

Verificación del sistema de medición del coeficiente de transmisión sonora de materiales en incidencia normal

Santiago Jesús Pérez Ruiz, Juan David Gil

Febrero 2012

Tipo de proyecto: Interno

Resumen. En el presente informe se presentan los resultados de la validación del sistema de medición del coeficiente de transmisión sonora desarrollado en el Laboratorio de Acústica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. Parte del trabajo formó parte de la estancia de Juan David Gil, estudiante de la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín, Colombia

Se muestra la teoría del proceso de cálculo, estructura del programa de procesamiento del sistema de medición del coeficiente de transmisión acústica en tubo de impedancia, la validación de este por medio del procesamiento de las señales adquiridas en experimentos anteriores a este trabajo, y la comparación de los resultados de experimentos con señales de ruido blanco y senoides moduladas con barrido lineal (sweep).

También se hace una evaluación sobre las características de medición en cuanto a la interfaz de adquisición de datos y las características de las señales, planteando que es necesaria una revisión minuciosa de la sincronía entre los dispositivos de entrada y salida y las características de la medición que proporcionan los mejores resultados.

Índice	No. pagina
Nomenclatura	3
Introducción	3
1. Marco Teórico	4
2. Metodología	7
3. Resultados y Análisis	7
3.1 Programa de procesamiento y calculo con MATLAB	9
3.2 Comparación con resultados previos	9
3.3 Comparación empleando ruido blanco y señales moduladas	10
3.4 Comparación utilizando interfaz NI y TASCAM	11
Conclusiones	13
Agradecimientos	13
Referencias	14
Apéndice A	15

Nomenclatura

A	Onda sonora viajando a la derecha, antes de la muestra (primera sección del tubo)
B	Onda sonora viajando a la izquierda, antes de la muestra (primera sección del tubo)
C	Onda sonora viajando a la derecha, después de la muestra (segunda sección del tubo)
D	Onda sonora viajando a la izquierda, después de la muestra (segunda sección del tubo)
D_1	Distancia del altavoz a la muestra, primera sección del tubo
D_2	Distancia de la muestra a la terminación, segunda sección del tubo
d	Grueso de la muestra
L_1	Distancia del micrófono 2 a la muestra
L_2	Distancia del micrófono 3 a la muestra
H_{12}	Función de transferencia entre el micrófono 1 y micrófono 2
H_{32}	Función de transferencia entre el micrófono 3 y micrófono 2
H_{43}	Función de transferencia entre el micrófono 4 y micrófono 3
P_A	Presión sonora total, en la primera sección del tubo
P_{AD}	Presión sonora viajando a la derecha, en la primera sección del tubo
P_{AI}	Presión sonora viajando a la izquierda, en la primera sección del tubo
P_B	Presión sonora total, en la segunda sección del tubo
r_1	Coefficiente de absorción de la muestra del lado de la primera sección del tubo
r_2	Coefficiente de absorción de la muestra del lado de la segunda sección del tubo
r_s	Coefficiente de absorción del altavoz
r_b	Coefficiente de absorción de la terminación del tubo
s_1	Separación entre el micrófono 1 y el micrófono 2
s_2	Separación entre el micrófono 3 y el micrófono 4
STL	Pérdida por transmisión sonora
τ	Coefficiente de transmisión sonora

INTRODUCCIÓN

En la caracterización acústica de materiales, existen algunos parámetros del material que pueden ser medidos por diversos métodos. El coeficiente de absorción por ejemplo es usualmente medido en cámara reverberante, por medio de la variación del tiempo de reverberación de la sala y un correspondiente cálculo de la absorción debida al material. El coeficiente de transmisión se mide usualmente en un laboratorio denominado cámara de transmisión sonora, este laboratorio consiste en dos cámaras aisladas, en cuya división se construye una pared del material que se desea estudiar.

Por razones de costo, muchas veces conviene desarrollar otros métodos de medición más económicos para caracterizar los materiales. Además de que, por razones técnicas, por ejemplo en el desarrollo de un nuevo material, conviene medir utilizando pequeñas muestras del material.

El tubo de impedancia es un instrumento particularmente útil para este objetivo. Actualmente en la norma ISO10534, se especifican los requisitos para medir el coeficiente de absorción sonora. En recientes investigaciones, se ha establecido que haciendo algunas modificaciones a este tubo es posible medir el coeficiente de transmisión en incidencia normal [Salissou et al, 2009, Bonfiglio et al, 2008, Dong-li et al, 2008).

En la Figura 1, se muestra el sistema de medición del Laboratorio de Acústica Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este sistema de medición fue construido por (Machuca, 2011), y el presente trabajo profundiza en su desarrollo.

A continuación se muestran los resultados de varias pruebas realizadas sobre este tubo de impedancias, para evaluar algunas características del proceso de medición del coeficiente de transmisión acústica a incidencia normal del sonido.

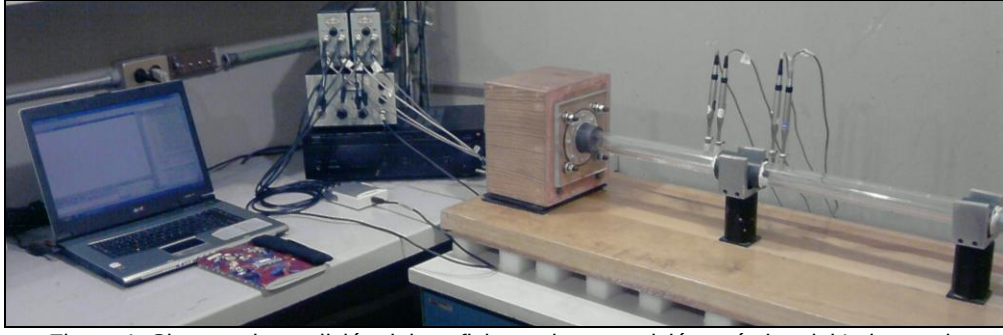


Figura 1. Sistema de medición del coeficiente de transmisión acústica del Laboratorio de Acústica del CCADET-UNAM.

1. MARCO TEÓRICO

La base teórica del fenómeno de transmisión acústica en el tubo de impedancias que se tomó como referencia para este trabajo es el expuesto por (Salissou et al, 2009) , a continuación se hace un resumen de las principales consideraciones que este método de cálculo tiene:

En la Figura 2, se muestran las variables que están involucradas en el cálculo y la estructura del tubo de impedancias. Este tubo tiene en uno de sus extremos un altavoz, y en el otro extremo una terminación acústica arbitraria, en medio del tubo está ubicada la muestra y cuatro micrófonos se usan para descomponer el campo acústico de cada lado de la muestra en señales que viajan hacia la derecha y hacia la izquierda, con el fin de poder cuantificar la pérdida por transmisión y los coeficientes de absorción del altavoz, del material y de la terminación.

