

DISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL PARA MEDICIÓN DE PÉRDIDA DE
TRANSMISIÓN ACÚSTICA

CRISTIAN CAMILO MÁRQUEZ GRANADA
NICOLÁS MATEO PINTO JIMÉNEZ

UNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2017

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS

CRISTIAN CAMILO MÁRQUEZ GRANADA
NICOLÁS MATEO PINTO JIMÉNEZ

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Director
JHON FREDDY OCHOA AVENDAÑO
Ingeniero Mecánico

Codirector
JUAN FELIPE GIRALDO
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2017

Aceptación (Dirección de investigaciones)

Docente Investigador
Ing. Jhon Freddy Ochoa Avendaño

Docente Jurado 1
Ing. Juan Felipe Giraldo Ávila

Docente Jurado 2
Ing. Libardo Mendoza Geney

Bogotá D.C., noviembre del 2017

DIRECTIVAS UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

DR. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

DR. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

DRA. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

DR. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías

ING. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones

ING. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director de Ingeniería Mecánica

ING. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

Agradecimiento

A la fundación universidad de América y su invaluable equipo de trabajo que me transmitieron sus conocimientos en las aulas y brindaron su apoyo de forma oportuna para mi formación integral, y la de todos mis compañeros.

Quiero agradecer de manera especial a los profesores Jhon Ochoa y Juan Felipe Giraldo por su gran apoyo en la orientación para la realización de este trabajo, por su oportuna atención y colaboración en el proyecto.

-También agradezco a la vida por haberme permitido emprender este camino de formación académica gracias al apoyo de cada uno de mis familiares, en especial a mis padres que siempre creyeron en mí y me dieron su apoyo en todo momento, aportando mucho más allá de los obstáculos académicos.

- Agradezco a Dios y a mis padres por ayudarme en toda esta etapa formativa que sin la ayuda de ellos no culminaría esta etapa de mi vida, agradezco a mis hermanos por estar en cada momento de mi vida apoyándome y dando fuerza para que nunca desfalleciera en el camino.

CONTENIDO

| | pág. |
|--------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| OBJETIVOS | 16 |
| 1. ESTADO DEL ARTE | 17 |
| 1.1 PARÁMETROS DE MEDICIÓN EN SILENCIADORES | 17 |
| 1.1.1 Reducción de ruido. | 18 |
| 1.1.2 Pérdida de inserción. | 18 |
| 1.1.3 Pérdida de transmisión acústica. | 19 |
| 1.2 BANCO ACÚSTICO | 21 |
| 1.3 CLASIFICACIÓN DE SILENCIADORES | 22 |
| 1.3.1 Silenciador reactivo. | 23 |
| 1.3.2 Silenciador disipativo. | 24 |
| 1.3.3 Silenciador Híbrido. | 25 |
| 1.3.4 Silenciador construido. | 27 |
| 2. CONDICIONES DE OPERACIÓN | 28 |
| 2.1 MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA | 28 |
| 2.1.1 Método de dos cargas (TLM). | 29 |
| 2.1.2 Método de dos fuentes (TSM). | 30 |
| 2.2 DESARROLLO NORMATIVA ASTM E2611-09 | 32 |
| 2.2.1 Parámetros de diseño del tubo de impedancia. | 33 |
| 2.2.2 Densidad del aire. | 33 |
| 2.2.3 Rango de frecuencias. | 34 |
| 2.2.4 Parámetros de diseño para selección del micrófono. | 35 |
| 2.2.5 Terminación anecoica. | 36 |
| 2.3 MATRIZ DE TRANSFERENCIA | 37 |
| 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE PRUEBA | 41 |
| 3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE PRUEBA | 41 |
| 3.1.1 Componentes. | 41 |
| 3.1.2 Terminación del banco. | 44 |
| 3.1.3 Diagrama de conexión. | 47 |
| 3.1.4 Presupuesto dispositivo de prueba. | 49 |
| 3.2 DISEÑO DEL BANCO ACÚSTICO CON CUATRO MICRÓFONOS | 50 |
| 3.2.1 Elementos. | 50 |
| 3.2.2 Diagrama de conexión. | 54 |
| 3.2.3 Presupuesto banco cuatro micrófonos. | 55 |
| 3.3 ELEMENTO DE PRUEBA | 56 |
| 3.3 PROGRAMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS | 57 |
| 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 66 |

| | |
|--------------------|----|
| 5. CONCLUSIONES | 75 |
| 6. RECOMENDACIONES | 76 |
| BIBLIOGRAFIA | 77 |
| ANEXOS | 81 |

LISTA DE IMÁGENES

| | pág. |
|-----------------------------------------------|------|
| Imagen 1. Banco Acústico | 20 |
| Imagen 2. Corte Transversal Silenciador | 24 |
| Imagen 3. Silenciador Disipativo Típico | 25 |
| Imagen 4. Silenciador Híbrido | 27 |
| Imagen 5. Banco Acústico | 33 |
| Imagen 6. Caja insonora con fuente de sonido. | 42 |
| Imagen 7. Terminación cónica fibra de vidrio | 45 |
| Imagen 8. Terminación cerrada tapón PVC | 45 |
| Imagen 9. Micrófono omnidireccional Genius®. | 46 |
| Imagen 10. Montaje Micrófono. | 47 |
| Imagen 11. Tarjeta de sonido | 47 |
| Imagen 12. Micrófono Alta Sensibilidad | 51 |
| Imagen 13. Brida. | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Tipos de silenciadores | 22 |
| Figura 2. Silenciador Reactivo | 27 |
| Figura 3. Método de las dos cargas | 29 |
| Figura 4. Cuatro Polos | 30 |
| Figura 5. Configuraciones en TSM | 31 |
| Figura 6. Método de dos fuentes vs. BEM | 32 |
| Figura 7. Montaje adecuado del micrófono en el tubo. | 36 |
| Figura 8. Detalle con espuma de fibra de vidrio. | 36 |
| Figura 9. Plano general banco de pruebas. | 41 |
| Figura 10. Diagrama Dos Micrófonos | 48 |
| Figura 11. Banco Cuatro Micrófonos | 50 |
| Figura 12. Diagrama Cuatro Micrófonos | 54 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Grafica 1. Perdida de trasmisión acústica vs frecuencia. Modelo Acústico De Silenciadores Con Material Absorbente | 67 |
| Grafica 2. Comportamiento TL 1" | 67 |
| Grafica 3. Comportamiento TL 2" | 68 |
| Grafica 4. Comportamiento TL 2" | 69 |
| Grafica 5. Comportamiento TL 2" cónico | 70 |
| Grafica 6. Comportamiento TL 2" Sin Silenciador | 71 |
| Grafica 7. Comportamiento TL 2" Diferencia | 72 |
| Grafica 8. Sobre posición de graficas | 73 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|-----------------------------------------------------|------|
| Anexo A. Plano explosionado banco de pruebas | 82 |
| Anexo B. Plano general banco de pruebas | 84 |
| Anexo C. Tubo longitud 400 mm 2 Pulg | 86 |
| Anexo D. Tubo longitud 800 mm 2 Pulg | 88 |
| Anexo E. Tubo longitud 400 mm 1 Pulg | 90 |
| Anexo F. Tubo longitud 800 mm 1 Pulg | 92 |
| Anexo G. Explosionado banco de pruebas (propuesta). | 94 |
| Anexo H. Plano banco de pruebas (propuesta) | 96 |
| Anexo I. Tubo longitud 400 mm 2 Pulg (propuesta) | 98 |
| Anexo J. Tubo longitud 800 mm 2 Pulg (propuesta) | 100 |
| Anexo K. Tubo longitud 400 mm 1 Pulg (propuesta) | 102 |
| Anexo L. Tubo longitud 800 mm 1 Pulg (propuesta) | 104 |
| Anexo M. Plano eléctrico | 106 |
| Anexo N. Tapón espuma | 108 |
| Anexo O. Silenciador | 110 |

LISTA TABLAS

| | pág. |
|--------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Frecuencia límite superior según diámetro del tubo. | 42 |
| Tabla 2. Acople de reducción. | 43 |
| Tabla 3. Unión | 44 |
| Tabla 4. Presupuesto Dispositivo De Prueba | 49 |
| Tabla 5. Selección De Brida | 52 |
| Tabla 6. Presupuesto Banco Cuatro Micrófonos | 55 |
| Tabla 7. Validacion de Codigo | 65 |
| Tabla 8. Datos TL 1" | 67 |
| Tabla 9. Datos TL 2" | 68 |
| Tabla 10. Datos TL 2" Cónico | 70 |
| Tabla 11. Datos TL 2" Sin Silenciador | 71 |
| Tabla 12. Datos TL 2" Diferencia | 72 |

RESUMEN

El presente proyecto de grado plantea el diseño y construcción de un dispositivo de pruebas para la medición de la pérdida de transmisión acústica, parámetro utilizado en la evaluación de la eficiencia de dispositivos de atenuación del sonido. Para esto se inició con el estudio de las diferentes metodologías experimentales usadas para comparar la eficiencia en silenciadores y su tipología.

Después se hizo una selección del parámetro de mayor reconocimiento en la literatura, la pérdida de transmisión acústica y se evalúan las alternativas usadas para su cálculo. La selección de esta alternativa y los parámetros básicos de construcción se realizaron según la norma ASTM E2611-09 que describe el procedimiento adecuado de medición.

Para el diseño conceptual y la construcción del dispositivo de prueba, se tuvo en cuenta el rango de frecuencias relacionado directamente con el diámetro de tubo de impedancia escogido, parámetros de diseño, selección y conexión de todos los componentes para efectuar la prueba. Además, se realizó un código en MATLAB para el cálculo de la matriz de transferencia como sistema de procesamiento de datos del banco acústico.

Finalmente se realizó la validación del código por medio de la medición de la pérdida de transmisión acústica en un silenciador construido a similitud de la tesis "MODELADO ACÚSTICO DE SILENCIADORES CON MATERIAL ABSORBENTE" para correlacionar los datos encontrando los factores principales que afectan la medición, y se realizó un diseño completo del banco acústico alterno al construido para realizar este tipo de mediciones con mayor confiabilidad.

Palabras clave: Pérdida de transmisión acústica, silenciador, banco acústico.

INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de controlar los niveles de ruido que hay en el medio ambiente producido por motores de combustión interna de competencia, exige un diseño del silenciador específico para cumplir con las normas de emisión de ruido.¹ En el diseño de silenciadores existen varios parámetros para evaluar su eficiencia en un rango de frecuencias, expuestos en el capítulo 1.1, donde se selecciona la pérdida de transmisión de potencia por ser utilizada como el principal factor de diseño a tener en cuenta en la comparación de tipos y configuraciones de silenciadores en la literatura.

El presente proyecto se enfoca en el diseño y construcción de un dispositivo de prueba de dos micrófonos y tarjeta de audio que permita graficar la pérdida de transmisión acústica basado en la norma ASTM E2611-09. Este dispositivo de prueba permite evaluar las condiciones iniciales de rendimiento acústico para proporcionar una base teórica de diseño en el estudio de silenciadores² y se compara con la construcción de un silenciador utilizado como elemento de prueba en un trabajo de grado realizando mediciones similares.

Además, se plantea el diseño del banco acústico con cuatro micrófonos de alta precisión para realizar mediciones que puedan efectuar de forma adecuada de adquisición de datos proporcionados por la norma.

¹SNEHASIS,paI.Design and acoustic analysis of exhaust muffler for automotive applications.[Repositorio Digital].Master of Technology.Christ University.Faculty of Engineering.Kumbalgodu.2015.[conslutado10,01,2017]

²ŠTEBLAJ,peter. A Muffler with Adaptive Acoustic Properties E: Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering.[ScienceDirect].noviembre. vol. 61, no. 10, p. 553-560.[Consultado15,02,2017]

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un banco de pruebas acústicas para silenciadores de exostos y paneles arquitectónicos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las condiciones de operación de un banco de pruebas acústicas.
- Realizar el diseño conceptual y de detalle del banco de pruebas para las condiciones de operación acústicas.
- Realizar la validación experimental de la pérdida de transmisión acústica, por medio de un dispositivo de prueba.

1. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se muestran los parámetros de medición de la eficiencia en silenciadores, donde se realiza una selección del parámetro a utilizar que permita garantizar una selección adecuada del silenciador, con el fin de atenuar adecuadamente la fuente de ruido. Además, se presenta la configuración básica del banco de pruebas acústico y la tipología actual de silenciadores.

1.1 PARÁMETROS DE MEDICIÓN EN SILENCIADORES

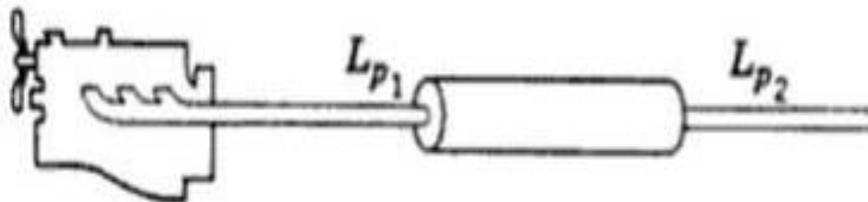
Los silenciadores son dispositivos para atenuar los niveles de ruido generados por el motor del automóvil, la mayor fuente de ruido de contaminación sonora. El nivel de reducción de sonido depende del tipo, diseño y construcción del silenciador utilizado.

La eficiencia de los silenciadores puede ser comparada por diferentes parámetros de medición conocidos en la literatura. Estos son: La reducción del ruido (NR), la pérdida de inserción (IL) y la pérdida de transmisión acústica (TL).³

1.1.1 Reducción de ruido. La reducción de ruido es uno de los parámetros utilizados para medir la capacidad de reducción sonora que pueda abarcar el silenciador en diferentes frecuencias. es la diferencia de nivel de presión acústica, expresada por L_{r1} y L_{r2} , que se mide antes y después del silenciador y es expresada simbólicamente por.⁴

$$NR = L_{r1} - L_{r2}$$

Figura 1. Esquema representativo para medir la reducción de ruido.



Fuente: CROCKER, malcom. Handbook of noise and vibration control. [Google Académico]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007. p.400. [Consultado 17,03,2017]. Disponible en : <https://es.scribd.com/doc/235661198/Handbook-of-Noise-and-Vibration-Control>

³ PIERCE, Allan D. Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications. McGraw-Hill New York, 1981. P.359

⁴ LAZCANO, Juan Luis Aguayo. Aplicación de técnicas digitales de medición del aislamiento suministrado por silenciadores en presencia de flujo. [Repositorio Digital]. Tesis. Licenciado en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero Acústico. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Acústica. Valdivia. 2005. p07 [consultado 20,02,2017]

Para conocer el rendimiento del sistema en términos de la matriz de cuatro polos, es necesario conocer la impedancia al final del ducto y la amplitud de onda medida antes y después del elemento de muestra.

$$NR = 20 * \left| \left[A + \frac{B}{Z_{rad}} \right] \right|$$

Dónde:

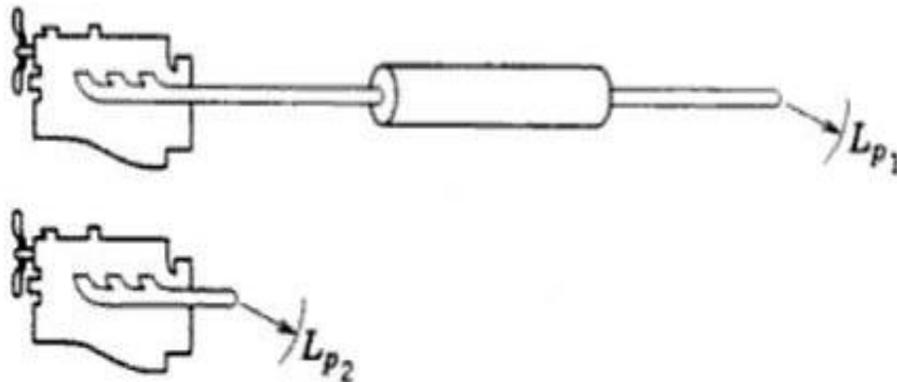
A Amplitud de onda incidente.

B = Amplitud de onda reflejada.

Z_{rad} = Corresponde a la impedancia de la onda, al final del conducto de salida. $\left[\frac{Pa * s}{m^3} \right]$

1.1.2 Pérdida de inserción. La medición del rendimiento acústico por medio de la pérdida de inserción se efectúa por la diferencia entre el nivel de presión sonora medido sin el silenciador (L_{p2}) y con el silenciador (L_{p1})⁵, como se puede ver ilustrado en la figura 2.

Figura 2. Esquema representativo para medir la pérdida de inserción.



Fuente: CROCKER, malcom. Handbook of noise and vibration control. [Google Académico]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007. p.400. [Consultado 17,03,2017]. Disponible en : <https://es.scribd.com/doc/235661198/Handbook-of-Noise-and-Vibration-Control>

Este método es utilizado en el análisis de rendimiento acústico para silenciadores, pero para hallar la pérdida de inserción en la adquisición de los datos se requiere la

⁵ DARLINGTON, Sidney. Synthesis of Reactance 4-Poles Which Produce Prescribed Insertion Loss Characteristics: Including Special Applications To Filter Design. En: Studies in Applied Mathematics. vol. 18, no. 1-4, p. 257-353

impedancia de la onda al final del conducto de salida y la impedancia de la fuente⁶, evaluando la atenuación del sistema de forma completa ya que tiene en cuenta la interacción del silenciador con la fuente y la terminación.

$$IL = \left| \frac{AZ_{Rad} + B + CZ_S Z_{Rad} + DZ_S}{A'Z_{Rad} + B' + C'Z_S Z_{Rad} + D'Z_S} \right|$$

Dónde:

A, B, C, D = Cuatro polos de la matriz de transferencia, calculados con el nivel de presión sonora.

Z_{rad} = Corresponde a la impedancia de la onda, al final del conducto de salida. $\left[\frac{Pa*s}{m^3} \right]$

Z_s = Impedancia de la fuente. $\left[\frac{Pa*s}{m^3} \right]$

Lo valores que tienen una comilla son los datos adquiridos en el banco sin el silenciador.

1.1.3 Pérdida de transmisión acústica. La diferencia de intensidad sonora que produce el silenciador es la pérdida de transmisión acústica, por medio de este método se estudia la diferencia entre los niveles de intensidad de las ondas incidentes y transmitidas sobre el comportamiento que tiene en dispositivos que atenúen el ruido como silenciadores o materiales.⁷

Para analizar el comportamiento de la pérdida de transmisión acústica de forma experimental, se inicia desde una fuente que produce ruido y pasa a través del silenciador o un disipador de ondas, este proceso es caracterizado por la comparación entre la intensidad sonora (I_0) que se produce y la onda transmitida (I_t). Cabe notar que estas intensidades serán el punto de partida para encontrar la pérdida de transmisión de potencia de un determinado elemento de forma simbólica, y está definido bajo la siguiente formula⁸.

⁶ LAZCANO, Juan Luis Aguayo. Aplicación de técnicas digitales de medición del aislamiento suministrado por silenciadores en presencia de flujo. [Repositorio Digital]. Tesis. Licenciado en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero Acústico. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Acústica. Valdivia. 2005. p07 [consultado 20,02,2017]

⁷ ESTELLÉS, DÍAZ, Ricardo. Aislación Acústica. [Google Académico]. Montevideo. Octubre. 2005 [Consultado 25,02,2017] Disponible en: <http://www.ing.univ.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/07-AISLACION-ACUSTICA.pdf>

⁸ WU, TW y CHEN, CYR. Boundary element analysis of reactive mufflers and packed silencers with catalyst converters. E: Electronic Journal of Boundary Elements. [ScienceDirect]. Kentucky. vol. 1,

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} + T_{22} \right|^2 \right)$$

De los tres parámetros explicados anteriormente el que evalúa con mayor asertividad el rendimiento del silenciador es la pérdida de transmisión acústica, ya que este es un caso especial de la pérdida de inserción donde únicamente se tiene en cuenta las características del elemento de prueba y no la impedancia de la fuente ni de las terminaciones, ya que se consideran iguales.

Esto permite un nivel de fiabilidad mayor que con el parámetro de la pérdida de inserción convencional y la reducción de ruido al evitar errores en la medición si se hacen cambios de la fuente o las terminaciones, y ser el parámetro de mayor reconocimiento en la literatura en el diseño de silenciadores.⁹

1.2 BANCO ACÚSTICO

En el estudio y diseño de los silenciadores acústicos utilizados en la industria se han utilizado diferentes parámetros como los mencionados en la sección 1.1. El de mayor importancia y reconocimiento en la literatura es la pérdida de transmisión acústica¹⁰. Para la correcta medición de este parámetro se desarrollan diferentes configuraciones y métodos utilizados en bancos acústicos bajo la norma ASTM E2611-09.

La configuración básica del banco acústico se basa en la generación de frecuencias de interés producidas por la fuente de sonido para cubrir el rango espectral. Hay dos micrófonos que toman la medida de la presión sonora antes y dos micrófonos después del silenciador, que van ubicados en posiciones fijas como se muestra en la imagen 1.

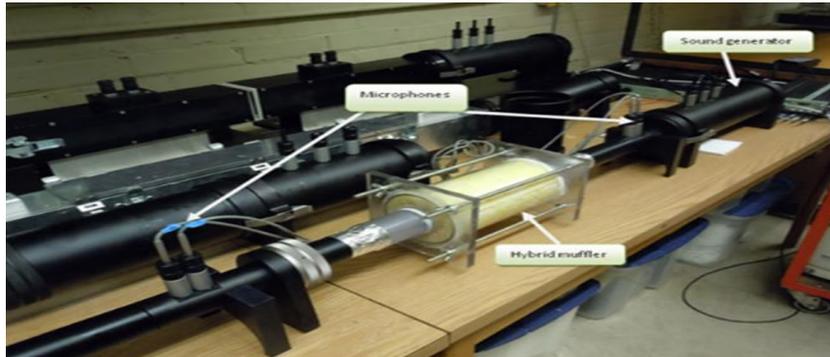
no 2.2003[Consultado28,02,2017].
<http://ejbe.libraries.rutgers.edu/index.php/ejbe/article/view/759>

Disponible en:

⁹ CROCKER, Malcom, op.cit, p.158

¹⁰ TAO, Z. y SEYBERT, AF. A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss. E: Society of Automotive Engineers, Inc. [Google Académico]. Kentucky. 01.2003.p02. [Consultado09,03,2017]. Disponible: <http://spectronics.net/resources/Technical%20Papers/Muffler%20TL.pdf>

Imagen 1 Banco Acústico



FUENTE:161ST. ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA MEETING, silencing your car with a hybrid muffler, [CONSULTADO EL 8/2/2017].
DISPONIBLE EN:
[HTTP://ACOUSTICS.ORG/PRESSROOM/HTTPDOCS/161ST/RONG](http://ACOUSTICS.ORG/PRESSROOM/HTTPDOCS/161ST/RONG).

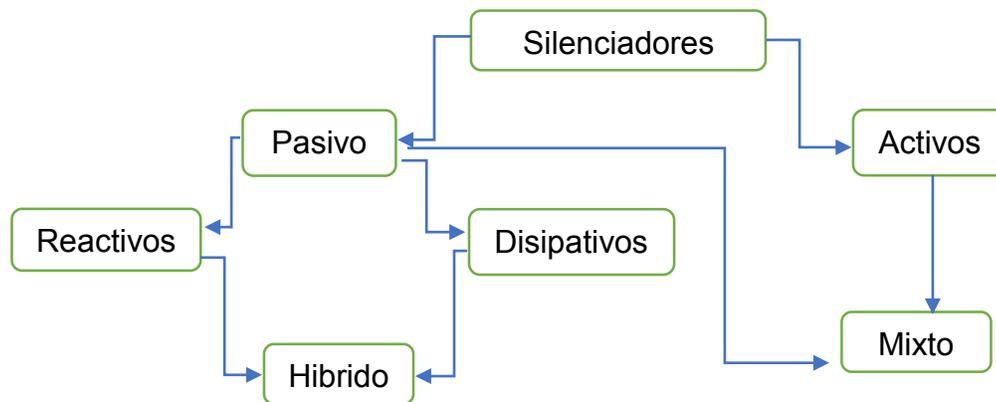
El banco de pruebas puede variar su configuración y la cantidad de toma de mediciones según la metodología experimental escogida y el sistema de adquisición de datos usado. Cuando el método a utilizar requiera realizar variaciones en la terminación sonora del banco o aumentar la cantidad de micrófonos, es posible hacerlo y variar términos en la teoría inicial de la medición de la pérdida de transmisión acústica para encontrar la gráfica requerida.

1.3 CLASIFICACIÓN DE SILENCIADORES

Los silenciadores son elementos encargados de atenuar el ruido producido en una fuente de ruido y expulsarlo al exterior. Debido a los diferentes requerimientos que existen en la actualidad por las normativas ambientales como el decreto 627 del 2006¹¹, que regula la contaminación auditiva generada por sitios de entretenimiento aledaños a sectores residenciales. Se debe tener en cuenta la posibilidad de hacer uso de diferentes tipos de silenciadores, para aumentar su eficiencia y evitar las molestias de contaminación auditiva que esto puede generar. En el siguiente mapa conceptual se presenta la clasificación actual de silenciadores.

¹¹ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. resolución 0627 de 2006. Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor. Bogotá. 2006. p.21

Figura 1. Tipos de silenciadores



Fuente: GARCÍA LUQUE, Alexander, et al. *Estudio comparativo del desempeño de los métodos FEM y MMT para el cálculo de la atenuación sonora de silenciadores pasivos*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido 03, 2017 Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/45947/1/80821533.2014.pdf>

Los silenciadores se dividen en pasivos y activos, esta clasificación hace relación al tipo de atenuación del ruido que se ejerce a la fuente sonora. “El control activo se refiere a un sistema electroacústico que por medio de DSP (Procesamiento digital de señal) con micrófono y parlante genera con una segunda fuente de ruido (parlante) una señal igual a la emitida por la fuente de ruido primaria pero desfasada y por medio de interferencias superpone ambas señales buscando la cancelación de estas y de esta forma la atenuación.”¹²

La eficiencia del control activo del ruido es mayor al pasivo ya que el micrófono actúa como sensor para encontrar que frecuencia tiene la onda sonora emitida por la fuente en tiempo real, y la onda emitida por el parlante del silenciador debe buscar la cancelación e interferencia del ruido.

Además, la cantidad de ruido atenuado en los silenciadores pasivos es directamente proporcional al tamaño del silenciador, en cambio el dispositivo del control activo del ruido puede ejercer una mayor eficiencia sin aumentar su tamaño. Debido a sus características los silenciadores activos son más costosos y poco utilizados en la industria automotriz. En este trabajo solo se tendrán en cuenta los silenciadores de tipo pasivo.

¹² GARCÍA LUQUE, Alexander. Estudio comparativo del desempeño de los métodos FEM y MMT para el cálculo de la atenuación sonora de silenciadores pasivos. [Repositorio Digital] Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá. p32. [Consultado 09, 03, 2017]

El diseño del silenciador se realiza en cada aplicación dependiendo del espectro de frecuencias que abarque el sonido producido por la fuente. De acuerdo a este rango de frecuencias se selecciona cual tipo de silenciador será el más adecuado para efectuar la disminución de ruido, sin causar la pérdida de compresión en el motor.¹³

Esta disminución de potencia es generada por la reflexión de ondas sonoras cuando entran en contacto con el silenciador pasivo, ya que la interferencia realizada por las cámaras interiores obliga a una parte de las ondas sonoras a devolverse por el mismo ducto, generando una presión en contra de las ondas que van camino al silenciador.

En la actualidad han sido propuestos dos tipos particulares de silenciadores pasivos para para lograr la disminución de sonido en el ducto de escape de los vehículos, teniendo en cuenta la forma como la energía es disipada en su interior: los disipativos y los reactivos; “El diseño de un silenciador que reúna los dos tipos daría como resultado una reducción de ruido que abarque un rango de frecuencias más amplio”¹⁴.

