



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN
DE AISLAMIENTO SONORO EN INCIDENCIA
NORMAL**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA**

PRESENTA:

FELIPE ARTURO MACHUCA TZILI



TUTOR:
DR. SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Felipe Orduña Bustamante
Secretario: Dr. Luis Pablo Rendón Garrido
Vocal: Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz
1^{er}. Suplente: M. en I. Antonio Pérez López
2^{do}. Suplente: Dr. Andrés Esteban Pérez Matzumoto

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), UNAM. México, D. F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz



FIRMA

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMA DE TESIS	1
1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS	2
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	3
2.1 ONDAS ACÚSTICAS EN DUCTOS	3
2.2 ONDAS PLANAS EN DUCTOS	4
2.3 IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA	6
2.4 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN	6
2.5 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	7
2.6 MATERIALES ABSORBENTES	7
2.7 AISLAMIENTO SONORO	8
2.7.1 AISLAMIENTO SONORO EN INCIDENCIA NORMAL	8
2.8 TRANSMISIÓN SONORA	8
2.8.1 COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA SONORA	8
2.8.2 PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN	9
2.9 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS CON EL TUBO DE IMPEDANCIAS	9
2.10 MÉTODO DE ONDA ESTACIONARIA	10
2.11 MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN DE ONDA	11
2.12 MÉTODO DE MATRIZ DE TRANSFERENCIA	12
CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES Y MÉTODOS UTILIZADOS	16
3.1 RESUMEN DE TRABAJOS ANTERIORES	16
3.2 DESARROLLO DE UNA NUEVA FORMULACIÓN POR DESCOMPOSICIÓN DE ONDA	17
3.3 EL MÉTODO DE PANNETON Y SALISSOU	20
CAPÍTULO 4: DESARROLLO	25
4.1 DISEÑO DEL TUBO	25
4.1.1 NORMA ISO 10534:2001	25
4.1.2 DIMENSIONES Y MATERIALES	29
4.1.2.1 MATERIALES Y SUS CARACTERÍSTICAS	29
4.1.2.2 LONGITUD DEL TUBO Y FRECUENCIAS LÍMITE DE OPERACIÓN	30
4.1.2.3 PORTAMUESTRAS	32
4.1.2.4 FUENTE DE EXCITACIÓN	34
4.1.2.5 ESQUEMAS	34
4.1.3 TERMINACIONES DEL TUBO	36
4.2 TIPO DE MUESTRAS	38
4.3 PROGRAMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	39
4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL PROGRAMA	42
4.4 MEDICIONES PRELIMINARES DE ABSORCIÓN	45

4.4.1	RESULTADOS DE LAS MEDICIONES PRELIMINARES	46
4.5	EFFECTOS DEL RUIDO DE FONDO	47
4.5.1	ANÁLISIS ESPECTRAL DEL RUIDO DE FONDO	52
CAPÍTULO 5: MEDICIONES		53
5.1	LOCACIÓN Y CONDICIONES EXPERIMENTALES	53
5.1.1	RUIDO AMBIENTAL	53
5.1.2	VIBRACIONES	53
5.1.3	VELOCIDAD DEL SONIDO c_0	54
5.2	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	55
5.2.1	CALIBRACIÓN	56
5.2.2	TIPO Y AMPLITUD DE LA SEÑAL DE PRUEBA	56
5.2.3	CORRECCIÓN DE FASE	57
5.2.4	PROMEDIACIÓN ESPECTRAL	58
5.3	PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DE CONDICIONES	58
5.3.1	RUIDO INTRODUCIDO POR LA FUENTE DE LOS MICRÓFONOS	58
5.3.2	DISTORSIÓN ARMÓNICA	59
5.3.3	PRUEBA PRELIMINAR DE AISLAMIENTO	60
5.4	RESULTADOS	62
5.4.1	RESULTADOS CON LA PRIMERA FORMULACIÓN	62
5.4.2	RESULTADOS CON LA SEGUNDA FORMULACIÓN	69
5.4.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	71
5.5	REPRODUCIBILIDAD	73
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		74
6.1	RECAPITULACIÓN	74
6.2	CONCLUSIONES	74
6.3	RECOMENDACIONES	75
6.4	TRABAJO FUTURO	76
APÉNDICES		77
GLOSARIO DE TÉRMINOS		95
BIBLIOGRAFÍA		99

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMA DE TESIS

El presente trabajo de tesis consiste en el diseño, construcción y evaluación de un tubo de impedancias modificado para la medición de transmisión sonora en incidencia normal. También se propone una formulación nueva para la utilización del dispositivo y se analiza e implementa otra formulación propuesta en la bibliografía para la medición de los parámetros más importantes que caracterizan la transmisión o aislamiento sonoro en incidencia normal sobre diversos materiales. Con la ayuda de un programa en MATLAB®ⁱ y una tarjeta de adquisición de datos de 4 canales, se controla el proceso de medición para adquirir simultáneamente todas las señales necesarias y se presentan los resultados de las mediciones del material a prueba colocado en el interior del tubo de transmisión.

El tubo de transmisión es un dispositivo compuesto por dos secciones cilíndricas de material rígido, en cuya unión se coloca el material a caracterizar. En uno de los extremos del tubo ensamblado se instala un altavoz que reproduce la señal de prueba, mientras que en el otro extremo puede haber distintos tipos de terminación (desde acústicamente reflejante, hasta muy absorbente), según el método de cálculo empleado. La señal que viaja a lo largo del tubo, es sensada por dos micrófonos antes y dos micrófonos después de la muestra. Los datos adquiridos de esta manera son procesados por el programa ya mencionado.

Caracterizar experimentalmente la capacidad de ciertos materiales (y arreglos de materiales) para aislar los campos sonoros entre dos espacios, es una necesidad que se presenta en diversas aplicaciones de la acústica. Ejemplos de estas aplicaciones son los esfuerzos realizados en acústica arquitectónica para evitar que la energía sonora se transmita a través de pisos, techos y paredes, y así alcanzar los requerimientos acústicos de confort de cada recinto; o bien, otro ejemplo se encuentra en la industria automotriz donde principalmente se desea que la cabina del conductor de un vehículo esté libre del exceso de ruido proveniente del motor y otras partes mecánicas. Sobre esta línea, también se investigan diferentes configuraciones de materiales que permitan el diseño de silenciadores (mofles) más eficaces^[17, 18].

Normalmente, la obtención precisa de parámetros acústicos relacionados con el aislamiento sonoro (ver glosario), se lleva a cabo por medio de un procedimiento normalizado, dentro de una cámara de transmisión; instalación costosa y de poca disponibilidad en la mayoría de los casos, además de requerir del uso de un analizador de espectros y de la construcción de un muro hecho con material que se quiere caracterizar, y que puede llegar a medir varios metros cuadrados. El empleo del tubo de impedancias para medir parámetros acústicos de materiales, como coeficientes de reflexión, absorción, transmisión, e impedancias, no es una técnica nueva^[8], pero viene a cubrir la necesidad práctica de poder efectuar mediciones más rápidas y menos costosas, con la posibilidad de repetirlas fácilmente cada vez que se haga un cambio en la muestra, por ejemplo, al diseñar un material. Si bien, los resultados obtenidos de esta forma se encuentran restringidos a ciertas condiciones e intervalos de validez, este dispositivo constituye una herramienta poderosa para el análisis rápido y económico de materiales para aislamiento acústico.

Para obtener el máximo provecho del tubo de transmisión, en trabajos anteriores se han propuesto técnicas basadas en diversos análisis matemáticos tales como la descomposición de onda, el método de matriz de transferencia y combinaciones de ambos^[15, 16, 17, 18 25, 26, 27], con

ⁱ www.mathworks.com

resultados que van desde modestos hasta satisfactorios; esto se debe no sólo a cuestiones de inexactitud matemática, sino por las elevadas exigencias de montaje y por las restricciones de las características físicas de la muestra que se va a medir. El método teórico que, en este trabajo, se consideró como aquel que caracteriza en mejor forma los parámetros de transmisión o aislamiento sonoroⁱⁱ es el que en fechas recientes desarrollaron Y. Salissou y R. Panneton^[15].

Un objetivo de esta tesis es estudiar y aplicar las técnicas empleadas para la medición del coeficiente de transmisión acústica en incidencia normal y la pérdida por transmisión, para lo cual se diseñó y construyó un tubo de transmisión, con un intervalo de operación entre 860 y 6800Hz. La justificación de esta propuesta es que, a pesar de que en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM se cuenta con una cámara de transmisión, la realización de mediciones en una instalación de este tipo está orientada a la industria de la construcción, y requiere muestras de 10 metros cuadrados; tamaño impráctico y/o imposible de replicar con otro tipo de materiales, como por ejemplo, aquellos utilizados en la industria aeronáutica o automotriz (materiales porosos, multicapa, o con cámara de aire posterior). En muchos casos, las aplicaciones ocupan superficies pequeñas, por lo que no son necesarias muestras de grandes dimensiones, que además representan una inversión alta de tiempo y dinero. Desde este punto de vista, la alternativa de utilizar muestras pequeñas con el tubo de impedancias se presenta como deseable práctica y económicamente.

Parte de este trabajo, incluye la aportación de una nueva formulación para la obtención del coeficiente de transmisión que utiliza el método de descomposición de onda.

Otro de los objetivos es proponer sugerencias del tipo práctico, así como nuevas modificaciones del prototipo construido, para lograr mediciones más exactas y precisas y, si es posible, para extender aún más las capacidades del tubo de impedancias.

1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el primer capítulo se describe el tema principal y se establecen los objetivos generales del trabajo. En el segundo capítulo se definen los conceptos físicos más importantes en el proceso de medir la transmisión sonora. En el capítulo tres se presenta un resumen de los trabajos publicados por otros autores y se detalla la teoría subyacente a ellos. También se propone una nueva formulación, desarrollada al inicio de la investigación. En el cuarto capítulo se detalla el diseño propuesto para el tubo de impedancias, su construcción y las pruebas preliminares para ajustar el experimento a las condiciones del entorno. En el capítulo cinco se describe el proceso de medición con el dispositivo construido, para dos formulaciones y métodos distintos, así como los resultados obtenidos hasta el momento. Finalmente, el capítulo seis plantea las conclusiones, así como las recomendaciones para la continuación de este trabajo.

ⁱⁱ Paralelamente a la investigación realizada para desarrollar un procedimiento que mejorara los resultados hasta el momento obtenidos en la literatura, la revista *JASA* publicó el artículo^[15] en el cual se decidió finalmente basar la mayor parte del trabajo realizado.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ONDAS ACÚSTICAS EN DUCTOS

Considérese un ducto infinito, de paredes rígidas y con sección transversal rectangular y constante (Figura 2. 1). Si el eje del tubo es coincidente con el eje x , la onda que se mueve dentro del ducto tiene dos componentes axiales (y , z) y una componente viajera armónica, como se muestra en la ecuación (2- 1),

$$p(x, \omega) = A \cos(k_y y) \cos(k_z z) e^{ik_x x} \quad (2- 1)$$

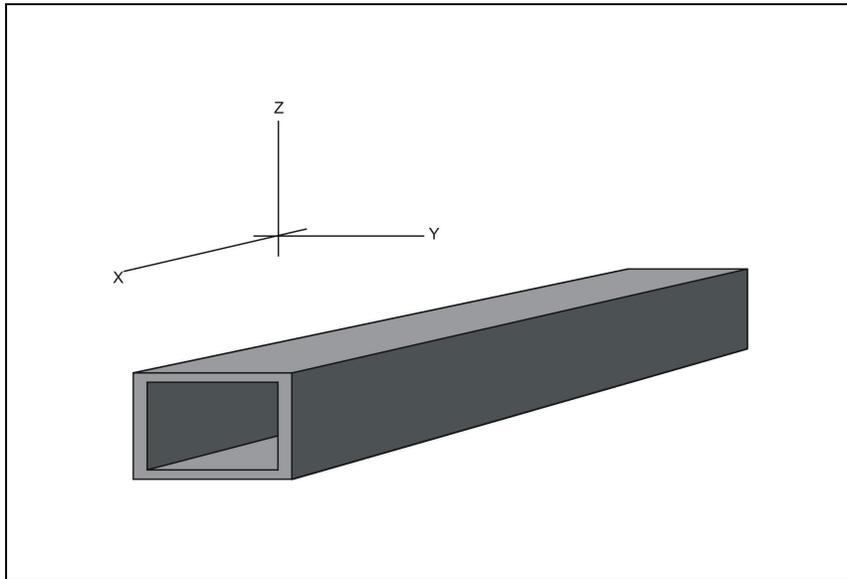


Figura 2. 1. Tubo rígido de sección transversal rectangular.

Donde $k_y = \frac{m\pi}{L_y}$, $k_z = \frac{n\pi}{L_z}$, siendo m y n números naturales. L_y y L_z son las dimensiones interiores del tubo en las direcciones que indican sus subíndices. El coeficiente k_x se puede obtener de la relación de dispersión (Ec. (2- 2)), derivada de la ecuación de onda en tres dimensiones:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} = 0 \quad (2- 2)$$

Si ahora consideramos el caso de un ducto de longitud infinita y de sección transversal circular (Figura 2. 2), las coordenadas perpendiculares al tubo serán r y el ángulo azimutal φ . Al igual que en el caso rectangular, la solución de la ecuación de onda es un producto de funciones de r , φ y x (variables separables)

$$p(x, \omega) = A e^{ik_x x} \cos(k_\varphi \varphi) J_m(k_r r) \quad (2- 3)$$

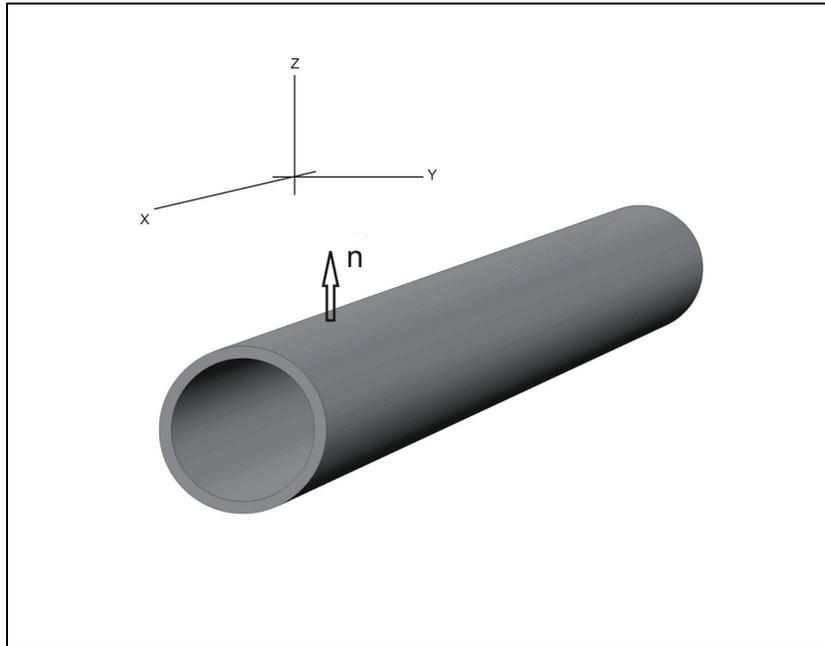


Figura 2. 2. Tubo rígido de sección transversal circular.

En la ecuación (2- 3) se muestra que el comportamiento en la dirección de x será igual que en el caso rectangular, y también habrá ondas moviéndose en las direcciones transversales; una en la dirección del ángulo φ , y otra en la dirección radial, cuya forma corresponde a una función de Bessel de primer tipo (soluciones finitas en el origen), de orden m .

2.2 ONDAS PLANAS EN DUCTOS

Para un tubo circular, si en uno de sus extremos colocamos un pistón que se mueva con desplazamientos de pequeña amplitud, y su velocidad sea mucho menor a la velocidad del sonido en el fluido en su interior, es decir, $u_x/c \ll 1$, se obtendrán únicamente ondas planas dentro del tubo. Como condición de frontera es necesario que la velocidad normal a las paredes del tubo sea nula, es decir, que el tubo sea de paredes suficientemente rígidas,

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad (2- 4)$$

donde ϕ es el potencial de velocidad y n indica la dirección normal a las paredes del tubo, como se ilustra con el vector de la Figura 2. 2. Además, la velocidad de la superficie del pistón nos da la otra condición de frontera,

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{dx_0(t)}{dt}, \quad \text{en } x = x_0(t). \quad (2- 5)$$

Si también se considera que no hay ondas reflejadas de vuelta al pistón (puesto que el tubo es infinito), entonces se tiene también la condición de radiación, por lo que las soluciones para la

ecuación (2- 5) pueden ser de la forma $\phi = f(x - ct)$, donde c es la velocidad local del sonido. Específicamente, la solución sería

$$\phi = -cx_0 \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (2- 6)$$

De esta forma se tienen frentes de onda planos propagándose a lo largo del tubo. El flujo volumétrico en cualquier punto del tubo está dado por $Q = Au$, donde el área de sección transversal A , es constante. Puesto que para una onda plana: $\bar{p} = \rho_0 c \bar{u}$, se tiene entonces que

$$Q = \frac{A \bar{p}}{\rho_0 c} \quad (2- 7)$$

donde,

$$Y = \frac{A}{\rho_0 c} \quad y \quad Z = \frac{\rho_0 c}{A}, \quad (2- 8)$$

representan la admitancia e impedancia característica del tubo respectivamente, siendo estas, propiedades del fluido y del tubo únicamente, por lo que resultan convenientes para describir el sistema.

En la práctica no siempre se puede tener una excitación con un pistón ideal, como el mencionado al inicio de esta sección; en su lugar (y es el caso de este trabajo), generalmente se tiene un altavoz, cuyo comportamiento y características son sólo aproximados al del pistón. Existen entonces, ciertas condiciones prácticas necesarias para garantizar que las ondas sean planas dentro de un ducto y que están relacionadas con las dimensiones físicas del ducto en comparación con las longitudes de onda de excitación. Las condiciones mencionadas, determinarán el ancho de banda donde, en la práctica, el análisis mencionado es válido.

Según lo expuesto por Rayleigh en este sentido^[2], la longitud de la onda de excitación y el diámetro interno del tubo deben cumplir con la siguiente relación:

$$\lambda \geq 1.706d \quad (2- 9)$$

A partir de esta expresión podemos obtener, la frecuencia límite superior:

$$f \leq \frac{0.586c}{d} \quad (2- 10)$$

Por otro lado, se sabe^[3] que de presentarse variaciones en el diámetro del tubo, éstas producen, sobre la transmisión de la onda plana, un efecto similar al que tendría un cambio en la impedancia característica del medio. Es decir, si el diámetro del tubo cambia abruptamente, una porción de la onda es reflejada. Ya sea que el cambio sea de un diámetro mayor a uno menor, o viceversa, el frente de onda ya no es plano (por efectos de difracción), en mayor o menor medida dependiendo de su longitud de onda. A una distancia relativamente corta de

dicha discontinuidad en la sección transversal del tubo, la onda vuelve a ser plana, por lo que según la aplicación y la magnitud de la variación, este efecto podría ser despreciado.

2.3 IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA

Es la razón compleja de la presión entre la velocidad volumétrica a una frecuencia dada, en un sistema acústico o en una línea de transmisión. Equivalentemente, la impedancia acústica se puede ver como una función de transferencia donde la velocidad es la entrada y la presión es la salida^[12].

Cuando es de interés la medición de la impedancia en una dirección específica, se puede determinar la *impedancia acústica específica*, que es la relación entre la presión acústica local y la velocidad de partícula en el mismo punto y en una dirección dada (generalmente normal a la superficie de incidencia). En el caso de los tubos de impedancia, se refiere a la impedancia que la superficie de un material poroso (muestra) presenta al campo sonoro, por lo que sus unidadesⁱⁱⁱ no se refieren a una velocidad volumétrica, sino a las componentes de la velocidad en la dirección normal a la superficie de incidencia del material.

2.4 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

Cuando se tienen una onda incidente $i(t)$ y una onda reflejada $r(t)$ sobre una superficie de impedancia acústica específica finita, a un ángulo específico, el coeficiente de reflexión $\mathfrak{R}(\theta_i, \omega)$ (donde θ_i es el ángulo de incidencia), se define de forma que $\tilde{r} = \mathfrak{R}(\theta_i, \omega)\tilde{i}$, siendo \tilde{r} e \tilde{i} las amplitudes complejas de la onda reflejada y la onda incidente, respectivamente, para una cierta frecuencia.

Si $i(t)$ y $r(t)$ son formas de onda transitorias, el coeficiente $\mathfrak{R}(\theta_i, \omega)$ es el cociente de las transformadas de Fourier de dichas funciones.

Si suponemos que la reflexión de la onda ocurre en un solo plano xy , y que la dirección de la velocidad es “ $-y$ ”, las expresiones para la presión y la velocidad de la onda incidente se pueden escribir, respectivamente, de la siguiente manera^[11],

$$\tilde{p} = \tilde{i} e^{ix \frac{\omega \sin \theta_i}{c}} \left[e^{-iy \frac{\omega \cos \theta_i}{c}} + \mathfrak{R}(\theta_i, \omega) e^{iy \frac{\omega \cos \theta_i}{c}} \right] \quad (2-11)$$

$$\tilde{u} = \left(\frac{\cos \theta_i}{\rho c} \right) \tilde{i} e^{ix \frac{\omega \sin \theta_i}{c}} \left[-e^{-iy \frac{\omega \cos \theta_i}{c}} + \mathfrak{R}(\theta_i, \omega) e^{iy \frac{\omega \cos \theta_i}{c}} \right] \quad (2-12)$$

ⁱⁱⁱ $[kg/(m^2 \cdot s)]$ o bien, $[(Pa \cdot s)/m]$

Puesto que se tiene la condición de impedancia compleja finita $Z(\omega)$, y combinando las ecuaciones (2- 11) y (2- 12) tenemos,

$$\mathfrak{R}(\theta_I, \omega) = \frac{Z(\omega)\cos\theta_I - \rho c}{Z(\omega)\cos\theta_I + \rho c} \quad (2- 13)$$

De forma que cuando el ángulo de incidencia es normal a la superficie, como es el caso de los tubos de impedancia ($\theta_I = 0$), se puede tener una expresión simplificada para el coeficiente de reflexión complejo que no depende del ángulo de incidencia^{iv},

$$\mathfrak{R}(\omega) = \frac{Z(\omega) - \rho c}{Z(\omega) + \rho c} \quad (2- 14)$$

2.5 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

Partiendo del análisis de la sección 2.4, se puede definir el coeficiente de absorción sonora. Si tomamos en cuenta el flujo de energía acústica incidiendo sobre la superficie, se observa que este es igual a la energía acústica reflejada mas la energía absorbida por el material; multiplicando las ecuaciones (2- 11) y (2- 12) para calcular la energía promedio se tiene que,

$$(pu)_{prom} = \frac{1}{2} \frac{\cos\theta_I}{\rho c} |i|^2 (1 - |\mathfrak{R}(\omega)|^2) \quad (2- 15)$$

donde se ve claramente que para que exista absorción, $|\mathfrak{R}|$ debe ser un valor entre cero y uno, obviamente, bajo el supuesto de una superficie de incidencia pasiva. Al factor $(1 - |\mathfrak{R}(\omega)|^2)$ se le conoce como coeficiente de absorción,

$$\alpha(\theta_I, \omega) = 1 - |\mathfrak{R}(\omega)|^2, \quad (2- 16)$$

que es una cantidad real.

2.6 MATERIALES ABSORBENTES

Son materiales cuyo coeficiente de absorción a una frecuencia dada es mayor a cero. Existen diferentes procesos físicos de disipación de energía acústica; cada material debe sus propiedades de absorción a uno o más de estos procesos siendo, por lo general, alguno de ellos dominante sobre los demás. Según sus características y propiedades físicas, los materiales absorbentes se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Absorbentes porosos
- Absorbentes por resonancia de Helmholtz
- Absorbentes de membrana

^{iv} Las expresiones son casi equivalentes, ya que la impedancia acústica efectiva es casi independiente del ángulo de incidencia para materiales gruesos y porosos con respaldo de aire (Morse et al.).

- Absorbentes multicapa
- Absorbentes de panel perforado

Cada material tiene una curva de absorción característica en frecuencia.

2.7 AISLAMIENTO SONORO

Algunos materiales, fungiendo como partición en un espacio o medio donde se propagan ondas sonoras, poseen una cierta capacidad para evitar que la energía sonora pase a través de ellos. Dependiendo de la forma en que sea considerado, se puede tener aislamiento en incidencia aleatoria, o en incidencia normal, siendo este último el de mayor interés para este trabajo.

2.7.1 AISLAMIENTO SONORO EN INCIDENCIA NORMAL

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el caso de incidencia normal sólo difiere del caso oblicuo en que la dirección de propagación de las ondas incidentes es perpendicular a la superficie de incidencia. A lo largo de este trabajo de tesis, se analizará únicamente el caso en el que las ondas incidentes sean planas, y suponiendo que el material a través del cual van a propagarse tiene propiedades homogéneas a lo largo de una dirección paralela a sus caras. Esta última condición se requiere para obtener también una onda plana a la salida del material, una vez que este ha sido atravesado. En caso contrario, la medición de la presión sonora dentro del tubo (suponiendo que el sensor está fijo en una sola posición), se hace errática.

2.8 TRANSMISIÓN SONORA

Las características de un muro construido entre dos cuartos, por lo general, se expresa en términos del índice de pérdida de transmisión, en decibeles. Éste parámetro depende a su vez del coeficiente de transmisión de potencia sonora. Cualquiera de estos dos parámetros puede determinarse a través de un arreglo experimental que consiste en la construcción de dos recintos separados por un muro hecho del material que se desea caracterizar (cámara de transmisión). Se coloca una fuente de sonido en uno de los cuartos y el sonido transmitido se mide en el segundo cuarto. Los pormenores de la realización de estas pruebas están normalizadas^[33, 34]. A continuación se expone la teoría subyacente a los dos de los parámetros más importantes en la caracterización del aislamiento sonoro; en secciones subsecuentes, se explicará la manera de obtenerlos experimentalmente con un tubo de transmisión, según diversos autores.

2.8.1 COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA SONORA

Cuando una onda sonora incide sobre algún material que obstaculiza su camino, la fracción de potencia sonora incidente que se transmite hacia el otro lado de la barrera se conoce como *coeficiente de transmisión de potencia sonora* (τ) (SOUND POWER TRANSMISSION COEFFICIENT). Si la onda incidente es una onda plana de una cierta frecuencia ω y se toma en cuenta su ángulo de incidencia θ_i , entonces el coeficiente $\tau(\theta_i, \omega)$ se puede calcular como

$$\tau(\theta_i, \omega) = \frac{(p_T^2)_{prom}}{(p_I^2)_{prom}} \quad (2-17)$$

donde el numerador es la potencia transmitida promedio y el denominador representa la potencia incidente promedio, ambas dependientes de la frecuencia y ángulo de incidencia^[11].

2.8.2 PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN

La *pérdida de transmisión* (R_{TL}) (TRANSMISSION LOSS), se define en general como una función del coeficiente de transmisión de potencia τ , y es

$$R_{TL} = 10 \log(1/\tau) [dB] \quad (2-18)$$

Para el caso de una onda plana de frecuencia constante, la *pérdida de transmisión de una onda plana* se puede calcular en función de los niveles de presión incidente y transmitido:

$$R_{TL} = L_{pl} - L_{pT} [dB] \quad (2-19)$$

En incidencia normal, este coeficiente suele denotarse como $nSTL$, por sus siglas en inglés.

2.9 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS CON EL TUBO DE IMPEDANCIAS

Los tubos de impedancias (Figura 2. 3) son dispositivos comúnmente utilizados en la medición de la impedancia acústica específica de materiales y otros parámetros de interés en el área de acústica, tales como el coeficiente de reflexión, índice de pérdida de transmisión y coeficiente de absorción, entre otros; todos ellos en incidencia normal, lo cual representa una caracterización un tanto limitada. Sin embargo, existen varias ventajas prácticas, suficientes para ser considerado como un dispositivo de relevancia en la instrumentación acústica. En este sentido, es de suma utilidad contar con un método que requiera menos material de muestra que los métodos que utilizan grandes cámaras. Es, por ejemplo, deseable tener la posibilidad de medir las propiedades de un material al cual se le cambian gradualmente las proporciones de los componentes (sustancias) utilizados en su elaboración, con el fin de registrar el efecto que esto tiene en su comportamiento^[8].

Los tubos de impedancias pueden utilizarse de diferentes maneras, estos métodos implican en términos generales, la exposición de la muestra a un campo sonoro conocido para medir los efectos que aquella tiene sobre este campo. Para la obtención de los parámetros mencionados, existen normas^[4, 5, 6, 7] que delimitan las condiciones acústicas y la instrumentación y montaje necesarios para lograr una medición apropiada^v. Agrupándolos de forma general, estos métodos son:

^v Para el caso particular del índice de pérdida de transmisión, la elaboración de la norma ASTM E2611 – 09 inició en el año 2004 y fue aprobada en 2009 a la par que fue realizado este trabajo.

- Método de onda estacionaria
- Método de descomposición de onda
- Método de matriz de transferencia
- Métodos híbridos

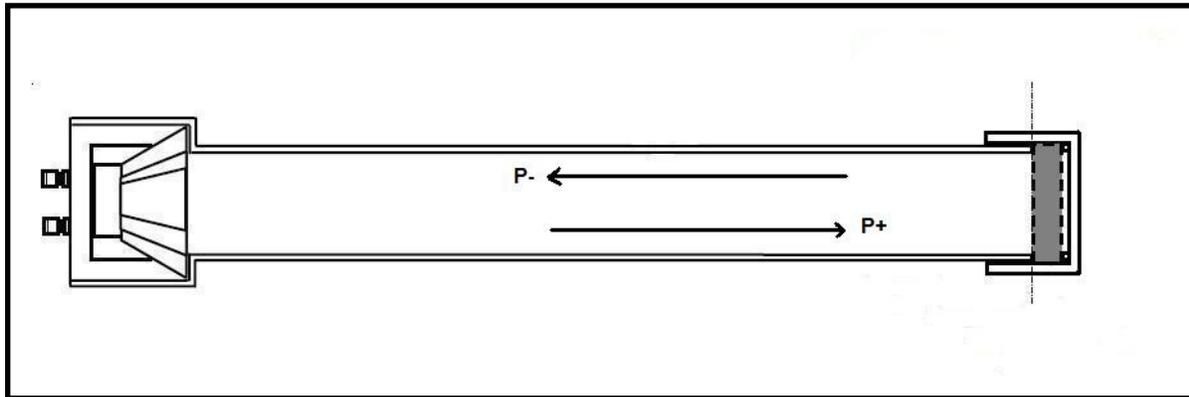


Figura 2. 3. Ondas incidente y reflejada en un tubo de impedancias configurado para medir impedancia y absorción.

2.10 MÉTODO DE ONDA ESTACIONARIA

Con este método se pueden determinar el coeficiente de absorción sonora de materiales en incidencia normal, así como la impedancia acústica, y la admitancia. Estos valores se determinan a través de la evaluación del patrón de onda estacionaria generado por una onda plana.

El objeto de prueba es montado en un extremo del tubo, mientras que la onda plana sinusoidal incidente en el mismo es generada por un altavoz colocado en el extremo opuesto del mismo tubo. La superposición de la onda incidente con la onda reflejada en el objeto de prueba, produce un patrón de onda estacionaria en el tubo. Con ayuda de una sonda móvil conectada a un micrófono, se realiza la cuantificación de los niveles de presión máxima y mínima ($|p_{x\text{mín}}|$ y $|p_{x\text{máx}}|$), que son suficientes para determinar el coeficiente de absorción.

$$|r| = \frac{|p_{\text{máx}}|/|p_{\text{mín}}| - 1}{1 + |p_{\text{máx}}|/|p_{\text{mín}}|} \quad (2-20)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2-21)$$

Si además, se mide la distancia que hay del mínimo n a la superficie de la muestra ($x_{\text{mín},n}$), y se conoce la longitud de onda (λ_0), es posible determinar el coeficiente de reflexión complejo,

$$r = |r|e^{j\theta}, \quad \text{donde: } \theta = \pi \left(\frac{4x_{\text{mín.},n}}{\lambda_0} - 2n + 1 \right) \quad (2-22)$$

y subsecuentemente la impedancia o la admitancia del material:

$$Z = Z_0 \frac{1+r}{1-r} \quad (2-23)$$

Una de las suposiciones que hace este método para fundamentar su validez, es que las ondas se propagan dentro del tubo prácticamente sin atenuación viscosa (pues dentro del tubo sólo caben unas cuantas longitudes de onda), y con una mínima atenuación en las paredes. En caso de requerir una medición muy precisa, en el anexo A de la norma ISO 10534-1:2001^[4] se proporcionan los métodos de obtención de las correcciones necesarias.