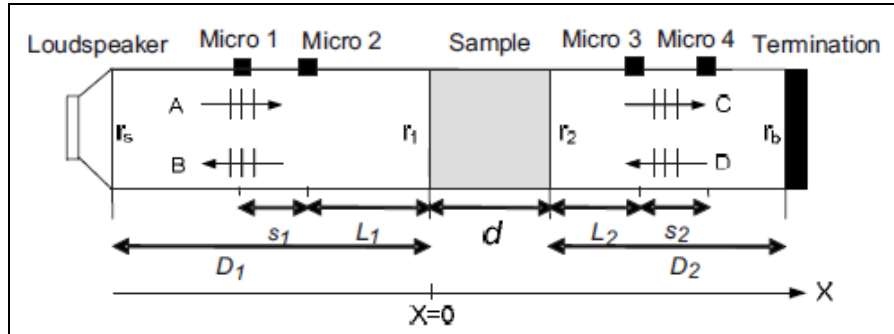


Figura 2. Diagrama de referencia del método de cálculo de descomposición de onda

El principio fundamental del cálculo es la descomposición del campo acústico en las múltiples reflexiones de ondas que ocurren dentro del tubo, y se parte del hecho que la muestra que está en medio del tubo tiene distintos coeficientes de absorción (Dong-li et al, 2008) debido a la diferencia de medios a cada lado ($r_1 \neq r_2$).

En estado estacionario, la propagación de ondas viajeras hacia la derecha en la primera sección del tubo (del lado del altavoz) puede escribirse como:

$$p_{AD} = ae^{-jkx} \left(1 + r_1 r_s e^{2jkD_1} + (r_1 r_s)^2 e^{4jkD_1} + \dots \right)$$

$$p_{AD} = \frac{a(e^{-jkx})}{1 - r_1 r_s e^{2jkD_1}} \quad (1)$$

De la misma forma se puede describir la propagación de ondas viajeras hacia la izquierda como:

$$p_{AI} = ar_1 e^{jkx} \left(1 + r_1 r_s e^{2jkD_1} + (r_1 r_s)^2 e^{4jkD_1} + \dots \right)$$

$$p_{AI} = \frac{a(r_1 e^{-jkx})}{1 - r_1 r_s e^{2jkD_1}} \quad (2)$$

Sumando las ecuaciones (1) y (2), el campo total en la primera sección del tubo es:

$$p_A = \frac{a(e^{-jkx} + r e^{jkx})}{1 - r_1 r_s e^{2jkD_1}} \quad (3)$$

De la misma forma se llega a la definición del campo acústico de la segunda sección del tubo (del lado de la terminación).

$$p_B = \frac{a(e^{-jkx} + r_b e^{jkx})\tau}{(1 - r_1 r_s e^{2jkD_1})(1 - r_2 r_b e^{2jkD_2})} \quad (4)$$

Con las ecuaciones (3) y (4), puede evaluarse la presión en cada uno de las posiciones de micrófonos así:

$$p_1 = \frac{a(e^{-jk(L_1+s_1)} + r e^{jk(L_1+s_1)})}{1 - r_1 r_s e^{2jkD_1}} \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{a(e^{-jkL_1} + r e^{jkL_1})}{1 - r_1 r_s e^{2jkD_1}} \quad (6)$$

$$p_3 = \frac{a(e^{-jkL_2} + r_b e^{jkL_2})\tau}{(1 - r_1 r_s e^{2jkD_1})(1 - r_2 r_b e^{2jkD_2})} \quad (7)$$

$$p_4 = \frac{a(e^{-jk(L_2+s_2)} + r_b e^{jk(L_2+s_2)})\tau}{(1 - r_1 r_s e^{2jkD_1})(1 - r_2 r_b e^{2jkD_2})} \quad (8)$$

Definiendo la función de transferencia $H_{12} = p_1/p_2$, y sustituyendo las ecuaciones (5) y (6), se puede despejar el coeficiente de absorción del material en el lado del altavoz:

$$r_1 = \frac{H_{12} - e^{jks_1}}{e^{-jks_1} - H_{12}} e^{2jkL_1} \quad (9)$$

Similarmente, puede definirse la función de transferencia $H_{43} = p_4/p_3$ y obtenerse el coeficiente de absorción de la terminación.

$$r_b = \frac{H_{43} - e^{-jks_2}}{e^{jks_2} - H_{43}} e^{-2jkL_1} \quad (10)$$

Por último, se define la función de transferencia entre los micrófonos 3 y 2 como:

$$H_{32} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{1}{1 - r_2 r_b e^{2jkD_2}} \frac{e^{-jkL_2} + r_b e^{jkL_2}}{e^{jkL_1} + r_1 e^{jkL_1}} \tau \quad (11)$$

Dado que en la ecuación (11), hay dos variables desconocidas, es necesario realizar una modificación en el sistema de medición, cambiando la terminación del tubo. Bajo esta nueva característica los únicos parámetros acústicos que se alteran son r_1 y r_b , dado que la condición acústica de la primera sección del tubo permanece igual.

También se hace necesario definir nuevamente las funciones de transferencia H_{12} , H_{43} y H_{32} , los coeficientes de absorción de la muestra por el lado del altavoz y de la terminación quedan definidos así:

$$r_1' = \frac{H_{12}' - e^{jks_1}}{e^{-jks_1} - H_{12}'} e^{2jkL_1} \quad (12)$$

$$r_b' = \frac{H_{43}' - e^{-jks_2}}{e^{jks_2} - H_{43}'} e^{-2jkL_1} \quad (13)$$

$$H_{32}' = \frac{p_3'}{p_2'} = \frac{1}{1 - r_2 r_b' e^{2jkD_2}} \frac{e^{-jkL_2} + r_b' e^{jkL_2}}{e^{jkL_1} + r_1' e^{jkL_1}} \tau \quad (14)$$

Habiendo definido estas nuevas ecuaciones, y utilizando las ecuaciones (11) y (14), el coeficiente de absorción de la muestra por el lado de la terminación es:

$$r_2 = \frac{r - h}{rr_b - hr_b} e^{-2jkD_2} \quad (15)$$

donde:

$$h = \frac{H_{32}}{H_{32}'} \quad (16)$$

$$r = \frac{e^{-jkL_2} + r_b e^{jkL_2}}{e^{-jkL_2} + r_b' e^{jkL_2}} \frac{e^{-jkL_1} + r_1' e^{jkL_1}}{e^{-jkL_1} + r_1 e^{jkL_1}} \quad (17)$$

Para finalizar, combinando las ecuaciones (15) y (11), el coeficiente de transmisión y la pérdida por transmisión queda definido como:

$$\tau = H_{32} (1 - r_2 r_b e^{2jkD_2}) \frac{e^{jkL_1} + r_1 e^{jkL_1}}{e^{-jkL_2} + r_b e^{jkL_2}} \quad (18)$$

$$STL = -20 \log(\tau) \quad (19)$$

2.0 METODOLOGÍA

El trabajo inició con una revisión del procedimiento de cálculo y la revisión del algoritmo de procesamiento, esto se realizó con el fin de comprender la manera cómo funcionaba el programa y entender el fundamento matemático-físico del fenómeno de la transmisión de ondas acústicas a través de un material poroso en un tubo de impedancias.