1.3.1 Silenciador reactivo. El silenciador reactivo es aquel que utiliza el fenómeno de la interferencia destructiva para reducir el ruido, esto hace referencia a que las ondas emitidas por el motor se anulen parcialmente en el silenciador por medio de cámaras resonantes, las cuales están configuradas en su interior con cambios geométricos, para provocar que las ondas emitidas choquen entre sí ocasionando un efecto de contra presión que produce una disminución del sonido.¹⁵

Aunque el objetivo principal del silenciador es la atenuación del ruido, el efecto de contra presión que se origina en las cámaras resonantes disminuye la compresión del motor. La configuración interna del silenciador deberá ser diseñada con el fin de no generar contra presiones adicionales que generen una pérdida de eficiencia en el vehículo. Este tipo de configuración permitirá abarcar de forma eficiente las frecuencias bajas producidas en el motor, ya que en las altas frecuencias es más efectivo utilizar silenciadores disipativos¹⁶.

En la entrada y el escape del silenciador se encuentran los tubos, estos están desplazados en su interior y tienen perforaciones para que en su momento de salida haya una mayor dispersión en la onda de modo que el sonido del escape del

¹³ ŠTEBLAJ, Peter. op. cit. p.113.

¹⁴ INGLE, Ravindra; JADHAV, jm; MANVI, vs y TALEKAR, VD. Experimental investigation of a double expansion chamber reactive muffler for stationary diesel engine. En: Noise & Vibration Worldwide. 10. vol. 45, no. 9, p. 12-17 [Consultado, 19,02,2017]

¹⁵ WU, TW y CHEN, CYR. op. cit. p.20

¹⁶ INGLE, Ravindra, op. cit. p. 15

vehículo no sea tan alto.¹⁷ Además, estas perforaciones permiten reducir de forma eficiente la contra presión que se origina en las recamaras internas del silenciador, aumenta la atenuación de sonido producido en el motor. A continuación, se presenta el esquema de un silenciador reactivo.

Imagen 2. Corte Transversal Silenciador



Fuente: POTENTE, Daniel. General Design Principles for an Automotive Muffler. En: daydesing[Google Academico]. Sidney. 11. 2005a. p. 153-158. [Consultado 03, 30, 2017]. Disponible en: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2005/papers/34.pdf

1.3.2 Silenciador disipativo. En este silenciador la potencia sonora producida por los vehículos es reducida por materiales internos absorbentes, que son fibras para atenuar el flujo de sonido, reduciendo el ruido cuando las ondas entran en el material disipativo¹⁸.

Esto genera un rendimiento alto de reducción en rangos de frecuencia medios y altos, y proporciona un control de ruido deseable en los sistemas de escape utilizados en automóviles.

Para la fabricación del silenciador es fundamental una correcta elección de los materiales internos con los que se efectúa el diseño. La selección del material absorbente que se va a utilizar como la fibra, debe tener en cuenta las diferentes propiedades acústicas como la densidad y la porosidad del material¹⁹, la extensión

¹⁷ POTENTE, Daniel. General Design Principles for an Automotive Muffler. En: daydesing[Google Academico]. Sidney. 11. 2005a. p. 153-158. [Consultado 03, 30, 2017]. Disponible en: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2005/papers/34.pdf

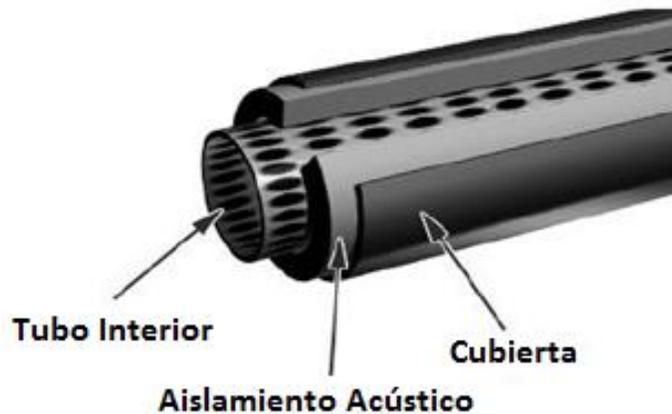
¹⁸ PIERCE, cit, p.19

¹⁹ FONSECA DE LIAM, Key; BARBIERI, Nilson y BARBIERI, Renato. Alternative method for acoustical characterization of absorbent materials based on the assessment of the acoustical efficiency of dissipative silencers. En: Noise Control Engineering Journal. [ScienceDirect]. 03 vol. 64, no. 2, p. 195-

de entrada y salida de los ductos, el tamaño de las perforaciones en el ducto y las dimensiones del silenciador.²⁰

Las diferentes configuraciones que se puedan presentar deben ser evaluadas de forma experimental para ver el comportamiento real del material, ya que presenta una mayor dificultad simular cada uno de los materiales que se implementen en el silenciador.

Imagen 3. Silenciador Disipativo Típico



Fuente: POTENTE, Daniel. General Design Principles for an Automotive Muffler. En: daydesing [Google Academico]. Sidney. 11. 2005a. p. 153-158. [Consultado 03, 30, 2017]. Disponible en: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2005/papers/34.pdf

La ubicación del material que absorbe las ondas es de vital importancia para aumentar la eficiencia del silenciador. En la imagen 3, se puede apreciar que la ubicación es en medio del tubo perforado y la carcasa, aunque para aplicaciones específicas es posible variar la configuración del material debido a cambios internos en las recamaras del silenciador.²¹ En estas aplicaciones, se debe medir el sonido emitido por el automóvil sin silenciador para identificar las frecuencias de mayor alcance²², para poder elegir la mejor configuración del silenciador disipativo y

207. [Consultado, 03, 31, 2017]. Disponible en: <http://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/ncej/2016/00000064/00000002/art00008>

²⁰ DENIA, fd. Acoustic attenuation performance of perforated dissipative mufflers with empty inlet/outlet extensions. En: Journal of Sound and Vibration. [ScienceDirect]. 02 vol. 302, no. 4, p. 1000-1017 [Consultado, 03, 04, 2017]

²¹ Ibid. p. 1008

²² PIERCE, Allan. op. cit. p. 18

abarcarse el mayor espectro posible de frecuencias, y disminuir efectivamente el ruido generado por el motor del vehículo.

1.3.3 Silenciador híbrido. Este silenciador actúa por medio de la configuración de fibras que combinan las propiedades disipativas del material poroso con las técnicas del silenciador reactivo para garantizar la eficiencia del dispositivo de reducción de ruido. Cuando se habla sobre absorción híbrida se refiere a la mayor posible atenuación de las ondas de baja y alta frecuencia. Existe una alta atenuación en el espectro de frecuencias bajas si se activan las propiedades reactivas del silenciador y de frecuencias altas si actúa el material disipativo y las perforaciones existentes en el tubo²³.

La atenuación del sonido puede ser mejorada si se realiza una selección apropiada de los parámetros geométricos y de las propiedades acústicas involucradas, como la pérdida de transmisión de potencia y las características de absorción del material. Las configuraciones más relevantes a estudiar en esta distribución de silenciadores son los efectos de la geometría utilizada, la resistencia de la fibra, el diámetro y la cantidad de perforaciones que tendrá el tubo.²⁴

Los beneficios de la combinación de ambos tipos de configuración (silenciadores reactivos y disipativos), son necesarios cuando es requerido atenuar un mayor rango de frecuencias y no es posible atenuar de forma efectiva las ondas con un solo tipo de silenciador.²⁵ Por ejemplo, esto ocurre cuando se va a atenuar el ruido producido por un vehículo de combustión interna, ya que el sonido que se produce depende de forma directa de las revoluciones por minuto que varían constantemente en el manejo, debido a que se debe abarcar un mayor rango de frecuencias.

²³ LEE, Seungkyu; BOLTON, J. Stuart y MARTINSON, Paul. op. cit. p. 545.

²⁴ DENIA, fs. op. cit. p. 1009.

²⁵ POTENTE, Daniel. op. cit. p. 565

Imagen 4. Silenciador Híbrido

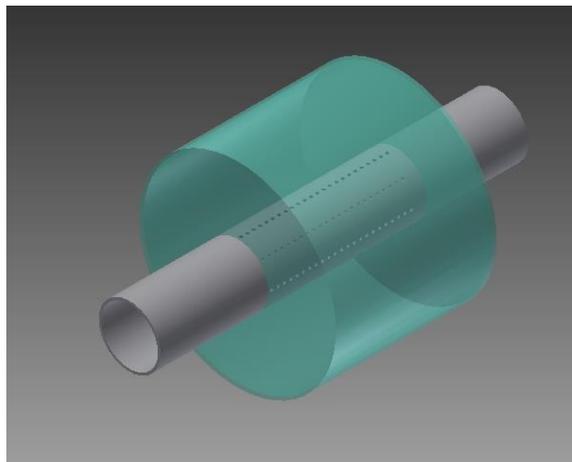


Fuente: POTENTE, Daniel. General design principles for an automotive muffler. En *Proceedings of ACOUSTICS*. 2005. p. 153-158. Obtenido 02, 2017, Disponible en: http://acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2005/papers/34.pdf

En la imagen 4 se logra apreciar una correcta combinación de los parámetros en el silenciador híbrido, ya que podrá atenuar una mayor parte de frecuencias debido a la mezcla de configuraciones del silenciador.

1.3.4 Silenciador construido. Después de analizar de forma detallada los silenciadores y los parámetros de medición de eficiencia sonora, el que está más acorde para el estudio de la pérdida de transmisión acústica y la validación del algoritmo de matlab creado en este proyecto de grado es el silenciador reactivo, construido a similitud del documento de torres picazo²⁶.

Figura 2. Silenciador Reactivo



²⁶ TORRES PICAZO, María Isabel. Modelado acústico de silenciadores con material absorbente. [Repositorio Digital]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Valencia. 2006. p. 130. [Consultado, 04, 18, 2017]

2. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para el análisis experimental de la pérdida de transmisión acústica se requiere información acerca de parámetros y elección de la metodología de medición a utilizar, que permitan garantizar las condiciones adecuadas de operación. A continuación, se presentan los diferentes métodos para medir la pérdida de transmisión acústica.

2.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA.

Según Munjal²⁷, la medición experimental en el diseño de silenciadores es fundamental para corroborar los datos obtenidos de la simulación, obtener datos que no pueden ser predichos de forma precisa y para evaluar el desempeño real de la configuración de un silenciador, de tal forma que pueda cumplir con todos los requerimientos de diseño del mismo.

En la actualidad, existen diferentes parámetros para determinar la eficiencia de los silenciadores en su diseño, como los vistos en el capítulo 1. Como lo muestra García Luque²⁸ en su documento la reducción de ruido y la pérdida de inserción pueden ser medidos con mayor facilidad y tengan aplicación en la industria, el parámetro de mayor reconocimiento para evaluar la atenuación sonora en silenciadores acústicos es la pérdida de transmisión acústica. Este parámetro evalúa de forma independiente la atenuación de ruido de la fuente que lo genera y así mismo evalúa la diferencia entre los niveles de intensidad de las ondas transmitidas.

Expuesto en lo anterior se puede adquirir la toma de datos de la manera libre o en la construcción de una terminación anecoica (aislamiento del sonido exterior) requiere de largos tubos y materiales con alto rango de absorción, o con un silenciador activo de sonido²⁹, como lo explicado en el capítulo 1.4.2. Esto genera un diseño más complejo del banco de pruebas acústicas, ya que se debe tener en cuenta la capacidad de atenuación del material absorbente en la terminación sonora del banco.

“Aunque existen diferentes metodologías de experimentación para encontrar la pérdida de transmisión acústica en los silenciadores, hay algunas en las que no es necesaria una terminación anecoica como en el método de las dos fuentes (TSM) y el método de las dos cargas (TLM). Esto permite reducir las posibles incongruencias en la toma de datos cuando la terminación produce errores en los resultados, por tener un alto índice de reflexión”.³⁰

²⁷ MUNJAL, M. L. Noise and Vibration Control.[Google Académico]. Hackensack:World Scientific.2013.[Consultado,04,05,2017].Disponible en:
<https://es.scribd.com/doc/305083492/Munjal-M-L-IISc-Lecture-Notes-Series-Volume-3>.

²⁸ GARCÍA LUQUE, Alexander. op.cit.p38

²⁹ TAO, z. y SEYBERT, af. op.cit.p.50

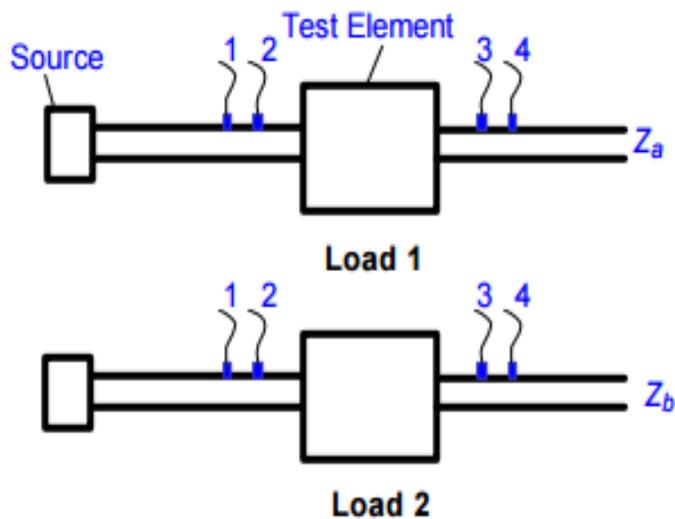
³⁰ Ibid,p.41

2.1.1 Método de dos cargas (TLM). El método de dos cargas se basa en dos mediciones con un mismo dispositivo (silenciador) en las cuales en cada toma de datos se va a variar la terminación sonora. según tao y seybert³¹, en la primera medición se utiliza una terminación insonora con materiales absorbentes en la salida del tubo que conecta el silenciador con el medio exterior, y en la segunda medición no se ubica ningún tipo de terminación sonora hacia el medio exterior. la comparación de las dos mediciones podrá definir la pérdida de transmisión acústica en el silenciador por medio de este método.

Si en la adquisición de la toma de datos los dispositivos arrojan resultados muy similares, significa que el método no podrá ser aplicado ya que las muestras no tendrán una diferencia confiable para ejecutar con precisión el análisis la pérdida de transmisión acústica.

En la figura 3 se presenta cual es el modelo utilizado en el desarrollo de este método.

Figura 3. Método de las dos cargas

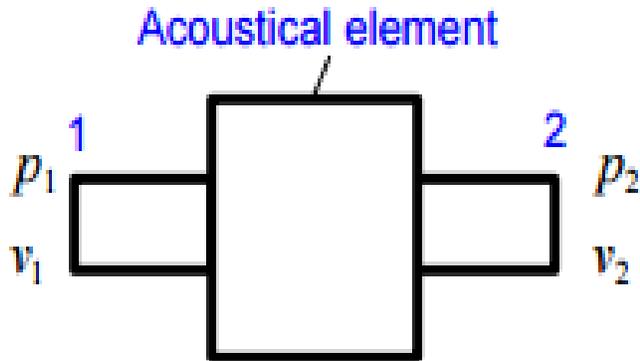


Fuente: TAO,Z. y SEYBERT,AF.A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss.E: Society of Automotive Engineers, Inc.[Google Académico].Kentucky.01.2003.p02.[Consultado09,03,2017].Disponible:
<http://spectronics.net/resources/Technical%20Papers/Muffler%20TL.pdf>

³¹ TAO, SEYBERT, op. cit, p.26

2.1.2 Método de las dos fuentes (tsm). El método de las dos fuentes está basado en la matriz de transferencia expuesto en el capítulo 2.3, en donde se modela un elemento acústico con cuatro polos, como se muestra en la figura 4³². en estos cuatro parámetros se incluyen las presiones sonoras y las velocidades de entrada y salida, respectivamente.

Figura 4. Cuatro Polos



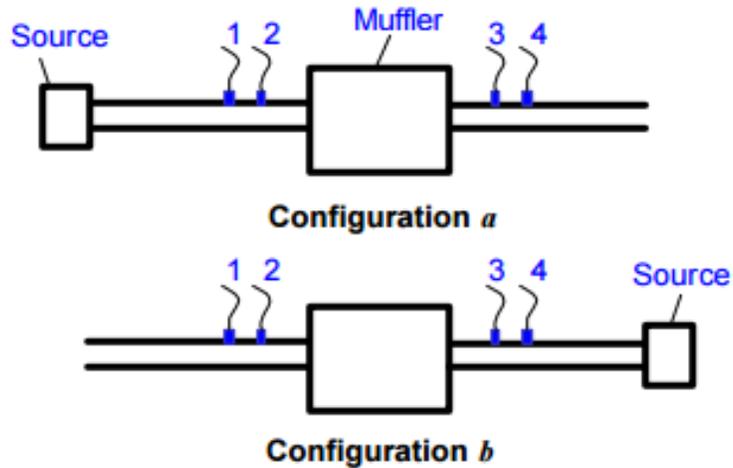
Fuente: TAO,Z. y SEYBERT,AF.A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss.E: Society of Automotive Engineers, Inc.[Google Académico].Kentucky.01.2003.p02.[Consultado09,03,2017].Disponibile:
<http://spectronics.net/resources/Technical%20Papers/Muffler%20TL.pdf>

En el desarrollo de este método se debe cambiar la posición de la fuente sonora, esta variación surge como alternativa al método de dos cargas como lo expone Fonseca³³ en su documento; utilizando el emisor de sonido en ambos extremos para ejecutar las mediciones y obtener resultados fiables en las frecuencias de interés a medir. A continuación, se presentan las dos configuraciones con las respectivas posiciones de los micrófonos y la fuente de sonido.

³² Ibíd., p.27

³³ FONSECA DE LIAM, op.cit,p.22

Figura 5. Configuraciones en TSM

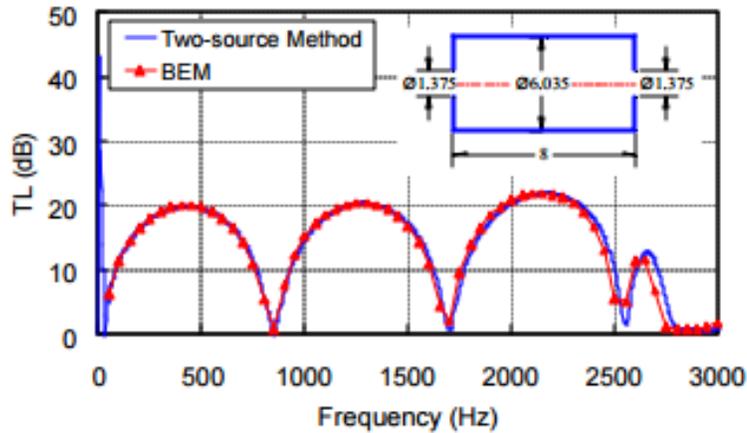


Fuente: TAO,Z. y SEYBERT,AF.A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss.E: Society of Automotive Engineers, Inc.[Google Académico].Kentucky.01.2003.p02.[Consultado09,03,2017]. Disponible: <http://spectronics.net/resources/Technical%20Papers/Muffler%20TL.pdf>

Debido a que no es necesario implementar una terminación insonora en la salida del banco acústico, se puede medir con una mayor eficiencia los materiales implementados en la atenuación de sonido por parte de los silenciadores disipativos e híbridos³⁴. Se muestra en la figura 6 una alta correlación cuando se compara los datos obtenidos en la experimentación, con los datos arrojados en la simulación por medio del método BEM (método de elementos de frontera).

³⁴ ARUNKUMAR,B. y JEYANTHI,S. Design and analysis of impedance tube for sound absorption measurement.En: ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences[Google Académico].Tamilnadul.03.p.04.[Consultado,04,13,2017].Disponible en: http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0317_5774.pdf

Figura 6. Método de dos fuentes vs. BEM



Fuente: TAO,Z. y SEYBERT,AF.A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss.E: Society of Automotive Engineers, Inc.[Google Académico].Kentucky.01.2003.p02.[Consultado09,03,2017].Disponible: <http://spectronics.net/resources/Technical%20Papers/Muffler%20TL.pdf>

2.2 DESARROLLO NORMATIVA ASTM E2611-09

Para el desarrollo de la matriz de transferencia la metodología a implementar en el banco de pruebas es el método de dos cargas, el cual se eligió ya que los parámetros utilizados en el procedimiento coinciden con los descritos en la norma ASTM E2611-09³⁵. Esta norma explica paso a paso el proceso de medición de la pérdida de transmisión acústica por medio de un banco acústico el cual pauta el diseño y construcción de cada uno de los elementos escritos a continuación, el tubo de impedancia, cuatro micrófonos y un sistema de análisis digital de frecuencia. Esta normativa es el referente principal para el desarrollo de las dimensiones y condiciones de operación del banco acústico diseñado.

Para realizar la medición se generan ondas planas en un extremo del tubo con la fuente de ruido, la descomposición del campo en ondas incidentes y reflejadas se obtienen a partir de las cuatro localizaciones fijas de micrófonos que miden las presiones sonoras, y finalmente el cálculo de la matriz de transferencia da como resultado la pérdida de transmisión de potencia en la frecuencia analizada.

³⁵ ASTM.Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. ASTM E2611.2009

2.2.1 Parámetros de diseño del tubo de impedancia. El banco de pruebas debe estar aislado de ruido y vibraciones como se muestra en la imagen 5, ya que estos factores pueden afectar la calidad de las mediciones, por lo que se recomienda que las paredes del tubo tengan como mínimo el 5% del diámetro del tubo. la sección transversal del tubo puede ser circular o rectangular. por otro lado, el tipo de material especificado puede ser madera, plástico o metal con sus paredes acabado espejo y sin agujeros.

Imagen 5. Banco Acústico



La longitud mínima requerida del primer tubo debe ser mayor a tres veces el diámetro del tubo para evitar la propagación de las ondas no planas según la norma ASTM-E2611-09³⁶.

$$L \geq 3d$$

$$L \geq 3 * 0.06m$$

$$L \geq 0.18m$$

Donde L es la longitud mínima requerida en metros, y d es el diámetro externo del tubo en metros. El diámetro del tubo de impedancia trabajado es de 0.06m³⁷; este diámetro es seleccionado por medio de los autores ya que es el ideal para el desarrollo del banco acústico, por lo que la longitud mínima es de 0.18 metros.

2.2.2 Densidad del aire. La matriz de transferencia requiere el cálculo de la densidad del aire la cual está descrita a continuación.

$$\rho = 1.290 * \left(\frac{P}{101.325} \right) * \left(\frac{273.15}{273.15 + T} \right)$$

$$\rho = 1.290 * \left(\frac{74.66kPa}{101.325} \right) * \left(\frac{273.15}{273.15 + 14^{\circ}C} \right)$$

³⁶ Ibid,p.8

³⁷ PAVCO,Manual Técnico Tubosistemas Presión PVC,PAVCO - MEXICHEM COLOMBIA,Disponible en :<https://pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25>

$$\rho = 0.9041 \text{ Kg/m}^3$$

Donde ρ es la densidad de aire expresada en Kg/m^3 , P es la presión atmosférica en kPa y T es la temperatura del ambiente al momento de la medición en 14°C y la presión atmosférica es de 74.66 atm ³⁸, la toma de estos tres datos son adquiridos para las condiciones en Bogotá.

2.2.3 Rango de frecuencias. El rango de frecuencias utilizado en la norma es establecido para evitar la aparición de ondas no planas y afectar la calidad de la medición. Este rango puede variar dependiendo del diámetro del tubo y el espaciamiento que hay entre los micrófonos. Se concibe el rango de frecuencias de trabajo así.

$$f_i \leq f \leq f_s$$

Donde f es el rango de operación del banco acústico, en Hertz. f_i es la frecuencia límite inferior y f_s es la frecuencia límite superior, ambas en Hertz.

Si se requiere de un espectro de frecuencias con mayor alcance la norma propone utilizar un mismo tubo con diferentes espaciamentos entre micrófonos mostrado en la imagen 5, o varios diámetros de tubo para variar esta condición y ampliar el rango. Este rango también debe tener en cuenta la capacidad del generador de sonido de proveer la potencia necesaria para obtener un resultado fiable, y eliminar así el ruido exterior que se pueda presentar en el ambiente y que afecta la medición de forma considerable.

Cabe anotar que la frecuencia límite inferior se determina por el rango mínimo espectral que tenga la fuente de sonido y el generador de ondas. Aunque la norma describe que también depende del espaciamiento entre micrófonos, no propone ninguna ecuación que permita encontrar la frecuencia inferior con esta variable. La frecuencia límite superior está delimitada por la siguiente ecuación, que se encuentra expuesta en la norma ASTM E2611-09³⁹.

$$f_s < \frac{Kc}{d}$$

Donde K es la constante del área transversal, en este caso por ser una sección circular tiene por valor 0.586. C la velocidad del sonido en m/s , y d es el diámetro del tubo utilizado. La velocidad del sonido es calculada con la siguiente expresión.

$$C = 20.047\sqrt{273.15 + T}$$

³⁸ POVEDA, Germán. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. En: Rev. Acad. Colomb. Cienc. vol. 28, no. 107, p. 201-222

³⁹ ASTM. Standard, op. cit. p. 10

Donde T es la temperatura del cuarto donde es instalado el dispositivo, en °C. La velocidad del sonido con la temperatura promedio en Bogotá da como resultado.

$$C = 20.047\sqrt{273.15 + 14^\circ C}$$

$$C = 339.76 \text{ m/s}$$

Con la velocidad del sonido se calcula la frecuencia límite superior.

$$f_s < \frac{0.586 * 339.76 \text{ m/s}}{0.06 \text{ m}}$$

$$f_s < 3320 \text{ Hz}$$

2.2.4 Parámetros de diseño para selección del micrófono. Según vitoria⁴⁰ en su documento, el rango de frecuencias utilizado para la validación experimental del silenciador, va de 80 a 3000 hz para encontrar el espaciamiento de los micrófonos, se utiliza esta frecuencia límite superior que cumple con la condición de ser menor a 3320 hertz⁴¹.

$$S \ll \frac{C}{2f_s}$$

Donde C es la velocidad del sonido en el tubo en m/s , S es el espaciamiento entre micrófonos en metros y f_s es la frecuencia límite superior en Hertz.

$$S \ll \frac{339.76 \text{ m/s}}{2 * 3000 \text{ Hz}}$$

$$S \ll 0.05661 \text{ m}$$

Cabe señalar que la norma indica un espaciamiento de micrófonos no mayor al 80% de $\frac{C}{2f_s}$, por lo que se construye con 4.5 cm entre micrófonos.

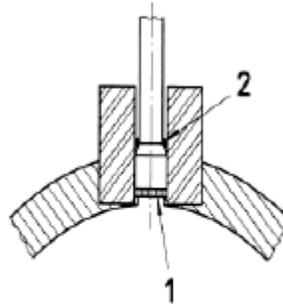
Los micrófonos utilizados deben ser del mismo modelo y marca para disminuir la posibilidad de diferencias en la respuesta en frecuencia que tenga cada uno. Según la norma ASTM 2611-09⁴², deben ser micrófonos de presión con dimensiones de cabeza menores al 20% de espaciamiento entre ellos. Para evitar fugas de sonido, se recomienda hacer un sello entre el micrófono y la pieza que lo sostiene firme en el banco acústico.

⁴⁰ TORRES PICAZO, María Isabel. op.cit.p.156.

⁴¹ ASTM. Standard, op.cit.p.10

⁴² Ibid, p.11

Figura 7. Montaje adecuado del micrófono en el tubo.



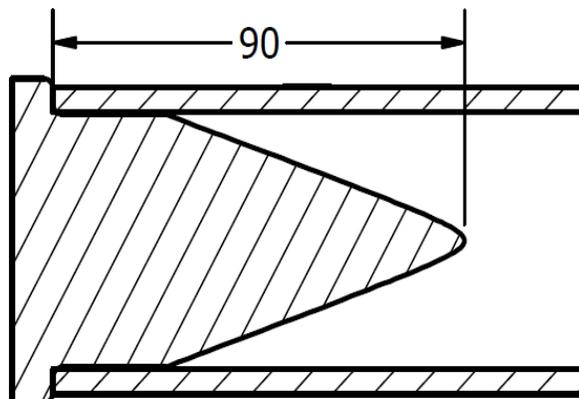
Elementos
1. Micrófono
2. Junta

Fuente: W. H. Tan et al., "Development of an Indigenous Impedance Tube", Applied Mechanics and Materials, Vol. 786, pp. 149-155, 2015

Cuando se realiza el montaje se debe tener en cuenta que el diafragma del micrófono esté sobre la misma superficie interna del tubo; Se consideran diferentes tipos de soportes incluyendo un pequeño tope para asegurar que el micrófono no genere pérdidas sonoras por el choque entre las ondas provenientes de la fuente y la errada posición del micrófono en el tubo.

