



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Diseño de un software de caracterización acústica de materiales mediante una tarjeta NIDAQ en un tubo

MEMORIA PRESENTADA POR:

Enrique Ramis Claver

Master Universitario en Ingeniería, Procesado y Fabricación de Materiales

Convocatoria de defensa: Julio 2017

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda inestimable del departamento de acústica aplicada de la universidad de alicante, pues gracias a ellos he tenido acceso a diversos materiales que no podría tener acceso de forma normal. Dentro de este grupo, agradecer especialmente a Pedro Poveda Martínez su impagable ayuda en tal tarea y su desmedida paciencia cuando ha sido necesaria.

Agradecer también, a mis padres por facilitarme (y financiarme) una educación, darme apoyo y ayudar en momentos complicados, porque sin ellos no hubiese llegado hasta aquí.

“Solo hay un bien, el conocimiento, y solo hay un mal, la ignorancia” - Sócrates

| | |
|---|-----------|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 1 |
| 1.2 Motivación | 1 |
| 1.3 Planificación | 2 |
| 1.4 Distribución | 3 |
| II. FUNDAMENTOS | 4 |
| 2.1 Fundamentos y definiciones | 4 |
| 2.1.1. Velocidad del sonido | 9 |
| 2.1.2. Numero de onda | 10 |
| 2.1.3. Impedancia acustica | 11 |
| 2.1.4. Coeficiente de reflexión | 12 |
| 2.1.5. Coeficiente de absorción | 13 |
| 2.2 Mecanismos de absorción acustica | 14 |
| 2.2.1. Porosidad | 15 |
| 2.2.2. Diametro de fibra..... | 15 |
| 2.2.3. Factor de estructura | 15 |
| 2.2.4. Resistividad al flujo | 15 |
| III. APLICACIONES A REALIZAR | 17 |
| 3.1. Impedancia y absorción | 17 |
| 3.1.1. Normativa / Referencia asociada | 17 |
| 3.1.2. Problemática asociada | 21 |
| 3.1.3. Montaje experimental..... | 21 |
| 3.2. Resistencia al flujo | 22 |
| 3.2.1. Normativa / Referencia asociada | 22 |
| 3.2.2. Problemática asociada | 24 |
| 3.2.3. Montaje experimental..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3. Perdidas por transmisión | 25 |
| 3.3.1. Normativa / Referencia asociada | 25. |
| 3.3.2. Problemática asociada | 31 |
| 3.3.3. Montaje experimental..... | 32 |
| 3.4. Impedancia mecánica | 32 |
| 3.4.1. Normativa / Referencia asociada | 32 |
| 3.4.2. Problemática asociada | 32 |
| 3.4.3. Montaje experimental..... | 33 |
| IV. INTRODUCCIÓN A LABVIEW | 34 |
| 4.1. Estructuras de control | 36 |
| 4.1.1. Estructuras de control principales | 36 |
| 4.1.2. Estructuras de control secundarias | 36 |
| 4.2. Formatos de datos | 37 |
| 4.3. DAQmx | 38 |
| 4.4. Jerarquía de funciones | 39 |
| V. DESARROLLO | 40 |
| 5.1. Programa principal..... | 40 |
| 5.1.1. Panel frontal | 40 |
| 5.1.2. Código | 43 |
| 5.2. Absorción..... | 44 |
| 5.2.1. Panel frontal | 44 |
| 5.2.2. Código | 46 |
| 5.3. Resistencia al flujo | 49 |
| 5.3.1. Panel frontal | 49 |
| 5.3.2. Código | 51 |
| 5.1. Martillo de impacto | 53 |
| 5.4.1. Panel frontal | 53 |
| 5.4.2. Código | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1. Perdidas por transmisión | 56 |
| 5.1.1. Panel frontal | 56 |
| 5.1.2. Código | 57 |
| VI. CONCLUSIONES | 62 |
| VI. LÍNEAS FUTURAS | 63 |
| VII. BIBLIOGRAFÍA | |
| VIII. ANEXOS | |

Listado de figuras

Figura 2.1 Representación de un frente de onda esférico

Figura 2.2 a) Esquema de diversas reflexiones en una sala

b) Representación de la respuesta al impulso

Figura 2.3 Planos de presión constante en una onda plana

Figura 2.4 Tubo de impedancia y compresión producida sobre un volumen V .

Figura 3.5 Presiones incidente, reflejada y transmitida, en un cambio de medio.

Figura 3.1. Diagrama del montaje para medir coeficiente de absorción

Figura 3.2. Detalle del final del tubo en montaje experimental

Figura 3.3 Detalle de zona donde va el material en el tubo.

Figura 3.4. Detalle de la terminación rígida del final del tubo en montaje experimental

Figura 3.5 Diagrama del montaje de tubo para medir resistencia al flujo

Figura 3.6. Detalle de la terminación rígida del final del tubo en montaje experimental

Figura 3.7. Detalle del final del tubo en montaje experimental

Figura 3.8. Diagrama del montaje para medir las pérdidas por transmisión.

Figura 3.9. Diagrama esquemático del setup de medida descrito en la normativa. Se aconseja una terminación anecoica

Figura 3.10. Calibración de micrófonos en la dirección longitudinal

Figura 3.11. Calibración de micrófonos en la dirección transversal

Figura 3.12. Esquema de componentes del martillo

Figura 3.13. Montaje experimental para obtener la rigidez dinámica de un material

Figura 4.1 Panel Frontal (izq.) y diagrama de bloques (der.)

Figura 4.2 Paleta de funciones.

Figura 4.4 Estructuras de control del programa.

Figura 4.5 Scripts de programación en texto.

Figura 4.6 Diferentes indicadores, dependiendo del contenido.

Figura 4.6. Librerías DAQmx.

Figura 4.8 Jerarquía entre los vi's que forman un programa.

Figura 5.2. Pantalla “welcome” del programa principal.

Figura 5.2. Pantalla de selección “Absorption” del programa principal.

Figura 5.3. Pantalla de selección “Flux Resistance” del programa principal.

Figura 5.4. Pantalla de selección “MMIH” del programa principal.

Figura 5.5. Pantalla de selección “TLoss” del programa principal.

Figura 5.6. Diagrama de bloques de “Pantalla Principal”.

Figura 5.7. Vi’s correspondientes a cada método de caracterización.

Figura 5.8. Mensaje de salida del programa principal..

Figura 5.9. Pantalla de selección “TLoss” del programa principal.

Figura 5.10. Detalle de los parámetros de configuración.