2.11 MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN DE ONDA

Para llevar a cabo un análisis por el método de descomposición de onda^[9], se necesita contar con el tubo de impedancias descrito en el apartado anterior, con la diferencia de que en lugar de tener un “micrófono sonda”, se instalan dos micrófonos fijos a lo largo del tubo con una cierta separación entre ellos que depende del intervalo en frecuencia de trabajo para el cual se haya diseñado el dispositivo.

Este método considera que no existe flujo dentro del tubo y también hace la suposición de que no hay atenuación a lo largo del mismo. Para este análisis se establece el campo sonoro dentro del tubo como una onda incidente y una onda reflejada

$$p(x,t) = Ae^{j(\omega t + kx)} + Be^{j(\omega t - kx)} \quad (2-24)$$

donde $p(x,t)$ representa la superposición de las ondas incidente y reflejada, mientras que A y B son sus respectivas amplitudes. La transformada de Fourier de la expresión (2-24) es

$$P(x,\omega) = P_+(\omega)e^{-jkx} + P_-(\omega)e^{jkx} \quad (2-25)$$

Entonces las expresiones para este campo sonoro sensado en $x=0$ y en $x=s$, correspondientes a dos micrófonos ubicados a lo largo del tubo de impedancias separados una distancia s , serían

$$\begin{aligned} P_1(\omega) &= P_+(\omega) + P_-(\omega), \\ P_2(\omega) &= P_+(\omega)e^{-jks} + P_-(\omega)e^{jks} \end{aligned} \quad (2-26)$$

En términos básicos, se establece que el coeficiente de reflexión de la muestra corresponde a la relación entre la presión de la onda reflejada entre la onda incidente

$$R(\omega) = \frac{P_-(\omega)}{P_+(\omega)} \quad (2-27)$$

y dado que el tubo es un sistema acústico pasivo, además de hacer la consideración de que la magnitud de la presión se encuentra dentro de un intervalo en el cual la relación entre P_+ y P_- es lineal, se puede establecer una función de transferencia entre las presiones sensadas por cada micrófono

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2-28)$$

Finalmente, haciendo simultáneas las ecuaciones (2-26), (2-27) y (2-28) se puede llegar a la siguiente expresión para el coeficiente de reflexión:

$$R(\omega) = \frac{H_{12}(\omega) - e^{(-jks)}}{e^{(jks)} - H_{12}(\omega)} \quad (2-29)$$

que, sustituyendo en (2-21), permite obtener el coeficiente de absorción de la muestra.

2.12 MÉTODO DE MATRIZ DE TRANSFERENCIA

Este método de análisis^[10] se explicará por medio de un tubo de impedancias modificado para medir transmisión sonora (Figura 2.4). En este dispositivo el tubo consta de dos secciones, una antes y otra después de la muestra. Las mediciones necesarias en este método se llevan a cabo con 4 micrófonos (dos a cada lado de la muestra).

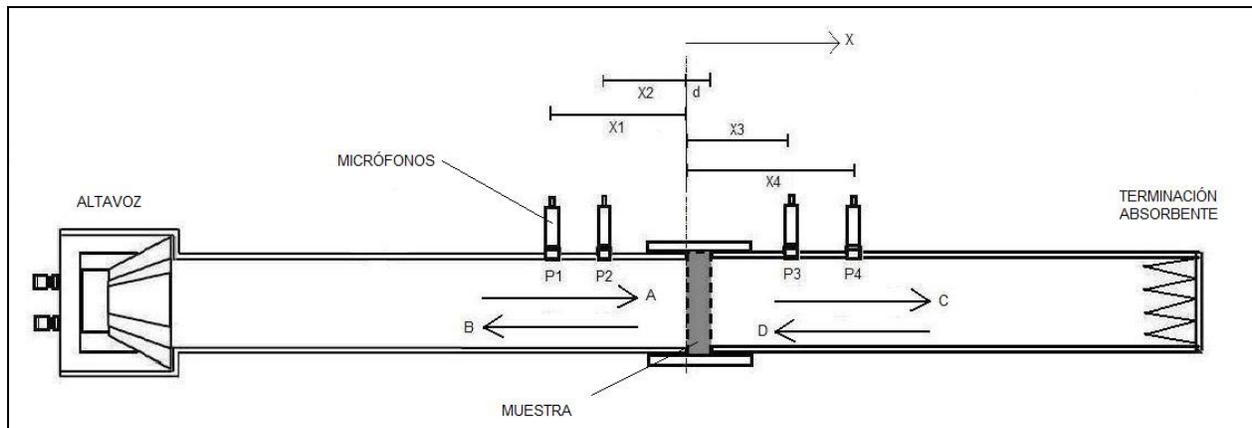


Figura 2.4. Tubo de impedancias modificado para medir aislamiento sonoro. Ondas viajando en ambas secciones del tubo. “A”, es la onda incidente en la muestra; “B”, representa la porción de energía de A reflejada en la muestra; “C”, es la onda transmitida; “D”, es la energía que no logró absorber la terminación del tubo.

De acuerdo a la Figura 2.4, las funciones de transferencia entre la señal suministrada al altavoz y la presión sonora en las posiciones x_1 a x_4 , pueden escribirse como

$$\begin{aligned}
P_1 &= (Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1})e^{j\omega t} \\
P_2 &= (Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2})e^{j\omega t} \\
P_3 &= (Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3})e^{j\omega t} \\
P_4 &= (Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4})e^{j\omega t}
\end{aligned} \tag{2-30}$$

Estas presiones contienen varias superposiciones de ondas planas a distintas frecuencias que van y vienen dentro del tubo. Si resolvemos el sistema para las amplitudes complejas A, B, C y D

$$\begin{aligned}
A &= \frac{j(P_1e^{jkx_2} - P_2e^{jkx_1})}{2\text{sen}[k(x_1 - x_2)]} \\
B &= \frac{j(P_2e^{-jkx_1} - P_1e^{-jkx_2})}{2\text{sen}[k(x_1 - x_2)]} \\
C &= \frac{j(P_3e^{jkx_4} - P_4e^{jkx_3})}{2\text{sen}[k(x_3 - x_4)]} \\
D &= \frac{j(P_4e^{-jkx_3} - P_3e^{-jkx_4})}{2\text{sen}[k(x_3 - x_4)]}
\end{aligned} \tag{2-31}$$

La equivalencia de las amplitudes B, C y D, en términos de A y los coeficientes de reflexión y transmisión de la muestra y la terminación, serían:

$$\begin{aligned}
B &= AR_1 \\
C &= A\tau \\
D &= A\tau R_2
\end{aligned} \tag{2-32}$$

donde, R_1 es el coeficiente de reflexión de la muestra, τ es el coeficiente de transmisión de la muestra y R_2 es el coeficiente de reflexión de la terminación del tubo. Estos tres parámetros son cantidades complejas.

Por otra parte, una matriz de transferencia funciona como una red de dos puertos y cuatro polos que relaciona la presión sonora (P) con las velocidades normales (V) a ambas caras de la muestra. Así, considerando que la posición de las caras de la muestra se encuentra en $x = 0$ y en $x = d$, podemos escribir el sistema en forma matricial

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d} \tag{2-33}$$

Los elementos (T_{ij}) de la matriz de dimensiones 2×2 de la expresión (2-33) están directamente relacionados con las propiedades físicas de la muestra, ya que de ellos depende

la manera en que se modifican la presión y la velocidad después de que las ondas acústicas la atraviesan ($x = d$).

Las presiones y velocidades de la ecuación (2- 33) se pueden expresar en términos de las amplitudes complejas, es decir, se expresa indirectamente en términos de las presiones medidas por los micrófonos

$$\begin{aligned}
 P_0 &= P|_{x=0} = A + B \\
 V_0 &= V|_{x=0} = \frac{A - B}{\rho_0 c} \\
 P_d &= P|_{x=d} = Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\
 V_d &= V|_{x=d} = \frac{Ce^{-jkd} - De^{jkd}}{\rho_0 c}
 \end{aligned} \tag{2- 34}$$

A partir de este punto, hay dos maneras de resolver el sistema de ecuaciones. Una posibilidad consiste en utilizar dos terminaciones diferentes para la segunda sección del tubo, a fin de tener 2 ecuaciones válidas adicionales para la resolución de las cuatro incógnitas (T_{11} , T_{12} , T_{21} y T_{22}). La otra posibilidad para obtener la cantidad suficiente de ecuaciones, es hacer la suposición de que hay simetría y reciprocidad (o bidireccionalidad) en el sistema (capa homogénea de material poroso); las implicaciones matemáticas a las que esto conlleva se explican a continuación.

Si para la expresión (2- 33) se considera un intercambio de posición entre la fuente y el receptor, es decir, el origen se sitúa en la parte posterior de la muestra, se tiene el sistema:

$$\begin{bmatrix} P' \\ V' \end{bmatrix}_{x=-d} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P' \\ V' \end{bmatrix}_{x=0} \tag{2- 35}$$

donde ahora,

$$\begin{aligned}
 P'_d &= P|_{x=-d} = Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\
 V'_d &= V|_{x=-d} = \frac{-Ce^{-jkd} + De^{jkd}}{\rho_0 c} \\
 P'_0 &= P|_{x=0} = A + B \\
 V'_0 &= V|_{x=0} = \frac{B - A}{\rho_0 c}
 \end{aligned} \tag{2- 36}$$

y R_1 y τ se cambian, para este caso, por R'_1 y τ' , que son ahora el coeficiente de reflexión que presenta la cara posterior de la muestra hacia la nueva posición de la fuente, y el coeficiente de transmisión resultante del intercambio entre fuente y receptor, respectivamente. Si se sustituyen las ecuaciones (2- 34) y (2- 36) en (2- 33) y (2- 35), y las amplitudes complejas

A, B, C y D se expresan en términos de R_1, R'_1, τ, τ' y R_2 , es posible resolver el sistema para éstos últimos parámetros, en términos de los elementos T_{ij} , de donde es fácil demostrar que cuando $R_1 = R'_1$, tal como sucede en una muestra simétrica, se tiene que:

$$T_{11} = T_{22} \quad (2-37)$$

De igual forma, cuando se hace la suposición de que $\tau = \tau'$, el determinante del sistema será igual a uno:

$$T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1 \quad (2-38)$$

Estos resultados, proveen las dos ecuaciones adicionales para poder resolver el sistema de ecuaciones (2-33) para los coeficientes T_{ij} .

Entonces, sustituyendo (2-37) y (2-38) en el sistema (2-33), podemos expresar los elementos de la matriz de transferencia como funciones de la presión y velocidad antes y después de la muestra (2-34)

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{P_d V_d + P_0 V_0}{P_0 V_d + P_d V_0} \\ T_{12} &= \frac{P_0^2 - P_d^2}{P_0 V_d + P_d V_0} \\ T_{21} &= \frac{V_0^2 - V_d^2}{P_0 V_d + P_d V_0} \\ T_{22} &= \frac{P_d V_d + P_0 V_0}{P_0 V_d + P_d V_0} \end{aligned} \quad (2-39)$$

A partir de estas expresiones se pueden calcular los parámetros más importantes de la muestra como los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión, el número de onda y la impedancia acústica^[10].

CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES Y MÉTODOS UTILIZADOS

3.1 RESUMEN DE TRABAJOS ANTERIORES

La medición experimental del coeficiente de transmisión con tubo de impedancias se ha estudiado fuertemente en los últimos años. Algunos autores, al igual que en este trabajo, construyeron su propio prototipo de acuerdo a sus intereses o necesidades, mientras que otros prefirieron utilizar el tubo comercializado por B&K (Mod. 4206). En ambos casos, el objetivo es encontrar la manera más precisa de calcular el coeficiente de transmisión, sin comprometer la variedad de materiales que se pueden caracterizar.

Entre los trabajos más importantes que emplean el método de matriz de transferencia, están el de Lung y Doige^[18], que lleva a cabo dos mediciones con dos condiciones acústicas diferentes en la terminación del tubo, y el de Munjal y Doige^[19], que también maneja dos mediciones, pero en este caso, con dos localizaciones distintas para la fuente. Ambos métodos utilizan dos micrófonos antes de la muestra, y dos después de la misma. Estos procedimientos son idénticos en sus resultados desde el punto de vista teórico, llegando sus desarrollos al valor exacto del coeficiente de transmisión en incidencia normal. Experimentalmente, asumen como cierta la hipótesis de bidireccionalidad de la transmisión del sonido (más tarde demostrada por Allard, *et al.*^[20]). Este tipo de consideraciones aparecen también en el trabajo realizado por B. H. Song y S. Bolton^[10], quienes basándose en las observaciones hechas por Pierce^[11], sobre la teoría de matrices de transferencia aplicadas a elementos acústicos, desarrollaron un método para obtener el coeficiente de transmisión (τ) con una sola medición, es decir, con una sola terminación y una sola posición de la fuente. Además de la bidireccionalidad, Song y Bolton consideran sólo muestras simétricas.

Dentro de los trabajos que emplean el método de descomposición de onda, uno de los primeros en el área, es el de A. F. Seybert y D. F. Ross^[21]. En su experimento, utilizan dos micrófonos antes de la muestra, y solamente uno después. Seybert y Ross hacen la suposición de que la terminación que utilizan es completamente absorbente, por lo que la descomposición de las señales sensadas en A (onda incidente) y C (onda transmitida), se simplifica convenientemente para así obtener τ simplemente como el cociente de C y A. Evidentemente, la construcción de una terminación completamente absorbente no es fácil, ya que requiere de extensiones del tubo muy largas ($\rightarrow \infty$) y materiales absorbentes eficaces, y aún así es posible que se presenten problemas en bajas frecuencias. Dada esta imposibilidad práctica, no es recomendable emular esta forma de calcular el coeficiente de transmisión, pues siempre se tendrán componentes reflejadas en la terminación y por tanto, error en el cálculo efectuado.

J. Y. Chung y D. A. Blaser^[22, 23], propusieron que al considerar una primera reflexión en la terminación del tubo (siendo ésta, casi completamente absorbente) dentro del análisis matemático, y continuar calculando τ con la misma expresión que Seybert y Ross, se resolvería este problema. Sin embargo, esto no es suficiente pues la onda C continúa siendo una composición de todas las reflexiones que existan en la segunda sección del tubo en dirección a la terminación, y no sólo de la primera. Es decir, mientras no se resuelva el problema de no tener físicamente una terminación anecoica, esta forma de obtener el parámetro τ , siempre será únicamente una mera aproximación.

En el artículo publicado por P. Bonfiglio y F. Pompoli^[26], se cuenta con el ejemplo de un híbrido entre el método de descomposición de onda y el método de matriz de transferencia, donde nuevamente sólo se necesita una medición. Este método necesita de una terminación relativamente absorbente para su correcto funcionamiento, y obtiene resultados similares a los del método de matriz de transferencia con dos terminaciones. A diferencia de los métodos de descomposición de onda, Bonfiglio y Pompoli incorporan a sus ecuaciones el defasamiento que sufre la onda al pasar a través de la muestra.

Finalmente, la publicación de Y. Salissou y R. Panneton^[15] expone una formulación que utiliza únicamente la descomposición de onda, con resultados presumiblemente exactos, pues al comparar con resultados de otros autores, sus gráficas coinciden, e inclusive, presentan un perfil con menos oscilaciones. Así, aunado a los métodos de matriz de transferencia con dos terminaciones o dos fuentes, su trabajo complementa la investigación sobre la obtención del coeficiente de transmisión en incidencia normal con el tubo de transmisión, al aportar un método exacto que ocupa la descomposición de onda. En la sección 3.3 se revisa exhaustivamente la teoría en la cual se basa este método, y posteriormente, las pruebas realizadas con el mismo.

Dentro del trabajo realizado para esta tesis, también se implementó un método similar a los mencionados, basado en la descomposición de onda, y con una aportación original en su formulación. Éste método, que puede caracterizar materiales porosos y simétricos de forma relativamente sencilla, también permite comparar simultáneamente sus resultados con los que se obtienen por otras formulaciones utilizando los mismos datos adquiridos y sin necesidad de alterar el procedimiento de medición.

3.2 DESARROLLO DE UNA NUEVA FORMULACIÓN POR DESCOMPOSICIÓN DE ONDA

Las amplitudes complejas de las ondas planas viajeras en ambas direcciones dentro de un tubo de transmisión se pueden expresar según las ecuaciones (2- 31), de acuerdo a las referencias que marca la Figura 2. 4. Estas amplitudes están expresadas en función de las presiones sensadas por los 4 micrófonos.

Se han propuesto varios modelos para obtener el coeficiente de transmisión (τ), por ejemplo, Pompoli^[26] calcula la respuesta impulso con funciones chirp; Bolton^[10], mide la función de transferencia entre cada micrófono y la señal de prueba con que se alimenta al altavoz. En el desarrollo de este trabajo se propuso obtener únicamente las funciones de transferencia entre los micrófonos del dispositivo. Para lo cual primero se deben normalizar todas las presiones con respecto a la presión de uno de los micrófonos, por ejemplo, la presión sensada por el micrófono 1 (P_1), dividiendo y multiplicando el numerador de las ecuaciones (2- 31) por esta presión.

$$\begin{aligned}
A &= \frac{j \left(e^{jkx_2} - \frac{P_2}{P_1} e^{jkx_1} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_1 - x_2)} P_1 \\
B &= \frac{j \left(\frac{P_2}{P_1} e^{-jkx_1} - e^{-jkx_2} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_1 - x_2)} P_1 \\
C &= \frac{j \left(\frac{P_3}{P_1} e^{jkx_4} - \frac{P_4}{P_1} e^{jkx_3} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_3 - x_4)} P_1 \\
D &= \frac{j \left(\frac{P_4}{P_1} e^{-jkx_3} - \frac{P_3}{P_1} e^{-jkx_4} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_3 - x_4)} P_1
\end{aligned} \tag{3-1}$$

Se tienen de esta manera tres funciones de transferencia dentro de los coeficientes anteriores.

Sabemos que la función de transferencia entre dos señales de entrada/salida x, y se puede obtener por medio de

$$H_{.xy} = \frac{P_{.xy}}{P_{.xx}} \tag{3-2}$$

Aplicando este concepto a la señal de cada micrófono, podemos obtener las funciones de transferencia referidas al micrófono 1:

$$H_{12} = \frac{P_{21}}{P_{11}} \quad H_{13} = \frac{P_{31}}{P_{11}} \quad H_{14} = \frac{P_{41}}{P_{11}} \tag{3-3}$$

De forma que podemos reescribir las amplitudes (3-1) como:

$$\begin{aligned}
A &= \frac{j \left(e^{jkx_2} - H_{12} e^{jkx_1} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_1 - x_2)} P_1 \\
B &= \frac{j \left(H_{12} e^{-jkx_1} - e^{-jkx_2} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_1 - x_2)} P_1 \\
C &= \frac{j \left(H_{13} e^{jkx_4} - H_{14} e^{jkx_3} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_3 - x_4)} P_1 \\
D &= \frac{j \left(H_{14} e^{-jkx_3} - H_{13} e^{-jkx_4} \right)}{2 \operatorname{senk}(x_3 - x_4)} P_1
\end{aligned} \tag{3-4}$$

Y simplificando la notación:

$$\begin{aligned}
 A &= a_1 - a_2 H_{12} \\
 B &= b_1 H_{12} - b_2 \\
 C &= c_1 H_{13} - c_2 H_{14} \\
 D &= d_1 H_{14} - d_2 H_{13}
 \end{aligned}
 \tag{3-5}$$

Esta forma de expresar las amplitudes complejas de las ondas, tiene la finalidad de utilizar única y simultáneamente los 4 canales de la tarjeta de adquisición utilizada, en lugar de requerir un dispositivo con más canales por la necesidad de incluir en ellos la adquisición de la señal de prueba, por ejemplo. Otra de las ventajas de calcular las funciones de transferencia de esta forma, es que la fuente de excitación queda fuera de los cálculos, evitando los errores debidos a no linealidades que se pudieran presentar en este punto de la cadena de medición.

Ahora bien, recordando que de acuerdo a la definición más simple, el coeficiente de transmisión es el cociente entre la energía transmitida al otro lado de la muestra y la energía incidente en la misma (C/A), para lograr medir únicamente la energía debida a las ondas A y C, sería necesario que el tubo contara con una terminación completamente absorbente. Ya que esto no es posible para todo el ancho de banda útil del dispositivo, las ondas reflejadas en la terminación, y que posteriormente son transmitidas de vuelta a la primera sección del tubo, deben ser tomadas en cuenta dentro del cálculo del coeficiente de transmisión.

Definiremos ahora B^{\sim} y C^{\sim} , que representan la onda reflejada en la muestra y la onda transmitida a la segunda sección del tubo, respectivamente, pero que a diferencia de B y C, contienen el efecto de la onda D reflejada en la terminación del tubo y a su vez transmitida de vuelta a la primer sección ($D \cdot \tau$). Parte de la energía de D también es reflejada por la muestra (cuyo coeficiente de reflexión denominaremos como R_1) y queda confinada en la segunda sección ($D \cdot R_1$). Por lo tanto, B^{\sim} se compone de la B original en dirección al altavoz, más la componente D reflejada en la terminación y ponderada por el coeficiente τ al atravesar la muestra, también en dirección a la fuente

$$B^{\sim} = B + D\tau \tag{3-6}$$

C^{\sim} sería en términos generales la onda C que atravesó la muestra, más la onda D reflejada sucesivamente en la terminación y luego en la muestra, es decir, ambos términos tienen el mismo sentido de propagación

$$C^{\sim} = C + DR_1 \tag{3-7}$$

Si ahora tomamos en cuenta el desfaseamiento que hay después de atravesar la muestra

$$C^{\sim} e^{-jkd} = C e^{-jkd} + DR_1 e^{jkd} \tag{3-8}$$

donde d es el grosor de la muestra. Por lo tanto, C^{\sim} se puede determinar como

$$\tilde{C} = C + DR_1 e^{2jkd} \quad (3-9)$$

En las expresiones anteriores, los coeficientes R_1 y τ , están dados por

$$R_1 = \frac{\tilde{B}}{A}, \quad (3-10)$$

$$\tau = \frac{\tilde{C}}{A} \quad (3-11)$$

Es fácil demostrar entonces que si B y C se expresan ahora como función de las cantidades con la tilde, es decir, lo que se considerará como la cantidad medida por el arreglo de micrófonos, la expresión final para la obtención de τ estará dada por

$$\tau = \frac{C}{A} - \left[\frac{BD}{A^2} + \frac{CD^2}{A^3} \right] e^{2jkd} \quad (3-12)$$

Las amplitudes que tienen una tilde en esta expresión, son las obtenidas directamente de la medición, lo cual significa que con A y D (sin asterisco) se está haciendo una aproximación, tomándolos en cuenta de la misma forma en que hacen otros autores.

Se supone entonces, que el hecho de utilizar \tilde{B} y \tilde{C} , que contienen la información de dos reflexiones más dentro del campo acústico, aportará una mayor exactitud al cálculo.

3.3 EL MÉTODO DE PANNETON Y SALISSOU

Los problemas para obtener el índice de pérdida de transmisión con el método de descomposición de onda, parecen haber sido resueltos por Y. Salissou y R. Panneton^[15] quienes, utilizando principalmente el análisis matemático de K.M. Ho *et al*^[16], con el que implementaron un método para medir este parámetro de manera exacta. La teoría subyacente a este método se basa en emplear las expresiones de convergencia de las series que representan todas las reflexiones presentes tanto en la primera sección del tubo (Ec.(3- 15)), como en la sección posterior a la muestra (Ec. (3- 18)). En su análisis, también se toma en cuenta el hecho de que el coeficiente de reflexión de la muestra es distinto según el sentido en que se considere, puesto que la condición acústica detrás de la muestra es diferente según el punto de observación; para la primera sección, la muestra tiene detrás un espacio y la terminación del tubo, mientras que para la segunda sección, la muestra tiene un espacio y al fondo se encuentra el altavoz.

La ecuación (3- 13) muestra la expresión a la que tiende la serie obtenida sumando todas las reflexiones que se mueven en dirección a la muestra, dentro de la primera sección del tubo. Complementariamente, la ecuación (3- 14) contiene las reflexiones que van en dirección al altavoz.

$$\begin{aligned}
p_u^a(x) &= ae^{-jk_0x} \left(1 + R_1 R_s e^{2jk_0L_1} + (R_1 R_s)^2 e^{4jk_0L_1} + \dots \right) \\
&= \frac{ae^{-jk_0x}}{1 - R_1 R_s e^{2jk_0L_1}}
\end{aligned} \tag{3-13}$$

$$\begin{aligned}
p_u^b(x) &= aR_1 e^{jk_0x} \left(1 + R_1 R_s e^{2jk_0L_1} + (R_1 R_s)^2 e^{4jk_0L_1} + \dots \right) \\
&= \frac{aR_1 e^{jk_0x}}{1 - R_1 R_s e^{2jk_0L_1}}
\end{aligned} \tag{3-14}$$

Donde los superíndices a y b , indican el sentido de la señal, del altavoz hacia la muestra y de la muestra hacia el altavoz, respectivamente. El coeficiente de reflexión de la muestra visto desde el interior de la primera sección, es R_1 ; el coeficiente de reflexión del altavoz está representado por R_s . L_1 es la distancia entre el altavoz y la muestra. Sumando las dos expresiones anteriores tenemos la presión total en toda la sección del tubo anterior a la muestra (Ec.(3- 15)). Al ser una expresión global para este lado del tubo, los superíndices “ a ” y “ b ” han desaparecido.

$$p_u(x) = \frac{a}{1 - R_1 R_s e^{2jk_0L_1}} \left(e^{-jk_0x} + R_1 e^{jk_0x} \right) \tag{3-15}$$

Si el origen se fija en el punto donde inicia la muestra, entonces la amplitud para $x = 0$, es

$$\frac{a}{\left(1 - R_1 R_s e^{2jk_0L_1} \right)} \tag{3-16}$$

Después de la muestra, la amplitud se atenúa de acuerdo al factor “ τ ”, que es justamente el coeficiente de transmisión

$$\frac{a}{\left(1 - R_1 R_s e^{2jk_0L_1} \right)} \tau \tag{3-17}$$

Si se considera ésta expresión como la fuente para la segunda sección del tubo, entonces la presión después de la muestra sería

$$p_d(x) = \frac{a}{\left(1 - R_1 R_s e^{2jk_0L_1} \right) \left(1 - R_2 R_b e^{2jk_0L_2} \right)} \left(e^{-jk_0x} + R_b e^{jk_0x} \right) \tau \tag{3-18}$$

Donde L_2 es la distancia entre la cara posterior de la muestra y la terminación, R_2 es el coeficiente de reflexión de la muestra “visto” desde la segunda sección del tubo, y R_b el coeficiente de reflexión de la terminación.

Si s_1 , s_2 son la separación entre los micrófonos 1 y 2 y los micrófonos 3 y 4, respectivamente, y x_1 , x_2 la distancia del micrófono 2 a la muestra y del micrófono 3 a la muestra, las presiones totales locales en las posiciones de cada micrófono están dadas por

$$p_1 = \frac{a}{(1 - R_1 R_s e^{2jk_0 L_1})} \left(e^{jk_0(x_1 + s_1)} + R_1 e^{-jk_0(x_1 + s_1)} \right) \quad (3-19)$$

$$p_2 = \frac{a}{(1 - R_1 R_s e^{2jk_0 L_1})} \left(e^{jk_0 x_1} + R_1 e^{-jk_0 x_1} \right) \quad (3-20)$$

$$p_3 = \frac{a}{(1 - R_1 R_s e^{2jk_0 L_1})(1 - R_2 R_b e^{2jk_0 L_2})} \left(e^{-jk_0 x_2} + R_b e^{jk_0 x_2} \right) \tau \quad (3-21)$$

$$p_4 = \frac{a}{(1 - R_1 R_s e^{2jk_0 L_1})(1 - R_2 R_b e^{2jk_0 L_2})} \left(e^{-jk_0(x_2 + s_2)} + R_b e^{jk_0(x_2 + s_2)} \right) \tau \quad (3-22)$$

Y ahora se pueden definir las siguientes funciones de transferencia entre los micrófonos^{vi}:

$$H_{12} = \frac{p_1}{p_2} \quad H_{32} = \frac{p_3}{p_2} \quad H_{43} = \frac{p_4}{p_3} \quad (3-23)$$

Combinando estas expresiones con las presiones (Ec. (3- 19), (3- 20), (3- 21), (3- 22)), se pueden obtener los coeficientes de reflexión de la muestra desde la primera sección (R_1), y el de la primer terminación empleada (R_b)

$$R_1 = \frac{H_{12} - e^{jk_0 s_1}}{e^{-jk_0 s_1} - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (3-24)$$

$$R_b = \frac{H_{43} - e^{-jk_0 s_2}}{e^{jk_0 s_2} - H_{43}} e^{-2jk_0 x_1} \quad (3-25)$$

Al cambiar la terminación del tubo, se pueden volver a calcular todos los parámetros mencionados (ahora indicados con un apóstrofo). Este cambio es necesario para tener ecuaciones adicionales que nos permitan encontrar los valores de R_2 y τ , que aparecen en H'_{32}

$$H'_{32} = \frac{1}{1 - R_2 R_b e^{2jk_0 L_2}} \frac{e^{-jk_0 x_2} + R_b e^{jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + R_1 e^{-jk_0 x_1}} \tau \quad (3-26)$$

El nuevo juego de funciones de transferencia es

^{vi} En este sentido, el método de Panneton y Salissou y el método propuesto en la sección anterior, facilitan de igual forma su implementación al requerir únicamente tres funciones de transferencia.

$$H'_{12} = \frac{p'_1}{p'_2} \quad H'_{32} = \frac{p'_3}{p'_2} \quad H'_{43} = \frac{p'_4}{p'_3} \quad (3-27)$$

Por un lado, se pueden calcular los coeficientes de reflexión de la segunda terminación, y de la muestra (ahora en combinación con la segunda terminación)

$$R'_1 = \frac{H'_{12} - e^{jk_0 s_1}}{e^{-jk_0 s_1} - H'_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (3-28)$$

$$R'_b = \frac{H'_{43} - e^{-jk_0 s_2}}{e^{jk_0 s_2} - H'_{43}} e^{-2jk_0 x_1} \quad (3-29)$$

El valor del coeficiente R_2 permanece inalterado ya que no se cambió la condición acústica de la primera sección del tubo, por lo que ahora se tiene una nueva ecuación que contiene dicho coeficiente

$$H'_{32} = \frac{1}{1 - R_2 R'_b} \frac{e^{-jk_0 x_2} + R'_b e^{jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + R'_1 e^{-jk_0 x_1}} \tau \quad (3-30)$$

Para simplicidad de notación, se utilizarán nuevas variables auxiliares para expresar el coeficiente R_2 de manera abreviada:

$$h = \frac{H'_{32}}{H'_{32}} \quad (3-31)$$

$$r = \frac{e^{-jk_0 x_2} + R'_b e^{jk_0 x_2}}{e^{-jk_0 x_2} + R'_b e^{jk_0 x_2}} \frac{e^{jk_0 x_1} + R'_1 e^{-jk_0 x_1}}{e^{jk_0 x_1} + R'_1 e^{-jk_0 x_1}}$$

$$R_2 = \frac{r - h}{rR'_b - hR'_b} e^{-2jk_0 L_2} \quad (3-32)$$

Y entonces el coeficiente de transmisión queda completamente caracterizado por la siguiente expresión

$$\tau = H'_{32} \left(1 - R_2 R'_b e^{2jk_0 L_2}\right) \frac{e^{jk_0 x_1} + R'_1 e^{-jk_0 x_1}}{e^{-jk_0 x_2} + R'_b e^{jk_0 x_2}} \quad (3-33)$$

El coeficiente de pérdida de transmisión

$$nSTL = -20 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (3-34)$$

En resumen, las diferencias más importantes entre los dos métodos expuestos son que, el primero de ellos, es de implementación más sencilla que el segundo al no necesitar cambios de piezas, y podría ser menos susceptible a error humano por ésta razón. También requiere menos tiempo en cada medición, que es aproximadamente de una sexta parte del tiempo que consume el segundo método (a partir del momento en que se tiene el tubo listo para comenzar la medición de una muestra).