2.2.5 Terminación anecoica. La terminación anecoica es un elemento utilizado para reducir la reflexión de las ondas que debe ser elaborada con un material frágil que permita el aislamiento acústico y genere la mínima reflexión de las ondas que retornen al elemento de prueba. un elemento en forma de cono con 30 centímetros de longitud, creado con un material como fibra de vidrio tendrá que ser introducido en el extremo del tubo que está libre.

Figura 8. Detalle con espuma de fibra de vidrio.



Para poder aplicar el método de las dos cargas y desarrollar la matriz de transferencia se deben hacer las mediciones con la terminación cerrada o abierta, por lo que se debe procurar que la terminación se pueda retirar con facilidad del tubo. La segunda medición se debe realizar bajo las mismas condiciones que la primera a excepción de la terminación.

Por otro lado, los elementos que se implementan para la unión del silenciador deben evitar la reflexión que genera el choque de las ondas con un componente montado de forma errónea en el banco acústico. Por esto, el acople utilizado para la unión debe tener la misma forma y área que el tubo para permitir el libre paso del sonido al elemento de prueba.

2.3 MATRIZ DE TRANSFERENCIA

La matriz de transferencia es utilizada para involucrar dos mediciones del mismo elemento de prueba, y así generar la cantidad de ecuaciones suficientes para solucionar la matriz y calcular la pérdida de transmisión acústica. La presión sonora en las posiciones x_1 a x_4 expresan las ondas que viajan en el interior del tubo hacia adelante y hacia atrás. Estas ecuaciones son adquiridas por medio de la norma ASTM E2611-09⁴³ las cuales son expuestas a continuación:

$$P_1 = (Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1})e^{jkx_1}$$

$$P_2 = (Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2})e^{jkx_2}$$

$$P_3 = (Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3})e^{jkx_3}$$

$$P_4 = (Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4})e^{jkx_4}$$

En donde

A, B, C, D = Representan magnitudes de onda complejas, las cuales son adquiridas con el despeje de las ecuaciones anteriormente descritas.

$$j = \sqrt{-1}$$

K = Número de onda en el medio ambiente dado en voltios/pa

P_n = Es la presión sonora en la ubicación del micrófono, donde $n = 1,2,3,4$. Se desarrolla un despeje de las magnitudes complejas a continuación⁴⁴.

T_n = Coeficiente de la matriz

⁴³ ASTM.Standard.op.cit. p.10

⁴⁴ Ibid.p.10

$$A = \frac{j (P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1})}{2 \text{sen} [k(x_1 - x_2)]}$$

$$B = \frac{j (P_2 e^{jkx_1} - P_1 e^{jkx_2})}{2 \text{sen} [k(x_1 - x_2)]}$$

$$C = \frac{j (P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3})}{2 \text{sen} [k(x_3 - x_4)]}$$

$$D = \frac{j (P_4 e^{jkx_4} - P_3 e^{jkx_3})}{2 \text{sen} [k(x_3 - x_4)]}$$

Las presiones y velocidades dadas en la matriz pueden ser expresadas en términos de las magnitudes complejas despejadas en las anteriores ecuaciones.

$$P_0 = P|_{x=0} = A + B$$

$$V_0 = V|_{x=0} = \frac{A - B}{\rho_0 c}$$

$$P_d = P|_{x=d} = C e^{-jkd} + D e^{jkd}$$

$$V_d = V|_{x=d} = \frac{C e^{-jkd} + D e^{jkd}}{\rho_0 c}$$

Donde:

ρ_0 = Es la densidad del aire en el ambiente

c = La velocidad del sonido

Para expresar adecuadamente las ondas sonoras en cada micrófono del banco acústico, se hizo énfasis en el documento de Pedrosa Sánchez⁴⁵. En donde se describen los componentes de presión y velocidad en términos de la presión sonora incidente y reflejada. En la entrada del elemento de muestra, la presión queda expresada de la siguiente forma.

$$P_{(x)} = (P^+ e^{-jkx} + P^- e^{jkx}) e^{j\omega t}$$

⁴⁵ PEDROSA SÁNCHEZ, Ana María. Desarrollo de herramientas experimentales para la caracterización acústica de silenciadores en presencia de flujo medio. [Repositorio Digital]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica De Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.Valencia.2015. p.120. [Consultado,04,18,2017]

Los coeficientes A y B representan en este caso las ondas incidentes y reflejadas y están en términos del nivel de presión sonora recibida por P_1 y P_2 , las dos posiciones del micrófono antes del silenciador.

Debido a que se toma este punto de referencia como ($x = 0$), todas las expresiones de Euler quedan reducidas a 1 y la presión a la entrada de la matriz se define como.

$$P_0 = P|_{x=0} = A + B$$

Cuando se expresa la presión a la salida del silenciador se hace un cambio de los coeficientes A y B que están a la entrada del silenciador, por C y D que expresan el nivel de presión sonora recibida por las dos posiciones del micrófono después del elemento de muestra, P_3 y P_4 .

$$P_d = P|_{x=d} = Ce^{-jkd} + De^{jkd}$$

En este caso, la longitud del silenciador ($x = d$) es incluida en el cálculo y las expresiones quedan también en términos de Euler. Para calcular la velocidad en la matriz de transferencia es necesario utilizar la impedancia de la onda, al final del ducto ($Z = \rho_0 c$) como se ve expresado a continuación.

$$V(x) = \frac{e^{-jkx}}{\rho_0 c} (P^+ e^{-jkx} - P^- e^{jkx})$$

En la entrada del silenciador, se utiliza el mismo punto de referencia ($x = 0$) como distancia y se obtiene la ecuación de velocidad en términos de la impedancia y los coeficientes correspondientes (A y B).

$$V_0 = V|_{x=0} = \frac{A - B}{\rho_0 c}$$

Cuando se utiliza la distancia del elemento de prueba ($x = d$) y se calcula la velocidad en su salida, se obtiene la siguiente ecuación.

$$V_d = V|_{x=d} = \frac{Ce^{-jkd} - De^{jkd}}{\rho_0 c}$$

De esta forma, todas las expresiones de la matriz quedan expresadas en términos del nivel de presión acústica medido por los micrófonos del banco de pruebas, para el cálculo de la pérdida de transmisión acústica.

Por otra parte, una matriz de transferencia relaciona la presión sonora (P) con las velocidades normales (V) en la entrada y salida del silenciador. Esta relación de presión y velocidad permite la solución de cuatro incógnitas, debido a estas se puede encontrar diferentes propiedades además de la pérdida de transmisión acústica.

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d}$$

Para el desarrollo de la matriz se realiza el cambio de la terminación en el banco acústico expuesto en el capítulo 3.1.2 de esta manera se genera las dos ecuaciones para encontrar las 4 incógnitas ⁴⁶.

$$T = \begin{bmatrix} \frac{P_{0a}V_{db} - P_{0b}V_{da}}{P_{da}V_{db} - P_{db}V_{da}} & \frac{P_{0b}P_{da} - P_{0a}P_{db}}{P_{da}V_{db} - P_{db}V_{da}} \\ \frac{V_{0a}V_{db} - V_{0b}V_{da}}{P_{da}V_{db} - P_{db}V_{da}} & \frac{P_{da}V_{0b} - P_{db}V_{0a}}{P_{da}V_{db} - P_{db}V_{da}} \end{bmatrix}$$

Al encontrar la solución de la matriz se hace un remplazo de las incógnitas en la formula general para hallar la perdida de trasmisión acústica.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} + T_{22} \right|^2 \right)$$

⁴⁶ Ibid.p.10

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE PRUEBA.

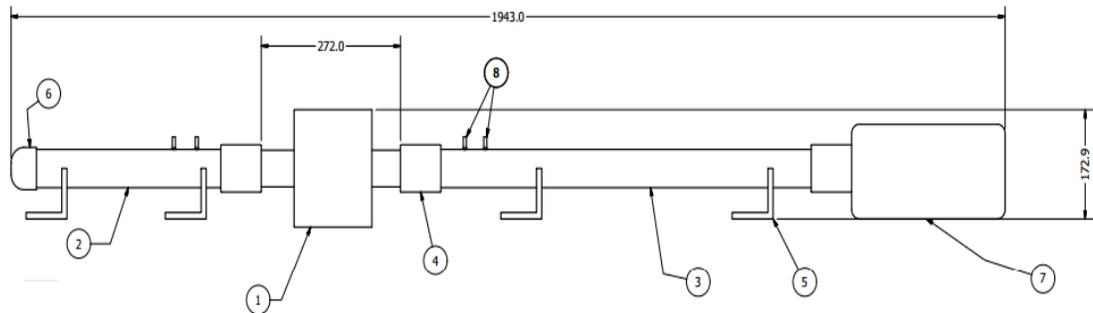
3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE PRUEBA.

Esta sección presenta los parámetros de diseño y detalles de construcción del elemento de prueba para realizar la validación experimental del algoritmo de la matriz de transferencia desarrollada en el capítulo 2.3.

El capítulo 3.1.1 desarrolla el diseño del banco acústico propuesto a construcción con un rango inicial de frecuencias de 80 a 4000Hz, y los parámetros que exige la norma para el cálculo de la pérdida de transmisión acústica.

3.1.1 Componentes. El dispositivo de prueba construido está compuesto de 8 elementos como se ve ilustrado en la figura 9: 1) elemento de prueba (silenciador); 2) tubo pvc 40cm; 3) tubo pvc 80cm; 4) acoples; 5) soportes; 6) terminación anecoica; 7) caja insonora con fuente de sonido; 8) micrófonos.

Figura 9. Plano general banco de pruebas.



Recapitulando la ASTM E2611-09⁴⁷, la fuente de sonido debe estar instalada en una caja sellada y aislada para evitar la transmisión indirecta de sonido a los micrófonos. La caja utilizada es construida con madera (10mm espesor) con recubrimiento externo para brindar un mejor aislamiento acústico, donde está instalado un parlante Pioneer de 2" con un rango de frecuencia de 80 a 22kHz, 8 ohmios y 15 watts.

⁴⁷ ASTM. standard. op. cit. p.05

Imagen 6. Caja insonora con fuente de sonido.



Con el fin de mantener la conexión entre la caja que contiene la fuente de sonido y el elemento 2 de la figura 9, se utiliza un acople PVC de 2" (Diámetro con igual medida al parlante) que actuará como guía para las ondas emitidas y mantendrá fija la conexión de los dos elementos. Cabe resaltar que este elemento está unido de forma permanente a la caja insonora, como puede ser observado en la imagen 5; esta unión es necesaria para realizar variaciones en el diámetro del tubo con un acople de reducción.

Para cubrir el espectro de frecuencias a trabajar en la delimitación inicial del proyecto, 80 a 4000 Hz, es necesario utilizar dos tubos con diámetros diferentes. Se utiliza un tubo con un diámetro interno de 58.6 mm, un espesor de pared de 3.2 mm, el cual es apropiado para evaluar frecuencias hasta 3320 Hz.

Si se requiere seguir ampliando el rango de frecuencias para la validación experimental, la frecuencia límite superior puede ser incrementada ya que es inversamente proporcional al diámetro del tubo, como se puede ver en la tabla No1.

Tabla 1. Frecuencia límite superior según diámetro del tubo.

| Diámetro Tubo (In) | Frecuencia límite superior (Hz) |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| 3 | 2268 |
| 2 | 3320 |
| 1 | 6033 |
| 1/2 | 9481 |

Como se mencionó anteriormente se debe incluir otro tubo debido a que el valor máximo del espectro que se tomó en la delimitación inicial es de 4000 Hz. El tubo debe tener un diámetro interno de 30.2 mm y un espesor de pared de 2.4 mm, el

cual tiene las características adecuadas para el rango de ondas a trabajar ya que abarca frecuencias hasta 6033 Hz.

Por otro lado, la adaptación del tubo de 1 pulgada se hace por medio de un acople el cual se encuentra en la tabla 2 para su respectiva selección.

Como se indicó, se debe hacer uso de un acople de reducción en PVC para cambiar el diámetro de tubo y poder abarcar todo el rango espectral. Como el mecanismo de dicho acople es insertar el elemento en la tubería a presión se eligió el acople de calibre 40, con reducción de 2 a 1 pulgada, el cual es el indicado para el banco de pruebas acústicas y se encuentra en el manual de tubos de presión de (Pavco)⁴⁸.

Tabla 2. Acople de reducción.



Bujes Roscados / Soldados

| Diámetro Nominal mm | Diámetro Nominal pulg | Referencia Soldados | Referencia Roscados |
|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 21 x 13 | 1/2 x 1/4 | | 2900918 |
| 21 x 17 | 1/2 x 3/8 | | 2900921 |
| 26 x 21 | 3/4 x 1/2 | 2900995 | 2900990 |
| 33 x 21 | 1 x 1/2 | 2900849 | 2900846 |
| 33 x 26 | 1 x 3/4 | 2900858 | 2900854 |
| 42 x 21 | 1.1/4 x 1/2 | 2900906 | 2900903 |
| 42 x 26 | 1.1/4 x 3/4 | 2900914 | 2900910 |
| 42 x 33 | 1.1/4 x 1 | 2900898 | 2900895 |
| 48 x 21 | 1.1/2 x 1/2 | 2900882 | 2900878 |
| 48 x 26 | 1.1/2 x 3/4 | 2900890 | 2900887 |
| 48 x 33 | 1.1/2 x 1 | 2900866 | 2900863 |
| 48 x 42 | 1.1/2 x 1.1/4 | 2900875 | 2900871 |
| 60 x 21 | 2 x 1/2 | 2900952 | 2900950 |
| 60 x 26 | 2 x 3/4 | 2900959 | 2900956 |
| 60 x 33 | 2 x 1 | 2900928 | 2900924 |
| 60 x 42 | 2 x 1.1/4 | 2900945 | 2900942 |
| 60 x 48 | 2 x 1.1/2 | 2900937 | 2900933 |
| 73 x 48 | 2.1/2 x 1.1/2 | 2900966 | 2900964 |

Fuente: Pavco manuelestecnicos
<https://pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25>

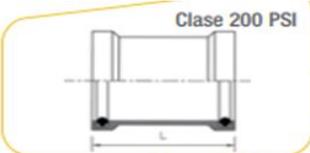
Cuando se utilizan elementos de reducción en PVC se puede generar interferencia por discontinuidades de área, ya que la salida del parlante tiene el mismo diámetro que el acople utilizado en la instalación del tubo, como se muestra en la imagen 5

⁴⁸PAVCO,Manual Técnico Tubosistemas Presión PVC,PAVCO - MEXICHEM COLOMBIA, Disponible en :<https://pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25>

del capítulo 2.2.1, por lo que se debe reducir el diámetro del tubo permitiendo que la señal enviada se refleje con la pared del elemento de reducción.

Para realizar las conexiones entre los acoples y los tubos de impedancia es necesario elegir una unión con el diámetro utilizado, por lo que en este caso se utilizan los diámetros de 1 y 2 pulgadas respectivamente; como son accesorios de presión, el sellado que ofrecen es adecuado para aislar el sonido exterior de las mediciones y evitar interferencias.

Tabla 3 Unión



Unión de reparación deslizante

| Diámetro Nominal | | Referencia |
|------------------|-------|------------|
| mm | pulg | |
| 21 | 1/2 | 2903399 |
| 26 | 3/4 | 2903401 |
| 33 | 1 | 2903397 |
| 48 | 1.1/2 | 2903398 |
| 60 | 2 | 2903400 |

Fuente: Pavco manualestecnicos
<https://pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25>

3.1.2 Terminación del banco. En el desarrollo del procedimiento de la normativa es necesario utilizar dos cargas de impedancia, para esto se realiza la misma medición dos veces con una terminación diferente en el banco acústico y se calcula la matriz de transferencia para obtener la pérdida de transmisión acústica.

La primera carga de impedancia se genera con una terminación anecoica, se puede observar en la imagen No 7, construida en forma cónica con fibra de vidrio. Se enrolla cinta aislante en la base de la terminación para generar un sello con la superficie interna del tubo y mantener el aislamiento acústico.

Imagen 7. Terminación cónica fibra de vidrio



La terminación anecoica es necesaria para evitar que las ondas se reflejen y se genere una interferencia con las ondas que van en el sentido contrario. Para efectuar la medición con la segunda carga se hace uso de un tapón PVC a presión mostrado en la imagen 8, que cierra el tubo en su extremo. Aunque la norma indica que también se puede generar esta carga con la terminación libre, las mediciones efectuadas con el tapón son más estables⁴⁹.

Imagen 8 Terminación cerrada tapón PVC



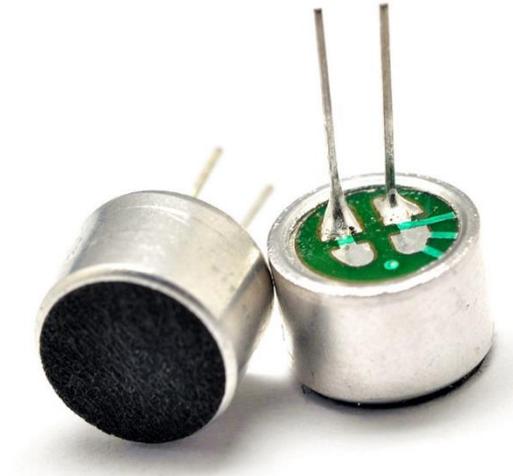
La posición en la que son colocados los elementos que cierran el extremo libre del tubo influye en el cálculo de la pérdida de transmisión acústica. Una vez hecha esta precisión, es necesario ubicar este elemento en una posición similar en todas las

⁴⁹ DESHPANDE, Satyajeet P. Development of a Low Cost Impedance Tube to Measure the Acoustic Absorption and Transmission Loss of Materials.

pruebas, verificando que no se deje el tapón inclinado y así asegurar que no exista una variación considerable en el resultado.

Queda por aclarar los elementos que componen el sistema de recolección de datos empleado en el banco acústico construido. Para realizar la gráfica de la pérdida de transmisión acústica, es necesario medir el nivel de presión sonora interno del tubo con micrófonos del mismo modelo y marca para evitar diferencias en la respuesta que tenga cada uno.

Imagen 9 Micrófono omnidireccional Genius®.



Fuente: <http://www.cui.com/catalog/components/microphones>

Se realiza la selección de un micrófono de bajo costo Genius con un índice medio de sensibilidad. Para el montaje de los micrófonos sobre los huecos dispuestos en el tubo se elige utilizar corchos de madera, adaptados para que el diafragma del micrófono genere un sello en uno de sus extremos, como se puede observar en la imagen 10.

Imagen 10 Montaje Micrófono.



Debido al constante cambio de lugar del corcho en el tubo en las pruebas es necesario instalarlo sin aplicar mayor fuerza porque el material presenta desgaste al generar el sello, y puede quebrarse con facilidad al efectuar una fuerza manual excesiva. Por otro lado, se adquieren dos tarjetas de sonido de alta definición para la conexión de los micrófonos al computador, que se pueden observar en la imagen 11.

Imagen 11 Tarjeta de sonido

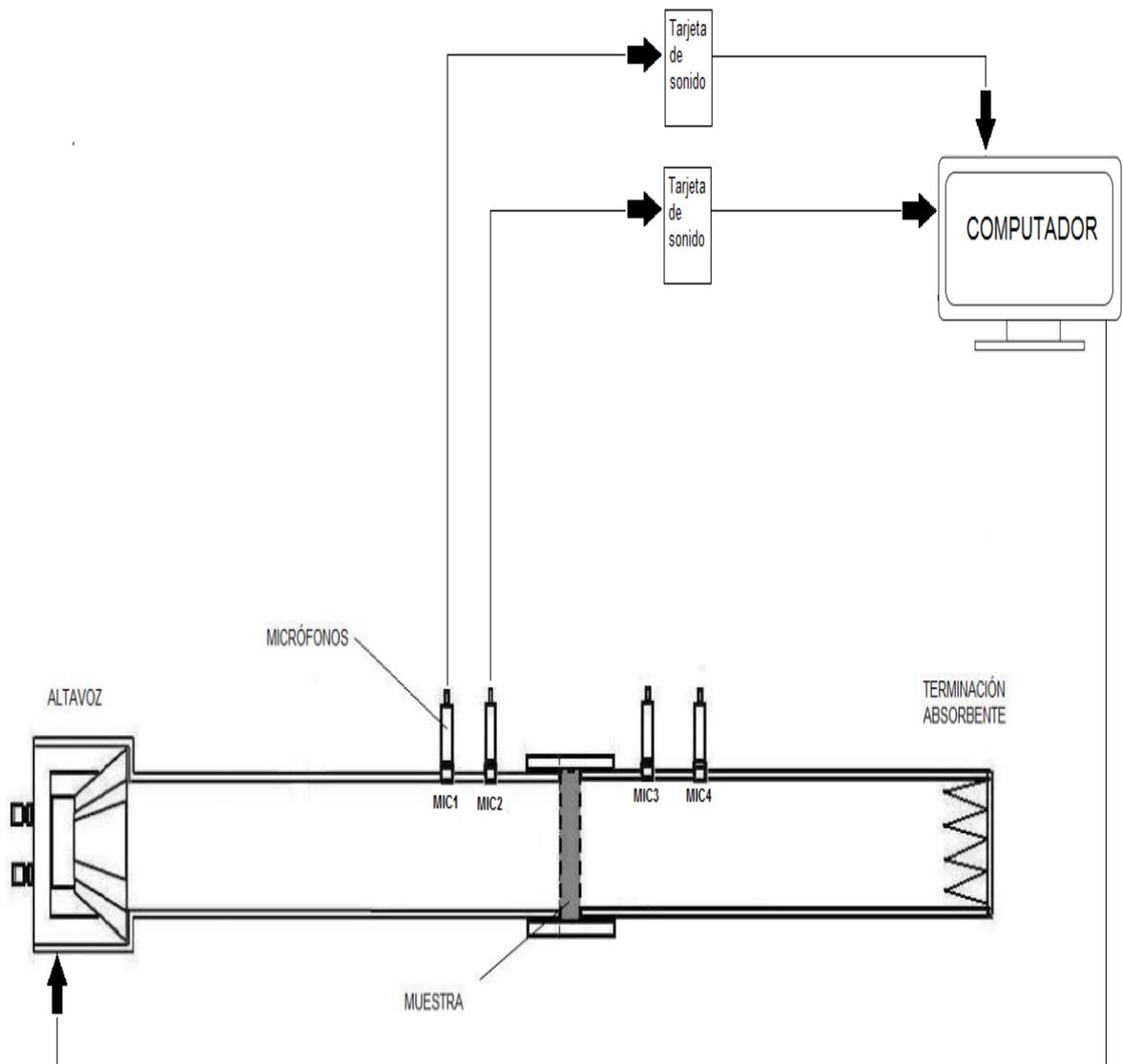


Fuente: YF Networks, Tarjeta de sonido externa. [En línea]. Tomado de <https://www.pccomponentes.com/tarjetas-sonido>. [Consultado,05,10,2017]

3.1.3 Diagrama de conexión. En el siguiente diagrama se muestran las conexiones necesarias para la medición de la pérdida de transmisión acústica en el dispositivo

de prueba con dos micrófonos donde el computador es utilizado para enviar la señal a la fuente sonora, y también recibe los datos enviados por los micrófonos.

Figura 10. Diagrama Dos Micrófonos



3.1.4 Presupuesto dispositivo de prueba. En el cuadro que se muestra a continuación se hace la cotización de todos los elementos que componen el diseño del dispositivo de prueba construido, que realiza la recolección de datos con la tarjeta de sonido.

Tabla 4. Presupuesto Dispositivo De Prueba

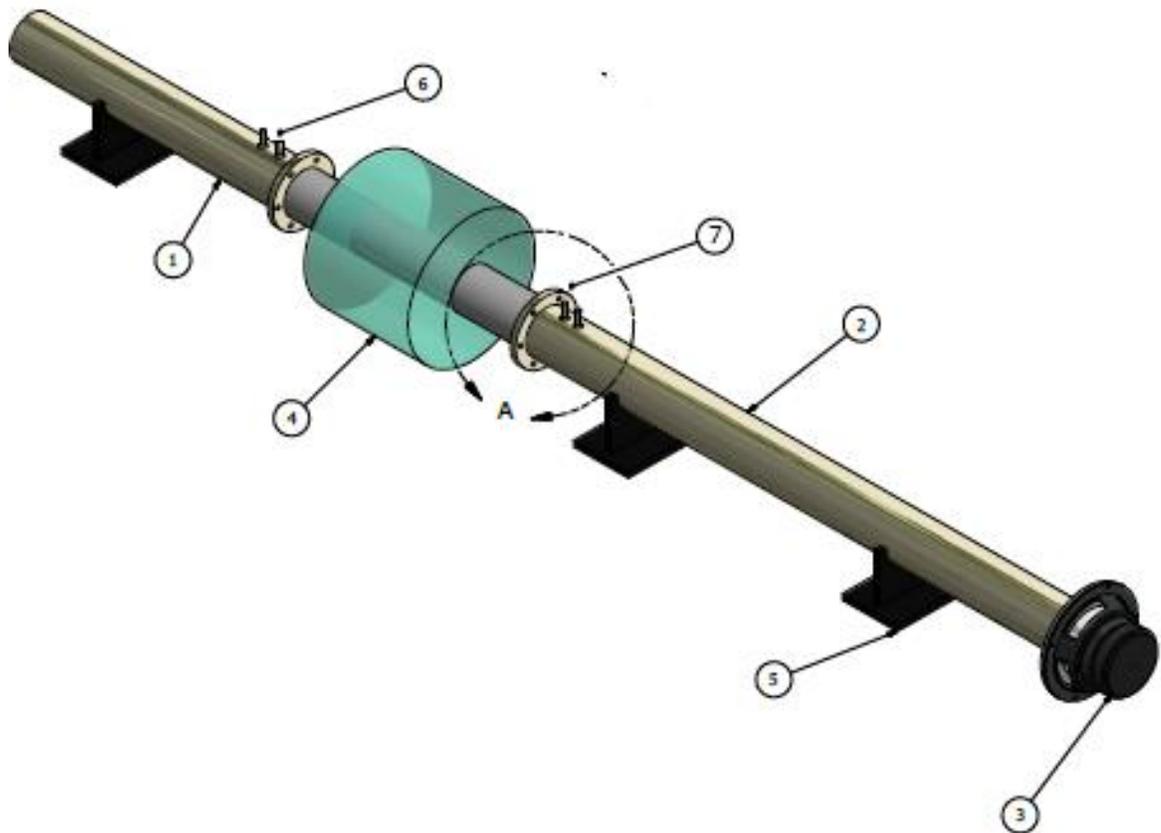
| Elementos Banco acústico | Descripción | Precio Uni. (\$) | Cantidad | Precio (\$) |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------|
| Fuente de sonido | Parlante Pioneer 6" 15 watts full range 8 Ohms. | 55.000 | 1 | 55.000 |
| Caja acústica (fuente de sonido) | Sistema de amplificación y aislación acústica. | 75.000 | 1 | 75.000 |
| Micrófonos | Micrófono omnidireccional Genius Mic-01a 3.5 mm | 45.000 | 2 | 90.000 |
| Tubos PVC | Tubo estándar PVC de presión (Tamaño de 1" y 2") | 38.500 | 2 | 75.000 |
| Unión PVC | Unión de PVC sin roscar (Tamaño de 1" y 2") | 5.500 | 3 | 16.500 |
| Acople reducción PVC | Acople de PVC sin roscar (Tamaño de 1" y 2") | 4.500 | 1 | 4.500 |
| Tapón PVC | Casquillo de tubería de PVC estándar (Tamaño de 1" y 2") | 10.000 | 1 | 10.000 |
| Tapón Espuma | Tapón en espuma de fibra de vidrio cónico. | 20.000 | 1 | 20.000 |
| Soportes | Bases de acrílico. | 25.000 | 3 | 75.000 |
| Tarjeta de sonido | Tarjeta de audio externa de dos canales. (Alta definición) | 30.000 | 2 | 60.000 |
| Computador | Toshiba Intel I5 X4 2.7ghz 8ram 500gb | 1.598.000 | 1 | 1.598.000 |
| Software | MATLAB 2016 | 1.030.000 | 1 | 1.030.000 |
| Total | | | | 3.109.000 |

3.2 DISEÑO DEL BANCO ACÚSTICO CON CUATRO MICRÓFONOS.

Esta sección presenta los parámetros de diseño y detalles del banco acústico de mayor precisión. La sección 3.2.1 expone los elementos que hacen parte del dispositivo con cuatro micrófonos, basados en los parámetros de diseño que exige la normativa ASTM E2611-09.

