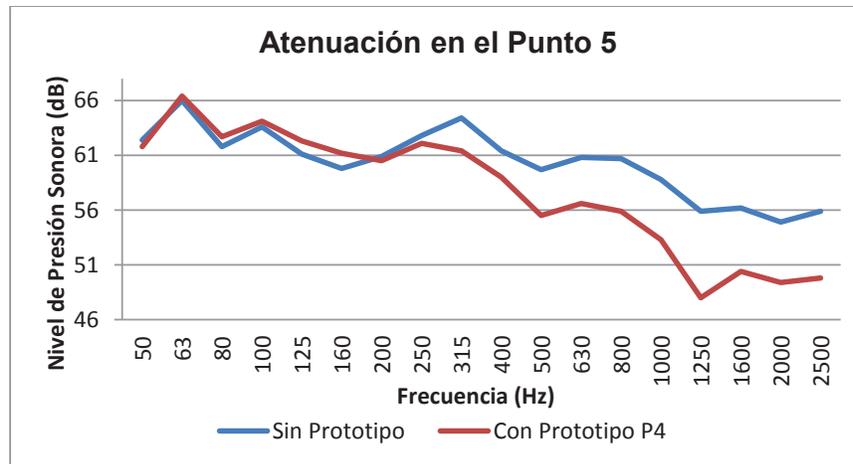


Gráfico 5. 3 Atenuación del Nivel de Presión Sonora en el punto 5

Fuente: (Propia)

El Gráfico 5.3 muestra el nivel de ruido en el punto 5 con y sin el prototipo presenta un comportamiento similar con variaciones mínimas en el rango de frecuencias de 50 Hz a 250 Hz. A partir de los 250 Hz se aprecia que el nivel energético con pantalla decae a medida que la frecuencia aumenta, llegando a atenuar hasta 7.9 dB.

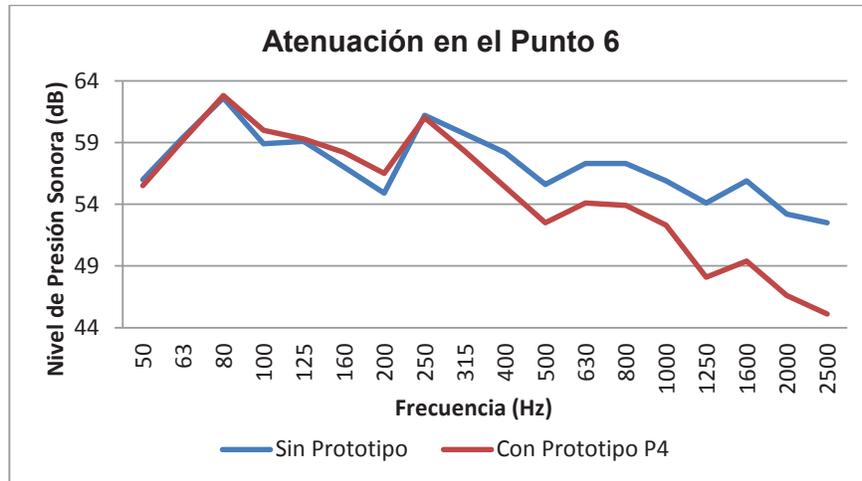


Gráfico 5. 4 Atenuación del Nivel de Presión Sonora en el punto 6

Fuente: (Propia)

En Gráfico 5.4 el nivel de ruido en el punto 6 con y sin el prototipo presenta un comportamiento similar con variaciones mínimas en el rango de frecuencias de 50 Hz a 250 Hz. A partir de los 250 Hz se aprecia que el nivel energético con pantalla decae a medida que la frecuencia aumenta, llegando a atenuar hasta 7.4 dB.

5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO POR PUNTOS DE LAS PERDIDAS POR INSERCIÓN DEL PROTOTIPO

En este apartado se compara los resultados obtenidos en el estudio numérico con los obtenidos en las pruebas de campo. Con el fin de validar los resultados arrojados por el programa de elementos finitos, se realizó un nuevo estudio numérico con las características y especificaciones mostradas en el procedimiento de evaluación ya indicado en el literal 4.4.1. A continuación se expone el gráfico de los puntos de evaluación simulados y las pérdidas por inserción.

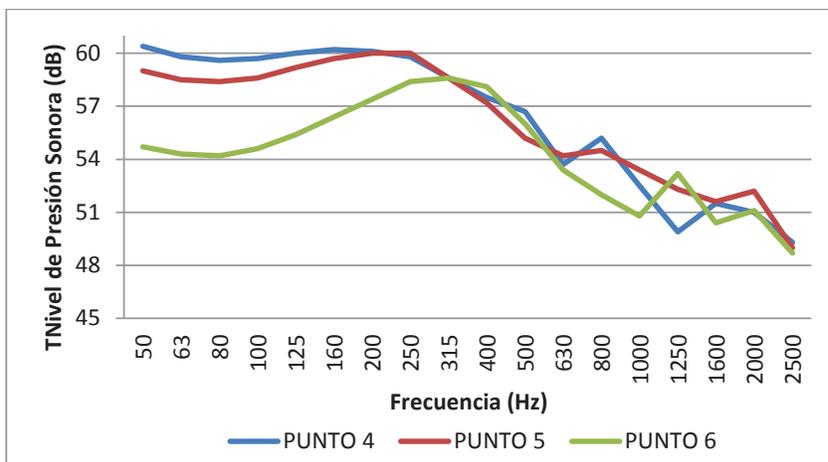


Gráfico 5. 5 Simulación de atenuación del prototipo P4

Fuente: (Propia)

SIMULACIÓN DE LA ATENUACIÓN DEL PROTOTIPO P4			
FRECUENCIA	PUNTO4	PUNTO 5	PUNTO 6
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]
50	60.4	59.0	54.7
63	59.8	58.5	54.3
80	59.6	58.4	54.2
100	59.7	58.6	54.6
125	60.0	59.2	55.4
160	60.2	59.7	56.4
200	60.1	60.0	57.4
250	59.8	60.0	58.4
315	58.6	58.6	58.6
400	57.5	57.2	58.1
500	56.7	55.2	56.0
630	53.7	54.2	53.4
800	55.2	54.5	52.0
1000	52.5	53.4	50.8
1250	49.9	52.3	53.2
1600	51.5	51.6	50.4
2000	51.0	52.2	51.1
2500	49.3	49.0	48.7
NPS Global	70.4	69.8	67.7

Tabla 5. 7 valores de la simulación de las pérdidas por inserción

Fuente: (Propia)

Las curvas de los Gráficos 5.6, 5.7 y 5.8, muestran que la mayor atenuación se da para los tonos graves y medios. Además los resultados de la simulación también revelan que, la atenuación es máxima el rango de frecuencias de 200 a 2500 Hz; lo mismo podemos observar con los resultados de las pruebas de campo con el prototipo que también muestran el mismo comportamiento, con la única diferencia que los niveles de atenuación en el estudio numérico, son mayores debido en gran parte a la influencia de factores externos como son: variación de temperatura, ruido de fondo y cambios en la dirección y velocidad. Dichos factores no pudieron ser incluidos en el estudio numérico; por este motivo el nivel de presión sonora simulado es menor, en los puntos analizados tras el prototipo. Este comportamiento se repite para cada uno de los puntos y claramente se observa congruencia en los datos obtenidos en la simulación con los valores medidos