El segundo método resulta, en teoría, más exacto que el primero, al tomar en cuenta todas las reflexiones que contribuyen al campo acústico dentro del tubo. Se puede suponer que, de llevar a cabo una implementación cuidadosa con éste método (condición, que no es tan fácil de lograr, como se verá en las siguientes secciones), resultaría la opción más recomendable.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO

4.1 DISEÑO DEL TUBO

La medición de los parámetros de absorción, impedancia específica y transmisión de sonido, cuenta con normas para el caso de ser efectuadas dentro de una cámara acústica, ya sea reverberante, o de transmisión^{vii}. La obtención de esos parámetros en incidencia normal con el tubo de impedancias, también es capaz de entregar resultados confiables, por lo que en fechas relativamente recientes, se han establecido las normas correspondientes.

Al momento de comenzar el diseño del tubo de transmisión para la medición de la transmisión sonora, la norma para la construcción y uso de este dispositivo (norma ASTM E2611-09)^[7] se encontraba en elaboración^{viii}, por lo que las dimensiones y características de las dos secciones que componen al tubo construido para este fin se basaron en adaptaciones y extensiones hechas a las características del tubo de una sola sección especificado en el estándar ISO 10534:2001^[4, 5]. Esta norma se refiere a la medición de los coeficientes de absorción y reflexión e impedancia específica de materiales porosos con un tubo de impedancias.

Para la medición de absorción, reflexión e impedancia característica, también existe la norma ASTM E1050 – 90^[6] publicada por la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). La razón por la que se eligió la norma ISO 10534:2001 como base de diseño, es porque, teórica y técnicamente hablando, tiene un carácter más general y detallado, aunque también se toman algunos elementos de la norma ASTM. En el apartado 4.1.1 se presenta una revisión de la norma, en los puntos de interés para el diseño del tubo.

4.1.1 NORMA ISO 10534:2001

Este estándar, referente a la obtención del coeficiente de absorción sonora e impedancia en tubos de impedancia, se divide en dos partes:

- ISO 10534-1:2001, para el método de relación de onda estacionaria (micrófono – sonda), y
- ISO 10534-2:2001, para método de función de transferencia (dos micrófonos fijos)

Este último es el que se utilizó como referencia para la determinación de las principales dimensiones y características del prototipo.

En este método de prueba, por medio de una fuente de ruido colocada en un extremo del tubo se generan ondas que se suponen planas en su interior, y la descomposición del campo de interferencias en ondas incidentes y ondas reflejadas en la muestra se obtiene a partir de la medición de las presiones acústicas en dos localizaciones fijas utilizando micrófonos montados en las paredes del tubo, y el posterior cálculo de la función de transferencia acústica compleja. Los parámetros obtenidos de esta forma, cubren únicamente la incidencia normal, aunque en el caso de materiales de *reacción local*^{ix} es posible estimar la absorción en incidencia difusa, a

^{vii} ISO 354:2003, ISO 140-3:1995 e ISO/DIS 15186-1:2000.

^{viii} La norma **ASTM E2611-09** tuvo un periodo de elaboración y diseño de 5 años (2004-2009), y fue publicada en noviembre de 2009 (fecha posterior a la construcción del prototipo de nuestro trabajo).

^{ix} Materiales en los que al aplicar una presión no uniforme en su superficie, la velocidad normal en cualquier punto de la misma depende únicamente de la presión local en ese punto, y no de la presión en cualquier otro lugar.

partir de estos resultados (en el apéndice F de la norma se explica cómo efectuar dicha transformación).

El aparato consiste en un tubo de material rígido con sección transversal uniforme (con una tolerancia dentro de $\pm 0.2\%$ de su diámetro), con paredes no porosas, lisas y sin ranuras o agujeros, exceptuando aquellos donde estarán los micrófonos. El dispositivo debe estar aislado de ruido y vibraciones externos, por lo que las paredes deben ser masivas, con un grosor de mínimo el 5% del diámetro del tubo.

Hay poca claridad en este punto de la norma, pues dependiendo de la densidad del material elegido, el 5% sugerido se vuelve un valor relativo. Para determinar si el grosor y densidad del material elegido es apropiado, se realizaron pruebas de inmunidad contra el ruido exterior, como se verá en la sección 4.5.

La forma de la sección transversal es arbitraria, siendo los más usados el tubo circular y el rectangular. La norma no especifica un tipo de material preferente, sin embargo, da algunas recomendaciones para el caso de que las paredes sean hechas de concreto o madera; la condición general es que sean masivas, rígidas y sin fugas. Por ejemplo, en el caso de la madera, se recomienda recubrir con placas de acero o plomo.

El intervalo de frecuencias de operación tiene límites que dependen de uno o más factores. En bajas frecuencias, el límite inferior ($f_{mín}$ ó $\lambda_{máx}$) depende de la separación s entre los micrófonos (se recomienda que sea mayor al 5% de la longitud de onda mas grande que se desea medir, aunque también está sujeta a la expresión (4- 2) y las capacidades del sistema para sensar con precisión estos valores. Las frecuencias más altas de operación ($f_{máx}$ o $\lambda_{mín}$) dependen de que, de acuerdo al diámetro del tubo d (expresión (4- 1)), se asegure que las ondas sigan siendo planas, además de la restricción que impone la expresión (4- 2), que relaciona la frecuencia máxima con la separación entre los micrófonos.

$$f_{máx} \cdot d < 0.586c \quad (4- 1)$$

$$f_{máx} \cdot s < 0.45c \quad (4- 2)$$

donde c es la velocidad del sonido en el aire. Se encontró que la expresión (4- 1) se basa directamente en la teoría de ondas planas desarrollada por Lord Rayleigh^[2]. Sin embargo, no se encontró ninguna referencia concreta que sustentara la relación (4- 2), por lo cual, se decidió recurrir a una expresión encontrada en el análisis de errores en este tipo de mediciones publicado por H. Bodén y M. Abom^[28], como se verá más adelante.

Por otra parte, a pesar de que la misma norma menciona que $f_{mín}$ depende también de la separación s entre los micrófonos, no proporciona ninguna ecuación donde haya una relación directa entre estas dos cantidades. Únicamente en la sección 1 de la norma (para el método de relación de onda estacionaria), se vincula a $f_{mín}$ con el diámetro (d) y la longitud (L) del tubo

$$L \geq \frac{250}{f_{mín}} + 3d \quad (4- 3)$$

La forma de esta expresión obedece principalmente a la longitud necesaria para medir dos mínimos de presión con el micrófono sonda, necesarios para aplicar el método de onda estacionaria. Esto no aplica estrictamente al método de matriz de transferencia.

Dentro de la segunda sección de la norma, se menciona que el largo del tubo debe ser suficiente para permitir el desarrollo de ondas planas dentro del mismo, de forma que sea posible ubicar los micrófonos en la zona donde se garantiza un campo de ondas planas, que sucede aproximadamente a una distancia de la fuente equivalente a tres veces el diámetro del tubo, suponiendo el uso de un altavoz común.

Puesto que la muestra produce irregularidades en el campo acústico cercano a la misma, se recomiendan las siguientes separaciones entre el micrófono más cercano a la muestra y la superficie expuesta de la misma, de acuerdo al tipo de material a caracterizar y en función del diámetro del tubo:

No estructurado (liso):	½ diámetro
Estructurado semi-lateralmente:	1 diámetro
Fuertemente asimétrico:	2 diámetros

Los micrófonos utilizados deben ser de presión y exactamente del mismo tipo y modelo para disminuir errores por diferencias drásticas en la respuesta en frecuencia de cada uno. Sus dimensiones necesariamente deben ser pequeñas en comparación con la longitud de onda mínima a medir, y más pequeños que el 20% del espaciamiento entre ellos. En cuanto a su montaje, es recomendable que se haga un sello entre el micrófono y la pieza que lo sujeta y mantiene firme, esto para evitar fugas.

El centro acústico del micrófono muy raras veces coincidirá con su centro geométrico, ya que el primero es una función de la frecuencia, por lo que, a fin de minimizar errores, en los apéndices de la norma se hacen recomendaciones para implementar una corrección a este respecto.

El portamuestras deberá ser del mismo diámetro interior que el resto del tubo, y tiene que estar bien sellado (se recomienda utilizar vaselina). El acceso a la muestra debe ser posible por ambos lados de la misma, para poder revisar que su montaje sea correcto y sin deformaciones.

Ya dentro del procedimiento de prueba, hay varios aspectos que se deben cuidar en cuanto a la medición de algunas distancias y algunos otros parámetros constantes dentro del cálculo, pero que deben ser sondeados justo antes de realizar el experimento.

- *Plano de referencia.* Normalmente se fija como $x = 0$ el plano correspondiente a la superficie de la muestra del lado de la fuente o altavoz. Si esta superficie no es uniforme, entonces el origen deberá situarse a una cierta distancia de la muestra.
- *Velocidad del sonido.* Se calcula como una función de la temperatura (en Kelvin)

$$c_0 = 343.2 \sqrt{\frac{T}{293}} \quad [m/s] \quad (4-4)$$

- *Longitud de onda.* Subsecuentemente, la longitud de onda es dependiente de la temperatura

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} = \frac{343.2}{f} \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (4-5)$$

- *Densidad del aire.* Es función de la temperatura ambiente y la presión atmosférica

$$\rho = 25032.23 \frac{P}{T} \quad (4-6)$$

- Finalmente, la *impedancia característica* del aire, es el producto ρc_0

La amplitud de la señal de excitación debe elegirse de acuerdo al siguiente criterio: la amplitud debe estar por lo menos 10dB por encima del ruido de fondo en todas las frecuencias de interés. Durante la prueba, cualquier valor 60dB por debajo del valor máximo sentido, deberá ser desechado.

El número de promedios espectrales depende del nivel de ruido ambiental y de cada material, pues la función de realizar cierto número de promedios es cancelar los errores debidos a ruido, mismos que pueden alcanzar distintos niveles según las características de la muestra.

El uso de micrófonos pareados, además de costoso, no es la única solución al problema de pequeñas diferencias en las respuestas de los micrófonos en amplitud y fase. El método de corrección de fase, representa una alternativa que a través de la obtención de factores de corrección de amplitud de fase, soluciona este inconveniente satisfactoriamente, aunque implica efectuar tres veces la medición, intercambiando el lugar de los dos micrófonos.

La norma incluye las expresiones matemáticas para efectuar el cálculo del coeficiente de reflexión, absorción, la impedancia específica y la admitancia del material. Se menciona que el procesamiento de la señal adquirida para obtener la función de transferencia a partir de estos valores, debe escogerse de forma que la incertidumbre en amplitud sea del 1%, y 0.6° para la fase, esto para todas las frecuencias incluidas en el análisis.

Por último, en los anexos o apéndices de la norma ISO 10534-2:2001, se precisan los siguientes tópicos complementarios para lograr una mayor exactitud en las mediciones:

- Mediciones preliminares:
 - Calibración de la amplitud sentido por los micrófonos. Deberá ser dentro de $\pm 0.3\text{dB}$ respecto al calibrador utilizado.
 - Temperatura ambiente. Medida con una exactitud de $\pm 0.5\text{K}$.
 - Presión atmosférica actual.
 - Relación señal a ruido. Previo a cada prueba, debe verificarse que la fuente de excitación genere niveles como mínimo 10dB por encima del ruido de fondo.
- Correcciones de atenuación de señal dentro del tubo. Se proponen 4 formas de minimizar este efecto.

- Uso de un solo micrófono. Se recomienda utilizar una señal determinística.
- Terminación para el “alivio de presión” detrás de la muestra. Consiste en un espacio entre la muestra y la terminación rígida del tubo (no necesaria para el caso en que se utilice ruido como fuente de excitación).
- Posibles fuentes de error:
 - Aliasing
 - Fugas
 - Efecto picket-fence
 - Errores aleatorios
- Cálculo del parámetro de absorción en incidencia difusa. Como ya se mencionó al inicio de este capítulo, es posible inducir esta información a partir de la obtenida para incidencia normal. La norma proporciona las expresiones apropiadas para este fin.

4.1.2 DIMENSIONES Y MATERIALES

A continuación se detallará el diseño del tubo de transmisión de acuerdo a las adaptaciones hechas a la norma ISO 10534-2:2001, según las necesidades de este proyecto. Primeramente, para el material elegido se consideró lo siguiente:

- Los tramos de tubo antes y después de la muestra deben ser de sección transversal constante (circular en este caso), con una tolerancia de $\pm 0.2\%$.
- El tubo debe estar fabricado de algún material rígido y liso (no poroso).
- El grosor de las paredes del tubo será de 5% del diámetro de la sección transversal.

Se señaló además el inconveniente que representa la manufactura de piezas de metal, y en el caso de la madera, la poca durabilidad, por lo cual se decidió buscar algún otro material de manejo más sencillo en su maquinación, pero con características de mayor durabilidad que la madera. Este y los anteriores requerimientos se vieron comprometidos por la disponibilidad de medidas estándar de tubos comerciales. Bajo estas condiciones, se eligieron los siguientes materiales y características para la construcción del prototipo:

4.1.2.1 MATERIALES Y SUS CARACTERÍSTICAS

Tubo de Acrílico tipo “cast”

Medidas nominales proporcionadas por el fabricante:

38.1mm de diámetro exterior (1.5”)

6mm de espesor

26.1mm de diámetro interior

densidad: **1.19 (gr/cm³)**

Medidas reales:

~ **40.8mm** de diámetro exterior

6.15 – 7.3mm de espesor [promedio: 6.725mm]^x

~ **26.3 - 27.9mm** de diámetro interior

densidad: **1.33 (gr/cm³)**

^x La variación del espesor a lo largo del tubo es de 1mm aproximadamente, es decir, 16%. El espesor se ha medido en ambos extremos del tubo, en distintos puntos de su pared.

Estas variaciones en el grosor de las paredes implicarían irregularidades de hasta un 3.6% en el diámetro de la sección transversal. Como ya se mencionó, la norma ISO 10534-2 dicta que la tolerancia para esta dimensión debe ser de $\pm 0.2\%$, por lo que este detalle deberá ser tomado en cuenta al evaluar los resultados.

La norma también recomienda que el espesor de las paredes del tubo sea de por lo menos 5% el diámetro del mismo, cuando se utiliza tubo de metal. Dado que la densidad del acrílico es menos de la mitad de la densidad de, por ejemplo, el aluminio (suponiendo que la norma se refiera a metales poco densos como éste, ya que se conocen dispositivos funcionales hechos con este material^[29]), proporcionalmente su grosor debería ser de 11-23% del diámetro. Para nuestro caso, se tiene el 24%, considerando el grosor promedio del tubo de acrílico utilizado (6.725mm).

Es importante hacer notar que la rigidez estructural de los materiales, está involucrado con la eficiencia de los mismos para transmitir vibraciones (que en este caso, es una situación no deseable). Además, la rigidez no es una función exclusiva de la densidad, por lo que podría ser importante tener en cuenta esta propiedad en el momento de la elección de la materia prima.

4.1.2.2 LONGITUD DEL TUBO Y FRECUENCIAS LÍMITE DE OPERACIÓN

Según la norma:

- Para garantizar la existencia de ondas planas en el ancho de banda seleccionado, los micrófonos no deben estar más cerca del altavoz que reproducirá las señales de prueba que una distancia equivalente a tres veces el diámetro del tubo.
- Debido a la distorsión provocada en el campo acústico en las cercanías de la muestra, los micrófonos no deben estar mas cerca de (con respecto al diámetro del tubo):
 - $\frac{1}{2}$ diámetro; si la superficie expuesta de la muestra es lisa
 - 1 diámetro; si la superficie expuesta de la muestra es semi lisa
 - 2 diámetros; si las caras de la muestra son asimétricas
- Se desea que la longitud de cada tramo de tubo sea lo más corta posible para evitar una mala relación señal a ruido.
- Sin embargo, debe ser suficientemente larga para permitir la formación de ondas planas entre la fuente y la muestra.
- Se deben respetar las distancias requeridas entre los micrófonos y la muestra.

Las frecuencias límite de operación ($f_{mín}$ y $f_{máx}$, o bien, las longitudes de onda $\lambda_{máx}$ y $\lambda_{mín}$) dependen tanto de las dimensiones del tubo como de la separación entre los micrófonos. Las expresiones (4- 1) y (4- 3) fueron tomadas de la norma para ser utilizadas en combinación con otras encontradas en literatura afín:

$$\lambda_{mín} \gg \sqrt{A} \quad (4- 7)$$

$$f_{máx} < 0.586 \frac{c}{d} \quad (4- 8)$$

$$f_{\text{mín}} > \frac{0.1c}{2s} \quad (4-9)$$

$$f_{\text{máx}} < \frac{0.8c}{2s} \quad (4-10)$$

Las expresiones (4- 7) y (4- 8) corresponden al trabajo de Lord Rayleigh^[2], mientras que las expresiones (4- 9) y (4- 10) parten del análisis de errores elaborado por Bodén y Aborn^[28]. Los cálculos realizados de acuerdo a estas restricciones físicas fueron los siguientes:

Frecuencia mínima (o $\lambda_{\text{máx}}$) de operación, según la separación entre los micrófonos

$$f_{\text{mín}} > \frac{0.1c}{2s}$$

$$\frac{0.1c}{2s} = \frac{0.1(342.336\text{m/s})}{2(0.02\text{m})} = 855.84\text{Hz}$$

$$\boxed{\therefore f_{\text{mín}} > 855.84\text{Hz}} \quad (4-11)$$

Longitud requerida del tubo de acuerdo a la frecuencia mínima

$$L \geq \frac{250}{f_{\text{mín}}} + 3d$$

$$\frac{250}{f_{\text{mín}}} + 3d = \frac{250}{855.84\text{Hz}} + 3(0.0279\text{m}) = 0.3758\text{m}$$

$$\boxed{\therefore L \geq 0.3758\text{m}} \quad (4-12)$$

Frecuencia máxima (o $\lambda_{\text{mín}}$) de operación, según el diámetro del tubo

$$\lambda_{\text{mín}} \gg \sqrt{A}$$

Considerando la sección transversal del tubo A, entonces

$$\lambda_{\text{mín}} \gg 0.0247\text{m} \quad (4-13)$$

Que corresponde a 13900Hz aproximadamente, considerando una velocidad del sonido a 20°C de 343.2 m/s

Pero, por otra parte,

$$f_{\text{máx}} < 0.586 \frac{c}{d}$$

$$0.586 \frac{c}{d} = 0.586 \frac{342.336 \text{ m/s}}{0.0279 \text{ m}} = 7190.28 \text{ Hz}$$

$$\boxed{\therefore f_{\text{máx}} < 7190.28 \text{ Hz}} \quad (4-14)$$

Que corresponde a una longitud de onda, $\lambda = 0.476 \text{ m}$

Ahora bien, según la separación entre los micrófonos, la frecuencia máxima de operación sería,

$$f_{\text{máx}} < \frac{0.8c}{2s}$$

$$\frac{0.8c}{2s} = \frac{0.8(342.336 \text{ m/s})}{2(0.02 \text{ m})} = 6846.72 \text{ Hz}$$

$$\boxed{\therefore f_{\text{máx}} < 6846.72 \text{ Hz}} \quad (4-15)$$

La separación entre la muestra y el micrófono más cercano (a ambos lados de la misma), será ligeramente mayor a 0.0279 m (un diámetro, según las normas vigentes para el tubo de absorción: ISO-10534-2:2001 y E1050, no se debe exceder demasiado la distancia de un diámetro para mantener una buena relación señal a ruido), tomando en cuenta que provisionalmente las muestras serán del tipo semi estructurado (o semi-liso).

4.1.2.3 PORTAMUESTRAS

El portamuestras consiste en un tubo cuyo diámetro interior es justo el diámetro exterior del tubo donde se montan los micrófonos, siempre que permita un acoplamiento exacto y sin fugas. Se construyeron dos portamuestras con la longitud apropiada para alojar la muestra (1 y 2 pulgadas de espesor) y que permiten un ensamble firme, pues el traslape entre el portamuestras y el tubo es igual al diámetro interior del tubo. Están hechos de PVC, y en ellos embonan los tubos de acrílico como se muestra en la Figura 4. 1 y en la Figura 4. 2



Figura 4. 1. Portamuestras para muestras de una y dos pulgadas

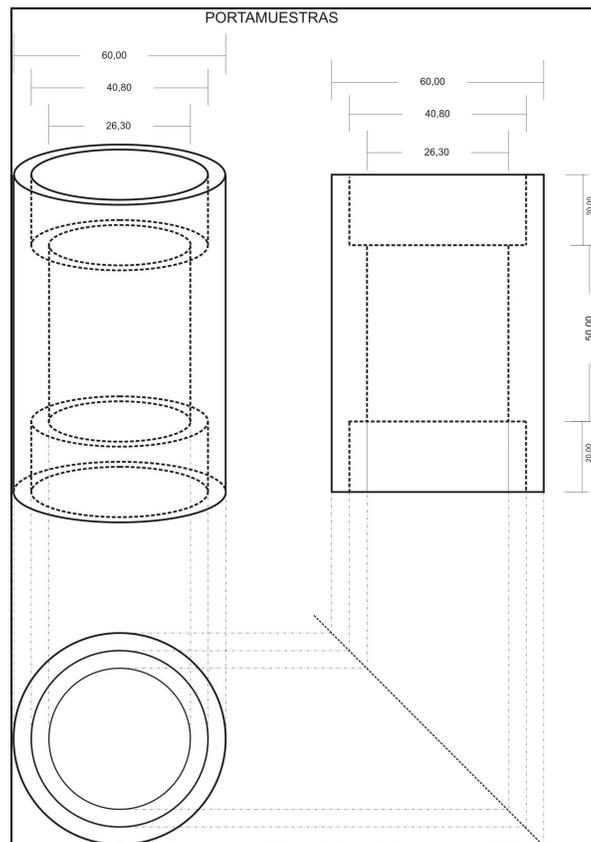


Figura 4. 2. Esquema de diseño del portamuestras.

4.1.2.4 FUENTE DE EXCITACIÓN

El altavoz colocado en un extremo del primer tramo de tubo, se montó en una caja de madera, que se rellenó parcialmente con material absorbente para amortiguar las reflexiones dentro de la misma. Así mismo, se colocaron o-rings en todos los tornillos que unen el tubo con la caja del altavoz, para reducir la transmisión de vibraciones entre ellos.

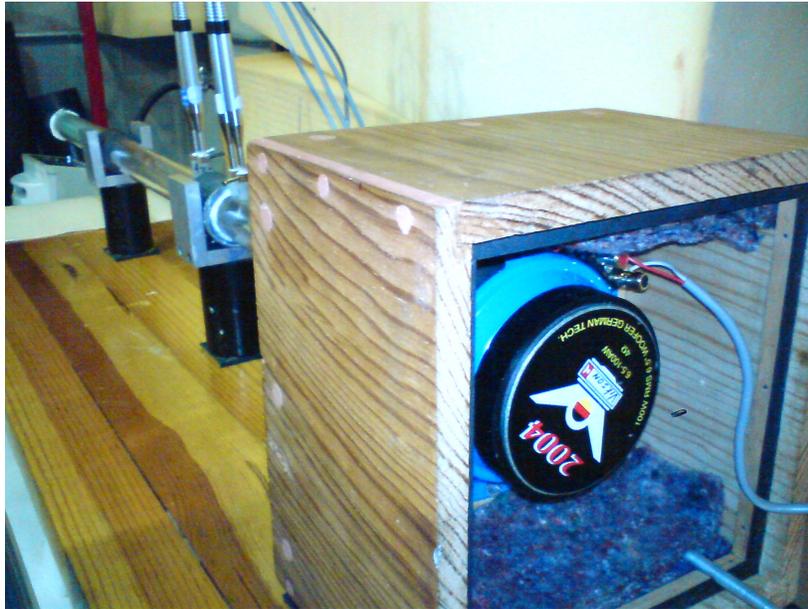


Figura 4. 3. Parte posterior de la caja de madera que aloja el altavoz con el cual se envía la señal de excitación. Durante las pruebas, la caja se encuentra cerrada.

4.1.2.5 ESQUEMAS

En las siguientes figuras se muestra el esquema de diseño y vistas del dispositivo completamente construido y en funcionamiento.

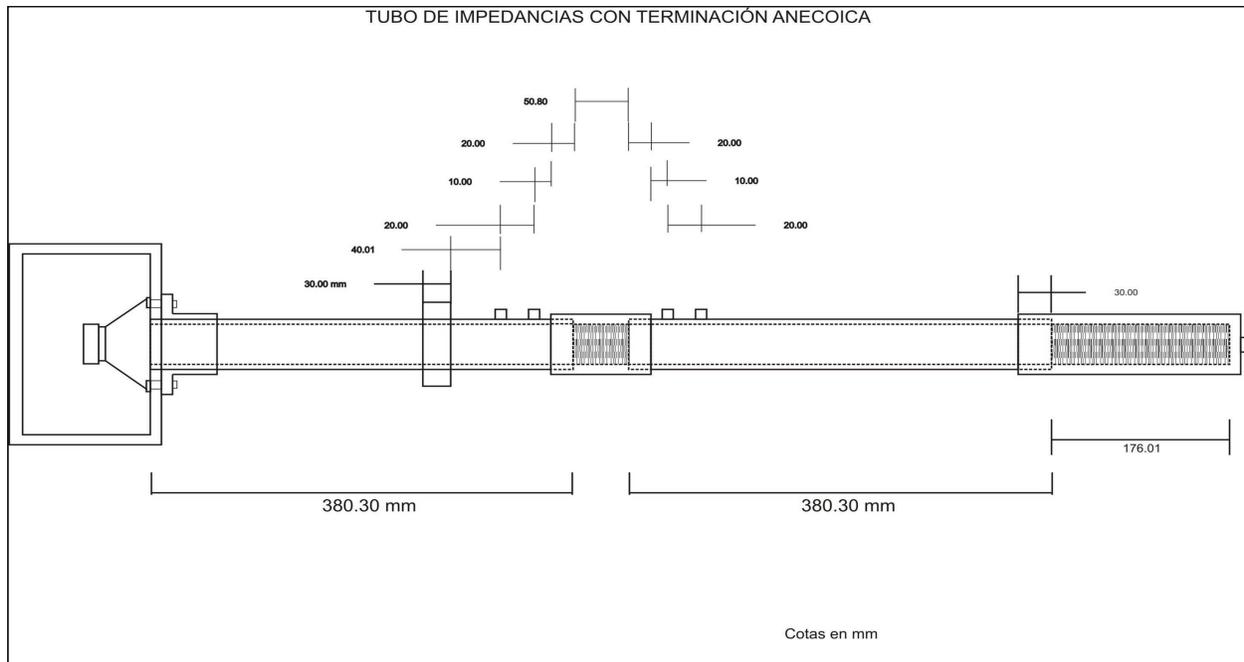


Figura 4. 4. Principales dimensiones del tubo de impedancias diseñado. De izquierda a derecha: caja con altavoz, primera sección del tubo, portamicrofonos 1 y 2, portamuestras con material de prueba, portamicrofonos 3 y 4, segunda sección del tubo y terminación absorbente.

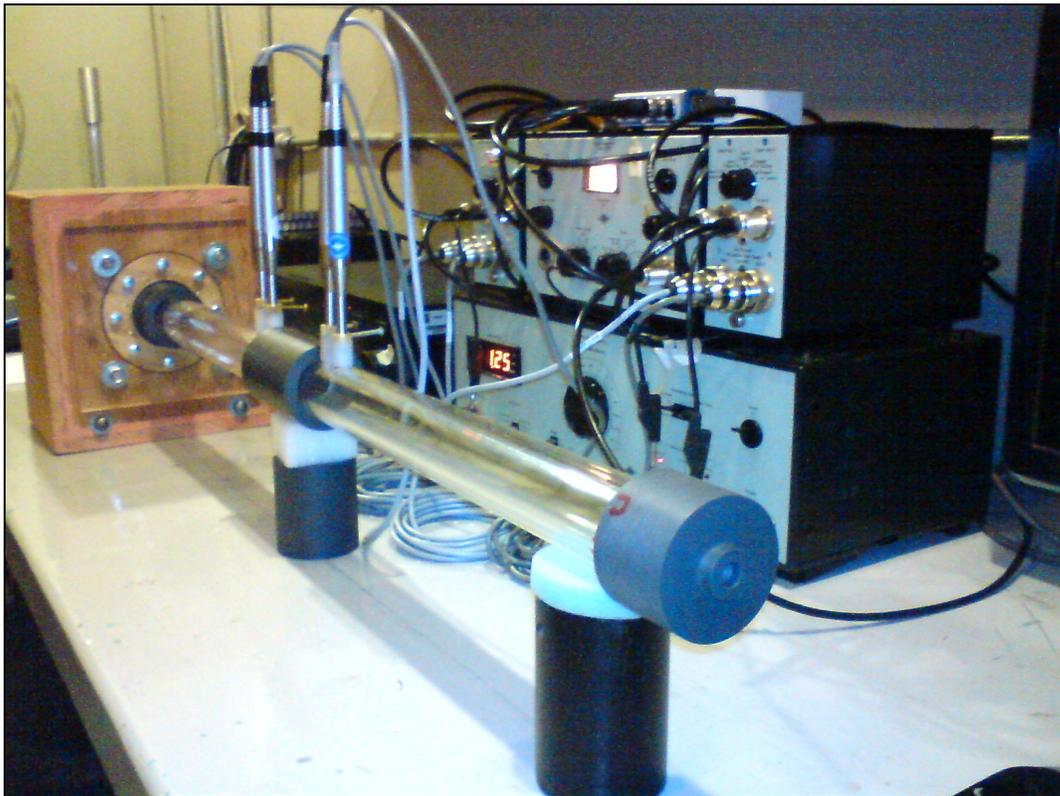


Figura 4. 5. Primer montaje del tubo con terminación reflejante. Al fondo puede verse el gabinete de madera que contiene el altavoz. Sobre la misma mesa están colocadas las fuentes de los micrófonos, un generador de ruido, un filtro por bandas y la PC (no visible en la foto).



Figura 4. 6. Montaje y ubicación final del tubo sobre una plancha de madera (amortiguada con material suave debajo) y sobre una mesa separada de los demás aparatos utilizados en las pruebas. El ruido de fondo dentro del cuarto donde se implementó el tubo, es de menos de 40dB.

4.1.3 TERMINACIONES DEL TUBO

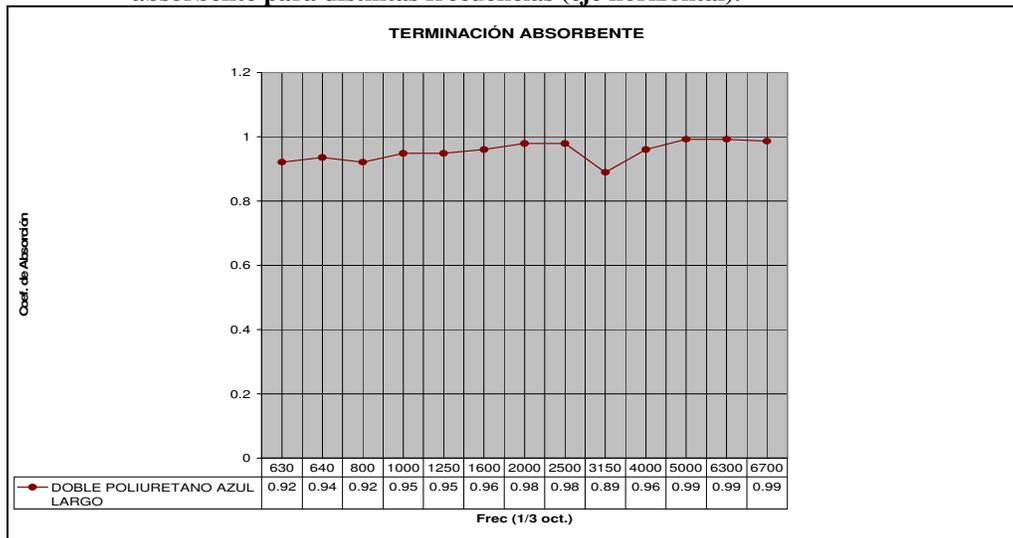
La terminación o remate de la segunda sección del tubo se hizo intercambiable, pues las mediciones requieren de dos condiciones diferentes; se observó que si una de estas condiciones era reflejante, el cálculo de las funciones de transferencia presentaba oscilaciones fuertes que finalmente entregaban resultados completamente erróneos del coeficiente de transmisión. Se buscó entonces una terminación más absorbente, e incluso alguna condición cercana a la anecoica, para probar los métodos que requieren una sola medición. En términos estrictos, es imposible lograr la condición anecoica dentro de un tubo de dimensiones finitas. En la Figura 4. 7 se muestran las dos terminaciones que finalmente se utilizaron.