Figura 5.11. Pestaña de graficas de Magnitud y Fase.

Figura 5.12. Pestaña con la gráfica de coeficiente de absorción.

Figura 5.13. Código de activación de micrófonos IEPE.

Figura 5.14. Código de sincronización de micrófonos y emisión de señal.

Figura 5.15. Código de adquisición de micrófonos y FFT.

Figura 5.16. Código para mostrar un mensaje de advertencia para cambiar los micrófonos.

Figura 5.17. Código para calcular el coeficiente de absorción.

Figura 5.18. Código para calcular la impedancia acústica.

Figura 5.19. Panel frontal del programa “Flux Resistance”.

Figura 5.20. Detalle de la zona de configuración.

Figura 5.21. Pestaña de resultados “Magnitud”.

Figura 5.22. Código de activación de micrófonos IEPE.

Figura 5.23. Código para configurar la emisión de señal y la grabación de micrófonos.

Figura 5.24. Código para la emisión de señal y la grabación de micrófonos, así como FFT.

Figura 5.25 Código para mostrar un mensaje.

Figura 5.26. Código para la emisión de señal y la grabación de micrófonos, asi como FFT.

Figura 5.27. Panel frontal en la aplicación MMIH.

Figura 5.28. Detalle de la zona de configuración.

Figura 5.29. Código que precarga variables al programa.

Figura 5.30. Código de cálculo de variables y activación IEPE.

Figura 5.31. Código de cálculo de variables y activación IEPE.

Figura 5.32. Código de cálculo de variables y activación IEPE.

Figura 5.33. Panel frontal de aplicación "TLoss".

Figura 5.34. Pestaña de configuración.

Figura 5.35 Pestaña de grafica con resultados de "TLoss".

Figura 5.36 Código de activación IEPE y configuración de la emisión.

Figura 5.37 Código de adquisición y emisión de señal, además de tratamiento FFT.

Figura 5.38 Código para guardar las FFT en variables.

Figura 5.39 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

Figura 5.40 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

Figura 5.41 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

Figura 5.42 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

Figura 5.43 Código para calcular los factores de corrección.

Figura 5.44 Código para mostrar un mensaje.

Figura 5.45 Código para activar IEPE e iniciar otra tarea de emisión/grabación.

Listado de tablas

Tabla I: Cronograma correspondiente al diagrama de Gantt.

Tabla II: Configuraciones de medida y procedimientos especificados en la norma E2611-09 de ASTM

1 Introducción y planteamiento

1.1 Objetivo general

El objeto del presente trabajo, que se propone para evaluación como proyecto final de master en el *Master Universitario de Ingeniería, Procesado y Fabricación de materiales*, es el de implementar un software en LabVIEW© para la caracterización acústica de materiales. Cuatro son los programas desarrollados, tres de ellos para ser utilizados en configuraciones en las que se necesita un tubo (de Kundt) con diferentes accesorios de apoyo y distintas características, según la aplicación. El cuarto programa tiene como objeto servir de apoyo para llevar a cabo medidas de impedancia mecánica (o movilidad, en su caso). El equipamiento de apoyo en este caso es un martillo de impactos y un acelerómetro.

El sistema nervioso central de estos programas es la tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ 9233 (Anexo I) y fue seleccionada en una etapa previa al comienzo de este trabajo.

Este software será una colección de programas que podría constituir una plataforma ampliable. Como se ha comentado, permitirá llevar a cabo una serie de caracterizaciones, procurando ser lo más completa posible dada la fecha límite tomada para este proyecto. A continuación se expone los programas que se quieren desarrollar:

- Pérdidas de Transmisión (Transmission Loss)
- Coeficiente de absorción & Impedancia (Absorption & Impedance)
- Resistencia al flujo (Flux resistance)
- Ensayo de movilidad mecánica : Martillo Impedancia (Impedance Hammer)

Cada una de las formulas y conocimientos necesarios, así como los datos de los montajes necesarios en cada experiencia, han sido extraídos de la normativa o de publicaciones de referencia y serán descritos más adelante en este documento en su correspondiente apartado.

1.2 Motivación

Dada la naturaleza frenética de las vidas en los núcleos urbanos, así como el desarrollo de actividades de carácter industrial en algunas zonas que se encuentran cerca de viviendas, o el hecho de tener un vecino músico en un bloque de apartamentos, ha incrementado la preocupación por las condiciones de aislamiento y acondicionamiento acústicos en los distintos ámbitos de la vida cotidiana a lo largo de los últimos años. Un mal acondicionamiento puede producir estrés auditivo y perjudicar a la salud del trabajador, así como un aislamiento incorrecto puede provocar molestias en los alrededores si realiza altos niveles de ruido. Debido a este problema creciente,

las asociaciones que imponen las normativas, son cada vez más exigentes y establecen mayores controles en cuanto a los niveles de ruido admisibles.

También cabe tener en cuenta que debido a la preocupación creciente por el medio ambiente han aparecido, y siguen apareciendo, nuevos materiales de fuentes recicladas de diversos orígenes, por lo que es importante ser capaz de obtener las propiedades del material para así evitar cometer errores en su selección o uso.

Por ello, y dependiendo de la aplicación a la que esté dirigida el material, puede ser más interesante una propiedad que otra, por lo que es útil contar con una colección de programas de caracterización que sea versátil.

1.3 Planificación

Se presenta, en la siguiente tabla un cronograma aproximado.

| Nombre de la tarea | Fecha de Inicio | Fecha final | Duración |
|---------------------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|
| Planificación | 16/01/17 | 14/03/17 | 42d |
| Recopilar documentación | 16/01/17 | 10/02/17 | 20d |
| Lectura y estudio de la documentación | 10/02/17 | 13/03/17 | 22d |
| Decisión sobre que métodos programar | 13/03/17 | 14/03/17 | 2d |
| Desarrollo | 13/03/17 | 03/07/17 | 81d |
| Programa 1 | 13/03/17 | 17/04/17 | 26d |
| Programación | 13/03/17 | 04/04/17 | 17d |
| Prueba y error | 04/04/17 | 14/04/17 | 9d |
| Acabado estético | 14/04/17 | 17/04/17 | 2d |
| Programa 2 | 17/04/17 | 23/05/17 | 27d |
| Programación | 17/04/17 | 04/05/17 | 14d |
| Prueba y error | 04/05/17 | 23/05/17 | 14d |
| Acabado estético | 23/05/17 | 23/05/17 | 1d |
| Programa 3 | 23/05/17 | 20/06/17 | 21d |
| Programación | 23/05/17 | 09/06/17 | 14d |
| Prueba y error | 09/06/17 | 20/06/17 | 8d |
| Acabado estético | 20/06/17 | 20/06/17 | 1d |
| Programa 4 | 21/06/17 | 03/07/17 | 9d |
| Programación | 21/06/17 | 29/06/17 | 7d |
| Prueba y error | 30/06/17 | 03/07/17 | 2d |
| Acabado estético | 03/07/17 | 03/07/17 | 1d |
| Redacción | 16/01/17 | 05/07/17 | 123d |

Tabla I: Cronograma correspondiente al diagrama de Gantt.