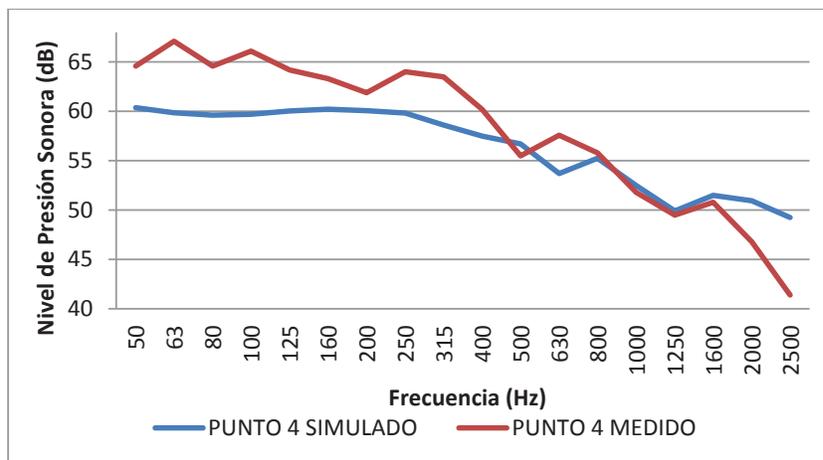


Gráfico 5. 6 Nivel de Presión Sonora en el punto 4 simulado y medido

Fuente: (Propia)

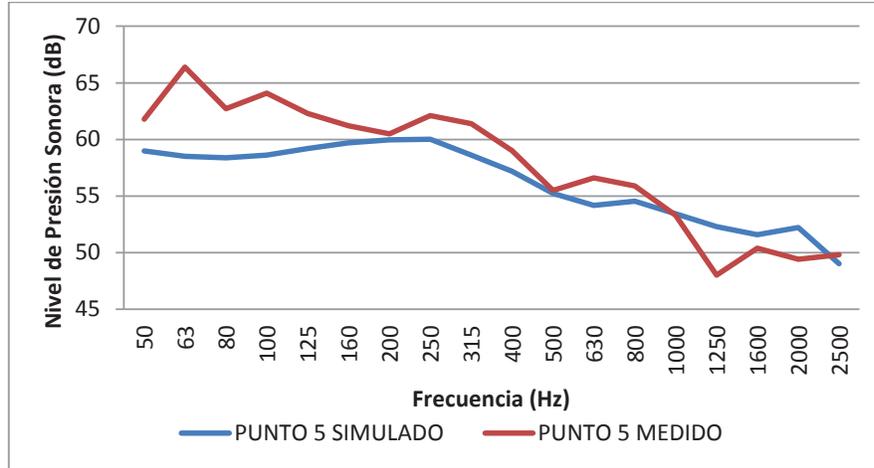


Gráfico 5. 7 Nivel de Presión Sonora en el punto 5 simulado y medido

Fuente: (Propia)

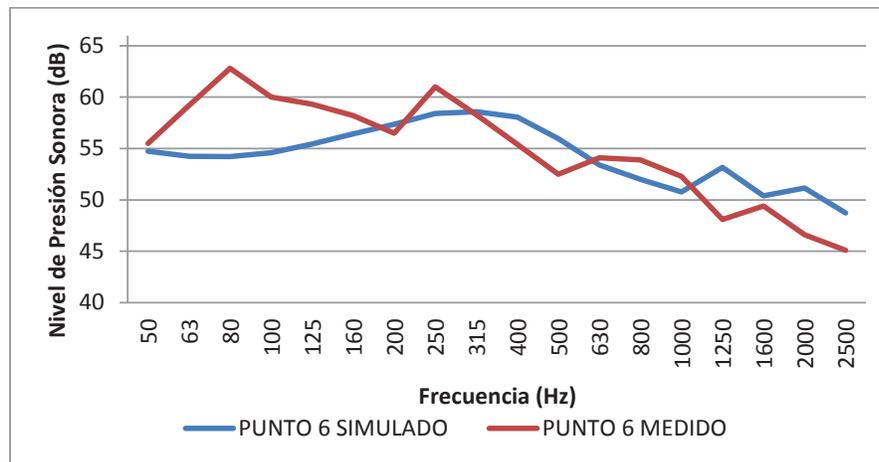


Gráfico 5. 8 Nivel de Presión Sonora en el punto 6 simulado y medido

Fuente: (Propia)

En la Tabla 5.8 se muestra la pérdida por inserción medida y simulada del prototipo P4, a partir de estos valores se construyen los Gráficos que se exponen a continuación, en los que se muestran la pérdida por inserción del prototipo, obtenida en la simulación y en las pruebas de campo.

PÉRDIDA POR INSERCIÓN						
FRECUENCIA [Hz]	PUNTO 4		PUNTO 5		PUNTO 6	
	MEDIDO [dB]	SIMULADO [dB]	MEDIDO [dB]	SIMULADO [dB]	MEDIDO [dB]	SIMULADO [dB]
50	0	2.7	0.6	1.9	0.5	1
63	0	2.9	-0.4	2	0.2	1
80	-0.7	3.2	-0.9	2.1	-0.2	1
100	-1	3.4	-0.5	2.1	-1.1	0.9
125	-1.1	3.6	-1.2	2.2	-0.2	0.8
160	-1.1	4.5	-1.4	2.8	-1.2	0.9
200	-0.6	5.8	0.4	3.7	-1.6	1.2
250	1.5	7.3	0.7	5	0.2	1.7
315	1.8	9.9	3	7.9	1.4	3.1
400	3.4	12.3	2.4	10.8	2.8	5.4
500	5.8	14.1	4.2	14.1	3.1	9.1
630	4.5	17.5	4.2	16.1	3.2	13.2
800	5.6	15.3	4.8	16.1	3.4	16
1000	7.3	15.4	5.5	16.5	3.6	18.3
1250	5	12.6	7.9	14.5	6	16.2
1600	2.4	17.6	5.8	8.8	6.5	18.1
2000	7	20	5.5	16.5	6.6	13.6
2500	7.3	13.4	6.1	21.3	7.4	6.4

Tabla 5. 8 Pérdida por inserción medida y simulada

Fuente: (Propia)

