



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN PARA LA  
DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN Y STL DE  
MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN EN ECUADOR, POR MEDIO DE  
UN TUBO DE IMPEDANCIA Y MEDICIONES IN SITU.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos  
para optar por el título Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor Guía

Ing. Marco Argoti

Autores

Daniel Cueva

Carlos García

Año

2014

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con los estudiantes, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Ing. Marco Antonio Argoti

Ingeniero en Acústica

CI: 171063119-1

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes

Fernando Daniel Cueva Mosquera  
CI: 1717178139

Carlos Alberto García Armijos  
CI: 1716311038

## RESUMEN

El presente trabajo es explora diferentes de técnicas de caracterización de absorción acústica de materiales por medio del uso de un tubo de Kundt y mediciones in situ (ToneBurst). Se han desarrollado programas de cómputo experimentales y una metodología para la adquisición y procesamiento de señales de audio. El primer paso de la investigación consistió en realizar una recopilación de los fundamentos teóricos de las diferentes técnicas de medida como son: método de medición de absorción a base de *standing wave*, medición de absorción en tubo de Kundt utilizando dos micrófonos y funciones de transferencia, método de medición de absorción y transmisión de sonido en tubo de Kundt por medio de 4 micrófonos y métodos de mediciones in situ. El segundo paso fue realizar la implementación de los métodos más representativos, se diseñó y construyó un tubo de Kundt modular, el cual es útil para satisfacer los requerimientos de la medición por medio de 2 y 4 micrófonos. En las pruebas de funcionamiento del tubo se midieron dos materiales a base de fibra de vidrio y en la comparación con los datos proporcionados por el fabricante, los resultados obtenidos fueron muy similares para ciertas frecuencias como los 1000 Hz en la cual la diferencia entre el resultado presentado por el fabricante y el medido varían en menos de 3 décimas. La caracterización de los parámetros acústicos mediante el método de medición In Situ, se realizó con un material absorbente poroso como muestra, constatando que los resultados obtenidos en la medición y aquellos entregados por el fabricante son muy similares a partir de los 1000 Hz. Sin embargo la comparación es sólo referencial debido a que los datos entregados por el fabricante son obtenidos mediante la normativa ISO 354.

## ABSTRACT

The present work is an exploration of techniques for measuring acoustic parameters of materials using Kundt's tube and in situ measurements (Tone Burst). We have also developed an experimental methodology and software for the acquisition and processing of information. First, it has been carried a compilation of the theoretical basis of the different techniques such as: measuring method of absorption based on the standing wave method, measuring absorption using a Kundt's tube with two microphones and transfer functions, method of measurement of absorption and sound transmission on a Kundt tube using 4 microphones and methods of in situ measurements. Following this, an implementation of the most representative methods was performed, a Kundt's tube has been designed and constructed, which is useful to meet the requirements of the measurement by 2 and 4 microphones. Two materials made of fibber glass were measured on the tube and then they were compared with the data provided by the manufacturer, the results were very similar to certain frequencies such as 1000 Hz in which the difference between the result presented by the manufacturer and the one obtained on the tube was less than 3/10. For the in situ method, a measurement of a porous acoustic material was made, finding that the results, from 1000 Hz, measured were very similar with the data given by the manufacturer, showing minor differences due to the nature of the measurement technique, because the manufacturer's data was obtained by the method described on the ISO-354.

# ÍNDICE

1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes: .....	2
1.2. Alcance: .....	2
1.3. Justificación: .....	3
1.4. Hipótesis.....	3
1.5. Objetivo General.....	4
1.6. Objetivos específicos. ....	4
2. Capítulo I. Marco Teórico.....	5
2.1. Métodos de Medición de parámetros acústicos por medio de tubos de impedancias .....	5
2.1.1. Método de Impedancia u Onda Estacionaria (Standing Wave tube measurement). ....	5
2.1.2. Método de Función de Transferencia 2 micrófonos.....	7
2.1.3. Método de Medición de coeficientes de transmisión (STL) .....	9
2.2. Descripción de los métodos de medición “In Situ” .....	13
2.3. Breve desarrollo histórico de los métodos de medición “In Situ” .....	14
2.3.1. Métodos de medición in Situ. ....	15

3. Capítulo II. Fundamentos de Procesamiento de Señales.....	21
3.1. Definiciones y Justificación teórica .....	21
3.1.1. Función de transferencia .....	21
3.1.2. Espectro Cruzado.....	22
3.1.3. Correlación Cruzada.....	23
3.1.4. Densidad espectral energética cruzada .....	23
3.1.5. Función de transferencia estimada.....	24
3.1.6. Mediciones In Situ .....	24
3.1.7. Ventana temporal Adrienne.....	26
4. Capítulo III. Diseño del Tubo de Kundt .....	28
4.1. Construcción del Tubo .....	29
4.1.2. Dimensiones.....	31
4.1.3. Elementos adicionales.....	31
4.2. Equipamiento .....	33
4.2.1. Fuente de Sonido .....	33
4.2.2. Amplificador de señal .....	36
4.2.3. Micrófonos.....	37
4.2.4. Interfaz de Adquisición de Datos .....	38
4.2.5. Señal de Prueba.....	40

5. Capítulo IV. Software de Mediciones .....	41
5.1. Software en MAX MSP .....	41
5.1.1. Etapa de Adquisición de Datos .....	41
5.1.2. Módulo de entrada.....	42
5.1.3. Módulo de reproducción de señal de prueba .....	43
5.1.4. Módulo de grabación .....	44
5.2. Software en Matlab .....	48
5.2.1. Interfaz Gráfica .....	48
5.2.2. Software de mediciones para el método de dos micrófonos .....	49
5.2.3. Software de mediciones para el método de cuatro micrófonos .....	54
5.2.4. Software para el método de medición In Situ .....	59
6. Capítulo V. Procedimiento de Medición.....	65
6.1. Procedimiento de medición Tubo de Kundt.....	65
6.1.1. Montaje.....	65
6.1.2. Adquisición de datos .....	65
6.1.3. Post Procesamiento de Información Tubo de Kundt .....	72
6.2. Procedimiento de medición “In Situ” .....	77
6.2.1. Consideraciones.....	77
6.2.2. Procedimiento de Medición .....	77
6.2.3. Adquisición de datos Tone Burst:.....	77



7. Capítulo VI. Resultados y Análisis de Datos .....	81
7.1. Resultados .....	81
7.1.1. Método de 2 micrófonos .....	81
7.1.2. Método de 4 micrófonos .....	105
7.2. Análisis de datos .....	108
7.2.1. Método 2 micrófonos .....	108
7.2.2. Método 4 micrófonos .....	110
7.2.3. Método Tone Burst .....	111
8. Capítulo VII. Conclusiones y Recomendaciones .....	112
8.1. Conclusiones .....	112
8.2. Recomendaciones .....	114
9. Referencias.....	116
10. Anexos.....	118
10.1. Anexos 1. Fotografías del proceso e instrumentos de medición.....	119
10.2. Anexo 2. Código de Programación para la generación de la señal MLS .....	127
10.3. Planos de Tubo de Kundt.....	130
10.4. Tubo de Impedancia a base de Teflón plástico .....	131

10.4.1. Medición Black Theater .....	131
10.4.2. Análisis de Resultados tubo de teflón plástico .....	143
10.5. Análisis económico. ....	146

## **1. Introducción**

En Ecuador no existen laboratorios de medición de materiales cuya finalidad sea obtener datos de parámetros acústicos. Tales infraestructuras como salas anecóicas, salas reverberantes o salas de cálculo de aislamiento acústico requieren de una inversión económica significativa y dada la falta de normativas de construcción o estándares de confort acústico, no se justifica este tipo de inversión. Es por esto que los métodos experimentales a base de mediciones in situ o utilizando tubos de impedancias cobran un papel importante, ya que sus costos de implementación son mucho más bajos al no requerir de espacios tan específicamente controlados, y brindan datos muy cercanos a la realidad que pueden servir de referencia al momento de realizar investigaciones, análisis o desarrollo de nuevos materiales.

## **2. Antecedentes:**

La caracterización más eficiente del comportamiento acústico de materiales constructivos se lo logra mediante el análisis de en laboratorios con muestras reales de estos, los parámetros permiten a los diseñadores e ingenieros prever el comportamiento acústico de un recinto o de una partición.

Actualmente existen varios métodos de medidas acústicas, cuyo procedimiento consiste en analizar una muestra de un material cuyo tamaño dependerá de requerimientos del método empleado; estos de ellos están estandarizados en normas ISO y ASTM, por ejemplo el método de la cámara reverberante (ASTM C384/ISO 354) y el método del Tubo de Kundt (ASTM e1050/ ISO 10534-2)

Además, existen métodos alternativos para realizar mediciones “in situ”, que permiten obtener información de cómo afecta el montaje o tipo de instalación del material a las características acústicas de mismo.

La Universidad de la Américas posee un Tubo de Impedancia para medir coeficientes de absorción de materiales, el cual será tomado como referencia en el diseño del nuevo Tubo de Impedancia para el desarrollo de este proyecto.

## **3. Alcance:**

El alcance de este trabajo de titulación se basa en realizar una recopilación de información teórica de las diferentes técnicas de medición por medio de métodos de Kundt y mediciones in Situ (ToneBurst), diseñar y construir un tubo de Kundt, diseñar un software y metodología experimental para poder realizar la mediciones y procesamiento de información para la caracterización de los coeficientes de absorción, reflexión, impedancia, y pérdida de transmisión (TL) de materiales utilizados en la construcción en Ecuador.

#### **4. Justificación:**

Los materiales acústicos pueden ser utilizados en sectores como la construcción, industria, estudios de grabación, entre otros. En Ecuador existen diversos materiales utilizados para la construcción de elementos acústicos; sin embargo no se cuenta con los datos técnicos de las propiedades como coeficientes de absorción, pérdida por transmisión e impedancia, por lo que se dificulta el diseño e implementación con fines profesionales. La caracterización de materiales disponibles en nuestro país determinará el inicio de una verdadera planificación acústica en la construcción; lo que ayudará tanto a técnicos especializados e ingenieros, como a autoridades a realizar un control oportuno y real de los parámetros antes mencionados.

#### **5. Hipótesis**

La hipótesis planteada en este proyecto consiste en que se puede realizar una implementación de métodos de medición basados en tubo de Kundt y mediciones in situ, utilizando funciones de transferencia, sustracción y técnicas de procesamiento de señales para la obtención de parámetros acústicos de materiales.

## **6. Objetivo General.**

Diseñar e implementar métodos de medición para la caracterización de las propiedades acústicas de materiales utilizados en la industria de la construcción en Ecuador.

## **7. Objetivos específicos.**

1. Diseñar y construir un tubo de impedancia, de acuerdo a la norma ASTM / ISO.
2. Diseñar e implementar un método para la cuantificación del parámetro de absorción acústica de materiales.
3. Incorporar un software de procesamiento de señales para la generación de ondas
4. Explorar métodos y softwares de procesamiento digital de señales para el análisis de mediciones hechas en el tubo de Kundt.
5. Diseñar e implementar un sistema computacional experimental para la generación de ondas a ser utilizadas para las mediciones en el tubo de Kundt.
6. Diseñar e implementar un sistema computacional experimental para el análisis de ondas a ser utilizadas en el tubo de Kundt.
7. Verificar los resultados de las mediciones echas en el tubo de Kunt mediante comparaciones con valores de absorción de materiales normados.
8. Implementar el método ToneBurst para la medición del coeficiente de absorción in situ.
9. Diseñar e implementar un sistema computacional experimental para la generación de ondas a ser utilizadas para las mediciones en el método ToneBurst.
10. Diseñar e implementar un sistema computacional experimental para el análisis de ondas a ser utilizadas en el método ToneBurst.

## 8. Capítulo I. Marco Teórico

### 8.1. Métodos de Medición de parámetros acústicos por medio de tubos de impedancias

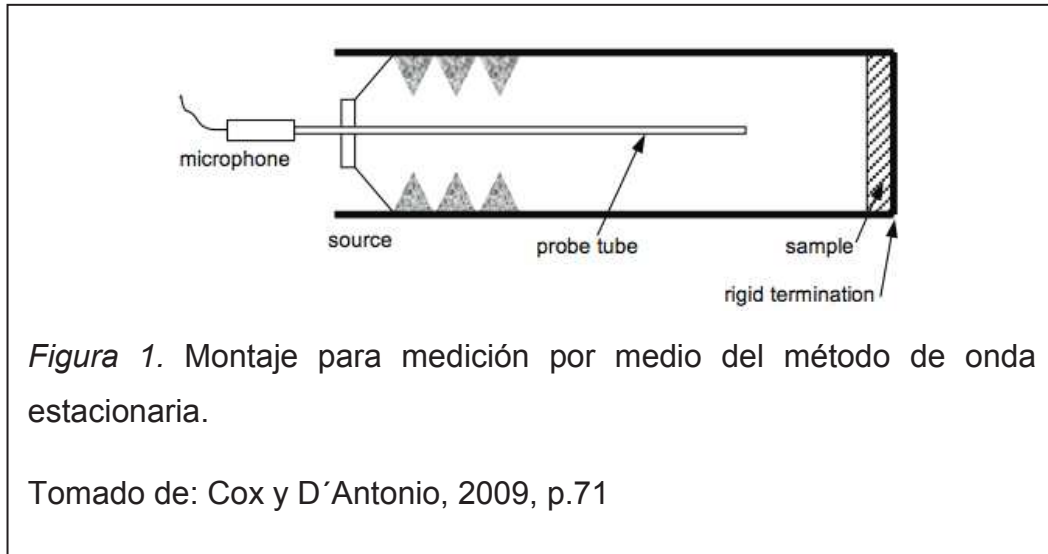
Los métodos basados en mediciones en tubos de Impedancia permiten realizar caracterización de los parámetros acústicos como la absorción y transmisión del sonido de forma más económica y práctica en situaciones académicas, investigación de nuevos materiales. Esto es debido a que se necesitan menos recursos para implementar este tipo de pruebas y los tamaños de las muestras son considerablemente pequeños, lo que resulta muy práctico.

Los métodos derivados del Tubo de Impedancia son:

#### 8.1.1. Método de Impedancia u Onda Estacionaria (*Standing Wave tubemeasurement*).

Este método consiste en realizar un análisis de la onda estacionaria que se produce dentro del tubo. Para esto se tiene que tener el montaje descrito en la Figura 1.

En este método un altavoz emite la señal de prueba, una onda plana se propaga a lo largo del tubo hasta chocar con la muestra ubicada en el extremo derecho en el cual se refleja, creando así una onda estacionaria en el tubo. La impedancia de la muestra altera como se refleja el sonido, y por medio de la medición de las propiedades de la onda estacionaria se pueden calcular el coeficiente de absorción e impedancia de la muestra.



Para este método es muy importante que se generen ondas planas dentro del tubo y se deben tomar ciertas consideraciones como las siguientes:

- Se debe minimizar la atenuación del sonido dentro del tubo. Para esto se debe tomar muy en cuenta los materiales a utilizar para la fabricación del tubo y la superficie interna debe ser lisa.
- La sección transversal del tubo debe ser constante, ya sea un tubo cuadrado o circular.
- Las posiciones de los micrófonos deberán ser lo suficientemente alejadas del altavoz emisor de la señal de prueba para que se logre una propagación de ondas planas.

Aunque este método no presenta complicaciones en su implementación, presenta desventajas prácticas ya que la medición se debe serializar frecuencia por frecuencia de manera consecutiva, lo cual aumenta el tiempo necesario para realizar la medición de un material.

Se debe tener en cuenta que van a existir dos ondas en el tubo, una emitida por el altavoz y la onda reflejada. La presión en el tubo cuando se haya estabilizado la señal viene dada por

$$p = A(e^{jkz} + Re^{-jkz}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde: R es el coeficiente de reflexión



k es el número de onda

Se asume que la muestra está en  $z=0$

En la ecuación 1, el primer término está dado por la onda incidente, mientras que el segundo término tiene relación con la onda reflejada

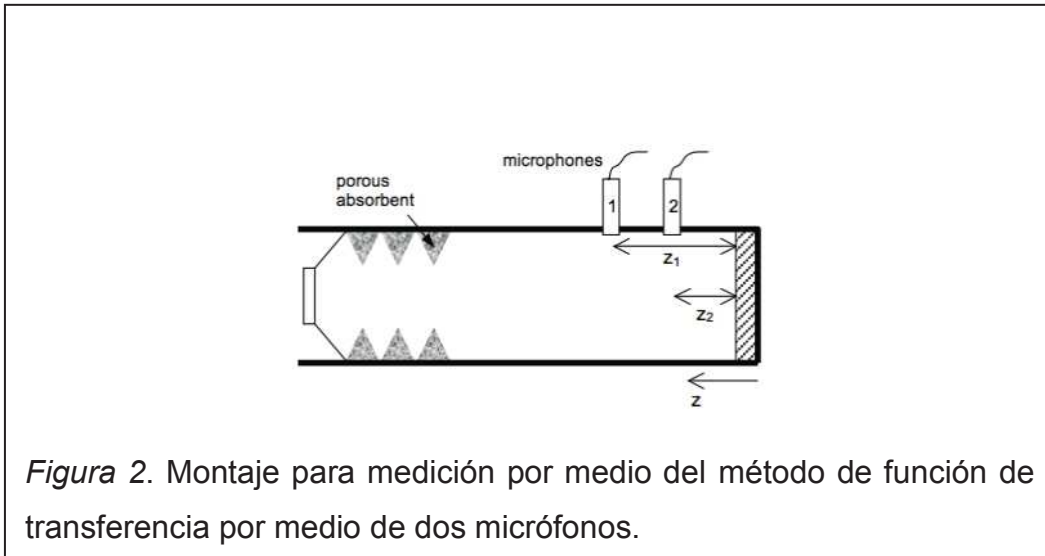
Para el método de onda estacionaria, es necesario medir las presiones mínimas y máximas. La presión máxima se da cuando el primero y segundo término de la Ecuación 1 se encuentran en fase, mientras que la presión mínima se da cuando los términos de la Ecuación 1 se encuentran desfasados 180 grados.

Estas presiones se las mide por medio de un micrófono tipo probeta como se indica en la Figura 1. Una vez que se obtienen los datos de  $p_{\max}$  y  $p_{\min}$  se puede calcular la razón entre  $p_{\max}$  y  $p_{\min}$ , despejando se obtiene el coeficiente de reflexión.

$$S = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{1 + |R|}{1 - |R|} \quad (\text{Ecuación 2})$$

### 8.1.2. Método de Función de Transferencia 2 micrófonos.

El método de 2 micrófonos facilita el proceso de medición, en comparación al método de ondas estacionarias. Este proceso utiliza funciones de transferencia y permite emplear una señal de prueba que contenga información en un determinado rango de frecuencias, ya sea ruido rosa, blanco o un barrido de frecuencias, por lo que permite la obtención de información de absorción sonora de todas las frecuencias medidas. El montaje del equipo de medición se muestra a continuación:



Las incógnitas presentes en la Ecuación 1 son la magnitud y la fase del coeficiente de reflexión. Se utilizan dos micrófonos, puesto que es necesario tomar los valores de presión en dos puntos distintos, y por medio de estas señales tanto el coeficiente de reflexión, el valor de la impedancia y el coeficiente de absorción del material son obtenidos.

Este método tiene la ventaja que, si existe algún error durante la medición generado por una inadecuada posición de los micrófonos, se obtienen valores que no tienen representación física, por lo que el error se evidencia de forma inmediata. (Cox y D'Antonio, 2009, p.75)

La función de transferencia se la define como la razón de presiones entre las posiciones de los micrófonos, por lo que está dada por la siguiente expresión.

$$H_{12} = \frac{e^{jkz_2} + Re^{-jkz_2}}{e^{jkz_1} + Re^{-jkz_1}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

De la cual se puede obtener el coeficiente de Reflexión por medio de la ecuación.

$$R = \frac{H_{12}e^{jkz_1} - e^{jkz_2}}{e^{-jkz_2} - H_{12}e^{-jkz_1}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

La separación entre los micrófonos es un factor importante en este método, debido a que permite determinar tanto la frecuencia superior como la inferior máximas de funcionamiento del Tubo de Impedancia.

La frecuencia más baja a ser medida en el tubo viene dada por la Ecuación 5.

$$f_l = \frac{c}{20|z_1 - z_2|} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Si la separación entre los micrófonos es muy pequeña, la variación entre la presión obtenida en un punto de medición con la del otro punto de medición, no va a ser representativa y los datos obtenidos no van a ser correctos. (Cox y D'Antonio, 2009, p.76)

La frecuencia más alta para la cual va a entregar datos coherentes el tubo, viene dada por la ecuación.

$$f_u = \frac{0.45c}{|z_1 - z_2|} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Para llevar a cabo este método se necesita un analizador FFT de dos canales, de esta manera se pueden realizar los cálculos para obtener las funciones de transferencia, utilizando dos micrófonos.

### **8.1.3. Método de Medición de coeficientes de transmisión (STL)**

Se pueden realizar mediciones de coeficientes de transmisión (STL) de materiales si se realizan algunas modificaciones al diseño de los tubos anteriormente mencionados. Para poder llegar a determinar los valores de transmisión de un material, se necesita realizar un montaje como el que se muestra en la Figura 3.

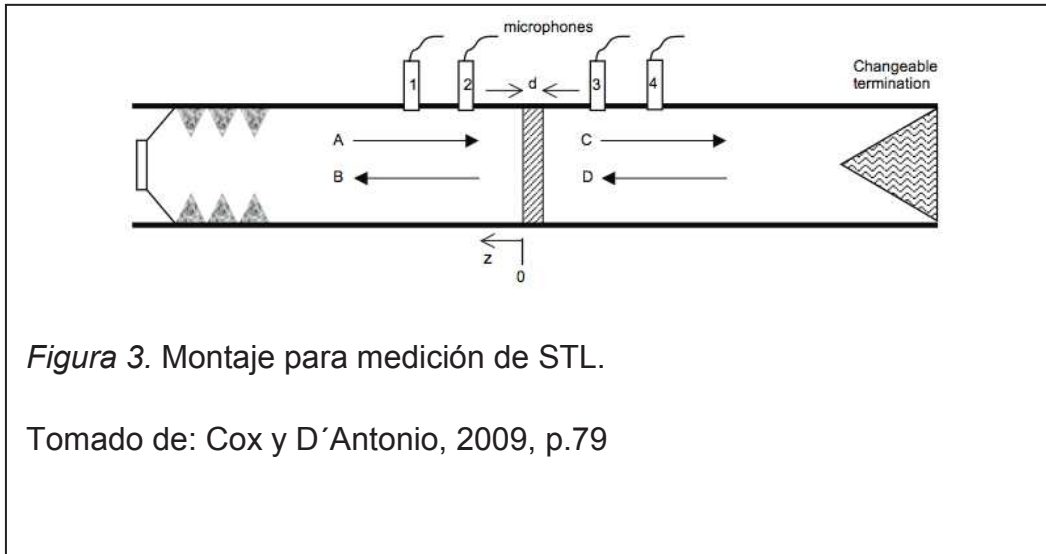


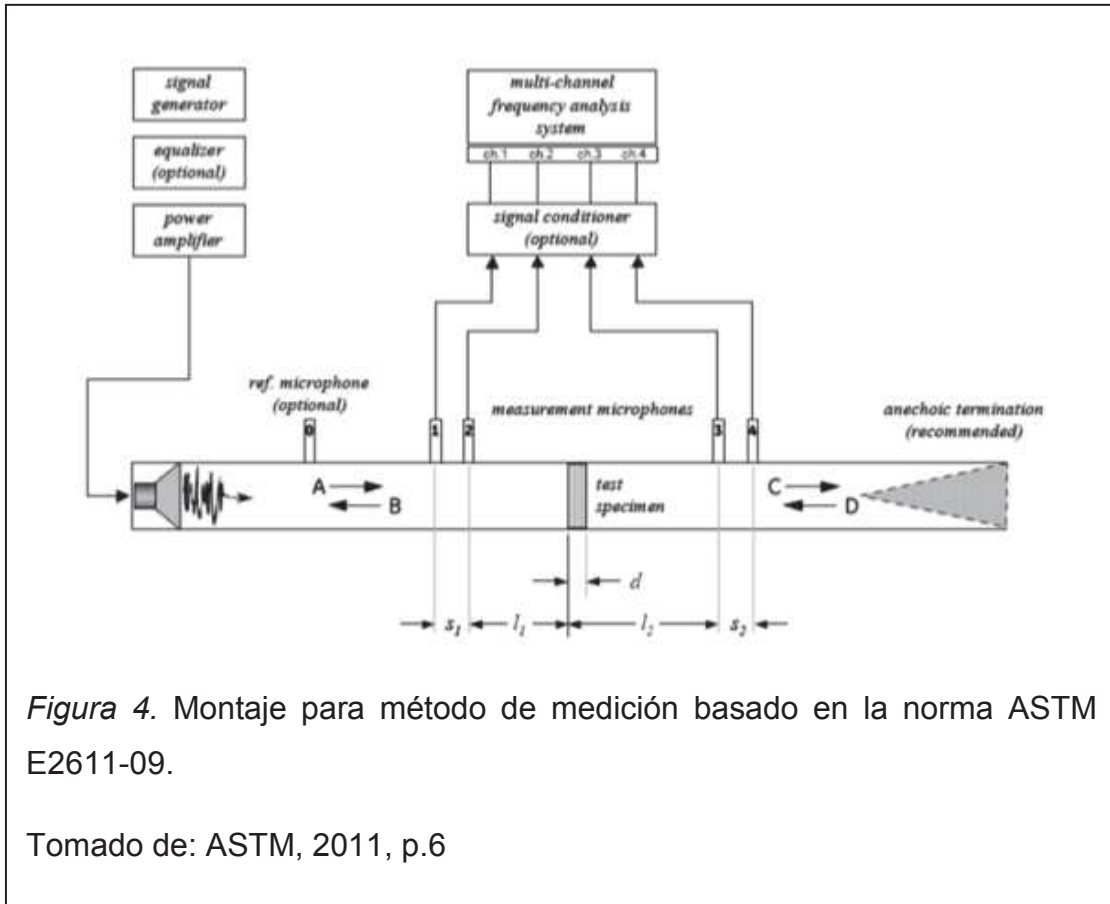
Figura 3. Montaje para medición de STL.

Tomado de: Cox y D'Antonio, 2009, p.79

Hay dos formas de realizar la medición de este parámetro, la primera es utilizando la terminación anecóica al final del tubo y también se puede realizar el método de dos terminaciones, el cual entrega datos mucho más confiables y reduce el margen de error en las mediciones. El método de dos cargas o terminaciones consiste en realizar mediciones con terminación anecóica y también realizar las mediciones utilizando terminación rígida, esto permite poder realizar mediciones en diferentes tipos de muestras, ya sean homogéneas, no homogéneas o lisas en su superficie.

Este método se lo tiene normado por la ASTM (*American Society for Testing Materials*) bajo la normativa E2611 – 09 *Standard Method for Measurement of Normal Incident Sound Transmission of Acoustical Materials Base on the transfer Matrix Method*. En esta normativa se indican los procedimientos a seguir para poder realizar este tipo de mediciones.

Para esto se necesita realizar un montaje como el que se indica en la Figura 4.



Las amplitudes de las presiones A y D de las componentes de ondas en el tubo se encuentran definidas en la Figura 3. La velocidad y presión al lado izquierdo de la muestra, se encuentra determinado por las ecuaciones 7 y 8.

$$p = Ae^{jkz} + Be^{-jkz} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$u = \frac{1}{\rho c}(Ae^{jkz} - Be^{-jkz}) \quad (\text{Ecuación 8})$$

La velocidad y presión al lado derecho de la muestra, se encuentra determinado por las ecuaciones 9 y 10.

$$p = Ce^{jkz} + De^{-jkz} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$u = \frac{1}{\rho c}(Ce^{jkz} - De^{-jkz}) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Utilizando las presiones obtenidas por cada posición de micrófono se pueden obtener las expresiones matemáticas que describen la amplitud de las presiones.

$$A = \frac{p(z_1)e^{-jkz_2} - p(z_2)e^{-jkz_1}}{2j \sin(k(z_1 - z_2))} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$B = \frac{p(z_2)e^{-jkz_1} - p(z_1)e^{-jkz_2}}{2j \sin(k(z_1 - z_2))} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$C = \frac{p(z_3)e^{-jkz_4} - p(z_4)e^{-jkz_3}}{2j \sin(k(z_3 - z_4))} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$D = \frac{p(z_4)e^{-jkz_3} - p(z_3)e^{-jkz_4}}{2j \sin(k(z_3 - z_4))} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Las amplitudes anteriormente descritas permiten evaluar la presión y velocidad, tanto antes como después de la muestra. La propagación a través de la muestra se la puede interpretar a través de la matriz de transferencia.

$$\begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{z=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{z=-d} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde  $p$  y  $u$  son incógnitas. Para obtener el coeficiente de transmisión es necesario obtener los valores  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  y  $T_{22}$  ya que son los que describen como la muestra reacciona a la señal de prueba. Como se había descrito anteriormente, se deben realizar dos tipos de mediciones, una con la terminación rígida y otra con la terminación anecóica, una vez obtenidos estos datos la expresión toma la forma de la Ecuación 16.

$$\begin{bmatrix} p^r & p^o \\ u^r & u^o \end{bmatrix}_{z=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^r & p^o \\ u^r & u^o \end{bmatrix}_{z=-d} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde los superíndices r permiten representar los valores con terminación rígida y los superíndices o permiten identificar los valores obtenidos con terminación anecóica.

Los elementos de la matriz de transferencia indican el comportamiento del sonido al propagarse por la muestra, pero estos elementos incluyen valores de velocidad los cuales no intervienen en la definición del coeficiente de transmisión, por lo cual se tiene que reemplazar las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 en la Ecuación 15 para obteniendo la siguiente expresión. (Cox y D'Antonio, 2009, p.79)

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} + T_{22} \right) e^{-jkd} \\ \frac{1}{2} \left( T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} - \rho c T_{21} - T_{22} \right) e^{-jkd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( T_{11} - \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} - T_{22} \right) e^{jkd} \\ \frac{1}{2} \left( T_{11} - \frac{T_{12}}{\rho c} - \rho c T_{21} + T_{22} \right) e^{jkd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}$$

(Ecuación 17)

La Ecuación 17 es válida para cualquier tipo de terminación. Al ser una terminación perfectamente anecóica se puede asumir que  $D=0$ . Sabiendo que el STL está dado por  $20 \log(A/C)$ , se puede obtener la Ecuación 18 que modela el STL.

$$TL = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} + T_{22} \right| \right) \quad \text{(Ecuación 18)}$$

## 8.2. Descripción de los métodos de medición "In Situ"

Las principales desventajas de las medidas de parámetros acústicos en tubos de impedancia son que no permiten las mediciones en incidencia oblicua, los resultados se ven afectados por un montaje defectuoso de la muestra y resulta complicado obtener muestras pequeñas de varios elementos constructivos

dados la naturaleza de los materiales. Además, el problema de la caracterización acústica de materiales mediante un tubo de impedancia es que puede entregar resultados erróneos, cuando la elasticidad del material contribuye al campo sonoro (Lauriks, Jansens, Allard, De Geetere, Vermeir, 2011, p.1-2)

Los métodos de medición in Situ han sido una alternativa en la medición de parámetros acústicos de los materiales, gran cantidad de ellos se han implementado y diversificado en su procedimiento de medición.

### **8.3. Breve desarrollo histórico de los métodos de medición “In Situ”**

Uno de los primeros trabajos se lo realizó en 1933, cuando Cremer (1933, pp. 302-315) comienza a investigar con ondas estacionarias sobre una superficie reflectante. Un año más tarde Spandöck (1934, pp. 328-344) trabaja con tonos cortos de 5 milisegundos en frecuencias de 800 Hz y 4000 Hz, logrando separar la señal reflejada de la señal generada.

En 1979, el trabajo de Davies y Mulholland (*An impulse method of measuring normal impedance at oblique incidence*) se utilizan ya dos señales, una como referencia donde no se capta reflexión alguna y la otra con la información de la señal reflejada.

A inicios de los años 90 se utiliza por primera vez la técnica de medición basada en señales MLS (*MaximunLegthSequence*) por los investigadores Heinz/Wilms (1991, pp. 28-29) y Garai (1993, pp. 119-139) para medición de absorción de materiales. Esta técnica permite medir la respuesta impulsiva de un sistema lineal y presenta cierta inmunidad a ruidos externos, pues puede beneficiarse de ellos en su generación de señales, por lo que puede ser usada en mediciones acústicas en entornos muy ruidosos sin comprometer los resultados (Bjor, 2000, p.1)

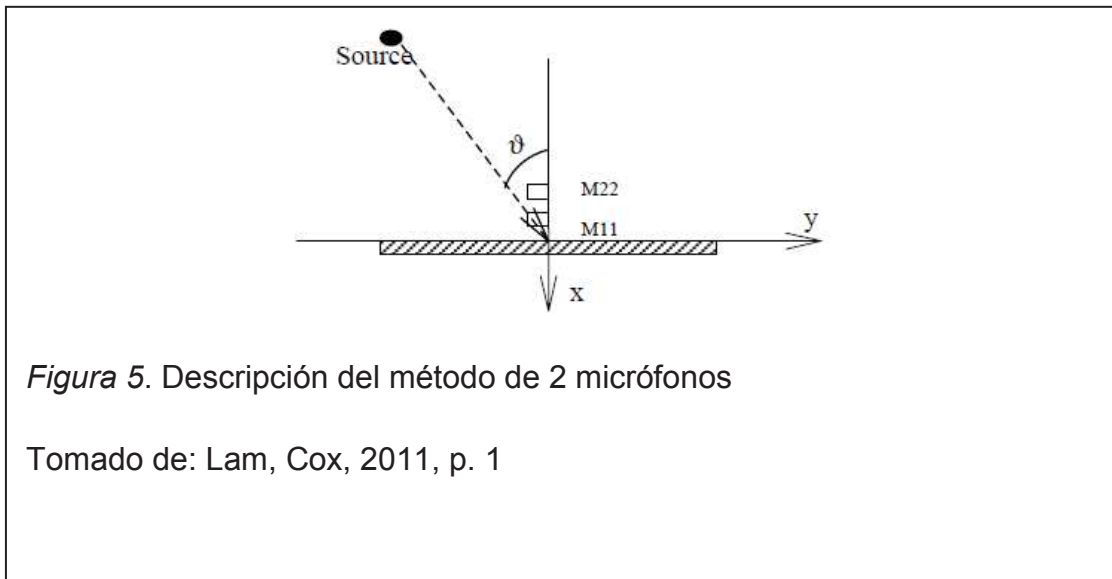
Este método ha sido desarrollado para su implementación en estándares como en la normativa ENV 1793-5, que será la principal metodología a implementar



en este capítulo. Sin embargo se mostrarán otros métodos, que no se implementarán prácticamente. Cabe mencionar que todos los métodos mencionados anteriormente se basan en asumir ondas planas.

### 8.3.1. Métodos de medición in Situ.

#### 8.3.1.1. Método de 2 micrófonos en un eje con una fuente desplazada.



Este método está basado en:

$$p_i = Ae^{-jk_x x_i - jk_y y_i} + RAe^{+jk_x x_i - jk_y y_i} \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$R = \frac{p_1/p_2 e^{jkd_2 \cos \theta} - e^{jkd_1 \cos \theta}}{e^{-jkd_1 \cos \theta} - p_1/p_2 e^{-jkd_2 \cos \theta}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde;

d1: distancia de la muestra al micrófono M1

d2: distancia de la muestra al micrófono M2

p1: presión en el micrófono M1

p2: presión en el micrófono M2

k: número de propagación de sonido (*wavenumber*)

$\theta$ : ángulo de incidencia

$$k_x: k \cos \theta$$

$$k_y: k \sin \theta$$

Una vez obtenida la impedancia, se puede calcular la absorción mediante

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (\text{Ecuación 21})$$

### 8.3.1.2. Micrófono y fuente equidistantes

En este método de medición, se disponen un altavoz y un micrófono separados una distancia  $d$  con respecto a un eje, formando ángulos iguales con respecto a la superficie a medir, tal como se muestra en la figura.

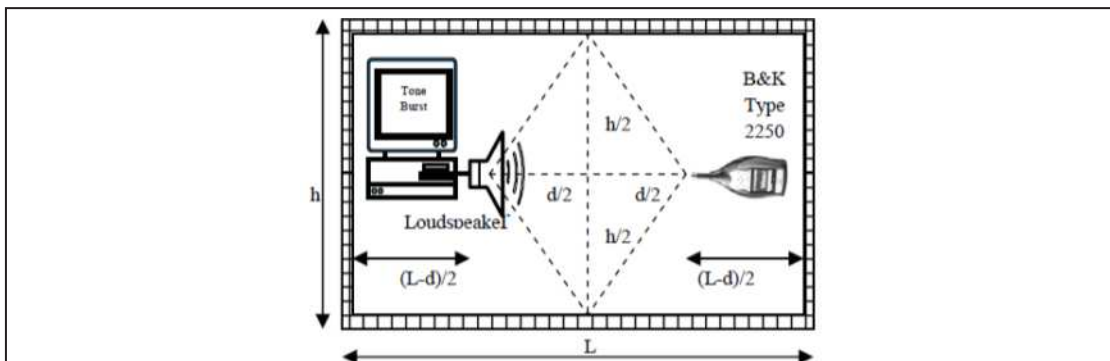


Figura 6. Descripción del Método- fuente

Tomado de Quintero, p.4

La duración de la señal de prueba deberá ser:

$$t \leq \frac{2l-d}{c} = \frac{\sqrt{h^2+d^2}-d}{c} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Despejando la distancia se obtiene:

$$d = \frac{h^2 - c^2 t^2}{2ct} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Bajo el criterio que la distancia entre el micrófono y el altavoz sea al menos una longitud de onda ( $d \geq ct$ )

$$ct = \frac{h^2 - c^2 t^2}{2ct} \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$t = \frac{\sqrt{3}h}{3c} \quad (\text{Ecuación 25})$$

La frecuencia mínima será recíproca al período

$$f_{min} = \frac{\sqrt{3}c}{h} \quad (\text{Ecuación 26})$$

En la distancia de los transductores,

$$d = ct = c \frac{\sqrt{3}h}{3c} = \frac{\sqrt{3}h}{3} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Esta distancia es la distancia óptima entre los transductores para un cuarto en forma de paralelepípedo para una longitud mínima  $h$ .

Tomando en cuenta la longitud total del cuarto  $L$ , para determinar la longitud máxima del pulso antes de captar la reflexión de las paredes posteriores, éste debe ser menor a la diferencia entre el tiempo en que llega la primera reflexión y el tiempo en que se capta el sonido directo; así

$$t \leq \frac{L-d}{c} [s] \quad (\text{Ecuación 28})$$

A partir de las ecuaciones 3 y 7, obtenemos:

$$L = 2ct \quad (\text{Ecuación 29})$$

La longitud del pulso deberá ser:

$$t = \frac{L}{2c} = \frac{L}{688} [s] \quad (\text{Ecuación 30})$$

Reemplazando la Ecuación 30 en la Ecuación 25

$$L = 1.15h [m] \quad (\text{Ecuación 31})$$

Por lo que la dimensión  $h$  debe ser un 15% mayor a  $L$  para obtener datos válidos según la deducción de las formulas realizadas.

Finalmente la distancia óptima entre transductores será

$$d = \frac{L}{2} \quad (\text{Ecuación 32})$$

### 8.3.1.3. Método de un micrófono en el eje de la fuente, normativa CEN/TS 1793-5

#### 8.3.1.3.1. Introducción

La normativa está concebida para mediciones in situ de barreras acústicas utilizadas para la atenuación del ruido de tráfico rodado. Estas barreras se pueden colocar de manera perpendicular al suelo, con algún ángulo de incidencia vertical, una combinación de ambas o pueden ser de geometría cóncava o convexa según el diseño y necesidades del fenómeno a tratar. Por esto la metodología consiste en la medición de la muestra en varios ángulos verticales (de 50° a 130°) como se muestra en la figura.

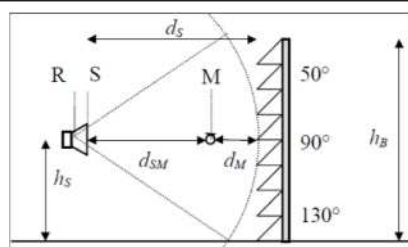


Figura 7. Ángulos de medición para barreras acústicas

Tomado de British Standards, 2033, p. 11

Sin embargo, para el análisis de materiales acústicos en mediciones in situ, aplicaremos únicamente 1 ángulos de medida, de 90° en el eje vertical por la naturaleza de las muestras a medir (paneles acústicos, acabados de paredes, entre otros) donde la disposición de los objetos a medir se encuentran generalmente perpendiculares al suelo y con la finalidad de evitar reflexiones no deseadas de otros materiales dispuestos en el suelo o techos.

#### 8.3.1.3.2. Descripción del método

La señal emitida por la fuente pasa primero por el micrófono de medición en su camino de propagación hasta la muestra, el sonido choca con la misma y es

reflejada nuevamente hacia el micrófono. El micrófono capta tanto la señal emitida como la señal reflejada incluida la dispersión. La diferencia entre el espectro de potencia de la señal emitida y reflejada nos permite obtener el coeficiente de reflexión, el cual es necesario para calcular la absorción del material bajo prueba. La eliminación de reflexiones no deseadas se lo realiza mediante la aplicación de un filtro ventana a la señal.

La ecuación para determinar el coeficiente de reflexión como función de la frecuencia es la siguiente:

$$RI = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \frac{\int_{\Delta f_j} |F[t \cdot h_{r,k}(t) \cdot w_r(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[t \cdot h_i(t) \cdot w_i(t)]|^2 df} \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde,

$h_i(t)$  es el componente de la incidencia de referencia de la respuesta impulsiva en campo libre

$h_{r,k}(t)$  es el componente de la reflexión de la respuesta impulsiva a cada ángulo  $k_i$

$w_i(t)$  es el componente en incidencia de referencia en campo libre de la ventana (ventana temporal Adrienne)

$w_r(t)$  es el componente reflejado de la ventana (ventana temporal Adrienne)

$F$  representa la transformada de Fourier

$j$  índice de las bandas de frecuencia en tercio de octava (de 100 Hz a 5 kHz)

$\Delta f_j$  es el ancho de banda en tercio de octava para cada ángulo de medición

$n_j$  es el número de ángulos a promediar

$t$  es el tiempo cuyo origen está en el principio de la respuesta impulsiva adquirida por la cadena de medición.

Al poder acercar el micrófono muy cerca de la superficie de prueba, podemos evitar que se capte gran cantidad de reflexiones no deseadas y permite tener mediciones más “limpias” (Cox, D’Antonio, 2009, p. 92)

## 9. Capítulo II. Fundamentos de Procesamiento de Señales

### 9.1. Definiciones y Justificación teórica

#### 9.1.1. Función de transferencia

Una función de transferencia describe la relación, en un sistema lineal, entre la salida y la entrada del sistema como una función de la frecuencia (Hussain, Sadik y O'Shea, 2011, p.18)

En el dominio del tiempo, la relación entre una entrada  $x(t)$  y la salida  $y(t)$ , se expresa de la siguiente manera:

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde  $*$  expresa la convolución de las señales.