3.2.1 Elementos. El banco de pruebas acústico está compuesto de 7 elementos como se observa en la figura 11: 1) tubo 40cm; 2) tubo de impedancia 80cm; 3) parlante; 4) elemento de prueba (silenciador); 5) soportes; 6) micrófonos; 7) bridas.

Figura 11. Banco Cuatro Micrófonos



En el inicio de este banco se encuentra instalado un parlante MTX audio 6.5" 100 watts, este parlante está diseñado para la elaboración de pruebas acústicas ya que puede generar ondas de sonido de alta calidad para analizarlas⁵⁰. Este diseño está basado en los parámetros de la norma ASTM E2611-09⁵¹ expuesta anteriormente; debido a esto el material que se escogió para el tubo de impedancia

⁵⁰ BOLTON, j stuart; LEE, Seungkyu y MARTINSON, paul.op.cit.p.13.

⁵¹ ASTM.standard.op.cit.p.05

es un acero inoxidable con acabado tipo espejo, este material permite un desplazamiento adecuado de las ondas planas para que la pérdida de sonido tenga una tendencia de ser nula al momento de la adquisición de datos.

Los tubos elegidos para este diseño tienen un diámetro de 1 pulgada y 2 pulgadas los cuales corresponden a las frecuencias límites de 6033Hz y 3320Hz respectivamente. Estos dos diámetros son escogidos para abarcar adecuadamente el rango espectral inicial de 80Hz a 4000Hz.

Por otra parte, Los micrófonos omnidireccionales toman los datos a 360 grados, lo cual hace que el sonido sea captado con una alta precisión⁵².

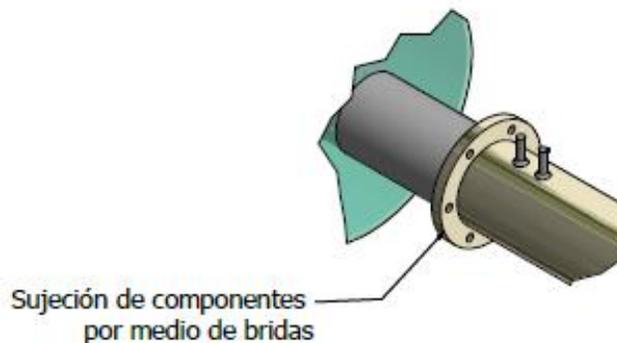
Imagen 12. Micrófono Alta Sensibilidad



Fuente:G.R.A.S.SOUND AND VIBRATION.microfono de medición dinamica.Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/gras-sound-vibration/product-70183-573915.html>

La brida es una parte estándar del sistema que es utilizada para la unión de dos componentes ya que su manipulación es sencilla y genera un mejor aislamiento en el banco acústico⁵³.

Imagen 13. Brida.

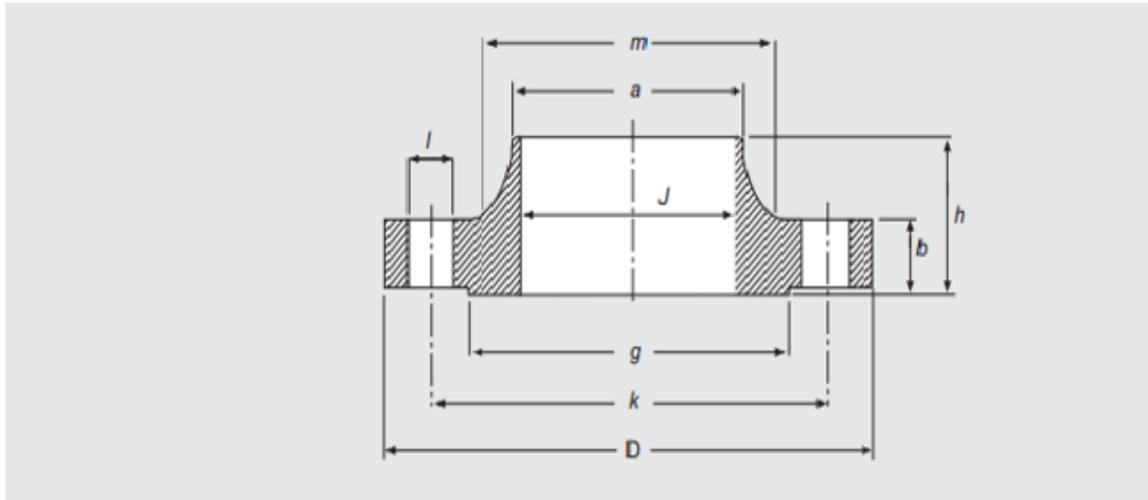


⁵²G.R.A.S. SOUND AND VIBRATION.microfono de medición dinamica.Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/gras-sound-vibration/product-70183-573915.html>

⁵³MOTORGIGA. BRIDA.Disponible en: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/brida-definicion-significado/gmx-niv15-con193265.htm>

En la siguiente tabla se muestran las especificaciones de los dos tamaños de las bridas que van a ser utilizadas en el diseño.

Tabla 5. Selección De Brida



| Pulgadas | D | b | g | m | a | J* | h | k | Taladros | l | kg |
|----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|------|--------|
| 1/2" | 88,9 | 11,1 | 34,9 | 30,2 | 21,3 | 15,7 | 46,6 | 60,3 | 4 | 15,9 | 0,500 |
| 3/4" | 98,4 | 12,7 | 42,9 | 38,1 | 26,7 | 20,8 | 52,4 | 69,8 | 4 | 15,9 | 0,700 |
| 1" | 107,9 | 14,3 | 50,8 | 49,2 | 33,5 | 26,7 | 55,6 | 79,4 | 4 | 15,9 | 1,100 |
| 1 1/4" | 117,5 | 15,9 | 63,5 | 58,8 | 42,2 | 35,1 | 57,1 | 88,9 | 4 | 15,9 | 1,500 |
| 1 1/2" | 127,0 | 17,5 | 73,0 | 65,1 | 48,3 | 40,9 | 61,9 | 98,4 | 4 | 15,9 | 1,800 |
| 2" | 152,4 | 19,0 | 92,1 | 77,8 | 60,3 | 52,6 | 63,5 | 120,6 | 4 | 19,0 | 2,700 |
| 2 1/2" | 177,8 | 22,2 | 104,8 | 90,5 | 73,1 | 62,7 | 69,8 | 139,7 | 4 | 19,0 | 4,400 |
| 3" | 190,5 | 23,8 | 127,0 | 107,9 | 88,9 | 78,0 | 69,8 | 152,4 | 4 | 19,0 | 5,200 |
| 3 1/2" | 215,9 | 23,8 | 139,7 | 122,2 | 101,6 | 90,2 | 71,4 | 177,8 | 8 | 19,0 | 6,400 |
| 4" | 228,6 | 23,8 | 157,2 | 134,9 | 114,3 | 102,4 | 76,2 | 190,5 | 8 | 19,0 | 7,500 |
| 5" | 254,0 | 23,8 | 185,7 | 163,5 | 141,2 | 128,3 | 88,9 | 215,9 | 8 | 22,2 | 9,200 |
| 6" | 279,4 | 25,4 | 215,9 | 192,1 | 168,4 | 154,2 | 88,9 | 241,3 | 8 | 22,2 | 11,000 |
| 8" | 342,9 | 28,6 | 269,9 | 246,1 | 219,1 | 202,7 | 101,6 | 298,4 | 8 | 22,2 | 18,300 |

Fuente: CIFUNSA.Fluida catalogo de productos. disponible en: <http://www.fluida.com.mx/pdfs/7%20Bridas%20de%20acero>

El dispositivo de laboratorio que produce las ondas planas necesarias para la medición de la pérdida de transmisión acústica es el generador de onda. Este elemento cumple con las características para la medición, ya que trabaja en un rango de frecuencias entre 0.2 Hz a 20.000 Hz y al tener un grado de frecuencia tan alto hace que la onda emitida por el dispositivo sea más nítida.

Imagen 14 Generador de onda



Fuente:Agilent technologies disponible en:
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1312/0900766b8131231>

Para el procesamiento de las señales enviadas desde los micrófonos al programa se hace uso de un analizador FFT que aplica una expresión matemática de Fourier, obteniendo el espectro correspondiente a la señal que se había medido y envía estos datos para procesarlos según como lo muestran Bolton, Lee y Martinson en su documento⁵⁴.

Por lo tanto, todo el proceso del analizador es digitalizar la toma de datos del sonido, de esta manera tener el análisis que se requiere de estas ondas y efectuar el cálculo numérico que se requiera. Este analizador hace que la toma de datos sea más adecuada debido a que puede analizar simultáneamente los cuatro micrófonos a la vez para que la medición tenga una mayor precisión y encontrar así la pérdida de trasmisión acústica⁵⁵.

Imagen 15. Analizador de FFT 4 canales



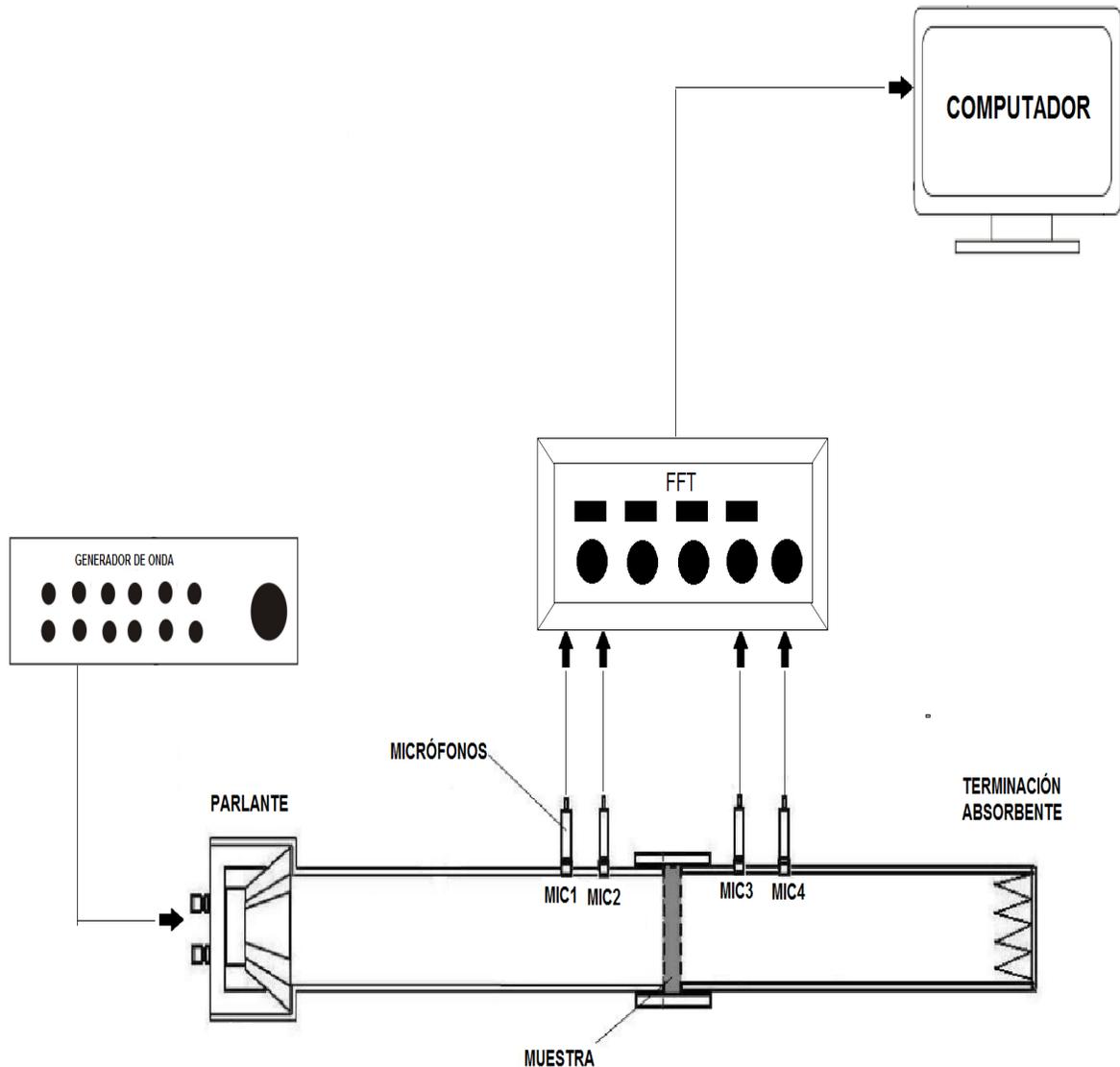
Fuente:eletrotool.importadores directos de herramienta de diagnóstico
<http://www.eletrotool.com/producto/osciloscopios/42/dso3064-usb-osciloscopio-automotriz-de-4-canales.html>

⁵⁴ LEE Y BOLTON,op.cit,p.37

⁵⁵ CANDIDO DA SILVA,gabriela;ARAUJO NUNES,maria alzira;VILELA LOPES,renato y BOSON ALMEDIA,antonio. Design and construction of a low cost impedance tube For sound absorption coefficients measurements.[ScienceDirect].Gama.11.2013.[Consultado,19,04,2017].Disponble en:
<http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2013/PDF/47>.

3.2.2 Diagrama de conexión. En la figura 12 se muestran las conexiones necesarias para la medición de la pérdida de transmisión acústica en el banco acústico con cuatro micrófonos donde el computador es utilizado para recibir la señal proveniente del analizador FFT que recibe los datos enviados por los micrófonos, y la fuente de sonido utilizada es el generador de ondas conectado al parlante.

Figura 12. Diagrama Cuatro Micrófonos



3.2.3 Presupuesto banco cuatro micrófonos. En la tabla 6 se hace la cotización de todos los componentes para el diseño del banco de cuatro micrófonos. hay unos elementos que no se exponen en este capítulo ya que han sido explicados en el capítulo 3.2 diseño del banco de pruebas de dos micrófonos.

Tabla 6 Presupuesto Banco Cuatro Micrófonos
BANCO DE CUATRO MICROFONOS

| Elementos Banco acústico | Descripción | Precio Uni. | Cantidad | Precio |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------|----------|------------|
| Fuente de sonido | Parlante MTX audio 6.5" 100 watts. | 526.500 | 1 | 526.500 |
| Micrófonos | Micrófono omnidireccional G.R.A.S. type 40PH | 1'130.000 | 4 | 4.520.000 |
| Tubos | Tubo acero inoxidable acabado espejo (Tamaño de 1" y 2") | 165.000 | 2 | 330.000 |
| Brida | Brida (Tamaño de 1" y 2") | 85.000 | 6 | 510.000 |
| Generador de ondas | Generador de ondas Agilent 33220A 20 MHz | 3'207.000 | 1 | 3.207.000 |
| Tapón | Casquillo metálico (Tamaño de 1" y 2") | 25.000 | 1 | 25.000 |
| Tapón fibra de vidrio | Tapón en espuma de fibra de vidrio cónico. | 50.000 | 2 | 100.000 |
| Soporte | Bases en aluminio | 25.000 | 3 | 75.000 |
| Analizador FFT | Módulo de análisis FFT OR34 de 4 canales. | 1'650.000 | 1 | 1.650.000 |
| Mesa | Acero inoxidable 140x50x120 | 400.000 | 1 | 400.000 |
| Computador | Toshiba Intel I5 X4 2.7ghz 8ram 500gb | 1.598.000 | 1 | 1.598.000 |
| Sowfare | MATLAB 2016 | 1.030.000 | 1 | 1.030.000 |
| Total | | | | 13.971.500 |

3.3 Elemento de prueba.

El elemento de muestra que se utiliza para la validación experimental del banco de pruebas acústicas es un silenciador reactivo concéntrico circular, con líneas de micro perforaciones que ocupan un 5% del área total interna del silenciador, que se muestra en la imagen 16.

Imagen 16. Silenciador Diseñado



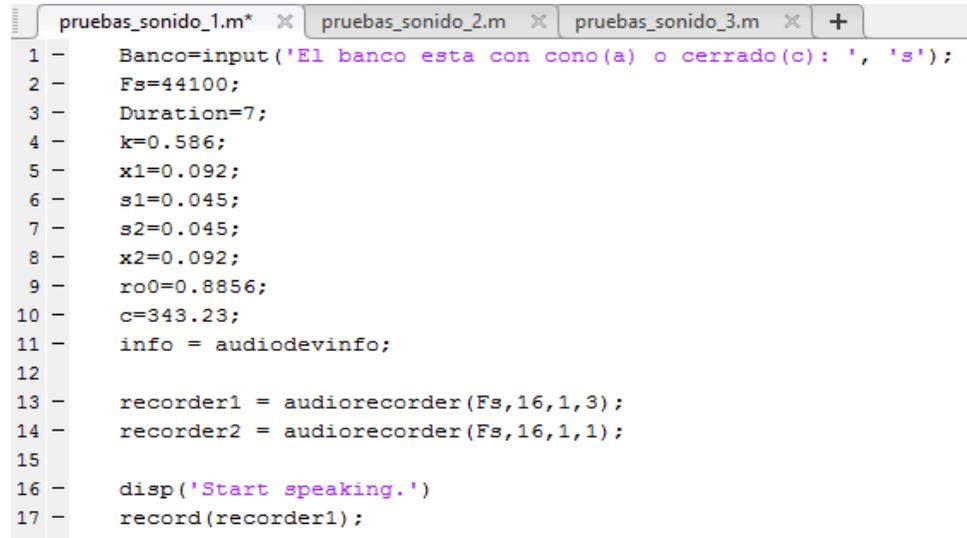
Este diseño está basado en el documento de Torres Picazo⁵⁶, donde se muestra la correlación de los datos adquiridos en la teoría con el método de elementos finitos y la experimentación del prototipo. El banco acústico con el que se realizan las mediciones del silenciador está construido con la normativa E2611-09, la misma normativa utilizada para el diseño y construcción del dispositivo de prueba en el presente trabajo.

⁵⁶ TORRES, picazo.op.cit. p.74.

3.4 PROGRAMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El proceso de Matlab está elaborado por medio del método de matriz de transferencia el cual fue explicado en el capítulo anterior, en este capítulo se explica de forma detallada como se desarrolla el código por medio del programa para poder hallar la pérdida de transmisión acústica.⁵⁷

Imagen 17. Análisis Matlab (A)



```
pruebas_sonido_1.m* x pruebas_sonido_2.m x pruebas_sonido_3.m x +
1 - Banco=input('El banco esta con cono(a) o cerrado(c): ', 's');
2 - Fs=44100;
3 - Duration=7;
4 - k=0.586;
5 - x1=0.092;
6 - s1=0.045;
7 - s2=0.045;
8 - x2=0.092;
9 - ro=0.8856;
10 - c=343.23;
11 - info = audiodevinfo;
12
13 - recorder1 = audiorecorder(Fs,16,1,3);
14 - recorder2 = audiorecorder(Fs,16,1,1);
15
16 - disp('Start speaking.')
17 - record(recorder1);
```

En la imagen 17 se visualiza el comienzo del programa para el desarrollo del código, el Matlab inicia con una pregunta la cual es “¿el banco está cerrado o abierto?” esta es su primera pauta ya que en la normativa se hace de esta manera para poder hallar las 4 incógnitas y desarrollar la pérdida de transmisión acústica.

F_s: Esta expresión es para dar el parámetro de mayor frecuencia que puede admitir el micrófono.

Duration: Valor que se da en segundos para la duración de la toma de la muestra.

K: Valor dado por la norma estipulada de acuerdo a si el banco es circular o cuadrado.

X₁: Distancia que hay entre la entrada de silenciador y el primer micrófono.

S₁ y *S₂*: Señala la distancia que deben tener los micrófonos entre sí.

X₂: Distancia que hay entre la entrada del silenciador al tercer micrófono.

R_o: Longitud total del banco.

C: Constante de la velocidad del sonido.

⁵⁷ da Silva, Gabriela Cristina Cândido, et al. Proceedings of the 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto. 2013. p. 105-115

Imagen 18. Análisis Matlab (B)

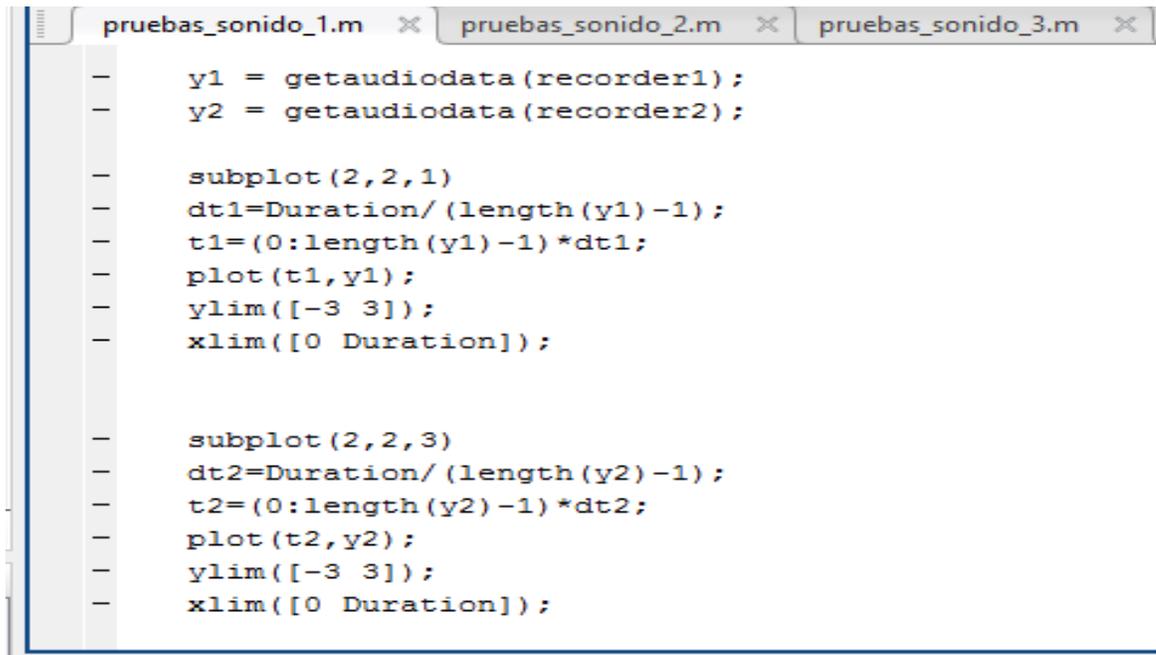
```
12 - info = audiodevinfo;
13
14 - recorder1 = audiorecorder(Fs,16,1,3);
15 - recorder2 = audiorecorder(Fs,16,1,1);
16
17 - disp('Start speaking. ')
18 - record(recorder1);
19 - record(recorder2);
20 - pause(Duration);
21 - stop(recorder1);
22 - stop(recorder2);
23 - disp('End of Recording. ');
24
```

Info = audiodevinfo: Por medio de este código se analiza la información que tienen las tarjetas de sonido de entrada y salida para adquirir los nombres y valores de las tarjetas y a su vez darle a conocer al programa que la toma de datos se va hacer simultáneamente de cada tarjeta de sonido.

Recorder1 y Recorder2: Su función es adquirir la información que se obtiene de las tarjetas de sonido. Este código se compone de las siguientes variables: *Fs*. da el parámetro de mayor frecuencia que puede admitir el micrófono, 16 es el número de bits que se van analizar, 1 se refiere a la tarjeta de sonido y último número hace referencia al canal que está conectando la tarjeta de sonido al computador.

disp('Start speaking.') : Recoge la muestra de sonido con cada uno de los micrófonos. Para recolectar estos datos se necesitan los siguientes comandos: *record*, *pause* y *stop*; los cuales son utilizados para grabar el sonido, analizarlo y guardarlo respectivamente, dichos datos se pueden graficar o utilizar más adelante en el proceso.

Imagen 19. Análisis Matlab (C)



```
pruebas_sonido_1.m x pruebas_sonido_2.m x pruebas_sonido_3.m x
-   y1 = getaudiodata(recorder1);
-   y2 = getaudiodata(recorder2);

-   subplot(2,2,1)
-   dt1=Duration/(length(y1)-1);
-   t1=(0:length(y1)-1)*dt1;
-   plot(t1,y1);
-   ylim([-3 3]);
-   xlim([0 Duration]);

-   subplot(2,2,3)
-   dt2=Duration/(length(y2)-1);
-   t2=(0:length(y2)-1)*dt2;
-   plot(t2,y2);
-   ylim([-3 3]);
-   xlim([0 Duration]);
```

y_1, y_2 : Son valores los cuales se guardan específicamente para la gráfica hecha por los autores de la tesis, para poder ver el comportamiento de los valores adquiridos y de esta manera cerciorarse que los datos tomados son correctos.

Subplot: Código el cual crea el cuadro de análisis para la gráfica, este necesita diferentes pautas para poder crear el mejor eje de análisis.

dt1: Es el primer parámetro a partir del inicio de la gráfica, este depende de la duración del tiempo y la longitud de la frecuencia que analiza.

plot: Grafica el comportamiento de los datos adquiridos.

ylim: Parámetro de análisis del eje y.

xlim: Parámetro de análisis del eje x, pero este depende de la duración del tiempo que el usuario de al analizar la pérdida de trasmisión acústica.

Imagen 20. Análisis Matlab (D)

```
pruebas_sonido_1.m* x pruebas_sonido_2.m x pruebas_sonido_3.m x +
41
42
43 - Y1=fft(y1);
44 - L1=length(Y1);
45 - power=abs(Y1).^2;
46 - dw=1/(dt1*L1);
47 - w=(0:L1-1)*dw;
48
49 - subplot(2,2,2);
50 - plot(w,power)
51 - P1=max(power);
52
53 - title('Intensidad Vs Frecuencia');
54 - xlabel('f (Hz)');
55 - ylabel('|P1(f)|');
58 - Y2=fft(y2);
59 - L2=length(Y2);
60 - power=abs(Y2).^2;
61 - dw=1/(L2*dt2);
62 - w=(0:L2-1)*dw;
63
64 - subplot(2,2,4);
65 - plot(w,power)
66 - P2=max(power);
```

Gráfico de frecuencia

$Y1, Y2 = \text{fft}(y1)$ Transformación de Fourier de acuerdo a esta función el programa hace que las señales digitales se vuelvan analíticas para poder hacer el estudio de estas.

$L1, L2$: Longitud mayor de la onda.

$\text{Power} = \text{abs}(Y1)^2, \text{Power} = \text{abs}(Y2)^2$: Calcula la intensidad de la onda

$dw = 1/(dt1 * L1), dw = 1/(L2 * dt2)$: Halla el paso del vector de frecuencia

$w = (0:L1 - 1) * dw, w = (0:L2 - 1) * dw$: Vector de frecuencias angulares

$\text{subplot}(2,2,2), \text{subplot}(2,2,4)$: Es el valor dado para cada gráfica que se haya durante el procedimiento de análisis.

$\text{plot}(w, \text{power})$: Es el intervalo que hay entre cada frecuencia para el análisis de la frecuencia.