En el anexo II se ha incluido un diagrama tipo Gantt por si hay alguna duda sobre la repartición de los días a lo largo del trabajo

Para conseguir el objetivo general planteado es necesario abordar unos objetivos específicos:

1. Llevar a cabo una revisión bibliográfica (artículos, normativas, teoría básica) para estructurar los fundamentos.
2. Revisar la literatura sobre el tema de la determinación de las pérdidas por transmisión, coeficiente de absorción, resistencia al flujo o ensayo de movilidad.
3. Implementar un código en LabVIEW que facilite la caracterización de materiales mediante un tubo de Kundt (o el martillo de impedancia) a través de un programa único.
4. Comprobar que el software implementado funciona correctamente y los resultados son coherentes.

1.4 Distribución

El presente documento, se ha estructurado de la siguiente forma:

- En el capítulo 1, *Introducción*, se realiza una breve introducción al tema al mismo tiempo que se contextualiza el problema. Además, expone el reparto de días y tareas para llevar a cabo la elaboración de los programas así como la memoria.
- En el capítulo 2 se revisan los conceptos básicos sobre los que se apoya este TFM a lo largo de su desarrollo
- El capítulo 3, se ha dedicada a la descripción de las aplicaciones a realizar, así como las normativas asociadas a cada experiencia.
- El capítulo 4, contiene una breve introducción a LabVIEW, donde se explican conceptos básicos para entender el código descrito.
- El capítulo 5 contiene la descripción del código elaborado, incluyendo la pantalla principal de cada programa desde la que se accede a la ejecución de las acciones necesarias.
- El capítulo 6 contiene las conclusiones extraídas tras la elaboración de este proyecto
- Por último, el capítulo 7 se detallan líneas futuras de acción.

2 Fundamentos

2.1. Fundamentos y definiciones.

En un espacio donde no hay perturbaciones, las moléculas de aire están continuamente en movimiento. La temperatura de las moléculas hace que se muevan aleatoriamente, golpeándose y cambiando la dirección en todo momento. Aun a pesar de eso, un pequeño volumen de aire se puede considerar como a una unidad, ya que cuando unas moléculas dejan su posición, otras lo ocupan. Esta agitación constante de las moléculas provoca una presión estática de unos 10^5 Pa, que nos rodea constantemente.

Si en un recinto se sitúa un altavoz y se alimenta con una señal, la membrana del altavoz se moverá hacia fuera, empujando las moléculas de aire en la misma dirección. De esta forma se comprime la capa de aire que toca la membrana, aumentando la presión, y en consecuencia la densidad y la temperatura. El desplazamiento provocado a las moléculas de aire cercanas al altavoz se transmite a la siguiente capa de aire, aumentando la presión. Cuando la membrana vuelve a la posición original, estira la capa de aire y disminuye la presión. El aumento de la presión forma el frente de onda, que se desplazará por el aire a la velocidad del sonido, en las tres dimensiones ya que es una onda esférica (**Figura 2.1**)

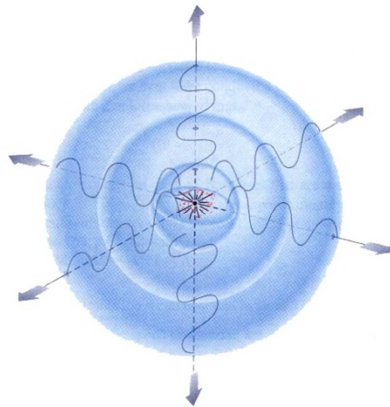


Figura 2.1 Representación de un frente de onda esférico.

El frente de onda generado viajara por el aire hasta encontrar una discontinuidad en el medio, por ejemplo, una pared. Cuando llega este punto, una parte de la onda se transmite a través del nuevo medio, mientras que la otra parte es reflejada. La relación entre la parte transmitida y la parte reflejada depende del material.

La porción de onda reflectada vuelve al interior del recinto modificando el campo acústico. Por tanto, la presión acústica en un punto del recinto está determinada por la onda que llega directamente de la fuente de sonido, y por todas las reflexiones que se hayan producido.

Por el impulso emitido, la presión en un punto del recinto variara en el tiempo de con la forma de la **Figura 2.2** .Se produce un primer impulso proveniente de la fuente, el sonido directo, seguido de un conjunto de impulsos correspondientes a la llegada de las reflexiones del sonido directo con las paredes, lo que forma un campo reverberado. El campo reverberado depende de las características de los cerramientos contra los que hayan reflectado las ondas de presión.

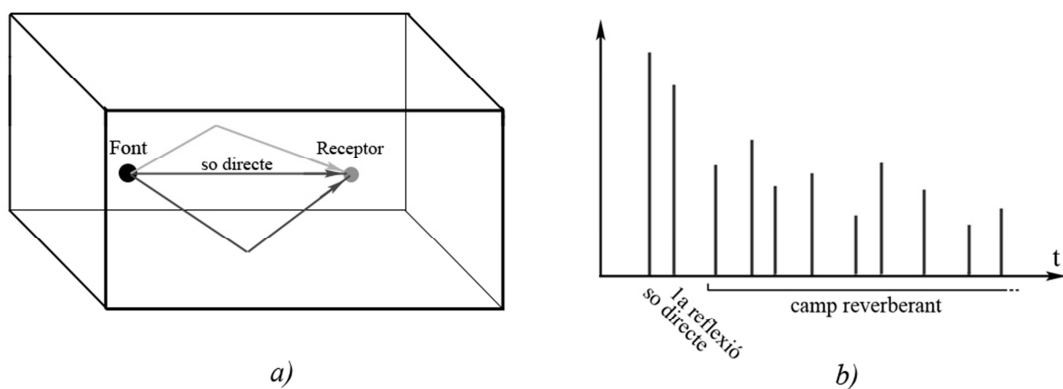


Figura 2.2 a) Esquema de diversas reflexiones en una sala
b) Representación de la respuesta al impulso.