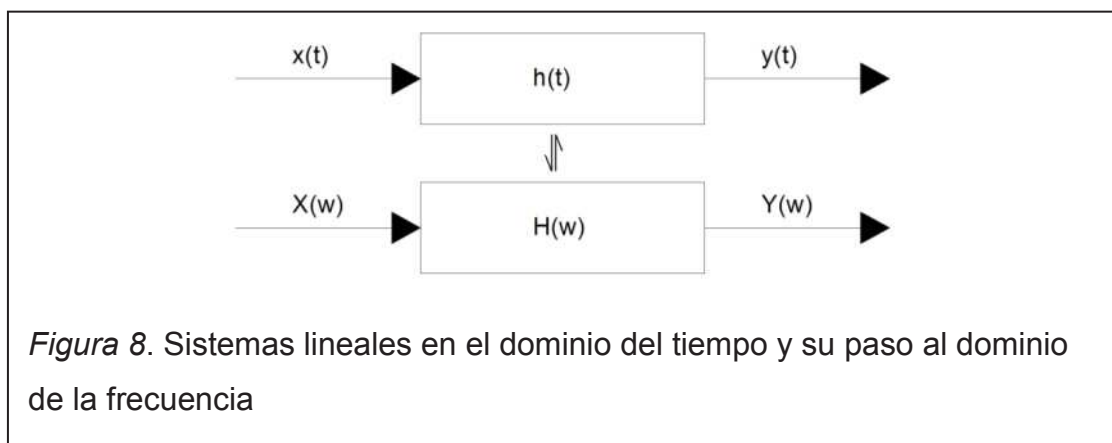
Al pasar al dominio de la frecuencia, la ecuación anterior se simplifica

$$Y(w) = H(w).X(w) \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde  $.$  expresa el producto simple entre las señales. Por lo tanto, la función de transferencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$H(w) = \frac{Y(w)}{X(w)} \quad (\text{Ecuación 36})$$

Gráficamente



El operador  $\mathcal{F}$  expresa la transformada de Fourier de la señal, como procedimiento para pasar al dominio de la frecuencia.

Según la normativa, la función de transferencia se puede obtener de 2 maneras: ya sea obteniendo la relación compleja entre la transformada de Fourier del micrófono más cercano a la muestra con aquel más cercano a la fuente, o con la relación entre el espectro cruzado del micrófono más cercano a la muestra con el micrófono más cercano a la fuente o de referencia, y el auto espectro del micrófono de referencia.

Las funciones de transferencia se emplean en el cálculo de los coeficientes de absorción y reflexión para los métodos de 2 y 4 micrófonos. Además de los métodos mencionados anteriormente, existen otras maneras de obtención de funciones de transferencia. Todos los métodos a utilizar se describen a continuación.

### 9.1.2. Espectro Cruzado

El espectro cruzado de 2 señales  $S_1(t)$  y  $S_2(t)$  se define

$$G_{21} = P_2(w)P_1(w)^* \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$P_n(w) = \mathcal{F}\{S_n(t)\} \quad (\text{Ecuación 38})$$

Donde \* significa el complejo conjugado,  $\mathcal{F}\{x\}$  es la transformada de Fourier de la señal.

El auto-espectro se describe como

$$G_{11} = P_1(w)P_1(w)^* \quad (\text{Ecuación 39})$$

Por lo tanto la función de transferencia es

$$H_{21} = \frac{G_{21}}{G_{11}} \quad (\text{Ecuación 40})$$

El cálculo de la función de transferencia por este método se lo implementa en Matlab de esta manera

```
tffc(y,x) = (fft(y) .* fft(conj(x))) ./ (fft(x) .* fft(conj(x)));
```



donde x, y hacen referencia a las señales 1 y 2 respectivamente.

### 9.1.3. Correlación Cruzada

La correlación cruzada entre 2 funciones  $S_1(t)$  y  $S_2(t)$ ,  $Z_{12}(t)$  es una medida de semejanza o interdependencia entre ambas funciones, en función al parámetro  $\tau$  (desplazamiento de una función en relación a la otra) (de Souza, 2013, p. 1). Se define como

$$Z_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau)S_2(t + \tau)d\tau \quad (\text{Ecuación 41})$$

Y de manera análoga

$$Z_{21}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_2(\tau)S_1(t + \tau)d\tau \quad (\text{Ecuación 42})$$

Si ambas funciones son iguales, entonces

$$Z_{11}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau)S_1(t + \tau)d\tau \quad (\text{Ecuación 43})$$

y ésta se denomina función de auto-correlación.

La función de transferencia se calcula mediante la siguiente ecuación

$$H_{21} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} \quad (\text{Ecuación 44})$$

En Matlab, la función que permite este cálculo es `xcorr (y,x)`, así

```
tfxc(x,y) = fft(xcorr(y,x))./fft(xcorr(x));
```

donde x, y hacen referencia a las señales 1 y 2 respectivamente.

### 9.1.4. Densidad espectral energética cruzada

La densidad espectral energética cruzada (Cross PowerSpectralDensity) es la distribución energética por unidad de frecuencia, se define así

$$P_{xy}(w) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xy}(m)e^{-jwm} \quad (\text{Ecuación 45})$$

La secuencia de correlación cruzada  $R_{xy}(m)$  está definida de la siguiente manera

$$R_{xy}(m) = E[x_{n+m}y^*_{n}] = E[x_n y^*_{n-m}] \quad (\text{Ecuación 46})$$

donde  $x_n$  e  $y_n$  son procesos aleatorios conjuntamente estacionarios, y  $E\{\cdot\}$  es el operador valor esperado. (Mathworks, s.f.)

La función de transferencia se calcula mediante la siguiente ecuación

$$H_{21} = \frac{P_{21}}{P_{11}} \quad (\text{Ecuación 47})$$

En Matlab, el cálculo se lo realiza mediante la función `cpsd(x,y)`, de la siguiente manera

```
tfcp(x,y) = cpsd(x,y) ./ cpsd(x,x);
```

donde `x`, `y` hacen referencia a las señales 1 y 2 respectivamente.

### 9.1.5. Función de transferencia estimada

Dentro de las funciones del compilador, encontramos una función llamada `tfestimate`, se define como el cociente entre la densidad espectral energética cruzada  $P_{yx}(f)$  de `x` e `y`, y la densidad espectral energética  $P_{xx}(f)$  de `x`.

Esta función permite obtener directamente la función de transferencia

$$T_{xy}(f) = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (\text{Ecuación 48})$$

La implementación de esta función se la realiza

```
tfes(y,x) = tfestimate(x,y);
```

La función de transferencia se estima utilizando el método periodograma promediado de Welch.

### 9.1.6. Mediciones In Situ

El método implementado es utilizado para mediciones in situ del índice de reflexión e índice de aislamiento sonoro en barreras anti ruido en carreteras, en este estudio se implementará únicamente la obtención de los índices de reflexión previo al cálculo de los coeficientes de absorción.

La metodología descrita en la normativa BS CENT/TS 1793-5:2003 es amplia, y al tratarse de una normativa para medición de barreras acústicas, permite realizar mediciones de éstas dependiendo de su configuración e implementación física

La adaptación del método consiste en medir de manera perpendicular a la superficie de muestra (a 90° según la normativa)

De esta manera la Ecuación 33 se simplifica en

$$RI = \frac{\int_{\Delta f_j} |F[t.h_{r,k}(t).w_r(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[t.h_i(t).w_i(t)]|^2 df} \quad (\text{Ecuación 49})$$

El procedimiento para calcular los índices de reflexión se basa en la técnica de sustracción, cuyo procedimiento se ilustra en los gráficos siguientes

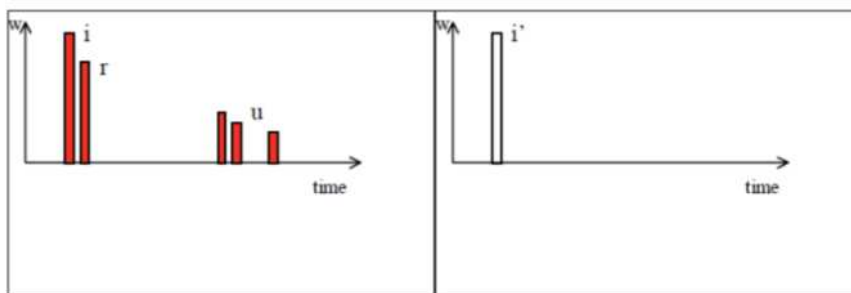


Figura 9(a)

Figura 9(b)

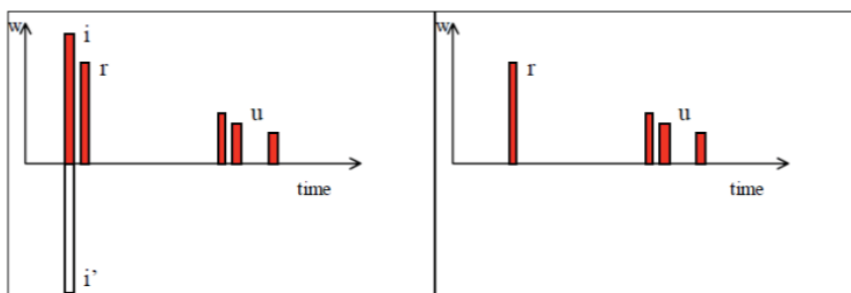


Figura 9(c)

Figura 9(d)

*Figura 9.* Procedimiento de la técnica de substracción. (a) medición in situ de la muestra, (b) medición en “campo libre” de la señal de prueba, (c) cancelación de la señal incidente por medio de la señal de “campo libre”, (resultado)

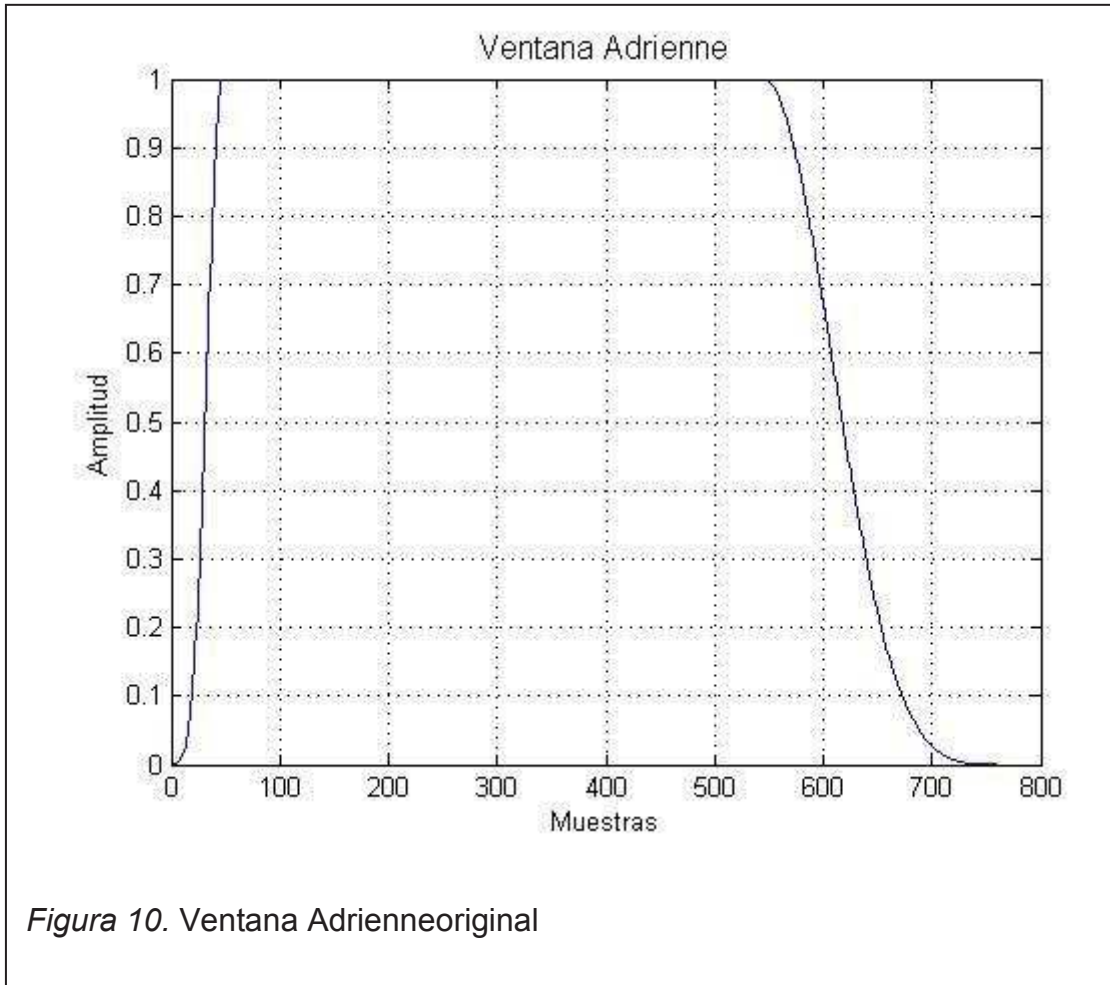
Tomado de British Standards, 2013, p. 18

### 9.1.7. Ventana temporal Adrienne

La normativa exige la implementación de una ventana temporal Adrienne, cuya especificación es la siguiente:

1. Una pre-ventana Blackman-Harris (mitad) de duración 0.5ms.
2. Una función unitaria de duración 5.18 ms.
3. Una ventana final Blackman-Harris (mitad) de duración 2.2ms.

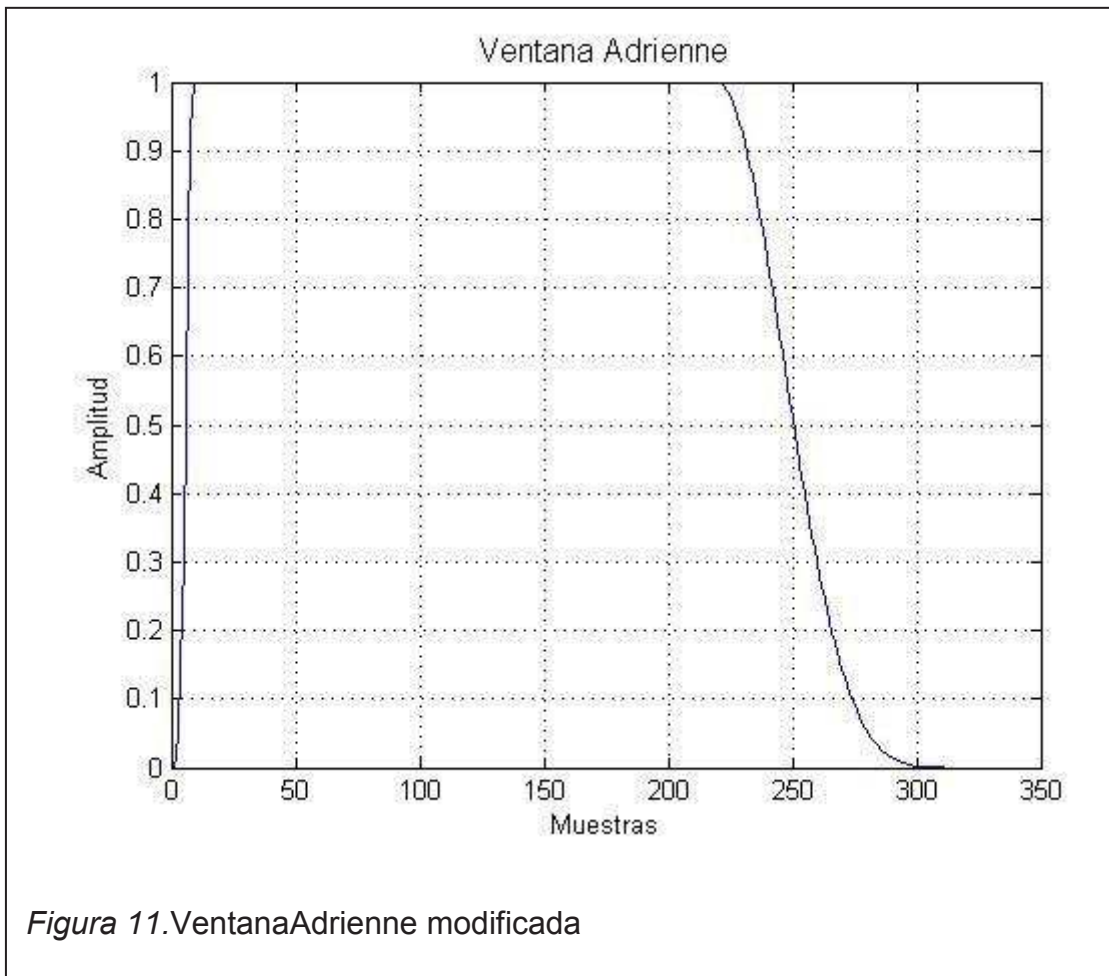
La duración total de la ventana será de 7.9ms (758 muestras)



Sin embargo, al tratarse de una implementación de esta normativa, y dado que las mediciones están previstas realizarse en lugares cerrados (al contrario de la aplicación original de la normativa), se ha rediseñado la longitud de esta ventana siguiendo la siguiente especificación:

1. Una pre-ventana Blackman-Harris (mitad) de duración 0.1 ms.
2. Una función unitaria de duración 2.2 ms.
3. Una ventana final Blackman-Harris (mitad) de duración 0.94 ms.

La duración total de la ventana a implementar será de 3.24ms (311.8 muestras)



Al momento de realizar una modificación al tamaño de la ventada, debe conservarse una relación 7/3 entre la función unitaria y la ventana Blackman-Harris de final.

## 10. Capítulo III. Diseño del Tubo de Kundt

El diseño del tubo de Kundt se realizó según la norma ASTM E2611 – 09 *Measurement of Normal Incidence Materials Based on the Transfer Matrix Method*, en la cual se especifican los requerimientos y los procesos para realizar mediciones de materiales a incidencia normal por medio del método de la matriz de transferencia, pero además se lo puede utilizar también para mediciones por la técnica de dos micrófonos por medio de funciones de transferencia.

El equipo a utilizar consta de dos tubos de igual diámetro interno conectados por medio de un porta muestras.

### **10.1. Construcción del Tubo**

Debido a las necesidades específicas que se requieren para realizar mediciones por medio de la normativa ASTM E2611 se realizó un análisis de la forma, dimensiones y materiales a utilizarse para la fabricación del tubo de Kundt y así cumplir con los objetivos planteados.

El material empleado para la fabricación del tubo es acero cédula 40 de 2" de diámetro interno debido a que se necesita que sea un material lo suficientemente macizo para evitar la transmisión de ruido exterior ya que esto disminuiría la relación señal – ruido y por lo tanto podría afectar a la medición.

En cuanto a la forma del tubo, según la normativa puede ser circular o rectangular, sin embargo se ha optado por la forma circular ya que esto evita la formación de modos transversales los cuales pueden afectar los datos obtenidos.

#### **10.1.1.1. Rango de frecuencia de funcionamiento**

Existen varias consideraciones que determinan el rango de frecuencias dentro del cual el tubo trabajará con normalidad, las variables más importantes son el espaciamiento entre los micrófonos y el diámetro del tubo.

#### **10.1.1.2. Frecuencia mínima de funcionamiento del tubo**

La frecuencia mínima de trabajo guarda relación con el distanciamiento entre los micrófonos de medición y la precisión del software de análisis de datos.

La distancia entre los micrófonos deberá ser mayor que el 1% de la longitud de onda de la frecuencia (*American Society of testing and Materials (ASTM, 2011, p.3)*) más baja a ser medida. Para las mediciones realizadas en el tubo se eligió unaseparación de los micrófonos de 4 cm con lo que se obtiene una frecuencia de trabajo mínima de 125 Hz.

Además, el tubo diseñado tiene la versatilidad de tener más de dos orificios para la ubicación de los micrófonos, esto con fines experimentales y para poder variar el rango de frecuencias a ser medidas. Se tienen 5 posiciones a cada lado de la muestra separadas como se puede observar en la Figura.

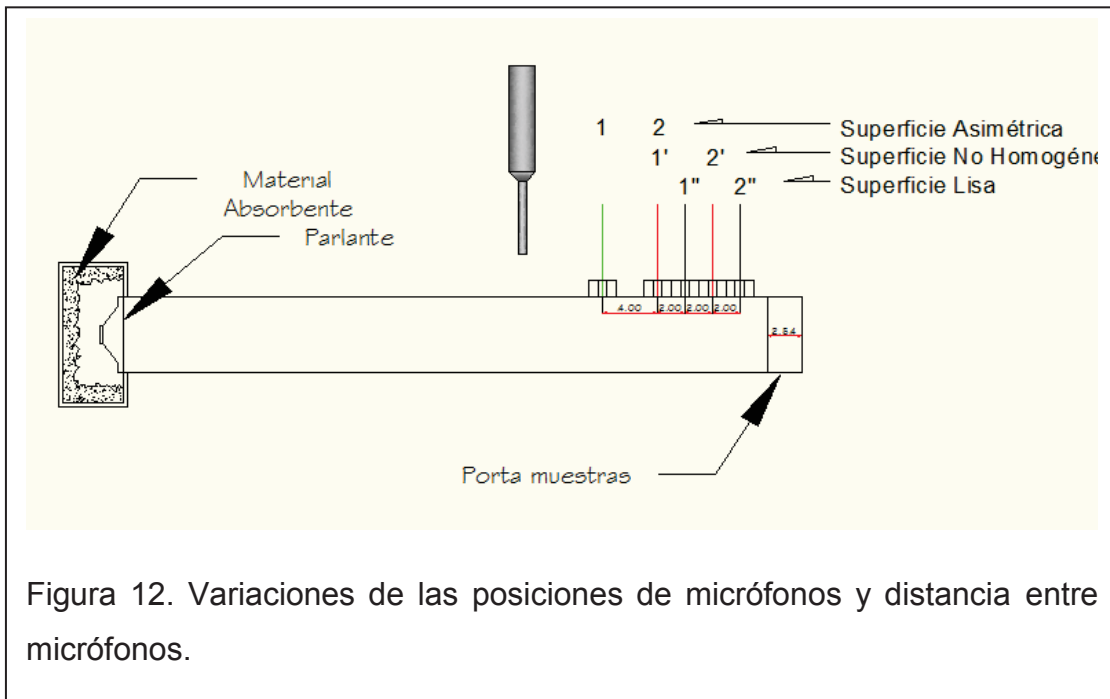


Figura 12. Variaciones de las posiciones de micrófonos y distancia entre micrófonos.

### 10.1.1.3. Frecuencia máxima de funcionamiento del tubo

La frecuencia máxima de trabajo del tubo, según la normativa E2611, se la determina con la siguiente ecuación, con la cual se obtiene propagación de ondas planas dentro del tubo:

$$f_u < \frac{Kc}{d} \text{ o } d < \frac{Kc}{f_u} \quad (\text{Ecuación 50})$$

Ecuación 50. Frecuencia máxima tuboKundt

Donde:  $f_u$  es la frecuencia máxima de operación del tubo

$K$  es una constante que para tubos circulares es de 0,586



$c$  es la velocidad del sonido en el tubo m/s

$d$  es el diámetro del tubo en metros

## **10.1.2. Dimensiones**

### **10.1.2.1. Diámetro**

Se ha seleccionado el diámetro interno del tubo de 5 cm con lo cual se pueden realizar mediciones hasta la frecuencia de 4 kHz, asumiendo la velocidad del sonido como 341 m/s a una temperatura de 17 °C. Cabe mencionar que la frecuencia máxima de funcionamiento puede variar debido a cambios de temperatura en el Tubo de Impedancia.

### **10.1.2.2. Largo del Tubo**

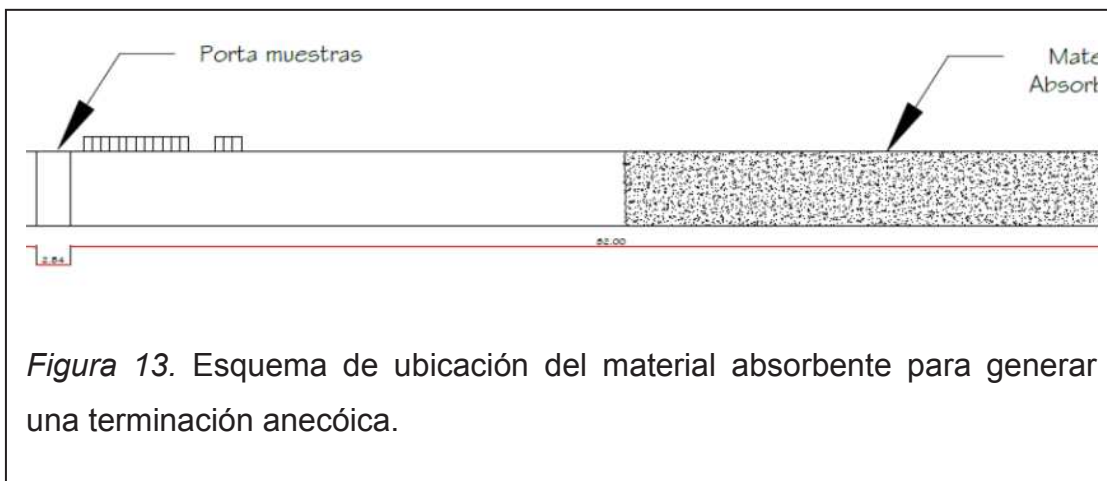
Para que se produzca una propagación de ondas planas dentro del tubo, según normativa ASTM E611-09, se necesita un largo de al menos 3 veces el diámetro del tubo entre la fuente y el micrófono más cercano, debido a que la fuente de sonido no emite ondas planas, por esta razón se necesita mínimo esta distancia para que se produzca la propagación adecuada.

Para asegurar la propagación de ondas planas dentro del tubo se ha tomado una distancia de 47 cm desde la fuente a la muestra, lo cual supera la condición requerida por la normativa.

## **10.1.3. Elementos adicionales**

### **10.1.3.1. Terminación del Tubo**

La terminación se ha diseñado para proveer la mayor absorción posible, para de esta forma evitar las reflexiones que se generen en la parte final del tubo ya que podrían causar errores en el cálculo de los parámetros. Para lograr esto, se utilizaron varias capas de material absorbente relleno los últimos 40 cm de tubo con este material.



El material absorbente utilizado para las mediciones es a base de capas de lana mineral de 2" y densidad de 48 Kg/m<sup>3</sup> ubicadas a lo largo de la superficie marcada en la Figura, este material Presenta los siguientes coeficientes de absorción.

Frec	125	250	500	1000	2000	4000
BT 2"	0.18	0.71	1.12	1.12	1.03	1.02

Tabla 1. Coeficientes de absorción del material utilizado para formar la terminación anecólica (los coeficientes presentados son para 1 capa de material de 2"). Medidos según ASTM C423 montaje A.

#### 10.1.3.2. Porta Muestras

El porta muestras se lo realizó con el mismo tubo del cual está elaborado el tubo de Kundt, para realizar el acople entre del porta muestras al tubo se realizaron recortes en el diámetro exterior por medio de un torno. De esta forma se produce un acoplamiento que reduce el ruido exterior, las fugas que se puedan producir y garantiza un fácil montaje. Se puede tener acceso a la

muestra a partir de los dos frentes del portamuestras, lo cual facilita la colocación y revisión antes de la medición.



Se elaboraron dos portamuestras, uno para realizar mediciones de muestras de 1 pulgada de espesor y 2 pulgadas de grosor, las cuales son medidas estándar de materiales utilizados en el área de acústica.

## 10.2. Equipamiento

### 10.2.1. Fuente de Sonido

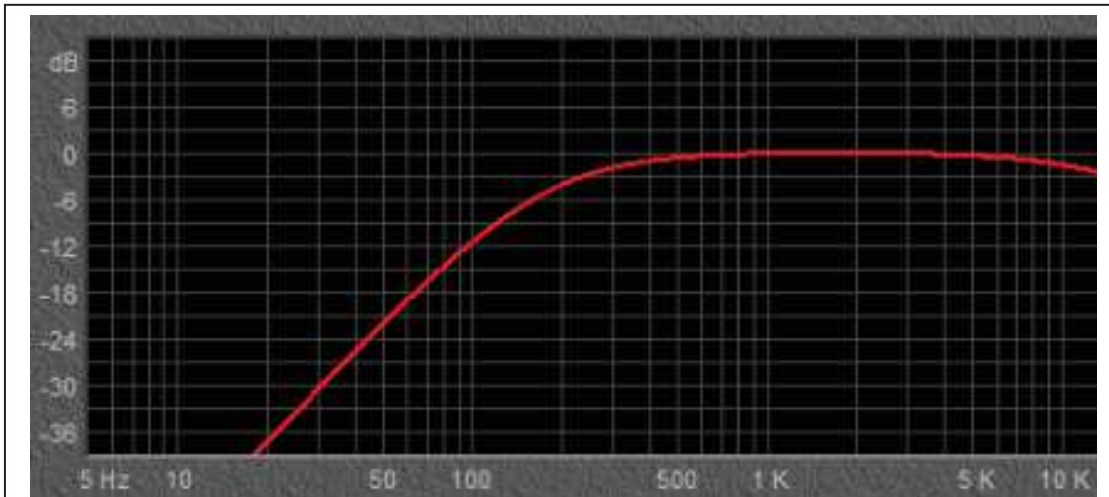
Para la emisión de la señal se necesita de un transductor, el cual deberá ser capaz de emitir dentro del rango de frecuencias para las cuales va a trabajar el tubo (125 Hz – 4kHz). El altavoz seleccionado es de la marca Vifa modelo: NE-65W-04, debido a que coincide con el diámetro del tubo y presenta las siguientes especificaciones técnicas

Tabla 2. Especificaciones técnicas transductor Vifa NE65W-04

Nominal Diameter	2"
PowerHandling (RMS)	20 Watts
PowerHandling (max)	40 Watts
Impedance:	4 ohms
Frequency Response:	150 to 18,000 Hz
Sensitivity:	82.2 dB 1W/1m
VoiceCoilDiameter:	1"

THIELE-SMALL PARAMETERS	
ResonantFrequency (Fs)	166 Hz
DC Resistance (Re)	3.7 ohms
VoiceCoilInductance (Le)	0.04 mH
Mechanical Q (Qms)	5.0
Electromagnetic Q (Qes)	0.74
Total Q (Qts)	0.65
ComplianceEquivalentVolume (Vas)	0.006 ft. <sup>3</sup>
Mechanical Compliance of Suspension (Cms)	0.58 mm/N
BL Product (BL)	2.85
TmDiaphragm Mass Inc. Airload (Mms)	1.58g
Maximum Linear Excursion (Xmax)	1.65 mm
Surface Area of Cone (Sd)	14.7 cm <sup>2</sup>

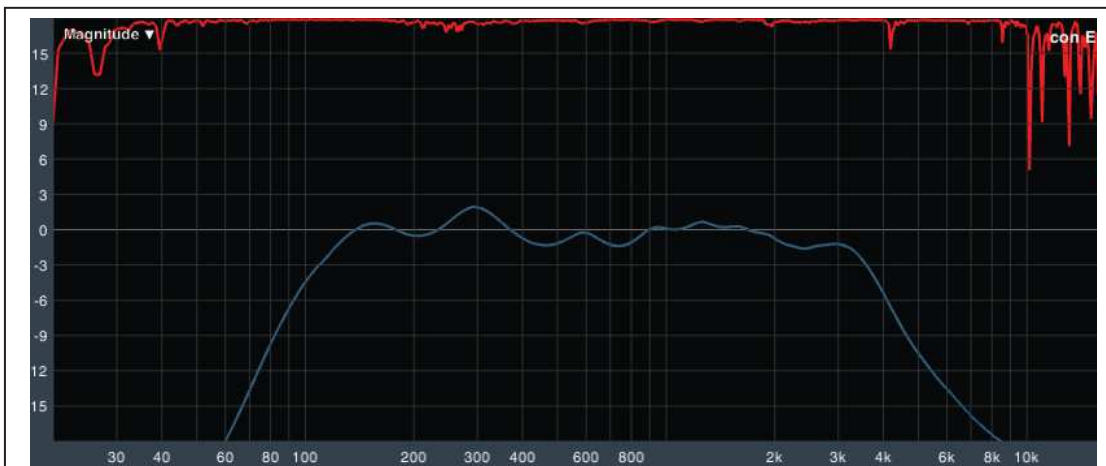
Una vez seleccionado el altavoz, se procedió a realizar el diseño de la caja acústica, para esto se utilizó el software *BassBox 6 Pro* por medio del cual se realizaron simulaciones de diferentes tipos de cajas y comportamientos. El diseño elegido fue el de una caja cerrada de medidas 111,3 mm x 290,55mm x 179 mm con las cuales se obtuvo la siguiente respuesta de frecuencia simulada por el software.



*Figura 15.* Respuesta de Frecuencia simulada del altavoz en la caja cerrada.

Como se puede observar la respuesta de frecuencia del altavoz permite cubrir el rango de frecuencias de interés. Además, se ubicó material absorbente en las paredes internas de la caja acústica para mejorar la el comportamiento de la caja acústica.

Una vez acoplada el altavoz en la caja y el tubo, se procedió a medir su respuesta de frecuencia utilizando el software Smaart V7.y luego de realizar correcciones por medio de un Ecuador de 31 Bandas KlarkTeknikSquare ONE, se obtuvo el siguiente gráfico de respuesta de frecuencia, el cual demuestra que se tiene una respuesta uniforme a lo largo del rango de frecuencias en el cual se van a realizar las mediciones (125Hz a 4 kHz).



*Figura 16.* Respuesta de frecuencia del altavoz dentro del tubo

### 10.2.2. Amplificador de señal

Para alimentar al altavoz con la señal de prueba se utilizó un amplificador TDA7492 clase D. Esto permite facilitar la medición ya que al no tener control de sensibilidad de entrada incorporado, garantiza la uniformidad en el nivel de las señales de prueba al realizar varias mediciones.

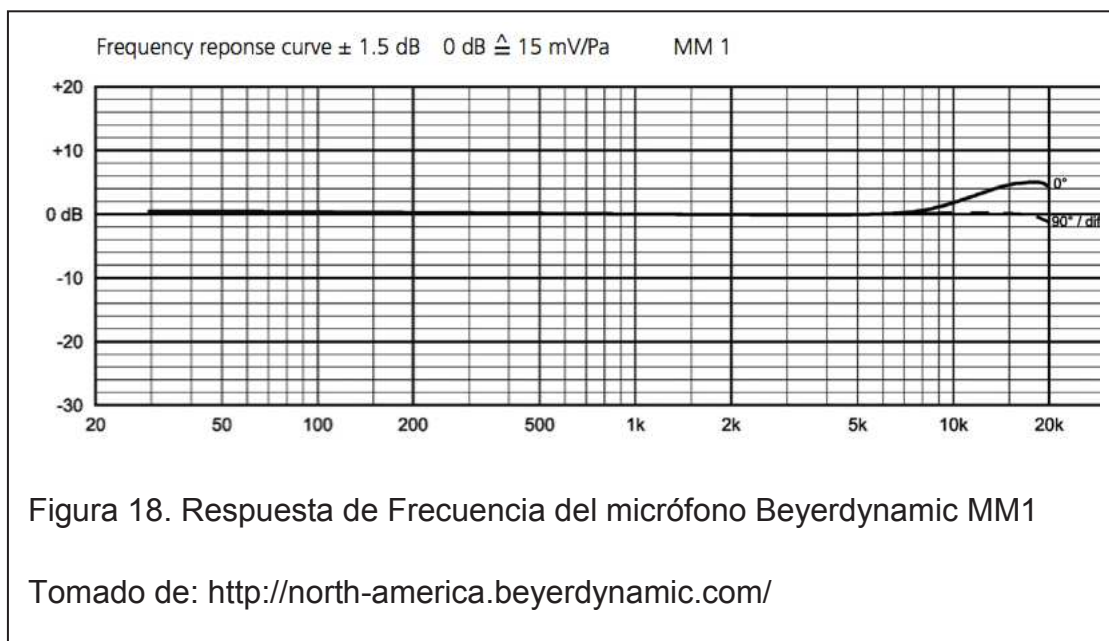


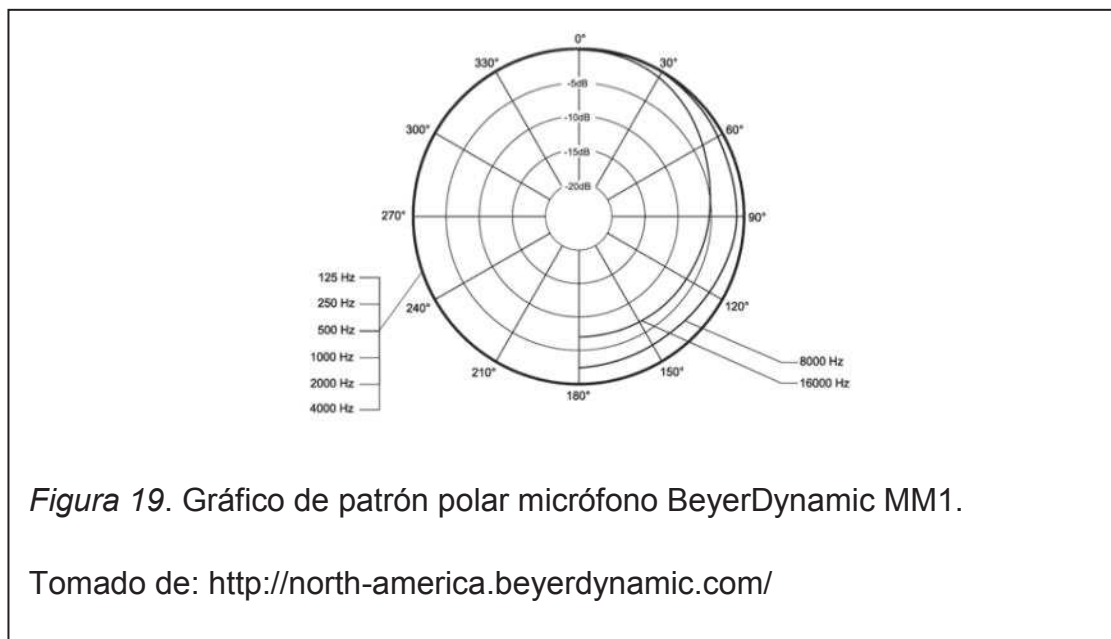
*Figura 17.* Amplificador TDA7492

Es un amplificador de 2 canales, cada uno de 25 W a 4 Ohms, por lo cual es la pareja ideal para el altavoz seleccionado como transductor para el tubo.

### 10.2.3. Micrófonos

Los micrófonos utilizados para la medición son los Beyerdynamic MM1, los cuales son micrófonos diseñados específicamente para mediciones acústicas. Son micrófonos tipo Electretde condensador con un patrón polar omnidireccional y una respuesta de frecuencia lineal.





Como se puede observar en la Figura 19 el micrófono presenta una respuesta lineal al estar ubicado a  $90^\circ$  por lo cual nos da una ventaja significativa ya que en el tubo va a estar ubicado de forma perpendicular al tubo principal, por lo que la incidencia del sonido será con un ángulo de 90 grados y se tendrá una respuesta de frecuencia lineal.

#### 10.2.4. Interfaz de Adquisición de Datos

La interfaz utilizada para la adquisición de datos es una M-Audio ProFire 2626.





Figura 20. Interfaz de Audio ProFire 2626

Tomado de: [www.m-audio.com](http://www.m-audio.com)

Es una interfaz de audio de 8 canales, de los cuales para la medición se utilizarán 4, presenta una respuesta de frecuencia lineal dentro del rango que se van a realizar las mediciones y permite alimentar con *phantom power* a los micrófonos que lo requieran. Cuenta con un control de los niveles de entrada y de salida por medio de software, lo cual facilita la reproducción de las mediciones sin utilizar los controles de nivel incorporados en el frente de la interfaz, ya que estos pueden ser inintencionalmente manipulados al momento de la medición provocando errores en los datos obtenidos.



Figura 21. Software para control de interfaz de audio ProFire 2626.

Tomado de: [www.m-audio.com](http://www.m-audio.com)

### 10.2.5. Señal de Prueba

Siguiendo los lineamientos de la normativa ASTM E2611 – 09 la señal de prueba puede ser ruido rosa, blanco o incluso un barrido de señal. Para la realización de las mediciones se ha optado por utilizar ruido rosa.

Para no tener errores en las mediciones se generaron varios archivos de ruido rosa de diferente duración en formato wav para ser cargados en el software de adquisición de datos, de esta manera se tiene la misma señal de prueba en todas las mediciones.

## 11. Capítulo IV. Software de Mediciones

El software para realizar las mediciones ya sea por el método del tubo de Kundt o por el método de ToneBurst, se lo ha concebido en dos etapas: adquisición de datos y post procesamiento de datos. Se decidió hacerlo de esta manera, debido a que en la etapa de adquisición de datos es necesario la reproducción de la señal de prueba y la grabación de la señal en los micrófonos de manera simultánea, lo cual en muchos lenguajes de programación como Matlab puede llegar a ser muy complicado ya que se necesitaría utilizar *multitethering* que complicaría innecesariamente la programación. Por esto se utilizó el software MAX MSP v6 como plataforma para el software de adquisición de datos ya que es un software que maneja módulos previamente programados, los cuales se interconectan entre sí para que realicen la función requerida y permite realizar procedimientos multi-tarea.

Una vez adquiridos los archivos de audio tras las mediciones realizadas por los distintos métodos se cargan estas señales. Por medio de algoritmos y procesamiento de señales se obtienen los coeficientes buscados. Para la programación de esta etapa se ha utilizado el software Matlab 2013 que posee implementadas funciones específicas para procesamiento y manipulación de señales.

Este capítulo contempla el diseño en los dos programas, las funciones utilizadas y los parámetros que estas contemplan.