Figura 4. 7. Las dos terminaciones utilizadas con el tubo, rellenas con espuma de poliuretano para darles diferente absorción.

El diámetro interno de estas terminaciones es el mismo que el del resto del tubo. Sus longitudes son 19 y 38 cms. Para determinar el tipo de material y la geometría necesarios en la terminación anecoica fue necesario implementar el método de onda estacionaria con el tubo de impedancias de 27mm de diámetro del Laboratorio de Acústica de CCADET-UNAM, para probar distintos materiales, en distintas configuraciones, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4. 1. Coeficiente de absorción (adimensional) del material utilizado en la terminación absorbente para distintas frecuencias (eje horizontal).



Después de probar con distintos tipos y cortes de poliuretano, se encontró que al utilizar varias secciones del poliuretano azul (densidad de 22 Kg/m^3), se incrementaba la absorción uniformemente. El utilizar bloques de este material, de 6.3cms para la terminación corta y de 9.5cms para la larga, permite modificar el grado de absorción fácilmente retirando uno o más bloques, en caso de ser necesario.

4.2 TIPO DE MUESTRAS

En una primera etapa, se desea obtener resultados comparables a los logrados por otros autores, para lo cual es necesario utilizar muestras con características similares a las que ellos utilizaron, es decir, materiales porosos y geoméricamente simétricos. Las densidades de los materiales con los que se trabajó en las pruebas son las siguientes:

ESPUMA DE POLIURETANO AZUL: 22 kg/m^3

ESPUMA DE POLIURETANO GRIS: 32 kg/m^3

CORCHO: 191 kg/m^3



Figura 4. 8. Espumas de poliuretano y capas de corcho utilizadas en las pruebas

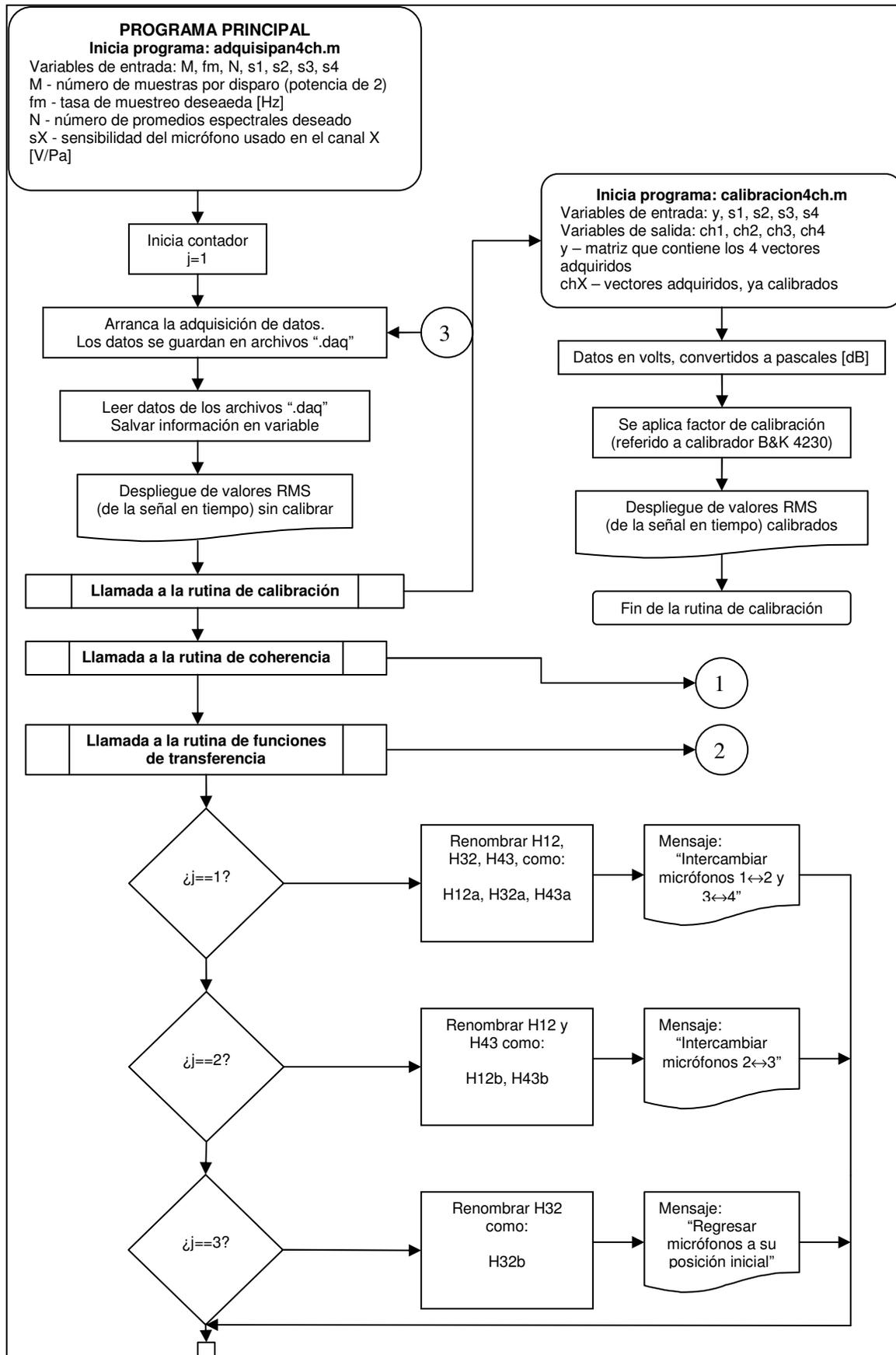
En el caso de las espumas, se cortaron muestras del tamaño exacto para ser colocadas en el portamuestras, mientras que en el caso del corcho, se cortaron varias capas de 6.5mm de espesor, suficientes para completar una y dos pulgadas.

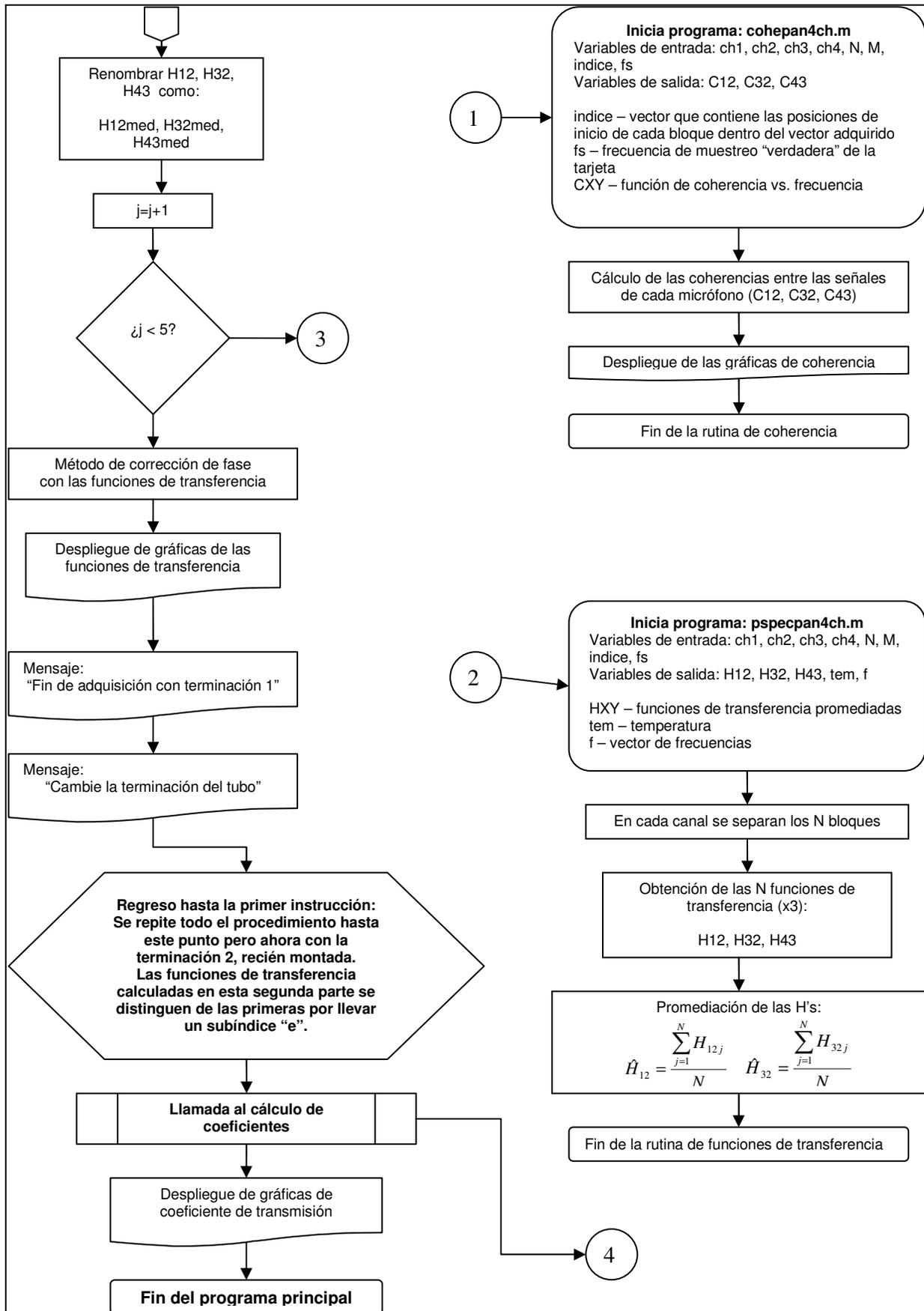
4.3 PROGRAMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para llevar a cabo la adquisición de las señales provenientes de los cuatro micrófonos, y posteriormente procesar la información, se elaboró un programa en MATLAB que se divide en varias funciones que cumplen con las siguientes tareas específicas:

- Adquisición de datos (programa principal)
 - Llamada a diferentes rutinas
 - Implementación del procedimiento para corrección de fase
 - Despliegue de gráficas
- Calibración (función)
- Cálculo de coherencia entre señales (función)
- Cálculo y promediación de funciones de transferencia (función)
- Cálculo de parámetros acústicos: τ , \mathfrak{X} (función)

En la Figura 4. 9 (que ocupa las siguientes tres páginas), se encuentra la estructura general de estos programas, y cómo son interconectados con el programa principal. Posteriormente se detallan las tareas que realiza cada función.





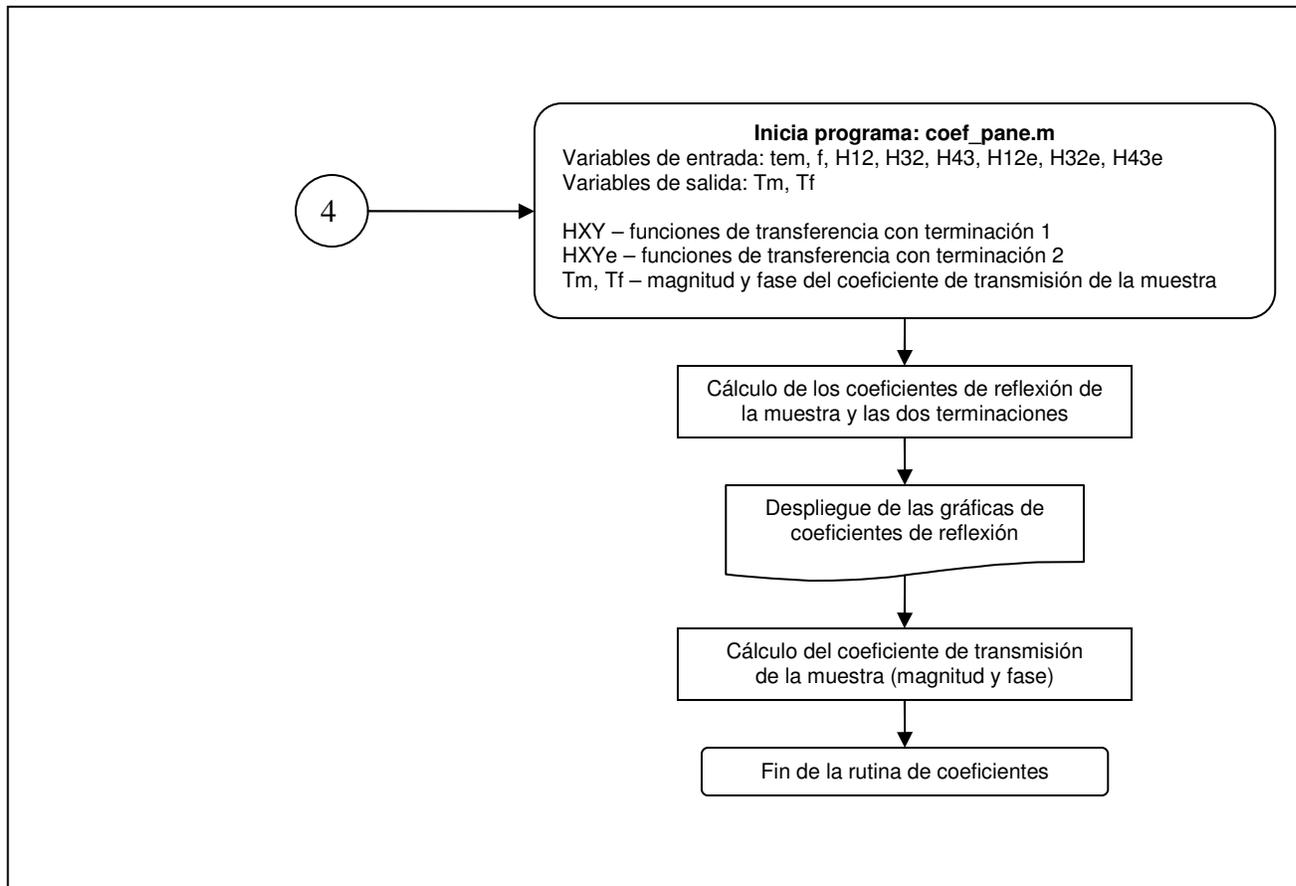


Figura 4. 9. Diagrama de flujo de los programas utilizados en la adquisición y procesamiento de datos del tubo de impedancias modificado.

El diagrama de flujo anterior corresponde al algoritmo que aplica el método de corrección de fase. Para realizar la adquisición y procesamiento sin la corrección de fase, fue necesario modificar esta estructura, omitiendo algunas rutinas de iteración de la adquisición.

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL PROGRAMA

Nombre del programa principal: adquisipan4ch.m

Descripción: Programa principal para la adquisición de datos a través de la tarjeta NI-9233. Al correr este programa, se harán sucesivas llamadas a otras funciones que desempeñan las siguientes tareas específicas (ver diagrama de flujo):

- Verificación de la calibración de la cadena de medición
- Promediación de espectros
- Obtención de las funciones de transferencia (entre los micrófonos 1 y 2, 2 y 3, y 3 y 4) para la posterior obtención del coeficiente de transmisión
- Obtención y graficación del coeficiente de reflexión de la muestra y de la terminación.
- Obtención y graficación de la coherencia entre las señales adquiridas

PARA INICIAR LAS MEDICIONES, SE UTILIZA PRIMERO LA TERMINACIÓN ABSORBENTE CORTA.

Las variables de entrada para este programa son:

- **M** - es el numero de muestras por disparo (preferentemente potencia de dos)
- **fm** - es la tasa de muestreo deseada [Hz]
- **N** - es el número de promedios espectrales deseado
- **s1, s2, s3, s4** - las sensibilidades de los micrófonos usados para cada canal [volts/pascal]

utilizando M, N y fs, se lleva a cabo la adquisición de los N bloques de señal en tiempo que se van a promediar como espectros en una etapa posterior, mismas que se guardan automáticamente en los archivos “XXXX00.daq”^{xi}, posteriormente son leídas y almacenadas en una variable .mat llamada “yraw”. Esta variable separa los bloques adquiridos con NaN’s (separadores no numéricos para localizar el inicio y final de cada vector), cuya posición en el vector se determina a través de la función *isnan*.

Antes de realizar la necesaria remoción de los NaN’s (para poder procesar la información de forma adecuada), se genera un filtro butterworth de 2° orden para filtrar cualquier señal parásita exterior al tubo que se encuentre fuera de su intervalo de operación. Después de dicho filtrado, la compensación del offset y la remoción de los NaN’s en cada canal, se conforma una matriz (“y”) con los cuatro canales ya listos para la calibración.

Como información útil para la calibración, se despliegan los valores RMS de las señales en tiempo (todos los bloques juntos). Entonces, se llama a la rutina **calibracion4ch.m**, que se describe a continuación.

Nombre de la función: calibracion4ch.m

Descripción: Programa para verificar la correcta calibración de los micrófonos del tubo de impedancias.

Utilizando las sensibilidades proporcionadas en el programa principal, los datos adquiridos en volts, son convertidos a pascuales, y se aplican las ponderaciones apropiadas para que la cadena quede calibrada.

En la pantalla principal de MATLAB se despliegan los valores RMS (tiempo) de las señales adquiridas por cada micrófono; primero, los valores sin el factor de calibración (esta parte en realidad se ejecuta en el programa principal **adquisipan4ch.m**); después, los valores ya ponderados (utilizando el calibrador B&K 4230 94dB@1kHz para proporcionar el nivel de presión).

Evidentemente, la calibración no es simultánea para los cuatro micrófonos (a menos que se contara con cuatro calibradores iguales), sino que se hace uno por uno. *Para llevar a cabo la calibración es necesario correr el programa principal y revisar que los valores RMS ya calibrados coincidan con las especificaciones del calibrador. Como el tiempo de procesamiento es largo en el programa principal, es recomendable utilizar pocos promedios al momento de configurar la corrida. En mi opinión, 3 a 5 promedios es más que suficiente. Cabe mencionar que esta forma de calibrar (corriendo el programa*

^{xi} En la segunda corrida (con terminación absorbente larga), los archivos ahora tienen nombres con la terminación 01: “XXXX01.daq”

principal, resulta un poco impráctica, por lo que se considerara la elaboración de una rutina más eficiente.

Ahora se llama a la función **pspecpan4ch.m** desde el programa principal,

Nombre de la función: pspecpan4ch.m

Descripción: Con los 4 vectores calibrados y la variable “índice” que contiene las posiciones de inicio y final de cada bloque, esta rutina separa esos bloques y efectúa el cálculo de los espectros H12, H32 y H43 (bloque por bloque), para finalmente promediarlos.

Las funciones de transferencia adquiridas son renombradas como H12a, H32a, H43a, es decir, la primer medición con los micrófonos en su posición natural. En este punto, el programa principal termina el primer ciclo “while”, programado para repetir 4 veces las instrucciones hasta el momento revisadas; durante el segundo y tercer ciclo, se intercambia la posición de los micrófonos según el método de corrección de fase^[9], el cuarto ciclo es para realizar la medición a la que se le aplicaran los factores de corrección (fase y magnitud).

Una vez adquiridas todas las señales *CON LA TERMINACIÓN ABSORBENTE CORTA*, el programa aplica el método de corrección de fase a las 3 funciones de transferencia.

Con la finalidad de verificar si existe relación entre el campo acústico que hay antes y después de la muestra analizada (ya que puede existir sonido contaminante exterior, o bien, que la relación señal a ruido sea muy pobre), se llama a una rutina que entrega como resultado la coherencia entre las señales que conforman las funciones de transferencia:

Nombre de la función: cohepan4ch.m

Cálculo y graficación de la coherencia entre las señales entre micrófonos, es decir, C12, C32, C43.

Si la coherencia es alta, entonces se puede confiar en que no hay contaminación en las señales procesadas.

Después de calcular la coherencia, el programa principal “pide” que se cambie la terminación del tubo por una diferente, en este caso con el mismo material absorbente (espuma de poliuretano azul), pero del doble de longitud de la primera.

Ya con la segunda terminación, se repite el programa (*doble de líneas de programación, REVISAR*) hasta este punto, para adquirir exactamente los mismos datos y funciones de transferencia (H12e, H32e, H43e). A continuación se llama a la función que calculará el coeficiente de reflexión de la muestra y de la terminación, además del COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN, que es el objetivo principal de esta medición.

Con los datos que hasta este momento ha entregado el programa (H12, H12e, H32, H32e, H43, H43e) se calcula el coeficiente de transmisión, llamando a la siguiente función:

Nombre de la función: coef_pane.m

Descripción: Esta función calcula los coeficientes de transmisión y reflexión (muestra y terminaciones) a partir de las funciones de transferencia del sistema obtenidas con

ambas terminaciones del tubo. Para esto se utilizan las expresiones obtenidas por Panneton y Salissou^[15]:

$$R_1 = \frac{H_{12} - e^{jk_0 s_1}}{e^{-jk_0 s_1} - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}$$

```
r1 = ((H12.'-exp(i*k*sep1))./(exp(-i*k*sep1)-H12.')).*exp(2*i*k*L1);
```

$$R_b = \frac{H_{43} - e^{-jk_0 s_2}}{e^{jk_0 s_2} - H_{43}} e^{-2jk_0 x_1}$$

```
rb = ((H43.'-exp(-i*k*sep2))./(exp(i*k*sep2)-H43.')).*exp(-2*i*k*L1);
```

$$\tau = H_{32} \left(1 - R_2 R_b e^{2jk_0 L_2} \right) \frac{e^{jk_0 x_1} + R_1 e^{-jk_0 x_1}}{e^{-jk_0 x_2} + R_b e^{jk_0 x_2}}$$

```
T = H32.'*((1.-r2.*rb.*exp(2*i*k*D2)).*((exp(i*k*L1) + r1.*exp(-i*k*L1))./(exp(-i*k*L2) + rb.*exp(i*k*L2))));
```

Nota: En las líneas de programación hay algunos cambios en los nombres de las variables, como puede observarse en las expresiones anteriores.

4.4 MEDICIONES PRELIMINARES DE ABSORCIÓN

Con la finalidad de familiarizarse con el proceso de medición de parámetros acústicos en tubos de impedancias, se hicieron una serie de mediciones de absorción con un tubo que, para este fin, fue construido con anterioridad por el Laboratorio de Acústica^[29], empleando el método de matriz de transferencia con uno y dos micrófonos.

Para realizar las mediciones, se montó el arreglo mostrado en la Figura 4. 10; que se compone de

- PC
- Tarjeta de adquisición de 4 canales (sólo se utilizaron dos canales simultáneamente)
- Fuente de polarización para el micrófono
- 2 Micrófonos de presión
- Generador de ruido blanco
- Amplificador de audio
- Tubo de Impedancias con intervalo de operación de 200 a 1600Hz

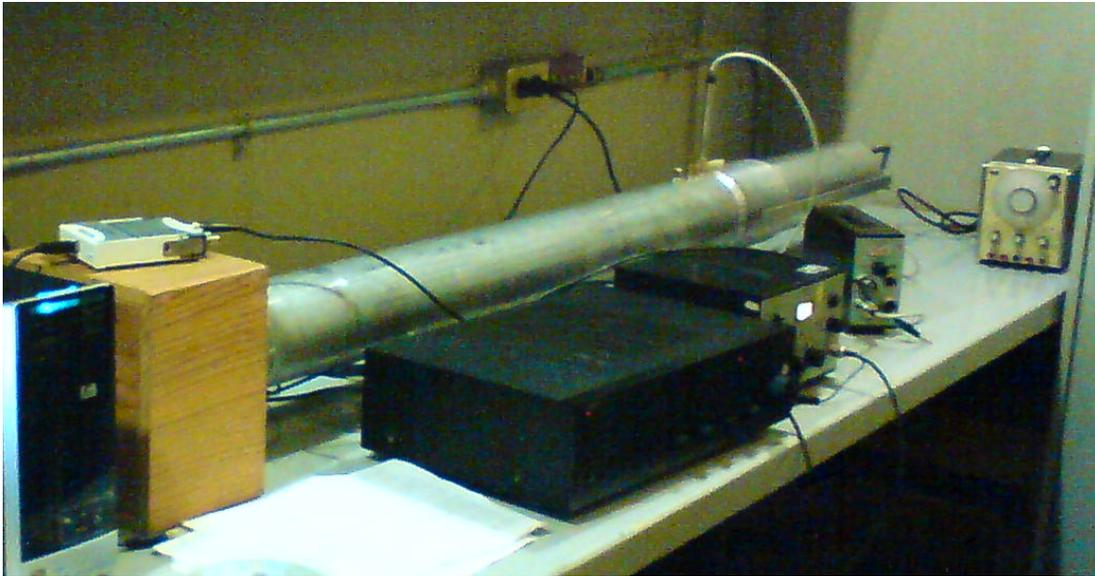


Figura 4. 10. Tubo de impedancias de 5 pulgadas de diámetro. Intervalo de operación: 200 – 1600Hz. Dispositivo construido en el Centro de Instrumentos, UNAM en el año 1987.

La cadena de medición fue calibrada con el calibrador B&K 4230 (nivel de referencia: 94dB @ 1kHz). Fue necesario colocar el micrófono y el calibrador sobre una superficie separada de la mesa de trabajo, para evitar las vibraciones producidas por los aparatos utilizados.

Debido a que el nivel en voltaje de las señales que entregan los micrófonos es muy bajo, también se modificó la configuración de los límites de voltaje de entrada/salida de la tarjeta de adquisición, para aprovechar todo su intervalo dinámico. La fuente que alimenta a el/los micrófono(s) debe utilizar baterías, ruido de línea inducido en las mediciones.

4.4.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES PRELIMINARES

En ésta sección se reportan los resultados de una de las pruebas preliminares realizadas como previa familiarización con este tipo de mediciones. Se muestra (Figura 4. 11) la absorción de un cilindro de espuma de poliuretano de 32kg/m^3 , y 5 cms de espesor. La gráfica tiene 3 trazos que corresponden a la siguiente información:

- Trazo azul: medición con el analizador B&K2034 y dos micrófonos, con corrección de fase.
- Trazo verde: medición con el analizador B&K2034 utilizando un solo micrófono.
- Trazo rojo: medición con tarjeta de adquisición, MATLAB y dos micrófonos.

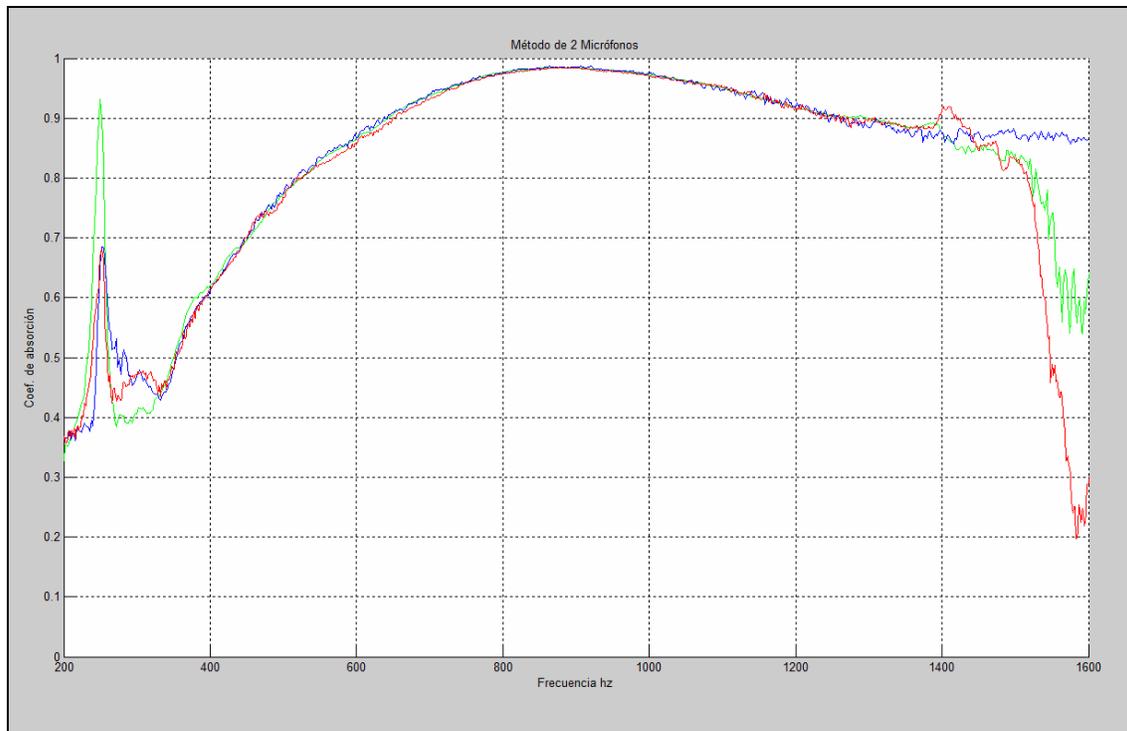


Figura 4. 11. Coeficiente de absorción según tres técnicas de medición diferentes. Trazo azul: medición con el analizador B&K2034 y dos micrófonos, con corrección de fase. Trazo verde: medición con el analizador B&K2034 utilizando un solo micrófono. Trazo rojo: medición con tarjeta de adquisición, MATLAB y dos micrófonos. Intervalo de 200 a 1600Hz.

Se aprecia una clara correlación entre los resultados que producen diferentes técnicas sobre la misma muestra de material absorbente. Además, se observa que al aplicar la corrección de fase mejoran los resultados en la zona de frecuencias arriba de 1400Hz. En bajas frecuencias ocurre una irregularidad, probablemente debido a la resonancia de alguna parte del tubo (la longitud de onda correspondiente al pico es de poco más de un metro de longitud, aproximadamente las mismas dimensiones del tubo).

La conclusión más importante que se puede advertir de esta experiencia, es que la adquisición de datos con el programa desarrollado en MATLAB, entrega resultados confiables, pues coinciden en gran medida con aquellos que se procesaron con el analizador B&K2034.

4.5 EFECTOS DEL RUIDO DE FONDO

Para evidenciar la influencia que tiene el ruido externo (ajeno al ruido blanco de prueba) al tubo de impedancias sobre una medición, se utiliza la coherencia entre las señales captadas por los micrófonos utilizados. Utilizando el tubo de transmisión para la medición de aislamiento sonoro, se colocó un altavoz autoamplificado a una distancia aproximada de un metro con respecto a la colocación de los micrófonos; con la ayuda de un generador se suministró ruido blanco al altavoz mencionado durante varias mediciones, aumentando progresivamente el nivel de la

señal contaminante, y así verificar la influencia del ruido en las mediciones. Los detalles de las condiciones en que se realizó esta prueba fueron:

- Medición con muestra de espuma de poliuretano gris (32 kg/m^3) de 2 pulgadas de espesor.
- La señal de prueba para el tubo fue ruido blanco a los niveles acostumbrados durante una medición (102 – 108 dB).
- Número de promedios espectrales (número de disparos de la tarjeta de adquisición): 10.
- Se utilizó la terminación absorbente corta.
- No se calibró la medición, pues no se desean valores absolutos.
- Número de muestras por disparo (trigger): 32768.
- Frecuencia de muestreo de la tarjeta de adquisición: 12500.
- Se filtraron las señales adquiridas con un filtro paso banda tipo “butterworth” de 2o orden (de 600 a 6250Hz), tal como se hace durante una medición habitual.

La prueba se realizó dentro de una cámara relativamente aislada del ruido exterior (normalmente por debajo de 40dB) y el tubo se colocó sobre una plancha de madera gruesa, amortiguada por espuma de poliuretano debajo de la misma. Los aparatos de medición y excitación, se colocaron en otra mesa.