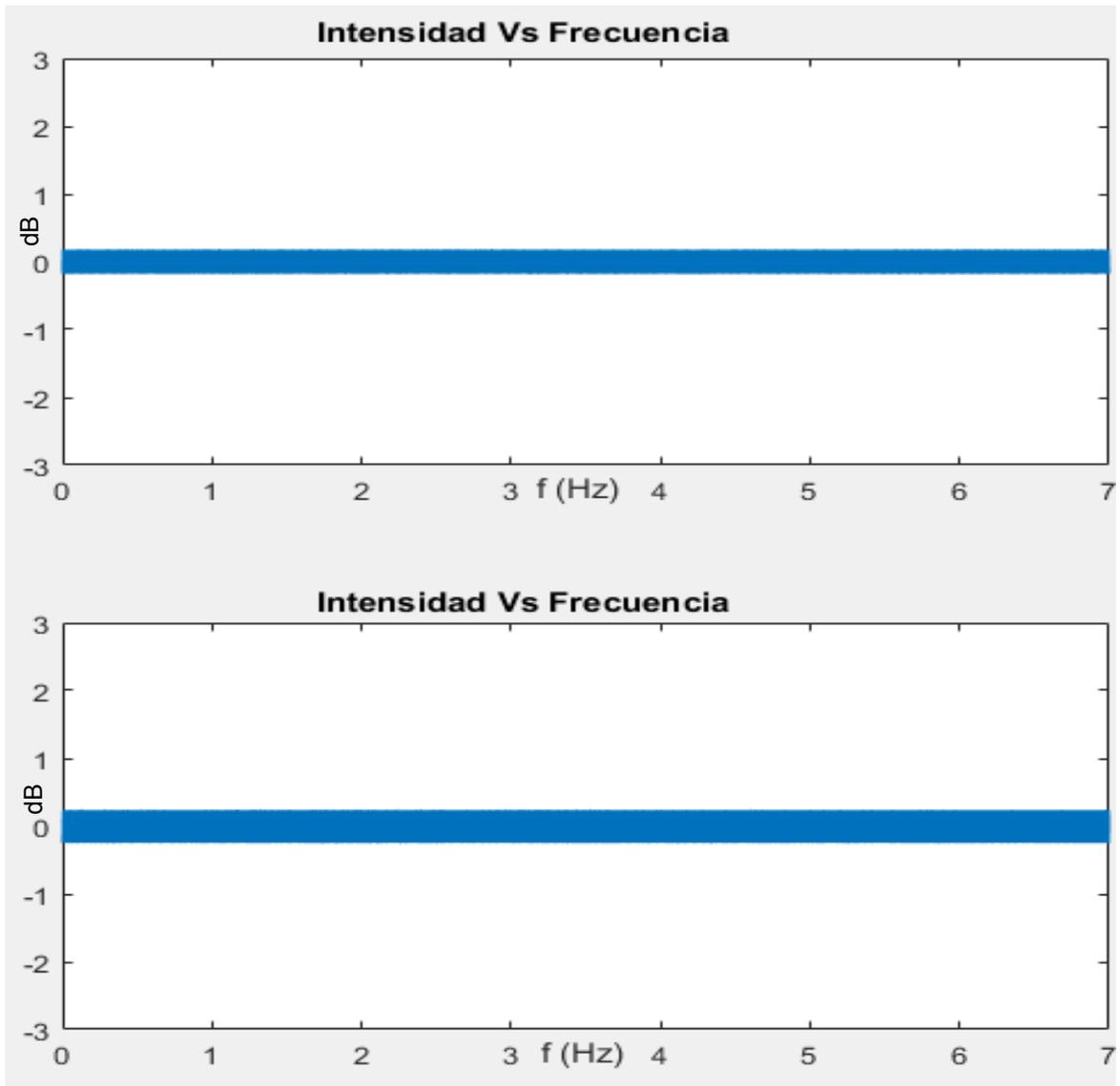
$P1, P2$: Es el máximo valor de la intensidad de la onda.

Title: Nombre del cuadro de análisis

Xlabel, Ylabel: Son los títulos que se le dan a cada eje.

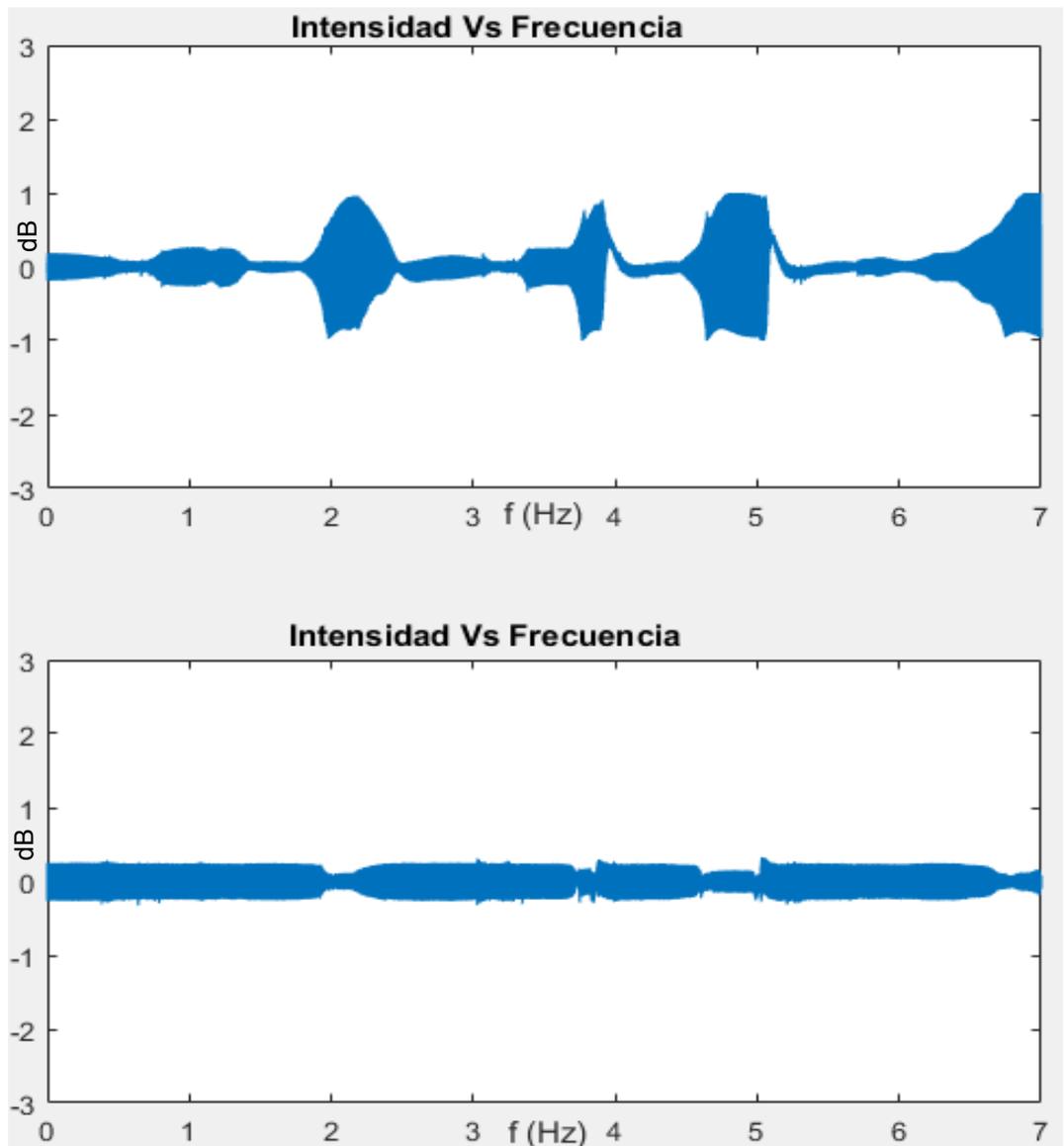
Según la descripción anterior se muestra en la imagen 21. Mediante esta información se puede visualizar el comportamiento de la toma de datos del sonido, el cual muestra el comportamiento de la onda que es continuo, esto quiere decir que la toma de datos está efectuada satisfactoriamente.

Imagen 21. Análisis Matlab (E)



En la imagen 22 se muestran saltos en el comportamiento de la gráfica, esto quiere decir que la adquisición de datos no está tomada adecuadamente y se debe volver a efectuar el análisis.

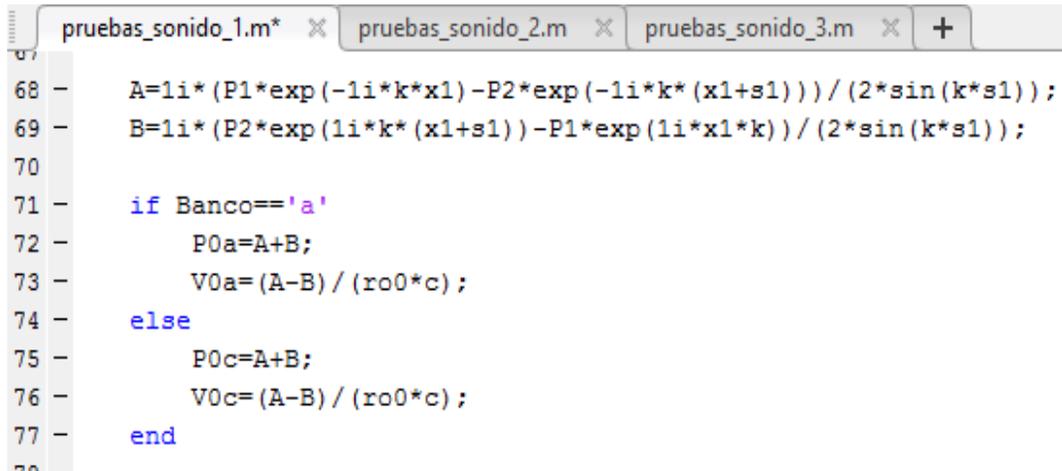
Imagen 22. Análisis Matlab (F)



Para el desarrollo total de la matriz de pérdida de transmisión acústica fue necesario crear tres pruebas las cuales se explican a continuación.

Después de realizar cada paso expuesto anteriormente y adquirir los datos para el desarrollo del algoritmo, las variables que se ven en la imagen son las variables que ya han sido explicadas en el capítulo anterior del método de matriz de transferencia, lo que se hace en este paso se r la fórmula que ya se tiene al programa para hallar las dos primeras incógnitas de la matriz, estos dos primeros datos son adquiridos antes del silenciador.

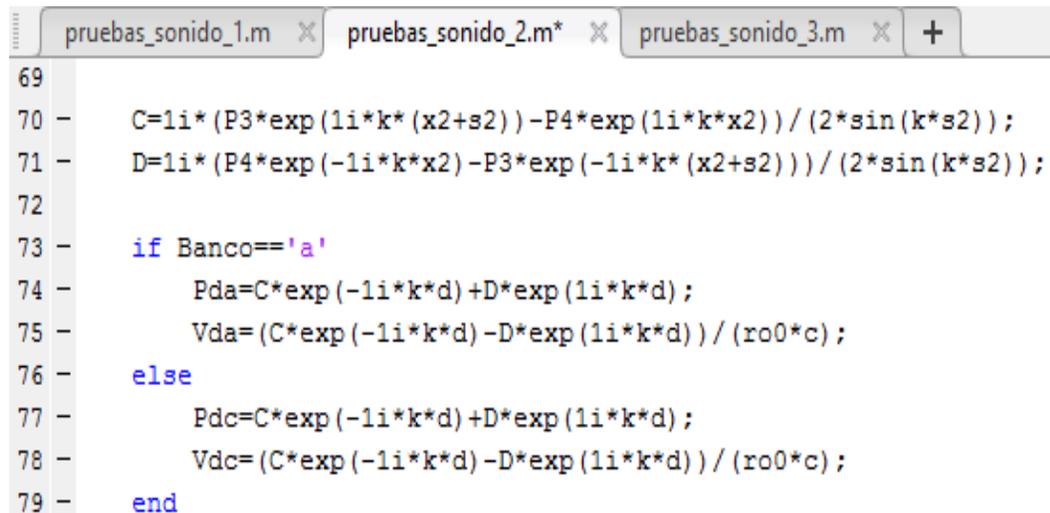
Imagen 23 Análisis Matlab (G)



```
pruebas_sonido_1.m* x pruebas_sonido_2.m x pruebas_sonido_3.m x +
68 - A=1i*(P1*exp(-1i*k*x1)-P2*exp(-1i*k*(x1+s1)))/(2*sin(k*s1));
69 - B=1i*(P2*exp(1i*k*(x1+s1))-P1*exp(1i*x1*k))/(2*sin(k*s1));
70
71 - if Banco=='a'
72 -     P0a=A+B;
73 -     V0a=(A-B)/(ro0*c);
74 - else
75 -     P0c=A+B;
76 -     V0c=(A-B)/(ro0*c);
77 - end
```

En la imagen 24 está la segunda ventana que tiene el programa, está elaborada de la misma manera que la primera ventana solo que esta prueba se realiza después del silenciador, después de adquirir la toma de datos el programa desarrolla la ecuación para hallar las dos incógnitas que hacían falta.

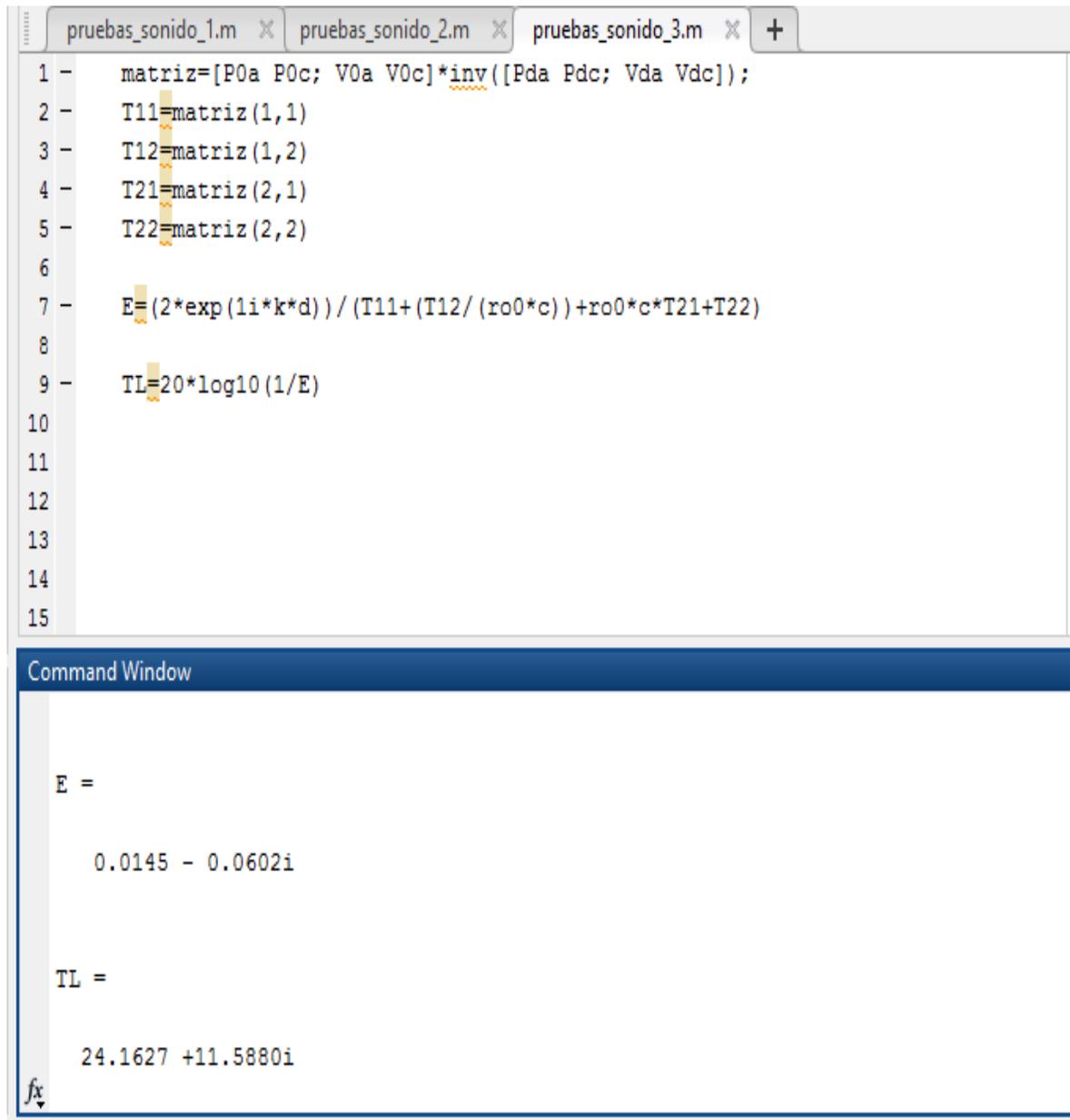
Imagen 24 Análisis Matlab (H)



```
pruebas_sonido_1.m x pruebas_sonido_2.m* x pruebas_sonido_3.m x +
69
70 - C=1i*(P3*exp(1i*k*(x2+s2))-P4*exp(1i*k*x2))/(2*sin(k*s2));
71 - D=1i*(P4*exp(-1i*k*x2)-P3*exp(-1i*k*(x2+s2)))/(2*sin(k*s2));
72
73 - if Banco=='a'
74 -     Pda=C*exp(-1i*k*d)+D*exp(1i*k*d);
75 -     Vda=(C*exp(-1i*k*d)-D*exp(1i*k*d))/(ro0*c);
76 - else
77 -     Pdc=C*exp(-1i*k*d)+D*exp(1i*k*d);
78 -     Vdc=(C*exp(-1i*k*d)-D*exp(1i*k*d))/(ro0*c);
79 - end
```

Después de adquirir las cuatro variables se realiza una tercera ventana, con respecto al desarrollo de la matriz, el programa toma los cuatros valores adquiridos en las dos ventanas, desarrolla la matriz, este la procesa y se adquiere la pérdida de trasmisión acústica.

Imagen 25 Análisis Matlab (I)



```
pruebas_sonido_1.m x pruebas_sonido_2.m x pruebas_sonido_3.m x +
1 - matriz=[P0a P0c; V0a V0c]*inv([Pda Pdc; Vda Vdc]);
2 - T11=matriz(1,1)
3 - T12=matriz(1,2)
4 - T21=matriz(2,1)
5 - T22=matriz(2,2)
6
7 - E=(2*exp(1i*k*d))/(T11+(T12/(ro0*c))+ro0*c*T21+T22)
8
9 - TL=20*log10(1/E)
10
11
12
13
14
15
```

Command Window

```
E =
    0.0145 - 0.0602i

TL =
    24.1627 +11.5880i
```

3.4.1 Validación código. Se realiza una validación del algoritmo creado en Matlab para verificar que el procesamiento de los datos utilizado este planteado de forma correcta. Si lo que entra es igual a lo que sale, la pérdida de transmisión acústica da como resultado cero, debido a que no se está generando ninguna disminución de ruido por parte del elemento de prueba.

Se obtienen los datos de los micrófonos a la entrada del elemento de prueba, representados en la matriz a la izquierda de la siguiente ecuación y se utilizan los mismos datos en la salida del silenciador.

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d}$$

Debido a que este parámetro permite ver la capacidad de atenuación del silenciador, entre mayor es, mayor es la atenuación que ejerce en la frecuencia utilizada. Se comprueba la validación con el resultado que es cero, esto significa que no existe una reducción sonora porque las presiones y velocidades utilizadas en la entrada de la matriz son iguales en la salida, como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7. Validación de Código

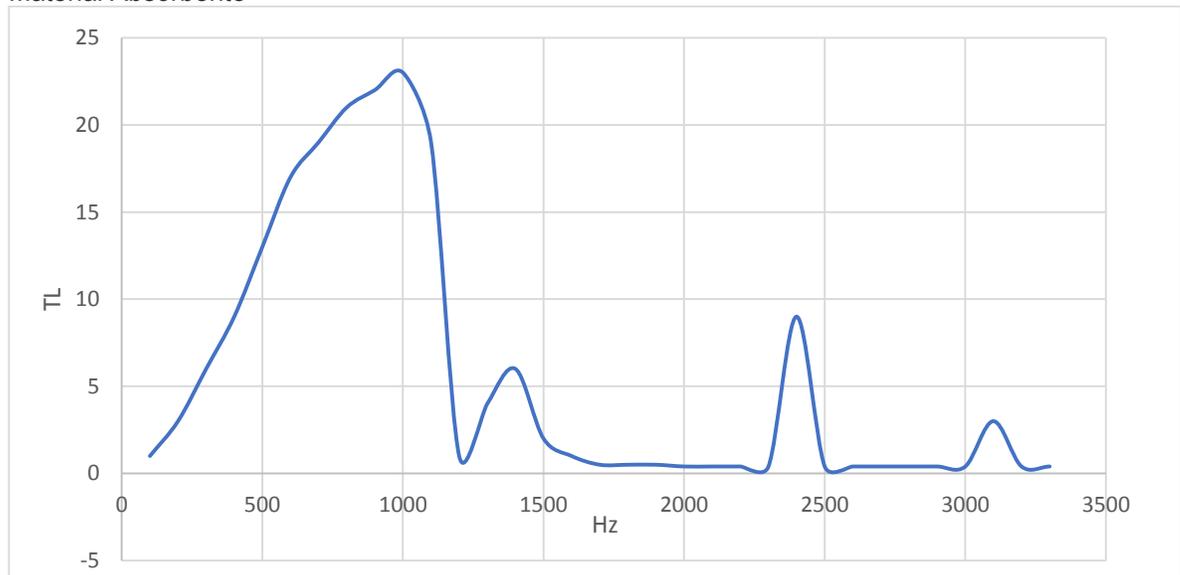
| Datos Tomados De Matlab | | | |
|-------------------------|--------------------|-----|---------------|
| V0a | 0.0000e+00+2.4198e | P0a | 3.3285e+09+ |
| V0c | 0.0000e+00+2.8627e | P0c | 3.4949e+09+ |
| Vda | 0.0000e+00+2.4198e | P1 | 3.4948e+09+ |
| Vdc | 0.0000e+00+2.8627e | P2 | 1.1992e+09+ |
| w | 1*310272 | P3 | 3.9806e+09+ |
| x1 | 0.0920 | P4 | 7.8957e+09+ |
| x2 | 0.0920 | Pda | 3.3285e+09+ |
| y1 | 310272*1 | Pdc | 3.4949e+09+ |
| Y1 | 310272*1 | TL | 0,000-0,7635i |
| y2 | 310272*1 | | |

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la elaboración del banco de pruebas acústico se generaron diferentes tomas de muestras basadas en los diámetros de los tubos que se muestra en la Tabla 1, se desarrollaron las pruebas de sonido al silenciador obteniendo como resultados los datos y las gráficas expuestas en el desarrollo de este capítulo.

Para el análisis de los resultados los autores se basan en la gráfica 1 de pérdida de transmisión acústica vs frecuencia que se encuentra expuesta en el documento de Torres Picazo⁵⁸; comparando dicha grafica con las gráficas obtenidas a través de la experimentación del banco de pruebas construido.

Grafica 1. Pérdida de transmisión acústica vs frecuencia. Modelo Acústico De Silenciadores Con Material Absorbente



TORRES PICAZO, María Isabel. Modelado acústico de silenciadores con material absorbente. [Repositorio Digital]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Valencia. 2006. p. 130. [Consultado, 04, 18, 2017]

través del estudio de este capítulo se presentarán los datos y gráficas de la pérdida de transmisión acústica. Después de haber adquirido los datos se hizo un estudio detallado del comportamiento de la reducción de sonido en la frecuencia de trabajo.

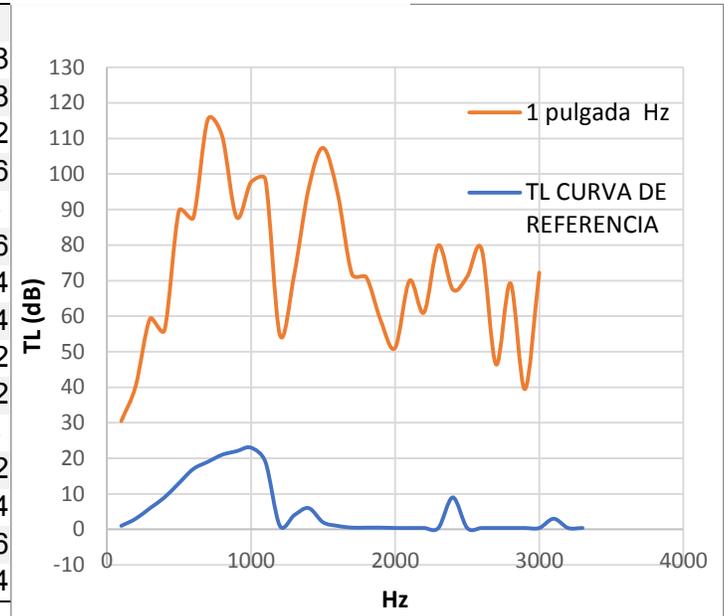
⁵⁸ TORRES PICAZO, María Isabel. Modelado acústico de silenciadores con material absorbente. [Repositorio Digital]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Valencia. 2006. p. 130. [Consultado, 04, 18, 2017]

En la elaboración de la primera prueba se escogió el tubo de una pulgada. La toma de datos se realiza con un intervalo de 100 Hz hasta llegar a 3000 Hz; esto significa que la prueba consta de treinta tomas reflejadas en gráficos y tablas, los cuales permiten que el análisis del comportamiento de la onda sea más claro para su estudio.

Tabla 8. Datos TL 1"

| 1 PULGADA | | | |
|-----------|----------|------|---------|
| Hz | TL | Hz | TL |
| 100 | 30,4886 | 1600 | 94,7858 |
| 200 | 40,3724 | 1700 | 71,8798 |
| 300 | 59,3372 | 1800 | 70,9512 |
| 400 | 56,0794 | 1900 | 58,7756 |
| 500 | 89,6134 | 2000 | 51,076 |
| 600 | 87,6832 | 2100 | 69,9846 |
| 700 | 115,297 | 2200 | 61,0094 |
| 800 | 110,6806 | 2300 | 79,9184 |
| 900 | 87,877 | 2400 | 67,5212 |
| 1000 | 97,7254 | 2500 | 71,1212 |
| 1100 | 98,5024 | 2600 | 78,843 |
| 1200 | 54,7912 | 2700 | 46,4152 |
| 1300 | 71,7288 | 2800 | 69,2494 |
| 1400 | 95,965 | 2900 | 39,4576 |
| 1500 | 107,3588 | 3000 | 72,2474 |

Grafica 2. Comportamiento TL 1"



En la gráfica 2 se muestra el análisis del mismo silenciador utilizado en la gráfica 1, y se realiza una comparación para saber si el comportamiento de estas es el mismo. Es evidente que las gráficas no tienen ninguna similitud puesto que en este documento se hizo la toma de datos con un tubo de 2 pulgadas, razón por la cual al revisar los resultados se evidencia una considerable diferencia con respecto a los datos tomados cuando el experimento se realiza con un tubo de 1 pulgada.

Se realizó un análisis del comportamiento de las ondas en el banco, donde se proyecta que los bujes instalados generan un choque de ondas ocasionando una pérdida o acumulación de sonido en cada intervalo; esto causa una alteración en la onda emitida por el sonido al momento de adquirir los datos.

Para que la toma de datos con el tubo de una pulgada sea exitosa la geometría de los bujes debe ser modificada a una forma cónica puesto que el diseño de este buje permite que no haya choques de ondas que son los que alteran los resultados, gracias a esta modificación se pueden hacer pruebas hasta de 6033Hz para los

paneles arquitectónicos o materiales de aislamiento acústico que utilicen estas frecuencias.

En base a esta experimentación se concluyó que es mejor hacer la toma de datos con un tubo de dos pulgadas, puesto que con este tubo ya no se tienen bujes de reducción, si no por el contrario se tienen uniones que hacen más preciso el recaudo de los datos.