### 11.1. Software en MAX MSP

#### 11.1.1. Etapa de Adquisición de Datos

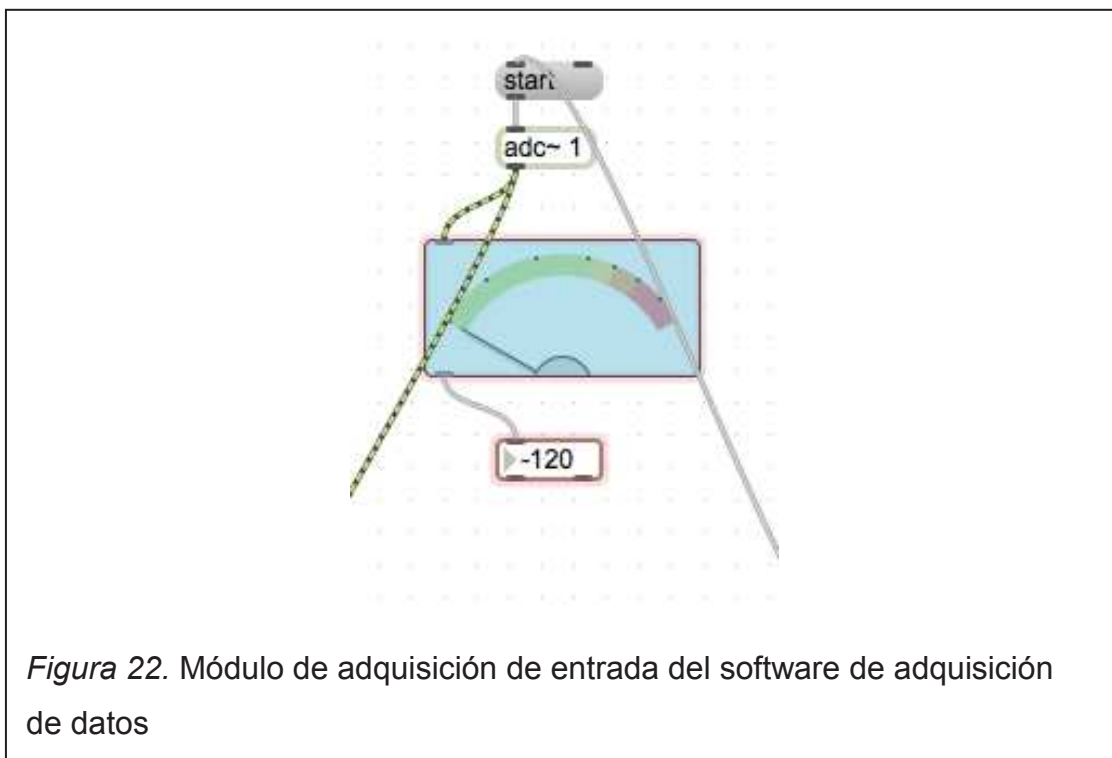
Para el diseño de los programas de adquisición de datos se utilizó el software MAX MSP v.6 tanto como para el caso de las mediciones en el tubo como las mediciones por medio del método de ToneBurst. Para los dos métodos se utilizaron los mismos módulos de MAX. Ya que en los dos casos se necesita que se reproduzca una señal de prueba y se graben las señales tomadas por los micrófonos, con la diferencia que en el método de Tubo de Kundt, se deben

grabar 4 ó 2 señales mientras que en el método de ToneBurst solo se requiere grabar una señal.

El programa de adquisición de datos tiene 3 módulos: módulo de entrada, reproducción de señal de prueba y grabación.

### 11.1.2. Módulo de entrada

Se configuraron la cantidad de canales, e incorporaron sistemas de medición de nivel de entrada por medio de un medidor de aguja o *VU metery* además un visualizador digital del nivel de señal de entrada. Estos elementos son de suma importancia al momento de realizar la medición porque permiten monitorear los niveles de entrada y verificar el buen funcionamiento de esta la etapa de adquisición de datos.



La función `adc~` es la que permite indicar al software que se requiere un convertidor analógico – digital de 1 canal. Esta se encuentra conectada al VU meter y también al módulo de grabación.

### 11.1.3. Módulo de reproducción de señal de prueba

Este módulo permite cargar el archivo de audio de la señal de prueba y controlar el nivel de este archivo

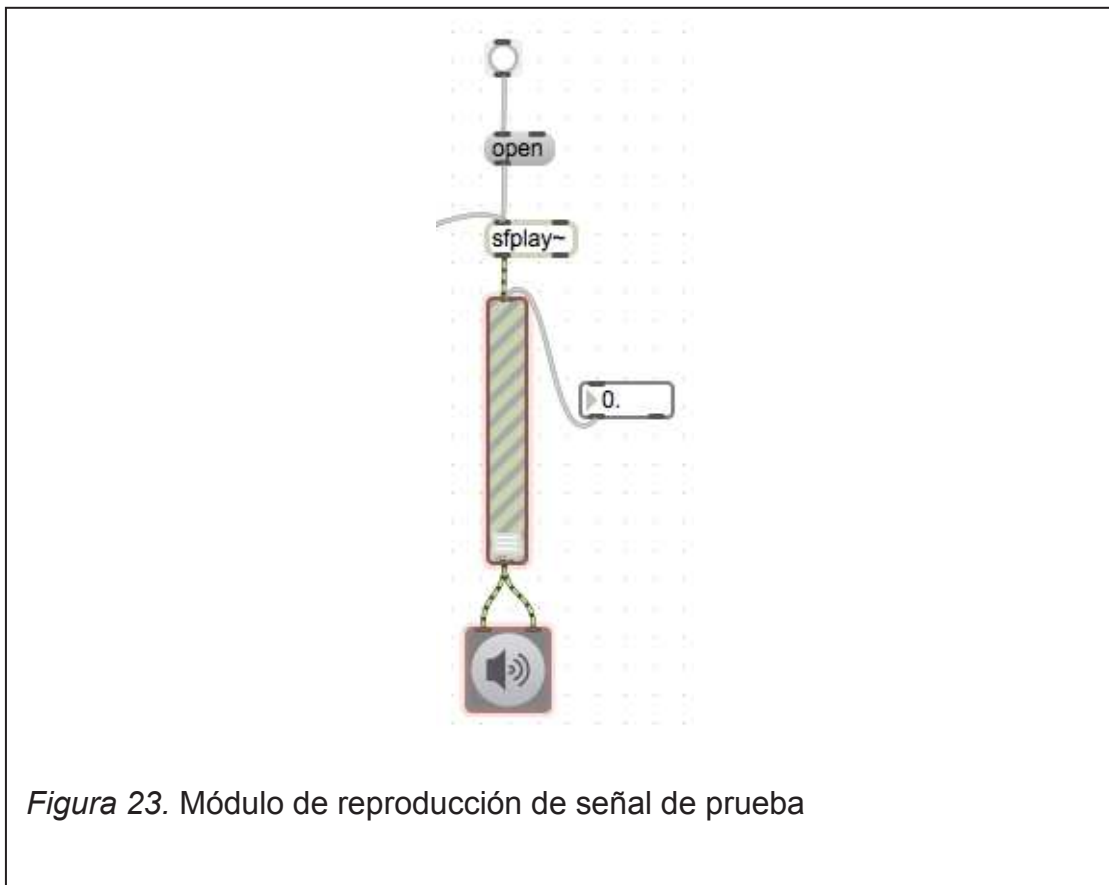


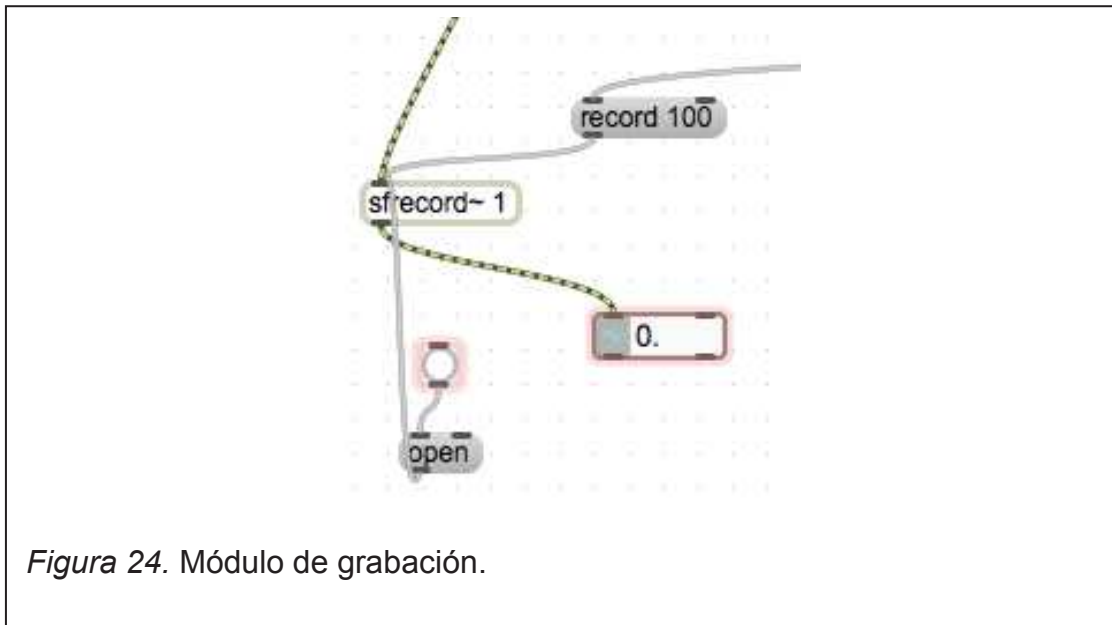
Figura 23. Módulo de reproducción de señal de prueba

La función `sfplay~` es la que permite cargar un archivo `.wav` y reproducirlo, para cargarlo se envía el mensaje `open` por medio del botón en la parte superior.

Se tiene control del nivel de la señal de audio por medio del Fader deslizante y posteriormente se envía al dispositivo de reproducción que está representado al final de la cadena con el ícono de un altavoz.

#### 11.1.4. Módulo de grabación

Este módulo permite grabar en el disco duro las señales obtenidas por los micrófonos, para esto se utiliza la función `sfrecord~ 1`, la cual indica que se tiene que grabar en disco duro la información entregada por la etapa de entrada y el número que precede indica el número de canales a grabarse.



Este módulo se activa con el botón general que activa la reproducción y grabación. Al activarse el botón, se manda una señal “*record 100*” que indica a la función `sfrecord~` que tiene que empezar la grabación.

Se ha incorporado un contador que indica los milisegundos grabados, y también un botón que envía el mensaje de “*open*” a la función `sfrecord~`, esto permite seleccionar la ubicación en la cual se tiene que almacenar el archivo de audio, permite además elegir el formato y asignarle un nombre al archivo que contiene la grabación.

Para las mediciones realizadas se ha seleccionado el formato `.wav` de audio ya que es completamente compatible con Matlab para su posterior procesamiento.



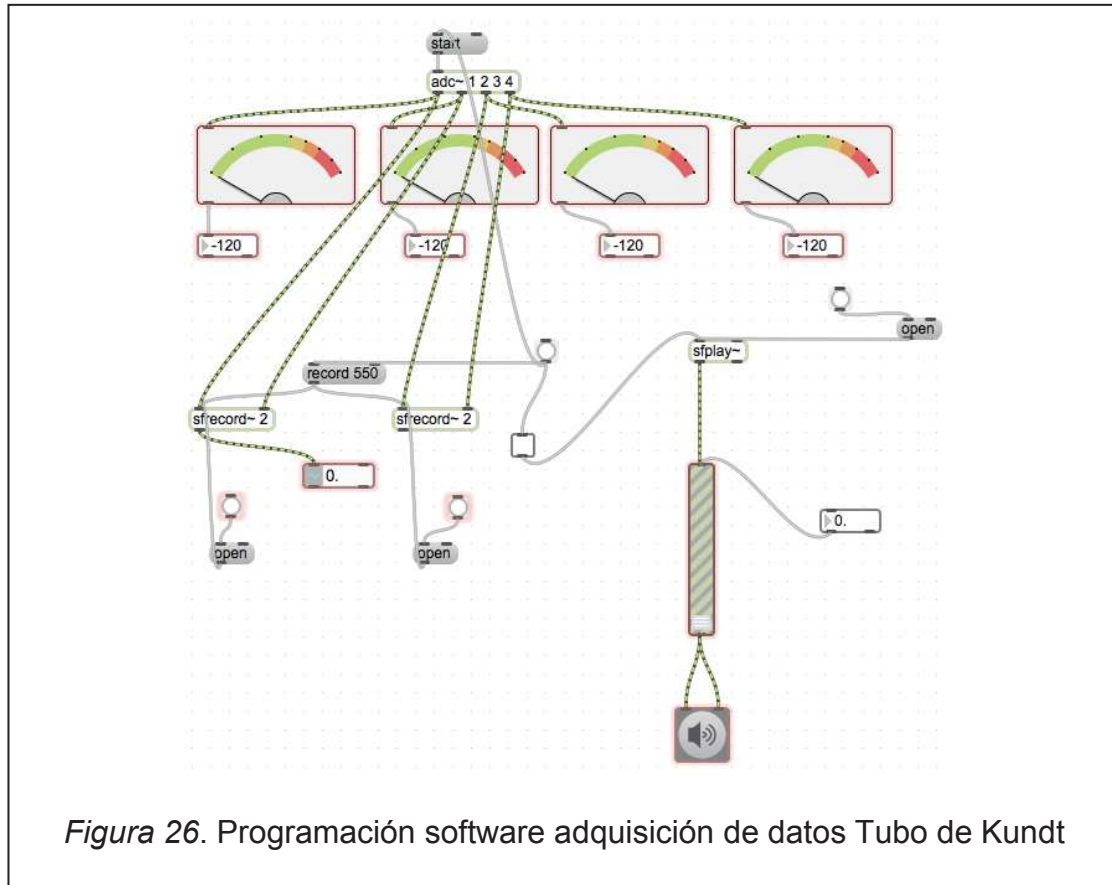


Figura 26. Programación software adquisición de datos Tubo de Kundt

Posterior a la programación y a la realización de pruebas para corroborar el correcto funcionamiento del software, se procedió a diseñar la interfaz de usuario en la cual solo se muestra la información necesaria para realizar las mediciones.



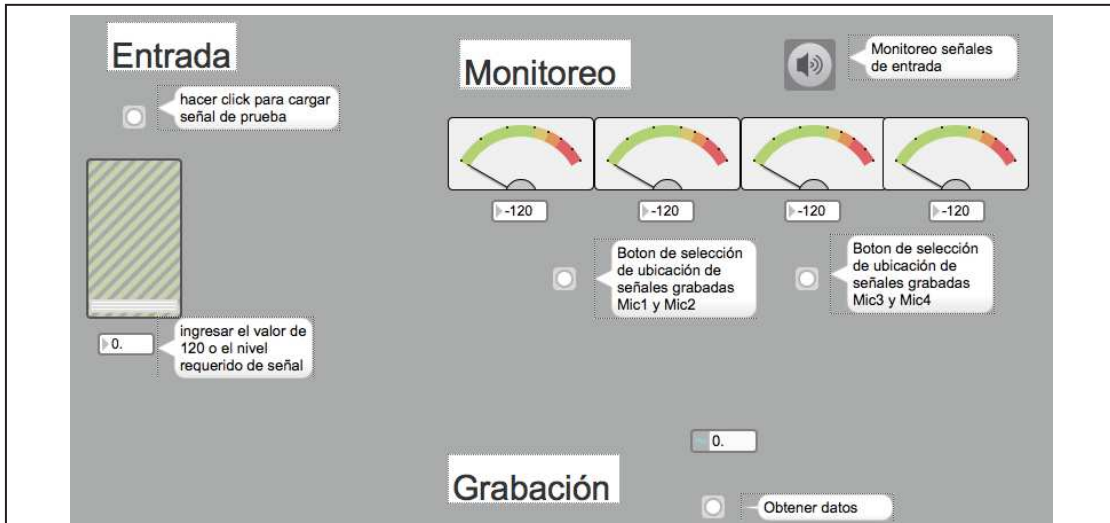


Figura 27. Interfaz de usuario para software tubo de Kundt

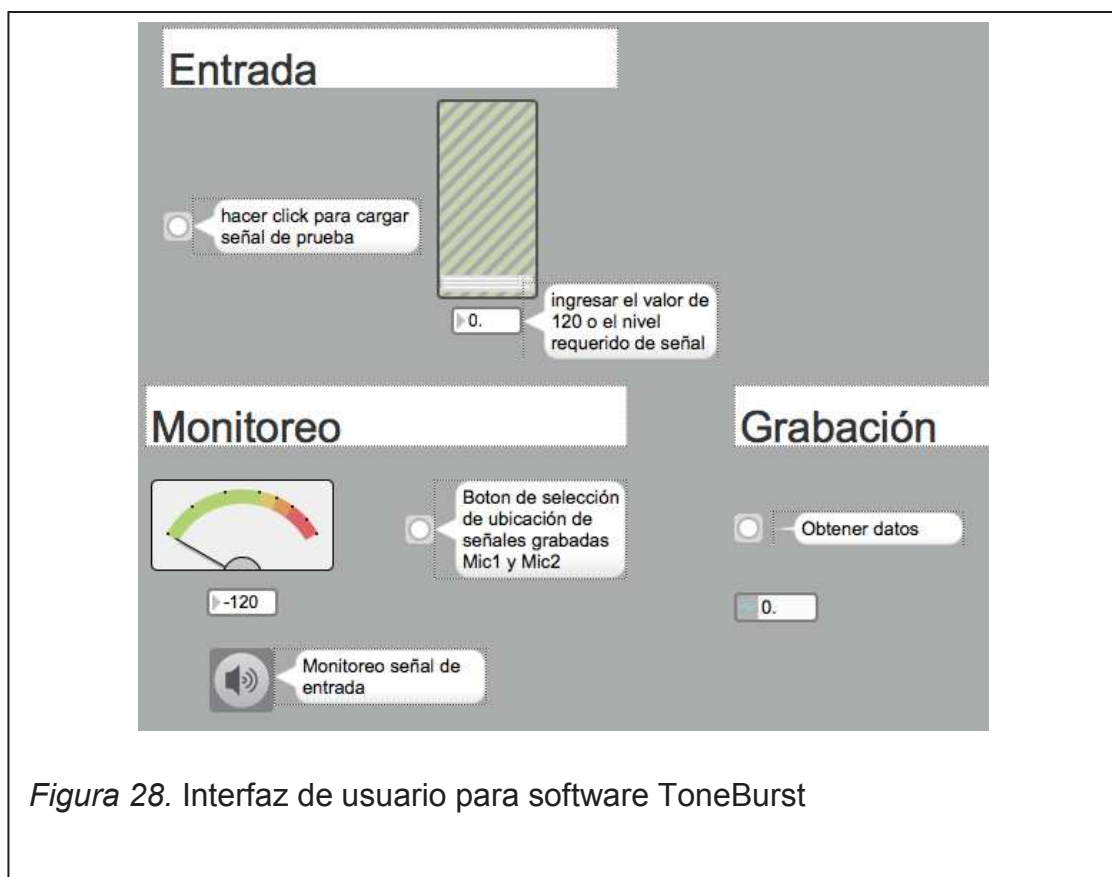


Figura 28. Interfaz de usuario para software ToneBurst

## 11.2. Software en Matlab

Dadas las características investigativas de este proyecto, se desarrollaron 3 programas para procesamiento de señales.

1. Interfaz Gráfica de acceso
2. Software de mediciones para el método de dos micrófonos
3. Software de mediciones para el método de cuatro micrófonos
4. Software para el método de medición In Situ.

### 11.2.1. Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica permite el acceso a cada uno de los diferentes programas de cálculo. Para acceder a los mismos se selecciona el método a utilizar y luego continuar.

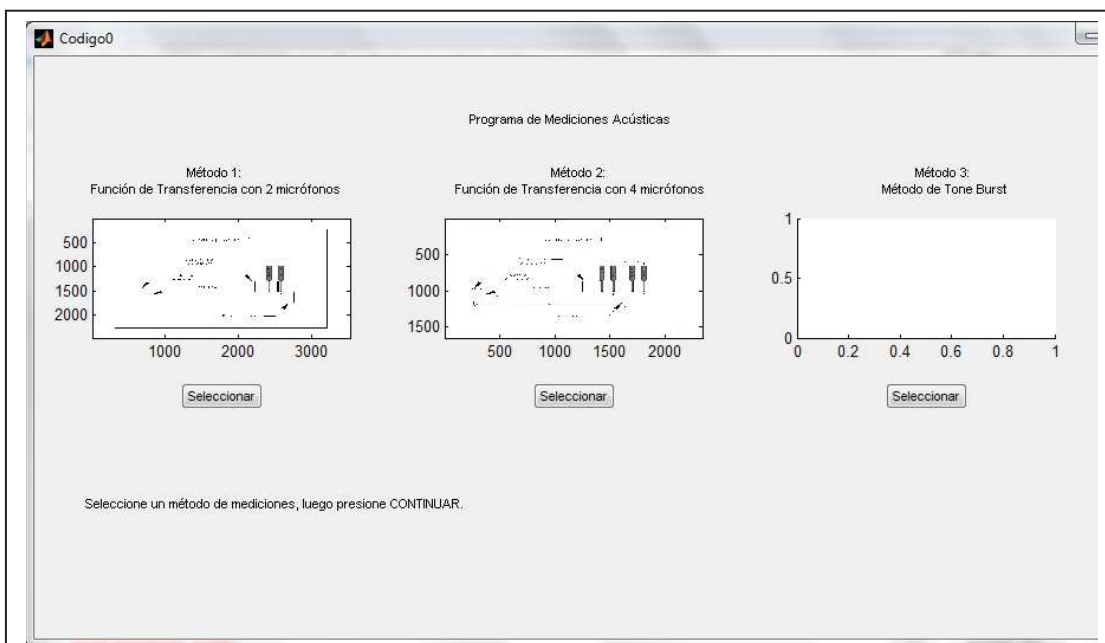


Figura 29. Interfaz de usuario de la interfaz para procesamiento de datos

## 11.2.2. Software de mediciones para el método de dos micrófonos

### 11.2.2.1. Interfaz de Usuario

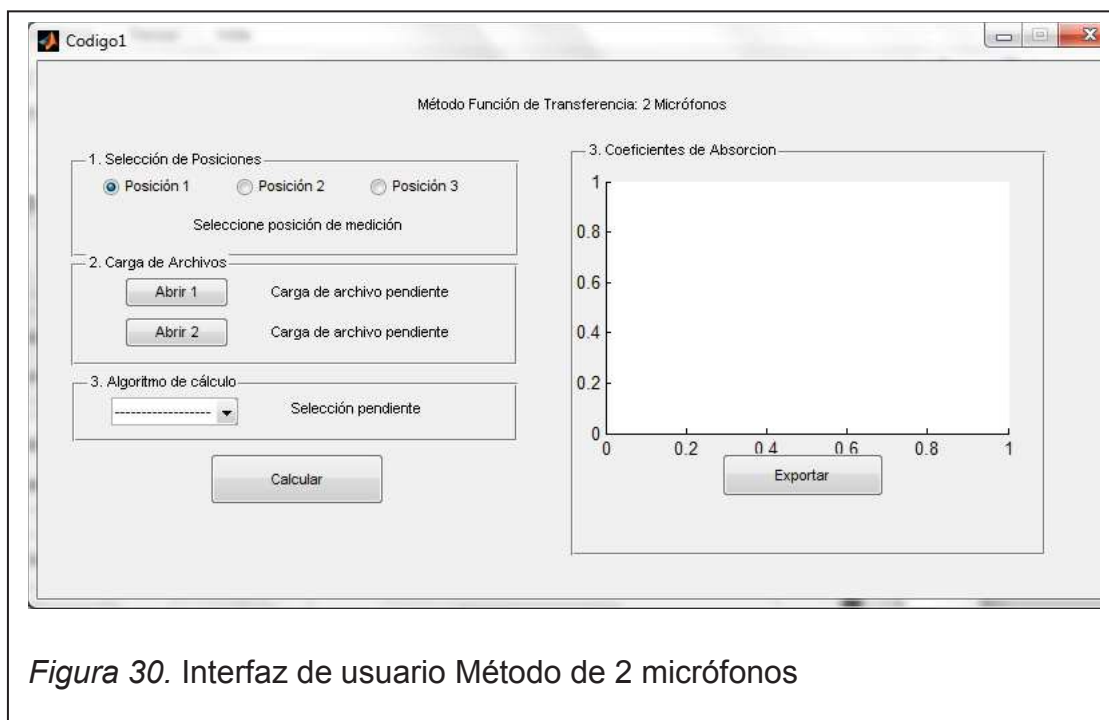


Figura 30. Interfaz de usuario Método de 2 micrófonos

La interfaz se divide en 4 secciones:

**Selección de Posiciones:** Se escoge la posición de pares de micrófonos, según las características del diseño.

**Carga de Archivos:** Permite al usuario escoger los archivos de las mediciones realizadas de marea independiente. En la primera pestaña se cargan los archivos de la primera medición (Micrófonos en posición 1,2), en la segunda pestaña se escogen los archivos de la segunda medición, es decir con los micrófonos intercambiados (Micrófonos en posición 2,1)

**Algoritmo de cálculo:** El proceso de cálculo de las funciones de transferencia se lo puede realizar mediante 4 algoritmos diferentes:

Correlación: calcula las funciones de transferencia mediante la correlación cruzada de las señales obtenidas y la auto-correlación.

Fft: divide los espectros de las señales mediante la aplicación de la transformada discreta de Fourier a cada una de las mismas.

Conjugado: Realiza la operación multiplicando la transformada de Fourier de una señal por el conjugado de la transformada de Fourier de la otra señal.(espectro cruzado)

CPSD: La función cpds (crosspowerspectraldensity por sus siglas en inglés) permite obtener la relación del espectros cruzado y auto espectro de las señales de prueba.

TF Estimate: El cálculo de la función de transferencia se lo realiza directamente con la función tfestimate de la librería de Matlab.

**Botón Calcular:** Realiza el procedimiento de cálculo, de no estar cargadas los archivos o seleccionadas las posiciones, se muestra un error indicando este problema.

**Coefficientes de Absorción:** Muestra la curva de coeficientes de absorción, Permite exportar los datos a una tabla de texto con los valores mostrados.

#### 11.2.2.2. Código de Programación

La interfaz de usuario de Matlab GUIDE, permite la fácil implementación de códigos; sin embargo dificulta la visualización cronológica de los algoritmos, por esto, se mostrará el código en ficheros con formato .m.

```
%1. Lectura de Archivos
[MIC12C, FS]=wavread('c12.wav');
```

Se leen las correcciones y archivos almacenados con el nombre respectivo, el número 1 y 2 hacen referencia a la posición del micrófono, la letra c o m, se indica si el archivo es una corrección o grabación. Los archivos son .wav en estéreo. El canal 1, en este caso, tendrá la información del micrófono 1 en la posición 'a'.

```

%2. Diseño de la ventana temporal Hamming
A=.54;
B=.46;
n=length(MIC12C);
contador=0;
h1=[1:1:n]';
for k=1:n
h1(k)=A-B*cos((2*pi*k)/(n-1));
contador=contador+1;
end
fórmula

```

A y B son los coeficientes de la ventana

$h_1(k)$  es el vector que contiene la ventana.

```

%3. Aplicar ventana temporal
Mic12c=MIC12C.*hamming;

```

Se multiplica la señal grabada por la ventana para eliminar ruidos

```

%Separación de vectores
C1a= Mic12c(:,1);
C2b= Mic12c(:,2);
C2a= Mic21c(:,1);
C1b= Mic21c(:,2);

```

Se separa la señal original en vectores independientes, se muestra la separación de canales para las correcciones. El mismo proceso se realiza para los archivos grabados de mediciones.

```

%Determinación de Constantes
rho =1.21; %Impedancia característica
T =21; %Temperatura
c =20.047*sqrt(273.15+T); %Velocidad del sonido
s =0.04; %Espaciamiento entre Micrófonos
x1 =0.06; %Distancia del micrófono más lejano a la
muestra
L =length(MIC12C); %Tamaño del vector
F =FS/2*linspace(-1,1,L); %Delimitación de la frecuencia
k =(2*pi*f)/c; %Delimitación del número de onda

```

Se inicializan las constantes de cálculo. Notar que en este archivo se considera constante la distancia del micrófono más lejano a la muestra (X1). Al momento de implementar el código en la GUI, esta distancia es seleccionada por el usuario.

```

%Función de transferencia para mediciones/correcciones
MHI21 =tffc (M1a,M2b);
MHII21 = tffc (M2a,M1b);
CHI21 =tffc (C1a,C2b);
CHII21 = tffc (C2a,C1b);

```

Se aplican las funciones de transferencia a los archivos de correcciones (CH12 y CH21) y de mediciones (MH12 y MH21). Dado que existen varias formas de calcular las funciones de transferencia en Matlab, se han desarrollado 5 funciones para dicho cálculo, las mismas que se listan a continuación:

### 1. Función tffc

```
tffc= (fft (y) .*conj (fft (x))) ./ (fft (x) .*conj (fft (x)));
```

Al multiplicar el espectro de y por el conjugado del espectro de x, se obtiene el espectro cruzado.

### 2. Función tfcp

```
tfcp= cpsd (y,x) ./cpsd (x,x)
```

cpsd es la función de Matlab que calcula el espectro de potencia cruzado. Al ingresar el mismo argumento 2 veces, realiza el cálculo del auto-espectro.

### 3. Función tfft

```
tfft=fft (y) ./fft (x)
```

Se dividen los espectros de ambas señales.

### 4. Función tffc

```
tfxc =fft (xcorr (y,x)) ./fft (xcorr (x));
```

xcorr es la función de Matlab que calcula la correlación cruzada de 2 señales. De existir una sola señal realiza el cálculo de la auto-correlación.

## 5. Función tfes

```
tfes=tfestimate(x,y);
```

tfestimate llama a la función de Matlab que realiza el cálculo de la función de transferencia como la división entre el espectro cruzado y el auto-espectro.

```
%Filtrado de Señales
mhI21= sgolayfilt(MHI21,1,117);
mhII21= sgolayfilt(MHII21,1,117);

chI21= sgolayfilt(CHI21,1,117);
chII21= sgolayfilt(CHII21,1,117);
```

Luego de obtener las funciones de transferencia es importante filtrar ruidos y anomalías presentes en la adquisición de datos. Para esto se utiliza la función *sgolayfilt*.

$$\text{Filtro} = \text{sgolayfilt}(\text{Hyx}, K, F)$$

Hyx= Función de Transferencia

K= Orden del polinomio

F= Tamaño del cuadro

El orden del polinomio debe ser menor que el tamaño del cuadro ( $K < F$ ) y K debe ser impar.

```
%Promedio Funciones de Transferencia
Hm21 = sqrt(mhI21.*mhII21);
Hc21 = sqrt(chI21./chII21);

Corrigiendo la medición
H21 = Hm21./Hc21;
```

Dado que el método utilizado no implica correcciones por tiempos de retardo ni fase, se deben corregir las mediciones dividiéndolas por sus respectivas correcciones.

```
%Cálculo de coeficientes
R = ((H21 - exp(-1i.*k' .*s)) ./ (exp(1i.*k' .*s) - H21)) .* exp(2.1i.*k' .*x1);
```

```
alpha= 1- abs(R).^2;
```

El cálculo de los coeficientes de reflexión se lo realiza con la implementación de la fórmula descrita en la normativa. Luego, se obtiene  $\alpha$  (alpha), o función de los coeficientes de absorción.

```
%Gráfico de los coeficientes de reflexión
plot(f, abs(R));
```

Se grafica la función en el dominio de la frecuencia y se muestran los resultados.

### 11.2.3. Software de mediciones para el método de cuatro micrófonos

#### 11.2.3.1. Interfaz de Usuario

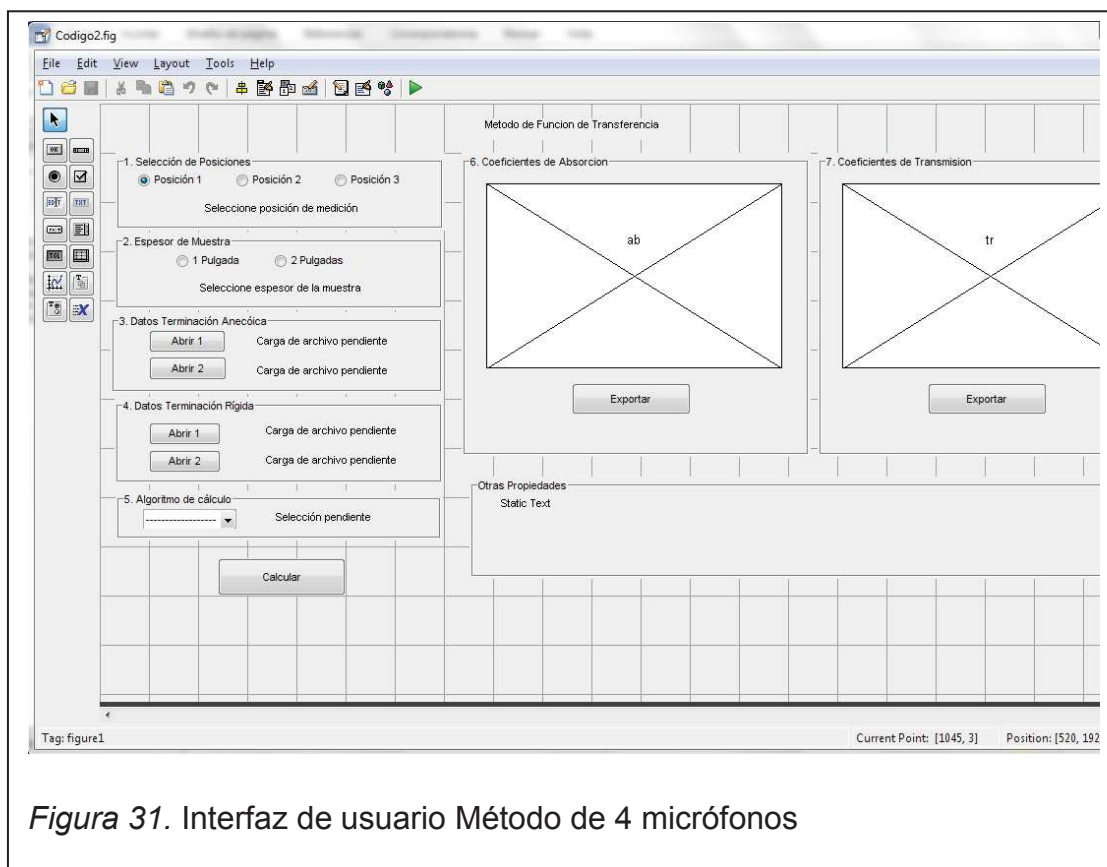


Figura 31. Interfaz de usuario Método de 4 micrófonos

La interfaz se divide en 8 secciones:



**Selección de Posiciones:** Se escoge la posición de pares de micrófonos, según las características del diseño.

**Espesor de la Muestra:** Permite intercambiar el espesor de las muestras entre 1 y 2 pulgadas.

**Datos Terminación anecóica:** Se cargan los datos realizados en la medición con terminación anecóica. En la primera pestaña se cargan los archivos de los micrófonos de la posición 1 y 2, en la segunda pestaña se escogen los archivos de micrófonos de la posición 3 y 4)

**Botón Calcular:** Realiza el procedimiento de cálculo, de no estar cargadas los archivos, seleccionadas las posiciones o el espesor de la muestra de prueba, se muestra un error indicando este problema.

**Algoritmo de cálculo:** El proceso de cálculo de las funciones de transferencia se lo puede realizar mediante 4 algoritmos diferentes:

Correlación: calcula las funciones de transferencia mediante la correlación cruzada de las señales obtenidas y la auto-correlación.

Fft: divide los espectros de las señales mediante la aplicación de la transformada discreta de Fourier a cada una de las mismas.

Conjugado: Realiza la operación multiplicando la transformada de Fourier de una señal por el conjugado de la transformada de Fourier de la otra señal.(espectro cruzado)

CPSD: La función cpds (crosspowerspectraldensity por sus siglas en inglés) permite obtener la relación del espectros cruzado y auto espectro de las señales de prueba.

TF Estimate: El cálculo de la función de transferencia se lo realiza directamente con la función tfestimate de la librería de Matlab.

**Coeficientes de Absorción:** Muestra la curva de coeficientes de absorción, Permite exportar los datos a una tabla de texto con los valores mostrados.

**Coefficientes de Transmisión:** Muestra la curva de coeficientes de transmisión, Permite exportar los datos a una tabla de texto con los valores mostrados.

**Otras Propiedades:**El método de 4 micrófonos permite además la obtención de pérdida por transmisión a incidencia normal y la propagación del Número de Onda en el Material

### 11.2.3.2. Código de Programación

```
%Lectura de Archivos
Mic12a=wavread('m12.wav');
```

El nombre de los archivos indica un archivo almacenado en la carpeta donde se encuentra el fichero funcion.m.

```
%Determinación de Constantes
T=21; %Temperatura en C;
c=20.047*sqrt(273.15+T); %Velocidad del Sonido en [m/s]
L=length(Mic12a); %Tamaño del vector
freq=FS/2*linspace(-1,1,L); %Delimitación de la frecuencia
k=(2*pi*freq/c)'; %Número de onda en [1/m]
p=1.185; %Densidad del aire [kg/m^3]
d=0.0254; %Espesor de la muestra en [m], equivalente
a 1 pulgada
s1=0.04; %Espaciamento entre mic 1 y 2
l1=2; %Espaciamento entre mic 2 y la muestra
s2=0.04; %Espaciamento entre mic 3 y 4
l2=l1; %Espaciamento la muestra y mic 3
```

Notar que en este ejemplo, las distancias entre los 4 micrófonos se mantienen constantes. Al momento de implementar la GUI, estos valores se ven afectados tanto por la separación entre micrófonos dada su ubicación como por el espesor de la muestra de prueba.

```
%Carga de Correcciones Espesor 1"
IHc21 = dlmread('1Hc21.txt');
IHc31 = dlmread('1Hc31.txt');
IHc41 = dlmread('1Hc41.txt');
```

Las correcciones se cargan desde archivos generados y guardados como texto. Estas correcciones pueden usarse siempre de manera definida ya que

presentan la respuesta de frecuencia del tubo de Kundt. Para este ejemplo se ha utilizado la corrección para muestras de 1" de espesor; para muestras de espesor de 2" se deben cargar las respectivas correcciones.

```
%Calculando funciones de Transferencia y realizando correcciones según 8.4.6
```

```
Ha11 = fft(M1a)./conj(fft(M1a));
Ha21 = (fft(M2a)./conj(fft(M1a)))./IHc21;
Ha31 = (fft(M3a)./conj(fft(M1a)))./IHc31;
Ha41 = (fft(M4a)./conj(fft(M1a)))./IHc41;

Hb11 = fft(M1b)./conj(fft(M1b));
Hb21 = (fft(M2b)./conj(fft(M1b)))./IHc21;
Hb31 = (fft(M3b)./conj(fft(M1b)))./IHc31;
Hb41 = (fft(M4b)./conj(fft(M1b)))./IHc41;
```

Se obtienen las funciones de transferencia mediante el la función tffc. Se dividen para las respectivas correcciones. La función de transferencia H11 no se corrige, dado que contiene la información del micrófono 1, utilizado como referencia.

La normativa señala la medición con 2 diferentes tipos de terminaciones al final del tubo: terminación anecóica, que se señala con la letra 'a' (Ha11 por ejemplo) y con una terminación rígida, señalada con la leta 'b' (Hb11).

```
%3. Descomposición de ondas A,B,C y D
% Ver 8.5.4.1 (3)
```

```
Aa=1i*((Ha11.*exp(-1i.*k.*l1)-Ha21.*exp(-
i.*k.*(l1+s1)))./(2*sin(k*s1)));
Ba=1i*((Ha21.*exp(1i.*k.*(l1+s1))-
Ha11.*exp(1i.*k.*l1))./(2*sin(k*s1)));
Ca=1i*((Ha31.*exp(1i.*k.*(l2+s2))-
Ha41.*exp(1i.*k.*l2))./(2*sin(k*s2)));
Da=1i*((Ha41.*exp(-1i.*k.*l2)-Ha31.*exp(-
i.*k.*(l2+s2)))./(2*sin(k*s2)));
```

Se descomponen las ondas incidentes, transmitidas y reflejadas según la normativa. Se realiza el mismo procedimiento para la terminación rígida.

```
% Ver 8.5.4.1 (4)
poa = Aa+Ba;
uoa = (Aa-Ba)/(p*c);
pda = Ca.*exp(-1i.*k.*d) + Da.*exp(1i.*k.*d);
```

```

uda = (Ca.*exp(-1i.*k.*d) - Da.*exp(1i.*k.*d))/(p*c);

pob = Ab+Bb;
uob = (Ab-Bb)/(p*c);
pdb = Cb.*exp(-1i.*k.*d) + Db.*exp(1i.*k.*d);
udb = (Cb.*exp(-1i.*k.*d) - Db.*exp(1i.*k.*d))/(p*c);

% Ver 8.5.4.1 (5)
T11 = (poa.*udb-pob.*uda)/(pda.*udb-pdb.*uda);
T12 = (pob.*pda-poa.*pdb)/(pda.*udb-pdb.*uda);
T21 = (uoa.*udb-uob.*uda)/(pda.*udb-pdb.*uda);
T22 = (pda.*uob-pdb.*uoa)/(pda.*udb-pdb.*uda);

% Ver 8.5.5 Cálculo de Propiedades de los materiales
% 8.5.5.1 Coeficiente de Transmisión
t=(2.*exp(1i.*k.*d))/(T11+(T12/p*c)+p*c*T21+T22);

% 8.5.5.2 Pérdida por transmisión a incidencia normal
TL= 20*log(abs(1/t));

% 8.5.5.3 Coeficiente de Reflexión
R= (T11-p*c*T21)/(T11+p*c*T21);

% 8.5.5.4 Coeficiente de Absorción;
alpha= 1- (abs(R).^2);

% 8.5.5.5 Propagación del Número de Onda en el Material
z= sqrt(T12./T21);

```

## Se grafican los resultados

```

%Gráfico de los coeficientes de absorción
figure(4)
plot(freq, alpha);
axis([0 3000 0 1]);
title('Coeficiente de Absorción','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)'), ylabel('alpha')
gridon

```

## 11.2.4. Software para el método de medición In Situ

### 11.2.4.1. Interfaz de Usuario

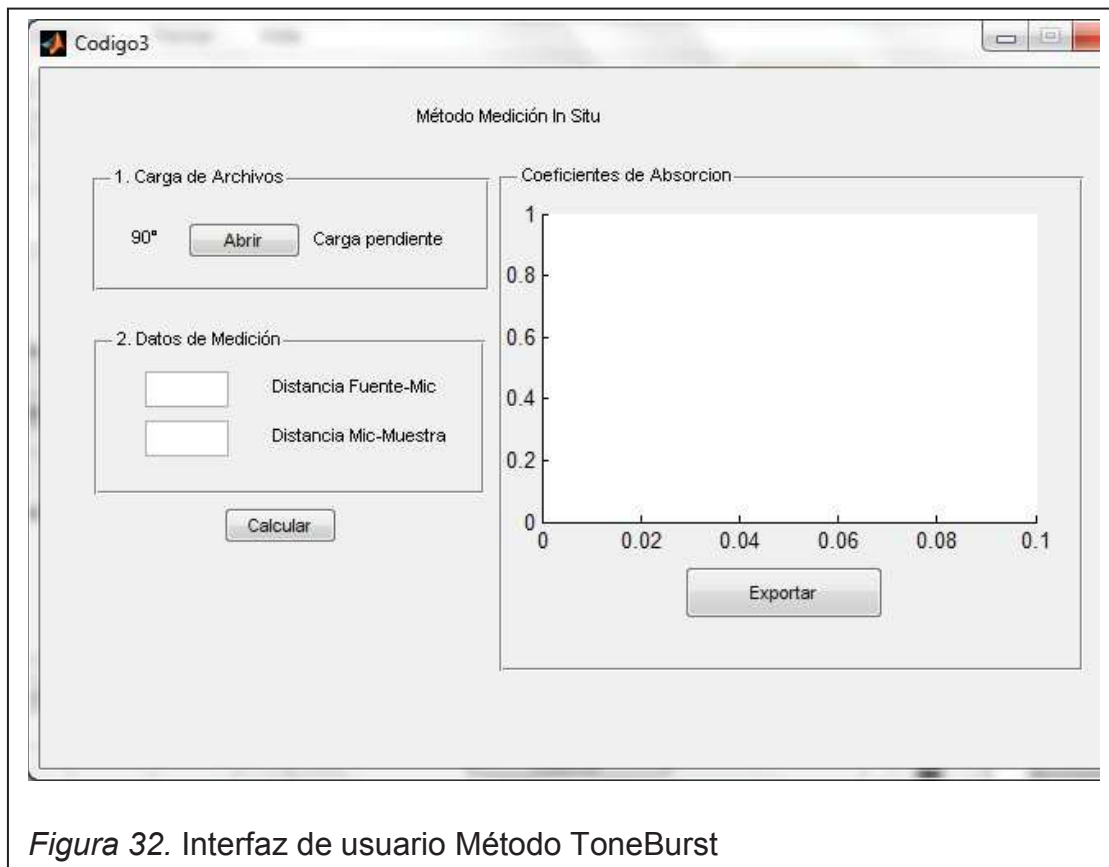


Figura 32. Interfaz de usuario Método ToneBurst

El software permite la medición In Situ con el micrófono y la fuente posicionados de manera perpendicular a la superficie de muestra; así podemos cargar un archivo de audio luego de realizar la medición de la manera antes mencionada.