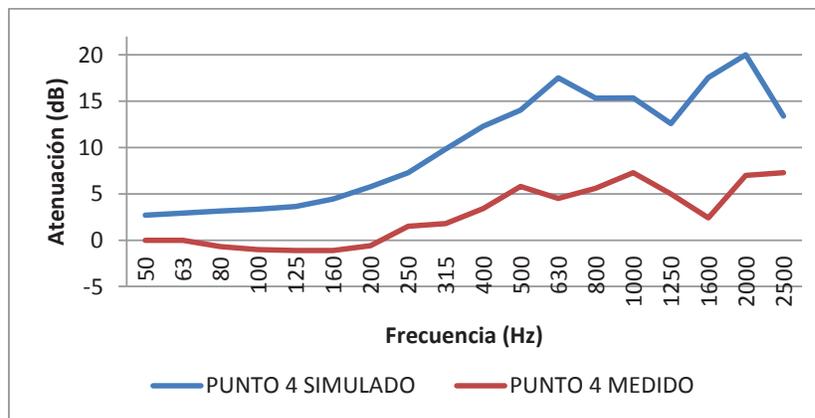


Gráfico 5. 9 Atenuación medida vs atenuación simulada

Fuente: (Propia)

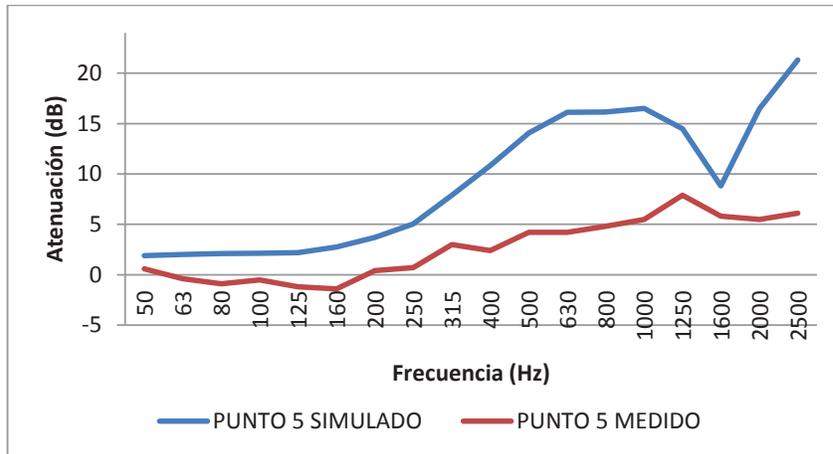


Gráfico 5. 10 Atenuación medida vs atenuación simulada

Fuente: (Propia)

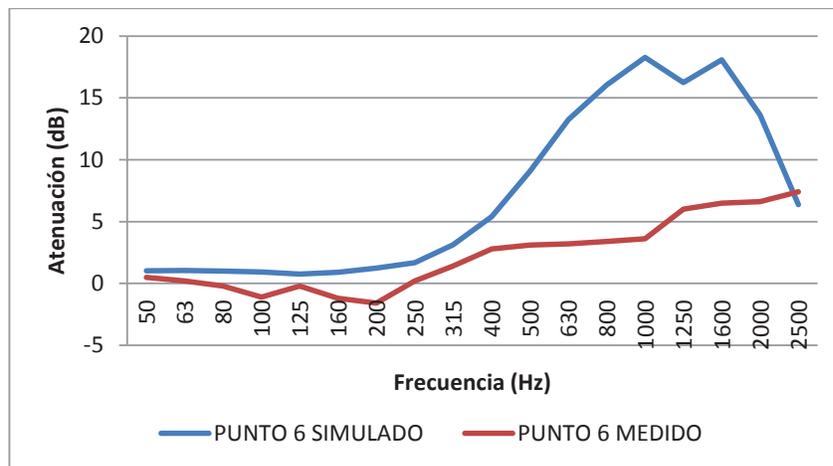


Gráfico 5. 11 Atenuación medida vs atenuación simulada

Fuente: (Propia)

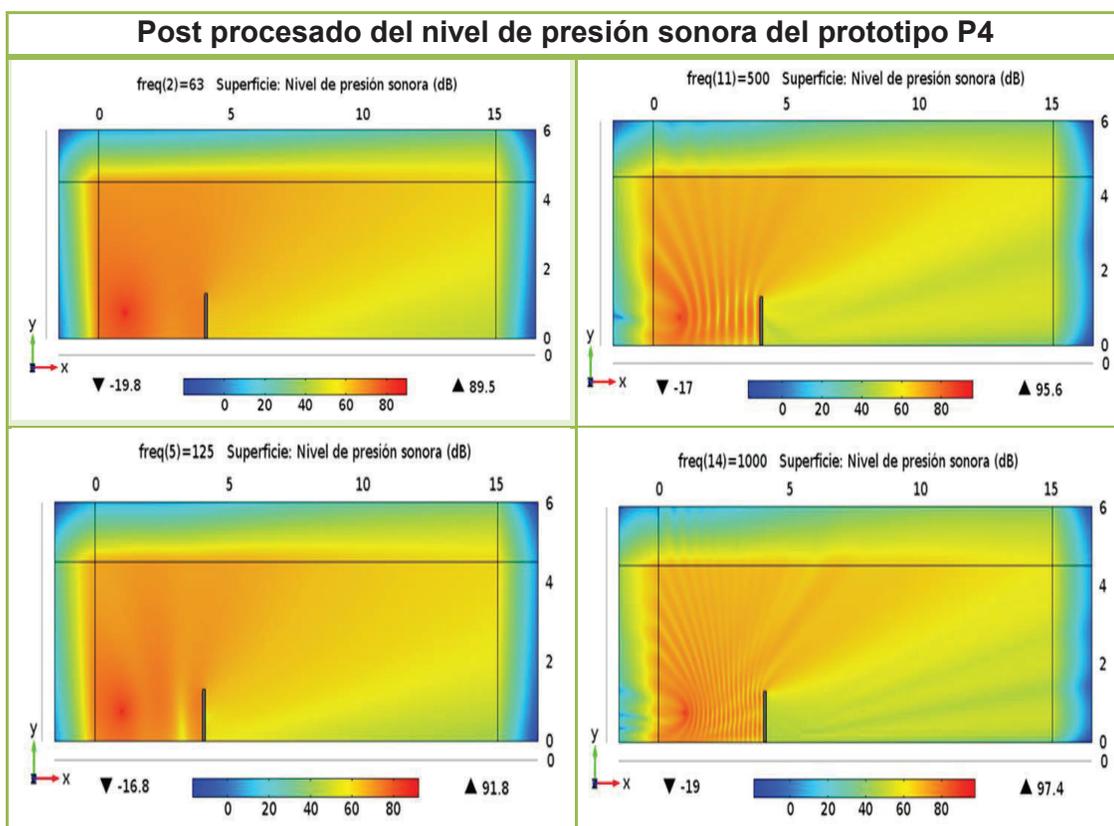
Con los niveles globales de presión sonora de la Tabla 5.5 y 5.6 se calculan el error relativo de las pérdidas por inserción del prototipo, entre la simulación y las pruebas de campo para los puntos P4, P5 y P6. A continuación en la Tabla 5.8 se indica dichos valores.