De los métodos de laboratorio para la medida de las propiedades acústicas de los materiales, las dos más usuales son: el método en cámara de reverberación y el método en tubo de impedancia. En este proyecto se utiliza el método de tubo de impedancia. Una de las características de este método es que emplea ondas planas en la medida, y por eso los resultados que se obtiene son válidos para una incidencia normal de la onda contra el material. Este hecho no quita validez al método, ya que una porción del frente de onda esférico se puede considerar plano a partir de una distancia de la fuente mayor que la longitud de onda. Por tanto, es en distancias cortas, o frecuencias bajas, donde cabe tener en cuenta la naturaleza esférica de la onda, con la atenuación por divergencia de la intensidad acústica con la distancia.

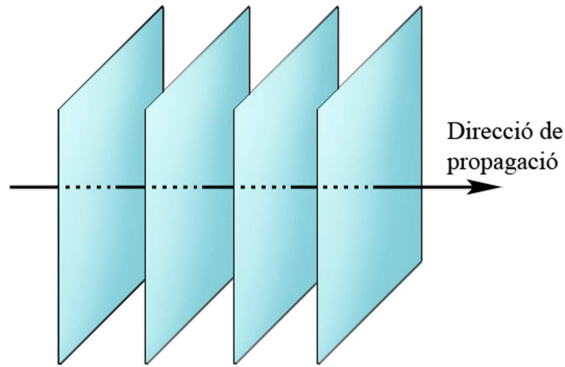


Figura 2.3 Planos de presión constante en una onda plana.

Las ondas planas se caracterizan por tener las variables acústicas (desplazamiento, velocidad, presión, densidad,...) constantes en cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación.

Suponiendo que el altavoz se coloca en una apertura de un tubo de impedancia, como se representa en la **Figura 2.4**.

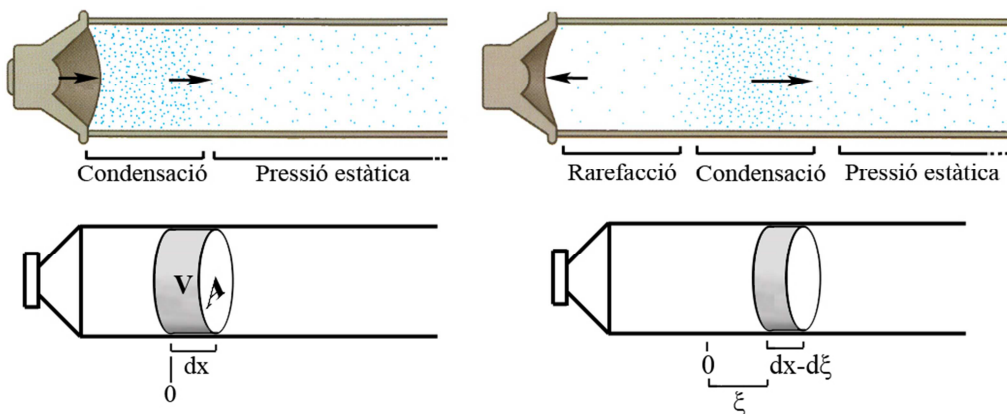


Figura 2.4 Tubo de impedancia y compresión producida sobre un volumen V.

La porción de volumen V se ha desplazado, al llegar la onda de presión, desde el punto O una distancia ξ . Por la ley de conservación de la materia, la masa inicial ha de ser igual a la final, de tal manera que

$$\rho_0 \cdot A \cdot dx = \rho \cdot A \cdot (dx - d\xi) \quad (1)$$

La densidad de la porción de aire considerada habrá variado de ρ_0 a ρ . A partir de la ecuación (1) se deduce esta diferencia:

$$\rho - \rho_0 = -\rho_0 \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (2)$$

La presión está relacionada con la densidad por una ecuación de estado tal que $p = f(\rho)$, que en los procesos adiabáticos, donde no hay intercambio de calor entre las partículas del fluido y suponiendo que se trata de un gas perfecto, se escribe como:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (3)$$

donde γ es la relación de calores específicos, que depende del gas.

La relación entre la presión y la densidad se puede determinar experimentalmente con una expansión de Taylor:

$$p = p_0 + \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} \cdot (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right)_{\rho_0} + \dots \quad (4)$$

donde las derivadas son constantes determinadas por la compresión y expansión adiabática del fluido, respecto a su densidad de equilibrio. Si las fluctuaciones son pequeñas, como suele suceder en los fenómenos acústicos, solo cabe considerar los dos primeros términos del sumatorio, y la fluctuación de la presión se obtiene de la ecuación anterior como:

$$p - p_0 = (\rho - \rho_0) \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} \quad (5)$$

Se define el modulo adiabático de volumen de un gas como:

$$B = \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} \quad (6)$$

Con las ecuaciones (2) y (6), se obtiene una forma reducida de la ecuación (5):

$$p = p_0 - B \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (7)$$

Esta ecuación relaciona la presión en cualquier punto de la columna de aire con el desplazamiento respecto a la posición de equilibrio.

Por otra parte, para el volumen considerado, la fuerza que actúa sobre la sección izquierda es $p \cdot A$, y la que actúa sobre el lado derecho es $p' \cdot A$. Por tanto, el diferencial de volumen está sometido a una fuerza neta de $(p - p') \cdot A$.

Si un diferencial de presión es $dp = p' - p$, se puede escribir la fuerza como:

$$F = -A \cdot dp \quad (8)$$

Si combinamos la masa y la aceleración del volumen estudiado, obtenemos la ecuación (9):

$$m = \rho_0 \cdot A \cdot dx$$

$$a = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$-A \cdot dp = \rho_0 \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (9)$$

que se puede reescribir como:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (10)$$

La derivada respecto de x de la ecuación (7) da:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -B \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (11)$$

De la comparación de (10) y (11) se obtiene la ecuación de desplazamiento de la onda acústica plana:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (12)$$

Si se realiza la segunda derivada de (7) respecto del tiempo se obtiene:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -B \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) \quad (13)$$

que combinada con (10) resulta la ecuación de presión de la onda acústica:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (14)$$

La velocidad de partícula se obtiene con la derivada del espacio respecto del tiempo:

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

La ecuación de la velocidad de partícula para la onda tiene la misma forma que (12) y (14):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (15)$$

2.1.1 Velocidad del sonido.

Las ecuaciones anteriores (12), (14) y (15) se adaptan a la ecuación de onda, donde la velocidad de la fase se identifica mediante:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad (16)$$

Esta es la velocidad con la que se propaga una determinada fase, y se entiende normalmente como velocidad de propagación o velocidad del sonido.