**Carga de Archivos:** Se selecciona el archivo de medición In Situ presionando el botón “Abrir”

**Datos de Medición:** Existen 2 casillas, donde se ingresan las distancias, en metros, de la fuente hasta el micrófono de medición y del micrófono hasta la superficie de muestra.

**Botón Calcular:** Realiza el procedimiento de cálculo, de no estar cargados los archivos, se muestra un error indicando este problema.

**Coefficientes de Absorción:** Muestra la curva de coeficientes de absorción, Permite exportar los datos a una tabla de texto con los valores mostrados.

### 11.2.4.2. Código de Programación

```
%Diseño de la ventana temporal Adrienne
%Diseño de las ventanas Blackman-Harris (BH) según 4.4.5

%Coeficientes de la ventana BH
A0=.35875;
A1=.48829;
A2=.14128;
A3=.01168;

%Límite del tamaño de las ventanas
n=96;
m=124;
contador=0;
bh1=1:1:n;
bh2=1:1:m;

%Creación de las ventanas
for k=1:n
bh1(k)=A0-A1*cos((2*pi*k)/(n-1))+A2*cos((4*pi*k)/(n-1))-
A3*cos((6*pi*k)/(n-1));
contador=contador+1;
end

contador=0;
for k=1:m
bh2(k)=A0-A1*cos((2*pi*k)/(m-1))+A2*cos((4*pi*k)/(m-1))-
A3*cos((6*pi*k)/(m-1));
contador=contador+1;
end
bh3=bh2(m/2:1:m);
k=1;
```

Se diseñan las 2 ventanas BH para la construcción de la Ventana Adrienne.

```
%Diseño final de la Ventana Adrienne
for l=1:254
if l<n/2
Adrienne(l)=bh1(l);
elseif l<192
Adrienne(l)=1;
elseif l<=254
Adrienne(l)=bh3(k);
k=k+1;
end
end
```

La ventana está estructurada por 3 partes: la mitad izquierda de una ventana BH, una función unitaria y la mitad derecha de una ventana BH al final.

```
%Lectura de Datos
[AudioFF,FS,NBITS] = wavread('medición.wav');
```

El archivo 'medición.wav' es el archivo de audio que contiene la información de medición. Para el código GUI, el usuario puede escoger un archivo para realizar el cálculo.

```
%Datos de Distancias
d1=.43;
d2=.55;
c=344;
```

```
%Cálculo de retardos
dly1=d1/c;
dly2=d2/c;
```

```
%Corrigiendoretardos
tdly1=(dly1+0.01518)*FS;
tdly2=(dly2+0.01805)*FS;
```

Se corrigen los retardos en función del tiempo que le toma a la fuente emitir la señal de prueba una vez ejecutada la acción.

```
%Separando la señal incidente y reflejada
l=length(Audio);
AudioFF=Audio(tdly1:l);
Audioref=Audio(tdly2:l);
```

```
%Límite de vectores
a1=AudioFF(1:254);
a2=Audioref(1:254);
```

Luego de identificar los picos de la señal original en la grabación del impulso en campo libre y de la reflexión en la medición, se determina el inicio de la señal de audio 0.2 milisegundos antes del inicio del pico. Luego, se delimita el archivo a la longitud de la ventana previo a su implementación.

```
%Aplicando Filtros
C1=a1.*Adrienne';
C2=a2.*Adrienne';
```

Se filtran las señales aplicando la ventana temporal.

```
%Pasar al dominio de la frecuencia
L=length(C1);
f=FS/2*linspace(-1,1,L);
S1=fftshift(fft(C1,L)/L);
```

```
S2=fftshift (fft (C2,L) /L) ;
```

Se realiza en paso al dominio de la frecuencia, obteniendo los espectros de cada una de las señales.

Se crean 7 filtros, que son los límites de las bandas de octava de frecuencia. De esta manera se podrá separar el espectro de la señal en secciones que contengan únicamente la información energética dentro de la banda de frecuencia de interés, como procedimiento previo a su integración.

```
%Creación de los filtros
F125=zeros (size (f) ) ;
F250=zeros (size (f) ) ;
F500=zeros (size (f) ) ;
F1k=zeros (size (f) ) ;
F2k=zeros (size (f) ) ;
F4k=zeros (size (f) ) ;
```

Los límites de las bandas de tercio de octava se obtienen despejando a siguiente fórmula

$$f_m = \sqrt{F_s \cdot F_i} \quad (\text{Ecuación 50})$$

La frecuencia superior de una banda es el doble de la frecuencia precedente.

$$F_s = 2F_i \quad (\text{Ecuación 51})$$

Reemplazando la Ecuación 51 en la Ecuación 50 y despejando se obtiene

$$F_m = \sqrt{2}F_i \quad (\text{Ecuación 52})$$

La frecuencia media será el límite inferior de la banda de octava siguiente.

```
b1=89; %Límite inferior banda de 125Hz
b2=177; %Límite inferior banda de 250Hz
b3=353; %Límite inferior banda de 500Hz
b4=707; %Límite inferior banda de 1kHz
b5=1414; %Límite inferior banda de 2kHz
b6=2828; %Límite inferior banda de 4kHz
b7=5656; %Límite inferior banda de 8kHz.
```

```
for k=1:L
if abs (f (k) ) >=b1 && abs (f (k) ) < b2
F125 (k) =1;
end
```



```

if abs(f(k))>=b2 && abs(f(k))< b3
F250(k)=1;
end
if abs(f(k))>=b3 && abs(f(k))< b4
F500(k)=1;
end
if abs(f(k))>=b4 && abs(f(k))< b5
F1k(k)=1;
end
if abs(f(k))>=b5 && abs(f(k))< b6
F2k(k)=1;
end
if abs(f(k))>=b6 && abs(f(k))< b7
F4k(k)=1;
end
end
end

```

**%Aplicación de filtros a la señal**

```

sf1=F125.*S1';
sf2=F250.*S1';
sf3=F500.*S1';
sf4=F1k.*S1';
sf5=F2k.*S1';
sf6=F4k.*S1';

```

```

sfp1=F125.*S2';
sfp2=F250.*S2';
sfp3=F500.*S2';
sfp4=F1k.*S2';
sfp5=F2k.*S2';
sfp6=F4k.*S2';

```

Se aplican los filtros de frecuencia a la señal, como resultado se obtienen varias señales donde cada una posee información del espectro en una banda de frecuencia específica.

**%Cálculo del índice de reflexión**

```

RI125=(trapz(f,(abs(sf1)).^2))/(trapz(f,(abs(sfp1)).^2));
RI250=(trapz(f,(abs(sf2)).^2))/(trapz(f,(abs(sfp2)).^2));
RI500=(trapz(f,(abs(sf3)).^2))/(trapz(f,(abs(sfp3)).^2));
RI1k=(trapz(f,(abs(sf4)).^2))/(trapz(f,(abs(sfp4)).^2));
RI2k=(trapz(f,(abs(sf5)).^2))/(trapz(f,(abs(sfp5)).^2));
RI4k=(trapz(f,(abs(sf6)).^2))/(trapz(f,(abs(sfp6)).^2));

```

La integral de la Ecuación 49, se calcula mediante la función trapz.

$$z=\text{trapz}(x,y)$$

El cómputo de la integral de y, a través del eje x se lo realiza mediante el método de cálculo trapezoidal.

```
%Almacenamiento de datos en el vector RI  
RI=[RI125 RI250 RI500 RI1k RI2k RI4k];
```

```
%Cálculo del coeficiente de absorción  
alpha=1-RI;
```

Se obtiene los coeficientes de absorción por bandas de octava.

## **12. Capítulo V. Procedimiento de Medición**

### **12.1. Procedimiento de medición Tubo de Kundt**

Para realizar las mediciones del tubo de Kundt se tiene tres etapas: la de montaje, adquisición de datos y finalmente la etapa de procesamiento de datos.

#### **12.1.1. Montaje**

El procedimiento de montaje para las dos técnicas de mediciones en tubo de Kundt En esta etapa se debe instalar el sistema y asegurarse de que el montaje sea el adecuado. Para esto se deberá seguir el procedimiento siguiente:

1. Preparar la muestra y ubicarla en el porta muestras correspondiente, ya sea el portamuestras para el método de 4 micrófonos o el de 2 micrófonos. La muestra deberá ser de 5 cm de diámetro.
2. Asegurarse de que exista un correcto montaje sin espacios por los que se pueda filtrar el sonido, de ser necesario se deberá colocar alguna sustancia sellante como Vaselina a base de petróleo o silicona en los bordes de la muestra para garantiza el sellado.
3. Realizar las conexiones de micrófonos a la interfaz, numerándolos desde la fuente emisora y ubicándolos en ese orden en los canales de la interfaz.
4. Verificar las conexiones tanto de entrada como de salida.

#### **12.1.2. Adquisición de datos**

El procedimiento de adquisición de datos para el método de tubo de Kundt es similar en los dos métodos ya sea el de 2 o 4 micrófonos y el software que se utiliza es el mismo, pero el procedimiento difiere en algunos aspectos.

### 12.1.2.1. Método de 2 micrófonos.

El procedimiento para el proceso de adquisición de datos es el siguiente:

1. Abrir el programa “Tubosoft”

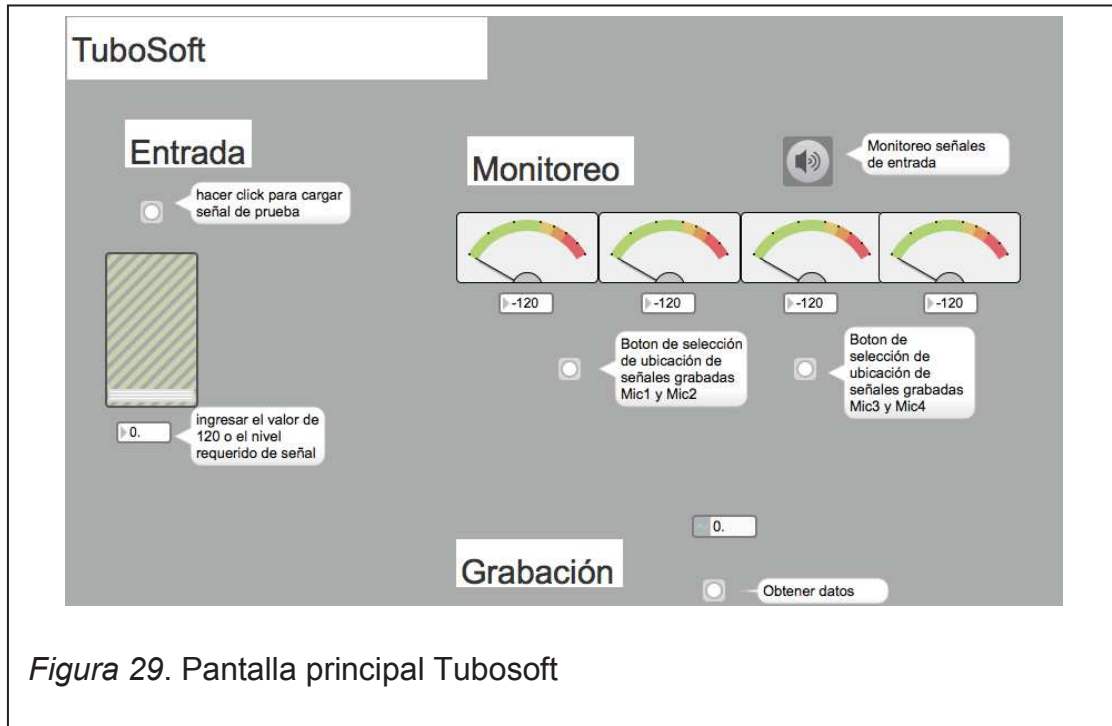


Figura 29. Pantalla principal Tubosoft

2. Cargar la señal de prueba, la cual consiste en un archivo de ruido rosa de 50 ms de duración.

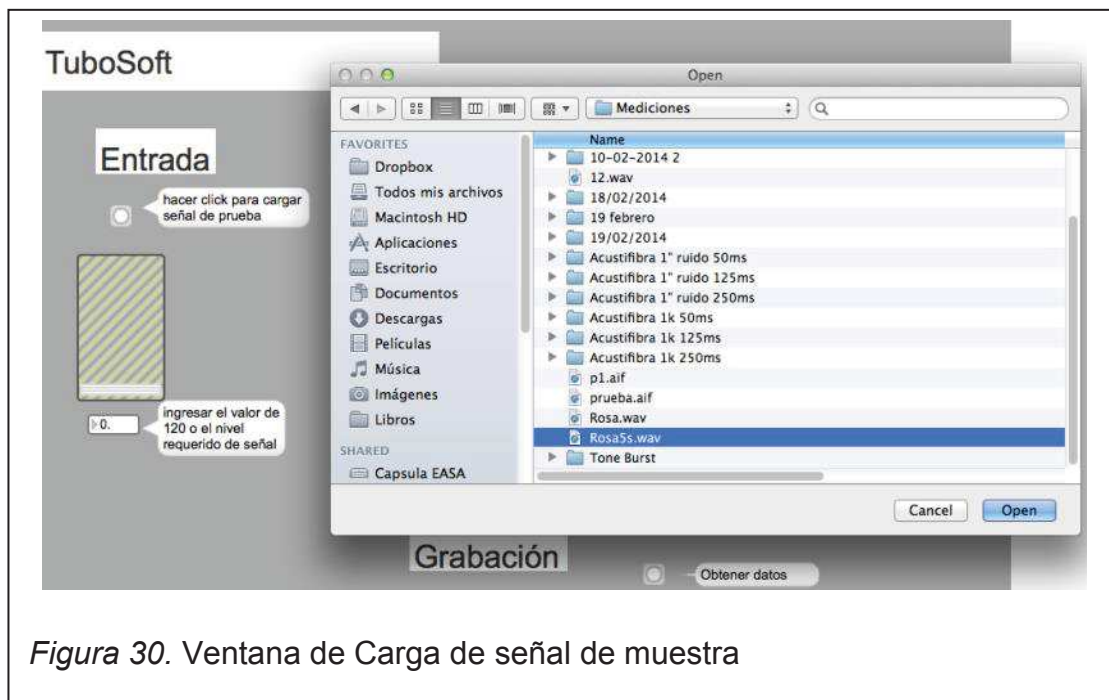


Figura 30. Ventana de Carga de señal de muestra

3. Ingresar el nivel de señal por medio del *Fader* o por medio del teclado en la ventana bajo el *Fader*. El valor por defecto con el cual se ha calibrado el tubo y se han realizado las mediciones es de 120.

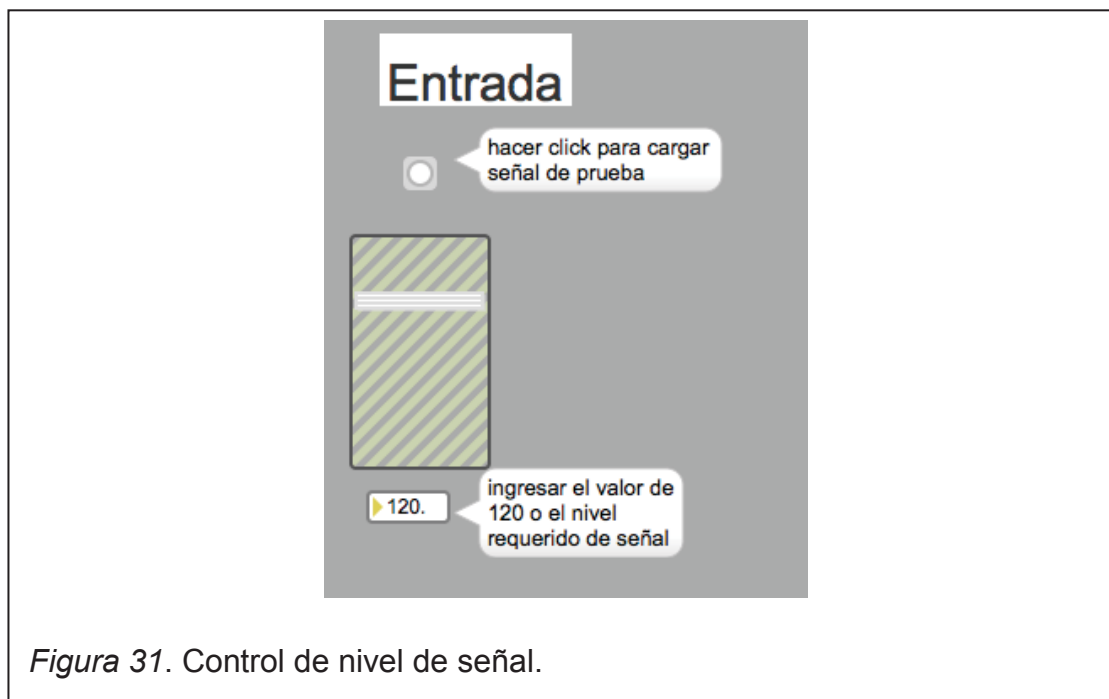


Figura 31. Control de nivel de señal.

- Comprobar que se esté recibiendo señal en los micrófonos a utilizar por medio de los VU meters. Para esto se deberá hacer click en el botón Monitoreo de señales de entrada.

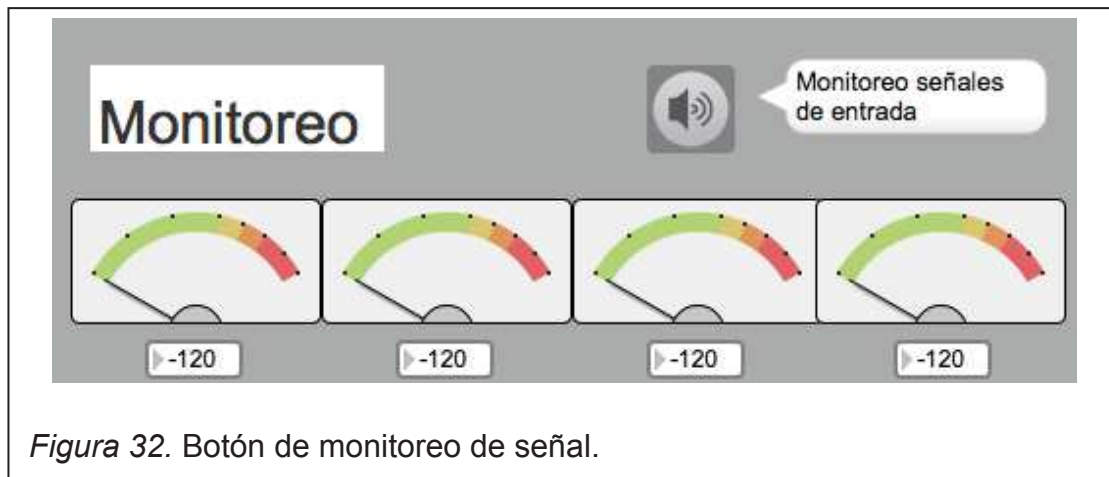


Figura 32. Botón de monitoreo de señal.

- Una vez constatado que se tenga señal de entrada en cada micrófono, se deberá hacer click en los botones para seleccionar la ubicación en la cual se desea que se almacene el archivo de audio. Como se esta midiendo con el método de 2 micrófonos, solo va a ser necesario el hacer click en el botón para generar el archivo para los micrófonos 1 y 2.

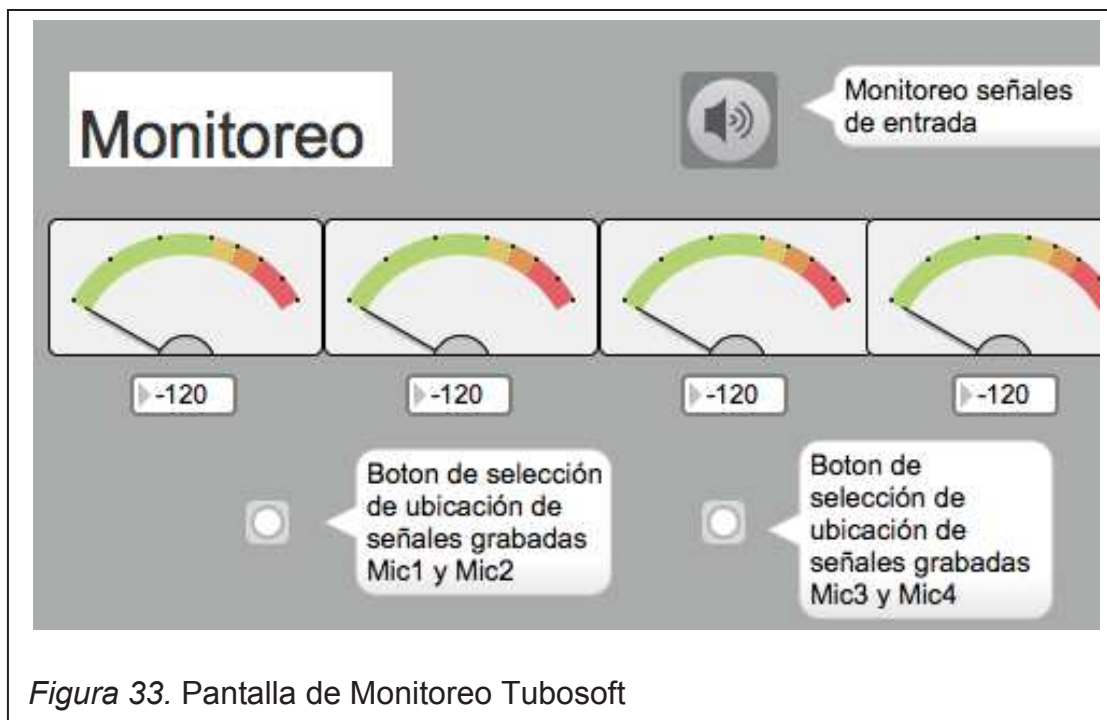
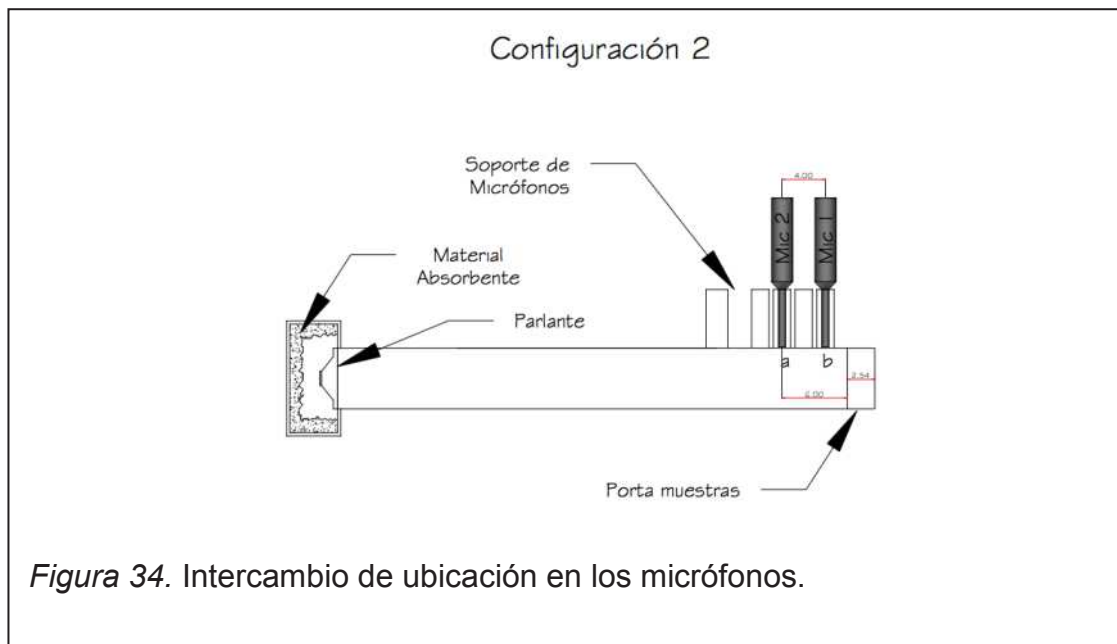


Figura 33. Pantalla de Monitoreo Tubosoft

6. Hacer click en el botón Obtener Datos, este botón va a reproducir la señal de prueba y simultáneamente almacenar la información de los micrófonos ubicados en las posiciones de medición.
7. Intercambiar la posición de los micrófonos a la configuración 2 como se indica en la figura.



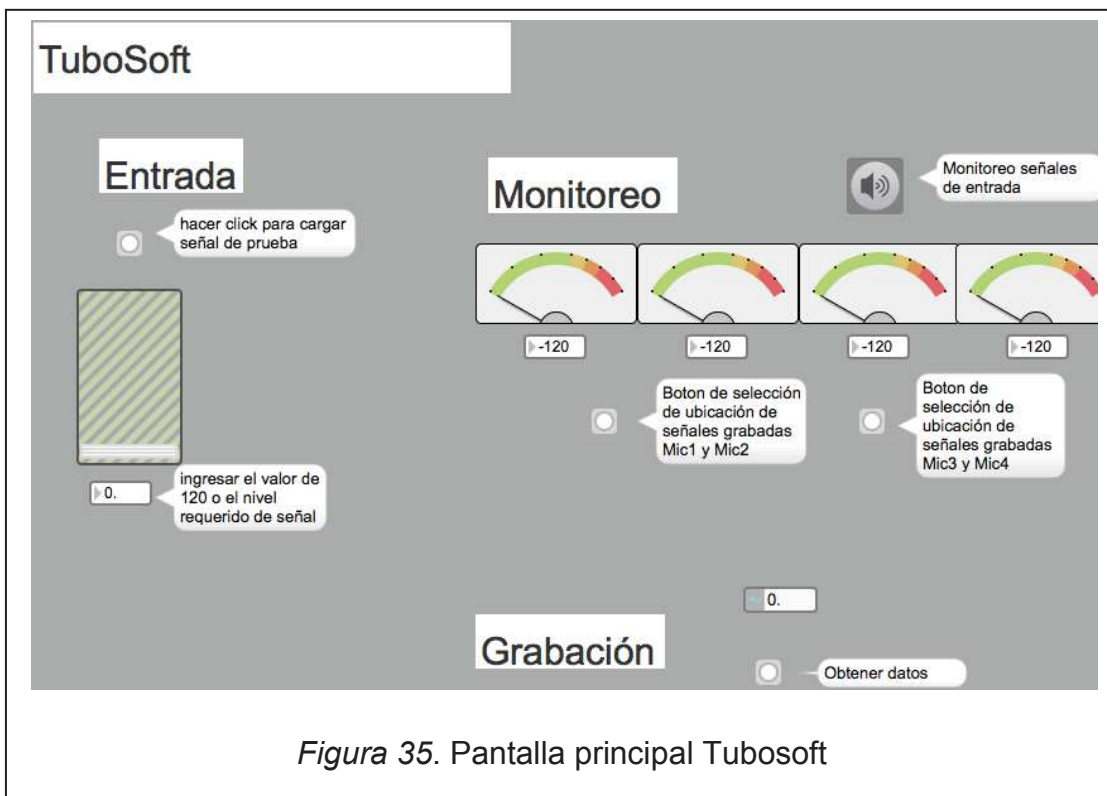
8. Volver a realizar los pasos 5 y 6.

Luego de realizar este procedimiento, el software va a generar dos archivos .wav, el primero es con la configuración normal de micrófonos y el segundo con la configuración intercambiada, esto permite realizar correcciones posteriores y brindar mayor seguridad a nuestra medición.

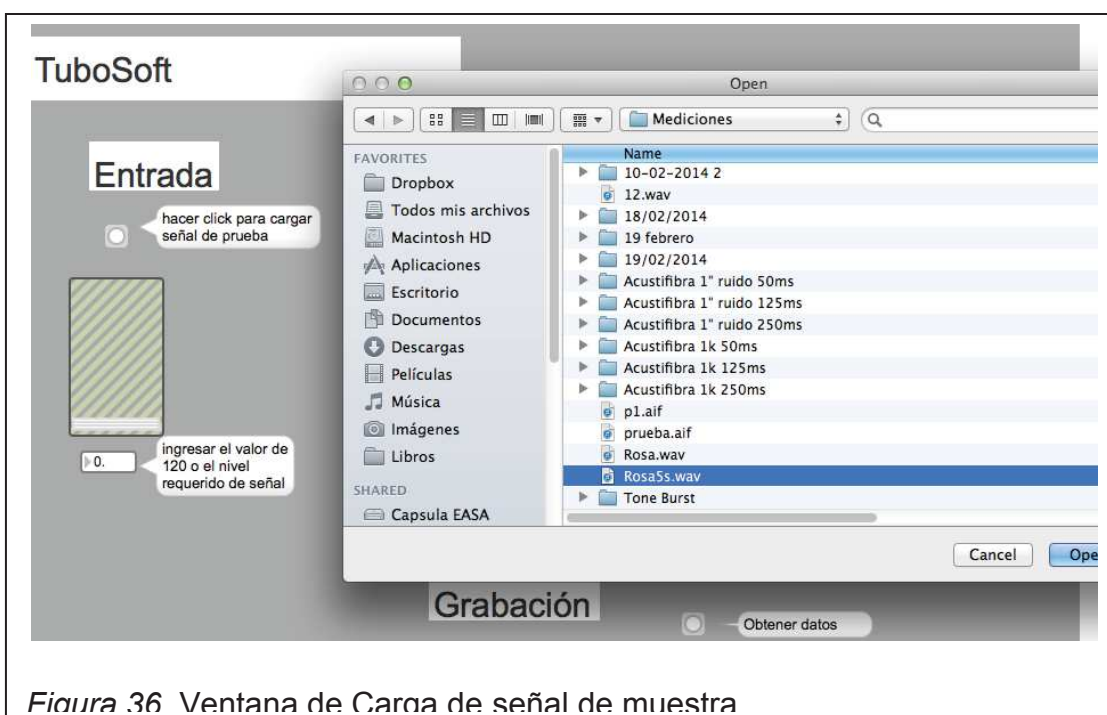
#### 12.1.2.2. Método de 4 micrófonos.

El procedimiento para el proceso de adquisición de datos es el siguiente:

1. Abrir el programa Tubosoft.

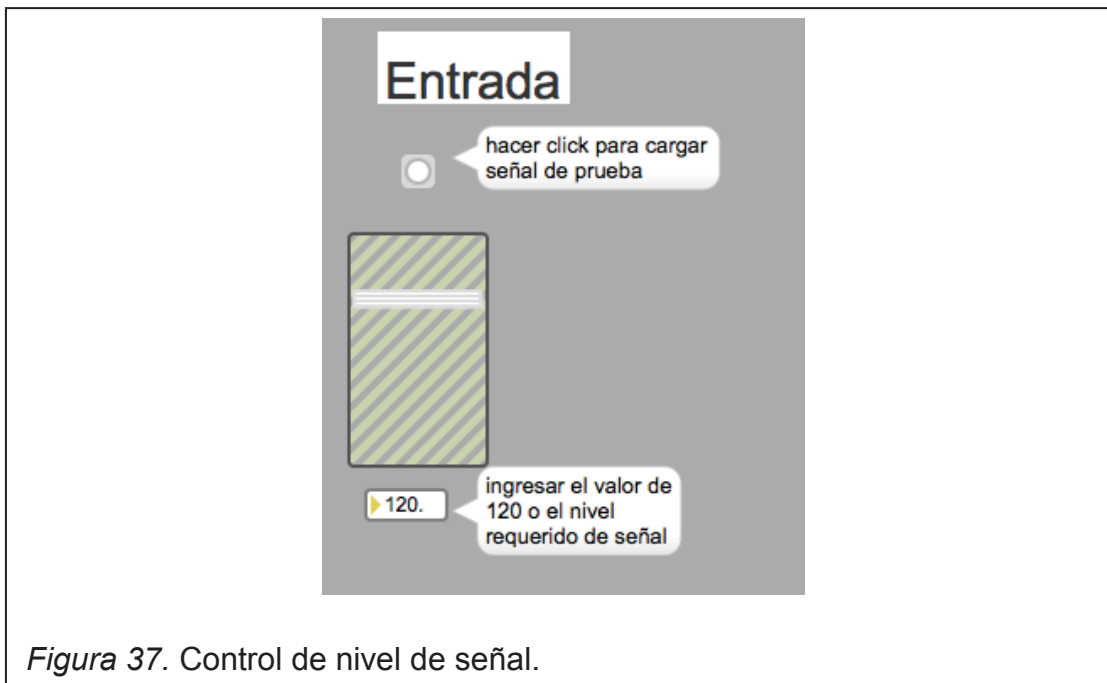


2. Colocar la terminación anecóica en el tubo.
3. Cargar la señal de prueba, la cual consiste en un archivo de ruido rosa de 50 ms de duración.





- Ingresar el nivel de señal por medio del Fader o por medio del teclado en la ventana bajo el Fader. El valor por defecto con el cual se ha calibrado el tubo y se han realizado las mediciones es de 120.



- Comprobar que se este recibiendo señal en los micrófonos a utilizar por medio de los VU meters. Para esto se deberá hacer click en el botón Monitoreo de señales de entrada.



- Una vez constatado que se tenga señal de entrada en cada micrófono, se deberá hacer click en los botones para seleccionar la ubicación en la cual se

desea que se almacene el archivo de audio. Se deberá hacer click en el botón para seleccionar la ubicación del Mic1 y Mic2 y posteriormente el botón para Mic3 y Mic4.

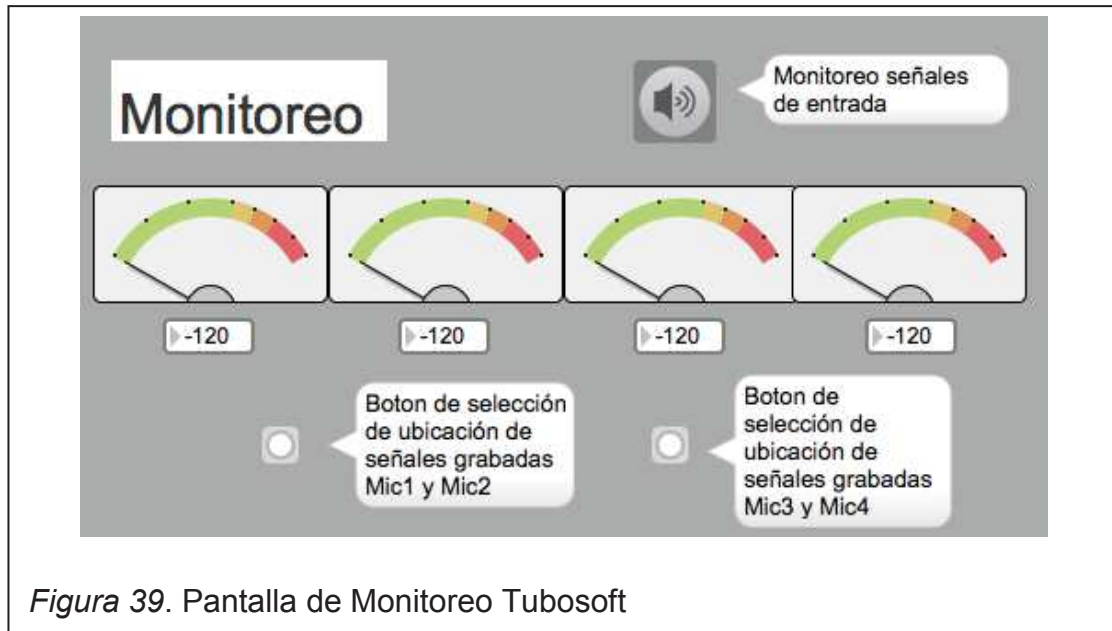


Figura 39. Pantalla de Monitoreo Tubosoft

7. Hacer click en el botón Obtener Datos, este botón va a reproducir la señal de prueba y simultáneamente almacenar la información de los micrófonos ubicados en las posiciones de medición.
8. Retirar la terminación anecóica.
9. Repetir el paso 7, para obtener la información sin terminación anecóica.

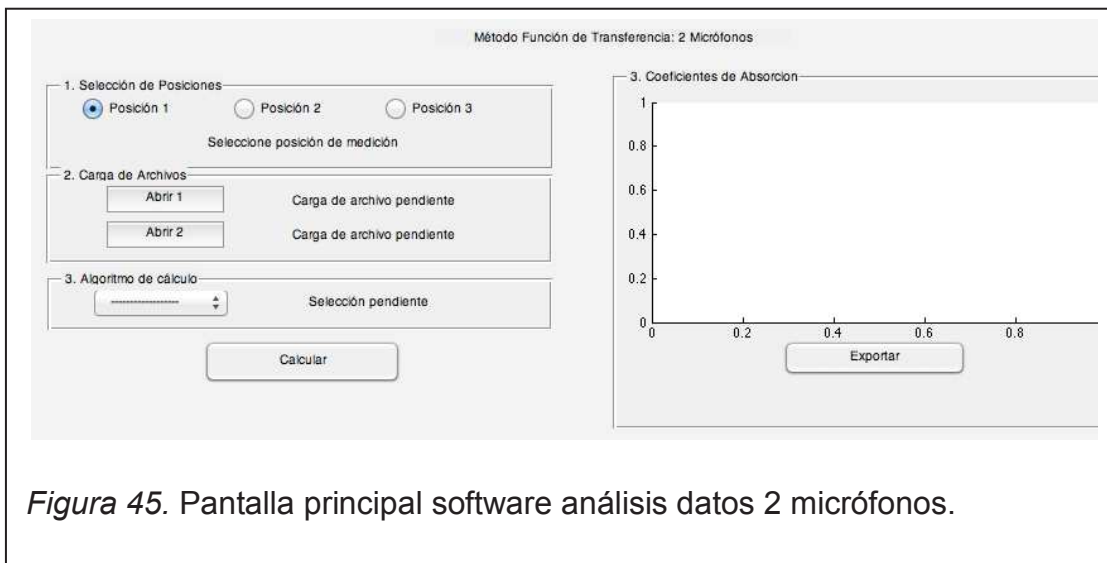
Luego de realizar este procedimiento, se obtiene 4 archivos .wav, 2 son los correspondientes a la terminación anecóica y 2 son los correspondientes a la terminación rígida.

### 12.1.3. Post Procesamiento de Información Tubo de Kundt

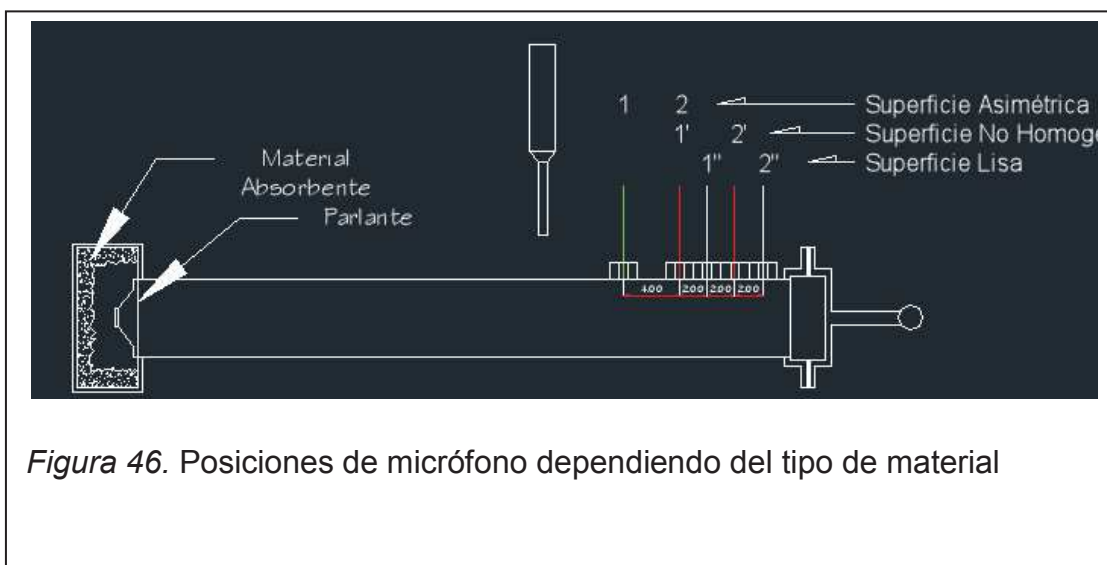
#### 12.1.3.1. Método 2 micrófonos

Una vez que se tienen los archivos de audio con la información captada por los micrófonos, se deberá seguir el siguiente procedimiento para obtener los coeficientes acústicos de interés.

1. Abrir el archivo de Matlab correspondiente al método de 2 micrófonos.



2. Seleccionar la posición, en la cual fueron tomados los datos, haciendo click. La selección de la posición depende de las características del material a ser medido. En la Figura45 . se puede observar cómo elegir la posición correcta.



La posición 1 es la que se encuentra señalada con las líneas de color blanco, la posición 2 es la que se encuentra de color rojo, y la posición 3 es una combinación de la posición donde está ubicada la línea verde y la posición que se encuentra inmediatamente a la derecha.

3. Cargar los archivos de audio generados en MAX MSP. El primer botón de carga de archivos es para la configuración 1 y el segundo para el archivo generado en configuración 2.
4. Seleccionar el algoritmo de cálculo a utilizar en el menú desplegable.