El programa de procesamiento se reestructuro para lograr un mejor desempeño (tanto en duración, como en el manejo de de diferentes señales de excitación y optimizar la adquisición en cuatro canales), pero en esencia conservó el mismo procedimiento tanto de medición como de cálculo de los parámetros acústicos.

Luego de la reestructuración del código del programa en MATLAB®, se procedió a verificar el correcto funcionamiento de este. Una vez fue verificado el resultado con el nuevo programa, se procedió a realizar mediciones bajo las mismas características que fueron realizadas en [Machuca, 2011].

Luego de la verificación del programa, se procedió a implementar una medición con señales senoidales con barridos en frecuencia (sweep), de tal manera que para implementar esto se debía adaptar el algoritmo de medición para que generara y adquiriera los datos simultáneamente desde el programa. En esta labor se encontraron inconvenientes de sincronía entre el dispositivo de entrada y el dispositivo de salida de la interfaz de adquisición de datos. Para solucionar dicho inconveniente se modificó el procedimiento de medición para llevarlo a cabo adquiriendo los datos en pares de micrófonos con una interfaz que no tuviera el problema de sincronía, sin embargo esta modificación arrojó resultados que serán objeto de estudio de trabajos posteriores.

3.0 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se muestran los resultados de cada una de estas etapas y el análisis respectivo.

3.1 Programa de procesamiento y cálculo en MATLAB®:

En el esquema de la Figura 3, se muestra de manera gráfica la forma como está estructurado el programa de procesamiento y cálculo para medir el coeficiente de transmisión acústica en tubo de impedancia.

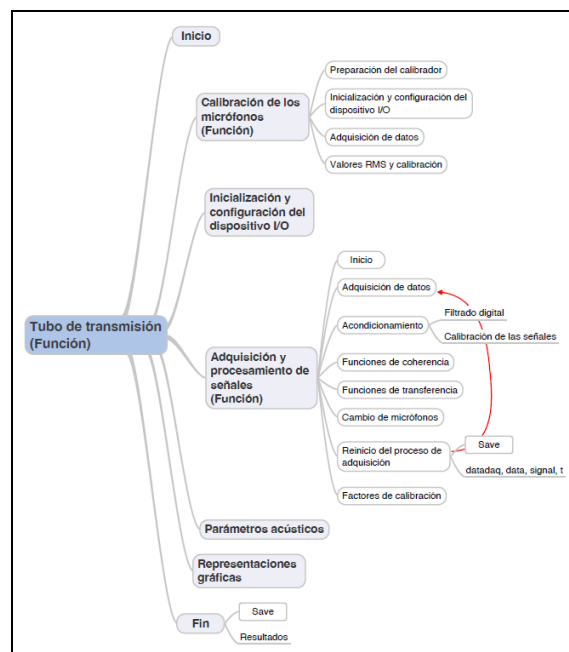


Figura 3. Esquema general del programa de procesamiento y cálculo.

El programa es una función de MATLAB® cuyos parámetros de salida son el coeficiente de transmisión acústica, la pérdida por transmisión y el eje de frecuencias, y los parámetros de entrada son:

- M: número de muestras por promedio (preferentemente potencia de dos).
- N: número de promedios.
- fm: tasa de muestreo deseada [Hz].
- S1: sensibilidad del micrófono usado en el canal 1 [voltios/pascal].
- S2: sensibilidad del micrófono usado en el canal 2 [voltios/pascal].
- S3: sensibilidad del micrófono usado en el canal 3 [voltios/pascal].
- S4: sensibilidad del micrófono usado en el canal 4 [voltios/pascal].
- X1: distancia entre los micrófonos 1 y 2 [m].
- X2: distancia entre los micrófonos 3 y 4 [m].
- L1: distancia entre el micrófono 2 y la muestra (del lado de emisión) [m].
- L2: distancia entre el micrófono 3 y la muestra (del lado de recepción) [m].
- D: distancia entre la terminación y la muestra.
- sig: señal de emisión ('NOISE' o 'SWEEP').

En el primer paso denominado “Inicio”, el programa prepara un directorio en la misma ubicación del archivo función .m de MATLAB® llamado RESULTADOS, en este directorio se almacenarán las adquisiciones y los resultados de la medición.

En el segundo elemento es una subfunción de calibración, cuyo objetivo es como su nombre lo indica, es preparar las señales que están llegando a la interfaz de audio para que con un calibrador acústico de 94dB@1kHz, se registre en MATLAB® el valor equivalente en voltaje.

La inicialización y configuración del dispositivo I/O, prepara la interfaz de entrada y salida para que se lleve a cabo el proceso de adquisición.

La adquisición y procesamiento de señales es otra subfunción del programa principal, en esta se genera la señal de emisión, se realiza el proceso de adquisición de datos, se realiza un acondicionamiento digital sobre los datos adquiridos, luego se calcula la coherencia entre cada par de micrófonos y según una evaluación subjetiva de estos datos por parte del operador del programa se continúa el procedimiento de medición finalizando en el cálculo de las funciones de transferencia necesarias para estimar los parámetros acústicos de interés. Este procedimiento se repite tres veces más, donde se indica un intercambio de micrófonos que permiten hacer una corrección en las funciones de transferencia por diferencias de fase en los micrófonos. También se guardan las adquisiciones, las señales acondicionadas, la señal de prueba y el eje de tiempo.

El procedimiento global de adquisición se repite, tras haber cambiado la terminación del tubo como lo indica el procedimiento de cálculo desarrollado por (Salissou et al, 2009) .

Por último se realiza el cálculo de los parámetros acústicos, de los cuales se grafica el coeficiente de transmisión acústica y se guardan los resultados.