Con (6) y (16) se obtiene otra relación para la velocidad del sonido:

$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} \quad (17)$$

Si se supone que se trata de una propagación adiabática en un gas perfecto, como se puede aproximar al caso real, la relación (3) se puede derivar para obtener, mediante la ecuación (17)

$$c_0 = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_0}{\rho_0}} \quad (18)$$

Si se sustituyen los valores para el aire en esta ecuación, se obtiene la velocidad del sonido en condiciones normales. A una $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, las propiedades son:

$$\gamma = 1,3787$$

$$p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_0 = 1,186 \text{ kg/m}^3$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{1,3787 \cdot 1,01325 \cdot 10^5}{1,186}} = 343,2 \text{ m/s}$$

Recordando la ecuación de estado de un gas ideal:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (19)$$

donde R es una constante del gas, y T es la temperatura en $^\circ\text{K}$, se obtiene de combinar con (18) que:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (20)$$

Si $c_0 = 343,2$ m/s es la velocidad del sonido a 20 °C (293 °K), la ecuación anterior se puede escribir como:

$$c = c_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (21)$$

donde T es la temperatura en °K. Esta es la expresión que utiliza la aplicación con tal de calcular la velocidad del sonido en el interior del tubo a partir de la temperatura.

2.1.2 Numero de onda.

Una solución general para la ecuación de la presión de una onda armónica es:

$$p(x,t) = p_0 \cdot e^{-jk(x \mp ct)} \quad (22)$$

donde k es el número de onda, que se relaciona con la longitud de onda λ y la frecuencia angular ω con

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (23)$$

Este parámetro indica el número de veces que se produce una fase concreta en un metro de propagación. Si se tiene en cuenta la absorción que produce en el medio, el número de onda será un valor complejo de la forma:

$$k = k' + j\alpha \quad (24)$$

donde α es la constante de atenuación lineal del medio, en Neper/m, que se puede convertir a dB/m con

$$a(\text{dB/m}) = 8,7 \cdot \alpha(\text{Np/m})$$

Cuando se estudia la propagación dentro de un material absorbente, suele utilizarse como parámetro la constante de propagación Γ que se relaciona con el número de onda de la ecuación (24) con:

$$\Gamma = j \cdot k = -\alpha + j \cdot k' \quad (25)$$

Para la onda que se propaga a través del aire en el interior del tubo, se utilizarán en los cálculos de la aplicación programada los siguientes valores¹:

$$k' = \frac{\omega}{c}$$

$$\alpha = 1,94 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{f}}{c \cdot d}$$

donde c es la velocidad de propagación, f la frecuencia y d el diámetro del tubo.

2.1.3 Impedancia acústica.

Una propiedad importante del medio se establece con la relación entre la presión y la velocidad asociada. Se puede hacer una analogía eléctrica, donde la impedancia eléctrica se determina con la tensión y la intensidad. En este caso, la impedancia acústica se determina con:

$$Z_a = \frac{p}{U} \quad (26)$$

donde p es la presión que causa una velocidad volumétrica U (m^3/s). Para la onda del tubo, en esta velocidad se calcula con la sección del tubo A y la velocidad de partícula u :

$$U = A \cdot u \quad (27)$$

Se define la impedancia característica como la relación entre la presión y la velocidad de partícula que provoca en un medio:

$$Z_c = \frac{p}{u} \quad (28)$$

Para materiales sin pérdidas, la impedancia característica es una constante real de valor:

$$Z_c = \rho \cdot c \quad (29)$$

La unidad de la impedancia característica es el Rayl:

$$1\text{Rayl} = 1 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

El resultado que se obtiene para el aire, considerándolo sin pérdidas, es:

$$Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 \cong 415 \text{ Rayl}$$

Comúnmente, la impedancia característica de un material se normaliza a la impedancia del aire. En esta relación se nombra como impedancia específica.

$$Z_e = \frac{Z_c}{\rho_0 \cdot c_0} \quad (30)$$

Generalmente la presión y la velocidad de partícula son funciones complejas que dependen de la frecuencia, eso hace que la impedancia sea un valor complejo variable con la frecuencia.

$$Z(f) = R(f) + j \cdot X(f) \quad (31)$$

Siguiendo con la analogía eléctrica, la parte real es la resistencia, y la parte imaginaria la reactancia.

2.1.4 Coeficiente de reflexión.

Otro parámetro importante en el estudio de las propiedades del material es el coeficiente de reflexión. En la **figura 3.5** se representa la onda incidente p_i , que se divide en una parte transmitida al material p_t y una parte reflejada p_r .

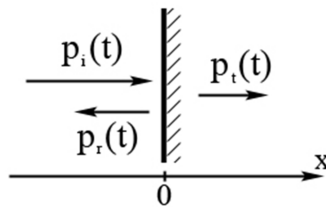


Figura 3.5 Presiones incidente, reflejada y transmitida, en un cambio de medio.

El coeficiente de reflexión se define con la relación de la presión reflejada y la presión incidente. Es una función de la frecuencia que depende del material.

$$R(f) = \frac{p_r(f)}{p_i(f)} \quad (32)$$

Para estudiar la relación de este parámetro con la impedancia, se toma como suposición que la presión incidente es una onda plana que en un momento determinado responde a la función

$$p_i(x) = e^{j \cdot k \cdot x} \quad (33)$$

La onda reflejada se puede escribir en función del coeficiente de reflexión R con:

$$p_r(x) = R \cdot e^{-j \cdot k \cdot x} \quad (34)$$

La presión se relaciona con la impedancia por la velocidad de partícula. Así, para el aire con una impedancia característica de Z_0 , se obtiene:

$$u_i(x) = \frac{p_i(x)}{Z_0} \quad u_r(x) = -\frac{p_r(x)}{Z_0} \quad (35)$$

La presión en un punto del aire se compone de la suma de las presiones incidente y reflejada, de tal manera que la impedancia característica será:

$$Z_c(x) = \frac{p_i(x) + p_r(x)}{u_i(x) + u_r(x)} \quad (36)$$

Sustituyendo (33), (34) y (35) a la ecuación (36), se obtiene

$$Z_c(x) = Z_0 \cdot \frac{e^{j \cdot k \cdot x} + R \cdot e^{-j \cdot k \cdot x}}{e^{j \cdot k \cdot x} - R \cdot e^{-j \cdot k \cdot x}} \quad (37)$$