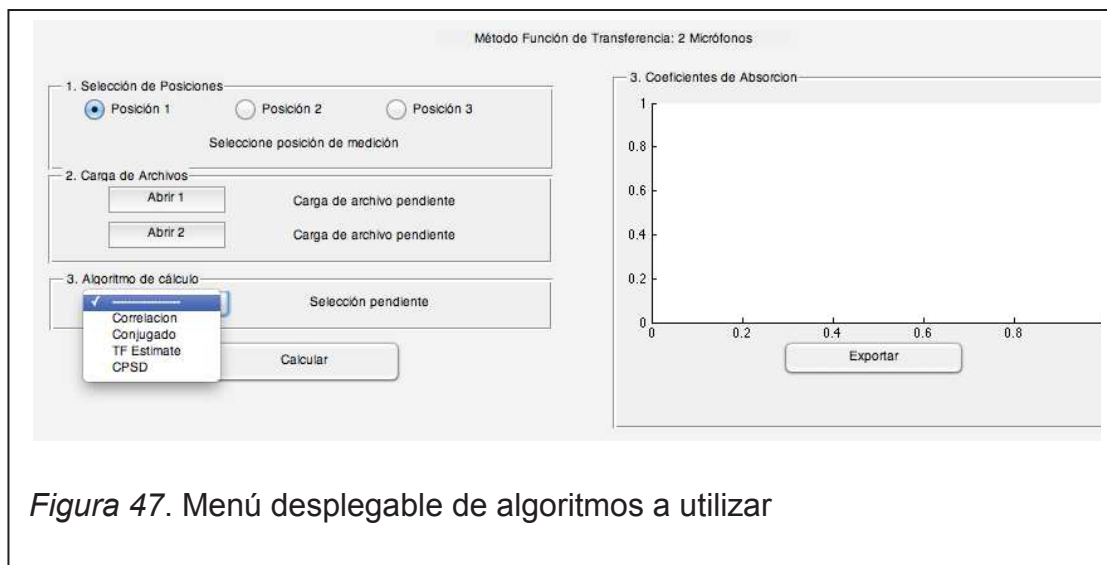


Figura 47. Menú desplegable de algoritmos a utilizar

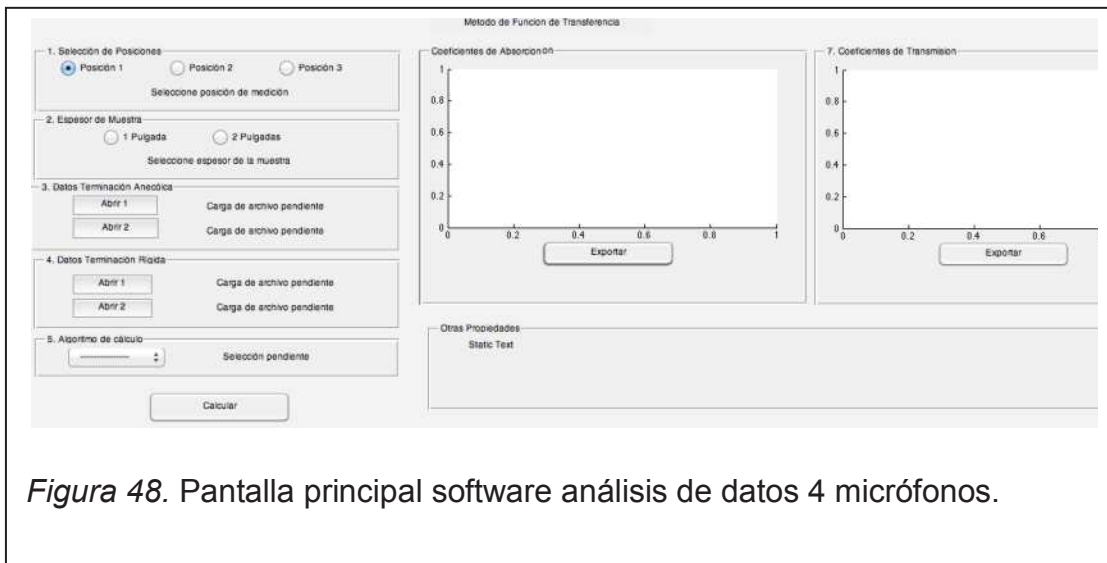
Nota: Al ser un software experimental, nos permite elegir varias formas de calcular los coeficientes de absorción, con lo cual se pueden realizar comparaciones entre ellas.

5. Hacer click en el botón calcular para procesar los datos y obtener los coeficientes buscados.
6. De ser necesaria la exportación de los datos se puede utilizar el botón exportar, el cual generará un archivo .xls con los datos obtenidos.

### 12.1.3.2. Método 4 micrófonos

Una vez que se tienen los archivos de audio con la información captada por los micrófonos, se deberá seguir el siguiente procedimiento para obtener los coeficientes acústicos de interés.

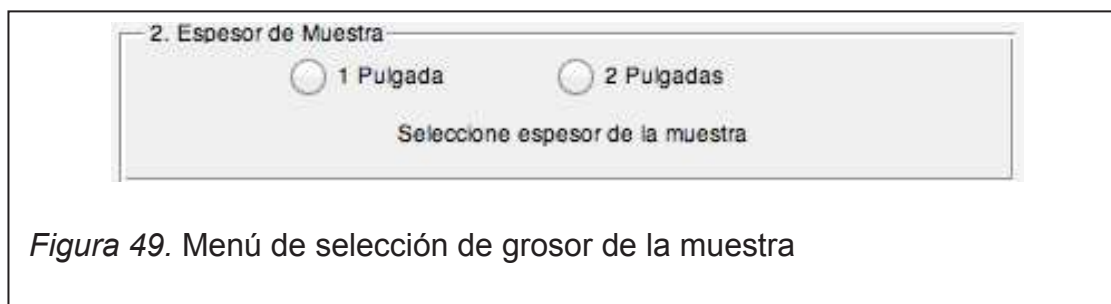
1. Abrir el archivo de Matlab correspondiente al método de 4 micrófonos.



*Figura 48.* Pantalla principal software análisis de datos 4 micrófonos.

2. Seleccionar la posición, en la cual fueron tomados los datos, haciendo click. La selección de la posición depende de las características del material a ser medido. En la Figura 48 se puede observar cómo elegir la posición correcta.

3. Seleccionar el grosor de la muestra.



*Figura 49.* Menú de selección de grosor de la muestra

4. Cargar los archivos de audio generados en en MAX MSP.



Figura 50. Menú de carga de archivos wav

5. Seleccionar el algoritmo de cálculo a utilizar en el menú desplegable.

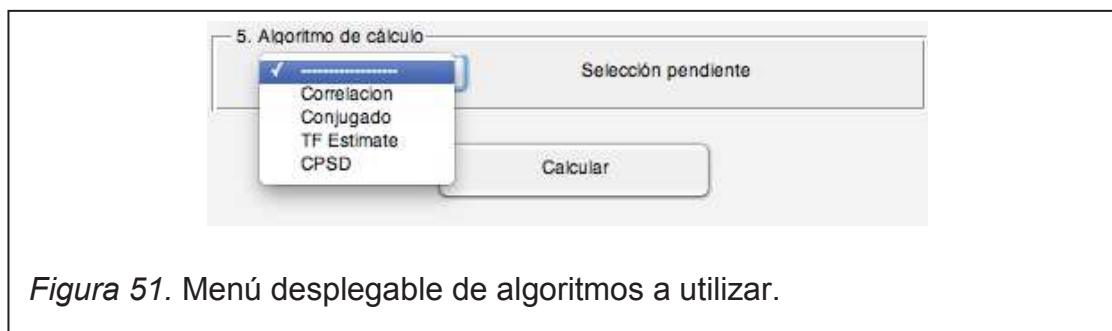


Figura 51. Menú desplegable de algoritmos a utilizar.

Nota : Al ser un software experimental, permite elegir varias formas de calcular los coeficientes de absorción, con lo cual se pueden realizar comparaciones entre ellas.

6. Hacer click en el botón calcular para procesar los datos y obtener los coeficientes buscados.
7. De ser necesaria la exportación de los datos se pueden utilizar los botones exportar, los cuales generarán archivos .xls con los datos obtenidos.

## 12.2. Procedimiento de medición “In Situ”

### 12.2.1. Consideraciones

**Superficie:** la superficie de muestra debe estar seca, para evitar alteraciones a las propiedades propias del material. La temperatura de la superficie debe estar entre 0-70°C.

**Viento:** No podrán realizarse mediciones con la presencia de viento a una velocidad mayor a 5m/s.

**Temperatura del Aire:** La temperatura del aire durante las mediciones deberá estar entre 0-40°C

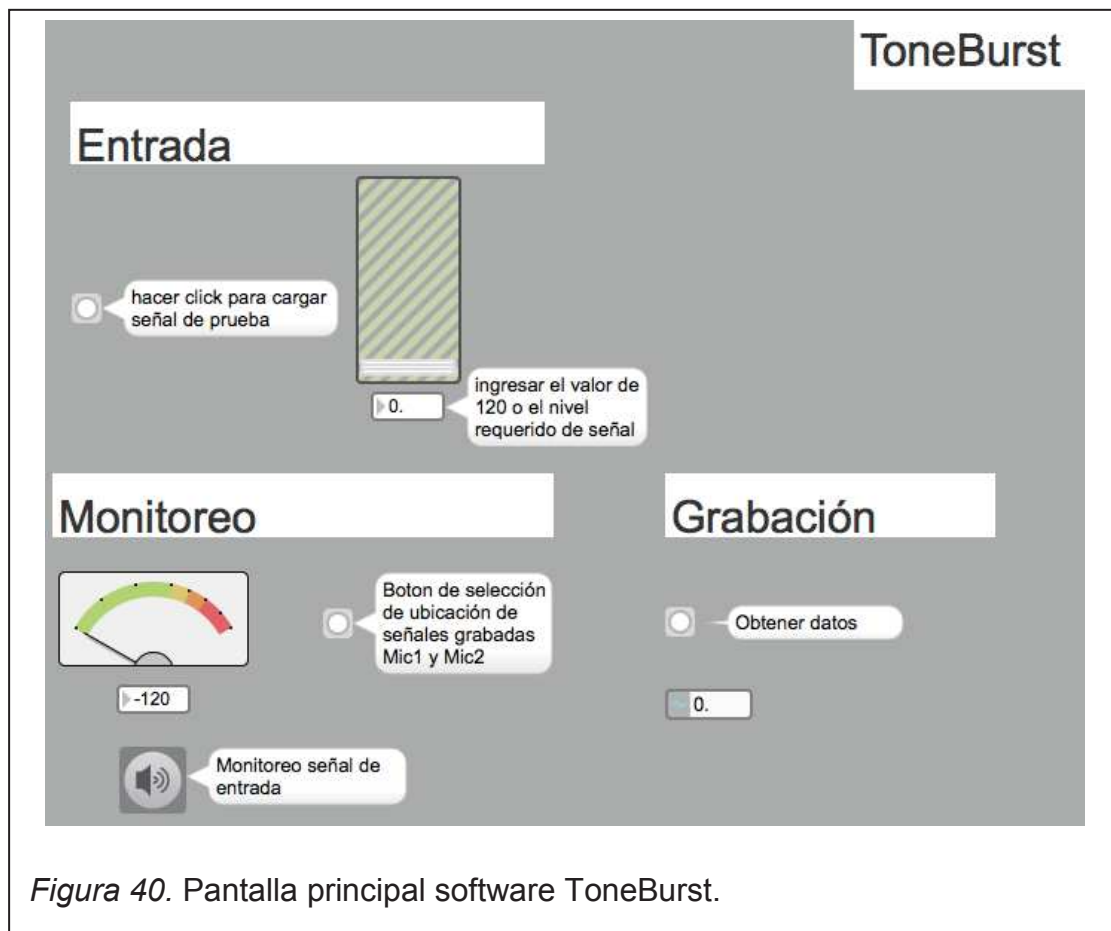
### 12.2.2. Procedimiento de Medición

1. Verificar las condiciones medioambientales y la superficie de muestra.
2. Ubicar el equipamiento de medición según tal.
3. Verificar la presencia de objetos reflectantes cercanos a la superficie de muestra que puedan alterar las mediciones.
4. Generar la señal MLS y capturar la respuesta en el micrófono de muestra, mediante el software *ToneBurst*
5. Cargar los archivos en el software de mediciones
6. Ingreso de datos de medición.
7. Analizar los resultados.

### 12.2.3. Adquisición de datos *ToneBurst*:

Para la adquisición de datos en el método de *ToneBurst* se deberá seguir el siguiente procedimiento:

4. Abrir el programa *ToneBurst*



5. Hacer click en el botón para cargar el archivo de la señal de prueba,
6. Seleccionar la señal de prueba, por defecto es una señal MLS de 0.5 ms de duración.





Figura 41. Ventana de carga de señal de prueba.

10. Ingresar el nivel de señal por medio del Fader o por medio del teclado en la ventana bajo el Fader. El valor por defecto con el cual se ha calibrado el tubo y se han realizado las mediciones es de 120.

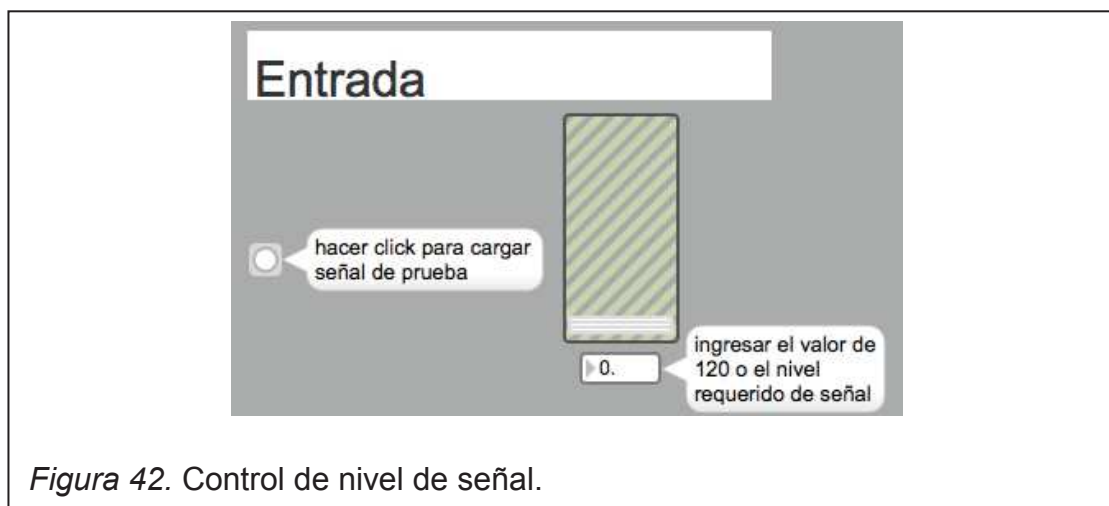
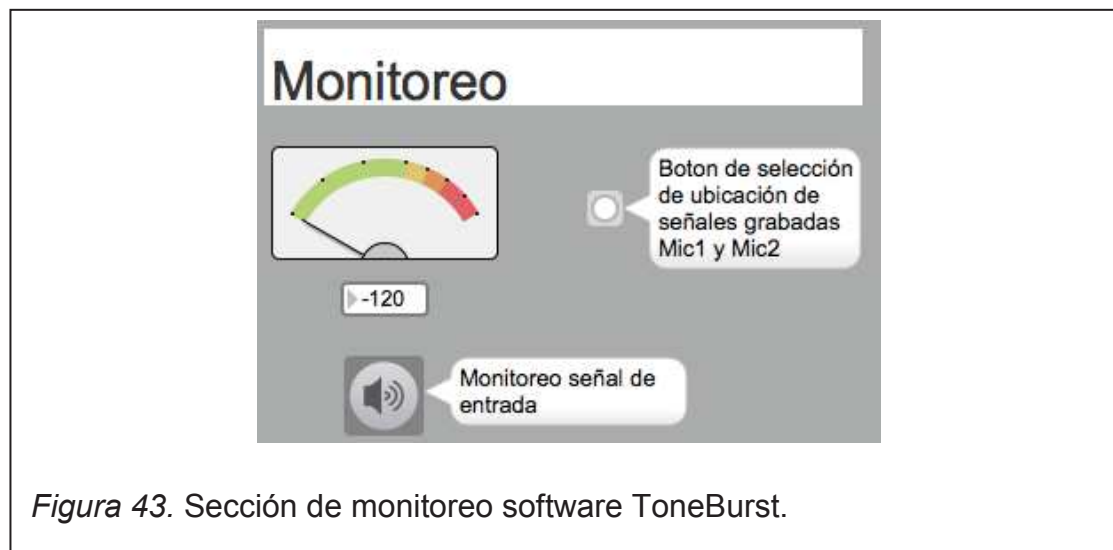
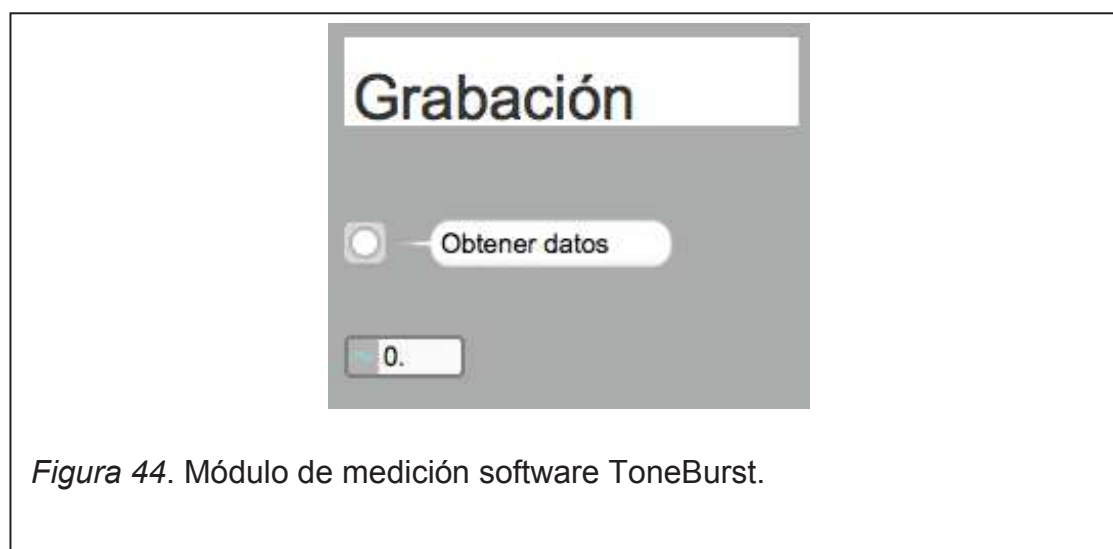


Figura 42. Control de nivel de señal.

7. Comprobar que la recepción de señal en el micrófono a utilizar por medio del VU meter. Para esto se deberá hacer click en el botón Monitoreo de señales de entrada.



8. Finalmente, se deberá hacer click en el botón Obtener Datos, este botón permite reproducir la señal de prueba y simultáneamente almacenar la información del micrófono utilizado en la medición.



## **13. Capítulo VI. Resultados y Análisis de Datos**

### **13.1. Resultados**

Se realizaron mediciones para constatar el funcionamiento de los métodos implementados y se obtuvieron los siguientes resultados.

#### **13.1.1. Método de 2 micrófonos**

Para poder probar el funcionamiento del tubo y del software se realizaron las mediciones de materiales conocidos en el mercado. Se tomaron muestras de Acustifibra de 1" y Black Theater 1" los cuales son materiales absorbentes de superficie lisas. Las mediciones se realizaron por medio de 5 formas de procesar la señal

##### **13.1.1.1. Medición Acustifibra 1"**

#### **Función tffc**

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

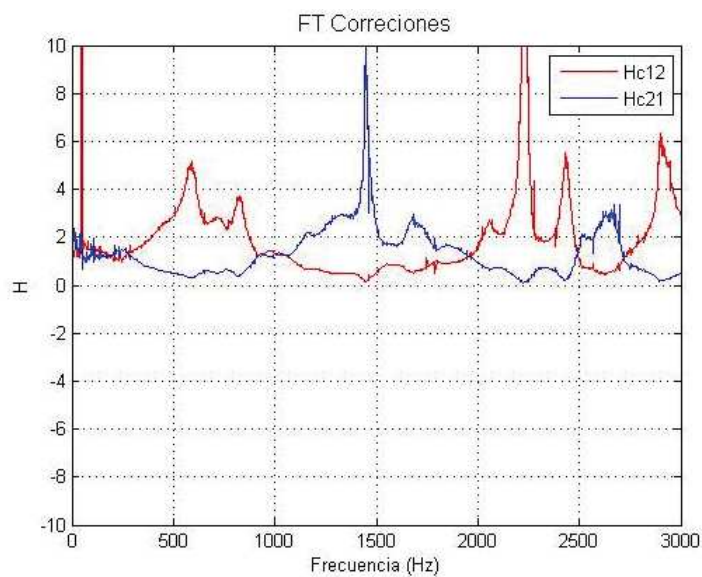


Figura 52. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tffc.

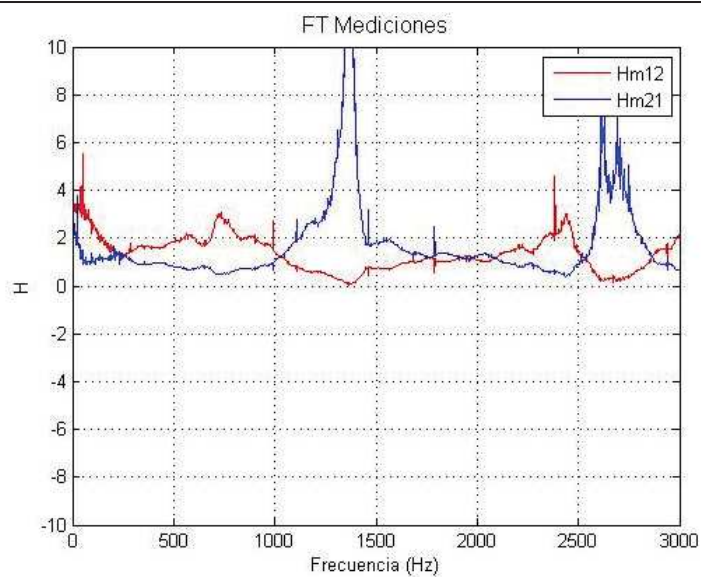


Figura 53. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tffc.

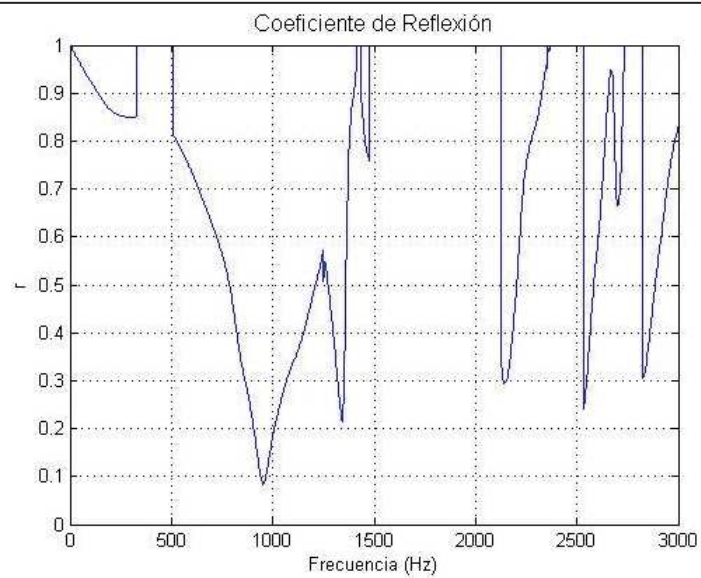


Figura 54. Coeficiente de reflexión acustifibra. Por método tffc.

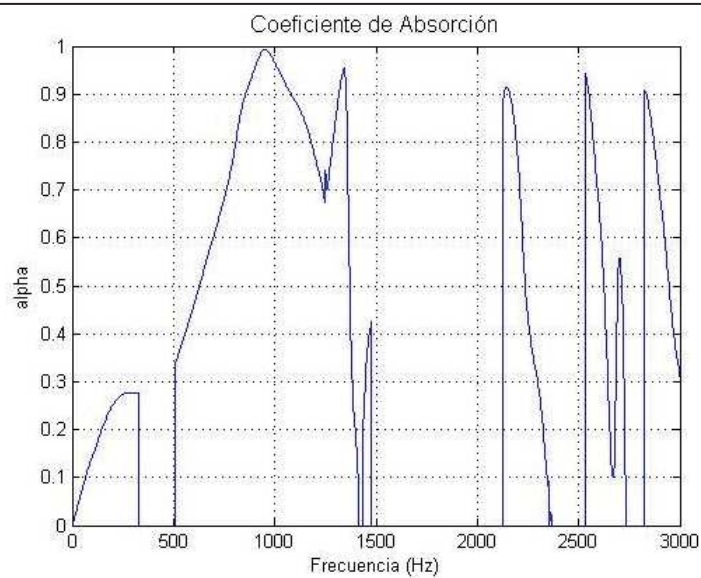
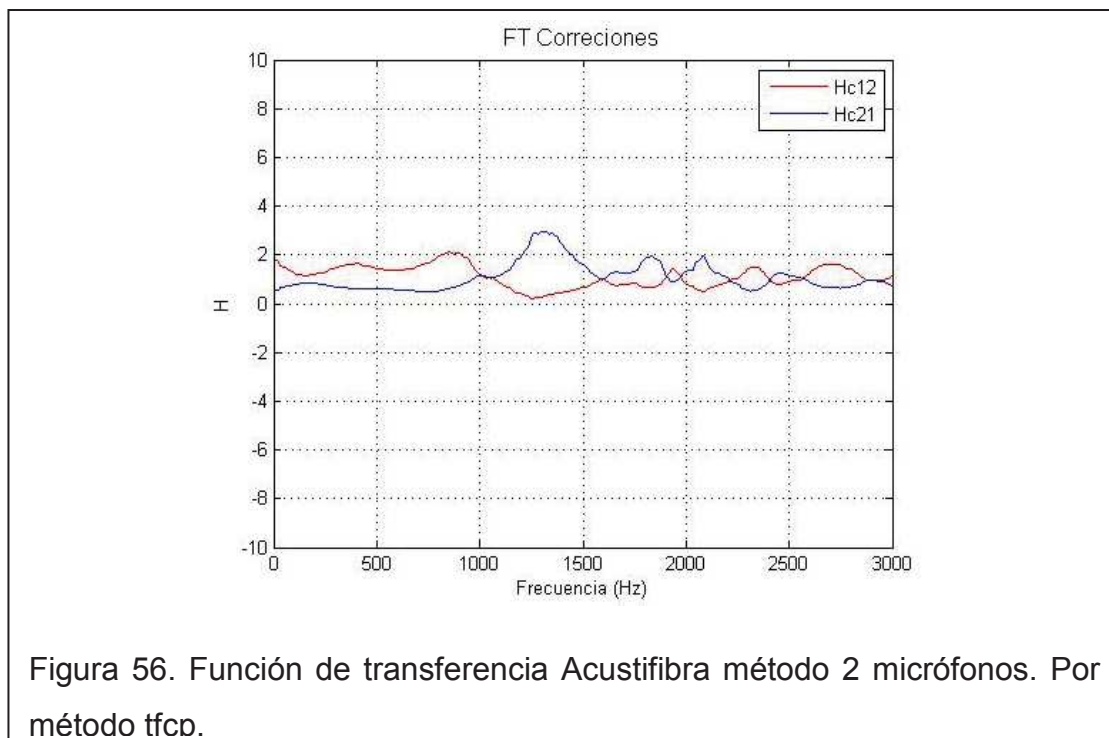


Figura 55. Coeficiente de absorción Acustifibra 1". Por método tffc.

### Función tfcp

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



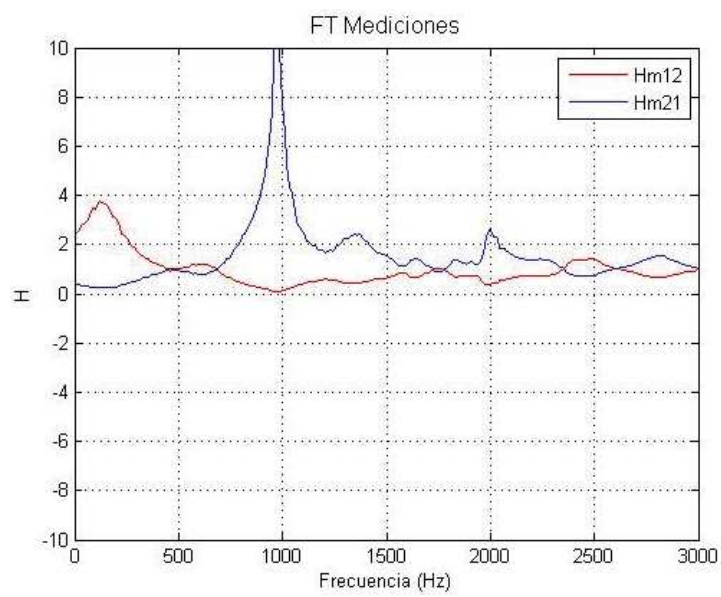


Figura 57. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tfcp .

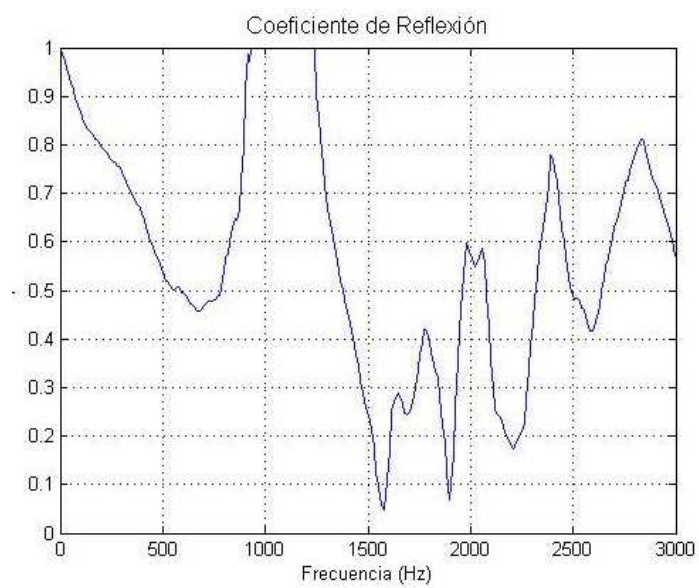
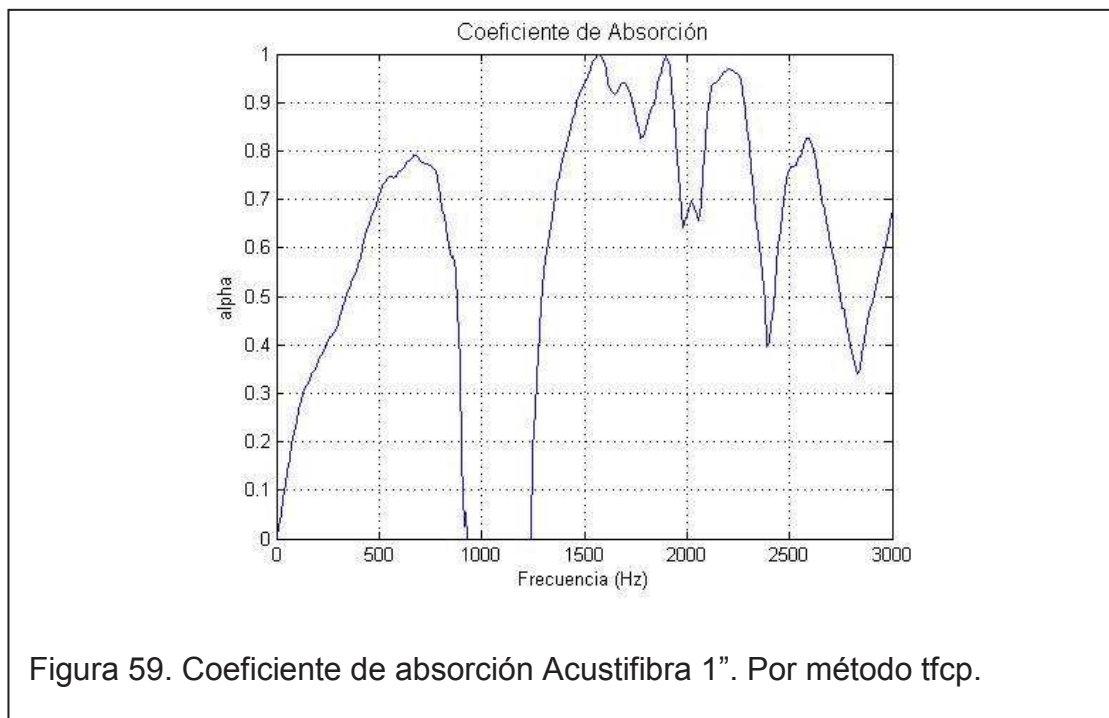
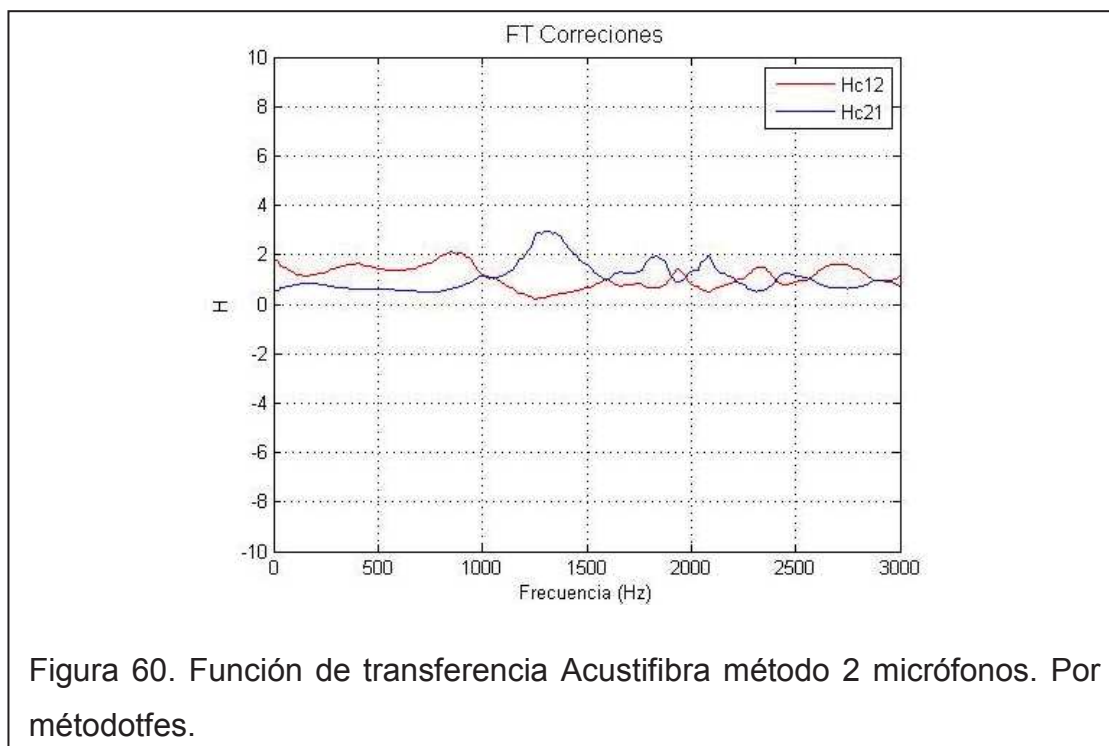


Figura 58. Coeficiente de reflexión acustifibra. Por método tfcp.



### Función de Transferencia

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.





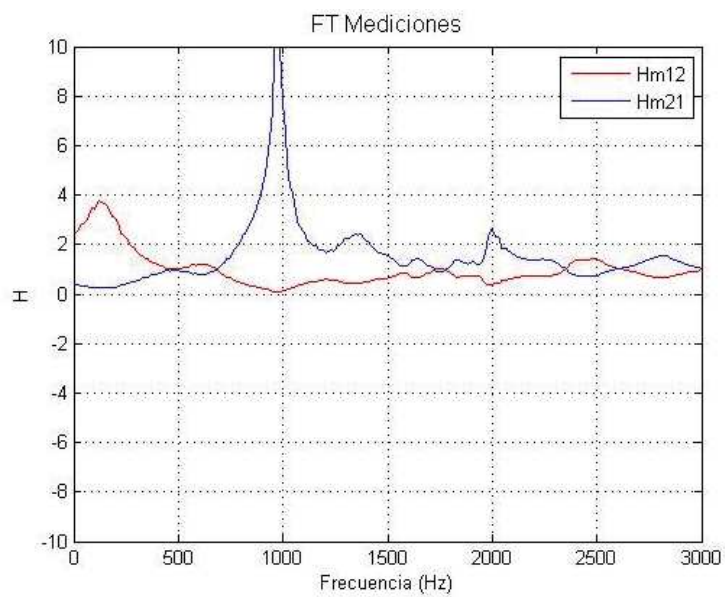


Figura 61. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tfes.

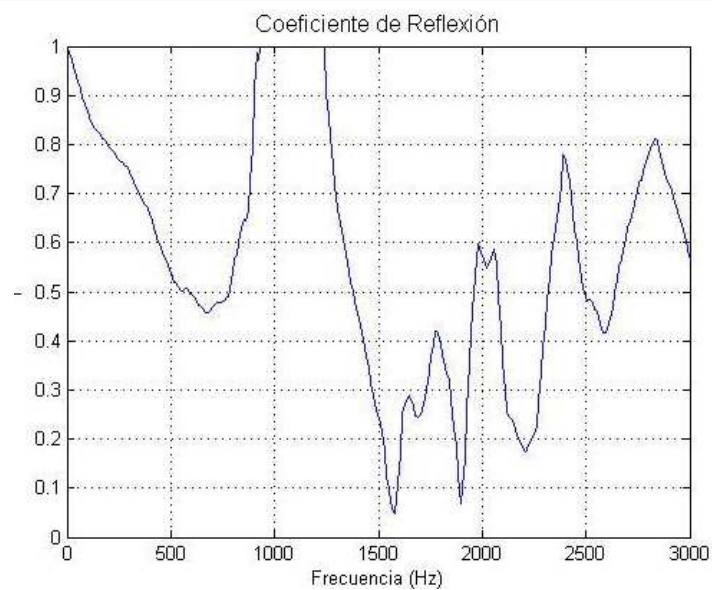
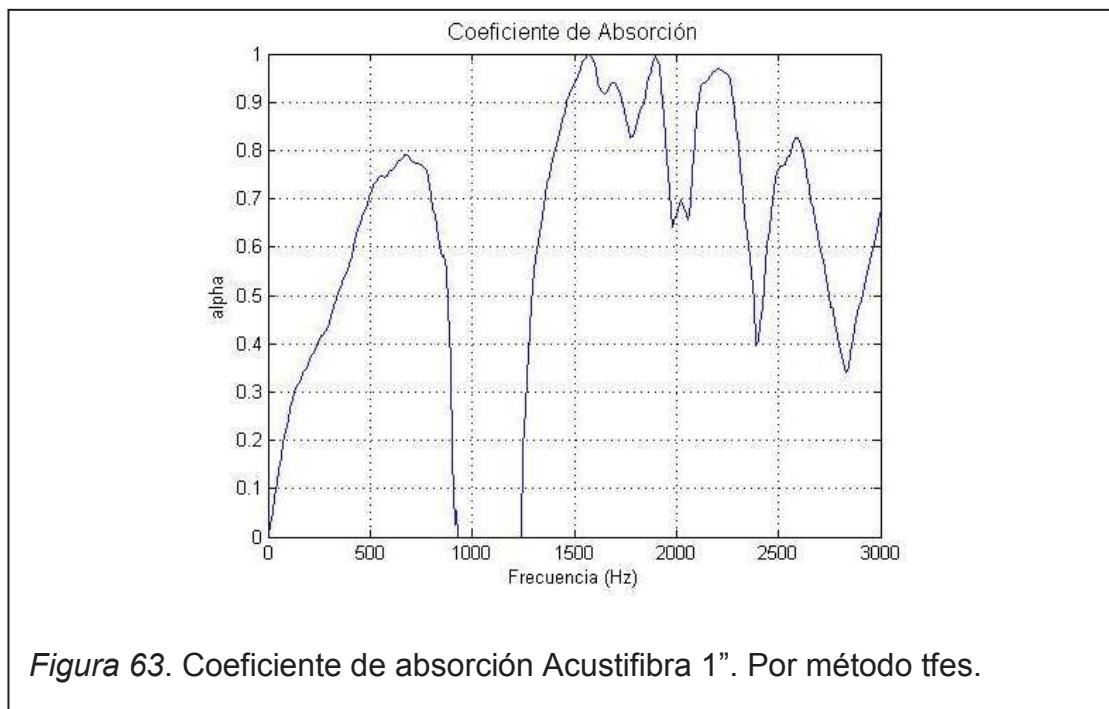
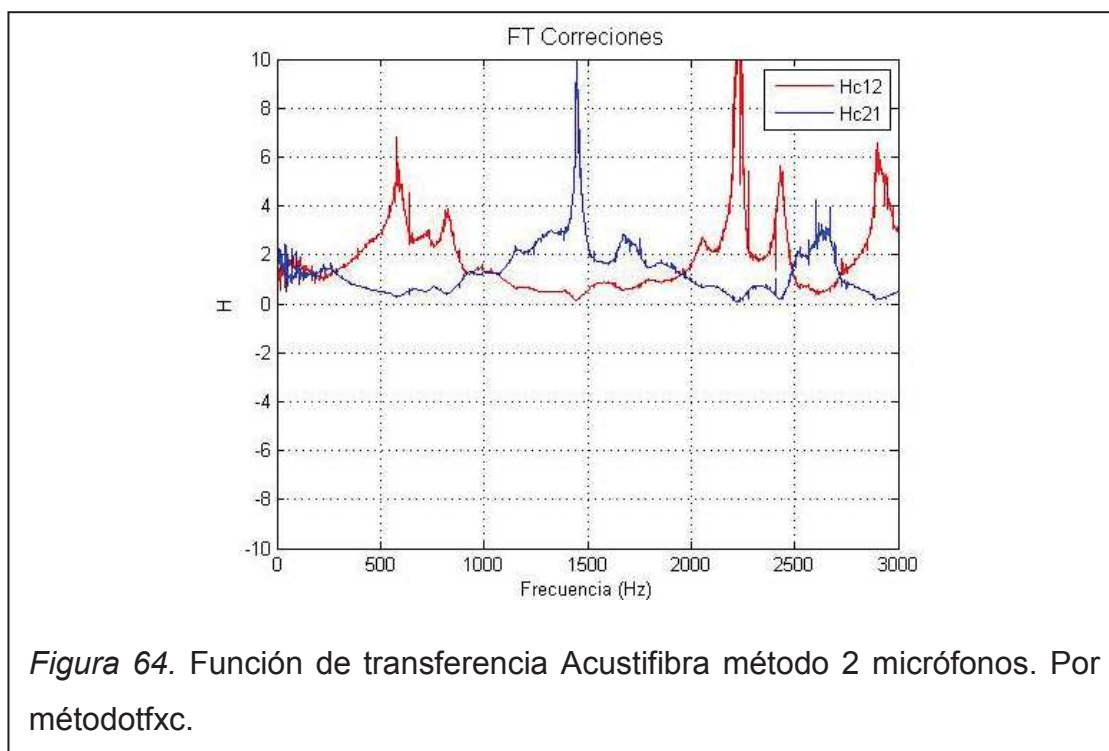


Figura 62. Coeficiente de reflexión acustifibra. Por método tfes.



### Función tfxc

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



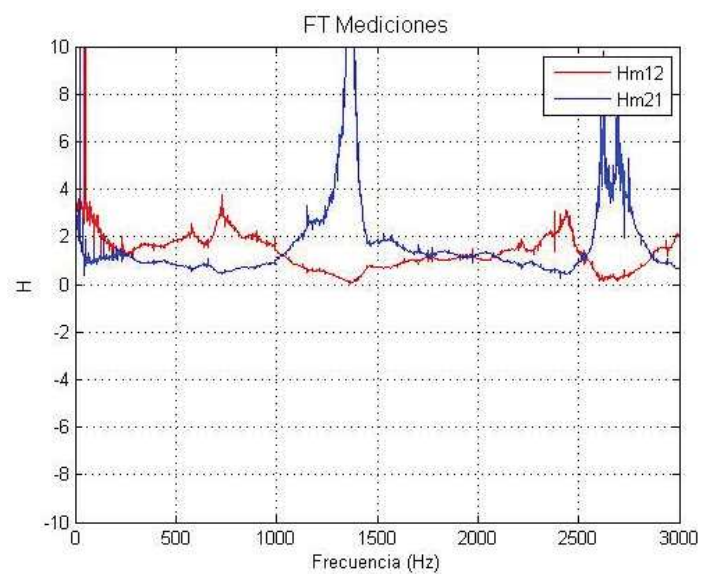


Figura 65. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tfox.