Nivel de Presión Sonora Global	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
Medido [dB]	74.6	73.0	69.7
Simulado o real [dB]	70.4	69.8	67.7
Error relativo [%]	6.00	4.58	2.98

Tabla 5. 9 Error relativo Porcentual

Fuente: (Propia)

Para tener una idea clara del funcionamiento del prototipo P4 en la Tabla 5.9 se muestra el post procesado en bandas de octavas del estudio numérico; al compararlo con el post procesado del ANEXO 5 se nota una clara similitud a pesar de no estar usando el mismo tipo de fuente sonora y diferente geometría de estudio.



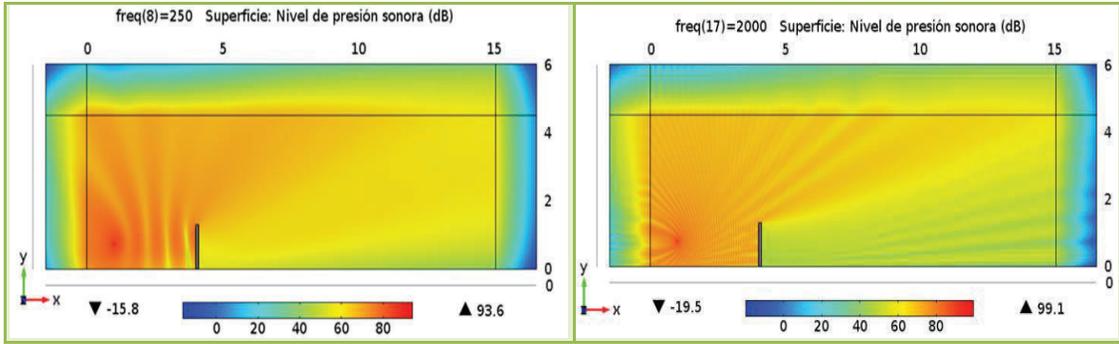


Tabla 5. 10 Post procesado del estudio numérico del prototipo P4

Fuente: (Propia)

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Una vez culminado el estudio numérico y las pruebas de campo, se procede a describir las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron con el desarrollo de este proyecto; no sin antes recordar que el objetivo general fue: Modelar y simular el comportamiento estructural y acústico de pantallas para la reducción de contaminación sonora y construir un módulo didáctico (Prototipo) para la validación de los resultados.

- Se definieron seis alternativas de aislamiento acústico combinando, lana mineral de roca, corcho y gypsum, utilizados como material absorbente; en la Tabla 3.1 se muestra la configuración de cada una de las alternativas de pantallas acústicas.
- El software de modelación revela que la inserción de la pantalla acústica P4 produce una atenuación promedio de 15 dB, mientras que la atenuación producida por las pantallas acústicas P1, P2, P3, P5 y P6 es aproximadamente de 10 dB; esta diferencia se debe a la forma del panel frontal que permite la absorción de la mayor parte de las ondas sonoras causando reflexiones mínimas.
- La implementación del panel frontal perforado en la pantalla acústica, incremento la atenuación producida por la pantalla, esto se lo puede comprobar con los resultados obtenidos en el estudio numérico.
- La atenuación del prototipo obtenida en las pruebas de campo y en la simulación, aumenta con la frecuencia es así que para frecuencias mayores a 400 Hz, es donde se presenta la mayor atenuación. Esto se debe a que la longitud de onda para estas frecuencias disminuye a medida

que la frecuencia aumenta aproximándose cada vez más al espesor del prototipo.

- La pérdida por inserción del prototipo medida y simulada, muestran una clara similitud en el punto 4, con una diferencia de hasta 13 dB a 630 Hz; la menor concordancia ocurre en el punto 6 con una diferencia máxima de 15.3 dB a 1000 Hz.
- La herramienta informática utilizada permite evaluar distintos tipos de configuraciones de pantallas acústicas, la dificultad radica en identificar las propiedades físicas del material, las condiciones de frontera y cada una de las variables que intervienen en el modelado; esto hace que el modelamiento se torne complejo, por la dificultad de obtener esta información.
- Los resultados obtenidos en la simulación, muestran que la atenuación del nivel de presión sonora, es directamente proporcional al espesor de la barrera acústica y depende del material de relleno de la misma.
- La caracterización del comportamiento acústico en campo abierto es complicado de realizar, debido a que no se puede definir claramente en el software los constantes cambios de las condiciones ambientales del medio y solo es posible trabajar con condiciones estables de presión y temperatura.
- Los resultados numéricos obtenidos en la simulación difieren de los valores de las pruebas de campo, debido al aumento de la velocidad del viento que provoca perturbación, en la propagación de la onda sonora; esto hace que los niveles de presión sonora medidos aumenten y se obtenga una medida poco confiable.
- El error relativo del nivel de presión sonora global de las pérdidas por inserción del prototipo, está dentro de los rangos aceptables de este

trabajo; es por este motivo que se toma el resultado obtenido con el software como válido y aplicable en la realidad.

- El postprocesado de la simulación con y sin barrera del prototipo, indica con una escala de colores la zona de sombra acústica producida por la inserción del prototipo. La mayor atenuación ocurre en el punto más cercano al prototipo (Punto 4), logrando así resultados similares a los obtenidos en las pruebas de campo.

6.2 RECOMENDACIONES

- Si se va a realizar simulación en 3D es necesario, contar con un equipo que ofrezca las características necesarias para soportar el proceso de simulación y evitar así contratiempos a lo largo del proceso y de esta manera obtener resultados más certeros que concuerden con el modelo físico.
- La evaluación en campo abierto es compleja por las condiciones cambiantes de la velocidad del viento. Por ello es recomendable usar una pantalla antiviento sobre el sonómetro y verificar que la velocidad del viento no supere los 3 m/s, de lo contrario se debe suspender la prueba hasta contar con las condiciones adecuadas.
- Se recomienda el uso de la herramienta informática para posteriores estudios, que permitan determinar las pérdidas por inserción de una barrera acústica, con diferentes materiales de relleno como: fibra de vidrio, fibrocemento, aglomerado de madera (MDF), espuma de baja densidad, etc. Sin la necesidad de tener físicamente dicha barrera.
- Se recomienda calibrar y revisar la sensibilidad a 1 kHz del sonómetro al comenzar y finalizar la evaluación, para asegurarnos que el nivel entregado corresponde a la fuente sonora que se está siendo medida.
- Es muy importante que al momento tomar la medida del nivel de presión sonora el evaluador, conserve una distancia prudente de 1 a 1.5 m entre la

fuente y el sonómetro, para evitar posibles reflexiones que produzcan errores de medida.