La solución de la anterior ecuación para $x=0$, es la impedancia característica de la superficie del material. Esta se calcula con:

$$Z_c(0) = Z_0 \cdot \frac{1 + R(0)}{1 - R(0)} \quad (38)$$

Las relaciones con la impedancia específica quedan finalmente así:

$$Z_e(0) = \frac{1 + R(0)}{1 - R(0)} \quad R(0) = \frac{Z_e(0) - 1}{Z_e(0) + 1} \quad (39)$$

2.1.5 Coeficiente de absorción.

De forma similar al coeficiente de reflexión, el coeficiente de absorción indica la relación entre la energía absorbida y la energía incidente. La relación para una onda plana incidente, entre el coeficiente de absorción y el de reflexión es:

$$\alpha(f) = \frac{E_{absorbida}}{E_{incident}} = 1 - |R(f)|^2 \quad (40)$$

2.2 Mecanismos de absorción acústica.

Los materiales porosos absorbentes de sonido acostumbran a utilizarse en forma de placas o elementos preformados constituidos de fibras minerales, orgánicas o textiles, o esponjas de célula abierta. Las dimensiones de los poros abiertos son del orden de 1 mm, muy inferiores a la longitud de onda acústica. Por eso, se puede considerar como un medio homogéneo con pérdidas. La caracterización acústica del material se hace frecuentemente con la impedancia característica y la constante de propagación.

Como se ha dicho, la acción de la presión sobre las moléculas de aire hace que estas oscilen alrededor de su posición de equilibrio (a parte de la oscilación dada por la presión atmosférica). Cuando estas oscilaciones se producen en moléculas de aire en el interior de un material absorbente, aparecen pérdidas por fricción. Los cambios en la dirección del flujo, así como la expansión y la contracción de este a través de los poros irregulares hacen que la onda pierda fuerza en la dirección de propagación. Estas son las causas de la absorción de la mayor parte de la energía acústica para frecuencias altas.

A bajas frecuencias aparece otro factor importante en la absorción de la onda, que es la disipación de calor. El alto ratio entre la superficie y el volumen de aire, y la alta conductividad térmica de las fibras hacen que durante el tiempo que dura una oscilación de baja frecuencia se pueda transmitir el calor de las zonas comprimidas a las fibras. Estas pérdidas de baja frecuencia en materiales fibrosos, son especialmente altas si las fibras están orientadas perpendicularmente a la dirección de propagación. La oscilación y el movimiento producido sobre las fibras del material representan otra parte de la absorción.

Desde el principio de la utilización de materiales específicos para la absorción acústica, se han estudiado los parámetros a partir de los cuales se pueda prever el comportamiento acústico del material. De esta forma, las propiedades constructivas más importantes son las que se explican a continuación.

2.2.1 Porosidad.

Da una idea de la cantidad de aire que contiene el material. La porosidad h se define como:

$$h = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} \quad (41)$$

donde ρ_M es la densidad del material que forma las fibras ,que para fibras minerales es del orden de 2500 kg/m^3 , y ρ_A es la densidad del material absorbente, normalmente de entre 20 y 200 kg/m^3 .

2.2.2 Diámetro de fibra.

El diámetro de las fibras que conforman el material también influye en la absorción producida. Este diámetro no es constante para todas las fibras del material, eso hace que se usen valores estadísticos con tal de definirlo. Para las “lanas minerales”, el diámetro de fibra suele hallarse entre 1 y $10 \text{ }\mu\text{m}$, con el máximo de la distribución estadística entre 2 y $5 \text{ }\mu\text{m}$.

2.2.3 Factor de estructura.

Reflecta el efecto de los poros y las cavidades que son perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Se calcula a partir de la porosidad y de la impedancia acústica con:

$$\chi = h^2 \cdot \text{Re} \left\{ \left(\frac{Z_a}{Z_0} \right)^2 \right\} \quad (42)$$

2.2.4 Resistividad al flujo.

La resistividad al flujo, o resistencia específica al flujo por unidad de longitud, es la característica más importante de un material poroso. Indica la dificultad que

presenta un material al paso de aire. Este parámetro se obtiene a partir de la impedancia al flujo, que es un valor complejo:

$$Z_f = R_f + j \cdot X_f \quad (43)$$

La parte real de este valor es la resistencia al flujo, y es el término dominante de la impedancia. Se calcula mediante el gradiente de presión al que está sometido el material, y la velocidad volumétrica del aire que el atraviesa

$$R_f = \frac{\Delta p}{U} \quad (44)$$

La unidad de la resistencia al flujo es N·s/m³, o rayl.

La parte imaginaria de la impedancia al flujo es consecuencia de la masa adicional que aporta la viscosidad de la capa superficial del material, y el movimiento restringido del aire dentro del poro del material.

Si se tiene en cuenta el grueso del material (G), se calcula la resistividad al flujo σ con:

$$\sigma = \frac{R_f}{G} = \frac{\Delta p}{G \cdot U} \quad (45)$$

Este parámetro se mide en N·s/m⁴ (o rayl/m) y es independiente del grueso del material absorbente.

La importancia de este parámetro se basa en el hecho de que las otras características del material influyen en su valor.

3. Aplicaciones a implementar

Las aplicaciones a desarrollar son, como se ha comentado en el primer capítulo, son cuatro. El procedimiento implementado para cada una de ellas, está basado en diferentes métodos especificados en normativas o artículos de investigación, detalladas a continuación en los apartados 3.1 a 3.4. y son las siguientes

- Impedancia & Absorción
- Resistencia al flujo
- Transmission Loss (4 micrófonos)
- Movilidad mecánica de un material (IH)

3.1 Impedancia & Absorción

3.1.1. Normativa / asociada : UNE EN ISO 10534-2:2002 [2]

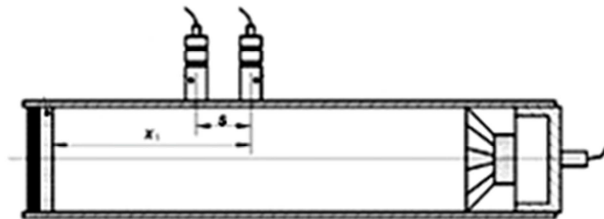


Figura 3.1. Diagrama del montaje para medir coeficiente de absorción

De una forma resumida, el proceso es el siguiente. El altavoz, situado en el extremo de un tubo, emita una señal de banda ancha, p.e. ruido rosa. En el otro extremo del tubo se instala la muestra de material bajo estudio. Los dos micrófonos captan la presión sonora en las dos posiciones en que están ubicados (en las cercanías de la muestra). A partir de las señales de presión convertidas a tensión por los micrófonos, se calcula la función de transferencia acústica compleja, la cual a su vez, se usa para calcular el coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia acústica de los materiales a ensayar.