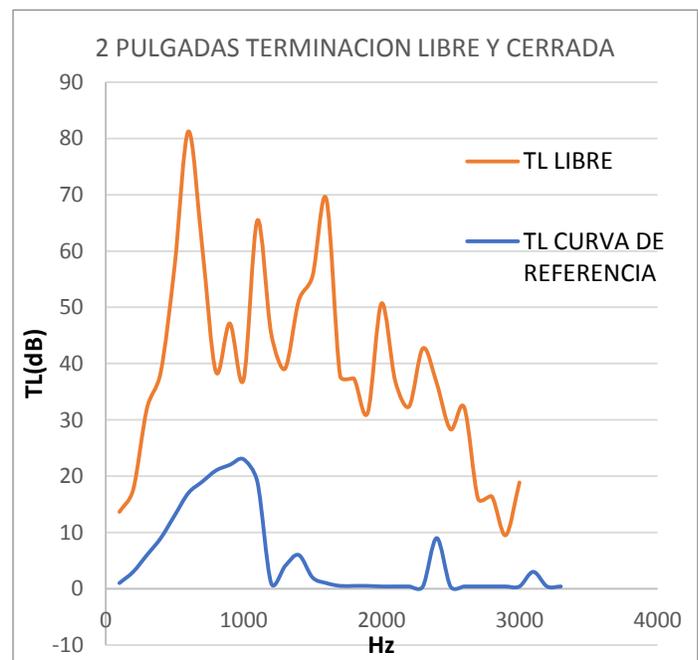
Seguido de esta se hacen las pruebas cambiando el tubo de 1 pulgadas por el de 2 pulgadas y variando la terminación del banco con los diseños que fueron expuesto en el capítulo 3.1.2, para así poder concluir cuál de estas es la más apropiada a escoger y cumpla con el fin de este proyecto.

A continuación, se realiza el análisis de las pruebas efectuadas con una modalidad de terminación libre.

Tabla 9. Datos TL 2"

| 2 PULGADAS | | | |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| Hz | TL | Hz | TL |
| 100 | 13,65956 | 1600 | 69,2626 |
| 200 | 17,60146 | 1700 | 37,8096 |
| 300 | 32,08386 | 1800 | 37,3453 |
| 400 | 38,4897 | 1900 | 31,2575 |
| 500 | 57,22149 | 2000 | 50,6978 |
| 600 | 81,2589 | 2100 | 36,862 |
| 700 | 60,84725 | 2200 | 32,3744 |
| 800 | 38,53098 | 2300 | 42,7237 |
| 900 | 47,13725 | 2400 | 36,5251 |
| 1000 | 37,1489 | 2500 | 28,3251 |
| 1100 | 65,4495 | 2600 | 32,186 |
| 1200 | 45,3968 | 2700 | 15,9721 |
| 1300 | 39,06315 | 2800 | 16,3892 |
| 1400 | 51,18125 | 2900 | 9,4933 |
| 1500 | 55,5491 | 3000 | 18,8828 |

Grafica 3. Comportamiento TL 2"



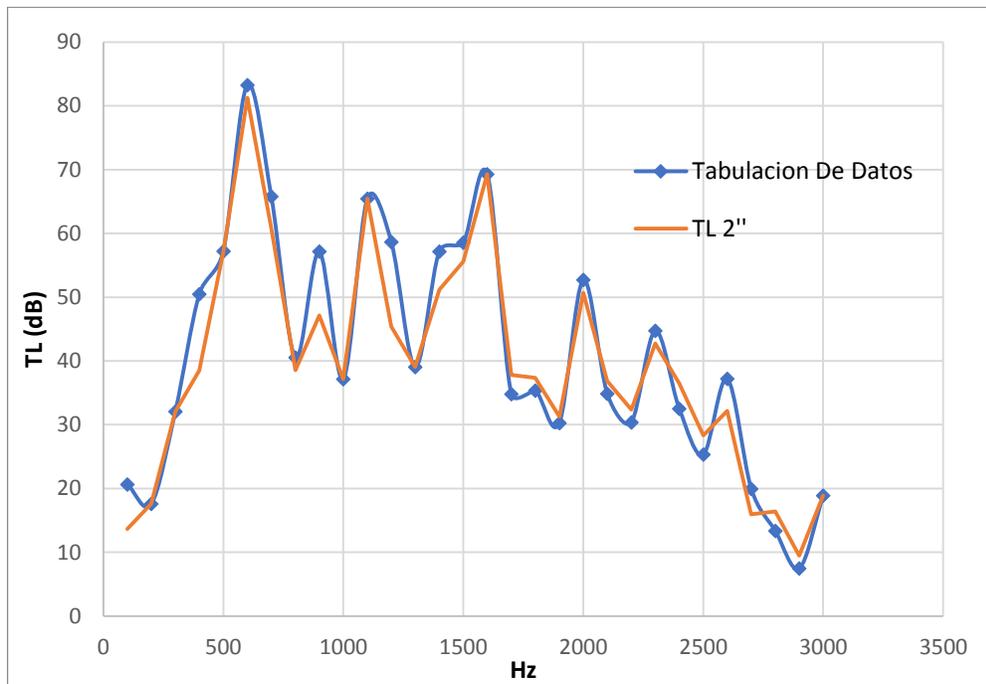
Fuente: Autores

Esta prueba consiste en tomar datos con el tubo abierto y cerrado con un tapón, como lo indica la norma ASTM E2611-09.

En la adquisición de la toma de datos de esta prueba se analiza el comportamiento de la gráfica, por medio de la cual se puede afirmar que la prueba ha tenido una disminución del catorce por ciento en la pérdida de transmisión acústica. Esta afirmación se hace con respecto a los puntos máximos que arroja la gráfica anterior, lo que indica que la prueba tiene una mejoría en la toma de datos ya que tuvo una disminución en los valores.

Estos datos siguen siendo aún muy altos a comparación de la gráfica 1 por ende se tienen que generar más pruebas para el análisis del comportamiento de la gráfica. A continuación, se muestra otra prueba realizada con las mismas condiciones de terminación la cual arroja resultados diferentes que se observan en la gráfica 4, pero siguiendo el mismo comportamiento de la gráfica anterior.

Grafica 4. Comportamiento TL 2"



Es importante resaltar, que estas pruebas se realizan con el fin de corroborar la fiabilidad del estudio realizado con el banco acústico.

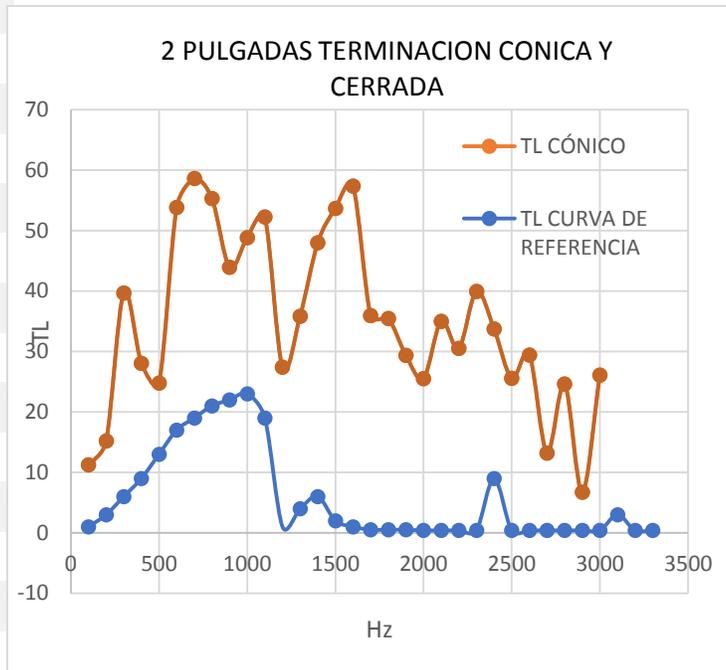
Paralelo a esto, se realizó la recolección de datos basado en la experimentación del análisis del banco acústico con el tapón y la terminación anecoica expuesto en el capítulo 3.1.2, viéndose reflejado en los siguientes esquemas.

Tabla 10. Datos TL 2" Cónico

2 PULGADAS

| Hz | TL con | Hz | TL con |
|------|---------|------|---------|
| 100 | 11,2443 | 1600 | 57,3929 |
| 200 | 15,1862 | 1700 | 35,9399 |
| 300 | 39,6686 | 1800 | 35,4756 |
| 400 | 28,0397 | 1900 | 29,3878 |
| 500 | 24,8067 | 2000 | 25,538 |
| 600 | 53,8416 | 2100 | 34,9923 |
| 700 | 58,6485 | 2200 | 30,5047 |
| 800 | 55,3403 | 2300 | 39,9592 |
| 900 | 43,9385 | 2400 | 33,7606 |
| 1000 | 48,8627 | 2500 | 25,5606 |
| 1100 | 52,2512 | 2600 | 29,4215 |
| 1200 | 27,3956 | 2700 | 13,2076 |
| 1300 | 35,8644 | 2800 | 24,6247 |
| 1400 | 47,9825 | 2900 | 6,7288 |
| 1500 | 53,6794 | 3000 | 26,1237 |

Grafica 5. Comportamiento TL 2"



En el estudio de esta grafica se analiza el comportamiento del silenciador puesto a prueba con la terminación anecoica. Los datos obtenidos en este experimento evidencian que la disminución es de un trece por ciento con respecto a los datos obtenidos de la gráfica 3. Se observa una mejora cuantitativa en la precisión del sistema acercándose cada vez más al rango obtenido, aunque se mantiene distante de los resultados representados en gráfica 1 con la cual se está comparando las pruebas realizadas.

Por conocimiento adquirido durante el proceso, se realiza la toma de datos del banco acústico esta vez sin el silenciador con el fin de ejecutar una prueba de calibración.

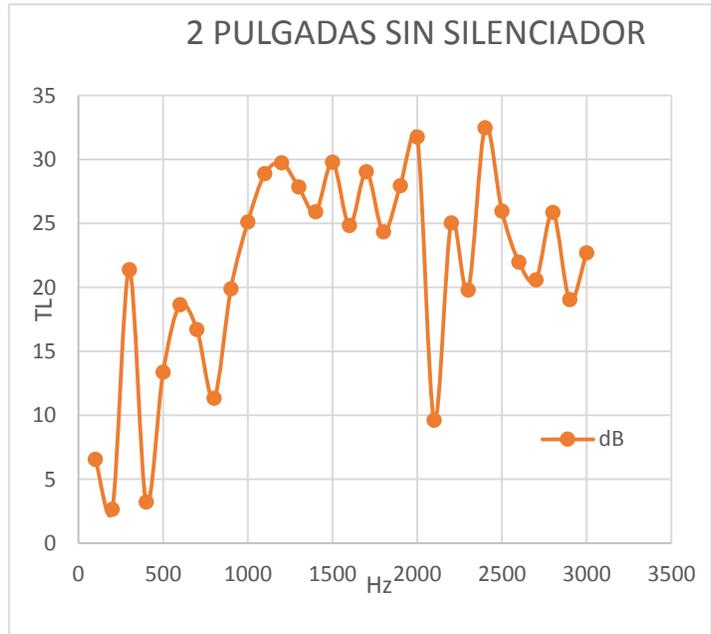
Los datos obtenidos a través de esta experimentación son los anunciados en los siguientes esquemas.

Tabla 11. Datos TL 2" Sin Silenciador

2 PULGADAS

| Hz | TL sin | Hz | TL sin |
|------|---------|------|---------|
| 100 | 6,5555 | 1600 | 24,8344 |
| 200 | 2,6429 | 1700 | 29,0289 |
| 300 | 21,3713 | 1800 | 24,3338 |
| 400 | 3,2205 | 1900 | 27,9437 |
| 500 | 13,3731 | 2000 | 31,7436 |
| 600 | 18,6493 | 2100 | 9,6089 |
| 700 | 16,6904 | 2200 | 25,028 |
| 800 | 11,3255 | 2300 | 19,7952 |
| 900 | 19,8941 | 2400 | 32,4824 |
| 1000 | 25,1141 | 2500 | 25,9485 |
| 1100 | 28,8762 | 2600 | 21,964 |
| 1200 | 29,7434 | 2700 | 20,5798 |
| 1300 | 27,8439 | 2800 | 25,863 |
| 1400 | 25,8993 | 2900 | 19,0348 |
| 1500 | 29,7735 | 3000 | 22,7008 |

Grafica 6. Comportamiento TL 2" Sin Silenciador



Después del análisis se puede evidenciar la disminución de los valores de pérdida de transmisión acústica aproximándose esta vez un veinte por ciento más a la gráfica 1. Es importante tener en cuenta que este evento se hizo para la calibración del banco acústico, obteniendo resultados que serán usados más adelante.

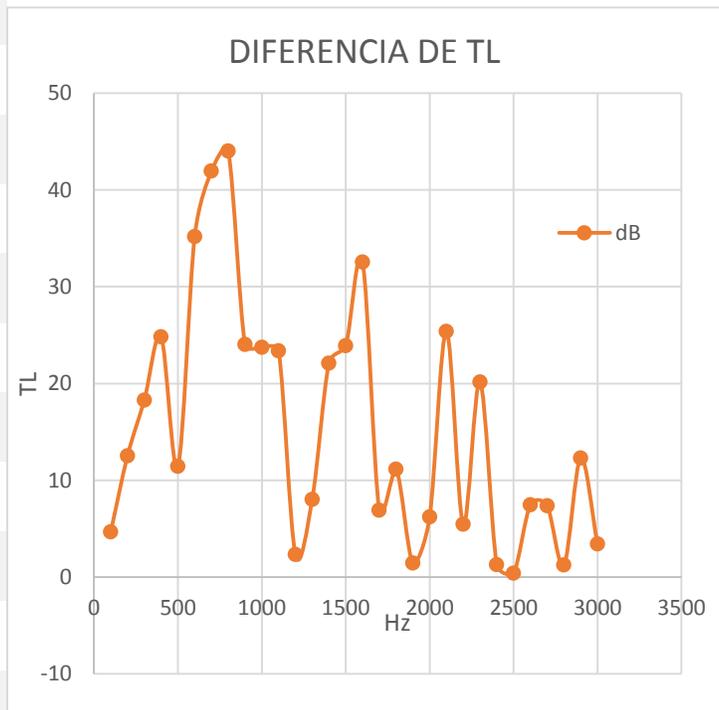
En la gráfica 7 se pueden evidenciar los resultados del comportamiento de la diferencia efectuada entre la prueba de 2 pulgadas con terminación cónica y la prueba de calibración; obteniendo como resultados los expuestos a continuación.

Tabla 12. Datos TL 2" Diferencia

DIFERENCIA DE TL

| Hz | TL | Hz | TL |
|------|---------|------|---------|
| 100 | 4,6888 | 1600 | 32,5585 |
| 200 | 12,5433 | 1700 | 6,911 |
| 300 | 18,2973 | 1800 | 11,1418 |
| 400 | 24,8192 | 1900 | 1,4441 |
| 500 | 11,4336 | 2000 | 6,2056 |
| 600 | 35,1923 | 2100 | 25,3834 |
| 700 | 41,9581 | 2200 | 5,4767 |
| 800 | 44,0148 | 2300 | 20,164 |
| 900 | 24,0444 | 2400 | 1,2782 |
| 1000 | 23,7486 | 2500 | 0,3879 |
| 1100 | 23,375 | 2600 | 7,4575 |
| 1200 | 2,3478 | 2700 | 7,3722 |
| 1300 | 8,0205 | 2800 | 1,2383 |
| 1400 | 22,0832 | 2900 | 12,306 |
| 1500 | 23,9059 | 3000 | 3,4229 |

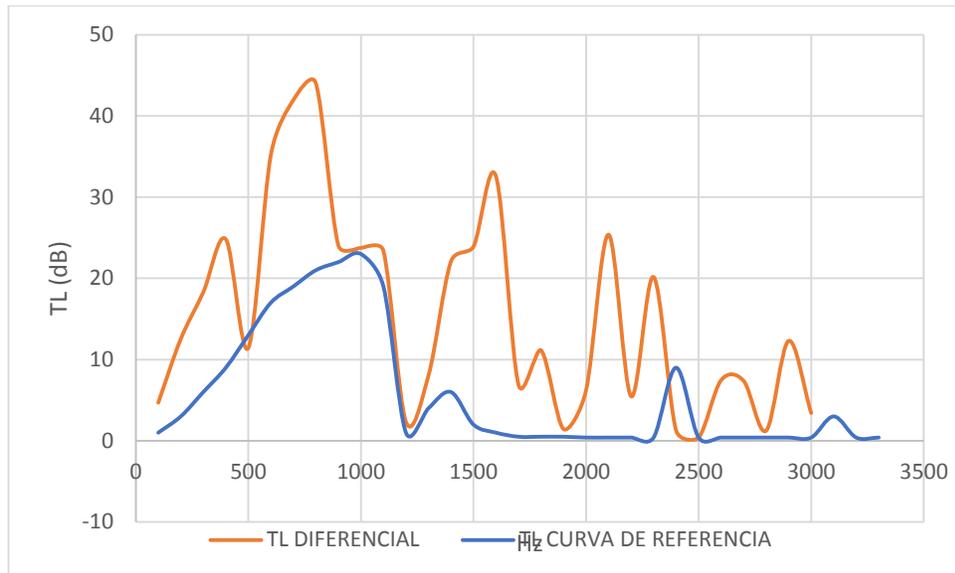
Grafica 7. Comportamiento TL 2"



Fuente: Autores

La evidencia del avance de este proyecto se puede observar en esta gráfica 7, siendo el resultado más cercano y preciso a la gráfica 1 de pérdida de transmisión acústica.

Grafica 8. Sobre posición de graficas



Al analizar el comportamiento de la gráfica 8 por medio de la interpretación de las 2 curvas obtenidas, se observa que no hay una correlación en los datos de forma precisa, pero que si existe una similitud en el comportamiento de la onda.

Estas diferencias en los resultados se deben a que las condiciones de experimentación no son las mismas que las empleadas en las pruebas realizadas en el documento de Torres Picazo.

Como consecuencia, el desfase generado entre las 2 curvas corresponde principalmente a el sistema de adquisición de datos usado, debido a que el banco acústico usado por Torres Picazo incluye el sistema de análisis FFT que recolecta la información de los cuatro micrófonos de alta precisión al tiempo en la medición, los almacena y luego permite su procesamiento en el software elegido. Mientras que el sistema utilizado en este experimento es la tarjeta de sonido por medio de la cual se recolecta la información de los dos micrófonos utilizados y se procesa tal y como se desarrolla en dicho documento.

El sistema de análisis FFT genera una mayor precisión en la prueba porque realiza las 4 pruebas simultáneamente a diferencia del mecanismo que se utiliza con la tarjeta de sonido, ya que se deben realizar dos tomas de datos por cada carga de impedancia utilizada, antes y después del silenciador.

Al llegar a este punto, se debe mencionar la importancia de la terminación del banco acústico, con respecto a la prueba que más se acerca a la gráfica de referencia; ya

que esta tiene una terminación cónica y cerrada lo que permite aislar el sonido de manera efectiva obteniendo así los resultados más precisos.

Para terminar, es importante mencionar que los micrófonos utilizados en la medición también influyen al ser de bajo presupuesto y tener un rango de sensibilidad medio. Por esta razón, para efectuar una medición más adecuada es necesario utilizar los micrófonos omnidireccionales que fueron elegidos en el diseño del banco acústico en donde se utilizó el analizador FFT.

5. CONCLUSIONES

- Mediante el estudio de diferentes alternativas para analizar la eficiencia en silenciadores, se concluye que el parámetro más adecuado entre los analizados es la pérdida de transmisión acústica, ya que su metodología tiene un nivel de fiabilidad mayor en el análisis de los silenciadores.
- De acuerdo con la revisión de la norma ASTM E2611-09 en relación a los diseños de bancos acústicos desarrollados y considerando los lineamientos descritos en la norma, se desarrolla el diseño y la construcción de un dispositivo de prueba capaz de medir la pérdida de transmisión acústica con dos micrófonos y una tarjeta de sonido, donde se evidencia el estudio de la pérdida de transmisión acústica.
- Se realiza la validación del algoritmo y de la construcción del dispositivo de prueba con mediciones efectuadas en un silenciador concéntrico circular para comparar los datos calculados con la tesis de “MODELO ACUSTICO DE SILENCIADORES CON MATERIAL ABSORBENTE”. Se observa que no hay una correlación en los datos de forma precisa ni en el comportamiento de onda, esto debido a que la condición de recepción es diferente al no incluir un sistema analizador FFT que permite la recolección de todos los datos al mismo tiempo y realiza la conversión de la señal de los micrófonos antes de enviarlos al computador, un generador de ondas y micrófonos de mayor precisión.
- Se evidencia como la terminación anecoica del banco acústico permite obtener datos más precisos para la representación de la curva de pérdida de transmisión acústica, ya que este tipo de terminación permite aislar los ruidos externos y además su forma cónica evita que las ondas tengan choques bruscos al momento de llegar a ella. Gracias a esto se logra obtener una curva de pérdida de transmisión acústica similar a la utilizada como curva de referencia

6. RECOMENDACIONES

Por medio de la experiencia que se obtiene en este trabajo, es posible hacer las siguientes recomendaciones para mejorar la calidad de las mediciones efectuadas con un banco de pruebas acústicas:

- Contemplar la adición de los elementos que componen el banco de pruebas acústicas de cuatro micrófonos, ya que no se contemplan en este proyecto por las limitaciones iniciales.
- Si se considera necesario, se puede modificar el tubo para obtener nuevas posiciones para los micrófonos. Esto permitirá la variación de los espaciamientos entre ellos, y con esto el rango de frecuencias a trabajar en la medición.
- Con el objetivo de mejorar la calidad y la precisión en las pruebas, se recomienda utilizar la norma ASTM E2611-09 para la construcción del banco acústico. Los lineamientos que ofrece son necesarios para no generar interferencias en la medición cuando se realicen las pruebas son necesarios.

BIBLIOGRAFIA

ARUNKUMAR,B. y JEYANTHI,S. Design and analysis of impedance tube for sound absorption measurement.En: ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences[GoogleAcadémico].Tamilnadul.03.p.04.[Consultado,04,13,2017].Disponible en: http://www.arnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0317_5774.pdf

ASTM.Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. ASTM E2611.2009

"BOLTON,j stuart; LEE, Seungkyu y MARTINSON, paul.Design of Multi-Chamber Silencers with Microperforated Elements.En:e-Pubs.[Google Académico].(2014). Westafayette.09.2014.[Consultado,04,01,2017].<http://docs.lib.purdue.edu/herrick/106>

CANDIDO DA SILVA,gabriela;ARAUJO NUNES,maria alzira;VILELA LOPES,renato y BOSON ALMEDIA,antonio. Design and construction of a low cost impedance tube For sound absorption coefficients measurements.[ScienceDirect].Gama.11.2013.[Consultado,19,04,2017].Disponible en: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2013/PDF/47>

CROCKER,malcom.Handbook of noise and vibration control.[Google Académico].New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.2007.p.400.[Consultado 17,03,2017].Disponible en : <https://es.scribd.com/doc/235661198/Handbook-of-Noise-and-Vibration-Control>

DARLINGTON,Sidney. Synthesis of Reactance 4-Poles Which Produce Prescribed Insertion Loss Characteristics: Including Special Applications To Filter Design. En: Studies in Applied Mathematics. vol. 18, no. 1-4, p. 257-353

DENIA,fd.Acoustic attenuation performance of perforated dissipative mufflers with empty inlet/outlet extensions.En: Journal of Sound and Vibration.[ScienceDirect].02 vol. 302, no. 4, p. 1000-1017[Consultado,03,04,2017]

DESHPANDE,Satyajeet P. Development of a Low Cost Impedance Tube to Measure the Acoustic Absorption and Transmission Loss of Materials.En:360 of engineering education,[ScienceDirect].Indianapolis.06.p.06.[Consultado,15,04,2017]. ESTELLÉS,DÍAZ.Ricardo. Aislación Acústica.[Google Académico].Montevideo.Octubre.2005[Consultado25,02,2017] Disponible en: [.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/07-AISLACION-ACUSTICA.pdf](http://www.acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/07-AISLACION-ACUSTICA.pdf)

Eletoool.importadores directos de herramienta de diagnóstico
<http://www.eletoool.com/producto/osciloscopios>

FONSECA DE LIAM,Key; BARBIERI,Nilson y BARBIERI,Renato. Alternative method for acoustical characterization of absorbent materials based on the assessment of the acoustical efficiency of dissipative silencers. En: Noise Control Engineering Journal.[ScienceDirect].03 vol. 64, no. 2, p. 195-207.[Consultado,03,31,2017].Disponible en:
<http://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/ncej/2016/00000064/00000002/art00008>

GARCÍA LUQUE, Alexander. Estudio comparativo del desempeño de los métodos FEM y MMT para el cálculo de la atenuación sonora de silenciadores pasivos. [Repositorio Digital]Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.Facultad de ingeniería Mecánica y Mecatrónica.Bogota. p32.[Consultado09,03,2017]

G.R.A.S. SOUND AND VIBRATION.microfono de medición dinamica.Disponible en:
<http://www.directindustry.es/prod/gras-sound-vibration/product-70183-573915.html>

HALUK,Erol y ÖZCAN Ahmetoglu, Acoustic attenuation in fully-filled perforated dissipative mufflers with extended inlet/outlet.En:The thirtheenthe international congress on sound an vibration[Google Académico].Vienaa.07[Consultado,04,08,2017]

INGLE,Ravindra;JADHAV,jm;MANVI,vs y TALEKAR,VD.Experimental investigation of a double expansion chamber reactive muffler for stationary diesel engine. En: Noise & Vibration Worldwide. 10. vol. 45, no. 9, p. 12-17[Consultado,19,02,2017]

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008, 110 p.

----- . Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998, 12 p.

----- . Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 1998, 8 p.