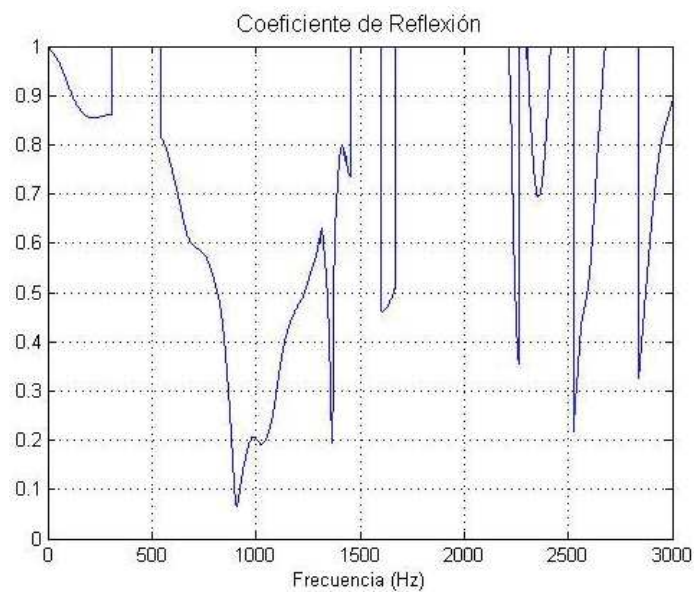
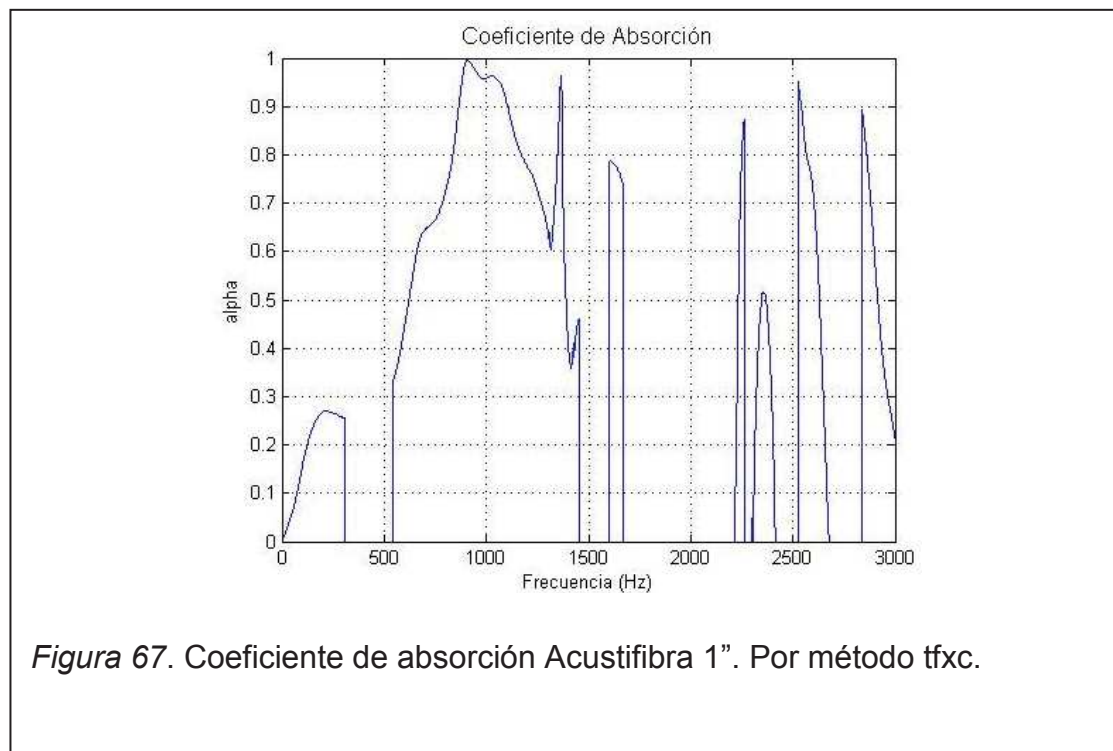


Figura 66. Coeficiente de reflexión acustifibra. Por método Tfox.



### Función tfft

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

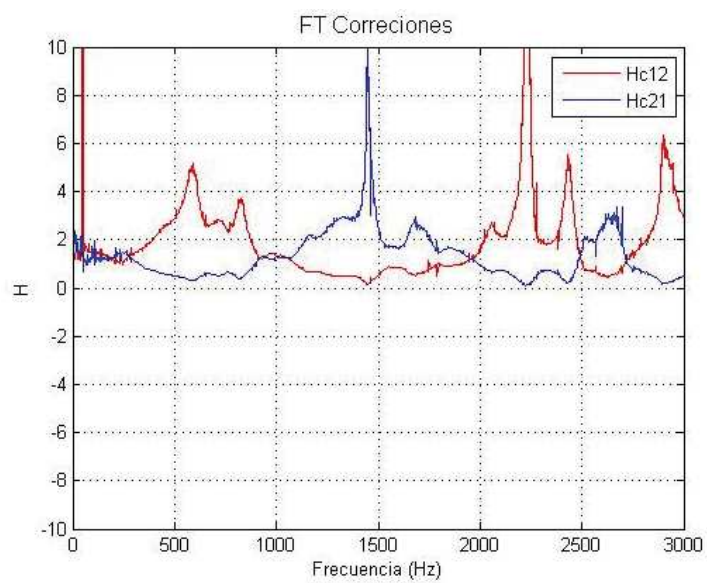


Figura 68. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método dotfft.

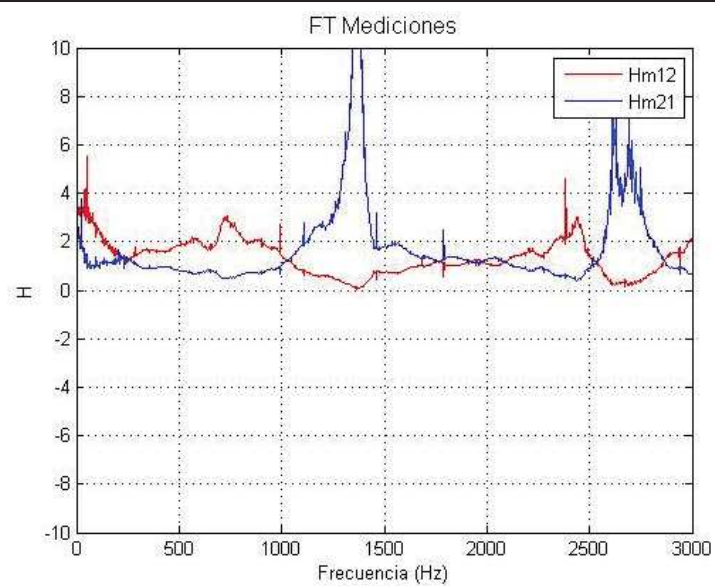


Figura 69. Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tfft.

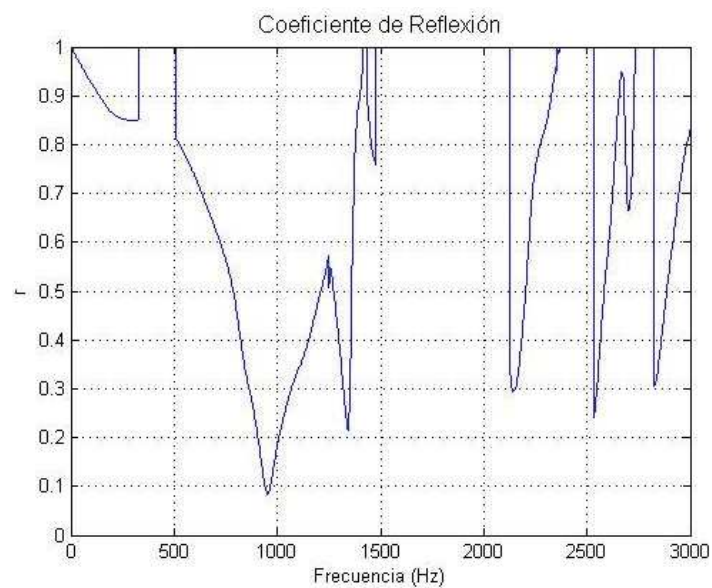


Figura 70. Coeficiente de reflexión acustifibra. Por método tfft.

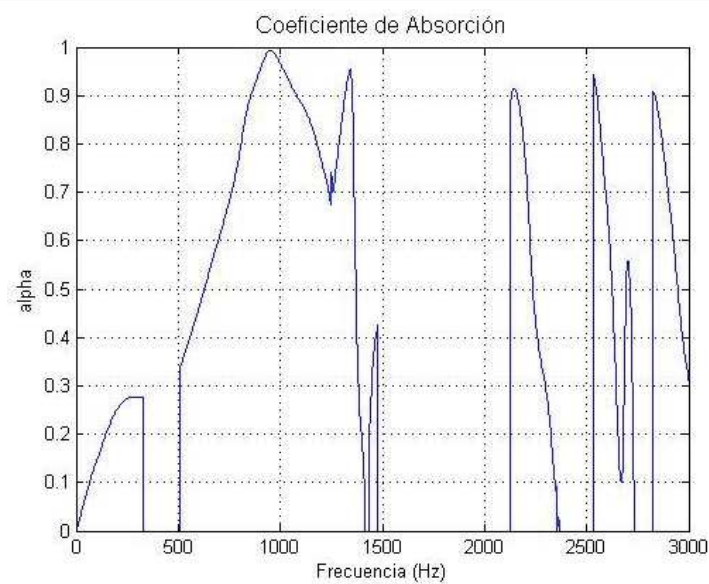


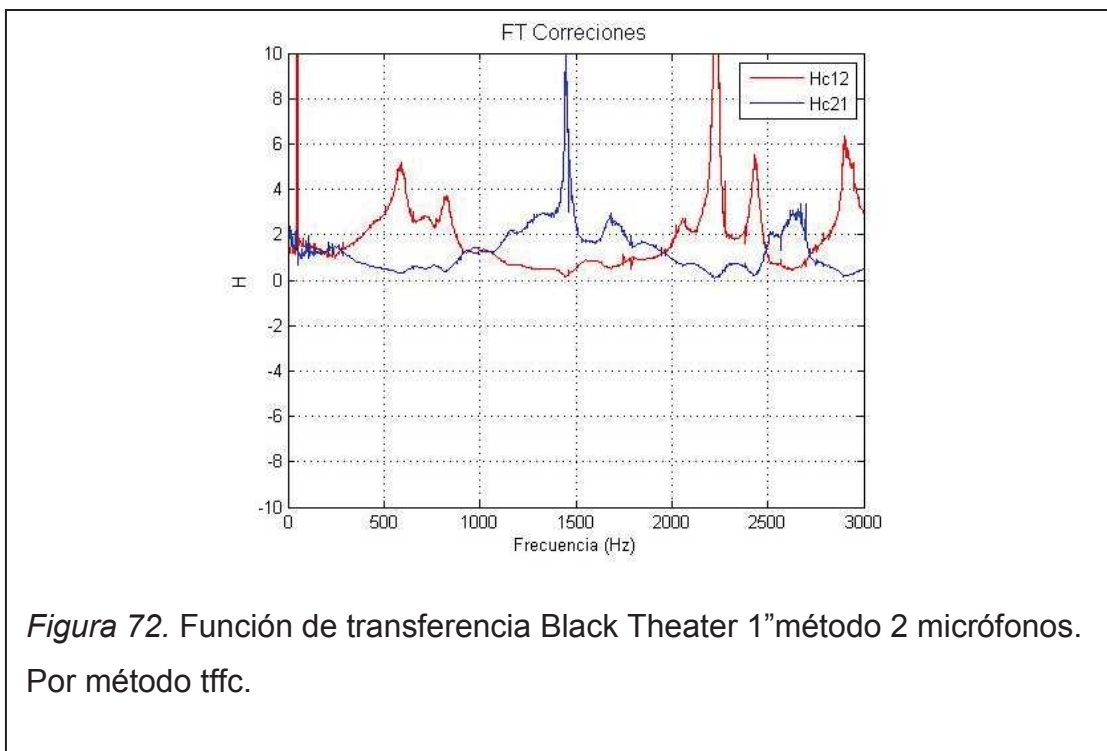
Figura 71. Coeficiente de absorción Acustifibra 1". Por método tfft.

### 13.1.1.2. Black Theater 1"

Luego del post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

## Funciontffc

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



*Figura 72.* Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos. Por método tffc.



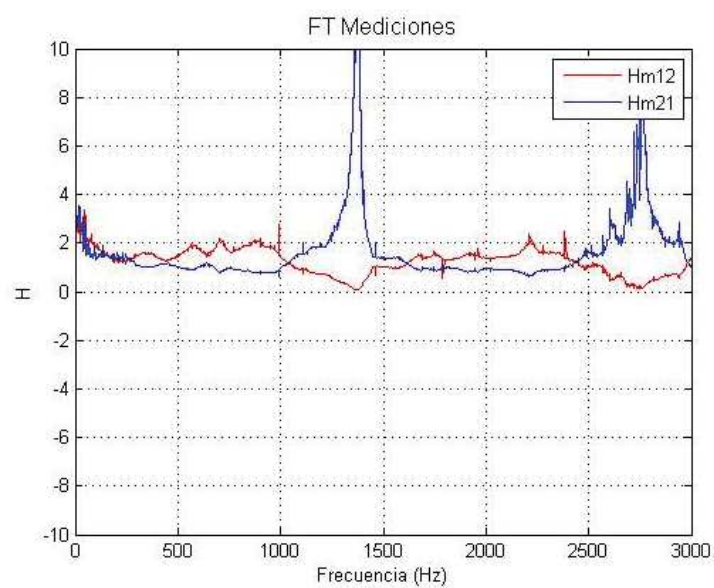


Figura 73. Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos. Por método tffc.

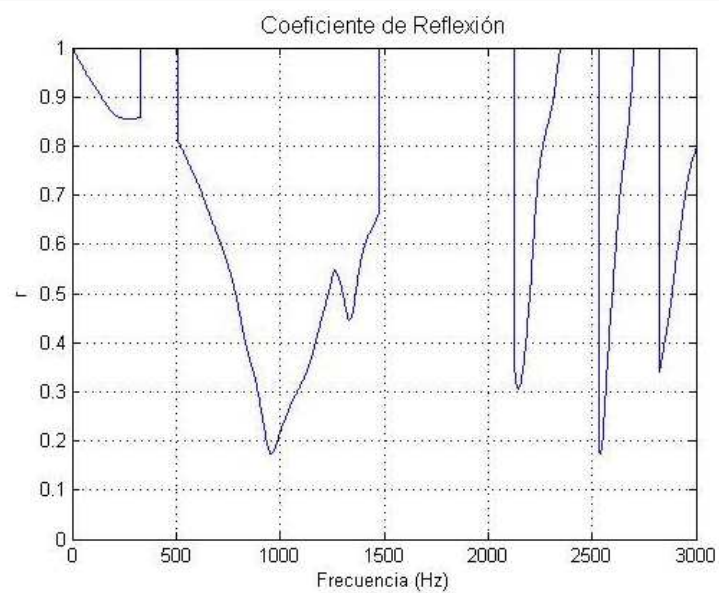
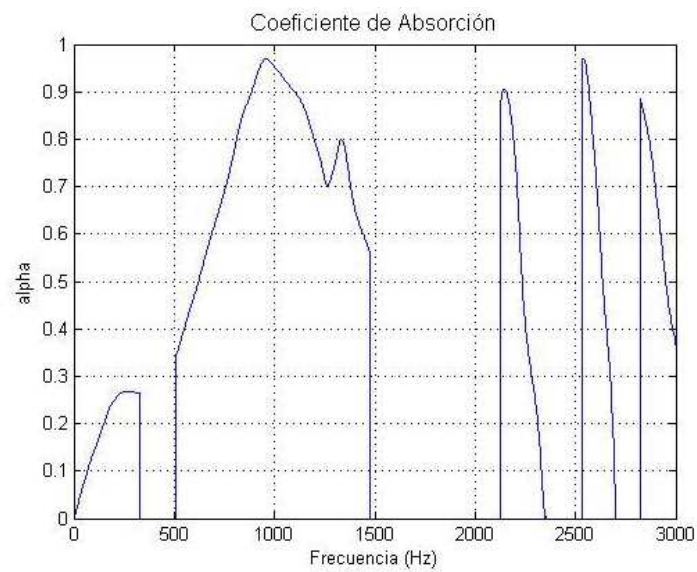


Figura 74. Coeficiente de reflexión Black Theater 1". Por método tffc.

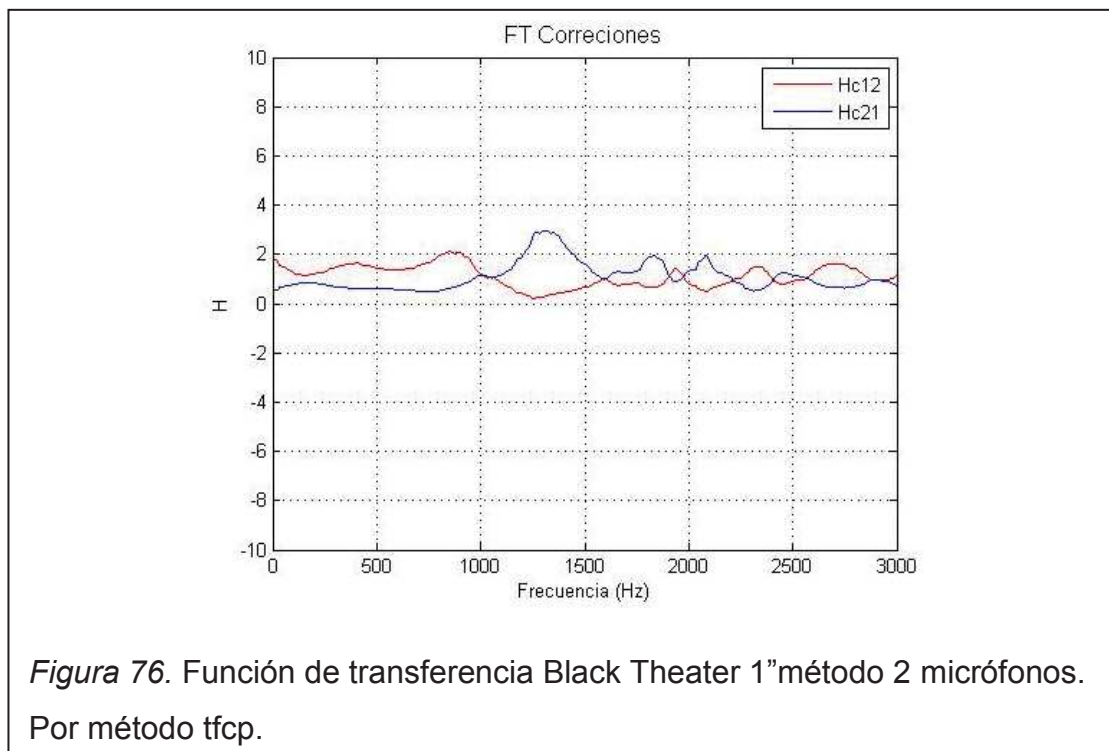




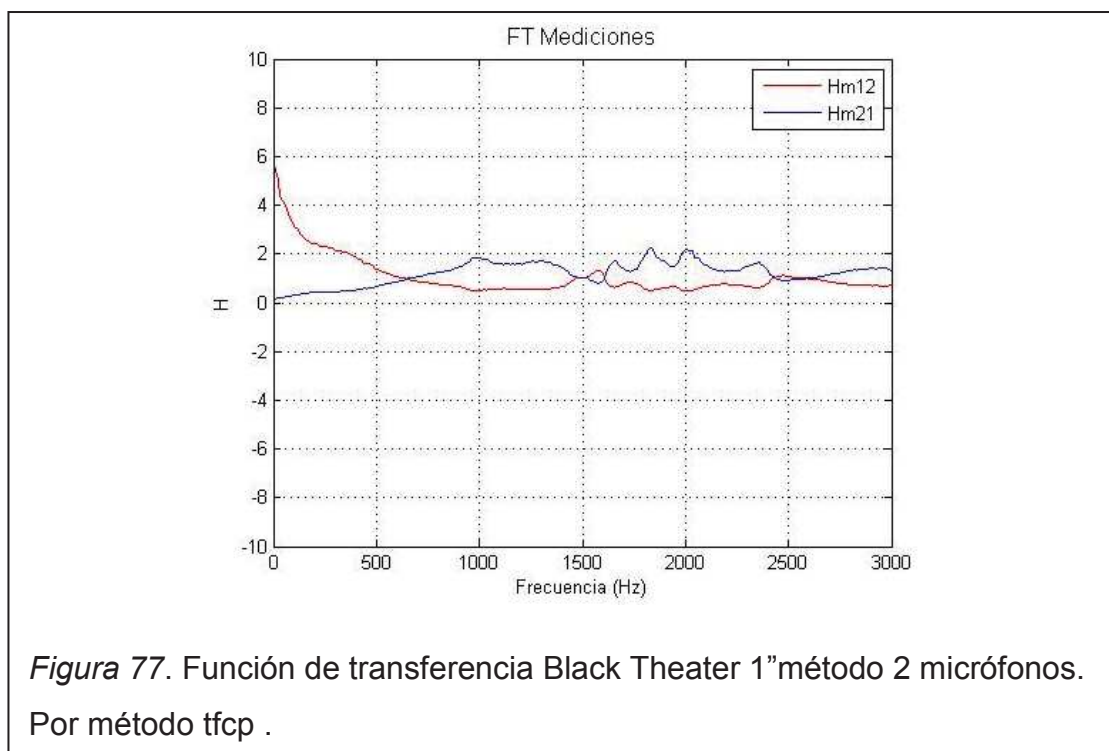
*Figura 75.* Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tffc.

### **Función tfcp**

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



*Figura 76.* Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos.  
Por método tfcp.



*Figura 77.* Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos.  
Por método tfcp .

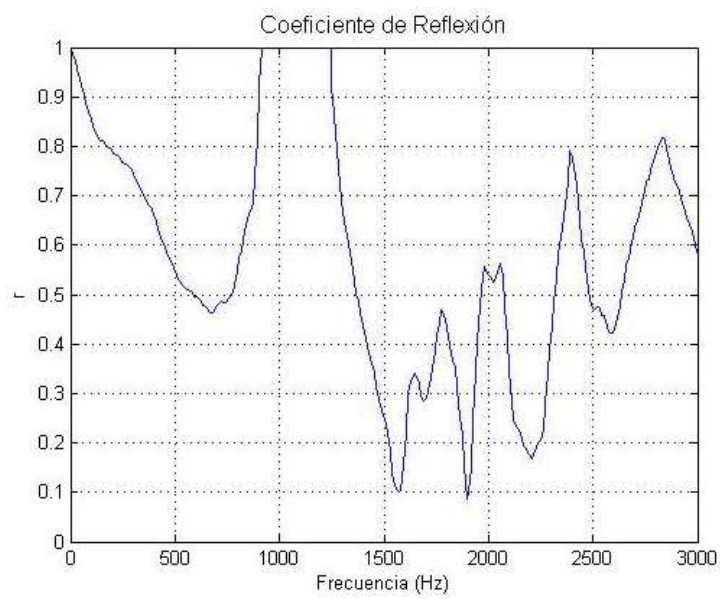


Figura 78. Coeficiente de reflexión Black Theater 1". Por método tfcp.

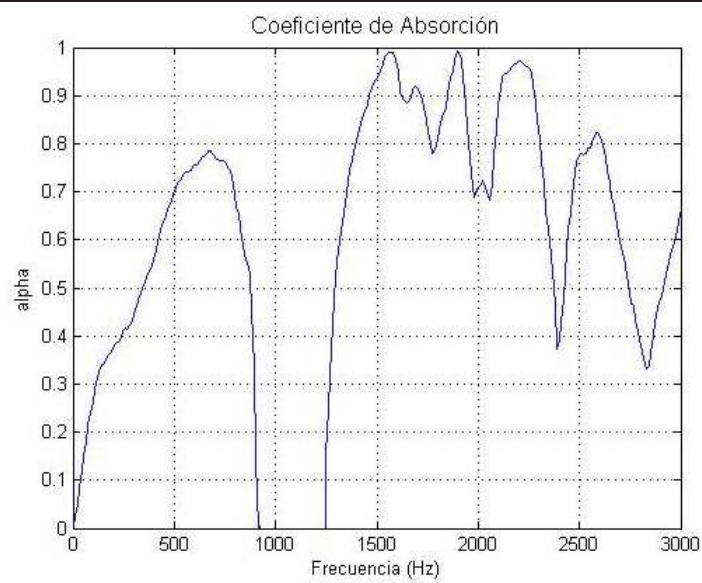
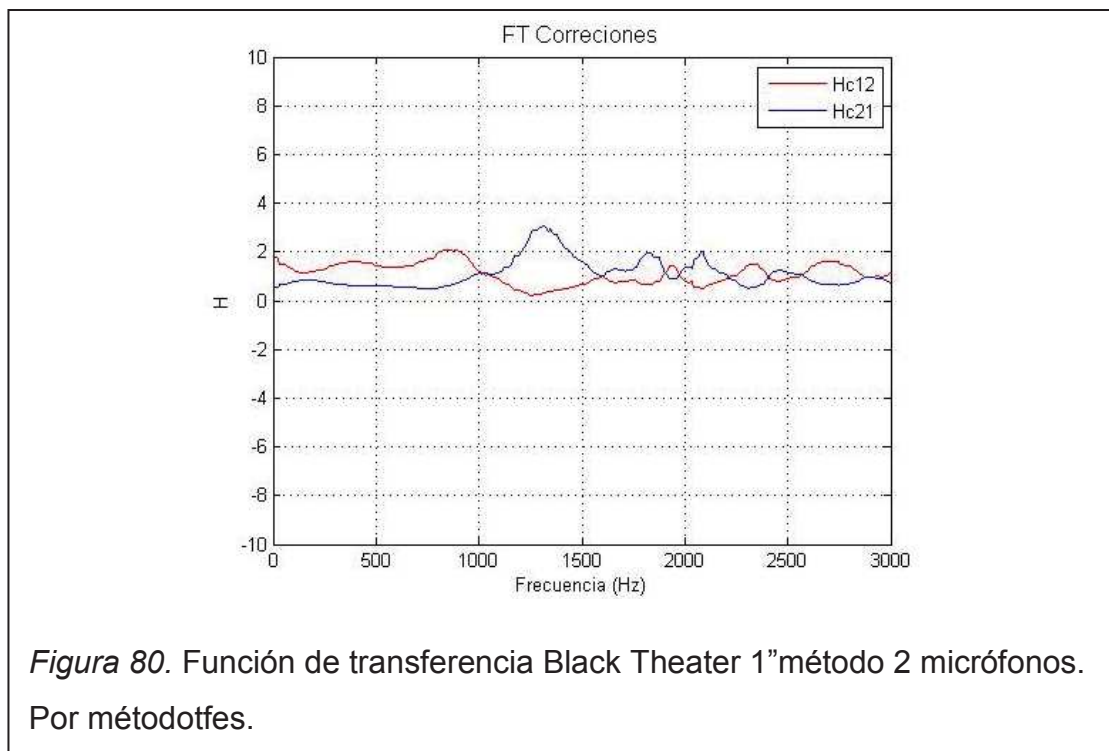


Figura 79. Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tfcp.

## Funciontfes

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



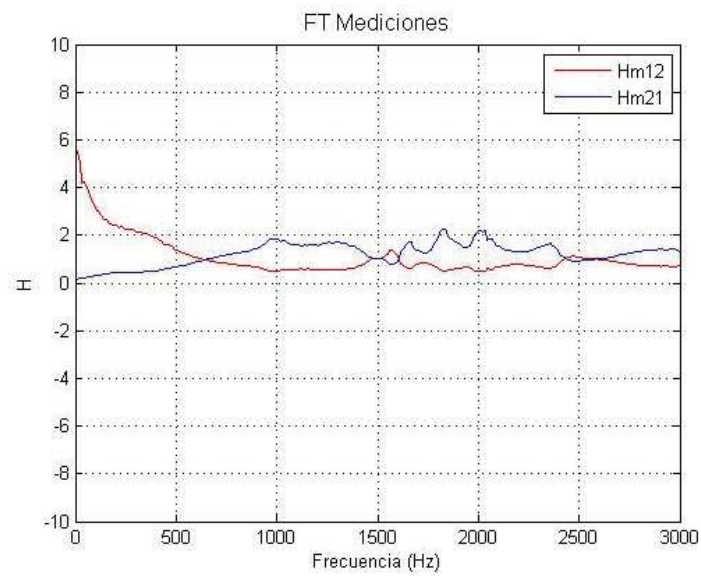


Figura 81. Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos. Por método tfes.

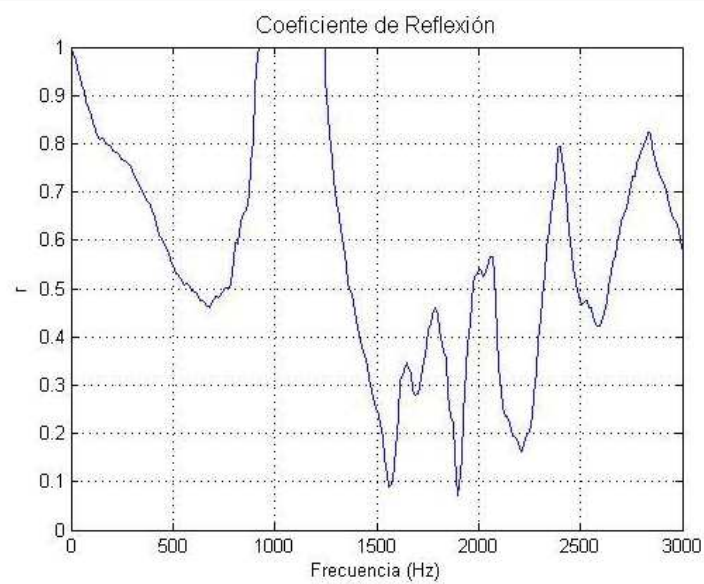
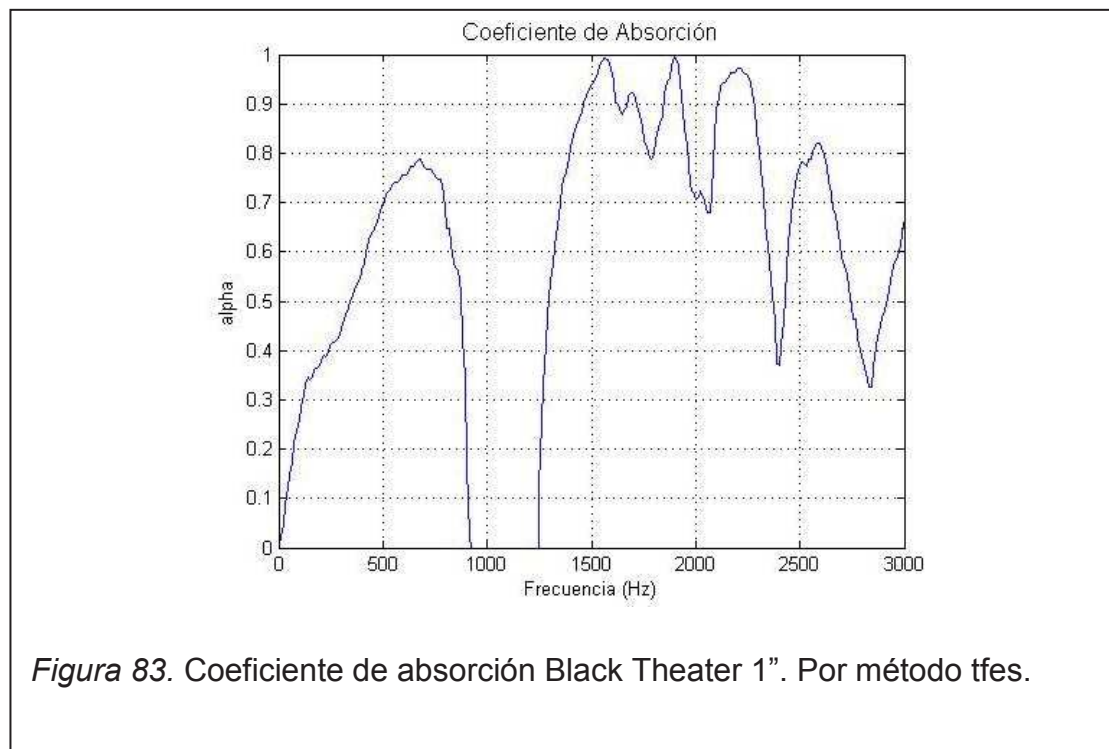


Figura 82. Coeficiente de reflexión Black Theater 1". Por método tfes.



### **Función t<sub>fxc</sub>**

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

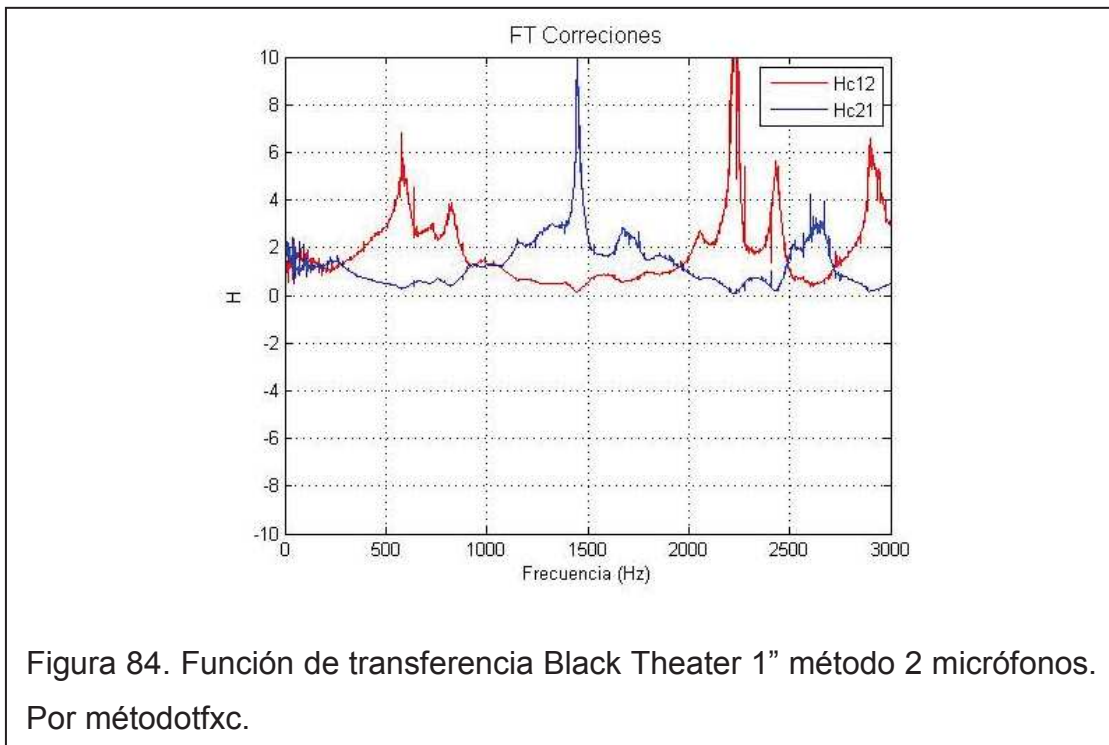


Figura 84. Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos.  
Por método fxc.

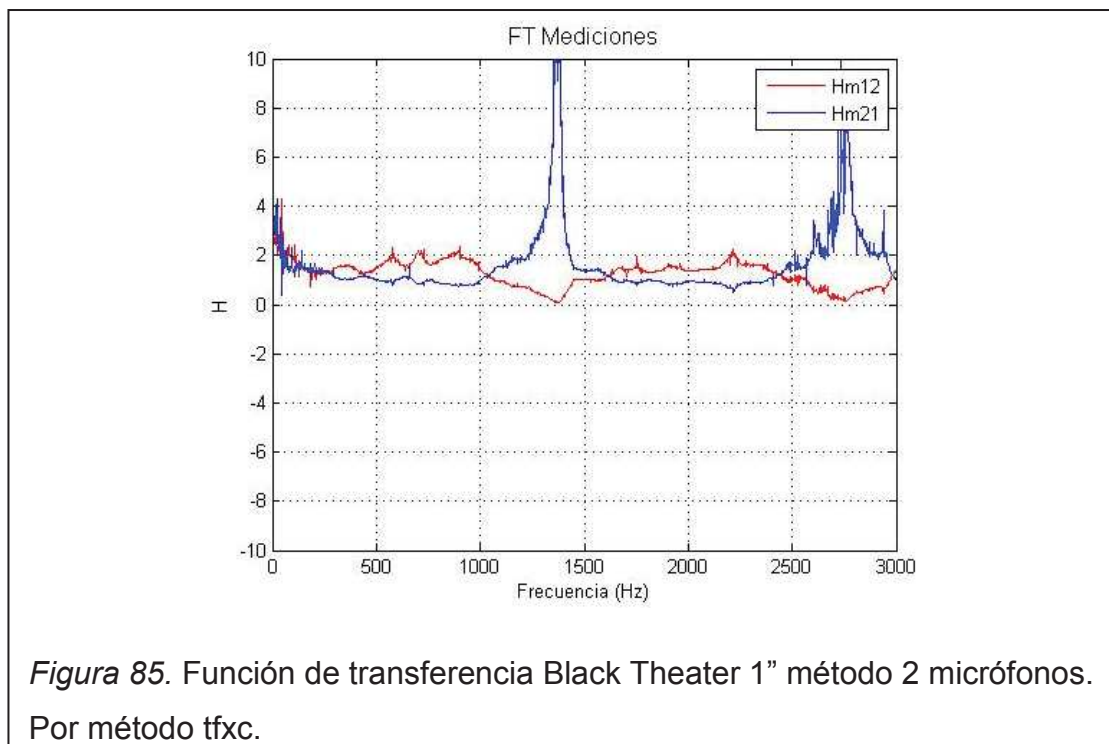


Figura 85. Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos.  
Por método txc.



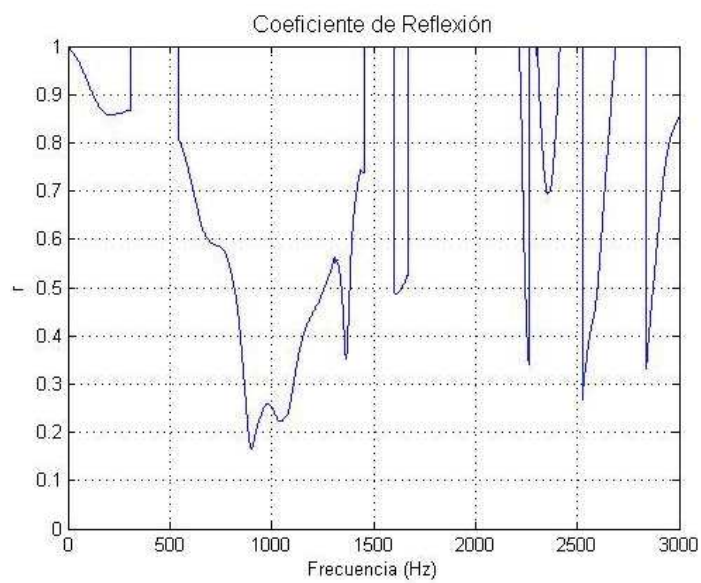


Figura 86. Coeficiente de reflexión Black Theater 1". Por método tfxc.

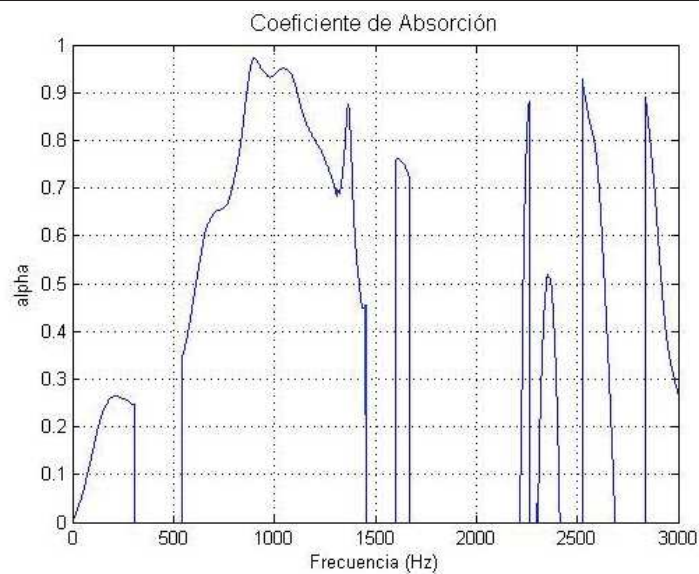


Figura 87. Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método Tfxc.

**Función tfft**



Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

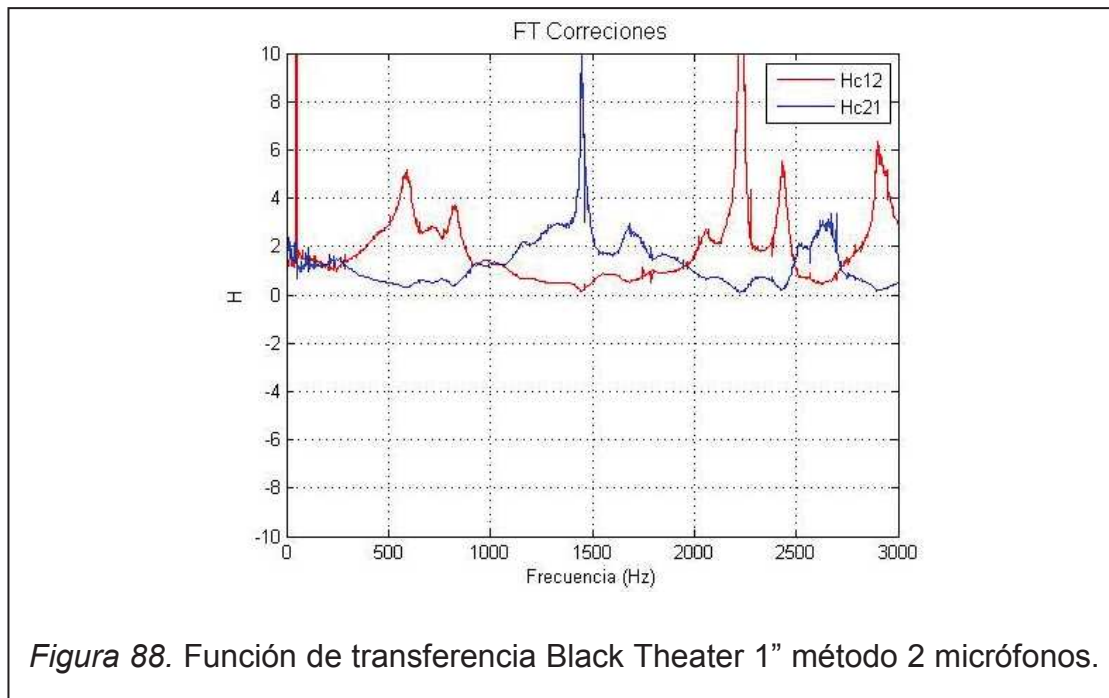


Figura 88. Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos.