3.2 Comparación de los resultados con las adquisiciones obtenidas por (Machuca, 2011) y mediciones recientes

En la gráfica de la figura 4. Se comparan los resultados obtenidos tras haber aplicado las adquisiciones del experimento llevado a cabo por (Machuca, 2011) y los resultados de una medición llevada a cabo con el programa de procesamiento anteriormente expuesto bajo las mismas características de medición.

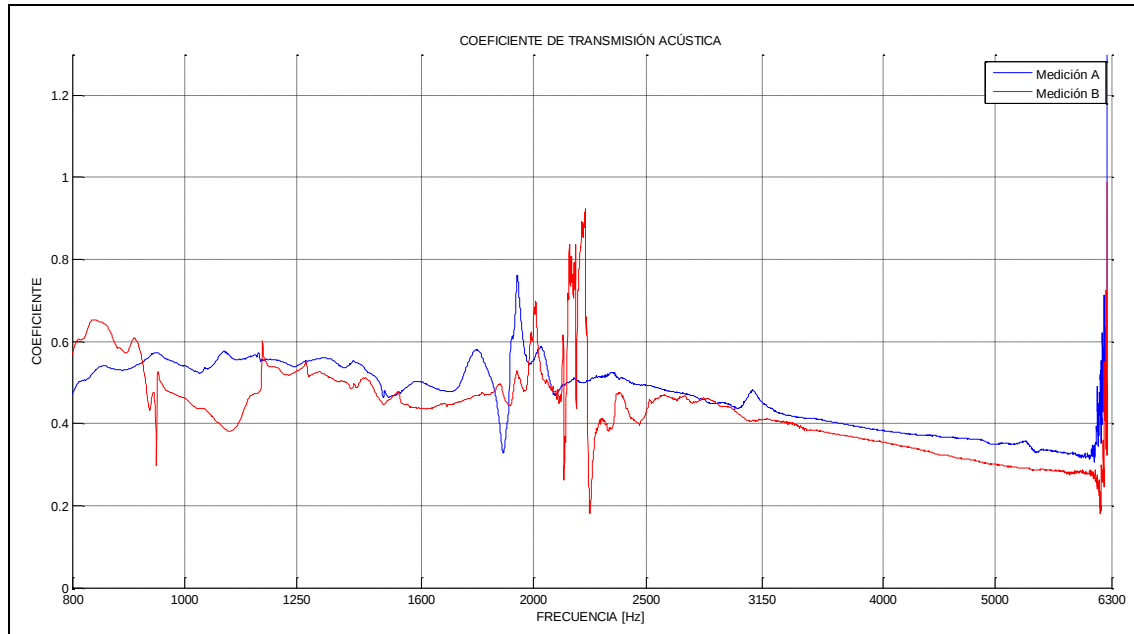


Figura 4. Medición A: Coeficiente de transmisión obtenido por (Machuca, 2011). Medición B: Coeficiente de transmisión obtenido en el trabajo actual.

En la Figura 4. Se comparan los resultados obtenidos tras haber aplicado las adquisiciones del experimento llevado a cabo por (Machuca, 2011) y los resultados de una medición llevada a cabo con el programa de procesamiento anteriormente expuesto bajo las mismas características de medición.

Con la obtención del coeficiente de transmisión de la Medición A, se verifica el funcionamiento del programa reescrito.

El resultado obtenido tras ejecutar el experimento nuevamente, Medición B, sugiere cambios en el sistema que se está evaluando o con el cual se está midiendo. Si bien se nota una tendencia similar de los resultados, entre las frecuencias de 1800Hz a 2500Hz se puede ver un desplazamiento de la zona irregular de la gráfica.

3.3 Comparación de medición con ruido blanco y con señales moduladas

El programa de medición tuvo una implementación nueva, la cual le da la posibilidad de generar la señal de prueba desde el programa mismo. La configuración de la señal de emisión y las características de la medición se discutirán más adelante, sin embargo, en la gráfica de la Figura 5, se comparan los resultados de dos mediciones elaboradas con ruido blanco y señales moduladas (sweep) bajo las características que arrojaron mejores resultados para cada señal.

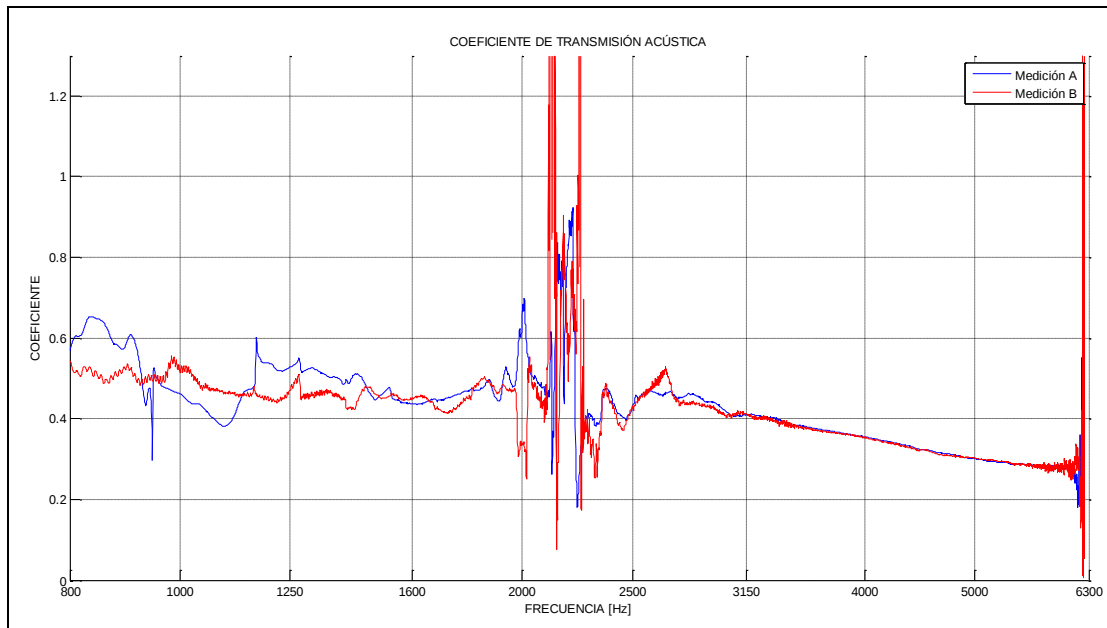


Figura 5. Medición A: Realizada con ruido blanco, Medición B: Realizada con señales moduladas (sweep).