LAZCANO,Juan Luis Aguayo. Aplicación de técnicas digitales de medición del aislamiento suministrado por silenciadores en presencia de flujo.[Repositorio Digital].Tesis. Licenciado en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero Acústico. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Acústica.Valdivia.2005.p07[consultado20,02,2017]

MUNJAL, M. L. Noise and Vibration Control. [Google Académico]. Hackensack: World Scientific. 2013. [Consultado, 04, 05, 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/305083492/Munj-al-M-L-II-Sc-Lecture-Notes-Series-Volume-3>

PAVCO, Manual Técnico Tubosistemas Presión PVC, PAVCO - MEXICHEM COLOMBIA, Disponible en : <https://pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25>

PEDROSA SÁNCHEZ, ana maria. Desarrollo de herramientas experimentales para la caracterización acústica de silenciadores en presencia de flujo medio. [Repositorio Digital]. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica De València. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Valencia. 2015. p. 120. [Consultado, 04, 18, 2017]

PIERCE, Allan D. Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications. McGraw-Hill New York, 1981. P. 359

POTENTE, Daniel. General Design Principles for an Automotive Muffler. En: daydesing [Google Académico]. Sidney. 11. 2005a. p. 153-158. [Consultado 03, 30, 2017]. Disponible en: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2005/papers/34.pdf

POVEDA, Germán. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. En: Rev. Acad. Colomb. Cienc. vol. 28, no. 107, p. 201-222

SNEHASIS, pal. Design and acoustic analysis of exhaust muffler for automotive applications. [Repositorio Digital]. Master of Technology. Christ University. Faculty of Engineering. Kumbalgodu. 2015. [consultado 10, 01, 2017]

ŠTEBLAJ, peter. A Muffler with Adaptive Acoustic Properties E: Strojniški Vestnik- Journal of Mechanical Engineering. [ScienceDirect]. noviembre. vol. 61, no. 10, p. 553-560. [Consultado 15, 02, 2017]

TAO, Z. y SEYBERT, AF. A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss. E: Society of Automotive Engineers, Inc. [Google Académico]. Kentucky. 01. 2003. p02. [Consultado 09, 03, 2017]. Disponible: <http://spectronics.net/resources/Technical%20Papers/Muffler%20TL.pdf>

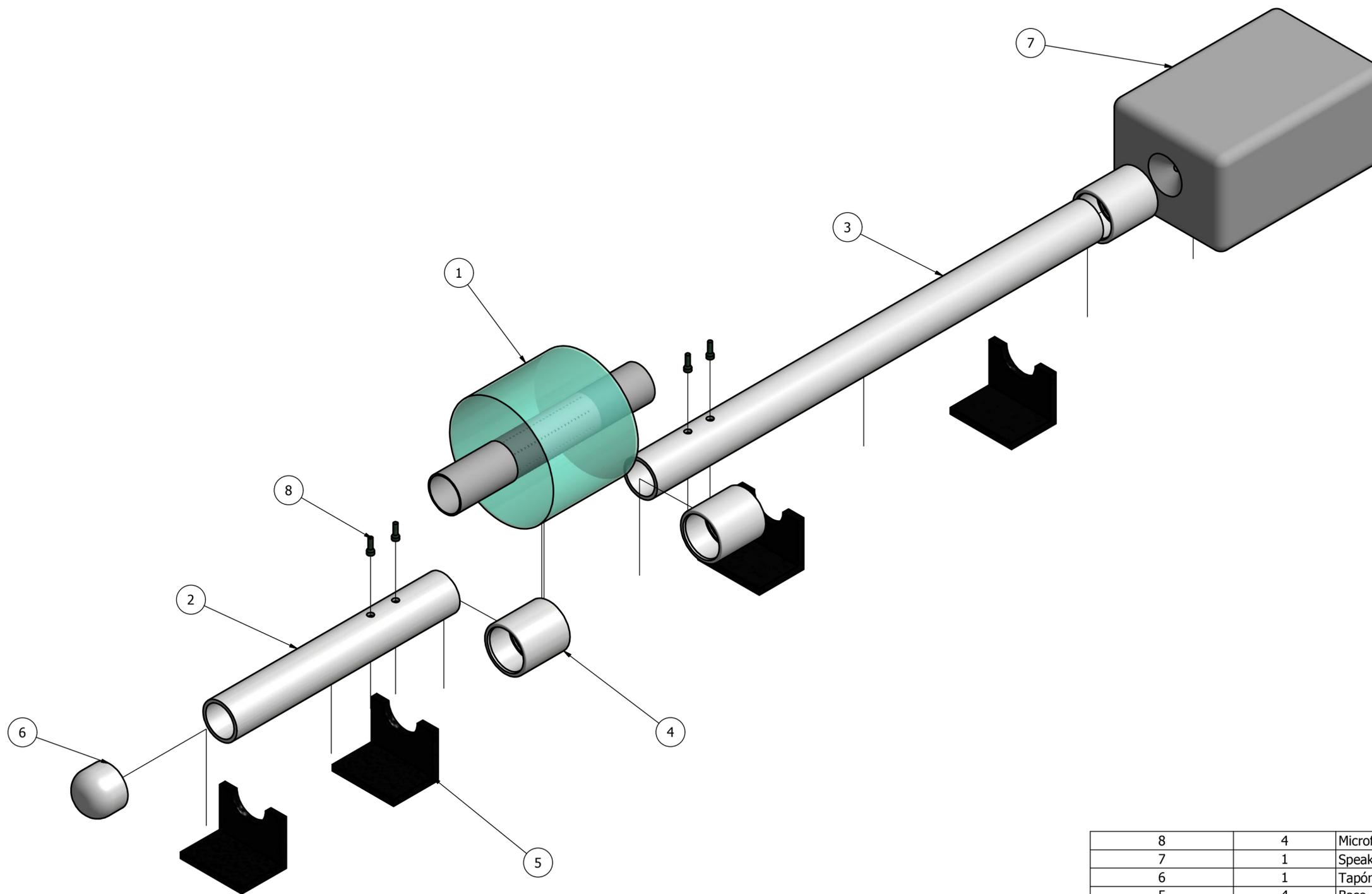
TORRES PICAZO, María Isabel. Modelado acústico de silenciadores con material absorbente. [Repositorio Digital]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Valencia. 2006. p. 130. [Consultado, 04, 18, 2017]

WU, TW y CHEN, CYR. Boundary element analysis of reactive mufflers and packed silencers with catalyst converters. E: Electronic Journal of Boundary Elements. [

ScienceDirect].Kentucky. vol. 1, no 2.2003[Consultado28,02,2017]. Disponible en :
<http://ejbe.libraries.rutgers.edu/index.php/ejbe/article/view/759>

Anexos

ANEXO A
PLANO EXPLOSIONADO BANCO DE PRUEBAS



| | | | |
|------|-----|----------------|-------------|
| 8 | 4 | Microfono | |
| 7 | 1 | Speaker | |
| 6 | 1 | Tapón PVC | PVC |
| 5 | 4 | Base | Acrilico |
| 4 | 3 | Unión 2" | PVC |
| 3 | 1 | Tubo de 800 mm | Tubo PVC 2" |
| 2 | 1 | Tubo de 400 mm | Tubo PVC 2" |
| 1 | 1 | Silenciador | |
| ITEM | QTY | PART NUMBER | MATERIAL |

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS

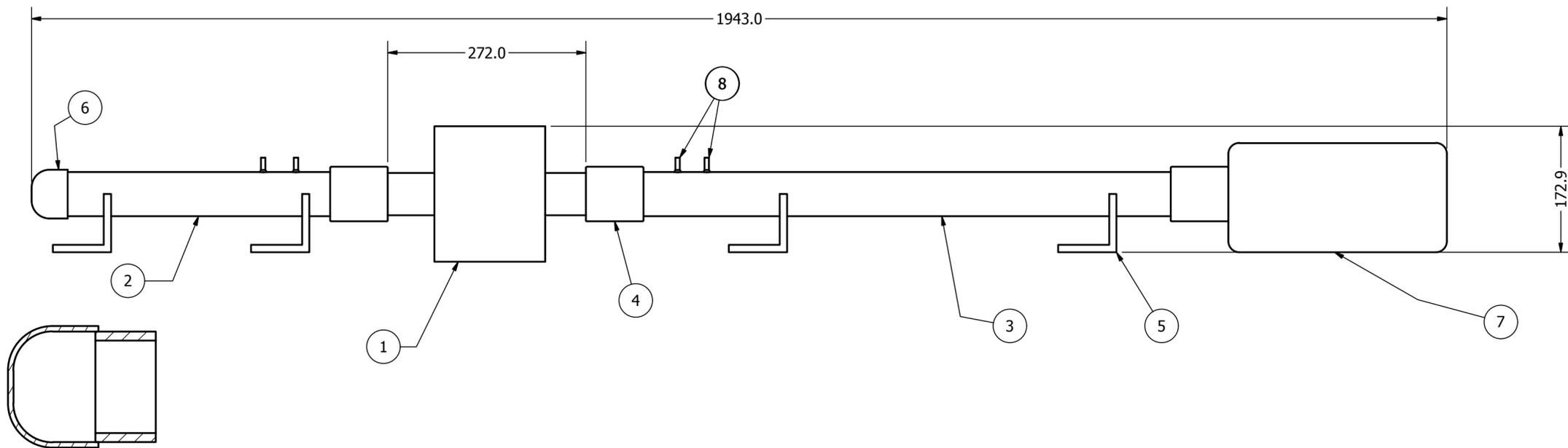


FECHA:
28/08/2017

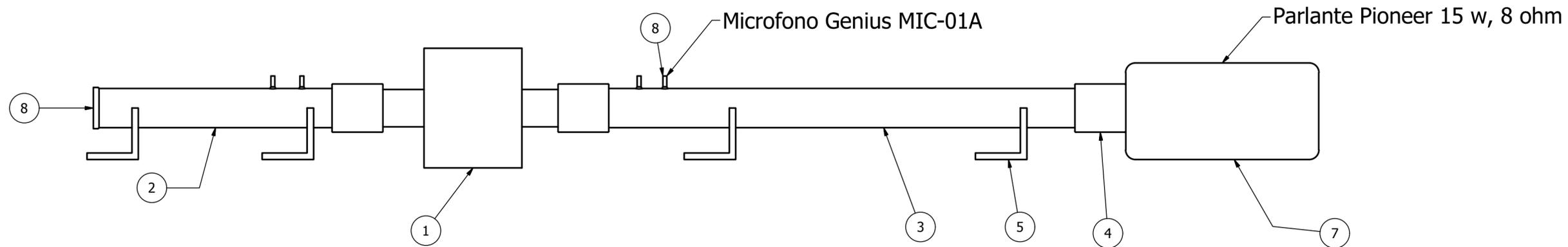
Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

Nombre plano: Plano explosionado banco de pruebas

ANEXO B
PLANO GENERAL BANCO DE PRUEBAS



Detalle con tapón en PVC
SCALE 1 : 2



Detalle con Espuma de fibra de vidrio
SCALE 1 : 2

| | | | |
|------|-----|----------------|-----------------|
| 9 | 1 | Tapón Espuma | Fibra de vidrio |
| 8 | 4 | Microfono | |
| 7 | 1 | Speaker | |
| 6 | 1 | Tapón PVC | PVC |
| 5 | 4 | Base | Acrilico |
| 4 | 3 | Unión 2" | PVC |
| 3 | 1 | Tubo de 800 mm | Tubo PVC 2" |
| 2 | 1 | Tubo de 400 mm | Tubo PVC 2" |
| 1 | 1 | Silenciador | |
| ITEM | QTY | PART NUMBER | MATERIAL |

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS

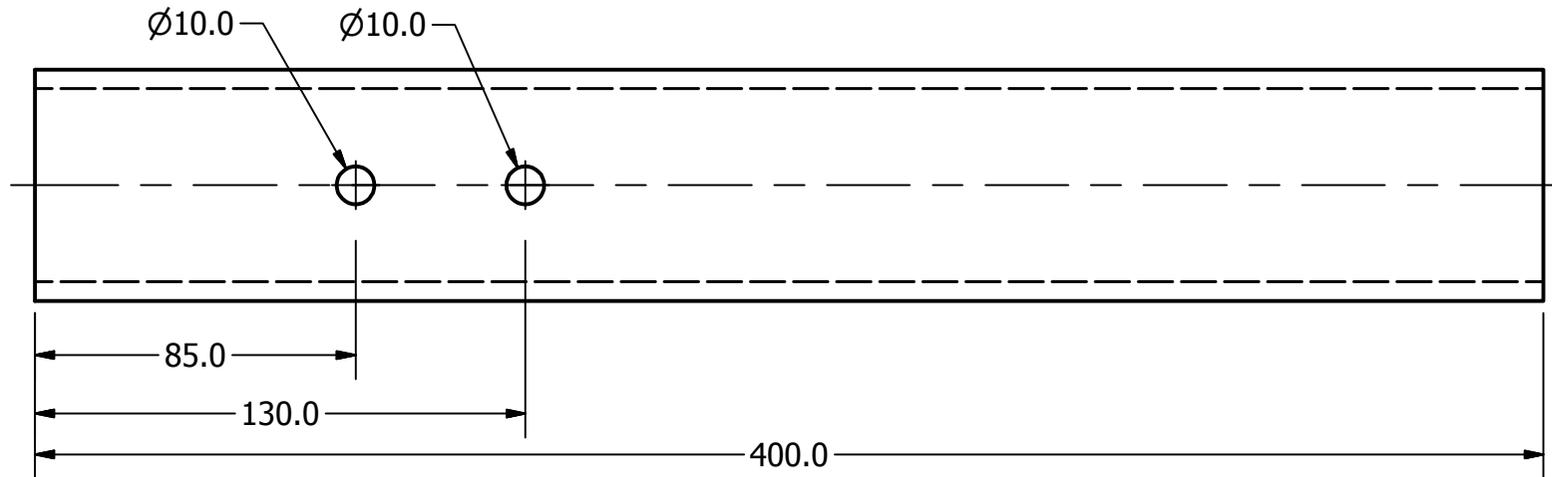


FECHA:
28/08/2017

Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

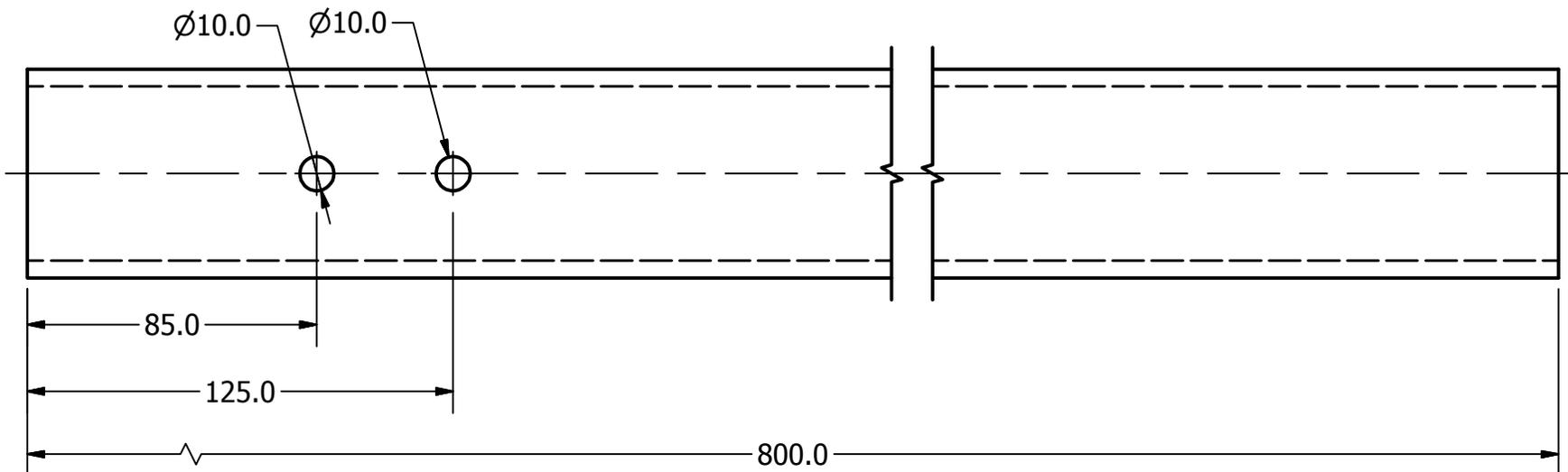
Nombre plano: Plano general banco de pruebas

ANEXO C
TUBO LONGITUD 400 MM 2 PULG



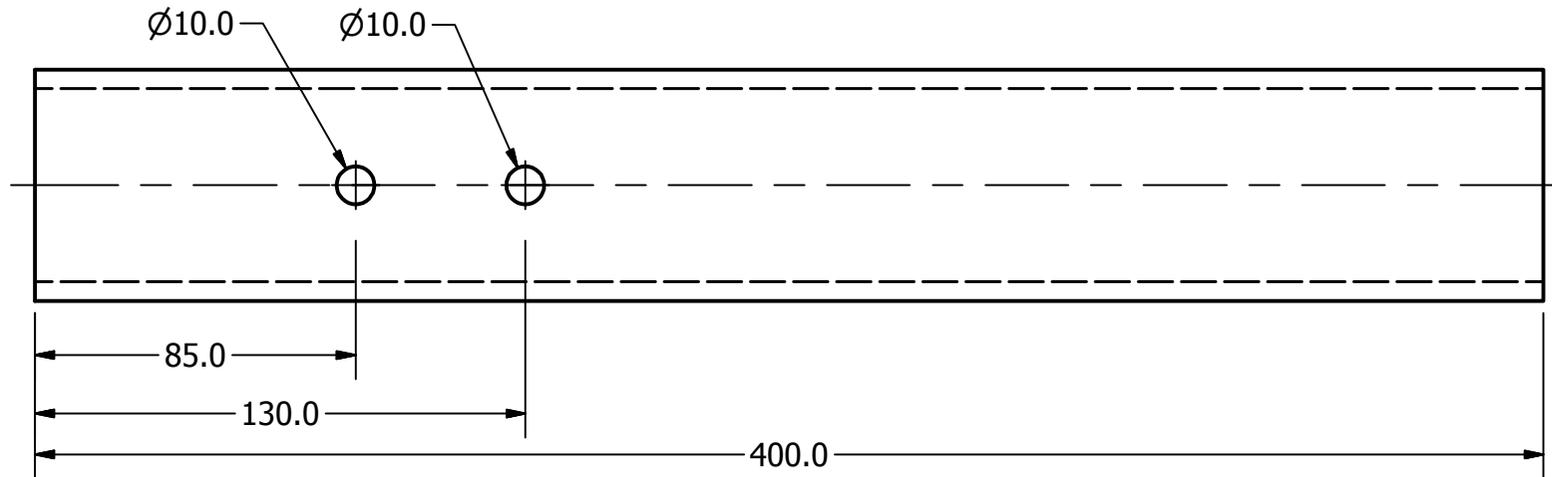
| 2 | 1 | Tubo 400 mm | Tubo PVC 1" espesor 4 mm |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|--------------------------|
| ITEM | QTY | PART NUMBER | MATERIAL |
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 28/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 400 mm | |

ANEXO D
TUBO LONGITUD 800 MM 2 PULG



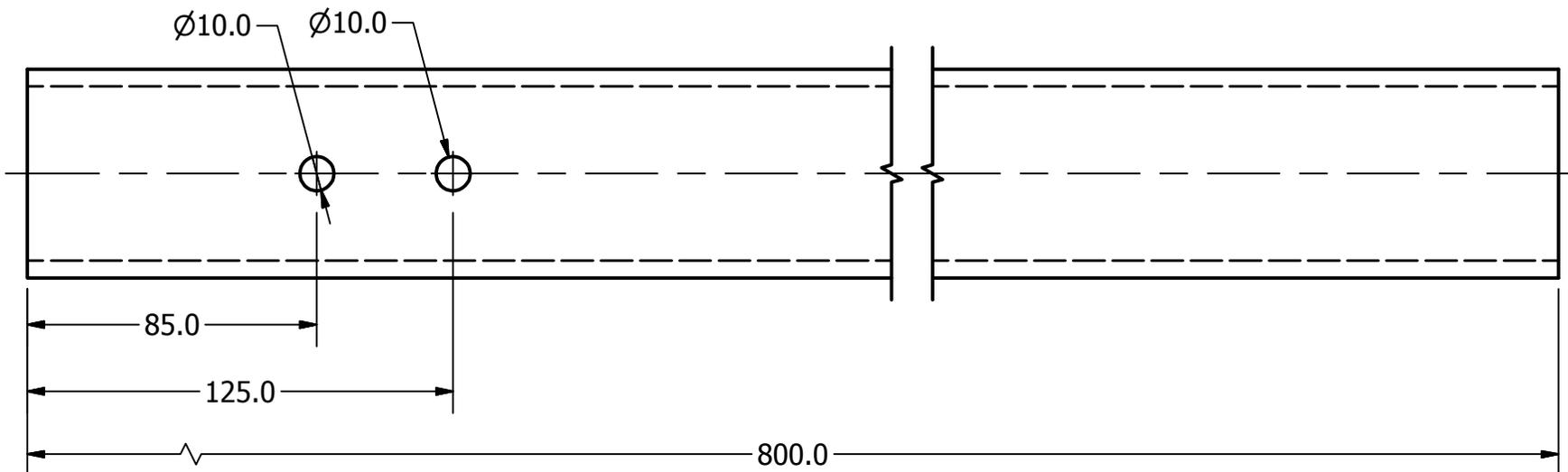
| 3 ITEM | 1 QTY | Tubo 800 mm PART NUMBER | Tubo PVC 2" MATERIAL |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-------------------------|
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 28/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 800 mm | |

ANEXO E
TUBO LONGITUD 400 MM 1 PULG



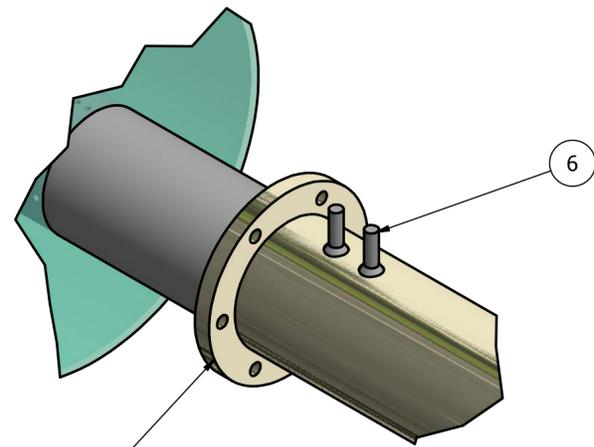
| 2 ITEM | 1 QTY | Tubo 400 mm PART NUMBER | Tubo PVC 1" MATERIAL |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-------------------------|
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 28/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 400 mm | |

ANEXO F
TUBO LONGITUD 800 MM 1 PULG



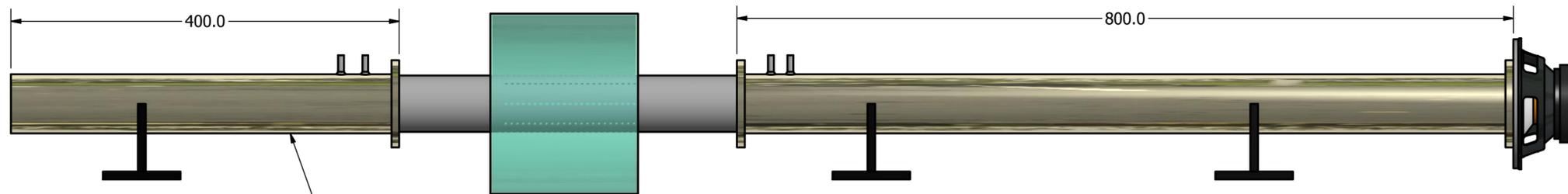
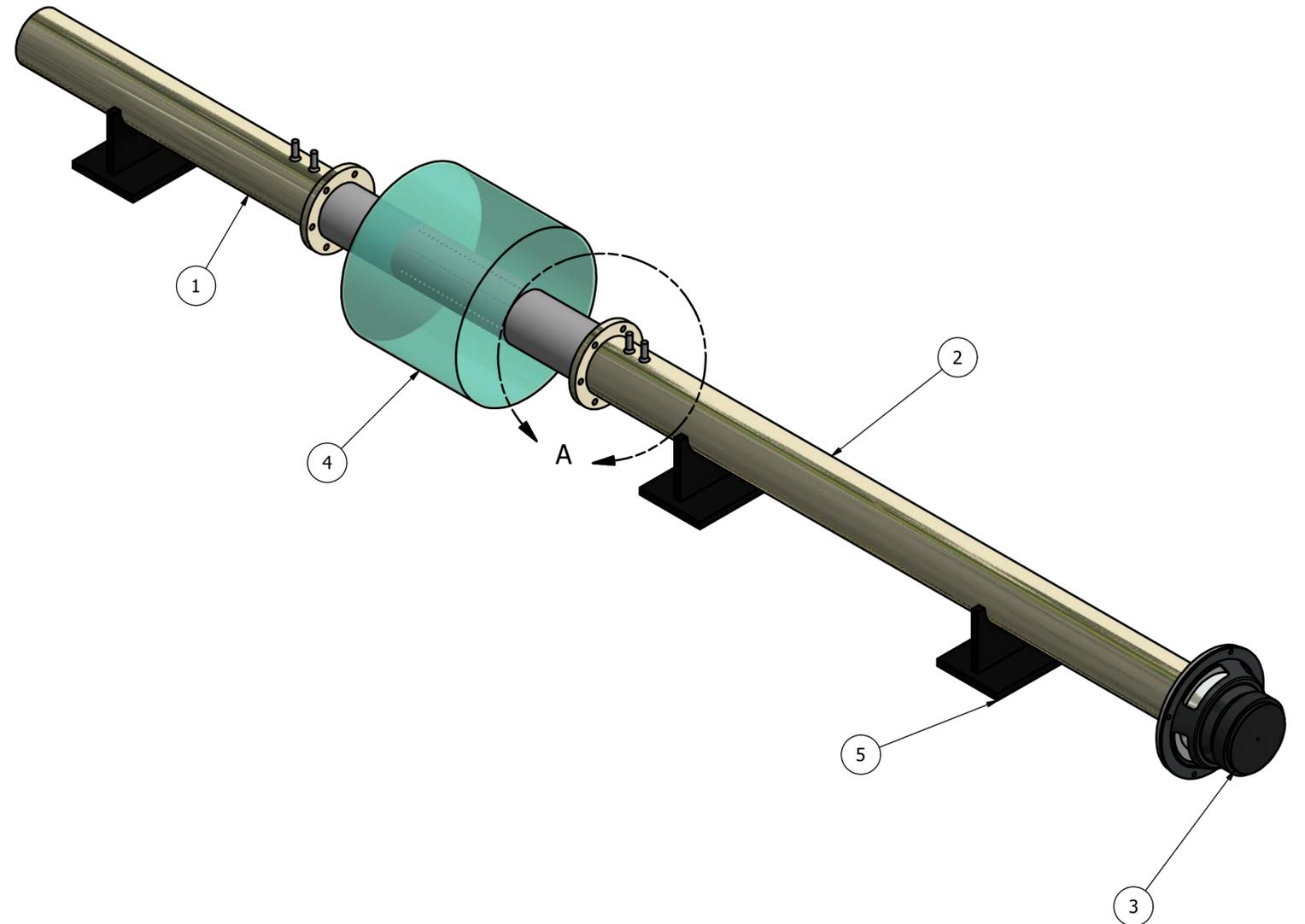
| 3 ITEM | 1 QTY | Tubo 800 mm PART NUMBER | Tubo PVC 1" MATERIAL |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-------------------------|
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 24/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 800 mm | |

ANEXO G
EXPLOSIONADO BANCO DE PRUEBAS (PROPUESTA).