- Ates de realizar una evaluación en campo abierto es recomendable realizar un estudio previo del terreno y verificar que este cumpla con las condiciones necesarias de campo abierto, donde la única superficie reflectante sea el piso.
- Es primordial que antes de la fabricación del prototipo se analice los materiales que se usaran en la construcción, para alcanzar así un buen desempeño y resistencia a la intemperie.
- Para posteriores trabajos se recomienda usar como panel frontal una lámina de tol de menor espesor, con el fin de observar el comportamiento de la misma frente a la incidencia de la onda sonora.
- Las pruebas con el prototipo se las debería realizar en una cámara anecoica, para evitar así la influencia del viento y evitar posibles reflexiones que perjudican la toma de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alegre, D., & Domínguez, J. (2004). *MATERIALES PARA PANTALLAS ANTI-RUIDO: Soluciones tipo más usuales*. Recuperado a partir de http://www2.uah.es/tiscar/Complem_EIA/tipos-pantallas-acusticas.pdf
- Álvarez, F. (2009). *Análisis del comportamiento acústico mediante simulación numérica de la interacción fluido estructura*. UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Recuperado a partir de <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?fichero=11976>
- Arango, C., & Molina, V. (2010). *CONSTRUCCIÓN DE UNA BARRERA ACÚSTICA A ESCALA PARA DISMINUIR LA CONTAMINACIÓN SONORA PRODUCIDA POR EL ALTO FLUJO VEHICULAR*. UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA. Recuperado a partir de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59900.pdf>
- Barrera Acústica 3200*. (2000). *SISTEMAS ACUSTICOS MODULARES*. Recuperado a partir de <http://www.acusticos.cl/fichas/3200.pdf>
- Bies, D. a., & Hansen, C. H. (2009). *Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition* (Fourth edi). New York: Spon Press. Recuperado a partir de <http://www.amazon.com/Engineering-Noise-Control-Practice-Edition/dp/0415487072>
- Borjas, L., & Salazar, L. (2007). *ESTUDIO DE UN MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD*. UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA. Recuperado a partir de <http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/3428/1/Trabajo Especial de Grado.pdf>
- Calorcol S.A. (2004). *Lana Mineral de Roca, (574), 5*. Recuperado a partir de http://www.calorcol.com/Portals/0/Contenidos/Documentos/PDF/ficha_de_datos_de_seguridad_lmr.pdf
- Camacho, D., & Altabella, J. (2013). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE SONIDO OMNIDIRECCIONAL*. Barcelona. Recuperado a partir de http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/17976/1/PFC_David_Camacho_Gómez.pdf
- Del Río, M. (2005). *NUEVAS APLICACIONES DEL CORCHO EN EL CAMPO DE LA EDIFICACION* (Vol. 2005). Madrid. Recuperado a partir de http://oa.upm.es/1896/1/RIO_PON_2005_01.pdf
- Espinosa, S., & Jaramillo, D. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BARRERA ACÚSTICA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN AUDITIVA GENERADA POR UNA PERFORADORA DE CONCRETO EN VÍAS*

- PÚBLICAS*. Universidad de San Buenaventura. Recuperado a partir de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/72725.pdf>
- Estellés, R. (2007). *FUENTES SONORAS Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO*. Recuperado a partir de <http://www.farq.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/03-FUENTES-SONORAS.pdf>
- Everest, F. a, & Pohlmann, K. C. (2009). *Master Hanbook of Acoustics* (Fifth Edit). New York: McGraw-Hill. Recuperado a partir de <http://andrealbino.wikispaces.com/file/view/Master+Handbook+of+Acoustics+-+5th+Edition+-+F.+Alton+Everest,+Ken+C.+Pohlmann.pdf>
- Fernandez, D., & Sánchez, I. (2011). *ANÁLISIS , DISEÑO Y APLICACIÓN DE RESONADORES ACÚSTICOS*. Córdoba. Recuperado a partir de <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0211E1-Fernandez-Sanchez-Gilberto.pdf>
- Fish, J., & Belytschko, T. (2007). *A First Course in Finite Elements. A First Course in Finite Elements*. <http://doi.org/10.1002/9780470510858>
- González, N. (2012). *Análisis numérico mediante elementos finitos de la dispersión acústica producida por cuerpos elásticos de dimensiones finitas*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- López, Á. (2010). *PANTALLAS ACÚSTICAS*. Recuperado a partir de <http://www.obralia.com/dir/minisites/catalogos/419295/catalogo.pdf>
- McComarc, J. (1991). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO*. (J. De la Cera, Ed.) (Segunda ed). Alfaomega. Recuperado a partir de <http://www.freelibros.org/ingenieria-civil/disenio-de-estructuras-de-acero-2da-edicion-jack-c-mccormac.html>
- Möser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica Teoría y Aplicaciones* (2nda Edici). New York: Springer.
- Mosquera, R. (2010). *RACIONALIZACIÓN DEL USO DEL AUTOMÓVIL EN QUITO : UN ANÁLISIS DE INCENTIVOS ECONÓMICOS* (No. 1). Quito.
- Muradali, A. (1997). Geometnc Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions. Recuperado a partir de <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/ftp05/mq22643.pdf>
- Norma ISO9613-2. (1996). *ACOUSTICS ATTENUATION OF SOUND DURING PROPAGATION OUTDOORS* (First edit). Recuperado a partir de <http://www.yorku.ca/pat/EATS2470-2013/ISO9613-2.pdf>
- Olmos, E. (2002). *Evaluación de la Pérdida de Inserción de una Barrera Acústica Aplicada en un Proyecto Lineal*. Universidad Austral de Chile. Recuperado a

- partir de
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmficio.51e/doc/bmficio.51e.pdf>
- Pacheco, M. (2010). *Mezclas Asfálticas para Atenuar la Contaminación Sonora*. Universidad de Castilla- La Mancha. Recuperado a partir de <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?fichero=21889>
- Polygal Sud S.A. (2013). *MANUAL TÉCNICO DE BARRERAS ACÚSTICAS*. Chile. Recuperado a partir de <http://www.polygalsud.cl/documentacion/Manual Barrera Acustica Final.pdf>
- Porta, E. M. (2011). *Nuevas pantallas acústicas a partir de materiales reciclados*. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Recuperado a partir de http://dspace.cc.upv.es/bitstream/handle/10251/10335/Tesina Master_Eva Merino Porta.pdf
- Quirós, R. (2013). *Estudio de pantallas acústicas elaboradas a partir de Green Composites*. Gandia. Recuperado a partir de <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33640/memoria.pdf>
- Segura, F. (2013). *Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación*. Gandia. Recuperado a partir de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/35924/Memoria.pdf?sequence=1>
- Serway, R. a., & Kirkpatrick, L. D. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. (C. Sergio, Ed.) *The Physics Teacher* (Séptima ed, Vol. 1). Cengage Learning. <http://doi.org/10.1119/1.2342517>
- Soto, M. (2012). *MATERIALES AISLANTES ACUSTICOS PARA MUROS*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA. Recuperado a partir de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/3518/1/SOTO ZUMBA MARCO LEONARDO.pdf>
- Transportation Noise Mesures and Countermeasures. (2002). *TR NEWS*, 56. Recuperado a partir de <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews240.pdf>
- Wang, C., Deng, H., & Huang, L. (2013). DAMPING PROPERTIES OF METALLIC SANDWICH ROOF PANELS WITH ROCK WOOL CORE. *JOURNAL OF VIBRATION AND SHOCK*, 32, 6.

ANEXO 1. ATENUACIÓN DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS ESTUDIADAS.