El ruido que genera el sistema de ventilación de los aparatos de medición, particularmente el del filtro Stanford SR650 utilizado en la cadena de medición, estuvo presente durante el desarrollo de la medición, aunque no se considera de incidencia crítica en el resultado pues su nivel (del orden de 45dB) es mucho menor al generado artificialmente con el altavoz, además de no ser coherentes, por lo que no se suman constructivamente.

Se colocó material absorbente en la pared más cercana al tubo, para evitar que el ruido contaminante pudiera reforzarse significativamente con su propia reflexión.

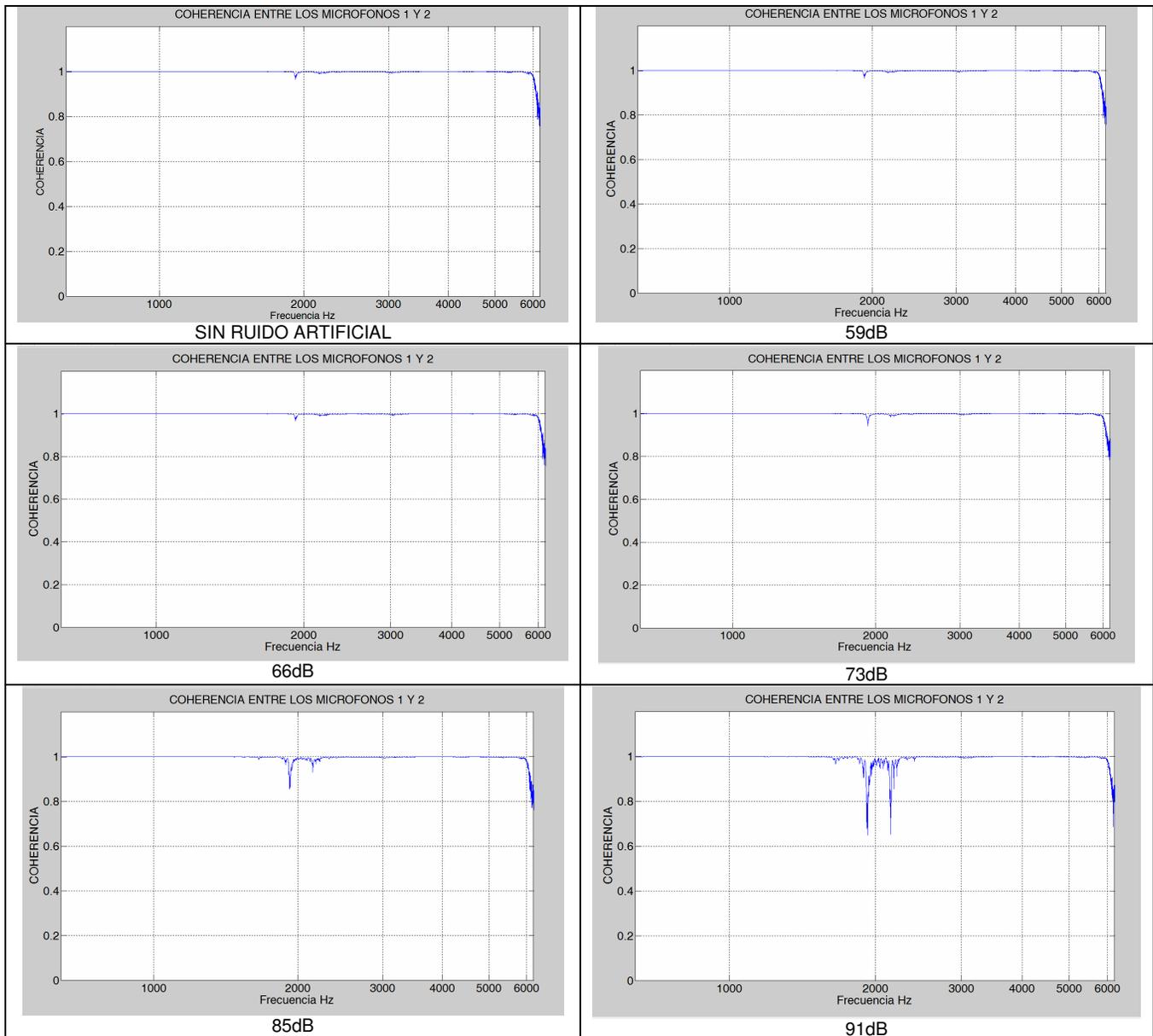


Figura 4. 12. Coherencia entre los micrófonos 1 y 2 bajo distintas condiciones de ruido contaminante.

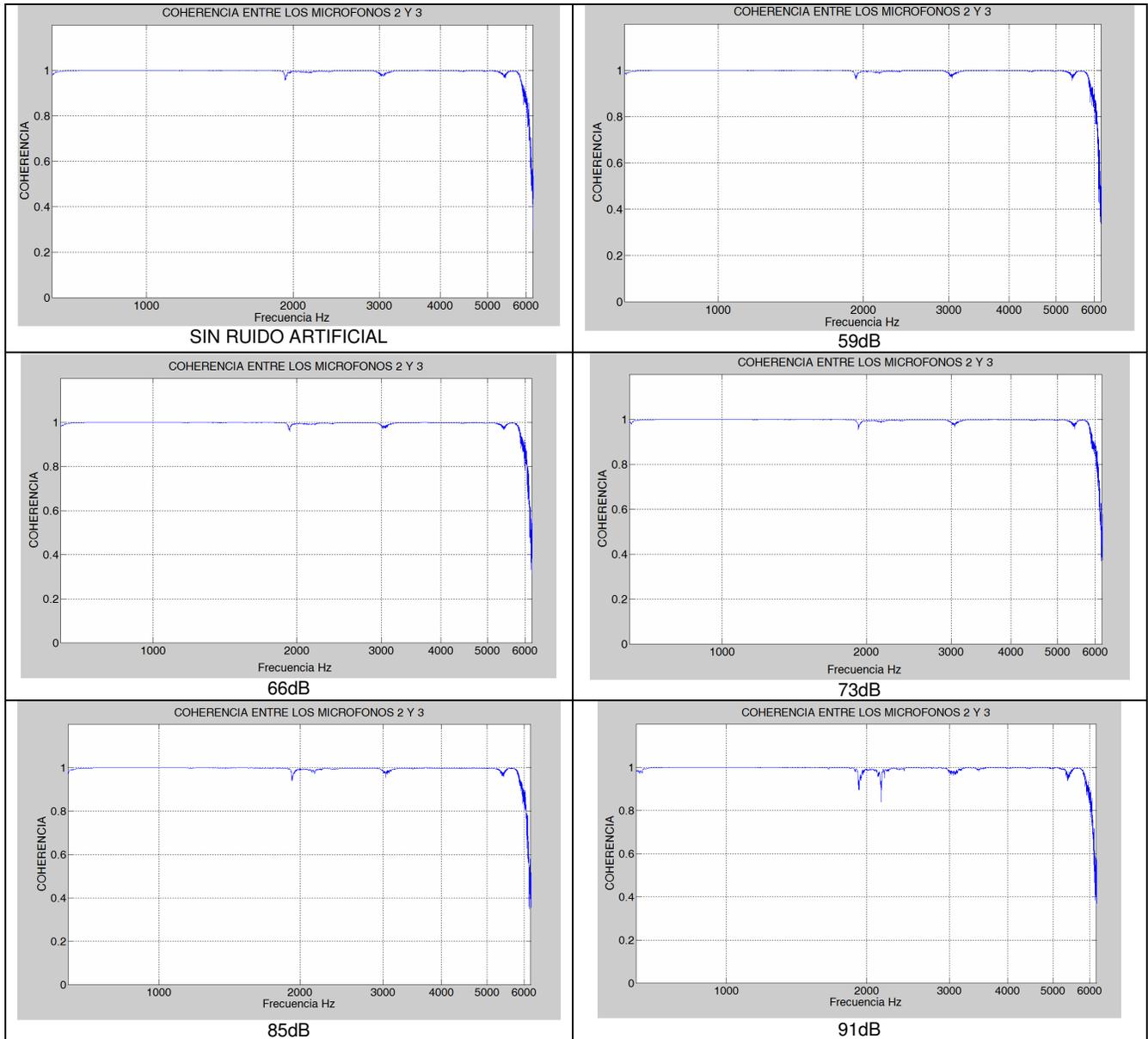


Figura 4. 13. Coherencia entre los micrófonos 2 y 3 bajo distintas condiciones de ruido contaminante.

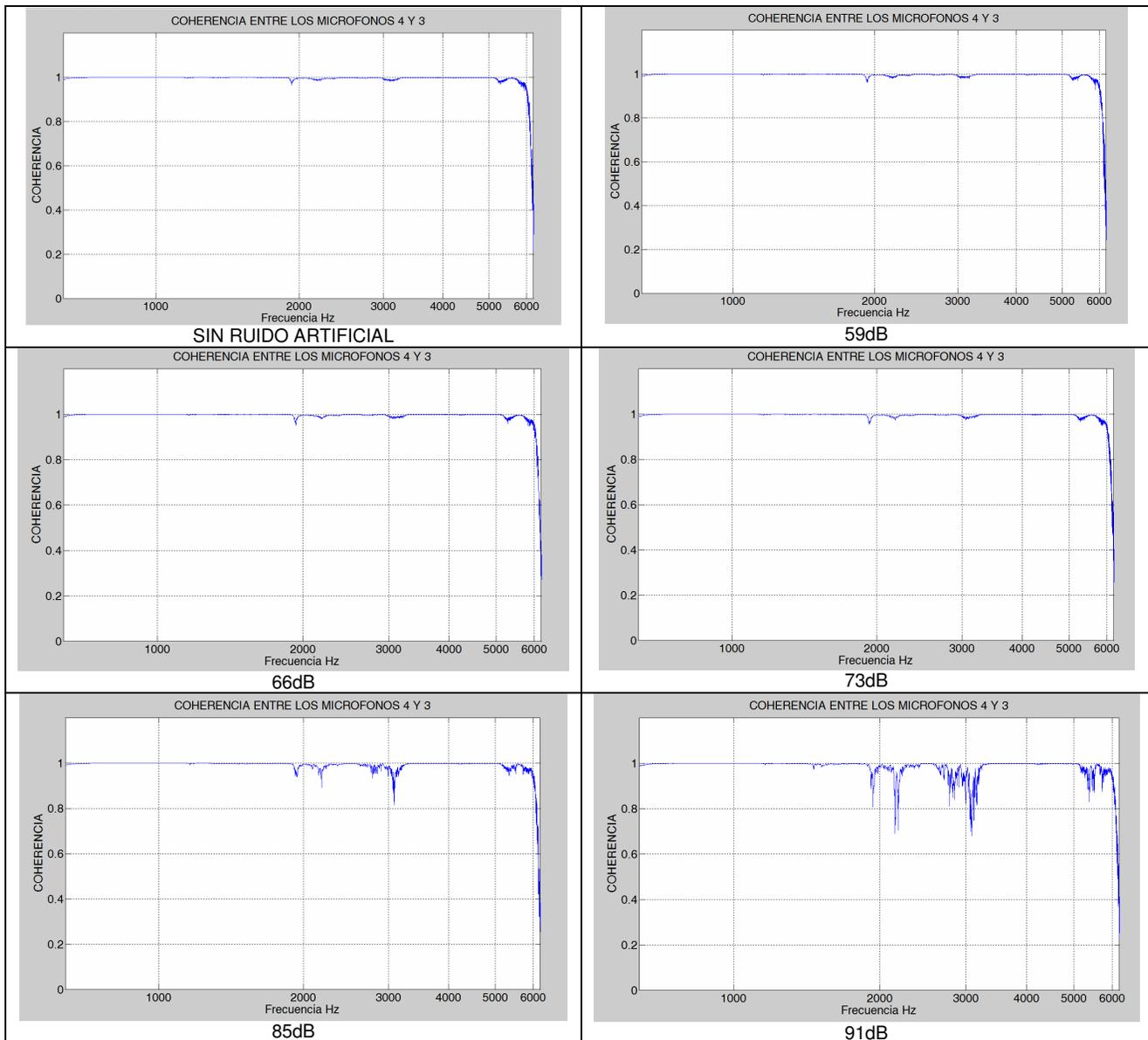


Figura 4. 14. Coherencia entre los micrófonos 3 y 4 bajo distintas condiciones de ruido contaminante.

Se puede observar en las gráficas de las figuras anteriores que de 73 a 85dB hay un cambio no favorable en la coherencia, en el caso de los micrófonos 3 y 4, bastante marcado. Puede pensarse que arriba de 75dB, aproximadamente, el ruido ajeno a la señal de prueba comienza a ser un factor que origina errores en el resultado final. Por arriba de 90dB se consideraría imposible efectuar una medición confiable.

Analizando lo anterior podemos concluir que la medición puede efectuarse en ambientes con niveles de ruido menores a 75dB sin que ello afecte la calidad de los valores obtenidos. Así, las mediciones pueden tener lugar en un espacio cualquiera que cumpla con estos requerimientos, por ejemplo, un laboratorio o aula.

En todas las gráficas hay una caída en la coherencia alrededor de 1940Hz, correspondiente a unos 17.7cm de longitud de onda, y que muy probablemente se deba a la resonancia natural de alguna pieza del tubo de estas dimensiones, por ejemplo, el portamuestras.

4.5.1 ANÁLISIS ESPECTRAL DEL RUIDO DE FONDO

Para determinar en qué región espectral se concentra la energía del ruido ambiental que penetra dentro del tubo, se hicieron algunas grabaciones con los micrófonos montados en el dispositivo, pero sin señal de prueba para medición. Los espectros correspondientes a dichas grabaciones indican que la energía se concentra sobretodo en bajas frecuencias (probablemente debido al constante cierre de puertas dentro de las instalaciones del laboratorio), por esta razón se decidió incorporar el filtrado digital de la señal después de su adquisición. Con esto se desea eliminar la mayor cantidad posible de fuentes de error.

En la siguiente figura se muestra el espectro del ruido presente en el interior del tubo, antes y después de ser filtrada la señal.

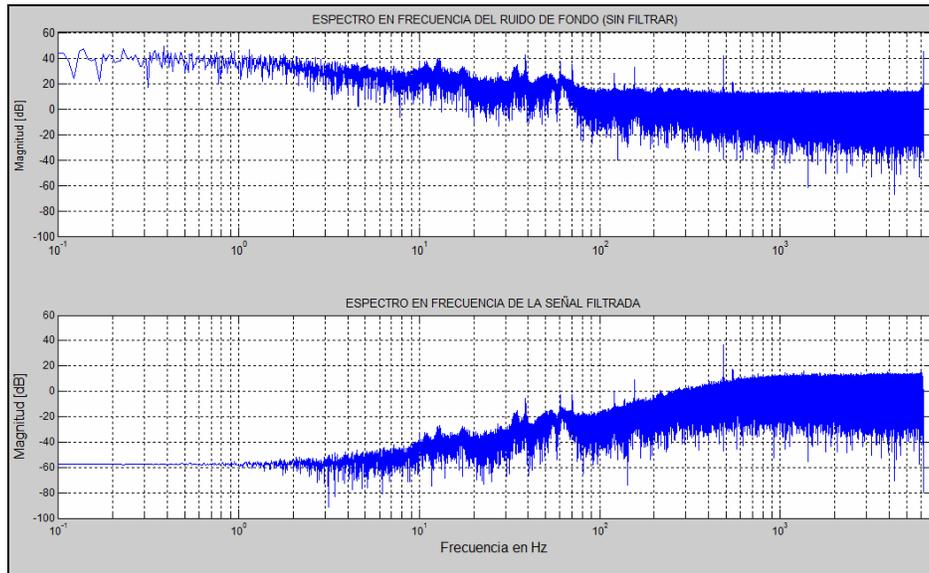


Figura 4. 15. Espectro en frecuencia del ruido de fondo dentro del tubo de impedancias. En la parte superior se muestra el ruido tal y como es capturado por los micrófonos de medición. En la parte inferior se aplicó un filtrado digital para eliminar del análisis las frecuencias por debajo del intervalo de operación del tubo de transmisión construido.

CAPÍTULO 5: MEDICIONES

En este capítulo se describen las condiciones y requerimientos experimentales que se tomaron en cuenta para la realización de las mediciones. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos para el método propuesto por Panneton y Salissou^[15] (al cual designaremos como “primer método” durante el resto del capítulo), y para un método que prescinde de la corrección de fase, y ocupa la nueva formulación propuesta (“segundo método”).

5.1 LOCACIÓN Y CONDICIONES EXPERIMENTALES

Después de la experiencia adquirida con el tubo de impedancias en las pruebas de condiciones preliminares, y la medición de los efectos y características del ruido de fondo, se pueden plantear una serie de requerimientos experimentales, necesarios para obtener datos libres de la mayor parte de los efectos ajenos al estímulo acústico aplicado al material que se desea caracterizar.

5.1.1 RUIDO AMBIENTAL

Como se mencionó en la sección 4.5, para el tubo de transmisión construido, el ruido de fondo en la locación donde se llevarán a cabo las mediciones, debe ser menor a 75dB, incluyendo cualquier evento transitorio que rebase este nivel para todo el espectro audible, e incluso frecuencias por debajo de 20Hz (por ejemplo, cierre de puertas), pues aunque se está llevando a cabo un filtrado digital de la señal adquirida, es posible que afecten el intervalo efectivo de medición.

5.1.2 VIBRACIONES

A pesar de que no se cuantificó el efecto de las vibraciones en la medición, la presencia de éstas, puede ocasionar una baja correlación entre las señales antes y después de la muestra. Las vibraciones pueden tener su origen en distintas fuentes, por ejemplo, si hay algún aparato sobre la misma mesa de trabajo con partes mecánicas funcionando, pudiera suceder que se transmitan a la estructura del tubo. Por esta razón, la caja que contiene el altavoz no debe estar en contacto directo con el cuerpo del tubo, pues evidentemente, ésta es la mayor fuente de vibraciones.

Además de las precauciones que se tomaron para aislar la caja del altavoz del cuerpo del tubo mediante o-rings, los soportes que nivelan al tubo en las uniones (portamuestras y terminación absorbente), así como la caja del altavoz, fueron recubiertos con hule suave en su base. Además, como se expuso en la sección 4.5, el dispositivo se colocó sobre una plancha de madera aislada de la mesa con tiras de material suave. En la Figura 5. 1 se muestran los detalles de este aislamiento.

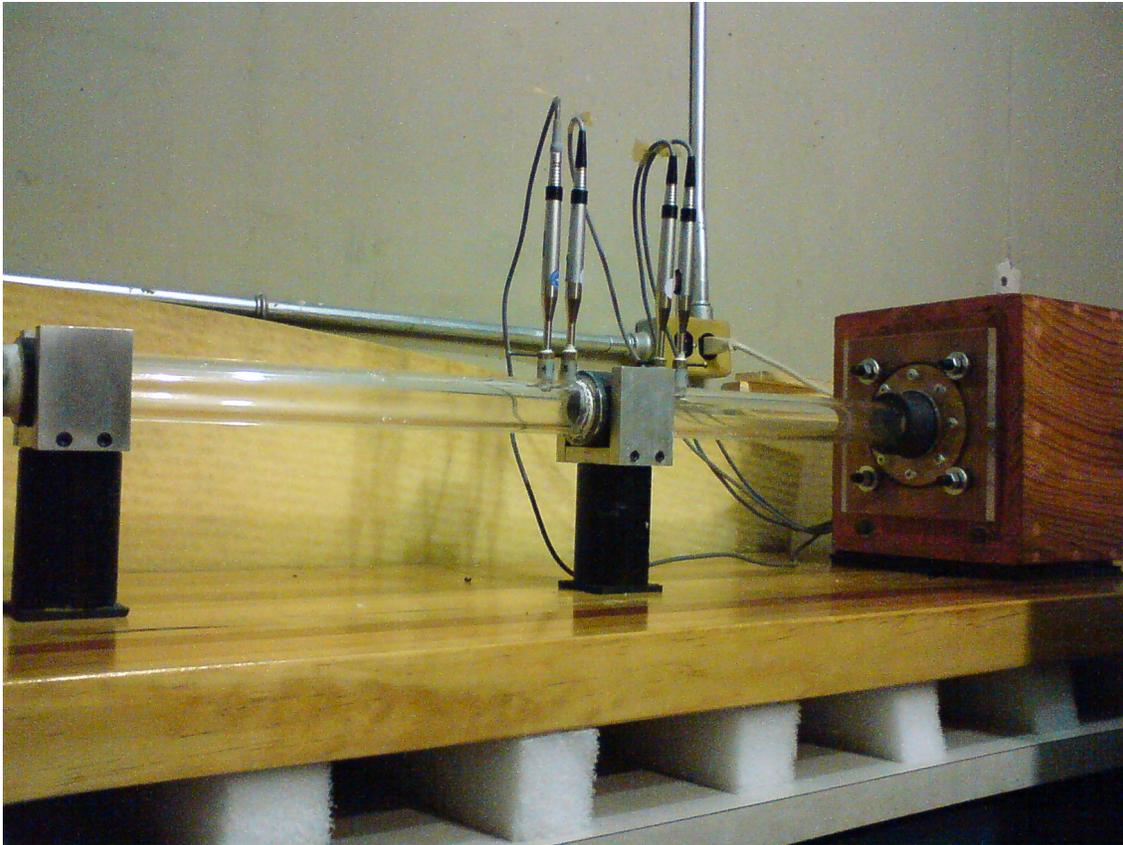


Figura 5. 1. Plancha de madera aislada de la mesa sobre la cual fue montado el tubo de transmisión. También puede observarse que los soportes y la caja del altavoz se amortiguaron en la base con goma (color negro).

5.1.3 VELOCIDAD DEL SONIDO c_0

Dentro del procesamiento de las señales de presión obtenidas, es necesario incorporar el valor de la velocidad del sonido en el aire del lugar en que se llevaron a cabo las mediciones, de esta manera, se pretende mejorar la exactitud. El cálculo de este parámetro se incluyó en el código de programación como la siguiente expresión:

$$c = 331.41 + 0.607t, \quad (5-1)$$

que es una aproximación simplificada^{xii} para el cálculo de la velocidad del sonido c en el aire, a partir de una expresión más general que considera de las condiciones termodinámicas de un gas. La temperatura t está en grados centígrados, con 0°C como el origen.

La temperatura promedio a la que fueron realizadas las pruebas reportadas fue de 23°C , es decir, $c \cong 345.37 \text{ m/s}$.

^{xii} El cálculo de c_0 (331.41 m/s , a 0°C) se lleva a cabo de manera experimental. Kinsler afirma que este valor, concuerda aceptablemente con las predicciones teóricas. Se revisaron los valores obtenidos por otros autores, encontrando variaciones despreciables de acuerdo a nuestros fines.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En la mayor parte de las mediciones realizadas con ambos métodos, se utilizó el siguiente equipo como base de los experimentos:

- Tarjeta de audio de cuatro canales marca National Instruments, modelo NI-9233
- 4 Micrófonos de presión marca B&K, modelo 4938
- Amplificador de potencia marca YAMAHA, modelo AX-380
- Fuente de polarización para micrófonos B&K, modelo 2804
- Generador de ruido B&K modelo 1405
- Filtro paso banda Stanford Research Systems Mod. SR650
- Computadora personal de escritorio con procesador Intel® Core2duo @2.20GHz y 2GB de RAM

Las conexiones que se usaron para realizar las pruebas se muestran en la Figura 5. 2.

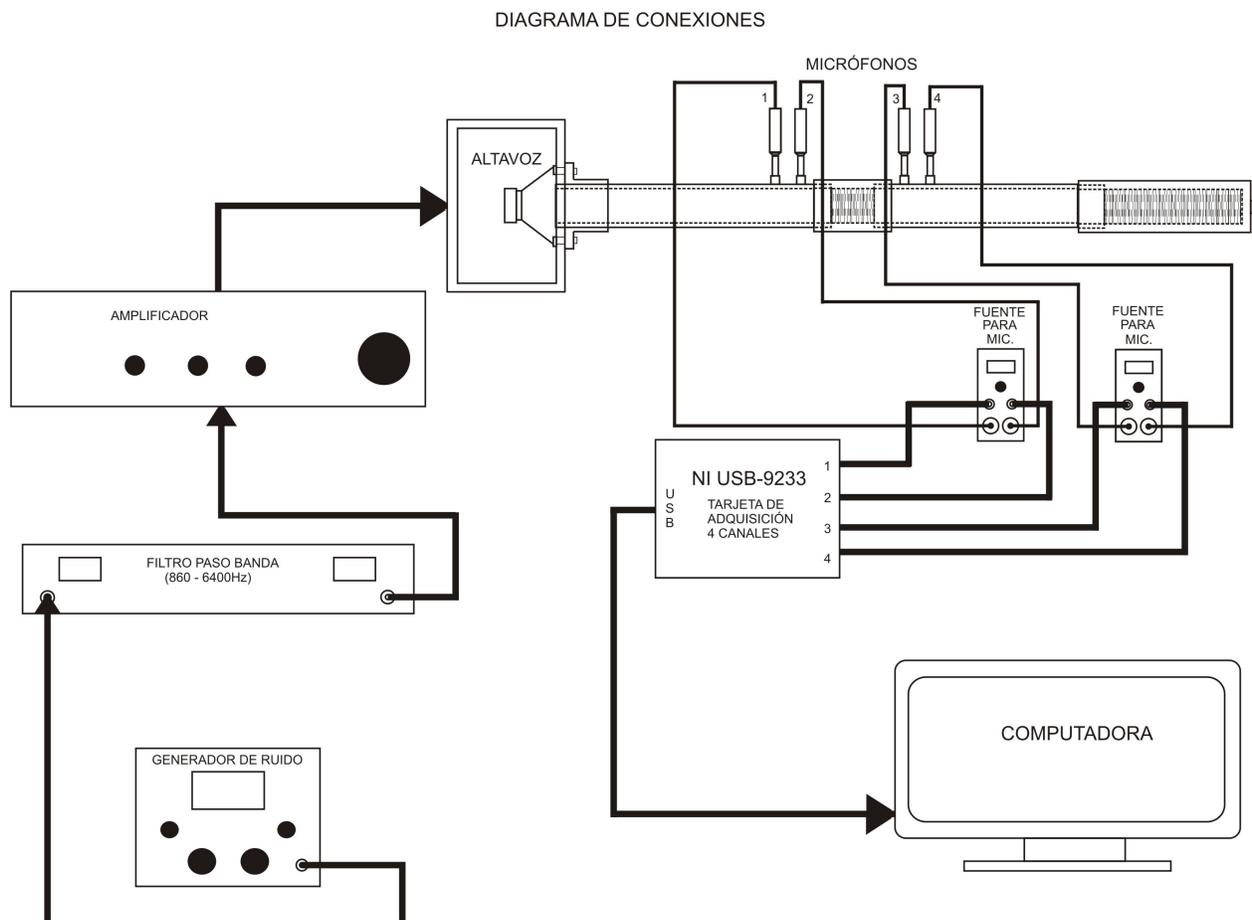


Figura 5. 2. Diagrama de conexiones empleadas en la mayor parte de las mediciones.

El procesamiento de las señales se realizó con un programa desarrollado en MATLAB versión 7.5 cuya función principal es comunicar a la computadora con la tarjeta de adquisición externa, y posteriormente calcular y promediar los espectros para la obtención del coeficiente complejo de transmisión (se eligieron 30 promedios para el primer método, y 100 para el segundo, de acuerdo a las capacidades del equipo).

El tiempo que toma realizar una medición completa es variable, y depende tanto del número de promedios elegido, como de la capacidad de la computadora utilizada. Por ejemplo, para el caso de 50 promedios, con el primer método y la computadora mencionada en la lista de equipo, el tiempo promedio de una prueba es de 12 minutos aproximadamente, que es el tiempo máximo que tomó realizar alguna prueba durante este trabajo.

El número de promedios que el sistema implementado es capaz de procesar dependerá del tamaño y cantidad de vectores adquiridos para cada medición y la capacidad de la computadora, ya que son almacenados en el disco duro antes de ser procesados^{xiii}.

El procedimiento de medición lleva varios pasos en secuencia que varían de acuerdo al método y formulación empleados. Por ejemplo, para poder llevar a cabo la corrección de fase, es necesario intercambiar las posiciones de los micrófonos 6 veces y dos veces las terminaciones del tubo. En las siguientes secciones, se explica la utilidad y detalles de los pasos más importantes para cada método, como calibración, excitación, etc.

5.2.1 CALIBRACIÓN

La calibración de amplitud de señal para la cadena de medición se hizo a través de un tono de 93.8dB a 1kHz proporcionado por el calibrador B&K4230.

Al igual que la estructura del tubo, es necesario aislar el calibrador de cualquier fuente de vibración.

Puesto que se cuenta con un solo calibrador, el proceso debe repetirse cuatro veces, una para cada micrófono.

El ajuste de la calibración se hace modificando un factor dentro del código de programación, de manera que se obtenga el nivel señalado por la especificación del calibrador.

5.2.2 TIPO Y AMPLITUD DE LA SEÑAL DE PRUEBA

Se utilizó ruido blanco como señal de prueba, suministrado por el generador B&K 1405. El nivel de esta señal se controló con el amplificador de potencia, procurando una excitación mínima de 10dB por encima del ruido de fondo^[5], pero sin alcanzar niveles que generasen distorsión. En algunas pruebas, con cierto tipo de muestras (como el corcho, o concreto) fue necesario aumentar drásticamente el nivel, de excitación para elevar la relación señal a ruido, pero además de encontrar la presencia de distorsión, los resultados fueron poco confiables (con baja

^{xiii} Hace falta mejorar el código de procesamiento, implementando un búfer dinámico de lectura, para que no sea necesario almacenar en memoria los vectores completos, y se pueda realizar un mayor número de promedios, de otra forma, sería necesario instalar más memoria RAM a la computadora.

correlación entre la señal de entrada y la de salida) debido a la baja relación señal a ruido en la segunda sección del tubo.

5.2.3 CORRECCIÓN DE FASE

La exactitud de la medición de una función de transferencia, se ve afectada por la disparidad entre los micrófonos que sensan la amplitud y fase de la presión. Los micrófonos utilizados en este trabajo no están pareados, por lo que es necesario corregir el error de fase y amplitud para cada función de transferencia medida.

El método de corrección aplicado, fue el que establece la norma E1050. En este método, es necesario hacer tres mediciones para cada función de transferencia en las que se deben intercambiar las posiciones de los micrófonos involucrados. Por ejemplo, si se desea medir la función de transferencia entre los micrófonos 1 y 2, $H_{12} = |H_{12}| e^{j\phi}$, primeramente se mide con los micrófonos colocados en su posición regular, con lo cual se obtiene la función

$$H_{12}^I = |H_{12}^I| e^{j\phi_I} \quad (5-2)$$

donde H_{12}^I y ϕ_I son funciones de la frecuencia. Posteriormente se intercambia la posición de los micrófonos (no las conexiones), para así obtener una nueva función

$$H_{12}^{II} = |H_{12}^{II}| e^{j\phi_{II}} \quad (5-3)$$

Con estas dos funciones, se calculan los factores de corrección que se aplicarán a la medición definitiva. Para la amplitud

$$|H^C| = \sqrt{|H_{12}^I| |H_{12}^{II}|} \quad (5-4)$$

Y para la fase

$$\phi_C = \frac{\phi_I + \phi_{II}}{2} \quad (5-5)$$

Finalmente, los micrófonos se regresan a su posición regular y se vuelve a tomar la medición,

$$H_{12}^{III} = |H_{12}^{III}| e^{j\phi_{III}} \quad (5-6)$$

y se aplican los factores calculados con las primeras dos mediciones

$$|H_{12}| = \frac{|H_{12}^{III}|}{|H^C|} \quad (5-7)$$

$$\phi = \phi_{III} - \phi_C \quad (5-8)$$

5.2.4 PROMEDIACIÓN ESPECTRAL

El objetivo de la promediación espectral es mejorar la relación señal a ruido de las funciones de transferencia, esto significa que, con un número pequeño de promedios, la respuesta puede presentar irregularidades (provocadas por transitorios) no necesariamente representativas del fenómeno analizado. Promediar los espectros medidos, puede cancelar algunos de los errores debidos al ruido. La cantidad de promedios depende de la exactitud que se desee obtener en la medición. Por ejemplo, si se desea caracterizar el índice de transmisión de una muestra masiva, conviene elevar el número de promedios ya que es muy probable que la relación señal a ruido sea baja en la segunda sección del tubo. Si la muestra no es muy masiva, y el entorno está libre de vibraciones o ruido contaminante, el número de promedios puede ser pequeño, con lo cual se tiene un tiempo de procesamiento considerablemente menor.