3.4 Comparación de medición con interfaz NI y TASCAM

Tras haber implementado el proceso de emisión de la señal de prueba desde el programa, se detectó una falla en la sincronía de los dispositivos de entrada y salida cuando se utilizaba la interfaz NI-9233 de National Instruments, de cuatro canales de entrada, para adquirir los datos, debido a que el dispositivo de salida debía ser cualquier otra interfaz que utilizara el identificador “winsound”.

Para solucionar dicho problema se modificó el programa de medición para que tuviera la posibilidad de adquirir primero las señales de los micrófonos 1 y 2 y luego las de los 3 y 4. Para este experimento se utilizó la interfaz de audio TASCAM US-122 de dos canales, la cual trabaja también con el identificador “winsound” para el dispositivo de entrada.

Luego de realizar varios experimentos se hizo una evaluación sobre la coherencia de las señales para proporcionar la validez del experimento y una comparación de sus respectivas características. Todas las mediciones se hicieron con señal modulada (sweep).

En las gráficas de la Figuras 6, 7 y 8 se muestran tres experimentos cuyos resultados fueron los más relevantes en esta comparación. En primer lugar vale aclarar que siempre se utilizó la misma frecuencia de muestreo que como se indica en (Machuca, 2011) corresponde a la mínima frecuencia de muestreo posible correspondiente al rango de funcionamiento del tubo.

En segundo lugar, se encontró que la duración de la sweep que mejores resultados arrojó en la coherencia fue de 2^{12} muestras (327.7ms).

El parámetro que se varió entonces fue el número de promedios y la interfaz que se usó. Como puede observarse en las Figuras 6 y 8. Hay una variación considerable de los resultados entre el experimento llevado a cabo con 30 promedios y con un solo promedio en la interfaz de NI. Esta diferencia es inversa en la interfaz TASCAM, para esta interfaz se encontró que mientras más promedios se utilizaran, mejor era la coherencia.

El mismo comportamiento fue encontrado con respecto a la duración de la señal modulada (sweep), mientras el numero de muestras se aleja tanto hacia la derecha como hacia la izquierda de 2^{12} , la coherencia comienza a tener irregularidades.

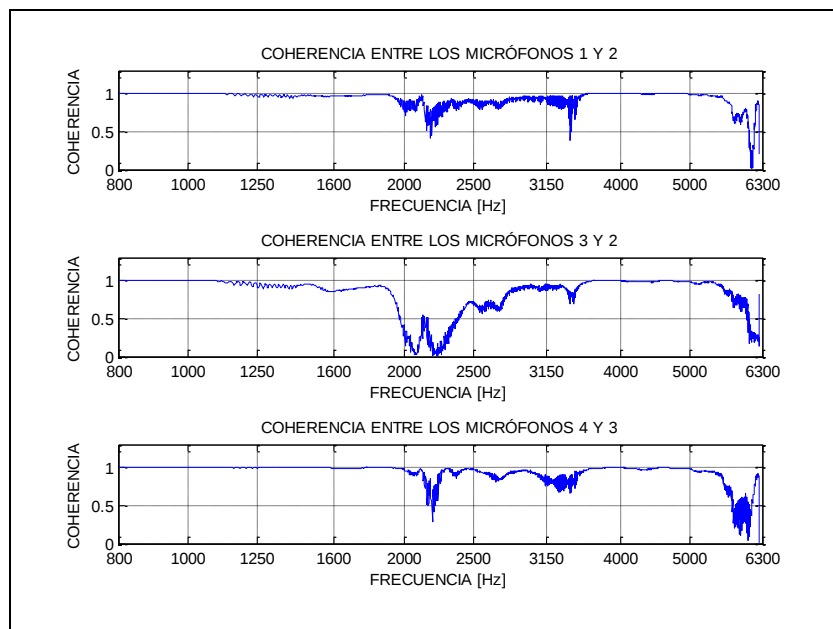


Figura 6. Coherencia de la medición con interfaz NI-9233 ($f_s=12500\text{Hz}$, $M=2^{12}$, $N=30$).

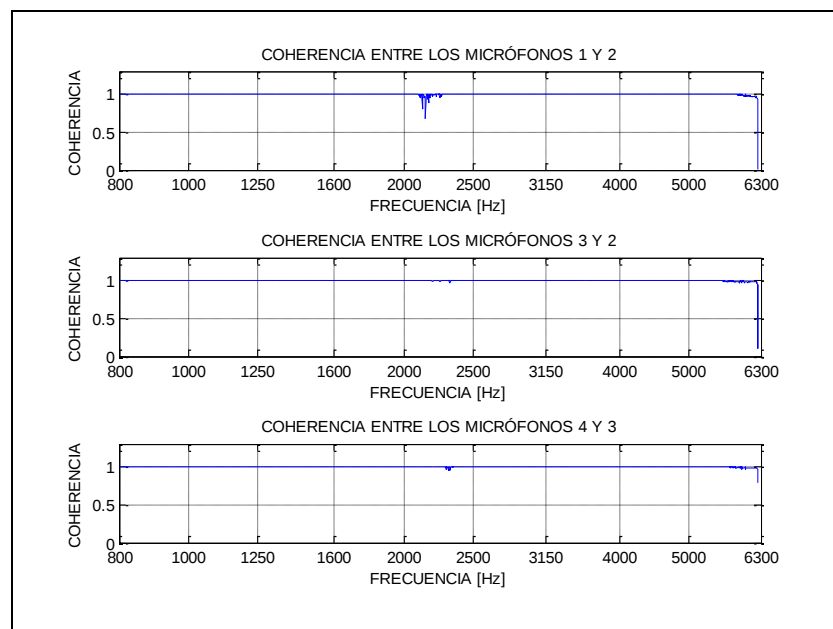


Figura 7. Coherencia de la medición con interfaz TASCAM ($f_s=12500\text{Hz}$, $M=2^{12}$, $N=30$).