Dentro de la normativa existen dos métodos diferenciados:

- Con dos micrófonos (posiciones fijas)
- Con un micrófonos (cambiando de posición)

En nuestro caso, al disponer de entradas y micrófonos suficientes, se ha optado por utilizar el método con dos micrófonos.

3.1.1.1 Definiciones y simbología

A continuación se definen algunos términos necesarios.

Coefficiente de absorción de sonido en incidencia normal α

Porción de potencia acústica que penetra la superficie de la muestra (sin retorno) de la potencia incidente para un plano de onda de incidencia normal.

Factor de reflexión en incidencia normal r

Compleja de la amplitud de la onda reflejada a la de la onda incidente en el plano de referencia para una onda en incidencia normal

Plano de referencia

La sección transversal del tubo de impedancia para el que se determina el factor de reflexión o la impedancia o la admisión G y que normalmente es la superficie del objeto de ensayo es plana.

Impedancia Z

Relación entre la presión sonora compleja $P(0)$ y la componente normal de la velocidad de partícula sonora $t(0)$ a una frecuencia individual en el plano de referencia.

Admitancia de superficie normal G

Inversa de la impedancia de superficie normal Z

Número de onda k_0

Variable definida por $k_0 = 2\pi f / c_0$ (46)

Dónde

f es la frecuencia
 c_0 es la velocidad del sonido

Presión de sonido compleja P

Transformada de Fourier de la presión acústica temporal

Espectro cruzado S_{12}

Producto $p_2 p_1^*$, determinado a partir de las complejas presiones de sonido p_1 y p_2 en dos posiciones de micrófono

Auto espectro S_{11}

Producto de $p_1 p_1^*$ determinado a partir de la compleja presión sonora p_1 en la posición del micrófono uno

Función de transferencia H_{12}

Función de transferencia desde la posición del micrófono uno a dos, definida por la relación compleja $p_2 / p_1 = S_{12} / S_{11}$ o S_{22} / S_{21} o $[(S_{12} / S_{11}) (S_{22} / S_{21})]^{1/2}$ (47)

Factor de calibración H_c

Factor utilizado para corregir los desajustes de amplitud y fase entre los micrófono

3.1.1.2 Rango de frecuencia de trabajo

El rango de frecuencia de trabajo es

$$f_t < f < f_u$$

donde

f_t es la frecuencia de trabajo más baja del tubo.

f es la frecuencia de operación.

f_u es la frecuencia de trabajo más alta del tubo.

f_t está limitado por la precisión del equipo de procesamiento de señal

f_u se elige para evitar la aparición de la propagación en modo de onda no plana

La condición para f_u es:

$$d < 0,58 \lambda_u \quad f_u d < 0,58 c_0 \quad (48)$$

Para tubos circulares con el diámetro interior d en metros y f_u en hertz

3.1.1.3 Corrección del desfase del micrófono

Cuando se utilice dos técnicas de micrófono, se utilizará uno de los siguientes procedimientos para corregir los datos de función medidos para la falta de coincidencia de canales: mediciones repetidas con canales intercambiados o factor de calibración predeterminado.

En este proyecto, la corrección para el desajuste del micrófono se realiza intercambiando los micrófonos para cada medición en una muestra de prueba. Este procedimiento puede ser preferido cuando se va a probar un número limitado de muestras.

Con la primera posición (con el micrófono 1 en posición 1 y el micrófono 2 en posición 2) conseguimos la función de transferencia H_{12}^I

Con la segunda posición (con el micrófono 1 en posición 2 y el micrófono 2 en posición 1) conseguimos la función de transferencia H_{12}^{II}

La función de transferencia se obtiene mediante la siguiente formula:

$$H_{12} = (H_{12}^I * H_{12}^{II})^{1/2} \quad (49)$$

3.1.1.4 Determinación de la función de transferencia entre las dos ubicaciones

Insertar la probeta de ensayo y de acuerdo con los requisitos de una de las dos técnicas descritas en la normativa, medir la compleja función de transferencia acústica.

La función de transferencia acústica compleja puede definirse como

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} \quad (50)$$

donde

H_r es la parte real de H_{12}

H_i es la parte imaginaria de H_{12}

3.1.1.5 Determinación del factor de reflexión

Calcular el factor de reflexión de incidencia normal

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} * e^{2jkx} \quad (51)$$

donde

x es la distancia entre la parte posterior de la muestra hasta el micrófono mas lejano

3.1.1.6 Determinación del coeficiente de absorción

Calcula el coeficiente de absorción en incidencia normal:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (52)$$

3.1.2 Problemática asociada:

- Al contar con dos micrófonos es necesario establecer una correlación entre ambos para eliminar errores que puedan aparecer.
- Las mediciones tomadas validas dependen de las propiedades geométricas del tubo, es decir, las características del tubo limitan de que ,y hasta que, frecuencia son válidos los resultados.
- Paredes lisas rígidas no porosas , sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo
- A mayor distancia entre micrófonos aumenta la precisión
- La frecuencia más baja debe ser $<5\%$ que la distancia intermicrofónica
- Las ondas no planas generadas se disipan a una distancia igual a 3 veces el diámetro
- El diámetro de los micrófonos debe ser un 20% de la distancia entre ellos

3.1.3 Montaje experimental

Así como será necesario el obedecer las recomendaciones anteriores, también es necesario un equipo determinado para lograr una caracterización correcta. A continuación se describe el equipo necesario.



Figura 3.2. Detalle del final del tubo en montaje experimental

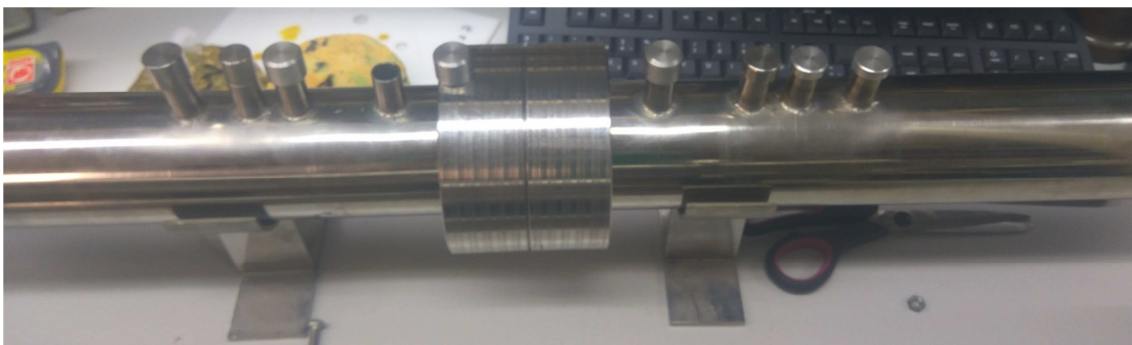


Figura 3.3 Detalle de zona donde va el material en el tubo.