5.3 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DE CONDICIONES

Aún cuando se hayan tomado en cuenta todos los procedimientos y precauciones antes mencionados para llevar a cabo una medición exitosamente, es indispensable verificar que estas condiciones tengan el efecto esperado. Esta práctica también resulta útil para corroborar que no existan factores adicionales que afecten la medición, y que no se hayan tomado en cuenta.

En las siguientes secciones se reportan las mediciones realizadas para comprobar y corregir la existencia de vibraciones y distorsiones no deseadas.

5.3.1 RUIDO INTRODUCIDO POR LA FUENTE DE LOS MICRÓFONOS

La fuente B&K 2804, que proporciona el voltaje de polarización para los micrófonos, se puede utilizar de dos formas, con baterías o con alimentación de la red eléctrica. Con las fuentes conectadas a la red se encontró que la señal de los micrófonos se contaminaba con ruido eléctrico inducido (Figura 5. 3), y utilizando baterías esto no ocurría, obteniendo una mejoría sustancial en la señal captada por los micrófonos (Figura 5. 4).

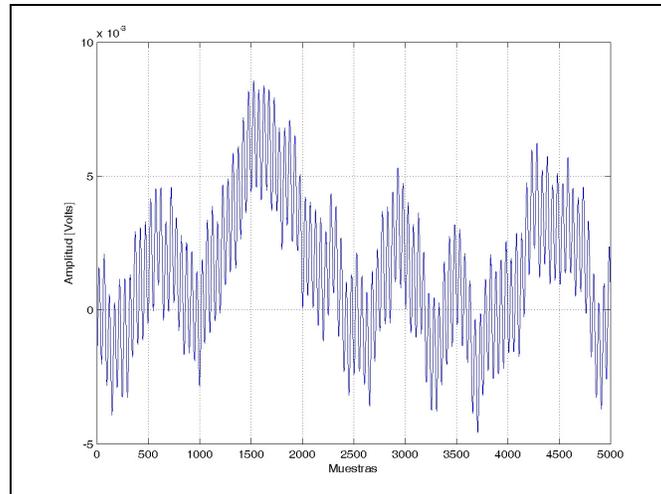


Figura 5. 3. Señal temporal obtenida con la fuente B&K2804 conectada a la red eléctrica. Se observa que el tono de calibración de 1kHz suministrado a los micrófonos (señal de oscilaciones rápidas) está “montado” en ruido inducido (oscilaciones lentas e inestables).

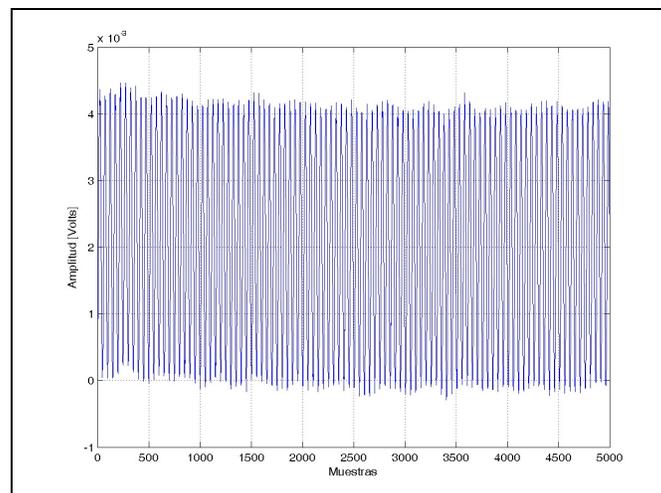


Figura 5. 4. Señal de tiempo, utilizando la fuente B&K2804 con baterías.

5.3.2 DISTORSIÓN ARMÓNICA

Es posible que cuando se suministra una excitación excesivamente alta, se alcance la región de respuesta no lineal del altavoz, donde se presentan componentes armónicas que no forman parte de la señal de excitación original. Para determinar este umbral, se llevaron a cabo pruebas tonales para evidenciar una posible distorsión de la señal suministrada por el altavoz.

Para estas pruebas no se colocó muestra entre los micrófonos de cada sección del tubo, se utilizó como señal de excitación tonos senoidales, y se promediaron 10 espectros para cada prueba. Se utilizaron tres niveles distintos y se repitió el experimento para 10 frecuencias diferentes, como se muestra en la Tabla 5. 1.

Tabla 5. 1. Niveles de excitación, frecuencias de las señales senoidales para las pruebas tonales de distorsión y distorsión armónica total para cada frecuencia de prueba.

NIVEL DE EXCITACIÓN	FRECUENCIA [Hz]	Distorsión Armónica Total [%]
Nivel “moderado”, o “de medición” (máximo nivel para la tarjeta de la PC; 25% de la capacidad del amplificador)	800	0
	1000	0
	1250	0.5
	1600	0.3
	2000	1.0
	2500	0.5
	3150	0.5
	4000	0.1
	5000	0.2
	6000	0.5
Nivel “medio” (máximo nivel para la tarjeta de la PC; 35% de la capacidad del amplificador)	800	0.2
	1000	0.2
	1250	0.9
	1600	0.7
	2000	3.5
	2500	0.5
	3150	0.7
	4000	0.3
	5000	0.7
	6000	0.3
Nivel “alto” (máximo nivel para la tarjeta de la PC; 50% de la capacidad del amplificador)	800	0.5
	1000	0.5
	1250	1.5
	1600	1.0
	2000	6.0
	2500	1.0
	3150	1.2
	4000	0.5
	5000	1.1
	6000	0.2

En la Tabla 5. 1 se puede observar que, de acuerdo al nivel de excitación, aparecen componentes de distorsión cada vez mayores, particularmente en 2000Hz, donde la distorsión armónica total alcanza un 6% a nivel alto de excitación. A nivel “moderado”, que es el nivel utilizado en las mediciones, la distorsión es suficientemente baja en todas las frecuencias analizadas (menor o igual a 1%).

5.3.3 PRUEBA PRELIMINAR DE AISLAMIENTO

Para conocer el comportamiento del tubo de transmisión construido, se analizó el valor de aislamiento para el ancho de banda útil. Para ello, se midió el nivel de presión sonora, primero sin muestra, y después con una muestra que consistió en un bloque de latón de dos pulgadas de longitud, intentando un bloqueo casi total de la energía transmitida a la segunda sección del tubo.

En la medición sin muestra se espera que el nivel de la señal tenga sólo pequeñas variaciones de un micrófono a otro, debidas a la atenuación de la señal por efecto de los muros del tubo y

por la distribución (difícilmente esbozable) de los modos correspondientes a las frecuencias de excitación. Se obtuvieron los siguientes valores para los micrófonos, siendo el número 1, el micrófono más cercano al altavoz, y el 4 el más alejado del altavoz y cercano a la terminación absorbente, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 5. 2. Amplitud promedio de la señal captada con cada micrófono, sin muestra en el tubo.

Canal	Amplitud en dB
1	114.37
2	114.41
3	112.54
4	112.62

La diferencia de poco menos de 2dB entre los micrófonos antes (1 y 2) y después (3 y 4) del portamuestras es muy grande para poder atribuir la únicamente a las pérdidas ocasionadas por las paredes del tubo. Se observó que esta diferencia variaba según el tipo de terminación absorbente utilizada. Al colocar la terminación larga, o cambiar el número de bloques absorbentes de poliuretano en el interior de la terminación, este valor se modificó notablemente. Lo anterior podría significar que, al modificarse la distribución de los modos dentro del tubo, la posición de los micrófonos coincide con valores de presión distintos, por lo cual se observa un comportamiento diferente entre los pares de micrófonos 1,2 y 3,4.

La realización de esta prueba fue motivada porque, independientemente al tipo de muestra, el micrófono 4 siempre captó un valor RMS más elevado que el micrófono 3.

Cuando se utiliza el cilindro de latón para bloquear el tubo casi por completo (pueden existir intersticios entre el cilindro y las paredes del tubo), se encontraron los siguientes valores,

Tabla 5. 3. Amplitud promedio de la señal captada con cada micrófono, con un bloque de latón como muestra.

Canal	Amplitud en dB
1	118.30
2	119.91
3	75.59
4	90.82

Nuevamente, el valor del micrófono 4 es mayor al sentido con el micrófono 3. De acuerdo a la explicación anterior, esta diferencia también se atribuye a la distribución de modos.

5.4 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de dos métodos y formulaciones diferentes. El primero es el método de Panneton y Salissou.^[15], y el segundo corresponde a la formulación propuesta, desarrollada y expuesta en la sección 3.2.

5.4.1 RESULTADOS CON LA PRIMERA FORMULACIÓN

Las mediciones basadas en la primera formulación se llevaron a cabo de acuerdo a la siguiente configuración:

- 30 promedios espectrales
- Corrección de fase entre micrófonos
- Utilización de dos terminaciones absorbentes distintas
- Arreglo previamente calibrado en amplitud
- Procesamiento de 16384 muestras de la señal, por disparo de la tarjeta de adquisición (trigger)
- Frecuencia de muestreo de 12500Hz
- Ruido blanco como señal de prueba, pasada por un filtro pasobanda tipo elíptico de 2° orden y frecuencias de corte de 860 y 6800 Hz, que corresponden a las frecuencias límite del ancho de banda útil del tubo.
- Señales adquiridas filtradas digitalmente antes del procesamiento con un filtro paso banda tipo Butterworth de 2° orden y frecuencias de corte de 600 y 6250Hz. Este filtrado digital, tiene principalmente la finalidad de eliminar las frecuencias fuera del ancho de banda útil, que no pertenecen a las de la señal de prueba, es decir, las introducidas por ruidos externos al tubo. Se desea sobretodo, eliminar frecuencias bajas, presentes en eventos comunes dentro del laboratorio, por ejemplo, en el cierre o apertura de puertas. La primera frecuencia se eligió menor que la frecuencia de trabajo más baja del tubo (860Hz) para no afectar el ancho de banda útil. La frecuencia superior se eligió como la mitad de la frecuencia de muestreo (12500Hz), para evitar interpretaciones erróneas en los resultados arrojados por encima de 6250Hz.

Estas mediciones se efectuaron para 3 casos:

- Sin muestra
- Muestra de espuma de poliuretano de una pulgada de espesor
- Muestra de corcho de 25mm de espesor

Una vez calibrada la cadena de medición, y con la terminación absorbente corta colocada en su lugar, el procedimiento de medición consta de los siguientes pasos:

- a. Introducir variables de inicio al programa principal de adquisición y procesamiento:
 - i. Número de muestras por disparo de la tarjeta de adquisición
 - ii. Tasa de muestreo
 - iii. Número de promedios espectrales
 - iv. Sensibilidad de cada micrófono
- b. Cuando el programa lo indique, intercambiar la posición de los micrófonos 1, 2, y 3, 4, sin alterar sus conexiones eléctricas
- c. Regresar los micrófonos 1 y 4 a su posición original, e intercambiar 2 por 3, y viceversa
- d. Regresar todos los micrófonos a su posición original

- e. Cambiar la terminación corta del tubo por la más absorbente (larga)
- f. Intercambiar la posición de los micrófonos 1, 2, y 3, 4, sin alterar sus conexiones eléctricas
- g. Regresar los micrófonos 1 y 4 a su posición original, e intercambiar 2 por 3, y viceversa
- h. Regresar todos los micrófonos a su posición original
- i. Fin de la medición

La primera medición (gráficas de la Figura 5. 5) se implementó sin muestra, es decir, en la condición donde el coeficiente de transmisión debe ser unitario, o del 100%.

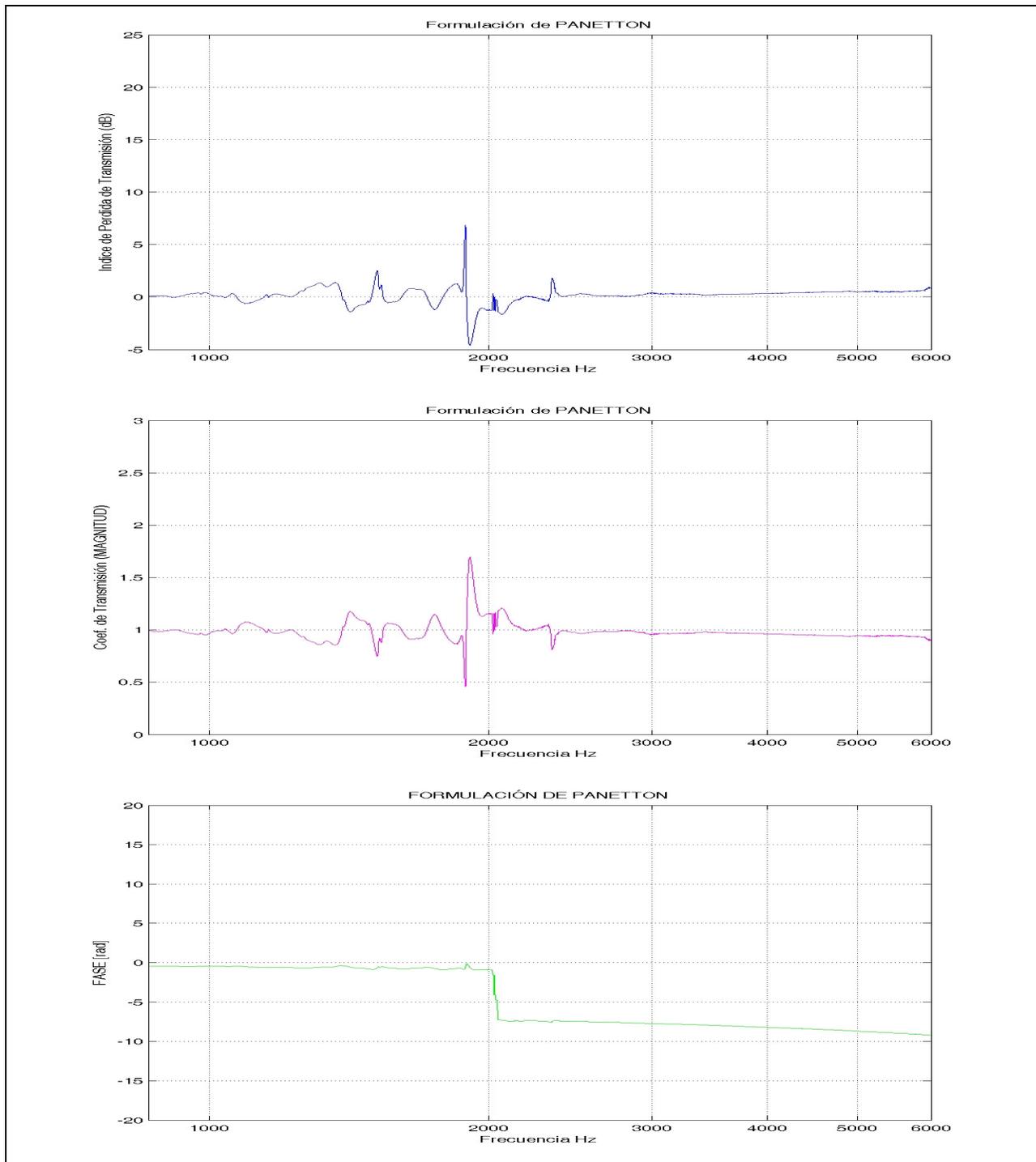


Figura 5. 5. Índice de pérdida de transmisión, coeficiente de transmisión y su fase con el portamuestras vacío, obtenido con la formulación de Panneton, *et al.* Exceptuando los picos, la medición oscila alrededor de un valor unitario, pues la energía es transmitida en su totalidad al otro lado del portamuestras.

En la Figura 5. 5 se observa que el comportamiento del dispositivo de medición en la condición más simple es aproximadamente el esperado, esto es, que el coeficiente de transmisión es muy cercano al valor unitario, con algunas oscilaciones y un pico en el que su valor sobrepasa esta

tendencia. A 1940 Hz (que equivale a una longitud de onda de unos 17.8cm, dimensiones aproximadas de algunas piezas del tubo, como el portamuestras, la terminación, etc.), el salto corresponde a una resonancia propia del tubo; a esta frecuencia, la coherencia decae notablemente. Es muy probable que las oscilaciones se deban al efecto de las ondas estacionarias que se forman dentro del tubo de acuerdo a sus dimensiones físicas. Este comportamiento ya ha sido observado por otros autores cuando el interior del tubo es poco absorbente, por ejemplo, cuando utilizan terminaciones rígidas (reflejantes)^[15, 17].

También se hicieron pruebas con distintos materiales. Por ejemplo, el coeficiente de transmisión para una espuma de poliuretano de una pulgada de longitud y densidad de 32 kg/m³, material poroso y homogéneo, tuvo el comportamiento que se muestra en las gráficas de la Figura 5. 6.

La magnitud del coeficiente de transmisión para este caso decae de 0.57 a 0.32, entre 860 y 6000Hz. Esto implica una pérdida de transmisión de 5dB en frecuencias menores a 1500Hz, que se incrementa en forma aproximadamente constante (en una escala logarítmica), hasta llegar a 10dB para 6000Hz. En la Figura 5. 6 de nuevo se observan cambios en la tendencia general del coeficiente alrededor de 1940Hz. Con las precauciones tomadas con anticipación, quedaron descartados como factores determinantes los efectos de vibraciones parásitas, distorsión por alto nivel de excitación, o una mala adquisición de la señal de procesamiento^{xiv}, por lo que nuevamente, estas irregularidades se atribuyen a la resonancia de alguna de las piezas que componen el arreglo experimental, o incluso del mismo altavoz. Como otra posible razón de efectos no esperados, se ha considerado que al intercambiar micrófonos y piezas del tubo dentro de una misma medición, se tengan desacoplamientos mecánicos que finalmente provoquen que las funciones de transferencia estén siendo calculadas bajo condiciones físicas distintas.

^{xiv} Con ayuda del analizador B&K Mod. 2034, se realizó la adquisición de señales, promediación y cálculo de las funciones de transferencia, encontrando una correspondencia casi perfecta con las funciones de transferencia adquiridas con el arreglo experimental propuesto en este trabajo.

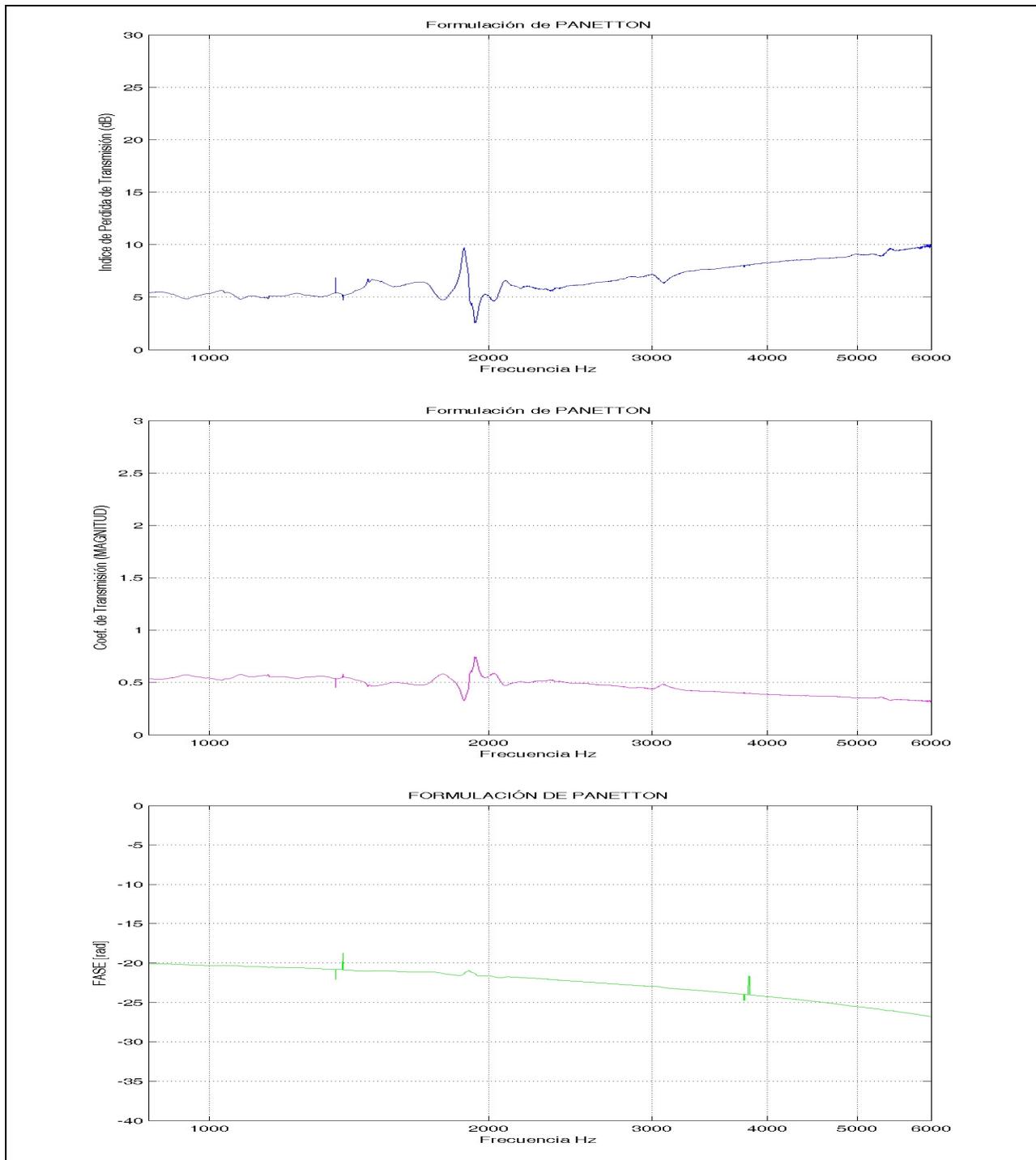


Figura 5. 6. Índice de pérdida de transmisión, coeficiente de transmisión y su fase (abajo) para espuma de poliuretano de 32Kg/m^3 , obtenido con la formulación de Panneton, *et al.*

Cuando se hizo la prueba con corcho como muestra, fue necesario reducir su grosor a 25 mm, pues con el espesor estándar de una pulgada, la coherencia resultó tan baja que los resultados eran completamente ilegibles. Aún así, lo que se obtuvo con la muestra adelgazada es un resultado bastante irregular, como puede apreciarse en la Figura 5. 7.

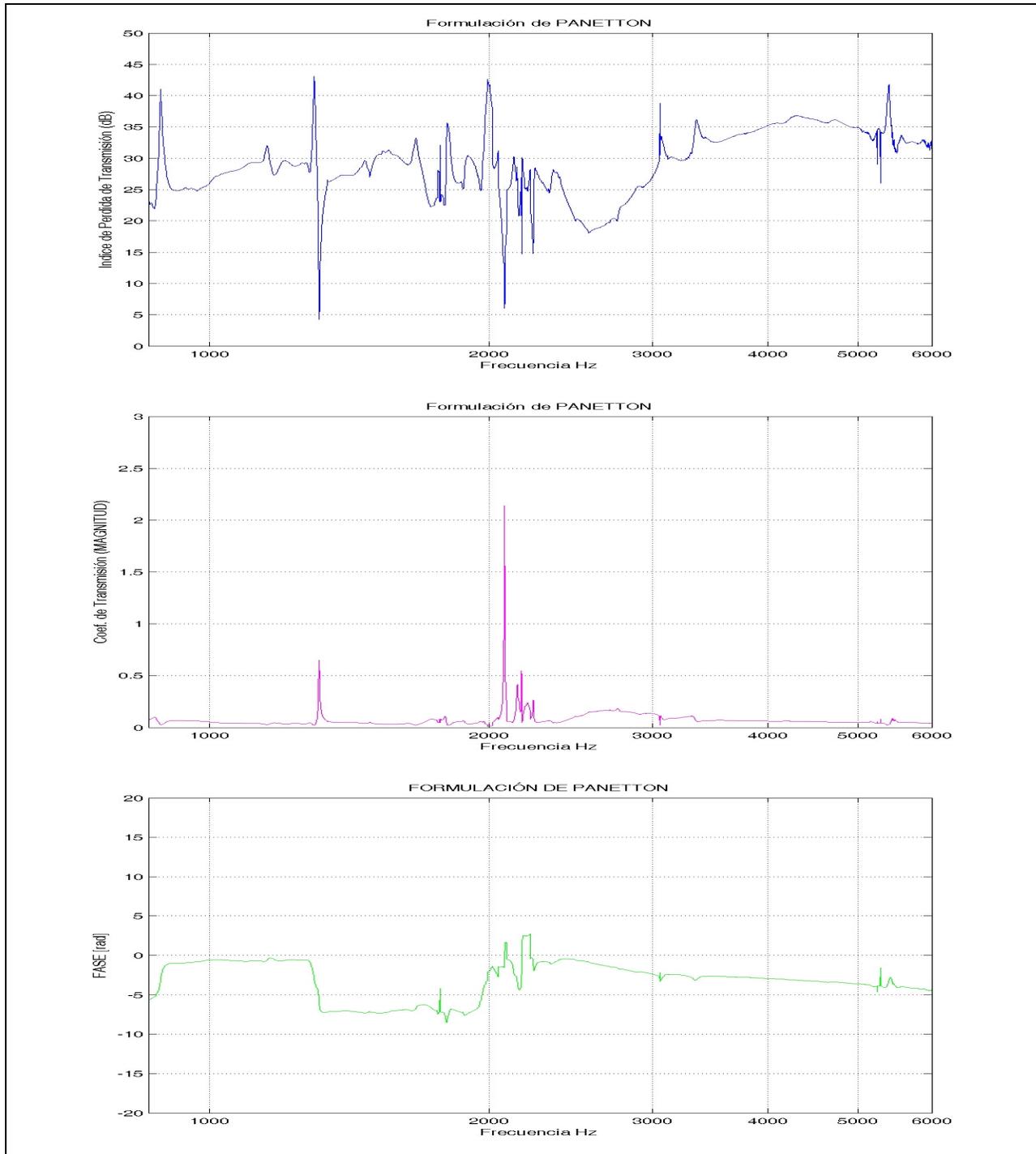


Figura 5. 7. Índice de pérdida de transmisión, coeficiente de transmisión y su fase para una muestra de corcho de 25mm de espesor, obtenido con la formulación de Panneton, *et al.* Los resultados obtenidos dan apenas una ligera noción del comportamiento del material, esto se debe a la baja correlación que hay entre las señales capturadas en uno y otro lado de la muestra.

Los resultados presentados en la Figura 5. 7 son poco satisfactorios al no definirse una tendencia clara en el índice de pérdida de transmisión. El nivel de aislamiento relativamente alto conlleva una baja coherencia entre las señales de los micrófonos. Es por ello que una medición con alto nivel de aislamiento, sólo puede proporcionar una idea aproximada del comportamiento de la muestra analizada. En la Figura 5. 8 se presenta la coherencia entre los micrófonos 4 y 3 (situados después de la muestra, es decir, del lado de la terminación absorbente).

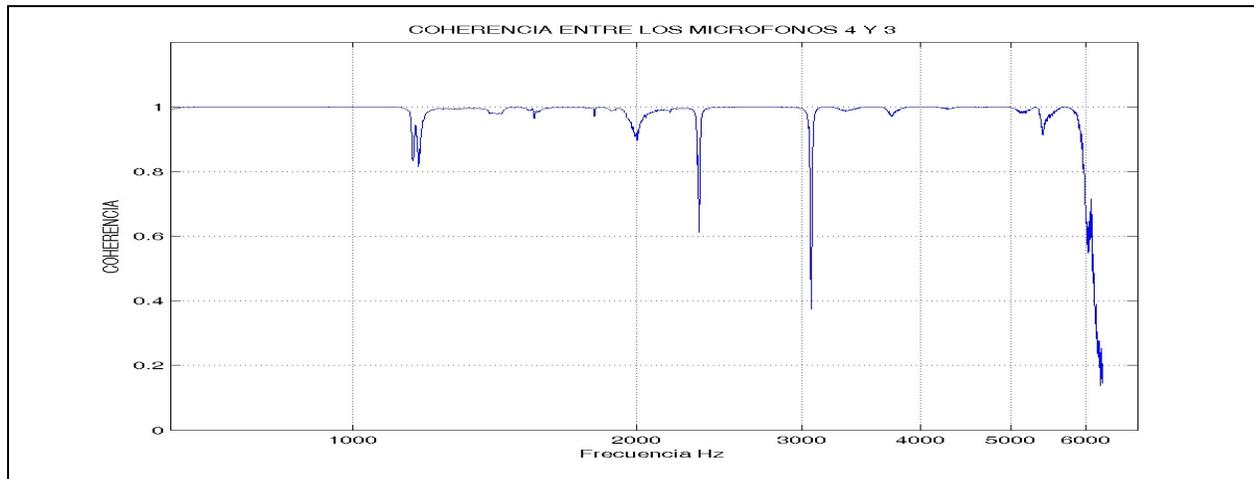


Figura 5. 8. Coherencia entre los micrófonos 4 y 3 para una muestra de corcho de 25mm de espesor. Pueden apreciarse algunos altibajos en distintas frecuencias, que implican una medición poco confiable.

El valor de coherencia con respecto a la frecuencia tiene varias caídas que indican que los resultados obtenidos para esas regiones del espectro, no podrían ser considerados como confiables.

5.4.2 RESULTADOS CON LA SEGUNDA FORMULACIÓN

Los resultados obtenidos con la nueva formulación desarrollada para este trabajo, corresponden a la caracterización de la misma muestra de poliuretano de 32 kg/m^3 . Es muy importante aclarar que esta formulación no es equivalente a la expuesta en el apartado anterior, y que además, está planteada para tener validez en muestras de características diferentes (materiales porosos, homogéneos y simétricos).

Se empleó la siguiente configuración:

- 100 promedios espectrales
- Terminación absorbente larga
- Arreglo previamente calibrado en amplitud
- Procesamiento de 16384 muestras de la señal por disparo de la tarjeta de adquisición (trigger)
- Frecuencia de muestreo de 12500Hz
- Ruido blanco como señal de prueba, pasada por un filtro pasobanda tipo elíptico de 2° orden y frecuencias de corte de 860 y 6800 Hz
- Señales adquiridas filtradas digitalmente antes del procesamiento con un filtro paso banda tipo Butterworth de 2° orden y frecuencias de corte de 600 y 6250Hz

El procedimiento de medición para la aplicación de esta formulación, es distinto al usado en el primer método, y se describe a continuación:

- a. Colocar la terminación absorbente larga al tubo de impedancias
- b. Realizar la calibración de amplitud del dispositivo
- c. Introducir variables de inicio al programa principal de adquisición y procesamiento:
 - i. Número de muestras por disparo de la tarjeta de adquisición
 - ii. Tasa de muestreo
 - iii. Número de promedios espectrales
 - iv. Sensibilidad de cada micrófono
- d. Correr el programa de adquisición y procesamiento
- e. Fin de la medición

Ya que el procedimiento de medición requerido para la nueva formulación es similar al utilizado por otros autores para la aplicación de sus propias formulaciones, resultó sencillo implementar la comparación entre ésta y las otras formulaciones, es decir, dicha comparación es únicamente entre las distintas expresiones matemáticas para el cálculo del coeficiente de transmisión, pues las condiciones en que se realiza el experimento (fuente de excitación, tipo de muestra, etc.), no son exactamente las empleadas por los demás autores.

En la Figura 5. 9, se muestran la magnitud y fase del coeficiente complejo de transmisión utilizando cuatro formulaciones diferentes; en color azul, la definición teórica (C/A); en turquesa, Liu *et al.*^[31]; en rojo, Pompoli *et al.*^[26] y en verde, la nueva formulación propuesta. La medición para todos los casos se realizó bajo las mismas condiciones y utilizando el mismo material de prueba.