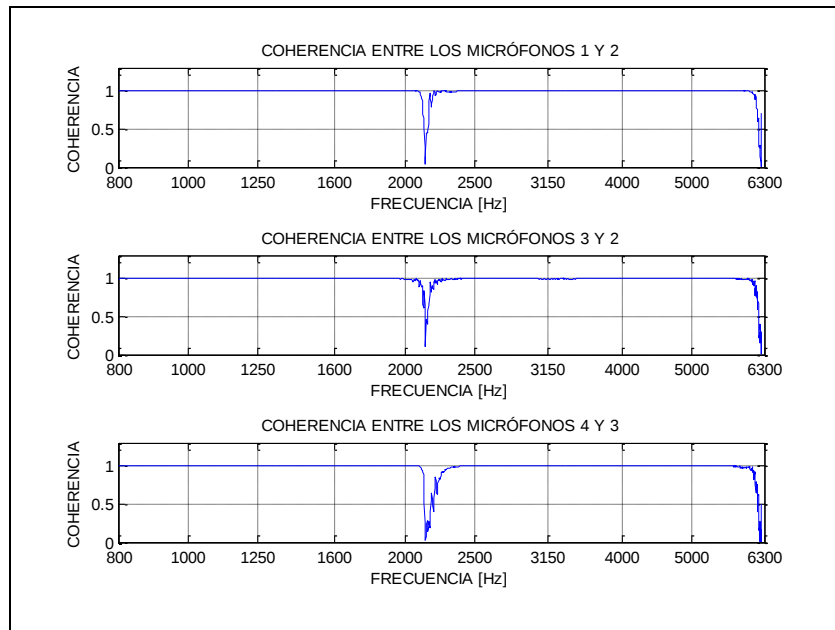


Figura 8. Coherencia de la medición con interfaz NI-9233 ($f_s=12500$, $M=2^{12}$, $N=1$).

CONCLUSIONES

El programa de procesamiento y cálculo fue reescrito de manera óptima, logrando reducir su longitud en líneas de código y mejorando su estructura lógica.

A pesar de las diferencias entre los datos obtenidos por (Machuca, 2011) y los obtenidos en este trabajo, se logró una repetitividad de los resultados, que aun no ha sido cuantificada, sin embargo cada vez que se realizó el experimento, se lograron resultados con la misma tendencia.

La medición realizada con ruido blanco y con sweep arrojó un resultado coherente y tiene la misma tendencia para ambas señales. Por lo tanto se hace una primera verificación del coeficiente de transmisión acústica por medio de dos señales de prueba diferentes.

Por medio de un análisis de la coherencia entre los micrófonos, logró encontrarse un problema de sincronía entre los dispositivos de entrada y salida, sin embargo los análisis solo se realizaron con la magnitud de la coherencia y del coeficiente de transmisión acústica y no con la fase.

TRABAJO FUTURO

El algoritmo de procesamiento fue implementado para que desde el programa se generara y adquirieran las señales necesarias en la medición, hace falta hacer una verificación de las características de la señal de emisión que proporcione mejores resultados, esto es duración de la modulación, rango de variación de frecuencias, tipo de barrido (lineal o logarítmica), entre otras. También se propone modificar el procedimiento de adquisición por medio del uso de eventos o callbacks del data acquisition toolbox de MATLAB®, lo cual proporcionaría la opción de realizar cálculos al mismo tiempo que se está realizando la adquisición.

Tras haber verificado el funcionamiento del programa reescrito, y realizar una medición bajo las mismas condiciones con que se realizó en (Machuca, 2011), se evidencia un cambio en la cadena de medición. Este cambio es un dato a indagar en investigaciones posteriores, se sugiere verificar el estado del material (Espuma de poliuretano de 32 kg/m^3 gris) y del altavoz.

Se sugiere indagar en los problemas de sincronía de los dispositivos de entrada y salida, proponiendo un análisis con mayor resolución sobre los retrasos inducidos por el motor de audio, o tal vez implementando un nuevo procedimiento de medición de las funciones de transferencia que elimine el efecto de dichos problemas de sincronía.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín, Colombia, y a la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente al Grupo de Acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, por posibilitar la movilidad internacional que permitió el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1]. **International Standard Organization.** Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. *ISO 10534*.
- [2]. **Pérez Ruíz, Santiago J y Loera Medrano, Gilberto.** Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancias del centro de instrumentos, UNAM. *Revista mexicana de física*. México : s.n., 2000.
- [3]. **Salissou, Yacoubou y Panneton, Raymond.** A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube. *Journal of the Acoustical Society of America*. April de 2009. Vol. 125, 4.
- [4]. **Bonfiglio, Paolo y Pompoli, Francesco.** A single measurement approach for the determination of the normal incidence transmission loss. *Journal of the Acoustical Society of America*. September de 2008. Vol. 124, 3.
- [5]. **Dong-Li, Peng, Peng, Hu y Bei-Li, Zhu.** The modified method of measuring the complex transmission coefficient of multilayer acoustical panel in impedance tube. *Applied Acoustics*. 2008. Vol. 69, págs. 1240-1248.
- [6]. **Machuca Tzili, Felipe Arturo.** Desarrollo de un sistema de medición de aislamiento sonoro a incidencia normal. *Universidad Nacional Autónoma de México*. [Trabajo de tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniería Eléctrica, Instrumentación Acústica]. 2011.