ATENUACIÓN POR DIVERGENCIA GEOMÉTRICA SIN PANTALLA							
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO	PUNTO
A	E	1	2	3	4	5	6
HZ	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
50	79.9	69.4	65.5	62.3	59.7	57.5	52.4
63	79.9	69.7	65.9	62.8	60.3	58.1	53.0
80	79.9	70.1	66.6	63.7	61.2	59.0	54.0
100	79.9	70.4	67.4	64.6	62.2	60.1	55.2
125	79.8	70.6	68.1	65.7	63.4	61.3	56.5
160	79.8	70.4	68.8	66.8	64.8	62.9	58.2
200	79.8	69.5	69.0	67.7	65.9	64.2	59.7
250	79.7	68.6	68.1	68.0	66.8	65.4	61.2
315	79.7	69.6	66.0	67.6	67.4	66.4	62.7
400	79.6	69.8	64.5	65.3	66.9	66.8	64.0
500	79.5	68.4	67.6	61.1	64.7	66.2	64.9
630	79.4	69.7	67.5	64.7	58.9	63.3	65.3
800	79.3	69.0	64.9	67.4	63.3	55.9	64.5
1000	79.2	68.2	67.4	61.5	66.8	63.1	61.1
1250	79.1	68.1	67.0	66.9	60.7	66.2	50.7
1600	78.9	69.4	66.0	61.5	66.2	56.2	62.4
2000	78.8	68.2	66.5	63.0	58.0	65.9	64.5
2500	78.6	68.4	67.4	63.8	63.9	57.1	50.9
NPS							
Global	92.1	81.9	79.6	77.8	76.8	75.9	73.8

ATENUACIÓN DE LA PANTALLA P1						
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
<i>Hz</i>	<i>dB</i>	<i>dB</i>	<i>dB</i>	<i>dB</i>	<i>dB</i>	<i>dB</i>
50	79.8	68.2	60.6	53.9	52.7	48.6
63	79.9	67.6	60.3	54.3	53.4	49.5
80	79.9	68.1	66.8	55.6	55.1	51.7
100	80.0	71.8	70.8	56.8	56.6	53.7
125	80.1	70.5	67.2	56.8	57.0	55.0
160	79.9	67.0	71.7	57.3	57.3	56.8
200	79.8	62.9	72.2	55.7	54.6	55.8
250	79.4	71.8	74.6	55.5	54.4	55.8
315	79.8	71.3	64.4	51.4	52.3	52.0
400	79.8	70.6	66.6	50.5	50.5	49.0
500	79.2	67.5	72.6	51.9	51.8	48.2
630	79.8	70.1	64.6	45.5	46.0	46.6
800	79.6	68.0	66.1	49.0	49.9	49.6
1000	79.4	69.1	64.9	45.8	46.9	44.3
1250	78.5	71.3	65.6	46.3	47.5	47.9
1600	79.5	68.2	64.9	44.2	44.1	44.6
2000	78.7	64.3	64.7	42.1	43.0	41.4
2500	78.2	69.6	69.4	43.9	44.5	42.0
NPS Global	92.1	81.9	81.4	65.8	65.5	64.3

ATENUACIÓN DE LA PANTALLA P2						
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	79.9	68.2	60.6	53.8	52.7	48.6
63	79.9	67.6	60.3	54.3	53.4	49.5
80	79.9	68.1	66.8	55.4	54.9	51.6
100	80.0	71.8	70.8	56.8	56.6	53.7
125	80.1	70.6	67.2	56.8	56.9	55.0
160	79.9	67.0	71.7	57.2	57.2	56.8
200	79.9	62.9	72.2	55.7	54.6	55.7
250	79.4	71.8	74.6	55.4	54.4	55.7
315	79.8	71.3	64.5	51.4	52.3	52.0
400	79.9	70.6	66.6	50.4	50.5	48.9
500	79.3	67.5	72.5	51.8	51.7	48.1
630	79.9	70.1	64.6	45.5	46.0	46.6
800	79.6	67.9	66.2	49.2	50.0	49.6
1000	79.5	69.1	64.9	45.8	46.9	44.3
1250	78.7	71.3	65.6	46.3	47.5	47.9
1600	79.6	68.2	65.0	44.0	44.1	44.6
2000	78.9	64.4	64.7	41.9	42.7	41.2
2500	78.4	69.6	69.4	44.1	44.1	43.1
NPS Global	92.2	81.9	81.4	65.7	65.4	64.3

ATENUACIÓN DE LA PANTALLA P3						
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	79.8	68.2	60.9	53.3	52.3	48.4
63	79.9	67.7	60.4	53.8	53.0	49.2
80	79.9	68.0	66.7	55.3	54.8	51.5
100	80.0	71.8	70.8	56.1	56.0	53.4
125	80.1	70.5	67.4	56.1	56.3	54.6
160	79.9	67.0	71.5	57.5	56.3	56.1
200	79.9	62.9	72.3	55.0	54.1	55.3
250	79.4	71.8	74.6	54.6	53.8	55.2
315	79.9	71.2	64.5	50.6	51.7	51.5
400	79.9	70.5	66.6	50.2	50.2	48.7
500	79.2	67.6	72.6	50.9	51.0	47.7
630	79.9	70.3	64.5	44.5	45.3	46.2
800	79.6	68.1	65.8	48.0	49.0	48.8
1000	79.5	68.7	65.5	44.9	46.2	44.0
1250	78.7	70.8	65.7	44.8	46.4	47.0
1600	79.6	67.9	65.7	43.0	43.3	44.1
2000	78.9	65.8	64.4	41.2	42.1	41.0
2500	78.2	69.1	68.9	42.7	43.2	42.6
NPS Global	92.2	81.8	81.4	65.2	64.9	63.8

ATENUACIÓN DE LA PANTALLA P4						
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	79.8	66.0	61.9	52.1	51.3	47.7
63	79.7	64.9	60.7	51.4	50.8	47.5
80	79.6	62.3	59.0	50.1	50.0	47.1
100	79.3	61.4	59.8	49.5	49.7	47.5
125	78.9	65.1	63.6	51.4	51.9	50.4
160	78.7	65.1	63.2	52.0	51.0	51.0
200	78.8	60.0	58.5	43.9	43.0	43.8
250	78.9	66.8	65.6	49.6	48.7	50.0
315	78.6	55.6	46.9	45.4	46.4	46.7
400	78.5	63.3	62.8	49.9	49.3	47.4
500	77.7	67.3	65.3	46.8	47.1	44.2
630	78.1	61.4	55.6	46.5	47.0	47.5
800	77.5	61.5	61.7	41.5	43.0	43.8
1000	79.5	48.5	56.6	43.0	44.4	42.2
1250	78.7	55.2	56.3	42.8	44.6	45.7
1600	79.6	64.7	57.4	40.5	40.9	42.5
2000	78.9	61.4	62.0	35.6	36.9	37.3
2500	78.2	52.9	55.2	31.1	32.2	33.9
NPS Global	91.4	75.8	73.8	60.8	60.6	59.4