Sujeción de componentes por medio de bridas

DETAIL A
SCALE 1 / 2



Terminación de tubería: Brillo espejo

| PARTS LIST | | | |
|------------|-----|-------------|------------------|
| ITEM | QTY | PART NUMBER | DESCRIPTION |
| 1 | 1 | Tubo 400 mm | Acero Inoxidable |
| 2 | 1 | Tubo 800 mm | Acero Inoxidable |
| 3 | 1 | Parlante | |
| 4 | 1 | Silenciador | |
| 5 | 3 | base | Acero |
| 6 | 4 | Microfono | |

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS

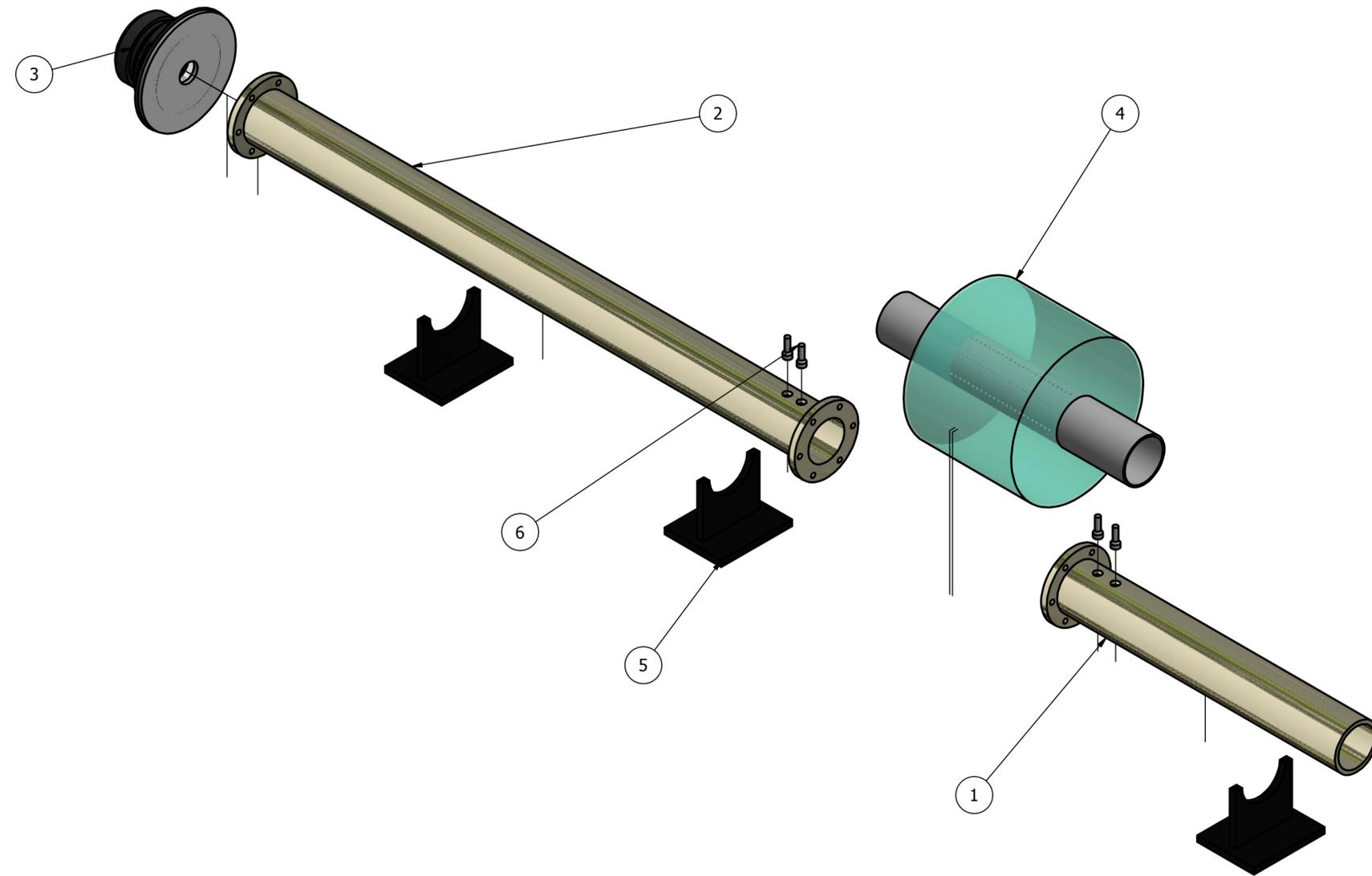


FECHA:
28/08/2017

Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

Nombre plano: Plano banco de pruebas

ANEXO H
PLANO BANCO DE PRUEBAS (PROPUESTA)



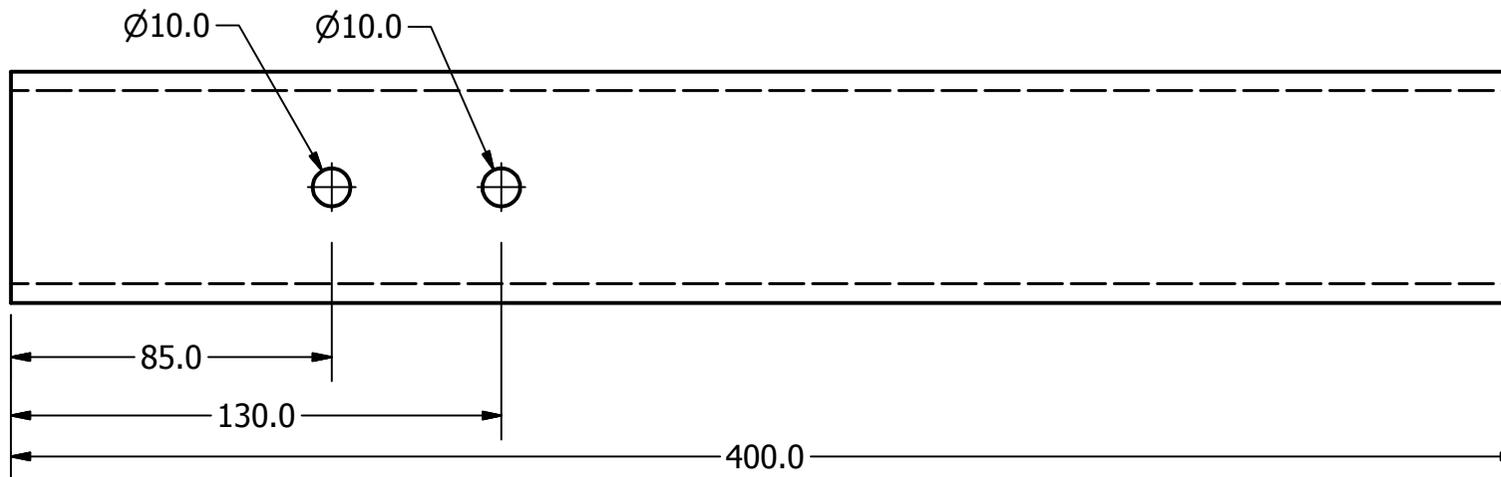
| PARTS LIST | | | |
|------------|-----|----------------|-------------|
| ITEM | QTY | PART NUMBER | DESCRIPTION |
| 1 | 1 | Tubo de 400 mm | Acero Inox |
| 2 | 1 | Tubo de 800 mm | Acero Inox |
| 3 | 1 | Parlante | |
| 4 | 1 | Silenciador | |
| 5 | 3 | Base | Acero |
| 6 | 4 | Microfono | |

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS

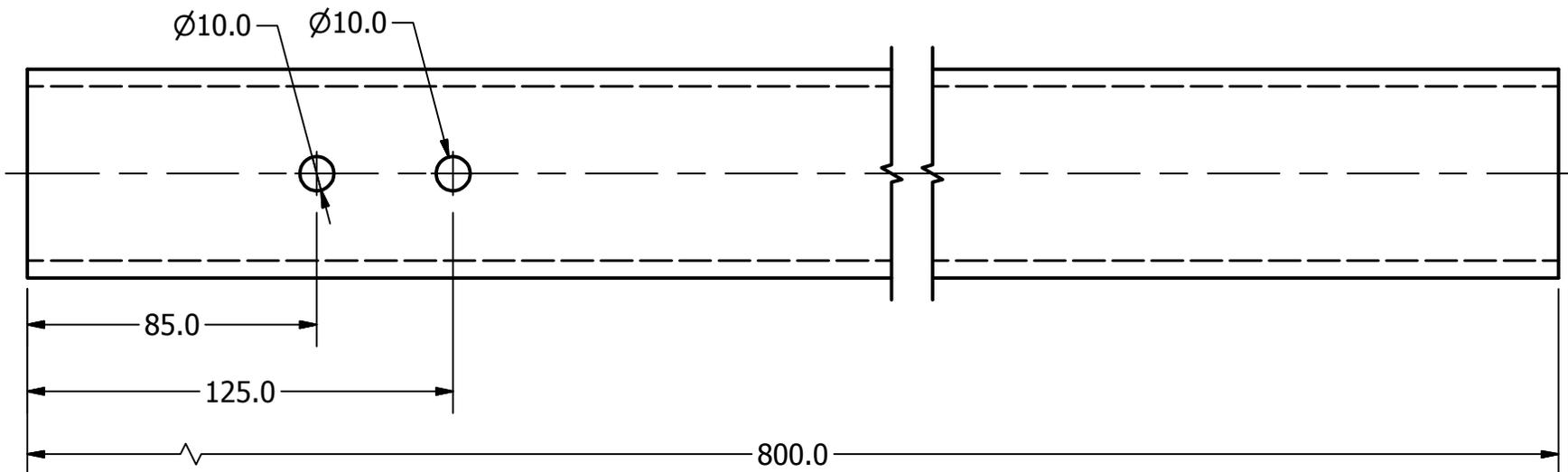
| | | |
|--|------------|---------------------------------------------------------|
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto |
| | 28/08/2017 | Nombre plano: Explosionado banco de pruebas (propuesta) |

ANEXO I
TUBO LONGITUD 400 MM 2 PULG (PROPUESTA)



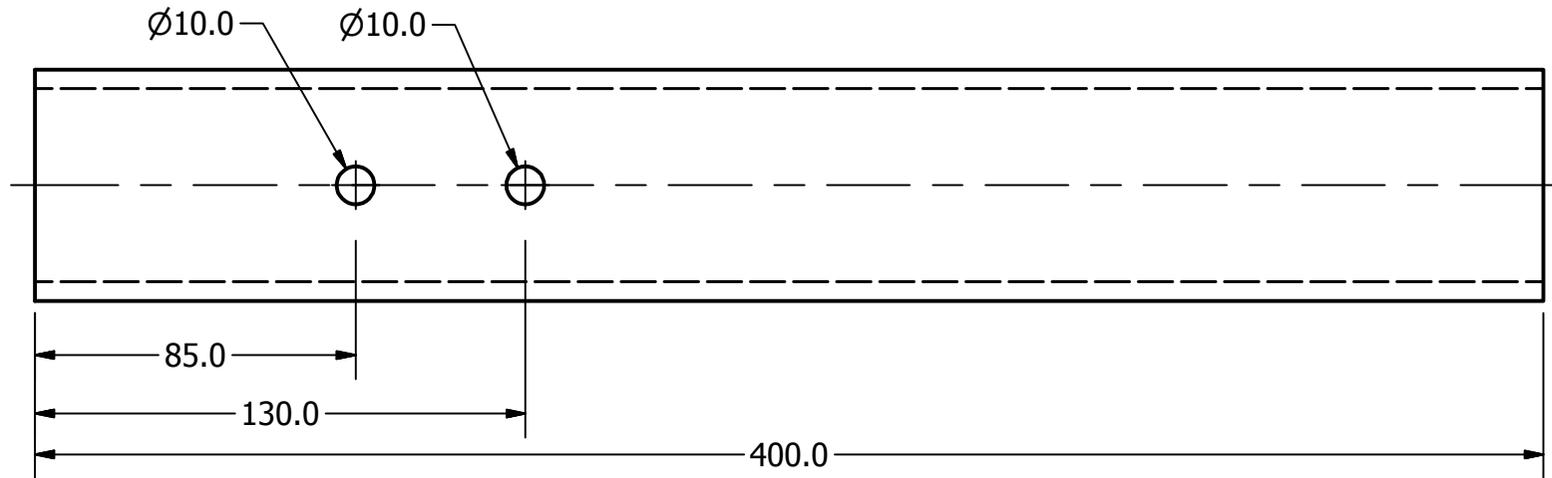
| 2 ITEM | 1 QTY | Tubo 400 mm PART NUMBER | Tubo 2" A INOX espesor 4 mm MATERIAL |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 28/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 400 mm | |

ANEXO J
TUBO LONGITUD 800 MM 2 PULG (PROPUESTA)



| 3 ITEM | 1 QTY | Tubo 800 mm PART NUMBER | Tubo 2" A INOX espesor 4 mm MATERIAL |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 28/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 800 mm | |

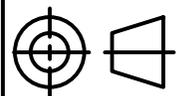
ANEXO K
TUBO LONGITUD 400 MM 1 PULG (PROPUESTA)



| | | | |
|------|-----|-------------|-----------------------------|
| 2 | 1 | Tubo 400 mm | Tubo 1" A INOX espesor 4 mm |
| ITEM | QTY | PART NUMBER | MATERIAL |

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS



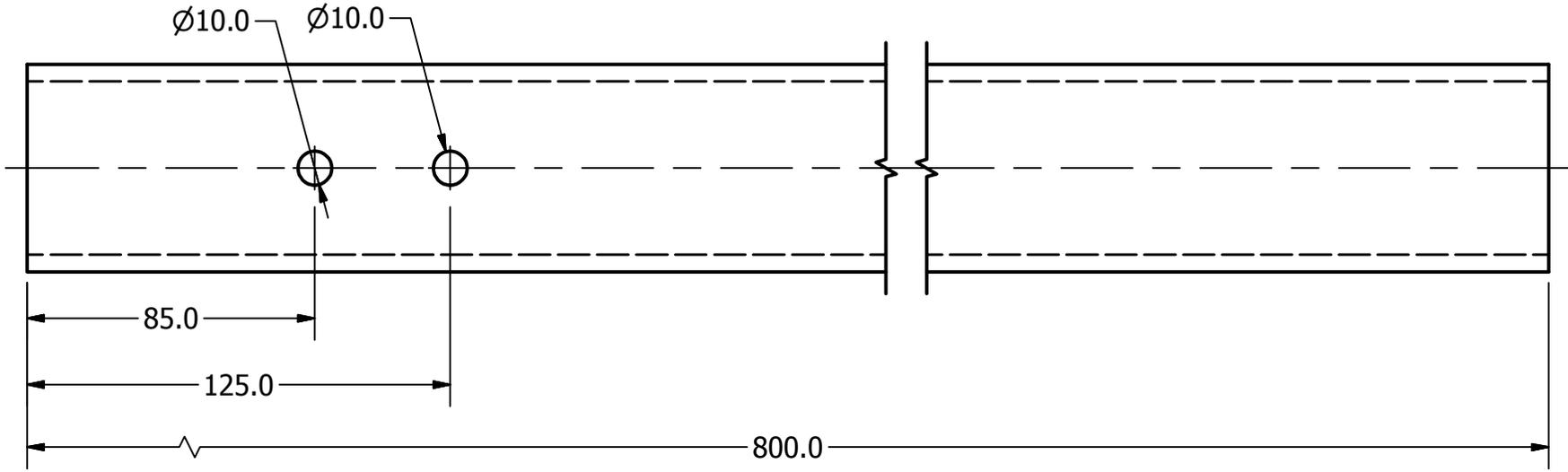
FECHA:

28/08/2017

Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

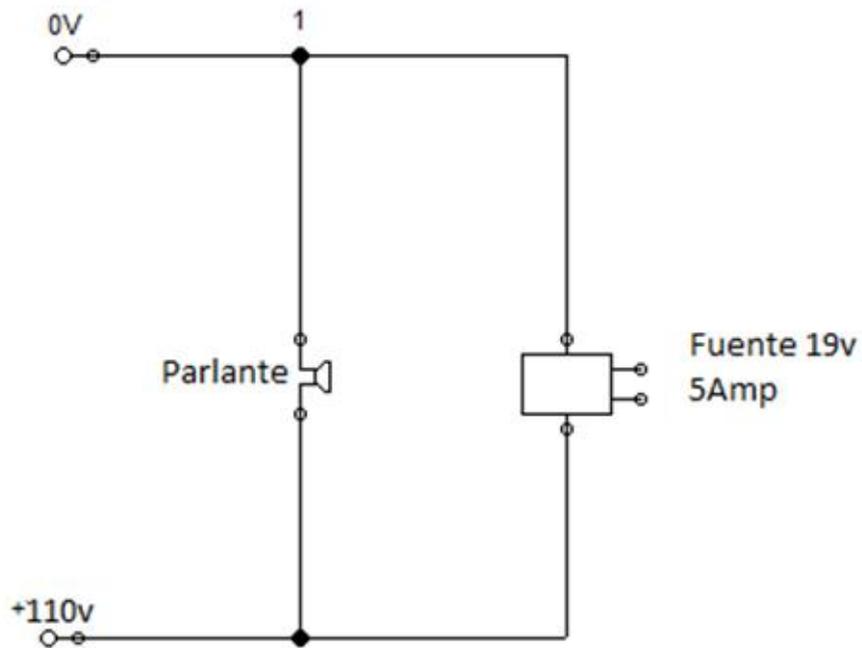
Nombre plano: Tubo longitud 400 mm

ANEXO L
TUBO LONGITUD 800 MM 1 PULG (PROPUESTA)

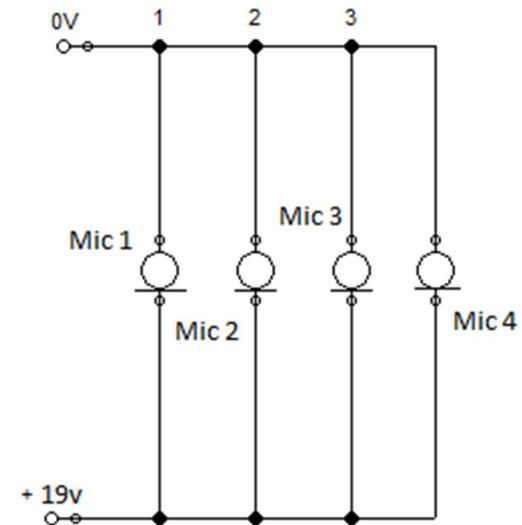


| | | | |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| 3 | 1 | Tubo 800 mm | Tubo 1" A INOX espesor 4 mm |
| ITEM | QTY | PART NUMBER | MATERIAL |
| FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | | | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS | | | |
| | FECHA: | Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto | |
| | 24/08/2017 | Nombre plano: Tubo longitud 800 mm | |

ANEXO M
PLANO ELÉCTRICO



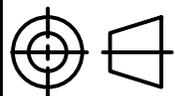
Conexionado de la fuente con los micrófonos



FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS



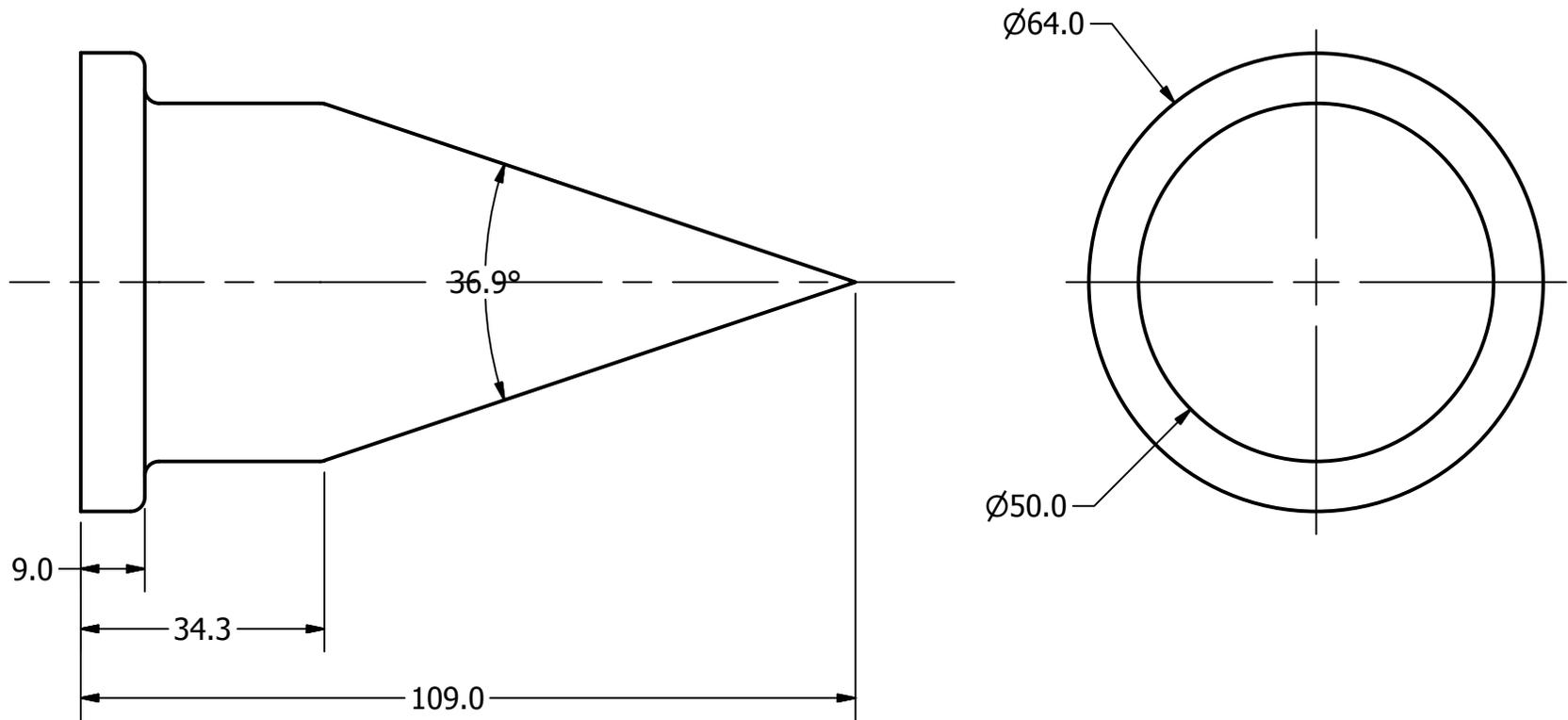
FECHA:

28/08/2017

Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

Nombre plano: Plano eléctrico

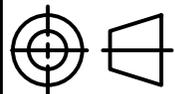
ANEXO N
TAPÓN ESPUMA



| | | | |
|------|-----|-------------|---------------------------|
| 9 | 1 | Cono espuma | Espuma de fibra de vidrio |
| ITEM | QTY | PART NUMBER | MATERIAL |

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS

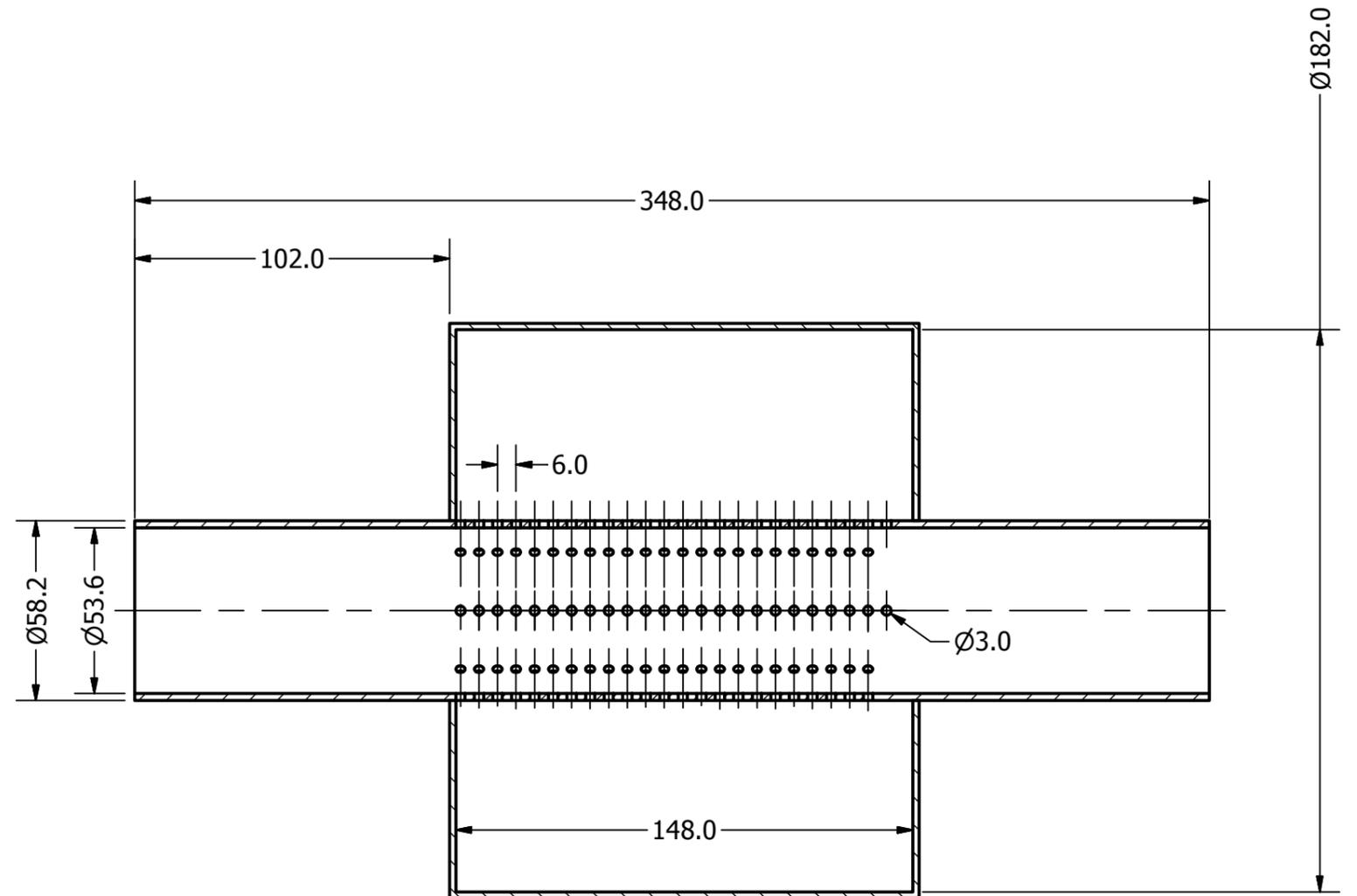
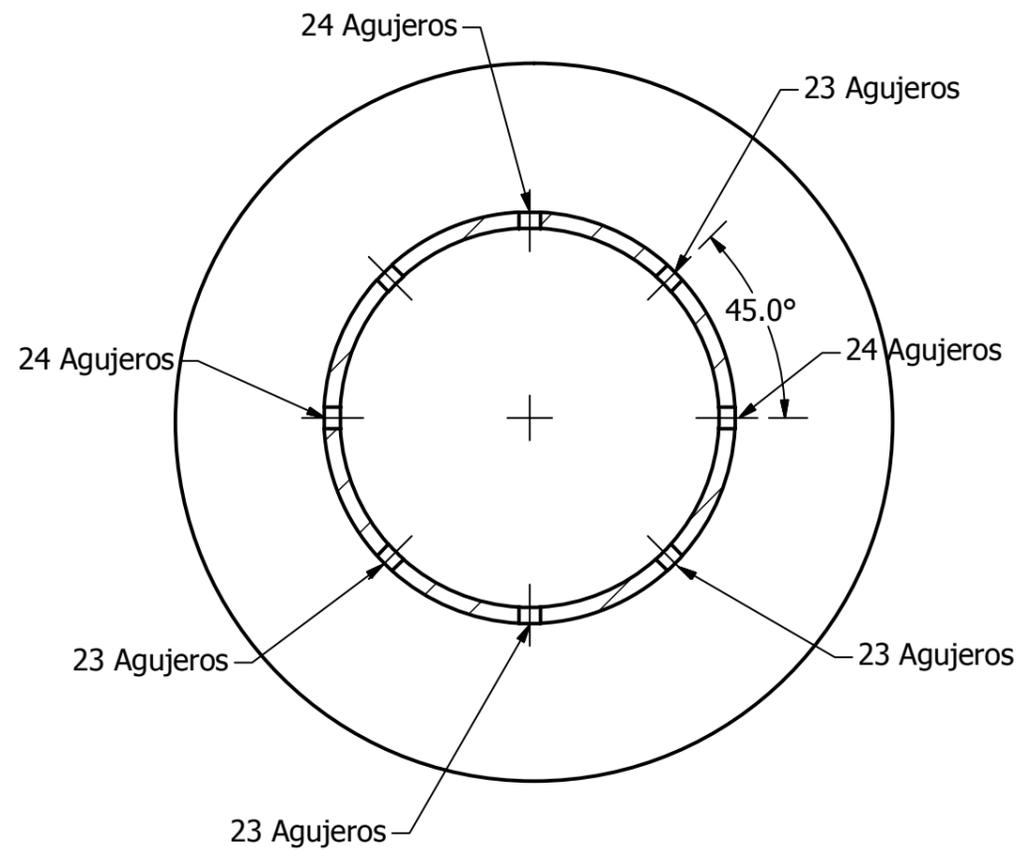


FECHA:
28/08/2017

Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

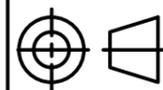
Nombre plano: Tapón espuma

ANEXO O
SILENCIADOR



FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
 FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ACÚSTICAS



FECHA:
28/08/2017

Elaboró: Cristian Márquez, Mateo Pinto

Nombre plano: Silenciador

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|  | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | Código: |
| | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA | Versión 0 |
| | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Nosotros Cristian Camilo Márquez y Granada Nicolás Mateo Pinto Jiménez en calidad de titulares de la obra Diseño de un banco experimental para medición de la pérdida de transmisión acústica, elaborada en el año 2016, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

| | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|  | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | Código: |
| | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA | Versión 0 |
| | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|  | Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor. | <input type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor. | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma. | <input type="checkbox"/> |

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

| AUTORIZAMOS | SI | NO |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso | X | |
| La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación | X | |

| Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso. | SI | NO |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| | | X |

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 9 días del mes de noviembre del año 2017.

LOS AUTORES:

Autor 1

| | |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombres | Apellidos |
| Cristian Camilo | Márquez Granada |
| Documento de identificación No | Firma |
| 1072668973 |  |

Autor 2

| | |
|---------------------------------------|---------------------|
| Nombres | Apellidos |
| Nicolás Mateo | Pinto Jiménez |
| Documento de identificación No | Firma |
| 1014266702 | Nicolás Mateo Pinto |