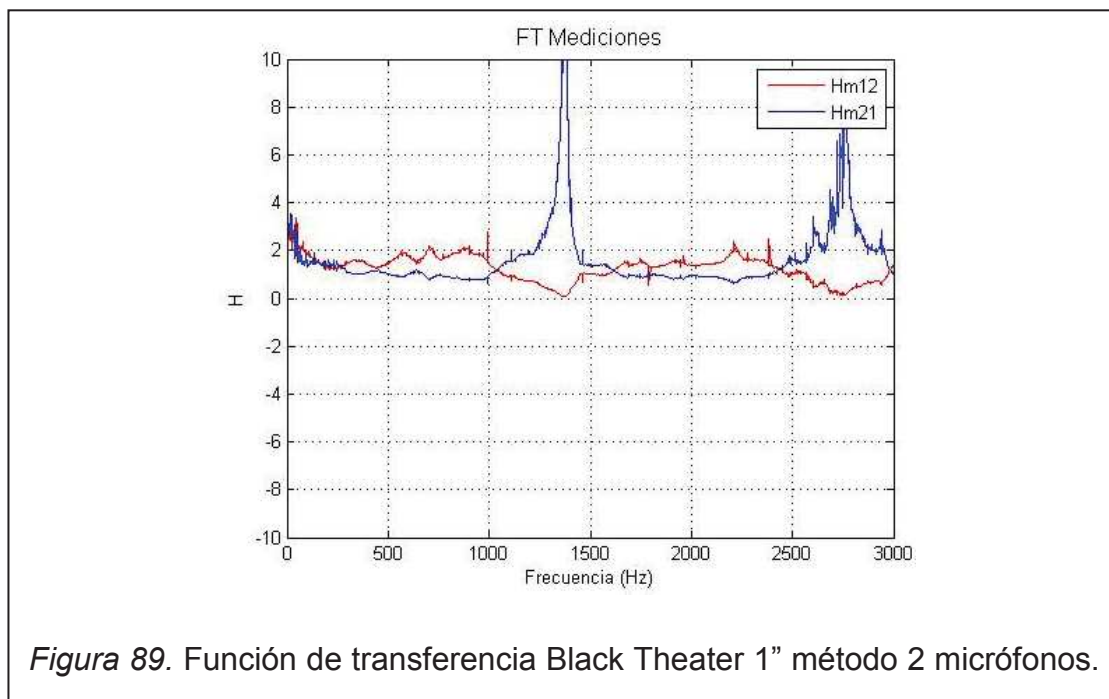


Figura 89. Función de transferencia Black Theater 1" método 2 micrófonos.

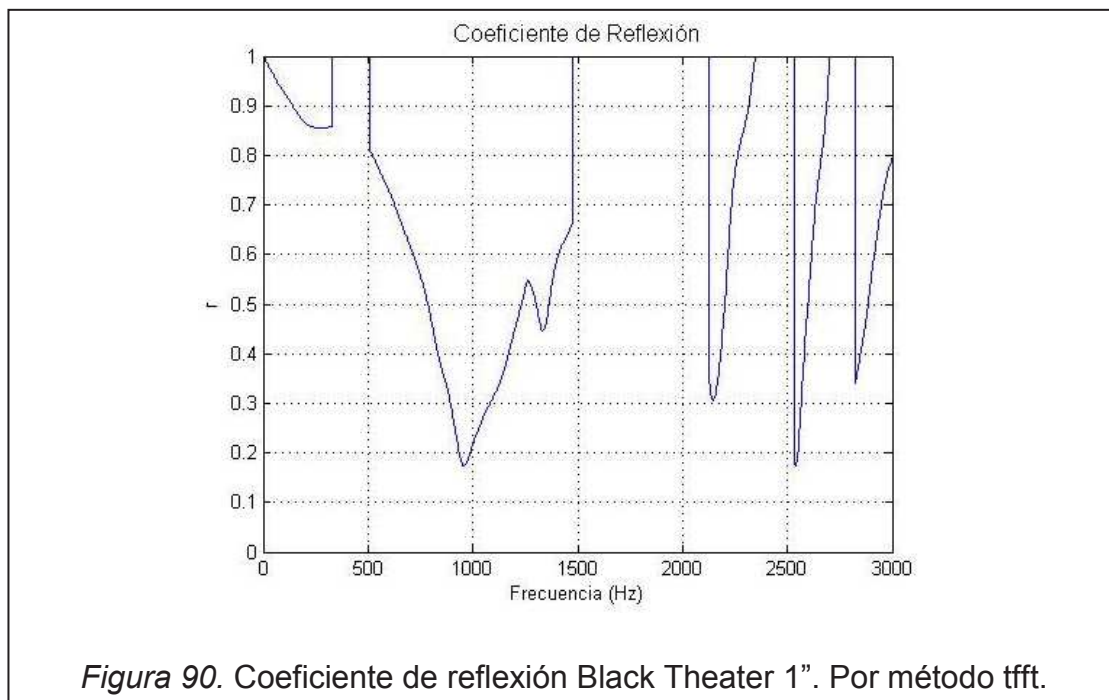


Figura 90. Coeficiente de reflexión Black Theater 1". Por método tfft.

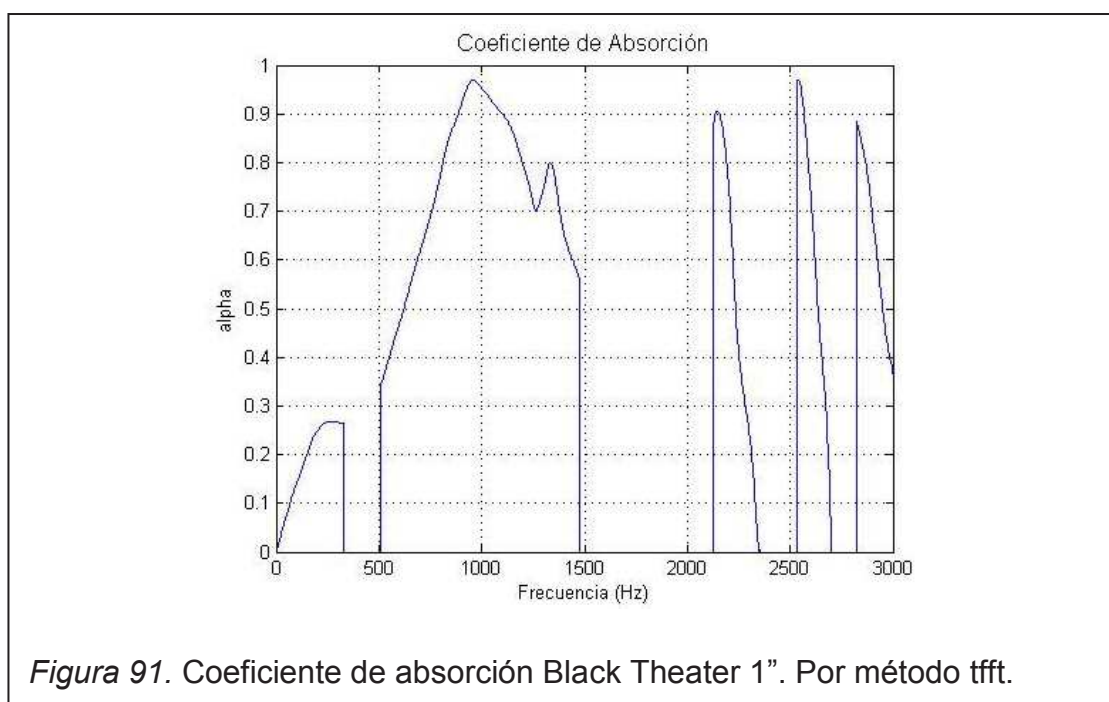


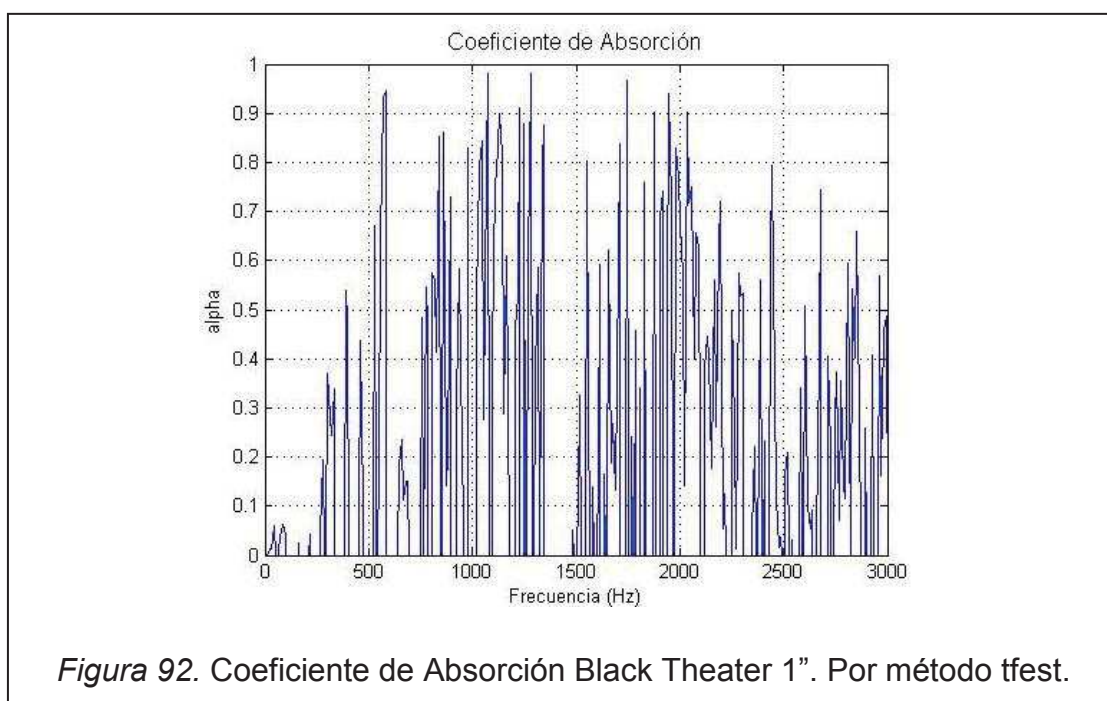
Figura 91. Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tfft.

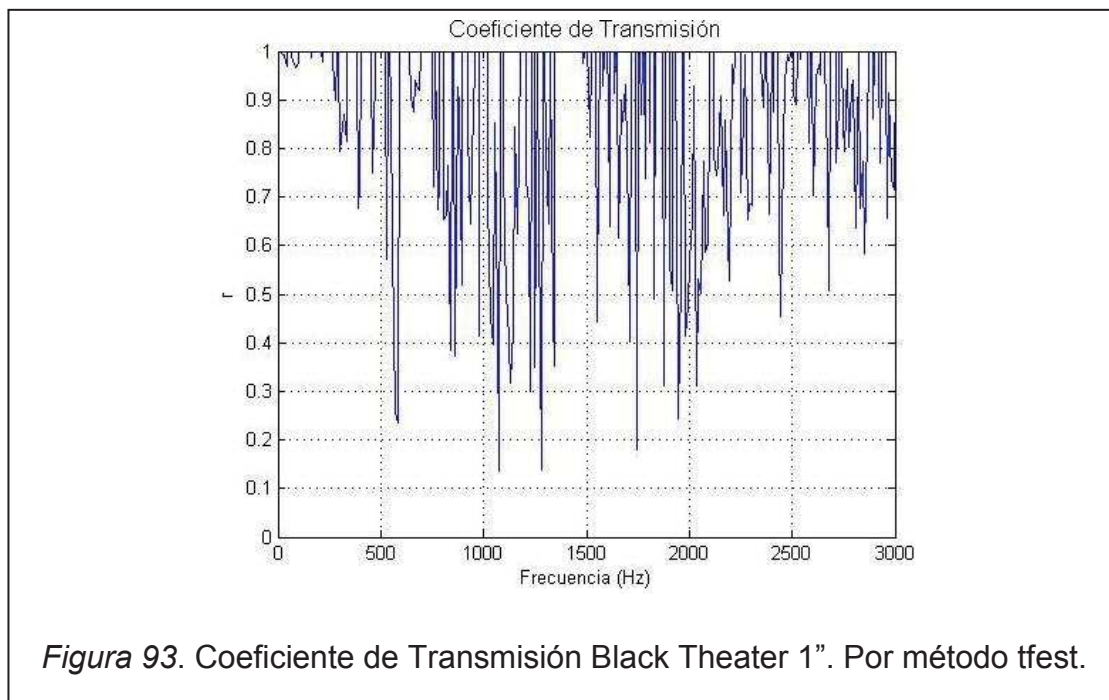
### 13.1.2. Método de 4 micrófonos

Tras la comprobación del comportamiento del tubo y del software se realizaron las mediciones de materiales a base de fibra de vidrio. Se tomaron muestras de Acustifibra de 1" los cuales son materiales absorbentes de superficie lisas.

#### 13.1.2.1. Medición Acustifibra 1"

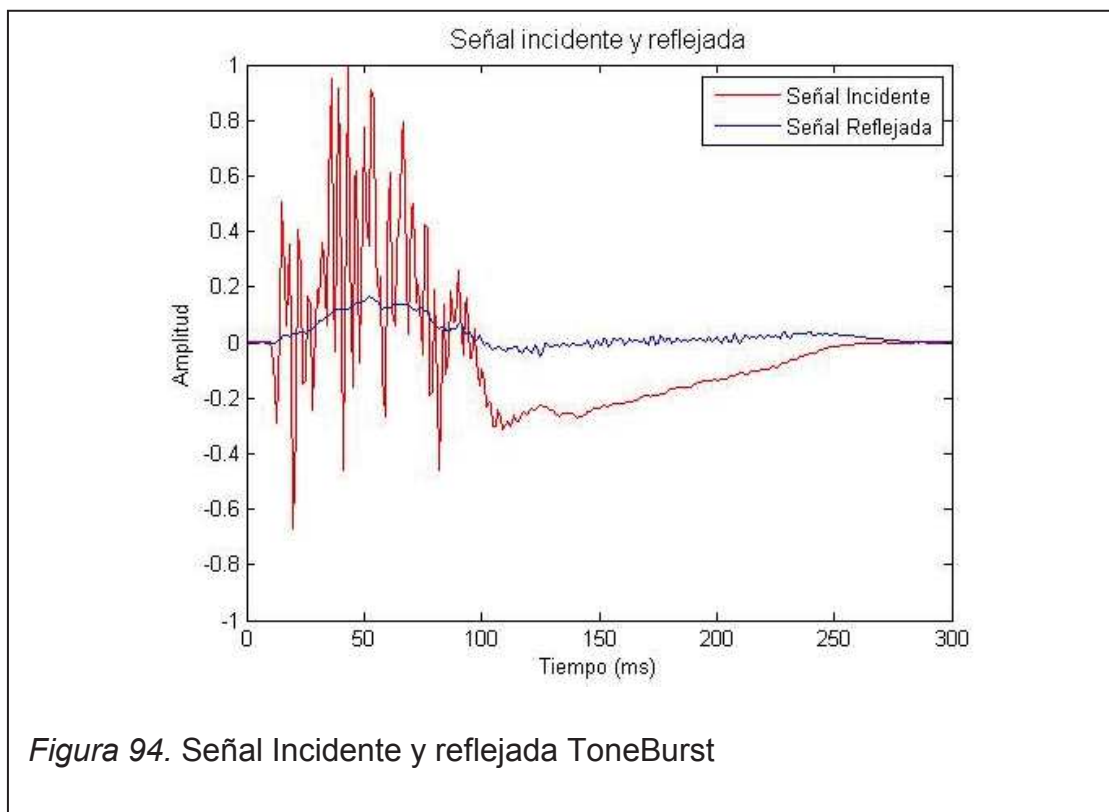
Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de coeficiente de reflexión y absorción.

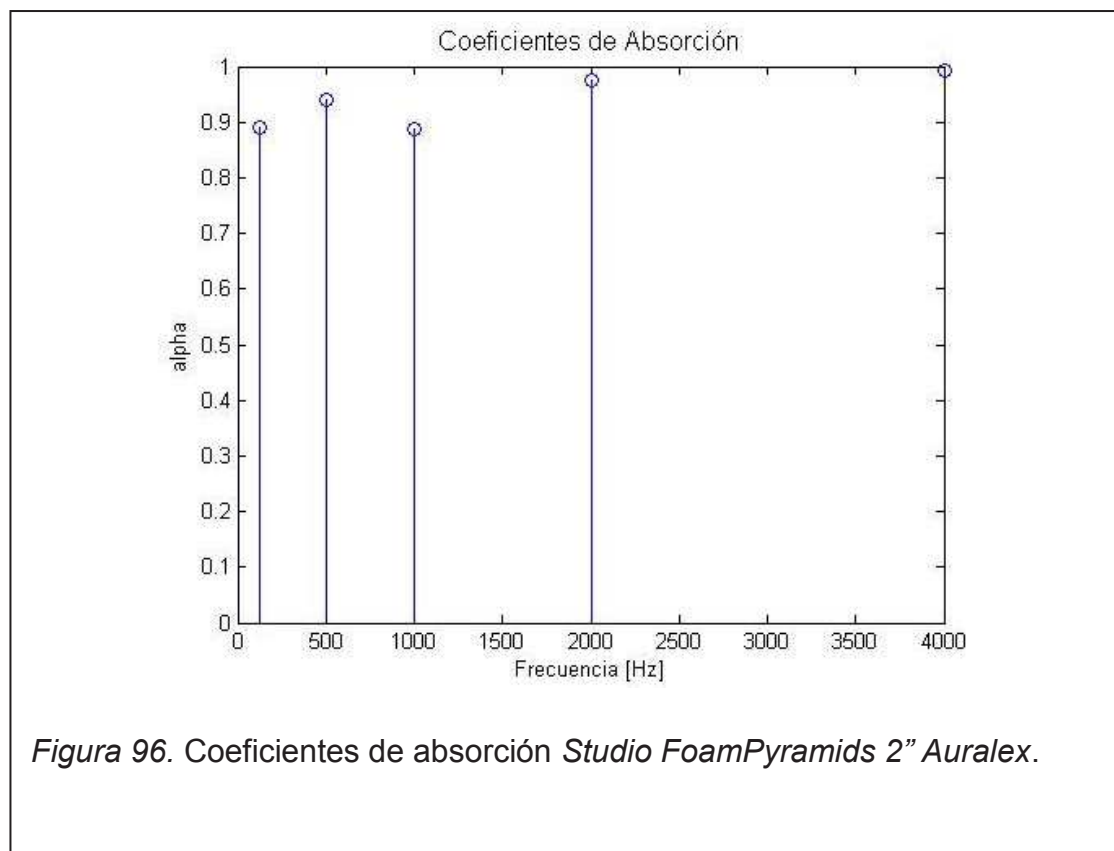
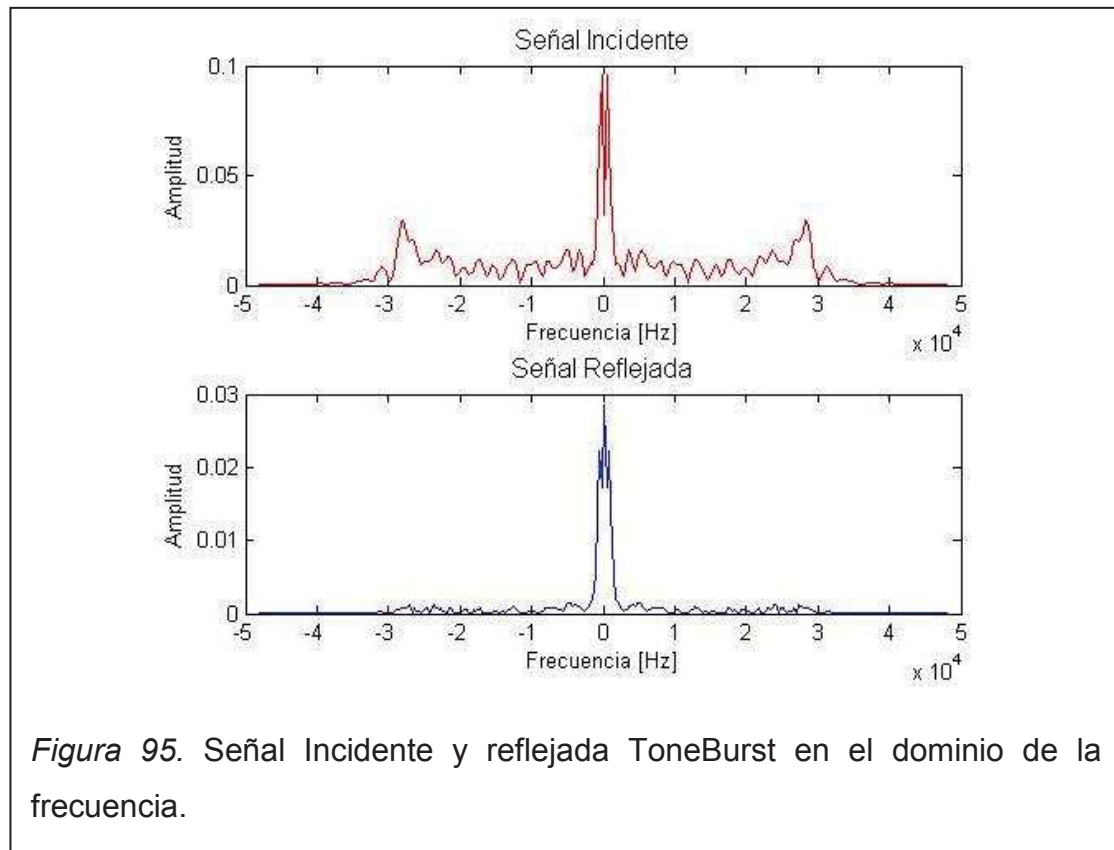




### 13.1.2.2. ToneBurst

Medición





## **13.2. Análisis de datos**

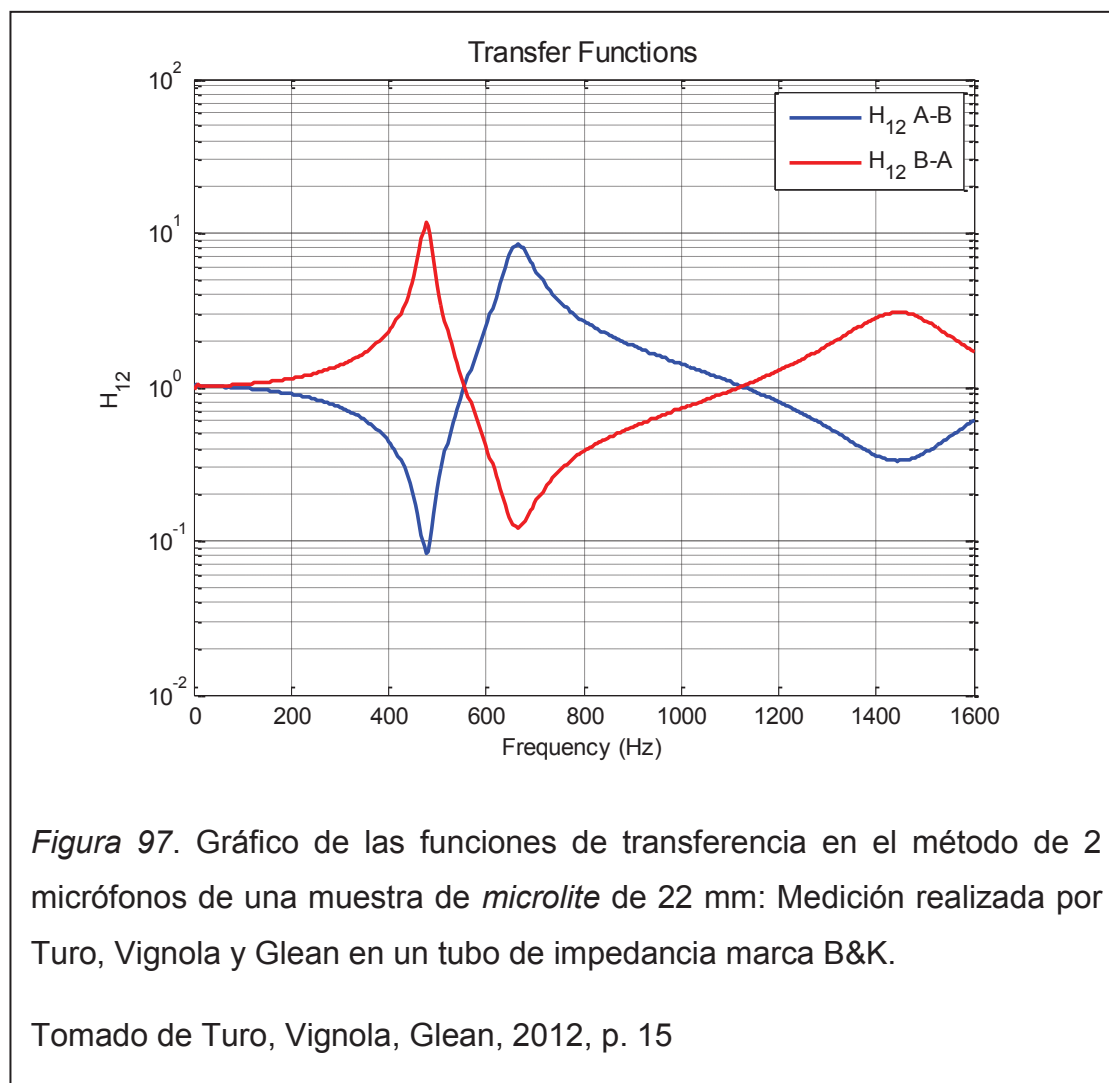
### **13.2.1. Método 2 micrófonos**

En el método de 2 micrófonos se han realizado el cálculo de la función de transferencia por 5 métodos de procesamiento de señales, 2 de estos métodos son funciones que vienen incorporadas en Matlab y 3 utilizando las teorías de procesamiento de señales.

Los métodos implementados con funciones de Matlab son cpds (tfcp) y tfestimate (tfes) presentan un comportamiento similar en las dos muestras, mientras que los otros métodos presentan de igual manera una coherencia entre si, ya que entregan los mismos datos en los dos casos de muestras.

Se puede observar una tendencia en los datos arrojados por cálculos, en los cuales se ve una coherencia en lo que normalmente son los coeficientes de materiales como lana mineral, se pueden observar altos coeficientes de absorción cuando se va aumentando la frecuencia, sin embargo se tienen puntos en los cuales se pueden ver caídas en el coeficiente de absorción, y tiene coherencia ya que al observar las funciones de transferencia en esos puntos se pueden notar irregularidades o picos entre las líneas rojas y azules que representan las funciones de transferencia.

En el siguiente gráfico se evidencia la simetría entre las funciones de transferencia de ambas señales.



La función de transferencia es una comparación entre dos señales, la entrada y salida en un sistema lineal. Esta comparación se la hace por medio de la división, cuando las funciones de transferencia mostradas en las figuras anteriores son simétricas y van teniendo un comportamiento similar, sin tener picos exagerados como los presentes en las figuras mostradas, se pueden obtener resultados mucho más coherentes. De hecho, en el mismo gráfico, en las frecuencias donde las funciones de transferencia presentan una mayor simetría, es donde los coeficientes de absorción entregados concuerdan o se acercan a los datos proporcionados por los fabricantes.

Se puede observar que los coeficientes de absorción del Black Theater de 1" con los del Acustifibra de 1" son muy similares ya que los dos materiales tiene el mismo grosor, y son a base de lana mineral.

Los datos proporcionados por el fabricante para el Black Theater son los indicados en la Tabla 1.

El fabricante plantea un coeficiente de absorción en 1 kHz de 0.91, mientras que en el tubo se midió un coeficiente de 0.96 por lo que se encuentra muy similar; sobre los 2 kHz el fabricante plantea un coeficiente de absorción de 0.99, mientras que el coeficiente medido para este rango es de alrededor de 0.9, lo que permite observar que los valores entregados por las mediciones realizadas en el tubo se acercan de forma significativa a los valores reales. Sin embargo, existen frecuencias para las cuales los valores de absorción no coinciden como es el caso de los 500Hz donde el fabricante muestra que la absorción es de 0.62 mientras que en la medición el valor obtenido es de 0.36, lo que evidencia que el trabajo del tubo es reducido, o tal vez existen anomalías en el tubo que hacen que se alteren estos datos.

### **13.2.2. Método 4 micrófonos**

En el método de 4 micrófonos se puede observar que existe muchas variaciones en el coeficiente de absorción y no se puede identificar una tendencia de forma clara, esto puede ser debido a deformaciones dentro del tubo causadas por afectaciones térmicas causadas por temperatura o al momento de realizar las sueldas de los elementos en el tubo ya que con el calor se pudo haber modificado la sección del tubo. Otro aspecto a tomar en cuenta podría ser el del montaje de la muestra, ya que en el método de 4 micrófonos se tiene q tomar muy en cuenta que no existan fugas de sonido a través de la muestra, ya que estas podrían afectar significativamente los resultados obtenidos y causar el mal funcionamiento del dispositivo.



### 13.2.3. Método ToneBurst

Posteriormente a la adquisición de datos del ToneBurst se puede observar que los datos arrojados por el software son los siguientes.

El material medido en este método fue una esponja *Studio FoamPyramids 2"* *Auralex*. Los datos de absorción del fabricante son los siguientes

Auralex Product	1/3-Octave Band Center Frequency (Hz)															
	100	125 <sup>1</sup>	160	200	250 <sup>1</sup>	315	400	500 <sup>1</sup>	630	800	1000 <sup>1</sup>	1250	1600	2000 <sup>1</sup>	2500	3150
1" Studiofoam Wedges	0.09	0.10	0.10	0.10	0.13	0.16	0.20	0.30	0.43	0.59	0.68	0.77	0.85	0.94	1.01	1.06
2" Studiofoam Wedges	0.17	0.11	0.16	0.24	0.30	0.45	0.64	0.91	1.01	1.06	1.05	1.02	1.03	0.99	0.97	0.96
3" Studiofoam Wedges	0.17	0.23	0.19	0.31	0.49	0.71	0.87	1.06	1.10	1.05	1.04	1.03	0.97	0.96	0.96	0.96
4" Studiofoam Wedges	0.24	0.31	0.36	0.62	0.85	1.09	1.21	1.25	1.17	1.16	1.14	1.08	1.06	1.06	1.11	1.11
2" Studiofoam Pyramids	0.11	0.13	0.09	0.13	0.18	0.27	0.34	0.57	0.73	0.90	0.96	1.05	1.07	1.03	0.98	0.98

Figura 98 . Coeficientes de absorción del fabricante *Studio FoamPyramids 2" Auralex*.

Tomado de: [www.auralex.com](http://www.auralex.com)

Se puede observar que los coeficientes de absorción medidos por medio de la técnica de ToneBurst coinciden con los entregados por el fabricante a partir de 1 kHz, mientras que para frecuencias menores a 1 kHz el método de ToneBurst no presenta datos confiables, esto puede ser debido a las condiciones de medición e incluso a la limitación del método para realizar mediciones en lugares cerrados, al ser una adaptación de una normativa para medición en carreteras esencialmente.

## 14. Capítulo VII. Conclusiones y Recomendaciones

### 14.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un tubo de impedancia, de acuerdo con las normativas ASTM – ISO. El material utilizado fue tubo cédula grado 40, de 2”, para los soportes de micrófono, tubo cédula grado 40 de ½” y las uniones se las realizó con suelda especial MIG.
- Se diseñó e implementó un método de cuantificación de absorción de parámetros de absorción acústica de materiales, basándose en la normativa y teoría utilizada para medición de absorción acústica de barreras para autopistas. La metodología de medición consiste en la calibración del sistema electro-acústico, calibración de la respuesta de frecuencia del tubo medición, almacenamiento de correcciones para los métodos de 2 y 4 micrófonos, captura de señales de medición de materiales, post procesamiento de la información previamente obtenida y exportación de los resultados.
- Se incorporó en MAX MSP, la función “*Pink*” como generador de ondas. La función permite únicamente generar ruido rosa, y el control de nivel y duración se debe realizar adicionando módulos para tal efecto. Sin embargo, con la finalidad de tener siempre la misma señal de prueba, se almacenó un archivo de audio con la señal de prueba y en cada medición se carga el archivo mencionado.
- Se exploraron los diferentes tipos de software de procesamiento de las señales obtenidas en el tubo, como el programa computacional desarrollado para la tesis del Dr. Ernesto Juliá Sanchis titulada “Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica”; el programa de Rao y Barnard desarrollado para su trabajo titulado “*A Comparison of Acoustic Absorption Coefficient Measurements from the In-Situ Method with Traditional Methods*”, trabajos que por su campo de acción se asemejan considerablemente al trabajo aquí presentado. Sin embargo, no son programas comerciales por lo que no se los pudieron

adquirir y, de esta manera, realizar una comparación real entre resultados, teniendo como base la utilización de una misma metodología. Por otro lado, existen programas computacionales desarrollados por empresas como BSWA que los venden junto con tarjetas específicas para mediciones y el tubo de impedancia, por lo que no satisfacen los objetivos de esta investigación.

- Se diseñó e implementó un software experimental para la adquisición de datos, es decir la reproducción de la señal de prueba y la grabación de la información obtenida en el tubo de Kundt, este proceso se lo llevó a cabo en el entorno MAX MSP. Si bien la generación de ondas se realiza mediante una función propia del programa, los módulos que el entorno posee permiten concatenar varias funciones y crear un programa específico para generar y almacenar los datos obtenidos, delimitando tiempos de grabación y reproducción.
- Se diseñó e implementó un software experimental para el procesamiento de la información obtenida en el tubo de Kundt y el cálculo de parámetros acústicos. El entorno de programación fue Matlab, donde se combinaron 3 diferentes programas para el cálculo de los parámetros acústicos de interés. Se presenta al usuario la capacidad de procesar archivos de audio por los métodos de medición In Situ, por el método de medición de 2 micrófono y por el método de 4 micrófonos en un entorno GUI (Interfaz de usuario gráfica, por sus siglas en inglés) intuitivo y secuencial.
- Los resultados obtenidos fueron verificados mediante comparaciones con valores proporcionados por los fabricantes. Los resultados se muestran muy cercanos a ellos.
- Se realizó una metodología para realizar mediciones In Situ, la misma que establece los parámetros de medición; posicionamiento de la fuente, distancias entre superficies de muestra y fuente, rango de frecuencias válidas para la medición, duración de la señal de prueba y limitaciones del método. El método presenta datos fiables a partir de los 1000 Hz, esto se puede ver reflejado en que la diferencia entre los valores

medidos y los entregados por el fabricante no presenta diferencias significativas a partir de dicha banda de frecuencia.

- Se diseñó e implementó un software experimental para la adquisición de datos, es decir la reproducción de la señal de prueba y la grabación de la información obtenida para métodos in situ (ToneBurst). La señal de prueba se la ha realizado con un generador de señales MLS, como indica la normativa.
- El método de medición in situ implementado permite al usuario la adquisición y procesamiento de señales de audio grabadas según la metodología propuesta, es decir, ubicando la fuente de manera perpendicular al centro de la superficie de muestra.

## 14.2. Recomendaciones

La elaboración del tubo para realizar las mediciones tiene que ser muy minuciosa y debe prestar especial atención a detalles que podrían causar un mal funcionamiento del mismo. Al realizar las sueldas de los elementos para soporte de micrófonos se utilizó suelda tipo MIG, la cual al parecer causó deformaciones en el tubo y no se pudieron tener las mismas distancias y ubicaciones entre los micrófonos. Se recomienda realizar un análisis de los datos obtenidos en las mediciones a base de un nuevo Tubo de Kundt, de un material diferente al utilizado (como acrílico), ensamblado utilizando técnicas que no pongan en riesgo la estructura interna del tubo. La asimetría en las funciones de transferencia evidencia una deficiencia en la adquisición de los datos, esta deficiencia puede ser debido a posibles inconsistencias en la estructura del tubo, a causa del proceso constructivo llevado a cabo.

La metodología implementada para la medición de los parámetros de absorción acústica presenta algunas deficiencias, en relación a la calibración del sistema electro-acústico, debido a que se ha utilizado procesadores de audio que permiten al usuario cambiar determinados parámetros mediante perillas tipo potenciómetros sin pasos en niveles fijos. Esto no es recomendable una vez establecido un laboratorio de mediciones;

es necesaria la adquisición de equipos como interfaces y procesadores sin perillas o con niveles de ganancia fijas para mantener controlado y permanentemente calibrado el sistema.

Se realizaron programas de computador en 2 entornos de programación: Matlab y MAX MSP. Se recomienda para futuros trabajos realizar una unificación del entorno de programación, con la finalidad de obtener un archivo ejecutable que permita la instalación, en cualquier computador, de un solo programa que contenga ambos módulos de almacenamiento y post procesamiento de datos, y que mantenga una misma interfaz en todo el proceso de mediciones.

El tubo de Kundt construido contiene 5 perforaciones con posibles ubicaciones de micrófonos. Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, únicamente se realizaron los análisis con 2 ubicaciones para el método de 2 micrófonos y 4 ubicaciones para el método de 4 micrófonos. Por lo tanto, se pueden investigar los efectos que se producen al cambiar distancias entre micrófonos y distancias de los micrófonos a la fuente con las propiedades de los materiales analizados.

El método de ToneBurst es muy susceptible a errores si no existe una adecuada relación señal – ruido. Por lo que no es fácilmente aplicable a situaciones en las cuales se tenga una relación señal ruido menor a 15 dB, por lo que se recomienda realizar las mediciones en ambientes controlados.

## 15. Referencias

- American Society for testing and materials. (2011). *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*. (1ª . ed.). West Conshohocken, Estados Unidos de Norteamérica.
- European Committee for standardization. (2003). Road traffic noise reducing devices — Test method for determining the acoustic performance. (1ª. ed .). Londres, Reino Unido.
- Cox, T. y D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers Theory, design and application* (2ª . ed.). Londres, Reino Unido: Spon Press.
- Hussain, Z. ,Sadik, A. y O'Shea, P. (2011). *Digital Signal Processing An Introduction with MATLAB and Applications*. (1ª . ed.). Berlin, Alemania: Springer Heidelberg
- Rincon, A. *Measurement of the sound-absorption coefficient in situ in egg cartons using the Tone Burst Method*. Buenos Aires, Argentina: Instituto tecnológico de Buenos Aires.
- Seybert, A. *Notes on Absorption and Impedance Measurements*. Lexington, Estados Unidos de Norteamérica: University of Kentucky.
- Garay, M. y Guidorzy, P. *Experimental verification of the european methodology for testing noise barriers in situ: Sound Reflection*. Bologna, Italia: DIENCA.
- Berengier, M. y Garai, M. *A state-of-the-art of in situ measurement of the sound absorption coefficient of road pavements*. Bologna, Italia: DIENCA.
- Wu, T. , Lam, Y. y Cox, T. *Measurement of non-uniform impedance surface by the two microphone method*. Salford, Inglaterra: Universidad de Salford.

Tronchin, L. ,Venturi, A., Farina, A. y Varani, C. *In situ measurements of reflection index and sound insulation index of noise barriers*. Sydney, Australia: ICA.

Guidorzi, P. y Garai, M. (2008). *Signal analysis in the sound absorption measurement procedure: The importance of time subtraction and reference surface corrections* .Bologna, Italia : DIENCA.

Bolton, J. y Hou, K. (2009). *A Transfer Matrix Method for Estimating the Dispersion and Attenuation of Plane Waves in a Standing Wave Tube*. West Lafayette, Estados Unidos de Norteamérica: Ray W. Herrick Laboratories

Kunio, J., Yoo T., Hou, K. y Enok, J. (2009). *A Comparison of Two and Four Microphone Standing Wave Tube Procedures for Estimating the Normal Incidence Absorption Coefficient* .Ottawa, Canadá.

Turo, D., Vignola, J., Glean, A. (2012). *Acoustic Metrology*. Washintgon DC, Estados Unidos de Norteamérica: Universidad Católica de América.

## **16. Anexos**



### 16.1. Anexos 1. Fotografías del proceso e instrumentos de medición.



*Figura 99.* Pruebas de recepción de señal ToneBurst



*Figura 100.* Montaje para medición in Situ



*Figura 101. Mediciones in situ.*



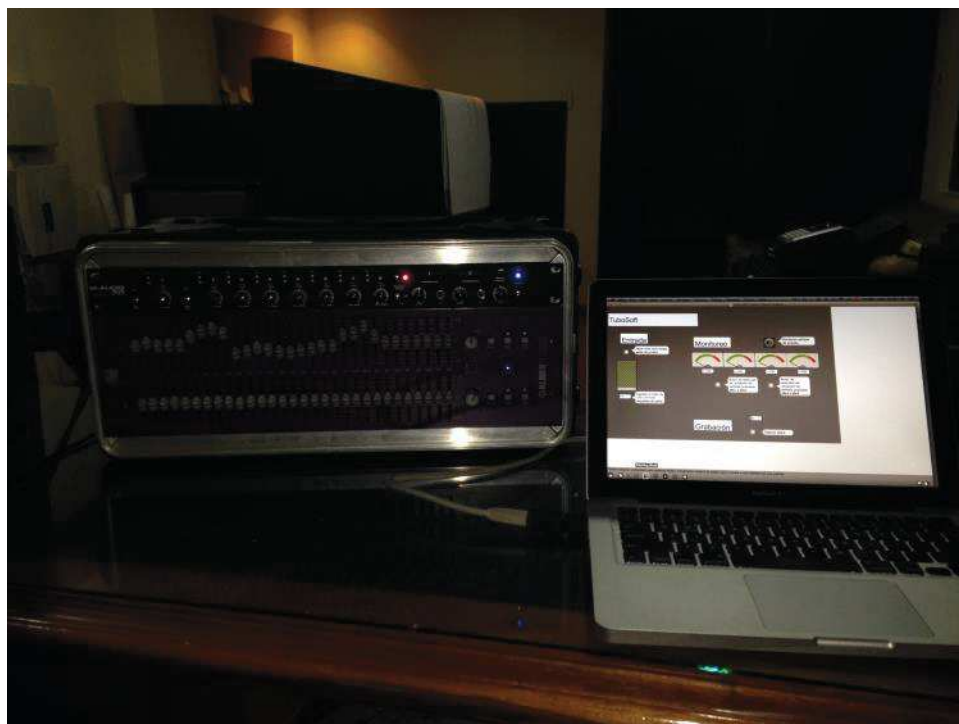
*Figura 102. Medición in situ panel acústico*



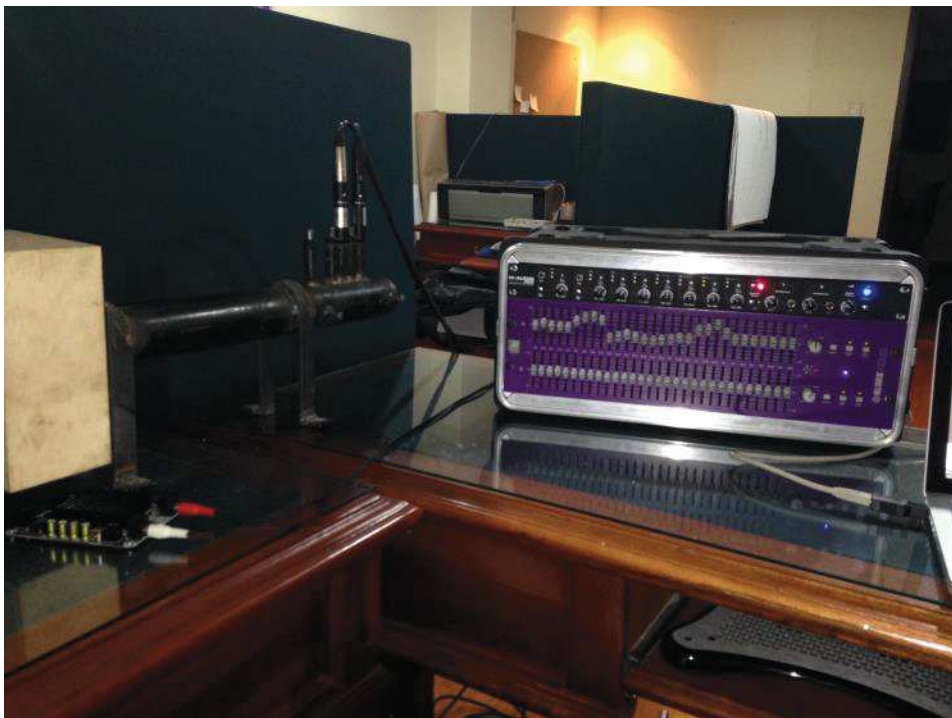
*Figura 103. Montaje medición in situ.*



*Figura 104. Montaje medición de Black Theater 1”.*



*Figura 105.* Software y equipo de adquisición de datos.