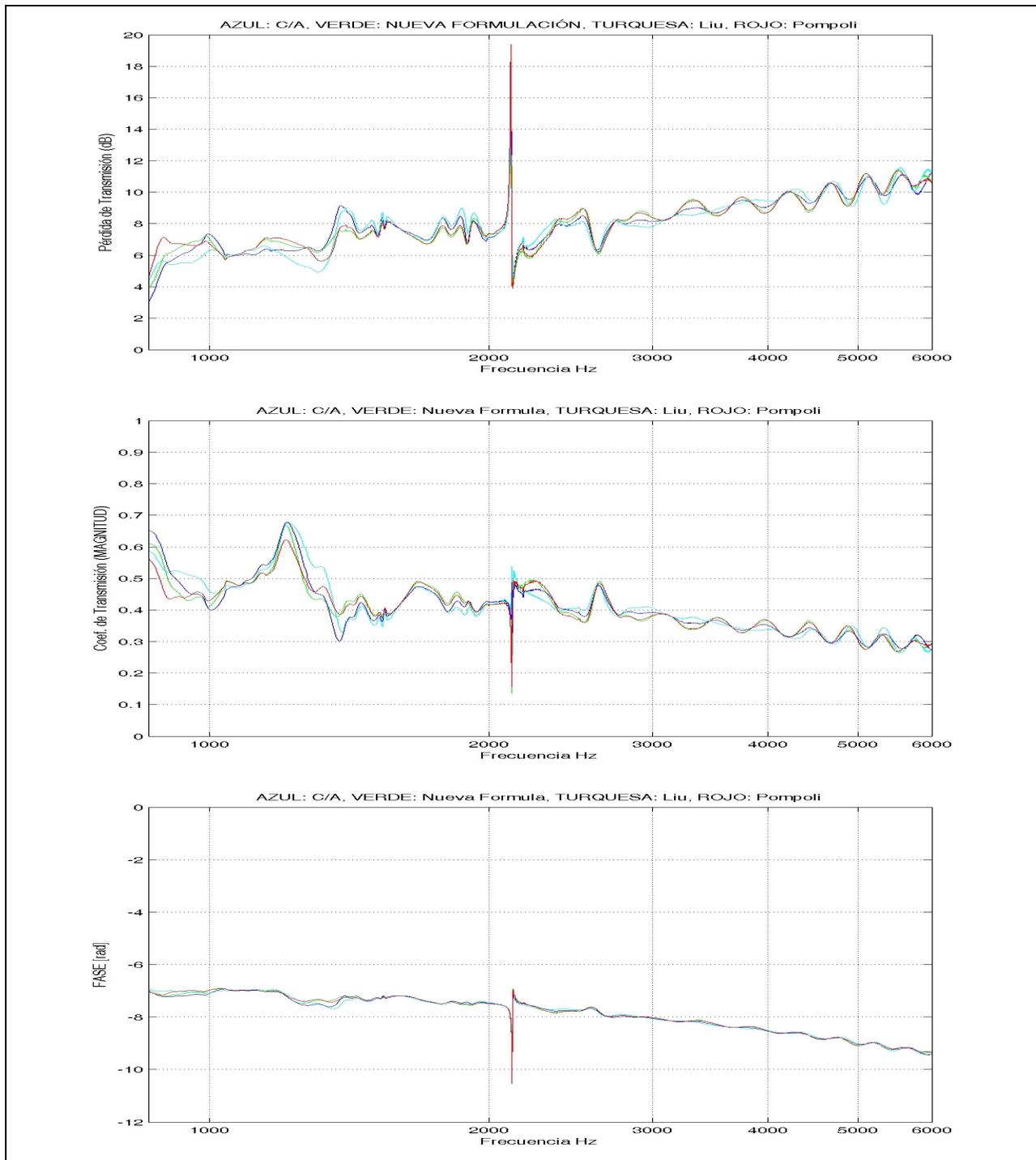


Figura 5. 9. Magnitud (dB) y fase (en radianes) del coeficiente complejo de transmisión calculado con diferentes formulaciones. AZUL: C/A (definición), VERDE: nueva formulación propuesta, ROJO: Liu *et al.*, TURQUESA: Pompoli *et al.* Se utilizó la misma muestra de poliuretano que en el primer método.

De acuerdo a lo observado en la Figura 5. 9, existen muchas similitudes entre el cálculo realizado con estas cuatro formulaciones. A pesar de seguir una tendencia relativamente clara, se presentan muchas oscilaciones en la información obtenida, incluso en la fase.

Hay una discontinuidad en la gráfica alrededor de 2078Hz (longitud de onda de 16.6cm). Esta posible resonancia, apareció en otras mediciones a 1940Hz. Para el momento en que se realizaron las pruebas de esta sección, fue necesario cambiar el altavoz, por un repuesto de la misma marca y modelo, la resonancia se desplazó algunos hertz en las mediciones posteriores al cambio de altavoz, lo cual podría significar que es este dispositivo el que produce la irregularidad mencionada.

5.4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Intuitivamente, se sabe que una muestra de material poroso y homogéneo presentará una mayor pérdida de transmisión en altas frecuencias (longitudes de onda pequeñas respecto a la muestra), por lo que los resultados de cada método obtenidos en las mediciones con la espuma de poliuretano son, en buena medida, los esperados. Aunque no se cuenta con un dato patrón o normalizado sobre las características acústicas de transmisión de la muestra de poliuretano utilizada, es posible hacer una comparación entre los resultados obtenidos con el primer y segundo métodos, para así verificar que exista una correspondencia entre las mediciones con ambos métodos.

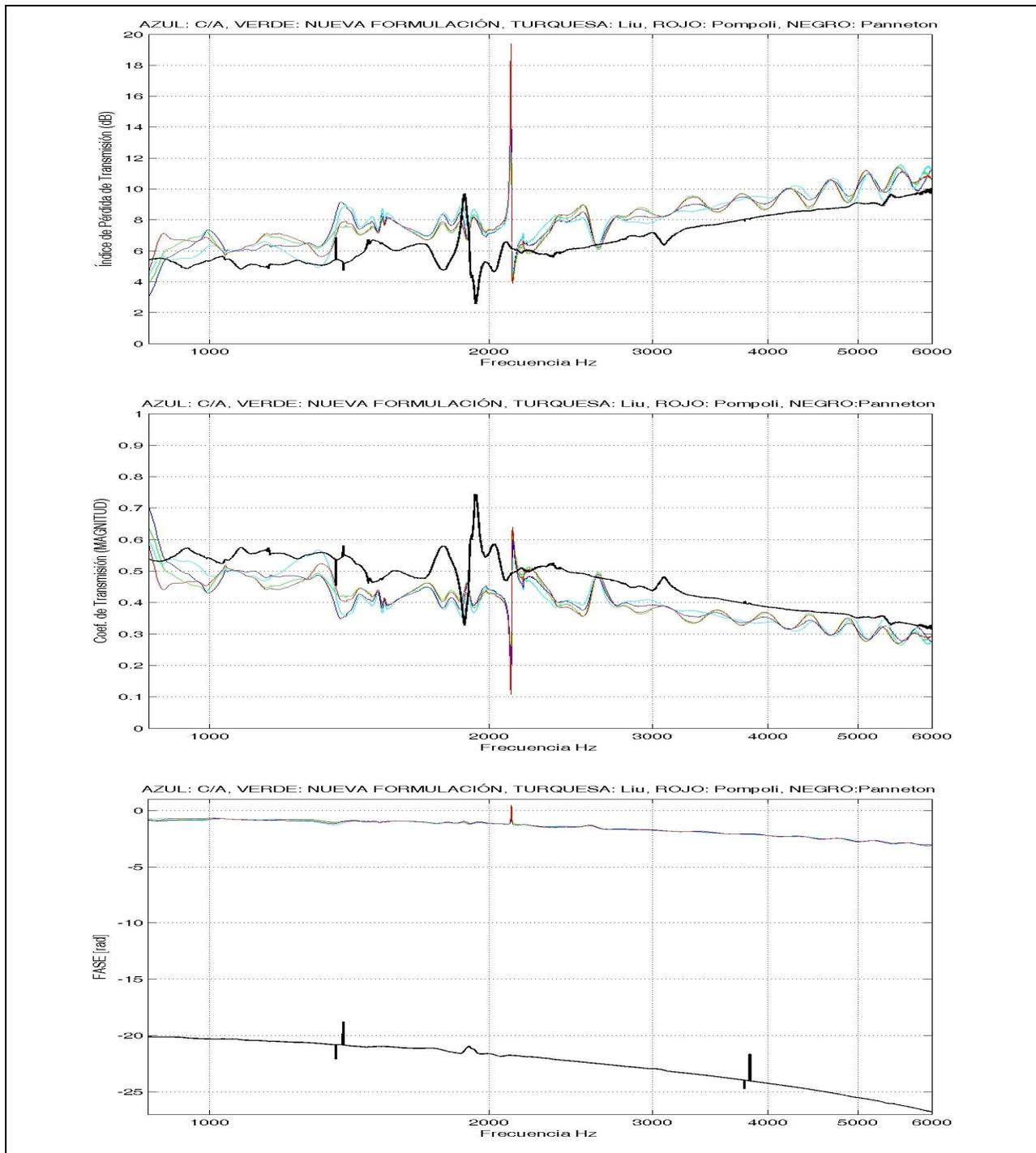


Figura 5. 10. Comparación gráfica entre los resultados obtenidos con el método de Panneton y Salissou (en color negro), y con el método que ocupa la nueva formulación (en color verde), así como otros métodos similares a este último (otros colores).

De acuerdo a las gráficas de la Figura 5. 10, tal y como es reportado en el artículo de Salissou y Panneton^[15], las oscilaciones presentes en métodos de síntesis de onda, que utilizan una sola terminación (colores azul, verde, turquesa y rojo), disminuyen con las técnicas y formulaciones que sugieren estos autores (línea en color negro).

Las resonancias que aparentemente se deben al altavoz, aparecen en 1940Hz para el primer método, y en 2078Hz para el segundo. Estas mediciones se realizaron con diferentes altavoces.

Al comparar la magnitud de los coeficientes de transmisión, se observa una diferencia aproximadamente constante entre los resultados de la primera formulación y el segundo grupo de formulaciones. Hace falta llevar a cabo más mediciones con distintos materiales para indagar las razones de esta diferencia.

5.5 REPRODUCIBILIDAD

Para conocer la reproducibilidad de los resultados obtenidos con el dispositivo desarrollado cada medición se repitió 5 veces, encontrándose algunas variaciones importantes en algunos casos. Para el caso concreto del primer método, hubo variaciones de más del 30% en el coeficiente de transmisión entre una medición y otra en puntos correspondientes, por lo que no se puede considerar que las mediciones sean reproducibles, posiblemente porque es necesario manipular el tubo durante la medición.

Para el segundo método, la reproducibilidad mejoró notablemente. Se observaron cambios de un orden similar a los del primer método, pero únicamente para regiones estrechas en el dominio de la frecuencia (mucho menos de un tercio de octava). Es importante notar que el procedimiento de medición para el cálculo de la transmisión con ésta formulación no exige un intercambio de micrófonos o de la terminación absorbente^{xv}.

^{xv} Se probó hacer la medición implementando una sujeción más firme del tubo, y se encontró una mejor relación señal a ruido, que permitió una repetición de resultados aún con mayor precisión.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 RECAPITULACIÓN

Para este trabajo de tesis se revisó el estado del arte en el tema de medición del coeficiente de transmisión sonora con el tubo de impedancias. A partir de este estudio, se diseñó y construyó un tubo de impedancias para poder implementar dos diferentes métodos de medición del parámetro mencionado, aplicados a materiales porosos. Ambos métodos se basan en la teoría de descomposición de onda.

El primer método^[15] contempla materiales porosos, homogéneos y de estructura sencilla o multicapa, esto gracias a que en su análisis incorpora las múltiples reflexiones que ocurren dentro del tubo, tomando en cuenta que la impedancia del material a prueba es distinta cuando las ondas viajan en un sentido u otro.

El segundo método presentado, utiliza la nueva expresión de cálculo del coeficiente de transmisión desarrollada en este trabajo y aplica a materiales porosos y homogéneos. Este método, en comparación con el primero, toma en cuenta solamente el efecto de una reflexión de las ondas de excitación en la terminación del tubo, después de haber atravesado la muestra, así como su transmisión a la primera sección cuando viaja de regreso hacia la muestra. Aunque en la teoría este método es menos exacto que el primero, tiene la ventaja de requerir mucho menos tiempo de medición.

6.2 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con ambos métodos presentan similitudes que, en general, pueden considerarse como una primera prueba del buen funcionamiento del dispositivo, y de la consistencia de las formulaciones empleadas. Es necesario realizar mas pruebas en las que se pueda contar con un material previamente caracterizado en la bibliografía, a fin de corroborar la exactitud estos resultados.

Siendo dos métodos distintos para la adquisición de las señales necesarias para el cálculo del coeficiente de transmisión, cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas en cuanto a su implementación y calidad de los resultados obtenidos:

El primer método tiene muchas posibilidades de alcanzar buen nivel de exactitud, pues considera materiales de diversos tipos por medio de un análisis exhaustivo de las reflexiones internas en el tubo. Tiene el inconveniente de ser difícil de implementar en un tubo de acrílico como el utilizado en la construcción de nuestro prototipo. Además, al necesitar de cambios de posición de los micrófonos de medición e incluso, cambios de piezas durante la adquisición de datos, el tiempo de medición se vuelve largo y susceptible a error humano.

El segundo método podría llegar a ser confiable, únicamente para el caso de materiales porosos y homogéneos, siempre y cuando la terminación del tubo sea lo suficientemente absorbente, para evitar que las reflexiones sucesivas dentro del tubo sean de un orden de magnitud similar a las ondas de excitación primarias. Para conocer la diferencia mínima admisible entre la energía de las ondas de excitación primarias y las reflexiones posteriores,

será necesario hacer un análisis de errores teniendo como referencia resultados validados con otro método, pero utilizando el mismo material.

Con la ventaja de ser un método que no requiere de cambios de conexión o posición en el dispositivo, es posible que el segundo método sea también el más efectivo para hacer un estudio exploratorio de materiales, dejando el trabajo de mayor precisión para el primer método.

Para ambos métodos, el uso de equipo adicional al tubo y la PC se puede reducir significativamente a solamente el amplificador de potencia y las fuentes de alimentación de los micrófonos. La señal de excitación puede generarse por medio de una rutina de programación. Por el momento, se realizaron las pruebas con equipo periférico para tener un programa de procesamiento con menos líneas de programación y más fácil de manipular. En este aspecto, lo más importante es la posibilidad de prescindir de un analizador de espectros.

Para este trabajo también fue necesario instrumentar técnicas normalizadas con un tubo de impedancias, con la finalidad de determinar el coeficiente de absorción del material utilizado en la terminación absorbente, necesaria para implementar los métodos revisados. Esta actividad, si bien se realizó con un tubo de impedancias, contribuyó a la familiarización con el proceso de medición de parámetros acústicos con tubos. Gracias a ello, se pudieron comprobar las ventajas y desventajas de algunas de las técnicas y métodos propuestos en la literatura, contribuyendo a un mejor diseño del tubo de transmisión. Éstas ventajas y desventajas son, en resumen, referentes al cuidado meticuloso que debe tenerse en la fabricación (corte) de la muestra y en el ensamble del tubo con todos sus accesorios, así como las condiciones de ruido de fondo permitidas.

6.3 RECOMENDACIONES

A través de la experiencia obtenida en este trabajo, es posible hacer las siguientes recomendaciones para mejorar la calidad de las mediciones efectuadas con un tubo de impedancias:

Es conveniente mejorar el código de programación en el módulo de promediación espectral, de manera que ésta se realice sin necesidad de almacenar todos los vectores de datos, ya que esto condiciona la cantidad de promedios posibles a la capacidad de memoria de la computadora utilizada. Es deseable que el número de promedios sea al menos de 100.

Es necesario probar nuevas posiciones para los micrófonos a lo largo del tubo, aunque ello implique modificaciones físicas del dispositivo, y por consecuencia, del ancho de banda útil. Es probable que, para longitudes de onda pequeñas, los micrófonos estén muy cerca de la muestra y que por ende, el campo acústico no esté compuesto por ondas totalmente planas, alterando el resultado final.

Con el objetivo de mejorar la reproducibilidad, se recomienda construir nuevamente el prototipo, ahora con un material más denso y rígido, por ejemplo de algún metal, para evitar al máximo las deformaciones y desacoples mecánicos que puedan ocurrir dentro de una misma adquisición de datos. Esta recomendación tiene el beneficio adicional de hacer más masiva la estructura de todo el dispositivo, mejorando su inmunidad a vibraciones mecánicas ajenas y a las que produce el propio altavoz y que se transmiten a través de las paredes del tubo, radiando hacia el interior.

Otra manera de solucionar el problema de la reproducibilidad, es evitando los cambios físicos en el arreglo dentro de una misma medición. Si esto no es posible, entonces se recomienda repetir la medición varias veces para después obtener una promediación.

6.4 TRABAJO FUTURO

Para asegurar la validez de los resultados obtenidos con el tubo de transmisión, se debe caracterizar al menos algún material igual a los reportados en la bibliografía y comparar ambos resultados. Otra forma de validar los cálculos, es enviar las muestras utilizadas a otro laboratorio que cuente con un tubo de transmisión y verificar si hay correspondencia entre los resultados obtenidos en ambos lugares (“trazabilidad”).

Quedan varias tareas pendientes para mejorar el desempeño y capacidades del tubo de transmisión. Por ejemplo, la construcción de otro tubo de mayor diámetro (10cm), con ancho de banda de 200 a 1600 Hz, aproximadamente, para cubrir con mejor resolución los parámetros de interés en bajas frecuencias.

Investigar nuevos métodos de medición y cálculo del coeficiente de transmisión de acuerdo a los requerimientos de varios tipos de muestra, con el objetivo de encontrar un método cada vez más general, que permita caracterizar materiales con menos restricciones de geometría y estructura de la muestra (y no únicamente materiales porosos, homogéneos e isotrópicos), sin comprometer la confiabilidad de las mediciones; esto aportará una mayor versatilidad que la reportada con métodos similares.

No existe hasta el momento un estudio que cuantifique la correlación entre las mediciones hechas con cámara de transmisión y las efectuadas con el tubo de transmisión, por lo que, una vez que los resultados que se obtienen con el tubo diseñado sean validados, y se elija una muestra apropiada, será posible realizar el trabajo necesario para evaluar el tubo de impedancias teniendo como referencia práctica los resultados normalizados de una cámara de transmisión.

APÉNDICES

APÉNDICE A. CÓDIGO DE MATLAB PARA LA ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS CON CORRECCIÓN DE FASE PARA LOS MICRÓFONOS

ADQUISIPAN4CH

```
function y = adquisipan4ch(M, fm, N, s1, s2, s3, s4);
%ADQUISICIÓN DE LOS BLOQUES DE SEÑAL
%Sintaxis: adquisicion4ch(M, fm, N, s1, s2, s3, s4)
% M - numero de muestras por disparo (preferentemente potencia de dos)
% fm - es la tasa de muestreo deseada [Hz]
% N - es el número de promedios deseado
% s1 - es la sensibilidad del micrófono usado en el canal 1 [V/Pa]
% s2 - es la sensibilidad del micrófono usado en el canal 2
% s3 - es la sensibilidad del micrófono usado en el canal 3
% s4 - es la sensibilidad del micrófono usado en el canal 4

j = 1;
while (j<5)
ai = analoginput('nidaq', 'Dev1');
canal = addchannel(ai, 0:3);
set(ai, 'SampleRate', fm);
fs = get(ai, 'SampleRate');
fprintf('\nFrecuencia de muestreo verdadera[Hz]= %1.0f\n', fs)
set(ai, 'SamplesPerTrigger', M);
Ts = 1/fs;
dur = M*Ts*N;
nm = M*N;
fprintf('Número de muestras adquiridas = %1.0f\n', nm)
fprintf('Duración de la señal [s] = %1.4f\n', dur)

set(canal, 'SensorRange', [-.05 .05]); %valores máximo y mínimo
                                     %esperados
                                     %(volts) (0.01volts)
set(canal, 'InputRange', [-5 5]); %si se desea conocer los valores
                                   %absolutos de presión,
                                   %se deberán reescalar los datos del
                                   %vector después de ser adquiridos
                                   %factor de 100

%SE CAPTURARÁN VARIOS BLOQUES DE SEÑAL (SEPARADOS POR NaN'S)
%Y SE GUARDARÁN EN ARCHIVOS ".daq"
fprintf('Número de bloques que componen la señal = %1.0f\n', N)
set(ai, 'TriggerRepeat', N-1);

if j==1
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234a00.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end

%SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw, time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234a00.daq');

elseif j==2
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\2143x00.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
```

```

set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end

%SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\2143x00.daq');

elseif j==3
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1324x00.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end

%SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1324x00.daq');

else
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234b00.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end
%SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234b00.daq');

end

ynan = yraw;
indice = find(isnan(ynan(:,1)))           %encuentra los indices de los
                                         %elementos NaN y los entrega en
                                         %un vector

%FILTRO PASO BANDA DE 600 A 6200Hz
fc1=600;
fmax=fs/2;
fnorm1=fc1/fmax;
fc2=6200;
fnorm2=fc2/fmax;
wn=[fnorm1 fnorm2];
[b,a]=butter(2,wn);

y1 = yraw(:,1);
y1 = y1(~isnan(y1));                   %remoción de NaN's del canal 1
                                         %del vector adquirido
y1 = dtrend(y1);                       %quita el offset de la señal
                                         %restandole su promedio
y1 = filter(b,a,y1);                   %filtrado digital pasobanda

y2 = yraw(:,2);
y2 = y2(~isnan(y2));                   %remoción de NaN's del canal 2
                                         %del vector adquirido
y2 = dtrend(y2);                       %quita el offset de la señal
                                         %restandole su promedio
y2 = filter(b,a,y2);                   % filtrado digital pasobanda

y3 = yraw(:,3);
y3 = y3(~isnan(y3));                   %remoción de NaN's del canal 3
                                         %del vector adquirido
y3 = dtrend(y3);                       %quita el offset de la señal

```

```

y3 = filter(b,a,y3);           %restandole su promedio
                               % filtrado digital pasobanda

y4 = yraw(:,4);
y4 = y4(~isnan(y4));          %remoción de NaN's del canal 4
                               %del vector adquirido
y4 = dtrend(y4);              %quita el offset de la señal
                               %restandole su promedio
y4 = filter(b,a,y4);          % filtrado digital pasobanda

y = [y1 y2 y3 y4];           %SEÑAL ADQUIRIDA (CUATRO CANALES)
y = y./100;                   %COMPENSANDO EL ESCALAMIENTO QUE SE HIZO
                               %PARA EL RANGO DINÁMICO DE LA TARJETA

%VALORES RMS
Vc1 = y(:,1).^2;
Vp1 = mean(Vc1);
Vrms1 = sqrt(Vp1);
Vrms1 = 20*log10(Vrms1/(20e-6*s2));
fprintf('Vrms canal 1 = %f\n',Vrms1)

Vc2 = y(:,2).^2;
Vp2 = mean(Vc2);
Vrms2 = sqrt(Vp2);
Vrms2 = 20*log10(Vrms2/(20e-6*s2));
fprintf('Vrms canal 2 = %f\n',Vrms2)

Vc3 = y(:,3).^2;
Vp3 = mean(Vc3);
Vrms3 = sqrt(Vp3);
Vrms3 = 20*log10(Vrms3/(20e-6*s3));
fprintf('Vrms canal 3 = %f\n',Vrms3)

Vc4 = y(:,4).^2;
Vp4 = mean(Vc4);
Vrms4 = sqrt(Vp4);
Vrms4 = 20*log10(Vrms4/(20e-6*s4));
fprintf('Vrms canal 4 = %f\n',Vrms4)

%LLAMADA A RUTINA DE CALIBRACIÓN DE LOS MICRÓFONOS
[ch1,ch2,ch3,ch4] = calibracion4ch(y,s1,s2,s3,s4);

%LLAMADA A CALCULO DE LA COHERENCIA PROMEDIADA
[C12,C32,C43] = cohepan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs);

%LLAMADA A CALCULO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PROMEDIADAS
[H12,H32,H43,tem,f] = pspecpan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs);

if j==1
    H12a=H12;
    H32a=H32;
    H43a=H43;
    fprintf('\n\n INTERCAMBIE la posición de los micrófonos 1,2 y 3,4 y presione
ENTER...')
elseif j==2
    H12b=H12;
    H43b=H43;
    fprintf('\n\n REGRESE los micrófonos 1, 4 a su posición e INTERCAMBIE la posición
de los micrófonos 2,3 y presione ENTER...')
elseif j==3

```

```

        H32b=H32;
        fprintf('\n\n REGRESE todos los micrófonos a la posición original y presione
ENTER...')
    else
        H12med=H12;
        H32med=H32;
        H43med=H43;
    end

    j = j+1;
    pause
end
fprintf('\n\n FIN DE ADQUISICIÓN CON TERMINACIÓN NO.1, para continuar presione
ENTER...\n')

%=====
%MÉTODO DE CORRECCIÓN DE FASE
H12r=real(H12a);
H12i=imag(H12a);
H12m=sqrt(H12r.^2+H12i.^2);
H12f=atan2(H12i,H12r);

H21r=real(H12b);
H21i=imag(H12b);
H21m=sqrt(H21r.^2+H21i.^2);
H21f=atan2(H21i,H21r);

Hcm = sqrt(abs(H12m).*abs(H21m));
Hcf = (H12f + H21f)/2;

Hr=real(H12med);
Hi=imag(H12med);
Hmag=sqrt(Hr.^2+Hi.^2);
Hfas=atan2(Hi,Hr);
H12m = Hmag./Hcm;
H12f = Hfas - Hcf;
%=====
H32r=real(H32a);
H32i=imag(H32a);
H32m=sqrt(H32r.^2+H32i.^2);
H32f=atan2(H32i,H32r);

H23r=real(H32b);
H23i=imag(H32b);
H23m=sqrt(H23r.^2+H23i.^2);
H23f=atan2(H23i,H23r);

Hcm = sqrt(abs(H32m).*abs(H23m));
Hcf = (H32f + H23f)/2;

Hr=real(H32med);
Hi=imag(H32med);
Hmag=sqrt(Hr.^2+Hi.^2);
Hfas=atan2(Hi,Hr);
H32m = Hmag./Hcm;
H32f = Hfas - Hcf;
%=====
H43r=real(H43a);
H43i=imag(H43a);
H43m=sqrt(H43r.^2+H43i.^2);
H43f=atan2(H43i,H43r);

H34r=real(H43b);

```

```

H34i=imag(H43b);
H34m=sqrt(H34r.^2+H34i.^2);
H34f=atan2(H34i,H34r);

Hcm = sqrt(abs(H43m).*abs(H34m));
Hcf = (H43f + H34f)/2;

Hr=real(H43med);
Hi=imag(H43med);
Hmag=sqrt(Hr.^2+Hi.^2);
Hfas=atan2(Hi,Hr);
H43m = Hmag./Hcm;
H43f = Hfas - Hcf;
%=====
H12=H12m.*exp(i*H12f);
H32=H32m.*exp(i*H32f);
H43=H43m.*exp(i*H43f);

v=[640 6800 min(abs(H12)) max(abs(H12))];
figure(5)
plot(f,abs(H12))
grid
axis(v)
title('FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA H12')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('MAGNITUD')

r=[640 6800 min(abs(H32)) max(abs(H32))];
figure(6)
plot(f,abs(H32))
grid
axis(r)
title('FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA H32')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('MAGNITUD')

b=[640 6800 min(abs(H43)) max(abs(H43))];
figure(7)
plot(f,abs(H43))
grid
axis(b)
title('FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA H43')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('MAGNITUD')
%=====

fprintf('\n\n CAMBIE la terminación del tubo y presione ENTER...')
%PAUSA - CAMBIO DE TERMINACION
pause

                                %SEGUNDA ADQUISICIÓN DE DATOS CON
                                %DIFERENTE TERMINACIÓN DEL TUBO

p = 1;
while (p<5)

ai = analoginput('nidaq','Dev1');
canal = addchannel(ai,0:3);
set(ai,'SampleRate',fm);

```

```

fs = get(ai, 'SampleRate');
fprintf('\nFrecuencia de muestreo verdadera[Hz]= %1.0f\n', fs)
set(ai, 'SamplesPerTrigger', M);
Ts = 1/fs;
dur = M*Ts*N;
nm = M*N;
fprintf('Número de muestras adquiridas = %1.0f\n', nm)
fprintf('Duración de la señal [s] = %1.4f\n', dur)

set(canal, 'SensorRange', [-.05 .05]); %valores máximo y mínimo esperados
                                       %(volts) (0.01volts)
set(canal, 'InputRange', [-5 5]); %si se desea conocer los valores
                                   %absolutos de presión,
                                   %se deberán reescalar los datos del
                                   %vector después de ser adquiridos
                                   %factor de 100

%SE CAPTURARÁN VARIOS BLOQUES DE SEÑAL (SEPARADOS POR NaN'S)
%Y SE GUARDARÁN EN ARCHIVOS ".daq"
fprintf('Número de bloques que componen la señal = %1.0f\n', N)
set(ai, 'TriggerRepeat', N-1);

if p==1
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234a01.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end
% SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234a01.daq');

elseif p==2
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\2143x01.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end
% SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\2143x01.daq');

elseif p==3
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1324x01.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end
% SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1324x01.daq');

else
set(ai, 'LogFileName', 'C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234b01.daq');
set(ai, 'LogToDiskMode', 'Index');
set(ai, 'LoggingMode', 'Disk&Memory');
start(ai)
while strcmp(ai.Running, 'On')
end
% SE ALMACENAN LOS VECTORES DE DATOS EN DIFERENTES ARCHIVOS
[yraw,time] = daqread('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\bin\1234b01.daq');

end
end

```

```

ynan = yraw;
indice = find(isnan(ynan(:,1)))           %encuentra los indices de los
                                         %elementos NaN y los entrega en
                                         %un vector

y1 = yraw(:,1);
y1 = y1(~isnan(y1));                    %remoción de NaN's del canal 1
                                         %del vector adquirido
y1 = dtrend(y1);                        %quita el offset de la señal
                                         %restandole su promedio

y2 = yraw(:,2);
y2 = y2(~isnan(y2));                    %remoción de NaN's del canal 2
                                         %del vector adquirido
y2 = dtrend(y2);                        %quita el offset de la señal
                                         %restandole su promedio

y3 = yraw(:,3);
y3 = y3(~isnan(y3));                    %remoción de NaN's del canal 3
                                         %del vector adquirido
y3 = dtrend(y3);                        %quita el offset de la señal
                                         %restandole su promedio

y4 = yraw(:,4);
y4 = y4(~isnan(y4));                    %remoción de NaN's del canal 4
                                         %del vector adquirido
y4 = dtrend(y4);                        %quita el offset de la señal
                                         %restandole su promedio

y = [y1 y2 y3 y4];                      %SEÑAL ADQUIRIDA (CUATRO CANALES)
y = y./100;                              %COMPENSANDO EL ESCALAMIENTO QUE SE HIZO
                                         %PARA EL RANGO DINÁMICO DE LA TARJETA

t=0:dur/length(y):dur-(dur/length(y)); %eje de tiempo

%VALORES RMS
Vc1 = y(:,1).^2;
Vp1 = mean(Vc1);
Vrms1 = sqrt(Vp1);
Vrms1 = 20*log10(Vrms1/(20e-6*s2));
fprintf('Vrms canal 1 = %f\n',Vrms1)

Vc2 = y(:,2).^2;
Vp2 = mean(Vc2);
Vrms2 = sqrt(Vp2);
Vrms2 = 20*log10(Vrms2/(20e-6*s2));
fprintf('Vrms canal 2 = %f\n',Vrms2)

Vc3 = y(:,3).^2;
Vp3 = mean(Vc3);
Vrms3 = sqrt(Vp3);
Vrms3 = 20*log10(Vrms3/(20e-6*s3));
fprintf('Vrms canal 3 = %f\n',Vrms3)

Vc4 = y(:,4).^2;
Vp4 = mean(Vc4);
Vrms4 = sqrt(Vp4);
Vrms4 = 20*log10(Vrms4/(20e-6*s4));
fprintf('Vrms canal 4 = %f\n',Vrms4)