Apéndice A

Listado de programa utilizado

```
function [tau STL F]=TUBO_TRANSMISION(M,N,fm,S1,S2,S3,S4,X1,X2,L1,L2,D,sig)
% TUBO DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA - UNAM/CCADET
% Programa de medición del coeficiente de transmisión acústica en tubo de impedancia
% Sintaxis: [tau STL F]=TUBO_TRANSMISION(M,N,fm,S1,S2,S3,S4,X1,X2,L1,L2,D,sig);
% Ejemplo: [tau STL F]=TUBO_TRANSMISION(2^14,30,12500,1.554e-3,1.519e-3,1.595e-3,1.415e-3,22.0e-3,20.7e-3,29e-3,29e-3,38.3e-2,'NOISE');
% tau   coeficiente de transmisión acústico [magnitud]
% STL   coeficiente de transmisión acústico [dB]
% F     eje de frecuencias físicas [Hz]
% M     número de muestras por promedio (preferentemente potencia de dos)
% N     número de promedios
% fm    tasa de muestreo deseada [Hz]
% S1    sensibilidad del micrófono usado en el canal 1 [voltios/pascal]
% S2    sensibilidad del micrófono usado en el canal 2 [voltios/pascal]
% S3    sensibilidad del micrófono usado en el canal 3 [voltios/pascal]
% S4    sensibilidad del micrófono usado en el canal 4 [voltios/pascal]
% X1    distancia entre los micrófonos 1 y 2 [m]
% X2    distancia entre los micrófonos 3 y 4 [m]
% L1    distancia entre el micrófonos 2 y la muestra (del lado de emisión) [m]
% L2    distancia entre el micrófonos 3 y la muestra (del lado de recepción) [m]
% D     distancia entre la terminación y la muestra
% sig   señal de emisión ('NOISE' o 'SWEEP')

%% INICIO
fprintf("\nPROGRAMA DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA\nCON TUBO DE IMPEDANCIA\n\nPOR FAVOR SIGA LAS INSTRUCCIONES\n\nPRESIONE ENTER PARA INICIAR...\n\n"); pause;

fprintf("\nCREANDO EL DIRECTORIO DE RESULTADOS...\n");
[s,mess]=mkdir('RESULTADOS');
if (strcmp('Directory already exists:',mess))
    fprintf('EL DIRECTORIO "..\RESULTADOS" YA EXISTE\n\n');
else
    fprintf('EL DIRECTORIO "..\RESULTADOS" FUE CREADO EXITOSAMENTE\n\n');
end

descripcion=sprintf("\nDESCRIPCIÓN DE LA MEDICIÓN:\n\número de muestras por promedio: %g\n\número de promedios: %g\n\ntasa de muestreo deseada [Hz]: %g\n\ntsensibilidad del micrófono usado en el canal 1 [voltios/pascal]: %g\n\ntsensibilidad del micrófono usado en el canal 2 [voltios/pascal]: %g\n\ntsensibilidad del micrófono usado en el canal 3 [voltios/pascal]: %g\n\ntsensibilidad del micrófono usado en el canal 4 [voltios/pascal]: %g\n\ntdistancia entre los micrófonos 1 y 2 [m]: %g\n\ntdistancia entre los micrófonos 3 y 4 [m]: %g\n\ntdistancia entre el micrófonos 2 y la muestra (del lado de emisión) [m]: %g\n\ntdistancia entre el micrófonos 3 y la muestra (del lado de recepción) [m]: %g\n\ntdistancia entre la terminación y la muestra [m]: %g\n\ntseñal de emisión: %s\n\n",M,N,fm,S1,S2,S3,S4,X1,X2,L1,L2,D,sig);
fprintf(descripcion);

%% CALIBRACIÓN DE LOS MICROFONOS
% cal(1)=CALIBRACION(M,fm,S1,1);
% cal(2)=CALIBRACION(M,fm,S2,2);
% cal(3)=CALIBRACION(M,fm,S3,3);
% cal(4)=CALIBRACION(M,fm,S4,4);
cal=[0.755 0.804 0.802 0.820];

%% INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO I/O
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
ao=analogoutput('winsound');
ch_ai=addchannel(ai,0:3);
ch_ao=addchannel(ao,1);

set(ai,'SampleRate',fm);
set(ao,'SampleRate',fm);
fs = get(ai,'SampleRate');

set(ai,'SamplesPerTrigger',M);

set(ch_ai,'SensorRange',[-.05 .05]);
```

```

    set(ch_ai,'InputRange',[-5 5]);
%   ai=0;
%   ao=0;
%   fs=fm;

%% ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES
[C12 C32 C43 H12 H32 H43 F]=ADQUISICION(ai,ao,M,N,fs,cal,'1',sig);
fprintf("\nCAMBIE LA TERMINACIÓN DEL TUBO Y PRESIONE ENTER...\n\n"); pause;
[C12p C32p C43p H12p H32p H43p]=ADQUISICION(ai,ao,M,N,fs,cal,'2',sig);

%% PARÁMETROS ACÚSTICOS
k=2*pi*F/340;

r1=((H12-exp(1i*k*X1))./(exp(-1i*k*X1)-H12)).*exp(2*1i*k*L1);
rb=((H43-exp(-1i*k*X2))./(exp(1i*k*X2)-H43)).*exp(-2*1i*k*L1);
r1p=((H12p-exp(1i*k*X1))./(exp(-1i*k*X1)-H12p)).*exp(2*1i*k*L1);
rbp=((H43p-exp(-1i*k*X2))./(exp(1i*k*X2)-H43p)).*exp(-2*1i*k*L2);

% coeficientes auxiliares para simplificar la notación
r=((exp(-1i*k*L2)+rb.*exp(1i*k*L2)).*(exp(1i*k*L1)+r1p.*exp(-1i*k*L1)))./((exp(-1i*k*L2)+rbp.*exp(1i*k*L2)).*(exp(1i*k*L1)+r1.*exp(-1i*k*L1)));
h=H32./H32p;
r2=((r-h)./((r.*rbp)-(h.*rb))).*exp(-2*1i*k*D);

% coeficiente de transmisión
tau = H32.*(1-(r2.*rb.*exp(2*1i*k*D))).*((exp(1i*k*L1)+(r1.*exp(-1i*k*L1)))./(exp(-1i*k*L2)+(rb.*exp(1i*k*L2))));
STL = 20*log10(1./abs(tau));

%% REPRESENTACIONES GRÁFICAS
figure
hold on
grid on
semilogx(F,abs(tau))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('COEFICIENTE')
title('COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA')
axis([800 6300 0 1.3]);
set(gca,'XScale','log','XTick',[800;1000;1250;1600;2000;2500;3150;4000;5000;6300]);

%% FIN
save ([cd
'RESULTADOS\RESULTADOS'],'descripcion','cal','C12','C32','C43','C12p','C32p','C43p','H12','H32','H43','H12p','H32p','H43p','r1','r
b','r1p','rbp','r2','tau','STL','F');
fprintf("\n\nFIN DEL PROGRAMA\n\n");
end

function cal=CALIBRACION(M,fm,S,ch)
% CALIBRACIÓN DE MICRÓFONO - UNAM/CCADET
% Sintaxis: cal=B_CALIBRACION_NIDAQ(M,fm,S,ch)
% Ejemplo: cal(1)=B_CALIBRACION_NIDAQ(M,fm,S1,1);
% cal   coeficiente de calibración
% M     número de muestras
% fm    tasa de muestreo deseada [Hz]
% S     sensibilidad del micrófono [volts/pascal]
% ch    número del canal del micrófono en la tarjeta de adquisición

%% PREPARACIÓN DEL CALIBRADOR
fprintf("\nUBIQUE EL CALIBRADOR EN EL MICRÓFONO %g Y PRESIONE ENTER...\n",ch); pause;

%% INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO I/O
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
ch_ai=addchannel(ai,ch-1);

set(ai,'SampleRate',fm);

set(ai,'SamplesPerTrigger',M);

set(ch_ai,'SensorRange',[-.05 .05]);
set(ch_ai,'InputRange',[-5 5]);