*Figura 106.* Equipo para medición de coeficientes de absorción por medio de 2 micrófonos.





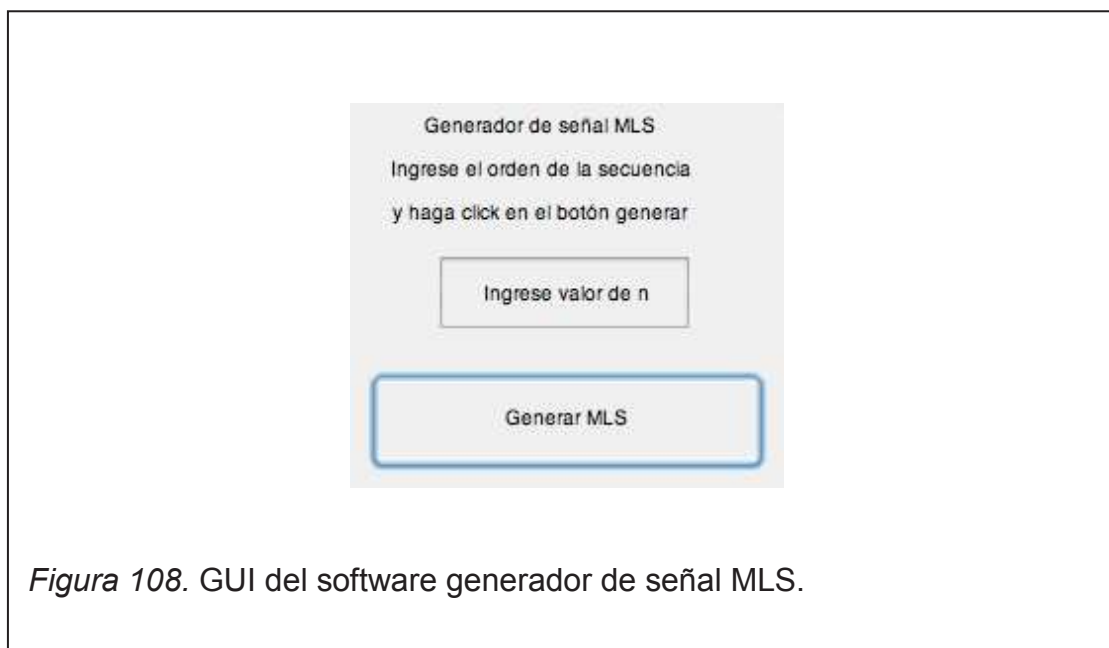
*Figura 107.* Montaje para medición por medio de técnica de 4 micrófonos.



## 16.2. Anexo 2. Código de Programación para la generación de la señal MLS

Para poder realizar las mediciones por medio del método in situ o ToneBurst se requiere de una señal de prueba del tipo MLS, por lo que se ha implementado el siguiente código de programación, el cual genera la señal MLS requerida para las mediciones. Una vez que se tiene esta señal.

Se deberá ingresar el valor del orden de la secuencia (para las mediciones se utilizó el valor de 6), posterior a esto se generará la secuencia requerida y se almacenará en un archivo wav.



*Figura 108.* GUI del software generador de señal MLS.

Interfaz gráfica:

El código implementado para la generación de la señal MLS es el siguiente.

```
function mls_output=mls_generator(n,random_flag)

n_big=15; %cualquier valor mayor a este, hará que la señal se divida
en dos archivos.
n=6
random_flag=1
if n<2
error('The input order must be 2 or greater')
end

if nargin==1
random_flag=0;
end

%Generación de la secuencia
%-----
if random_flag==0 %
register_list=ones(1,n);
elseif random_flag==1 %aleatorio
register_list=round(rand(1,n));
while sum(register_list)==0 % se asegura que al menos un elemento no
sea 1
register_list=round(rand(1,n));
end
else % indica que el valor ingresado debe ser 0 o 1.
error('random_flag must be either set to zero or one')
end

prim_poly=gfprimdf(n); %obtiene el primitivo del polinomio
sum_list=find(prim_poly(1:n)==1); % determina elementos del registro
de la secuencia para ser sumados

if n<=n_big
mls_output=zeros(1,2^n-1); %genera una secuencia vacia
for m=1:2^n-1 % rellena la secuencia
%asigna el primer elemento de la secuencia
mls_output(m)=register_list(1);

%%polinomio primitivo
register_list=[register_list(2:n)
mod(sum(register_list(sum_list)),2)];
end
else
disp('orden muy larga .')

split_number=(n+1)-n_big;

for p=1:split_number;
if p==split_number
mls_output=zeros(1,2^n_big-1); %genera la secuencia vacía
for m=1:2^n_big-1
%se almacena el primer elemento de la secuencia
mls_output(m)=register_list(1);

%cambia el registro y determina el Nuevo elemento del polinomio
primitivo
%%polinomio primitivo
register_list=[register_list(2:n)
mod(sum(register_list(sum_list)),2)];
```

```

end

else
mls_output=zeros(1,2^n_big); %genera la secuenciavacia
for m=1:2^n_big
% se almacena el primer elemento de la secuencia
mls_output(m)=register_list(1);

% cambia el registro y determina el Nuevo elemento del polinomio
primitivo
%polinomioprimitivo
register_list=[register_list(2:n)
mod(sum(register_list(sum_list)),2)];
end
end
eval(['mls_output_',num2str(p),'of',num2str(split_number),'_order',num
2str(n),'=mls_output;']);
disp(['Saving file ',num2str(p),' out of ',num2str(split_number),'.'])

save(['mls_output_',num2str(p),'of',num2str(split_number),'_order',num
2str(n)],...

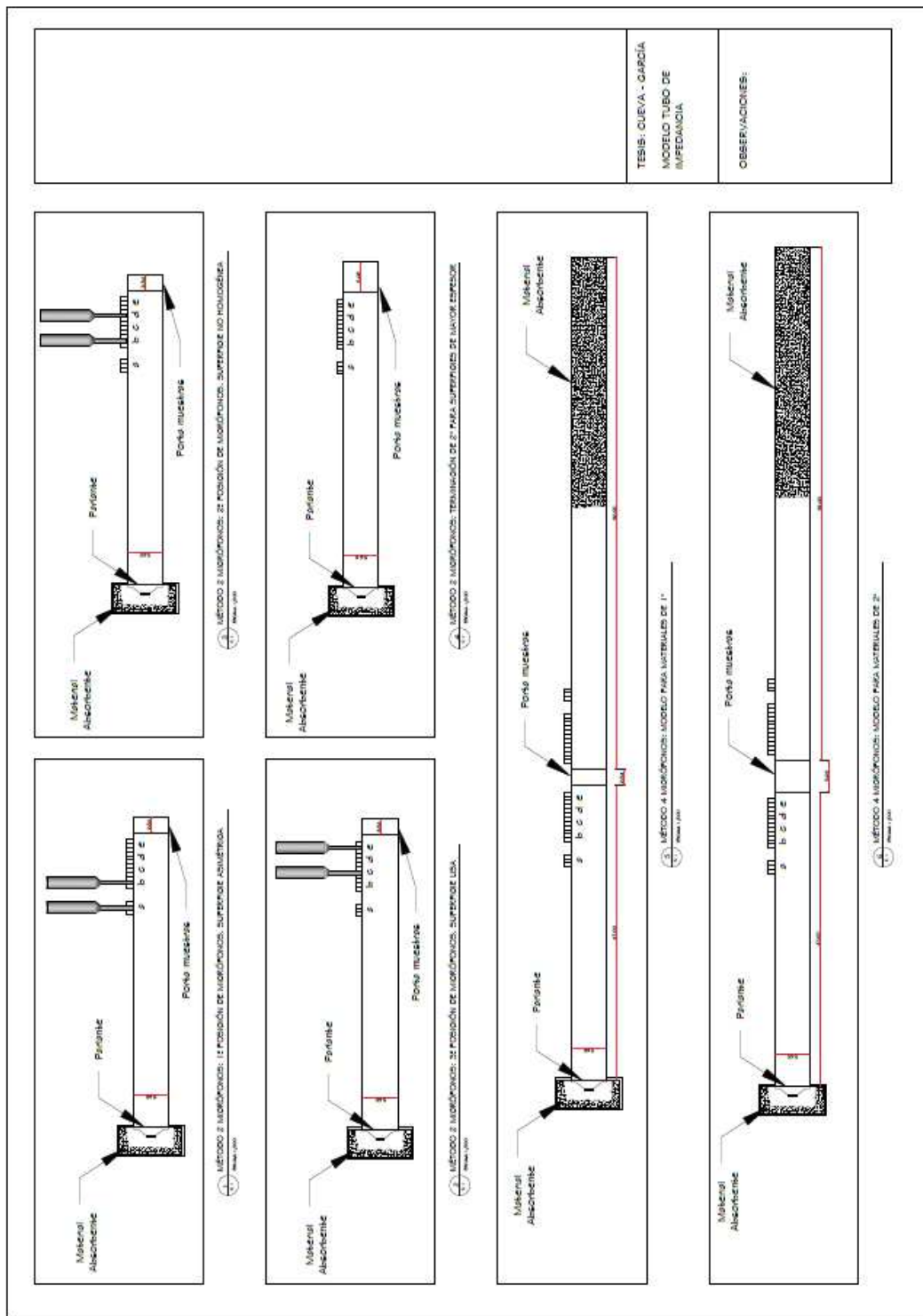
['mls_output_',num2str(p),'of',num2str(split_number),'_order',num2str(
n)]);

end
mls_output='saved as files';
end

```

### 16.3. Planos de Tubo de Kundt

Figura 109. Planos tubo de Kundt



TESIS: CUEVA - GARCÍA  
MODELO TUBO DE  
IMPEDANCIA

OBSERVACIONES:

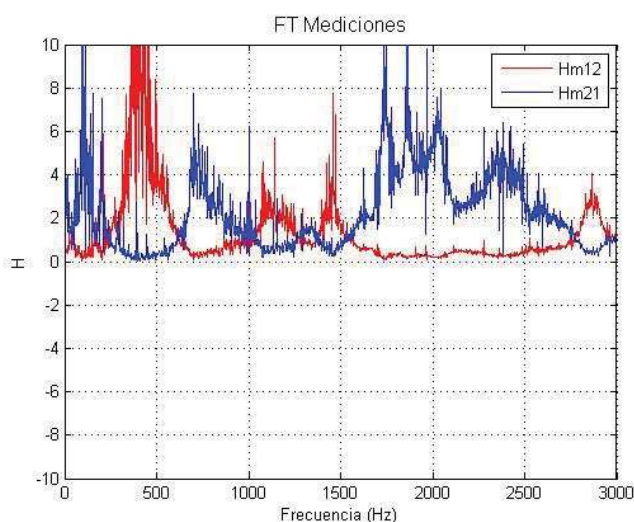
## 16.4. Tubo de Impedancia a base de Teflón plástico

Una vez obtenidos los resultados de las mediciones en base al Tubo de Impedancia con de acero, mostraban resultados incoherentes en ciertas frecuencias específicas. Por lo que se realizó otro Tubo de Impedancia en base a un material de teflón plástico, manteniendo los mismos parámetros de diseño y metodología de medición. Los resultados se muestran a continuación.

### 16.4.1. Medición Black Theater 1”

#### Función tffc

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



*Figura 110.* Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos. Por método tffc.

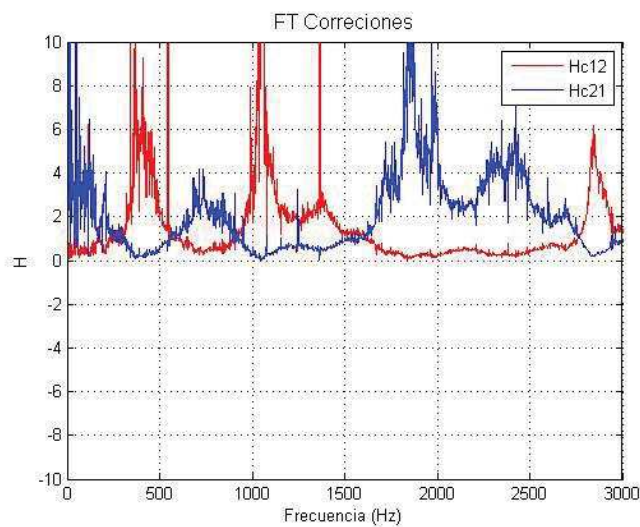


Figura 111. Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos. Por método tffc.

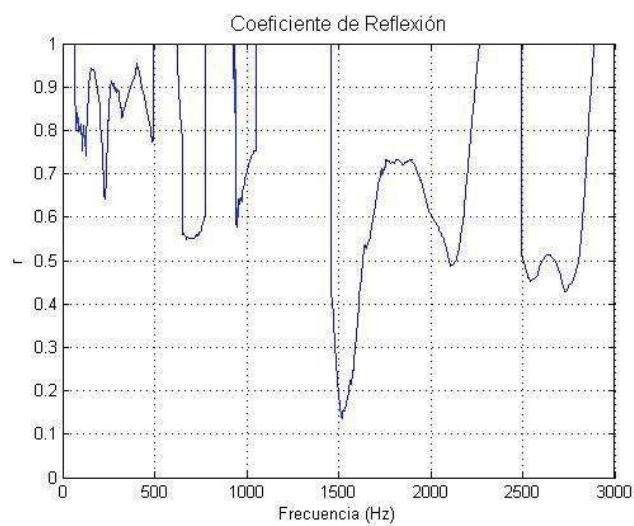
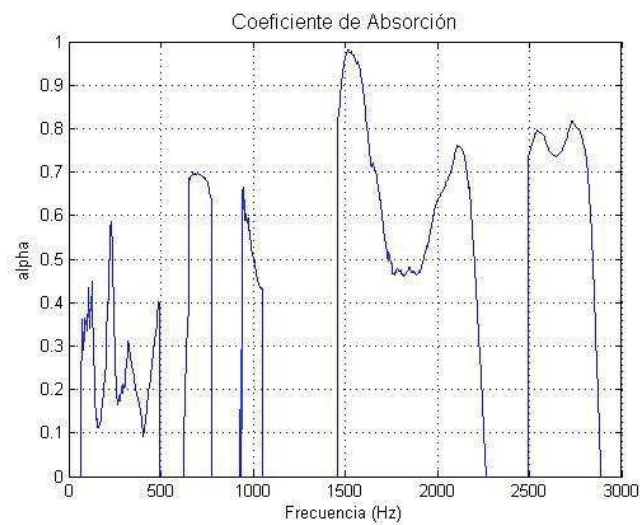


Figura 112. Coeficiente de reflexión Black Theater. Por método tffc.



*Figura 113.* Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tffc.

### **Función tfcp**

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

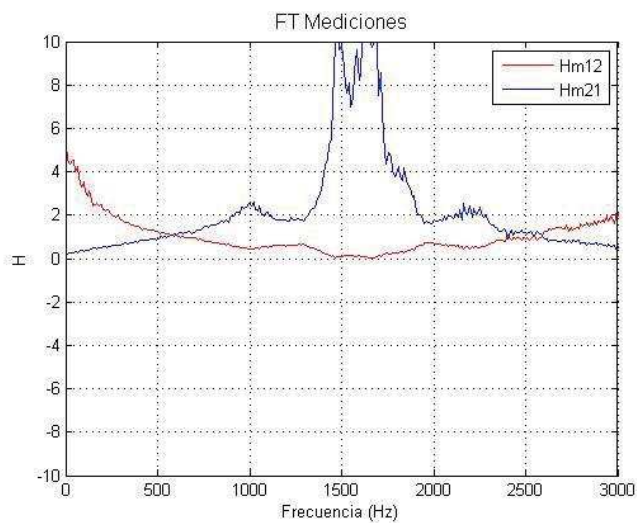


Figura 114. Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos. Por método tfcp.

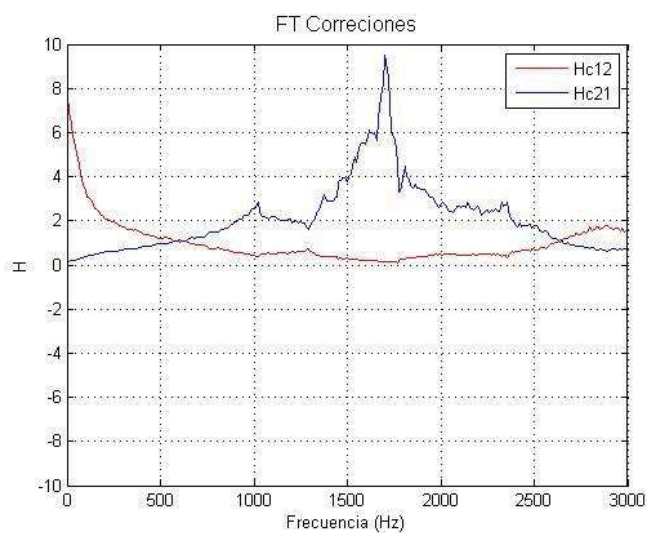


Figura 115. Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos. Por método tfcp .



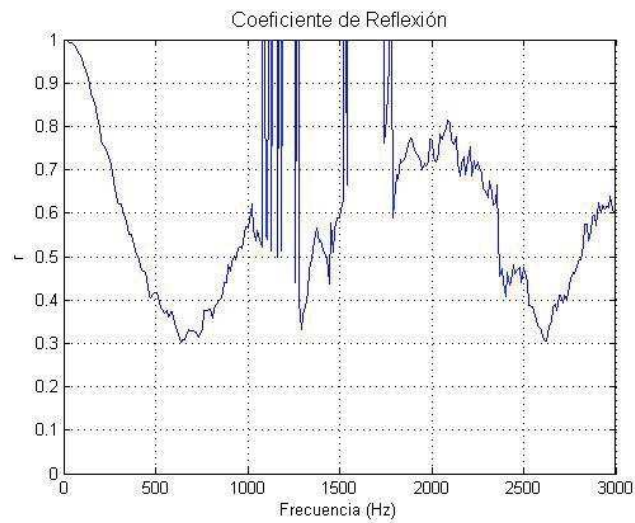


Figura 116. Coeficiente de reflexión Black Theater. Por método tfcp.

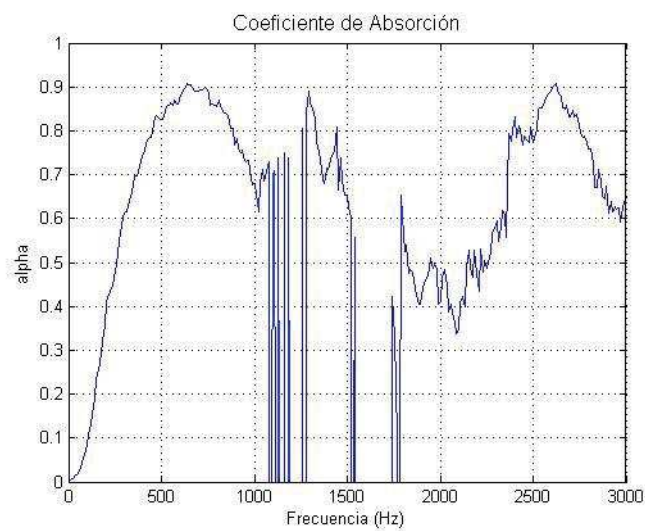
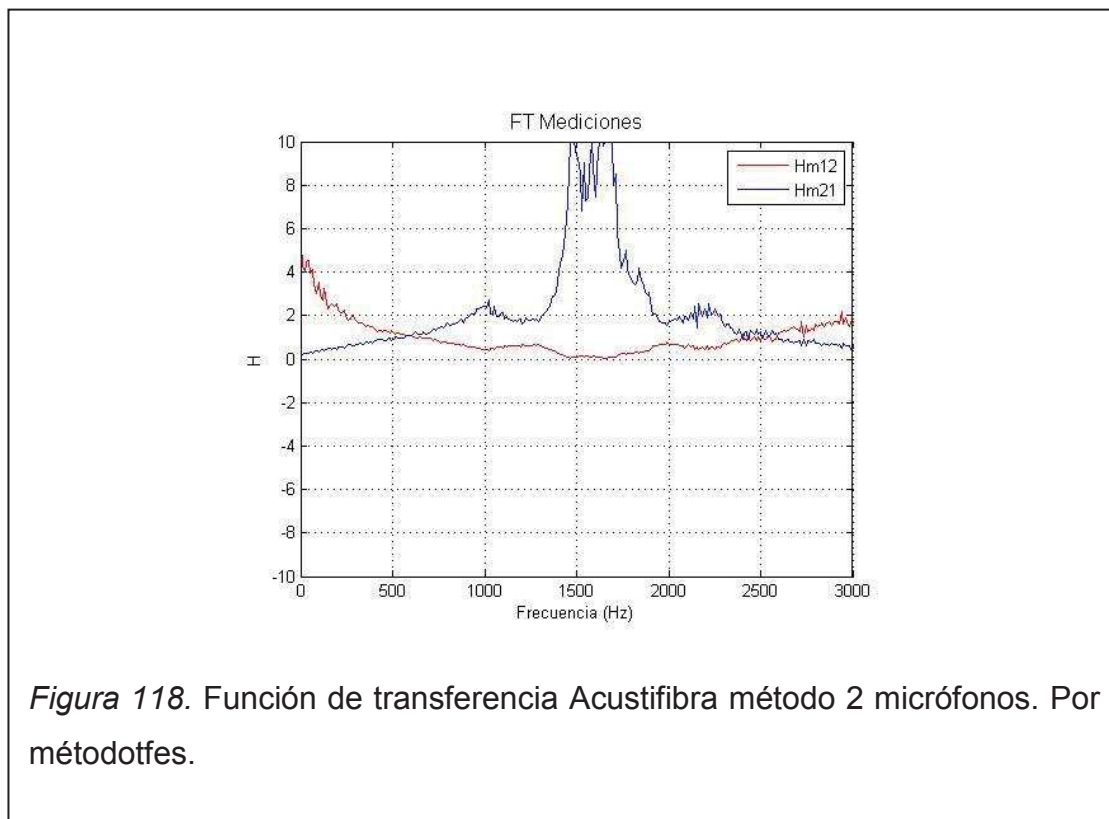
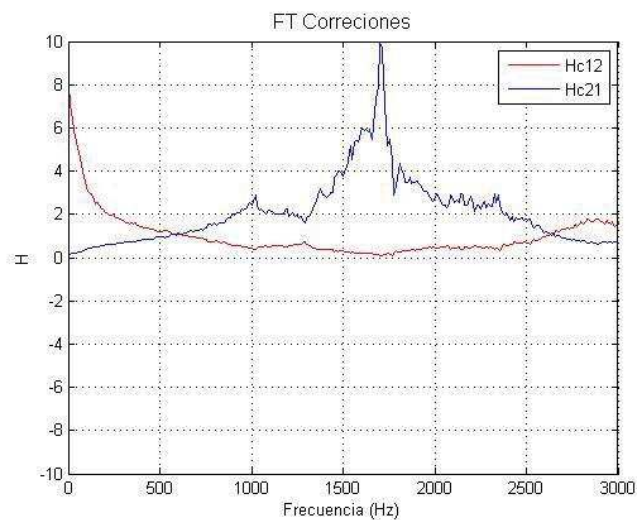


Figura 117. Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tfcp.

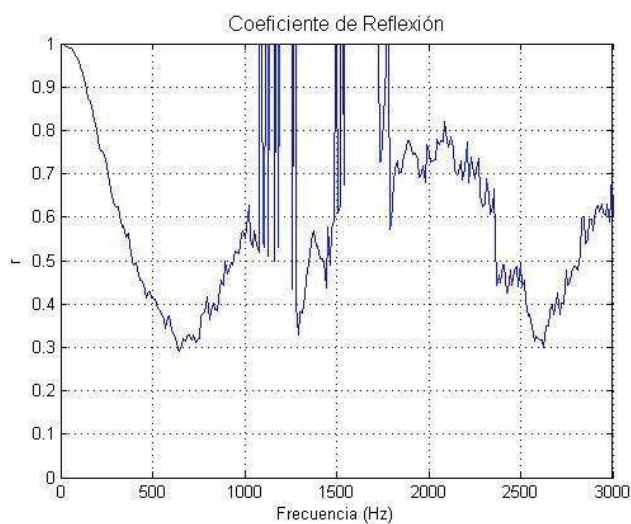
### Función t<sub>fes</sub>

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

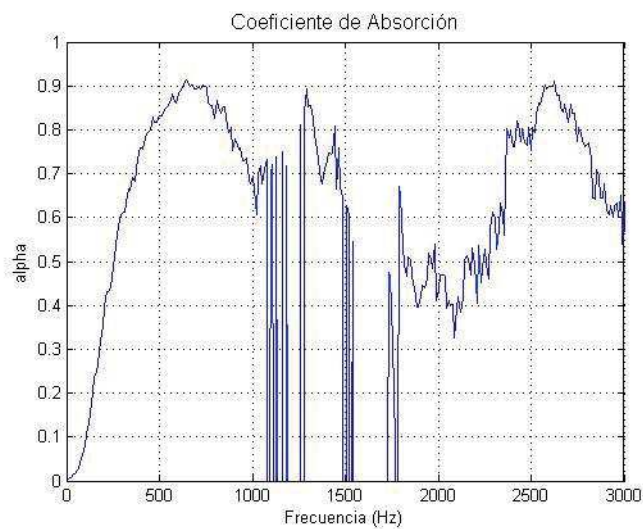




*Figura 119.* Función de transferencia Acustifibra método 2 micrófonos. Por método tfes.



*Figura 120.* Coeficiente de reflexión Black Theater. Por método tfes.



*Figura 121.* Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tfes.

### **Función t<sub>fxc</sub>**

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.

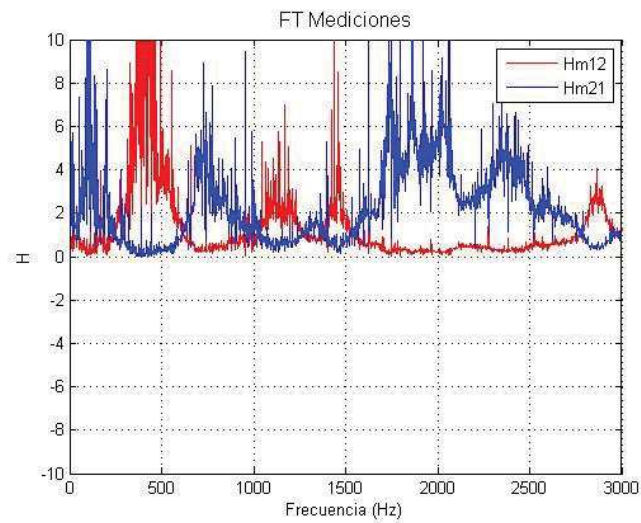


Figura 122. Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos.

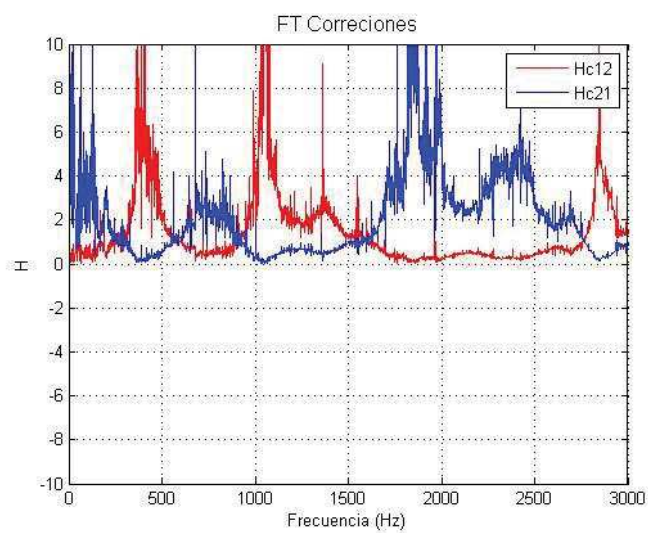


Figura 123. Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos.  
Por método tfix.

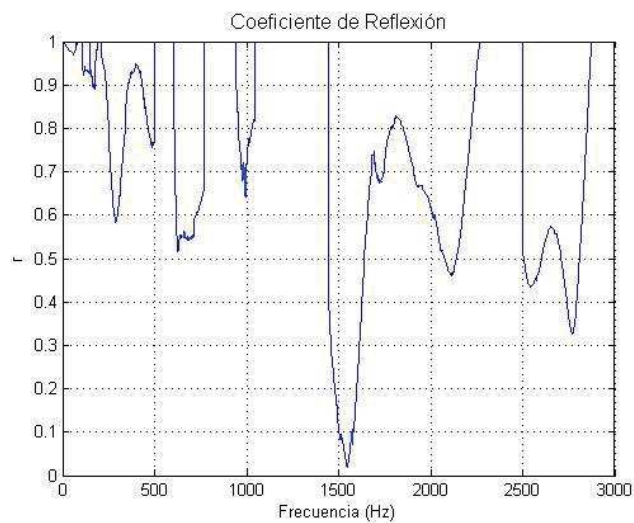


Figura 124. Coeficiente de reflexión Black Theater. Por método Tfxc.

Por método tfxc.

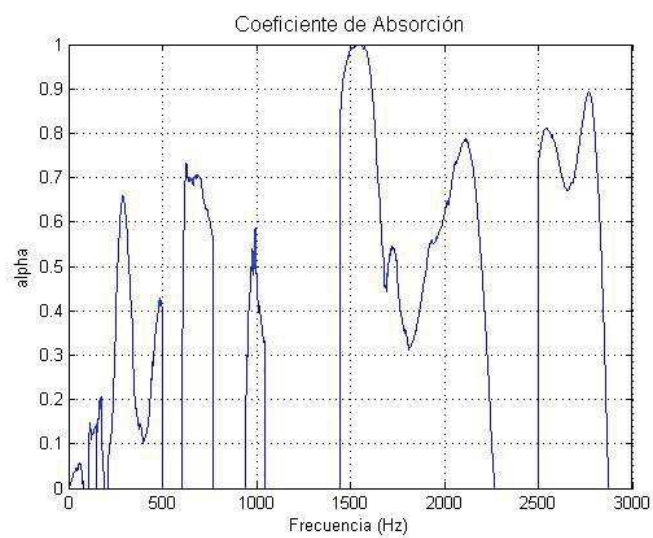
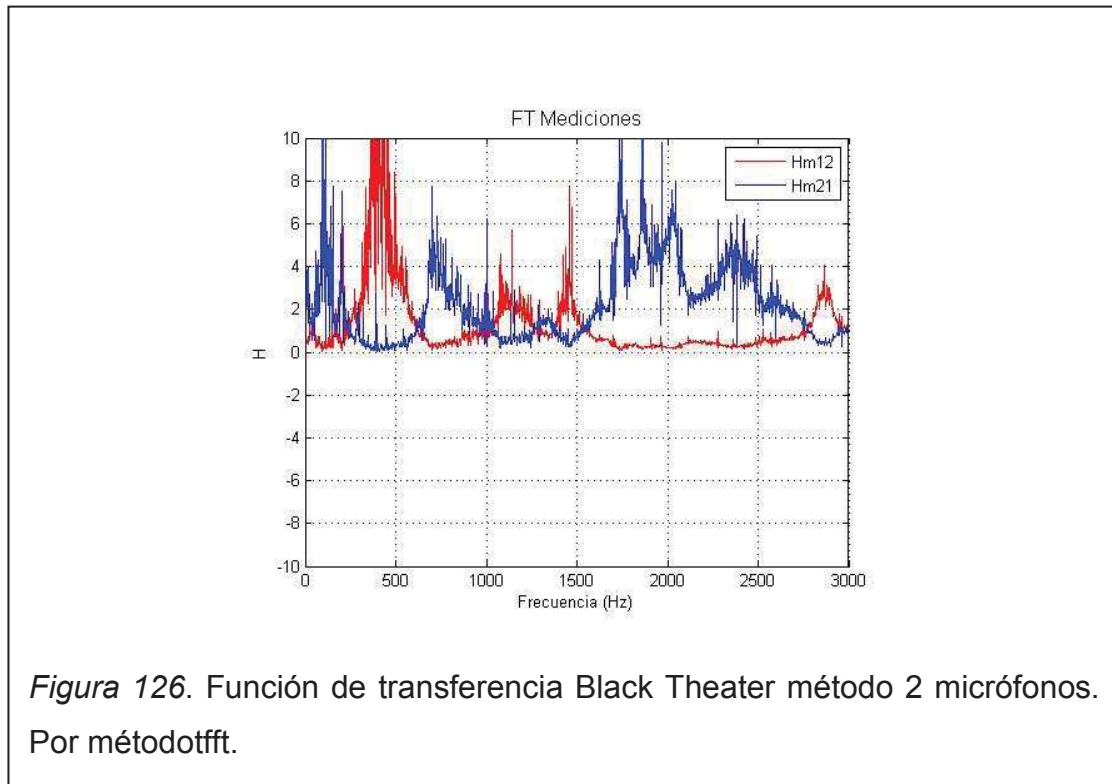


Figura 125. Coeficiente de absorción Black Theater 1". Por método tfxc.

### Función tfft

Una vez realizado el post procesamiento de señales se obtuvieron las siguientes gráficas de Funciones de Transferencia, coeficiente de reflexión y absorción.



*Figura 126.* Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos. Por método tfft.

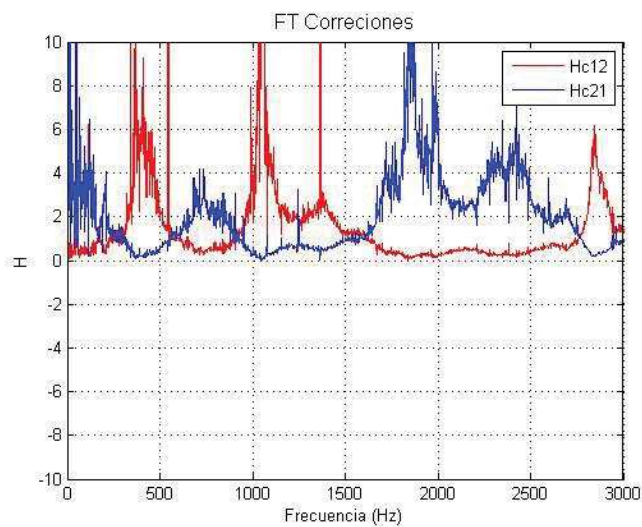


Figura 127. Función de transferencia Black Theater método 2 micrófonos. Por método tfft.

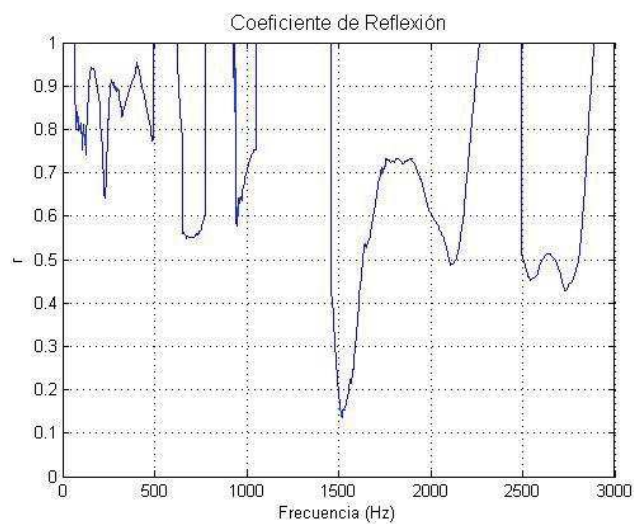
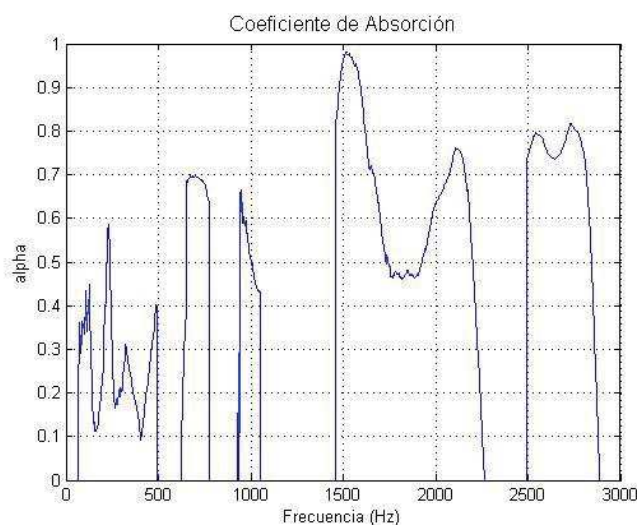


Figura 128. Coeficiente de reflexión Black Theater. Por método tfft.





*Figura 129.* Coeficiente de absorción Black Theater 1". Pormétodotfft

#### 16.4.2. Análisis de Resultados tubo de teflón plástico

En los resultados obtenidos se puede observar que al mejorar la construcción del tubo de impedancia se ha podido obtener datos en el rango de 1500 Hz a 2000 Hz, esto no ocurría con el tubo a base de metal. Esto se debe principalmente a que se ha mejorado la construcción, añadiendo detalles significativos para mejorar la hermeticidad dentro del tubo como por ejemplo, el añadir rosca en el acople entre los porta muestras y el tubo principal. Además se ha mejorado el cierre entre los elementos que conforman el tubo de Impedancias como se demuestra en las figuras siguientes.



*Figura 130.* Porta muestras de teflón plástico



*Figura 131.* Acople de portamuestras a tubo principal



*Figura 132.* Tubo de impedancia.

Los resultados obtenidos fuera del rango de 1500 Hz a 2000 Hz son similares a los obtenidos en el tubo de impedancias construido con metal y dentro del rango de 1500 a 2000 Hz se puede observar que existen diferencias con respecto a los datos entregados por el fabricante, ya que el coeficiente de absorción entregado por fábrica es de 0.99 para 2000 Hz mientras que el obtenido en la medición utilizando el tubo de impedancia elaborado a base de teflón, y utilizando as funciones  $tffc$  y  $tfft$ , es de 0.76 aproximadamente. Esta diferencia es representativa por lo cual se recomienda un análisis posterior del procesamiento de señales y también del diseño del tubo de impedancias para poder optimizar su funcionamiento y evitar las discontinuidades que se obtienen en los gráficos de coeficiente de absorción.

## 16.5. Análisis económico.

Tabla 3. Análisis económico.

<b>Análisis Económico Desarrollo tubo de Impedancia y Mediciones In Situ</b>				
<b>Rubro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>V.Unitario</b>	<b>Total</b>
<b>Tubo de Acero y Materiales</b>				
Tubo cédula 40 2"	Metros	2,5	\$ 14,50	\$ 36,25
Tubo cédula 40 1/2"	Metros	0,5	\$ 8,00	\$ 4,00
Trabajo de torno - Fase 1	Unidad	1	\$ 30,00	\$ 30,00
Parlante 5" VIFA	Unidad	1	\$ 48,19	\$ 48,19
Amplificador 50 W 2 CH	Unidad	1	\$ 33,67	\$ 33,67
Fuente de poder para amplificador	Unidad	1	\$ 11,79	\$ 11,79
Caja Acústica de madera	Unidad	1	\$ 60,00	\$ 60,00
Elementos varios de sujeción	Global	1	\$ 30,00	\$ 30,00
Trabajos de Sueda - Fase 1	Unidad	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Trabajos de Torno - Fase 2	Unidad	1	\$ 55,00	\$ 55,00
Trabajos de Sueda - Fase 2	Unidad	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Materiales varios de instalación	Global	1	\$ 22,89	\$ 22,89
<b>Tubo de Teflón</b>				
Tubo de teflón redondo 20 mm	Kg	0,34	\$ 12,46	\$ 4,24
Tubo de teflón redondo 75mm	Kg	0,31	\$ 11,08	\$ 3,43
Grillón perforado 70x40mm	Kg	4,6	\$ 11,49	\$ 52,85
Lámina de tefrón 12mm	Kg	0,72	\$ 13,99	\$ 10,07
Sellante epóxica	Unidad	2	\$ 4,56	\$ 9,12
Trabajos de Torno	Unidad	1	\$ 60,00	\$ 60,00
<b>Equipos y Software</b>				
Interfaz de audio 8 canales M-AUDIO	Dia	20	\$ 15,00	\$ 300,00
Ecuilizador KlarkTeknik DN360	Dia	20	\$ 30,00	\$ 600,00
Cables de audio	Dia	20	\$ 2,00	\$ 40,00
Computador con software de análisis	Dia	20	\$ 10,00	\$ 200,00

Altavoz amplificado para mediciones In Situ	Dia	10	\$ 30,00	\$ 300,00
Adquisición de Software MAX MSP	Unidad	1	\$ 380,00	\$ 380,00

<b>Programación</b>
---------------------

Diseño de software de adquisición de datos	U	1	\$ 300,00	\$ 300,00
Diseño de software de procesamiento de datos	U	1	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00

<b>Personal Técnico</b>
-------------------------

Diseño, Implementación, calibración del sistema, supervisión técnica e informes	Hora/Hombre	1280	\$ 3,82	\$ 4.889,60
---	-------------	------	---------	-------------

<b>Gastos de Opreación</b>
----------------------------

Arriendo Oficina	Mes	4	\$ 150,00	\$ 600,00
Agua	Mes	4	\$ 3,00	\$ 12,00
Luz	Mes	4	\$ 10,00	\$ 40,00
Teléfono	Mes	4	\$ 10,00	\$ 40,00
Internet	Mes	4	\$ 22,00	\$ 88,00
Celular	Mes	4	\$ 10,00	\$ 40,00

<b>TOTAL</b>	\$ 9.361,11
--------------	-------------