ATENUACIÓN DE LA PANTALLA P5						
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	79.8	68.2	60.2	54.4	53.1	48.9
63	79.9	67.4	61.0	55.0	53.8	49.8
80	79.9	68.4	67.3	56.3	55.6	52.0
100	80.0	71.6	70.8	57.4	57.1	54.0
125	80.1	71.3	65.8	57.5	57.5	55.4
160	79.9	68.1	72.7	58.1	57.8	57.1
200	79.9	64.4	71.0	57.1	55.8	56.4
250	79.5	72.9	75.3	56.3	55.5	56.5
315	80.0	67.6	69.8	52.7	53.9	53.1
400	80.0	60.8	71.4	53.2	53.8	51.9
500	79.3	67.1	72.7	53.2	51.8	47.8
630	79.8	71.3	66.2	50.6	49.3	49.4
800	79.7	70.2	56.5	47.8	49.2	48.9
1000	79.5	66.2	75.1	44.0	46.9	44.1
1250	79.4	67.9	63.9	44.7	47.9	47.1
1600	79.5	68.1	66.9	44.9	44.6	44.9
2000	79.0	67.0	59.4	41.1	41.9	41.8
2500	78.8	68.6	65.5	40.2	41.5	41.1
NPS Global	92.2	81.5	82.5	66.6	66.2	64.8

ATENUACIÓN DE LA PANTALLA P6						
FRECUENCIA	FUENTE	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	79.8	68.2	60.2	54.4	53.1	48.9
63	79.9	67.4	61.1	54.9	53.8	49.8
80	79.9	68.4	67.2	56.3	55.6	52.0
100	80.0	71.6	70.7	57.5	57.1	54.0
125	80.1	71.3	65.8	57.5	57.5	55.4
160	79.9	68.2	72.6	58.2	57.9	57.2
200	79.9	64.9	70.6	56.4	55.3	56.1
250	79.5	72.9	75.3	56.0	55.3	56.3
315	80.0	67.6	69.8	51.8	53.1	52.5
400	80.0	59.2	71.9	54.0	54.3	52.4
500	79.3	67.3	72.2	53.3	51.9	47.9
630	79.8	70.1	65.9	47.1	47.8	47.5
800	79.6	70.5	58.7	50.7	51.3	50.7
1000	79.4	67.5	74.6	48.1	49.6	45.7
1250	79.4	68.7	63.3	48.3	50.4	49.3
1600	79.4	68.6	66.0	46.9	46.2	46.2
2000	78.9	66.8	60.3	44.6	44.7	42.7
2500	78.7	68.1	66.7	46.2	45.6	43.6
NPS Global	92.2	81.5	82.4	66.7	66.3	64.9

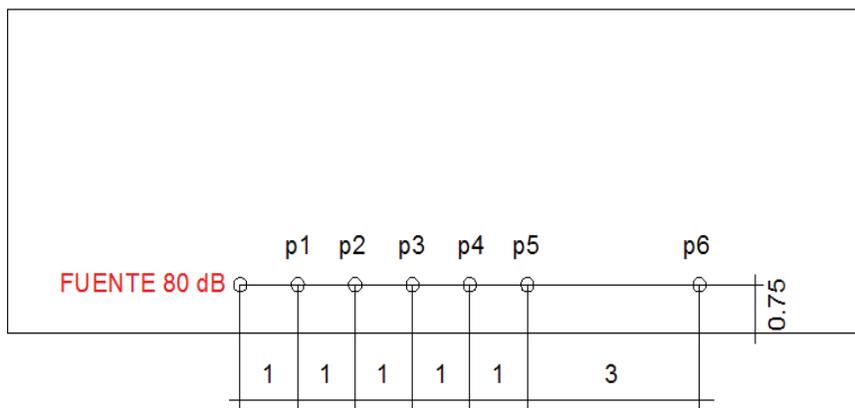
**ANEXO 2. PLANOS DE CONJUNTO Y DE TALLER DEL
PROTOTIPO DE PANTALLA ACUSICA**

ANEXO 3. HOJAS DE PROCESO

ANEXO 4. HOJA DE DATOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

EVALUACIÓN SIN EL PROTOTIPO P4					
Fecha:		Condiciones ambientales		Ruido de fondo	Tipo de Ruido a Evaluar
Hora:		Vel:	Temp:		
Fuentes de Ruido de Fondo:					

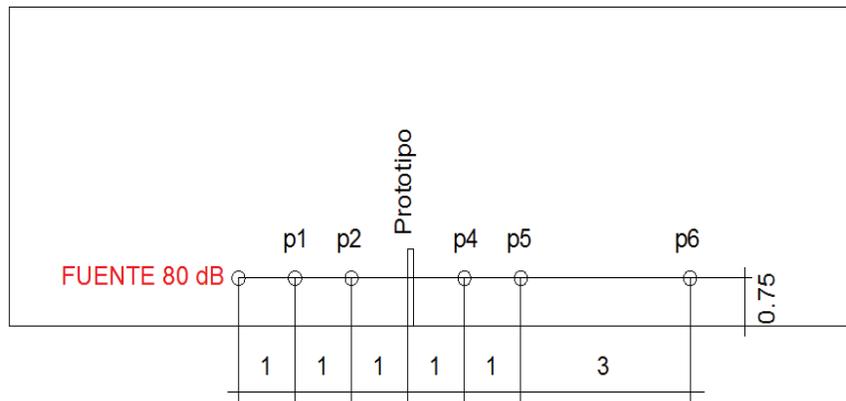
ESQUEMA:



PUNTOS DE EVALUACIÓN	MEDIDA 1	MEDIDA 2
PUNTO 1		
PUNTO 2		
PUNTO 3		
PUNTO 4		
PUNTO 5		
PUNTO 6		

EVALUACIÓN CON LA INSERCIÓN DEL PROTOTIPO					
Fecha:		Condiciones ambientales		Ruido de fondo	Tipo de Ruido a Evaluar
Hora:		Vel:	Temp:		
Fuentes de Ruido de Fondo:					

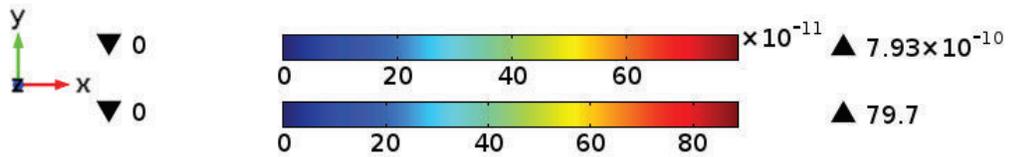
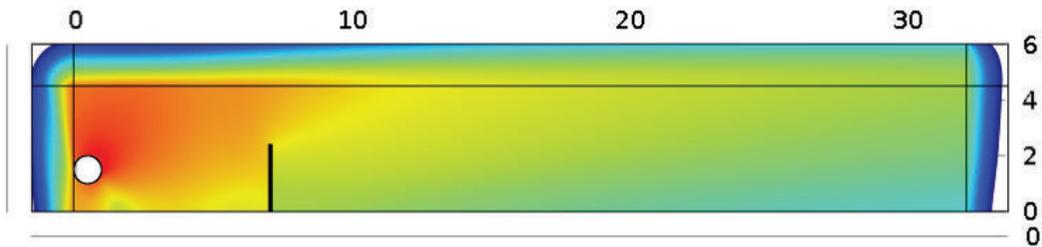
ESQUEMA:



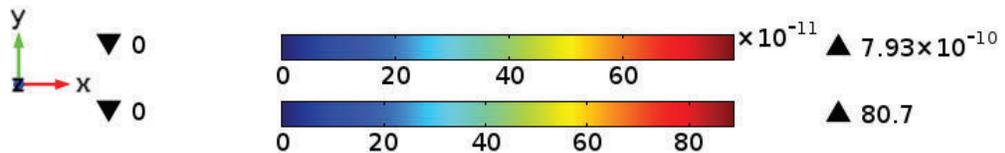
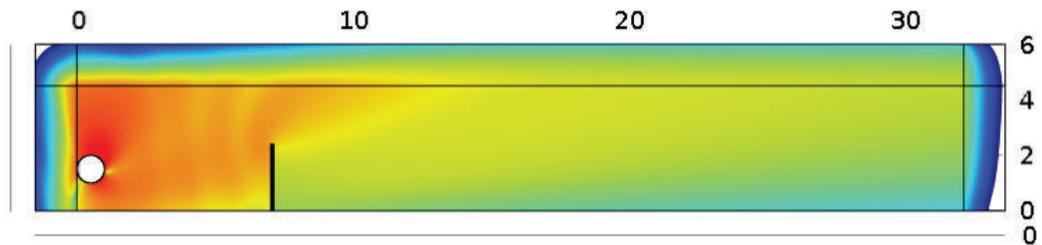
PUNTOS DE EVALUACIÓN	MEDIDA 1	MEDIDA 2
PUNTO 1		
PUNTO 2		
PUNTO 3		
PUNTO 4		
PUNTO 5		
PUNTO 6		

ANEXO 5. POST-PROCESADO DEL ESTUDIO DE LA PANTALLA ACÚSTICA P4

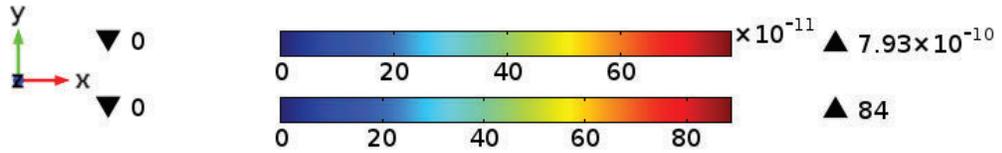
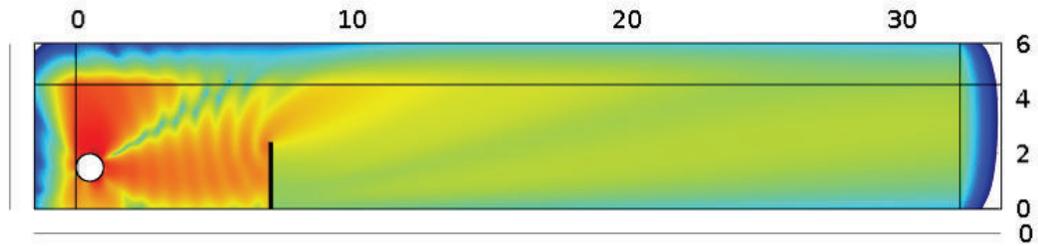
Superficie: Nivel de presión sonora a 63 Hz (dB)
 Superficie: Desplazamiento total (m)



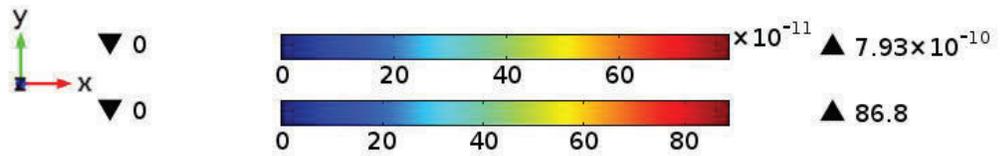
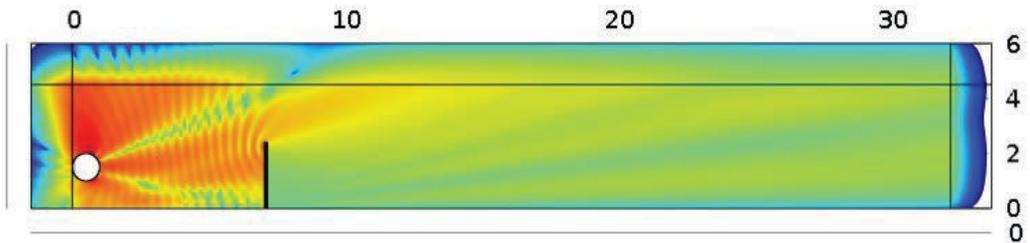
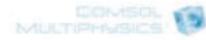
Superficie: Nivel de presión sonora a 125 Hz (dB)
 Superficie: Desplazamiento total (m)



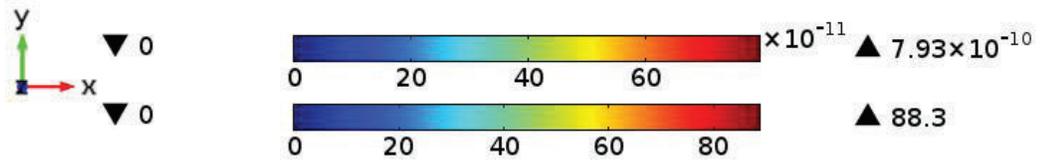
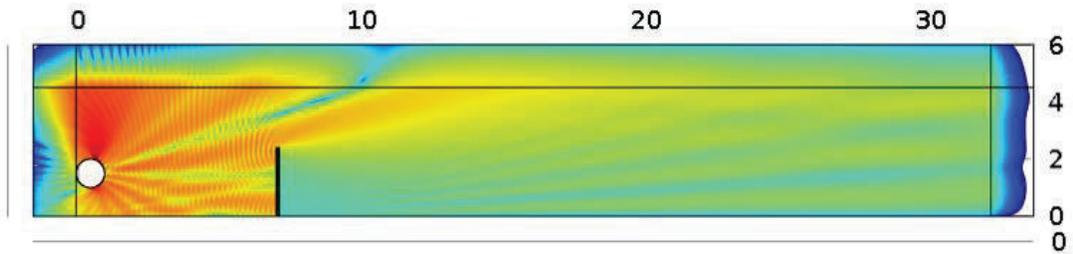
Superficie: Nivel de presión sonora a 250 Hz (dB)
Superficie: Desplazamiento total (m)



Superficie: Nivel de presión sonora a 500 Hz (dB)
Superficie: Desplazamiento total (m)



Superficie: Nivel de presión sonora a 1000 Hz (dB)
 Superficie: Desplazamiento total (m)



Superficie: Nivel de presión sonora a 2000 Hz (dB)
 Superficie: Desplazamiento total (m)