```

```

%SEGUNDA LLAMADA A RUTINA DE CALIBRACIÓN DE LOS MICRÓFONOS
[ch1,ch2,ch3,ch4] = calibracion4ch(y,s1,s2,s3,s4);

%LLAMADA A CALCULO DE LA COHERENCIA PROMEDIADA
[C12,C32,C43] = cohepan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs);

%SEGUNDA LLAMADA A CALCULO DE LAS
%FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PROMEDIADAS
[H12e,H32e,H43e,tem,f] = pspecpan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs);

if p==1
    H12a=H12e;
    H32a=H32e;
    H43a=H43e;
    fprintf('\n\n INTERCAMBIE la posición de los micrófonos 1,2 y 3,4 y presione
ENTER...')
elseif p==2
    H12b=H12e;
    H43b=H43e;
    fprintf('\n\n REGRESE los micrófonos 1, 4 a su posición e INTERCAMBIE la posición
de los micrófonos 2,3 y presione ENTER...')
elseif p==3
    H32b=H32e;
    fprintf('\n\n REGRESE todos los micrófonos a la posición original y presione
ENTER...\n')
else
    H12med=H12e;
    H32med=H32e;
    H43med=H43e;
end

p = p+1;
pause
end
fprintf('\n\n FIN DE ADQUISICIÓN CON TERMINACIÓN NO.2...\n')

%===== MÉTODO DE CORRECCIÓN DE FASE
H12r=real(H12a);
H12i=imag(H12a);
H12m=sqrt(H12r.^2+H12i.^2);
H12f=atan2(H12i,H12r);

H21r=real(H12b);
H21i=imag(H12b);
H21m=sqrt(H21r.^2+H21i.^2);
H21f=atan2(H21i,H21r);

Hcm = sqrt(abs(H12m).*abs(H21m));
Hcf = (H12f + H21f)/2;

Hr=real(H12med);
Hi=imag(H12med);
Hmag=sqrt(Hr.^2+Hi.^2);
Hfas=atan2(Hi,Hr);
H12m = Hmag./Hcm;
H12f = Hfas - Hcf;
%=====
H32r=real(H32a);
H32i=imag(H32a);
H32m=sqrt(H32r.^2+H32i.^2);
H32f=atan2(H32i,H32r);

H23r=real(H32b);

```

```

H23i=imag(H32b);
H23m=sqrt(H23r.^2+H23i.^2);
H23f=atan2(H23i,H23r);

Hcm = sqrt(abs(H32m).*abs(H23m));
Hcf = (H32f + H23f)/2;

Hr=real(H32med);
Hi=imag(H32med);
Hmag=sqrt(Hr.^2+Hi.^2);
Hfas=atan2(Hi,Hr);
H32m = Hmag./Hcm;
H32f = Hfas - Hcf;
%=====
H43r=real(H43a);
H43i=imag(H43a);
H43m=sqrt(H43r.^2+H43i.^2);
H43f=atan2(H43i,H43r);

H34r=real(H43b);
H34i=imag(H43b);
H34m=sqrt(H34r.^2+H34i.^2);
H34f=atan2(H34i,H34r);

Hcm = sqrt(abs(H43m).*abs(H34m));
Hcf = (H43f + H34f)/2;

Hr=real(H43med);
Hi=imag(H43med);
Hmag=sqrt(Hr.^2+Hi.^2);
Hfas=atan2(Hi,Hr);
H43m = Hmag./Hcm;
H43f = Hfas - Hcf;
%=====
H12e=H12m.*exp(i*H12f);
H32e=H32m.*exp(i*H32f);
H43e=H43m.*exp(i*H43f);

v=[640 6800 min(abs(H12e)) max(abs(H12e))];
figure(5)
plot(f,abs(H12e))
grid
axis(v)
title('FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA H12e')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('MAGNITUD')

r=[640 6800 min(abs(H32e)) max(abs(H32e))];
figure(6)
plot(f,abs(H32e))
grid
axis(r)
title('FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA H32e')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('MAGNITUD')

b=[640 6800 min(abs(H43e)) max(abs(H43e))];
figure(7)
plot(f,abs(H43e))
grid

```

```

axis(b)
title('FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA H43e')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('MAGNITUD')
%===== %LLAMADA A CALCULO
%          %DEL COEFICIENTE DE
%          %TRANSMISIÓN YA CON
%          %LOS DATOS DE AMBAS
%          %MEDICIONES

[Tm, Tf, nSTL]=coef_pane(tem, f, H12, H32, H43, H12e, H32e, H43e);

v=[860 6800 0 10]; %PARA T EN MAGNITUD
figure(9)
semilogx(f, Tm, 'm') %PARA T EN MAGNITUD
grid
axis(v)
title('Formulación de PANETTON')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('Coef. de Transmisión (MAGNITUD)')

Tf=unwrap(Tf);

b=[860 6800 -100 100];
figure(10)
semilogx(f, Tf, 'g')
grid
axis(b)
title('FORMULACIÓN DE PANETTON')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('Coef. de transmisión (FASE (GRADOS))')

figure(11)
semilogx(f, nSTL, 'b') %PARA T EN MAGNITUD
grid
axis(v)
title('Formulación de PANETTON')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('Índice de Pérdida de Transmisión (dB)')

```

CALIBRACION4CH

```

function [f,Xe,Ye1,Ye2,Ye3,Ye4]=sine_test(f1,fs,D,N,nprom),
%f - frecuencia de la senoidal
%Fs - frecuencia de muestreo
%D - duración de la señal
%N - número de muestras
%nprom - numero de promedios

%CHIRP DE PRUEBA
%f0=600;
%f1=8000;
%ts=1/fs;
%t=(0:ts:D-ts);
%N=D*N;
%t1=D;
%x=chirp(t,f0,t1,f1);

%SENOIDAL DE PRUEBA
ts=1/fs;
t=(0:ts:D-ts);
N=D*N;
t1=D;
w = 2*pi*f1;
wt = w*t;
x = sin(wt);

ai = analoginput('nidaq','Dev1');
canal = addchannel(ai,0:3);
set(ai,'SampleRate',fs);
%fs = get(ai,'SampleRate');
set(ai,'SamplesPerTrigger',N);
set(ai,'TriggerType','Immediate');
set(ai,'TriggerRepeat',nprom-1);

ao=analogoutput('winsound');
canal2=addchannel(ao,1);
set(ao,'SampleRate',fs);
set(ao,'TriggerType','Immediate');
set(ao,'RepeatOutput',nprom-1);
putdata(ao,x');

start([ao ai]);
g=zeros(N,4);

for k=1:nprom,
datos=getdata(ai);
datos=datos+g;
end
y=datos'/nprom;
stop([ao ai]);
delete([ao ai]);

y1=y(1,:);
y2=y(2,:);
y3=y(3,:);
y4=y(4,:);

fc1=800;
fmax=fs/2;
fnorm1=fc1/fmax;
fc2=6200;
fnorm2=fc2/fmax;

```

```

    wn=[fnorm1 fnorm2];
    [b,a]=butter(2,wn);

%antes de la transformada se ventanea la chirp
ventanal=tukeywin(length(x),0.1);

L=length(x);
MITAD=L/2; %la mitad de datos

x=x.*ventanal';
x = detrend(x);
X = fft(x);
X(MITAD:L-1)=[];
Xe = abs(X)./(N/2);

%y1 = filter(b,a,y1);
y1=y1.*ventanal';
y1 = detrend(y1);
Y1 = fft(y1);
Y1(MITAD:L-1)=[];
Y1 = abs(Y1);
Ye1 = (Y1)./(max(Y1));

%y2 = filter(b,a,y2);
y2=y2.*ventanal';
y2 = detrend(y2);
Y2 = fft(y2);
Y2(MITAD:L-1)=[];
Y2 = abs(Y2);
Ye2 = (Y2)./(max(Y2));

%y3 = filter(b,a,y3);
y3=y3.*ventanal';
y3 = detrend(y3);
Y3 = fft(y3);
Y3(MITAD:L-1)=[];
Y3 = abs(Y3);
Ye3 = (Y3)./(max(Y3));

%y4 = filter(b,a,y4);
y4=y4.*ventanal';
y4 = detrend(y4);
Y4 = fft(y4);
Y4(MITAD:L-1)=[];
Y4 = abs(Y4);
Ye4 = (Y4)./(max(Y4));

f=(0:MITAD-1)*(fs/(2*MITAD));

figure(1)
    set(gcf,'DefaultLineLineWidth', 0.5)
%subplot(5,1,1);plot(f,Xe,'r');grid;hold on
%subplot(5,1,2);plot(f,Ye1,'r');grid;hold on
%subplot(5,1,3);plot(f,Ye2,'r');grid;hold on
%subplot(5,1,4);plot(f,Ye3,'r');grid;hold on
%subplot(5,1,5);plot(f,Ye4,'r');grid;hold on

```

PSPEC PAN4CH

```

function [H12,H32,H43,tem,f] = pspecpan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs)
%PROMEDIO EN FRECUENCIA DE LOS N BLOQUES
%Sintaxis: promspec4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs)
%N - es el número de bloques contenidos en "y", parámetro previamente
%elegido en la función "adquisición4ch"

j = 1;
sze = 2^14;
H12aux = zeros([sze/2+1 1]);
H32aux = zeros([sze/2+1 1]);
H43aux = zeros([sze/2+1 1]);

    signal1 = ch1(1:indice(1,1));
    signal2 = ch2(1:indice(1,1));
    signal3 = ch3(1:indice(1,1));
    signal4 = ch4(1:indice(1,1));

%función de transferencia entre las señales 1 y 2 (bloque 1)
[H12,W] = tfestimate(signal2,signal1,[],[],sze,fs);
%función de transferencia entre las señales 3 y 2 (bloque 1)
[H32,W] = tfestimate(signal2,signal3,[],[],sze,fs);
%función de transferencia entre las señales 4 y 3 (bloque 1)
[H43,W] = tfestimate(signal3,signal4,[],[],sze,fs);

    H12aux = H12aux + H12;
    H32aux = H32aux + H32;
    H43aux = H43aux + H43;

while (j<N-1)
    ndx = indice(j,1)+1;
    ndx2 = indice(j+1,1);

    signal1 = ch1(ndx:ndx2);
    signal2 = ch2(ndx:ndx2);
    signal3 = ch3(ndx:ndx2);
    signal4 = ch4(ndx:ndx2);

%función de transferencia entre las señales 1 y 2 (bloque i)
[H12,W] = tfestimate(signal2,signal1,[],[],sze,fs);
%función de transferencia entre las señales 3 y 2 (bloque i)
[H32,W] = tfestimate(signal2,signal3,[],[],sze,fs);
%función de transferencia entre las señales 4 y 3 (bloque i)
[H43,W] = tfestimate(signal3,signal4,[],[],sze,fs);

    H12aux = H12aux + H12;
    H32aux = H32aux + H32;
    H43aux = H43aux + H43;

    j = j + 1;
end

ndx=indice(j,1)-N+1;
    signal1 = ch1(ndx:end);
    signal2 = ch2(ndx:end);
    signal3 = ch3(ndx:end);
    signal4 = ch4(ndx:end);

%función de transferencia entre las señales 1 y 2 (bloque n)
[H12,W] = tfestimate(signal2,signal1,[],[],sze,fs);
%función de transferencia entre las señales 3 y 2 (bloque n)
[H32,W] = tfestimate(signal2,signal3,[],[],sze,fs);

```

```
%función de transferencia entre las señales 4 y 3 (bloque n)
[H43,W] = tfestimate(signal3,signal4,[],[],sze,fs);

H12aux = H12aux + H12;
H32aux = H32aux + H32;
H43aux = H43aux + H43;

tem = 23; %temperatura [°C]
%d = 0.0254; %grosor de la muestra [m]
c = 331.41 + 0.607*tem; %velocidad del sonido
cte = 1/c;
k = cte*W;

Hr = real(H12aux); %parte real
f = 0 : fs/(2*length(Hr)) : (fs - fs/length(Hr))/2; %vector (eje) de frecuencias

H12 = (H12aux)./N; %H12 ES EL ESPECTRO YA PROMEDIADO
H32 = (H32aux)./N; %H32 ES EL ESPECTRO YA PROMEDIADO
H43 = (H43aux)./N; %H43 ES EL ESPECTRO YA PROMEDIADO
```

COHEPAN4CH

```

function [C12,C32,C43] = cohepan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs)
%Sintaxis: [C12,C32,C43] = cohepan4ch(ch1,ch2,ch3,ch4,N,M,indice,fs)
%N - es el número de bloques contenidos en "y", parámetro previamente
%elegido en la función "adquisición4ch"

i = 1;
sze = 2*fs;
C12aux = zeros([sze/2+1 1]);
C32aux = zeros([sze/2+1 1]);
C43aux = zeros([sze/2+1 1]);

    signal1 = ch1(1:indice(1,1));
    signal2 = ch2(1:indice(1,1));
    signal3 = ch3(1:indice(1,1));
    signal4 = ch4(1:indice(1,1));

%Coherencia entre las señales procesadas
C12 = mscohere(signal1,signal2,[],[],sze,fs);
C32 = mscohere(signal3,signal2,[],[],sze,fs);
C43 = mscohere(signal4,signal3,[],[],sze,fs);

    C12aux = C12aux + C12;
    C32aux = C32aux + C32;
    C43aux = C43aux + C43;

while (i<N-1)

    ndx = indice(i,1)+1;
    ndx2 = indice(i+1,1);

    signal1 = ch1(ndx:ndx2);
    signal2 = ch2(ndx:ndx2);
    signal3 = ch3(ndx:ndx2);
    signal4 = ch4(ndx:ndx2);

%Coherencia entre las señales procesadas
C12 = mscohere(signal1,signal2,[],[],sze,fs);
C32 = mscohere(signal3,signal2,[],[],sze,fs);
C43 = mscohere(signal4,signal3,[],[],sze,fs);

    C12aux = C12aux + C12;
    C32aux = C32aux + C32;
    C43aux = C43aux + C43;

    i = i + 1;
end

ndx=indice(i,1)-N+1;
    signal1 = ch1(ndx:end);
    signal2 = ch2(ndx:end);
    signal3 = ch3(ndx:end);
    signal4 = ch4(ndx:end);

%Coherencia entre las señales procesadas
C12 = mscohere(signal1,signal2,[],[],sze,fs);
C32 = mscohere(signal3,signal2,[],[],sze,fs);
C43 = mscohere(signal4,signal3,[],[],sze,fs);

    C12aux = C12aux + C12;
    C32aux = C32aux + C32;
    C43aux = C43aux + C43;

```

```
Cr = real(C12aux); %parte real
f = 0 : fs/(2*length(Cr)) : (fs - fs/length(Cr))/2; %vector (eje) de frecuencias

C12 = (C12aux)./N; %COHERENCIA PROMEDIADA
v=[860 6800 0 1];
figure(2)
semilogx(f,abs(C12))
grid
axis(v)
title('COHERENCIA ENTRE LOS MICROFONOS 1 Y 2')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('COHERENCIA')

C32 = (C32aux)./N; %COHERENCIA PROMEDIADA
figure(3)
semilogx(f,abs(C32))
grid
axis(v)
title('COHERENCIA ENTRE LOS MICROFONOS 2 Y 3')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('COHERENCIA')
```

COEF_PANE

```

function [Tm,Tf,nSTL]=coef_pane(tem,f,H12,H32,H43,H12e,H32e,H43e)
%Esta funcion calcula el coeficiente de TRANSMISIÓN complejo T
%En Tm se encuentra la magnitud y en Tf la fase de T
%HXX - funciones de transferencia con terminación 1
%HXXe - funciones de transferencia con terminación 2

c=331.41+0.607*tem;
const=2*pi/c;
k=(const)*f;
sep1=0.022;      %DISTANCIA ENTRE LOS MICRÓFONOS 1 Y 2
sep2=0.0207;    %DISTANCIA ENTRE LOS MICRÓFONOS 3 Y 4
L1=0.029;       %distancia entre el microfono 2 y la muestra
                %(del lado de incidencia)
L2=0.029;       %distancia entre el microfono 3 y la muestra
                %(del lado de transmisión)
%D1=0.38;       %DISTANCIA DEL ALTAVOZ A LA MUESTRA
D1=0.3995;      %DISTANCIA DEL ALTAVOZ A LA MUESTRA
D2=0.383;       %DISTANCIA DE LA TERMINACIÓN A LA MUESTRA

%ancho del cople del portamuestras = 0.0183mts
%NOTA: Los sufijos "i" y "r" se refieren a "imaginario" y "real",
%respectivamente. Los sufijos "m" y "f", son "magnitud" y "fase"

%coeficiente de reflexión de la muestra (con terminación 1 montada)
r1 = ((H12'-exp(i*k*sep1))./(exp(-i*k*sep1)-H12')).*exp(2*i*k*L1);
%coeficiente de reflexión de la terminación 1
rb = ((H43'-exp(-i*k*sep2))./(exp(i*k*sep2)-H43')).*exp(-2*i*k*L1);
%coeficiente de reflexión de la muestra (con terminación 2 montada)
r1e = ((H12e'-exp(i*k*sep1))./(exp(-i*k*sep1)-H12e')).*exp(2*i*k*L1);
%coeficiente de reflexión de la terminación 2
rbe = ((H43e'-exp(-i*k*sep2))./(exp(i*k*sep2)-H43e')).*exp(-2*i*k*L2);

%=====
r1r=real(r1);
r1i=imag(r1);
r1m=sqrt(r1r.^2+r1i.^2);
r1f=atan2(r1i,r1r);

rbr=real(rb);
rbi=imag(rb);
rbm=sqrt(rbr.^2+rbi.^2);
rbf=atan2(rbi,rbr);

rber=real(rbe);
rbei=imag(rbe);
rbem=sqrt(rber.^2+rbei.^2);
rbeF=atan2(rbei,rber);

v=[860 6800 0 2];
figure(8)
semilogx(f,r1m,'b',f,rbm,'r',f,rbem,'g')
grid
axis(v)
title('Coef de reflexión de la muestra (AZUL), de la terminación corta (ROJO) y larga (VERDE)')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('Coef. de Reflexión (MAGNITUD)')
%=====

%definición de coeficientes auxiliares para simplificar la notación

```

```
r = ((exp(-i*k*L2)+rb.*exp(i*k*L2)).*(exp(i*k*L1)+r1e.*exp(-i*k*L1)))/((exp(-i*k*L2)+rbe.*exp(i*k*L2)).*(exp(i*k*L1)+r1.*exp(-i*k*L1)));

h = H32./H32e;

r2 = ((r-h')./(r.*rbe-h'.*rb)).*exp(-2*i*k*D2);

%coeficiente de transmisión
T = H32'.*((1.-r2.*rb.*exp(2*i*k*D2)).*((exp(i*k*L1) + r1.*exp(-i*k*L1))./(exp(-i*k*L2) + rb.*exp(i*k*L2))));

nSTL = -20*log10(T);
Tr=real(T');
Ti=imag(T');

Tm=sqrt(Tr.^2+Ti.^2);
Tf=atan2(Ti,Tr);
```

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Dada la gran cantidad de términos técnicos y manejos conceptuales utilizados para definir la cantidad de sonido que pasa a través de un material, se presenta este glosario de términos, referente solo a los conceptos relacionados con dicho tema.

1. **Aislamiento sonoro** SOUND INSULATION. (*en edificios*). Término genérico para referirse a la capacidad de particiones, pisos o techos de evitar que la energía sonora se cuele a través de ellos. Un buen aislamiento sonoro (SOUND INSULATION) significa que el sonido generado en una parte del edificio no se escapa hacia otras partes donde no es deseado.
2. **Coefficiente de transmisión** TRANSMISSION COEFFICIENT. *Para presión sonora o para velocidad de partícula*. Son las razones complejas:

$$T_p = \frac{P_{trans}}{P_{inc}} \quad (\text{presión})$$

$$T_u = \frac{u_{trans}}{u_{inc}} \quad (\text{velocidad})$$

Se define como la transmisión de una onda plana de una frecuencia dada a través de una frontera plana o una interfaz entre dos fluidos. En la primer ecuación P_{trans} y P_{inc} representan las amplitudes complejas de la presión acústica transmitida e incidente en la posición de la frontera; la segunda ecuación es similar pero la presión es ahora reemplazada por la velocidad normal de partícula. Unidades: adimensional.

3. **Coefficiente de transmisión de potencia sonora** SOUND POWER TRANSMISSION COEFFICIENT. (*en un sistema unidimensional o línea de transmisión*). Es la razón entre el flujo de potencia neto y el flujo de potencia incidente en un punto específico del sistema. También se le conoce como ENERGY TRANSMISSION COEFFICIENT. Unidades: adimensional.

Nota: Los términos equivalentes TRANSMITTANCE and TRANSMISSION FACTOR también se pueden usar para este concepto.

(*de una partición excitada por ondas planas incidentes*). La razón entre la potencia sonora transmitida por la partición y la potencia sonora que incide sobre ella, esto cuando el lado receptor de la partición radie hacia campo libre. Con la dirección de llegada de las ondas incidentes definidas por las coordenadas (θ, ϕ) , el coeficiente de transmisión del lado "1" al lado "2" se puede escribir como

$$\tau_{12}(\theta, \phi, f) = \frac{W_{trans}}{W_{inc}}$$

donde W_{trans} , es la potencia sonora transmitida en el lado “2”, y W_{incl} es la potencia sonora incidente del lado “1”.

Se acostumbra dar este coeficiente en tercios de octava. Su valor para incidencia aleatoria es comúnmente llamado SOUND TRANSMISSION COEFFICIENT en acústica arquitectónica.

NOTA: Para una partición uniforme y plana de extensión infinita (no necesariamente isotrópica), con un medio sin pérdidas a ambos lados, existe reciprocidad entre los coeficientes en ambas direcciones.

(*en una interfaz plana entre dos medios*). Es la razón entre la potencia transmitida a través de la interfaz y la potencia incidente, para transmisión en “medio espacio”, es decir, el medio al cual se transmite se extiende hasta el infinito.

$$\tau = \frac{I_{trans}}{I_{inc}}$$

donde I_{trans} e I_{inc} denotan la intensidad normal, o potencia sonora por unidad de área de la interfaz, asociada con las ondas transmitidas e incidentes. Unidades: adimensional.

4. **Coeficiente de transmisión de presión** PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT. (*para una onda incidente de una frecuencia dada*). También llamada SOUND PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT, es la razón compleja entre la presión incidente y la presión transmitida, definida tanto para ondas planas incidentes a un cierto ángulo sobre una superficie plana, o para ondas planas en un sistema unidimensional siendo transmitida entre puntos específicos del sistema.
5. **Coeficiente de transmisión de presión complejo** COMPLEX PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT. (*para ondas incidentes de una sola frecuencia, transmitidas a través de una frontera o discontinuidad*). Es la razón compleja de la presión transmitida entre la presión incidente, con la presión transmitida medida inmediatamente detrás de la frontera y la presión incidente medida inmediatamente al frente de la misma. Para propósitos de definición, el campo transmitido se asume como libre (no hay ondas reflejadas en el lado de transmisión. Unidades: adimensional.

Nota (1): Este concepto también es llamado SOUND PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT o PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT, pero preferentemente no debe llamársele simplemente TRANSMISSION COEFFICIENT, para evitar ambigüedades.

Nota (2): Para verificar lo anterior, compare el con los conceptos de TRANSMISSION COEFFICIENT. También compárese con SOUND TRANSMISSION COEFFICIENT, que tiene un significado distinto en acústica arquitectónica.

Nota (3): Este coeficiente normalmente se establece (define) *para ondas planas incidentes a un ángulo dado* sobre una superficie plana y uniforme, o bien, para ondas planas en un sistema unidimensional (por ejemplo, tubos o guías de onda) transmitidas entre puntos específicos dentro del sistema. Para situaciones más generales (como ondas planas incidiendo en una partición finita), este coeficiente es una cantidad local que varía de punto a punto sobre (a lo largo de) la frontera. Por esta razón, el concepto

SOUND POWER TRANSMISSION COEFFICIENT (una cantidad global) es a menudo de mayor interés práctico.

6. **Coefficiente de transmisión de presión sonora** SOUND PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT. (*para ondas incidentes de una sola frecuencia sobre una discontinuidad*). Es la razón compleja de la presión transmitida entre la presión incidente, cuando el campo transmitido consiste en ondas salientes (sin reflejo).

$$T_p = \frac{P_{trans}}{P_{inc}}$$

Está definido tanto para ondas planas que inciden a un ángulo dado sobre una frontera plana y uniforme, como para ondas planas transmitidas entre puntos específicos dentro de un sistema unidimensional (p. e. tubo o guía de ondas). Para una discusión más completa, ver COMPLEX PRESSURE TRANSMISSION COEFFICIENT. Unidades: adimensional.

7. **Coefficiente de transmisión sonora** SOUND TRANSMISSION COEFFICIENT. (*de una partición excitada por ondas planas incidentes*). Es la fracción que se transmite de la potencia incidente en una partición. El uso de este término implica que el campo incidente es difuso. Comparar con STATISTICAL SOUND POWER TRANSMISSION COEFFICIENT. Unidades: adimensional.
8. **Índice de reducción sonora** SOUND REDUCTION INDEX. (*de una partición que separa dos campos sonoros difusos*). Es un término equivalente para TRANSMISSION LOSS y SOUND TRANSMISSION LOSS ($TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau}$), tal como es medido en las técnicas estándar de acústica de edificios. Unidades: dB.
9. **Índice de reducción sonora aparente** (APPARENT SOUND REDUCTION INDEX) (R'). (*de una partición que separa dos cuartos*). Es el resultado de aplicar el procedimiento de medición de diferencia de nivel estándar, pero en campo. Esto significa que las mediciones se hacen entre dos cuartos dentro de un edificio o construcción donde los campos sonoros pueden no ser difusos, y puede haber rutas de transmisión que flanqueen la barrera a caracterizar. Unidades: dB
10. **Índice de reducción sonora ponderado** WEIGHTED SOUND REDUCTION INDEX. (*De una partición*). Método de evaluación del aislamiento sonoro por aire de una partición, basado en mediciones de aislamiento sonoro (SOUND INSULATION) en bandas de tercios de octava de 50Hz a 3.15kHz. una curva de perfil estándar se ajusta a los datos, y el aislamiento sonoro nominal a 500Hz define el índice ponderado. Unidades: [dB].
11. **Matriz de transmisión** TRANSMISSION MATRIX. (*Para un sistema mecánico o red de dos puertos*). Es otra forma (ya no muy usada) de llamarle a la matriz de transferencia (TRANSFER MATRIX) que relaciona las variables de sistema en los puertos de entrada y salida.
12. **Pérdida de transmisión (1)** TRANSMISSION LOSS (1). (*De un silenciador u otro elemento en un sistema unidimensional*). Es la reducción del nivel de potencia sonora, a

una frecuencia dada, entre la potencia de la onda incidente al silenciador y la potencia de la onda transmitida a la salida del mismo, cuando el silenciador tiene terminación anecoica. Unidades: [dB].

13. **Pérdida de transmisión (2)** TRANSMISSION LOSS (2). (*De una partición*). El recíproco del coeficiente de transmisión de potencia sonora (SOUND POWER TRANSMISSION COEFFICIENT, *de una partición excitada por ondas planas*), expresada en decibeles; su símbolo es **TL**. Matemáticamente,

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

Donde τ es el coeficiente de transmisión. También se le conoce como sound transmission loss. Unidades: [dB]

14. **Pérdida de transmisión medida en laboratorio** LABORATORY TRANSMISSION LOSS. (*para una partición separando dos campos sonoros reverberantes*). Es un término equivalente para SOUND INSULATION; como puede ser la pérdida de transmisión de un campo difuso en una partición, calculada a partir de una medición de diferencia de nivel. Unidades: dB.

15. **Pérdida de transmisión sonora** SOUND TRANSMISSION LOSS. (*de una partición excitada por ondas planas incidentes*). Término alternativo para TRANSMISSION LOSS

($TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau}$); el uso de este término implica que el campo incidente es difuso.

Unidades: dB

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Billingham, J. y King, A.C.
WAVE MOTION
Cambridge University Press, United Kingdom, 2000, págs.
- [2] Rayleigh, J. W. S.
THE THEORY OF SOUND (Vol.II)
Dover Publications, Inc., New York. 1896, pág. 161
- [3] Kinsler, Lawrence E. y Frey, Austin R.
FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS
John Wiley & Sons. EUA, 1950.
- [4] British Standard. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. ISO 10534-1:2001.
- [5] British Standard. Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. ISO 10534-2:2001.
- [6] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System. ASTM E 1050-90.
- [7] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. ASTM E2611-09.
- [8] E. T. Paris. On the stationary wave method of measuring sound-absorption at normal incidence. Proc. Phys. Soc. Lond. 39, 269-295 (1927).
- [9] Pérez Ruiz, Santiago y Loera Medrano, Gilberto. *Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancias del centro de instrumentos, UNAM*. Revista Mexicana de Física 46 (5) 478-484. Octubre 2000.
- [10] Bryan H. Song y J. Stuart Bolton. *A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials*. J. Acoust. Soc. Am. 107 (3), March 2000.
- [11] Pierce, A. D.
ACOUSTICS: AN INTRODUCTION TO ITS PHYSICAL PRINCIPLES AND APPLICATIONS
McGraw-Hill, New York, 1981.
- [12] Morfey, Christopher L.
DICTIONARY OF ACOUSTICS
Academic Press. United Kingdom, 2001.

-
- [13] Brüel & Kjaer
DUAL CHANNEL SIGNAL ANALYZER TYPE 2034, INSTRUCTION MANUAL
Brüel & Kjaer. Denmark, 1983.
- [14] Matlab
DATA ACQUISITION TOOLBOX (FOR USE WITH MATLAB)
The Math Works, Inc. EUA, 1999.
- [15] Y. Salissou y R. Panneton. *A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 125, No. 4, April 2009.
- [16] K. M. Ho, Z. Yang, X. X. Zhang y P. Sheng. *Measurements of sound transmission through panels of locally resonant materials between impedance tubes*. Applied Acoustics 66(2005) 751-765.
- [17] Z. Tao y A. F. Seybert. *A review of current techniques for measuring muffler transmission loss*. Society of Automotive Engineers, Inc. 03NVC-38. 2003.
- [18] T. Y. Lung y A. G. Doige. *A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 73, No. 3, March 1983.
- [19] M. L. Munjal y A. G. Doige. *Theory of two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element*. J. Sound Vib. 141(2), 323-333 (1990).
- [20] J. F. Allard, B. Brouard, D. Lafarge y W. Lauriks. *Reciprocity and antireciprocity in sound transmission through layered materials including elastic and porous media*. Wave Motion 17, 329-335 (1993).
- [21] A. F. Seybert y D. F. Ross. *Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique*. J. Acoust. Soc. Am. 61, 1362-1370 (1977).
- [22] J. Y. Chung y D. A. Blaser. *Transfer function method in-duct acoustic properties. I. Theory*. J. Acoust. Soc. Am. 68(3), Sept, 1980.
- [23] J. Y. Chung y D. A. Blaser. *Transfer function method in-duct acoustic properties. II. Experiment*. J. Acoust. Soc. Am. 68(3), Sept, 1980.
- [24] J. Y. Chung y D. A. Blaser. *Transfer function method of measuring acoustic intensity in a duct system with flow*. J. Acoust. Soc. Am. 68(6), Dec, 1980.
- [25] Peng Dong-Li, Hu Peng, Zhu Bei-Li. *The modified method of measuring the complex transmission coefficient of multilayer acoustical panel in impedance tube*. Applied Acoustics 69 (2008) 1240-1248.

- [26] P. Bonfiglio y F. Pompoli. *A single measurement approach for the determination of the normal incident transmission loss*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 124, No. 3, September 2008.
- [27] Andrew R. Barnard y Mohan D. Rao. *Measurement of sound transmission loss using a modified four microphone impedance tube*. NOISE-CON 2004, July 12 – 14.
- [28] Mats Abom y Hans Bodén. *Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts*. J. Acoust. Soc. Am. 79 (2), February 1986.
- [29] Antonio Pérez López. *Diseño, construcción y evaluación de un tubo de impedancias*. Trabajo de tesis para obtener el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica. IPN, 1987.
- [30] W. T. Chu. *Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone*. J. Acoust. Soc. Am. 80 (2), August 1986.
- [31] K.Liu, Z. Qijun, y T. Feng. *The measurement theory and experiment investigation of transmission loss of material – four transducer method*. Proceedings of The 11th International Congress of Sound and Vibration, St. Petersburg, Russia (2004), pp. 1585-1592.
- [32] P. M. Morse and R. H. Bolt, *Sound Waves in Rooms*, Rev. Mod. Phys., 16:69-150 (1944)
- [33] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements. ASTM E90 – 09.
- [34] British Standard. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation. ISO 10140-2:2010