```

```

%% ADQUISICIÓN DE DATOS
start(ai)
while strcmp(ai.Running,'On'); end
data=getdata(ai)/100;

%% VALORES RMS Y CALIBRACIÓN
Vrms=sqrt(mean(data.^2));
cal=((20e-6)*S*(10^(94/20)))/Vrms;
end

function [C12 C32 C43 H12 H32 H43 F]=ADQUISICION(ai,ao,M,N,fs,cal,x,sig)
% ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES - UNAM/CCADET
% Sintaxis: [C12 C32 C43 H12 H32 H43 F]=C_ADQUISICION_WINSOUND(ai,ao,M,N,fs,cal,x,sig)
% Ejemplo: [C12 C32 C43 H12 H32 H43 F]=C_ADQUISICION_WINSOUND(ai,ao,M,N,fs,cal,'1',sig)
% C12 coherencia entre los micrófonos 1 y 2
% C32 coherencia entre los micrófonos 3 y 2
% C43 coherencia entre los micrófonos 4 y 3
% H12 función de transferencia entre los micrófonos 1 y 2
% H32 función de transferencia entre los micrófonos 3 y 2
% H43 función de transferencia entre los micrófonos 4 y 3
% F eje de frecuencias físicas [Hz]
% ai dispositivo de entrada
% ao dispositivo de salida
% M número de muestras por disparo (preferentemente potencia de dos)
% N número de promedios
% fs tasa de muestreo configurada [Hz]
% cal coeficientes de calibración de voltaje a dB
% x número de serie de la medición
% sig señal de emisión ('NOISE' o 'SWEEP')

%%
=====
%% INICIO
fprintf("\nUBIQUE LOS MICRÓFONOS EN EL ORDEN 1234 Y PRESIONE ENTER...\n\n"); pause;

d=(M-1)/fs;
t=0:1/fs:d; t=t';
if strcmp(sig,'SWEEP')
    signal=chirp(t,400,d,6250,'logarithmic');
elseif strcmp(sig,'NOISE')
    signal=rand(M,1);
end

j=1;
while (j<=4)

%% ADQUISICIÓN DE DATOS
datadaq=zeros(M*N,4);
fprintf("\nADQUIRIENDO DATOS, POR FAVOR ESPERE...\n");
for n=0:N-1;
    putdata(ao,signal);
    start([ao,ai]);
    while strcmp(ai.Running,'On'); end
    datadaq(n*M+1:n*M+M,:)=getdata(ai);
end
stop([ai ao]);
% if j==1
%     filename=sprintf('T%s_1234a',x);
% elseif j==2
%     filename=sprintf('T%s_2143',x);
% elseif j==3
%     filename=sprintf('T%s_1324',x);
% elseif j==4
%     filename=sprintf('T%s_1234b',x);
% end
% load([cd 'A RUIDO EXTERNO ARTURO NIDAQ' filename '.mat'], 'datadaq');
fprintf("\nPROCESANDO DATOS, POR FAVOR ESPERE...\n");

%% ACONDICIONAMIENTO

```

```

% FILTRADO DIGITAL
fc1=600; % RANGO DEL TUBO = 860
fc2=6200; % RANGO DEL TUBO = 6800
wc1=fc1*2/fs;
wc2=fc2*2/fs;
[b,a]=butter(2,[wc1 wc2]);

data=dtrend(datadaq);
data=filter(b,a,data);
data=data./100;

%CALIBRACIÓN DE LAS SEÑALES
for k=1:4;
    data(:,k)=data(:,k)./cal(k);
end

%% FUNCIONES DE COHERENCIA
NFFT=2^nextpow2(M);
win=rectwin(NFFT);

if j==1
    [C12 F]=mscohere(data(:,2),data(:,1),win,[],NFFT,fs);
    [C32 ]=mscohere(data(:,2),data(:,3),win,[],NFFT,fs);
    [C43 ]=mscohere(data(:,3),data(:,4),win,[],NFFT,fs);

    % GRÁFICAS DE LA COHERENCIA
    subplot(311), plot(F,C12);
    hold on; grid on;
    xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
    ylabel('COHERENCIA')
    title('COHERENCIA ENTRE LOS MICRÓFONOS 1 Y 2')
    axis([800 6300 0 1.3]);
    set(gca,'XScale','log','XTick',[800;1000;1250;1600;2000;2500;3150;4000;5000;6300]);
    subplot(312), plot(F,C32);
    hold on; grid on;
    xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
    ylabel('COHERENCIA')
    title('COHERENCIA ENTRE LOS MICRÓFONOS 3 Y 2')
    axis([800 6300 0 1.3]);
    set(gca,'XScale','log','XTick',[800;1000;1250;1600;2000;2500;3150;4000;5000;6300]);
    subplot(313), plot(F,C43);
    hold on; grid on;
    xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
    ylabel('COHERENCIA')
    title('COHERENCIA ENTRE LOS MICRÓFONOS 4 Y 3')
    axis([800 6300 0 1.3]);
    set(gca,'XScale','log','XTick',[800;1000;1250;1600;2000;2500;3150;4000;5000;6300]);

    fprintf('\n\nCOMPROBANDO LA COHERENCIA ENTRE LOS MICRÓFONOS\nPRESIONE ENTER PARA
CONTINUAR...\n\n'); pause;
    close all
end

%% FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
[H12 ]=tfestimate(data(:,2),data(:,1),win,[],NFFT,fs);
[H32 ]=tfestimate(data(:,2),data(:,3),win,[],NFFT,fs);
[H43 ]=tfestimate(data(:,3),data(:,4),win,[],NFFT,fs);

%% CAMBIO DE MICROFONOS
if j==1
    H12a=H12;
    H32a=H32;
    H43a=H43;
    fprintf('\nUBIQUE LOS MICRÓFONOS EN EL ORDEN 2143 Y PRESIONE ENTER...\n\n'); pause;
    filename=sprintf('T%s_1234a',x);
elseif j==2
    H21=H12;
    H34=H43;
    fprintf('\nUBIQUE LOS MICRÓFONOS EN EL ORDEN 1324 Y PRESIONE ENTER...\n\n'); pause;
    filename=sprintf('T%s_2143',x);

```

```

elseif j==3
    H23=H32;
    fprintf('\nUBIQUE LOS MICRÓFONOS EN EL ORDEN 1234 Y PRESIONE ENTER...\n\n'); pause;
    filename=sprintf('T%s_1324',x);
elseif j==4
    H12b=H12;
    H32b=H32;
    H43b=H43;
    filename=sprintf('T%s_1234b',x);
end
%% REINICIO DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN
j = j+1;
save ([cd 'RESULTADOS\' filename], 'datadaq', 'data', 'signal', 't')
end

%%
=====
=====
%% FACTORES DE CALIBRACIÓN
HcA=sqrt(H12a.*H21);
H12=H12b./HcA;

HcB=sqrt(H32a.*H23);
H32=H32b./HcB;

HcC=sqrt(H43a.*H34);
H43=H43b./HcC;
end

```