Figura 3.4. Detalle de la terminación rígida del final del tubo en montaje experimental

Micrófonos: Dos micrófonos tipo GRASS (detallados en el anexo)

3.2 Resistencia al flujo

3.2.1 Normativa / Referencia asociada: [3]

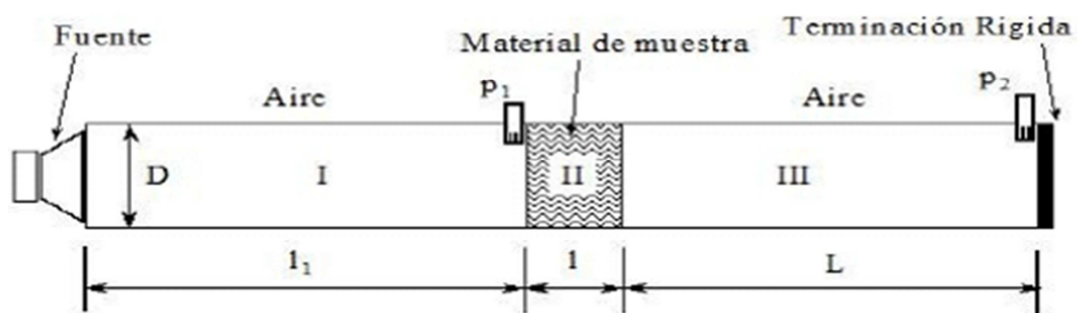


Figura 3.5 Diagrama del montaje de tubo para medir resistencia al flujo .

Del mismo modo, este método consiste en capturar las presiones que existen antes y después de la muestra con dos micrófonos. Corrigiendo también el desfase que pueda producirse, se realizan dos medidas con los micrófonos intercambiados. Así, se obtendrá una función de transferencia corregida, que será la utilizada para calcular la resistencia al flujo.

Este tipo de cálculo, a diferencia de los anteriores, se basa en el método U.K.Ingar y T.A.Dear³ para la obtención de la impedancia a flujo de aire que ofrece un material poroso.

El tubo de impedancia utilizado en esta medida es el de la figura 3.5 en el cual se ha insertado la muestra de grueso G y los dos micrófonos.

3.2.1.1 Frecuencia de trabajo valida

Las frecuencias de medidas validas son aquellas en las cuales se cumple que entre la parte final de la muestra y la terminación rígida hay un número seno de cuartas partes de longitud de onda. Teniendo en cuenta que la superficie rígida del final del tubo fuerza a la presión del aire a ser un máximo en aquel punto, la presión (y por tanto la impedancia) a la parte posterior de la muestra será cero, y por lo tanto, la impedancia al flujo se la impedancia en la parte delantera de la muestra. Eso queda reflejado en esta ecuación.

$$L = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (53)$$

donde λ es la longitud de onda y $n=1, 2, 3..$

De aquí se obtienen las frecuencias de medida

$$f = (2n - 1) \frac{c}{4 \cdot L} \quad (54)$$

a partir de la velocidad del sonido c y la distancia entre el material y la terminación rígida L .

3.2.1.2 Calculo de resistencia al flujo

La expresión con la cual se calcula la impedancia al flujo es

$$Z_f = j \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot (-1)^n \cdot \frac{p_1}{p_2} \quad (55)$$

donde p_1 y p_2 son las presiones complejas registradas a las posiciones 1 y 2 respectivamente.

El procedimiento utilizado en este proyecto difiere un poco del explicado hasta ahora. El altavoz no emite una señal periódica de frecuencia fija, sino que emite ruido blanco. Se mide el espectro en cada una de las dos posiciones del micrófonos y se calcula el nivel en dB . La diferencia entre los niveles medidos en la posición 1 y la posición 2 formaran una curva con valores mínimos en las frecuencias de medida, que aproximadamente serán las de la ecuación 54. Con los niveles de presión correspondiente a estas frecuencias se calcula la resistencia al flujo como:

$$R_f = \rho_0 \cdot c_0 \cdot 10^{\frac{Lp_1 - Lp_2}{20}} \quad (56)$$

Tras seleccionar un determinado número de frecuencias, para las cuales obtener la resistencia al flujo, se calcula un valor medio y se utiliza la ecuación 45 (en el apartado de fundamentos) para calcular la resistencia al flujo.

3.2.2 Problemática asociada:

- Es un método sencillo pero con limitaciones en cuanto a las mediciones, ya que el margen de frecuencias para los que las medidas son válidas estarán determinadas por las dimensiones del tubo.
- A parte de esto, la longitud de onda, λ , deberá ser mucho mayor que 1.7 veces el diámetro del tubo, para asegurarnos la disipación de las ondas incidentes que no son planas antes de que lleguen a la muestra.
- La longitud del tubo utilizado debe cumplir la siguiente condición: $L = (2n-1) \frac{\lambda}{4}$, para $n=1,2,..$. Cuando se cumple dicha condición, la parte resistiva de la impedancia es mucho mayor que la reactiva, siendo esta última despreciable, simplificando la ecuación de la resistencia al flujo de la siguiente manera:

3.2.3 Montaje experimental

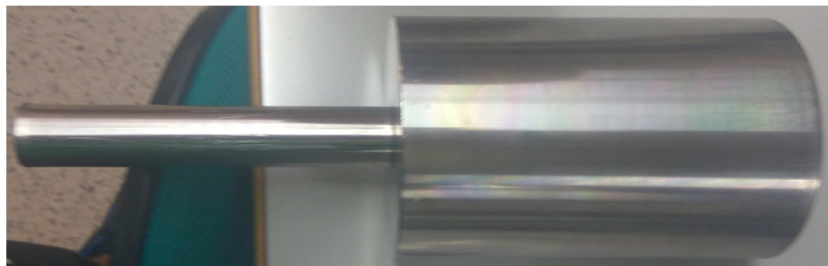


Figura 3.6. Detalle de la terminación rígida del final del tubo en montaje experimental

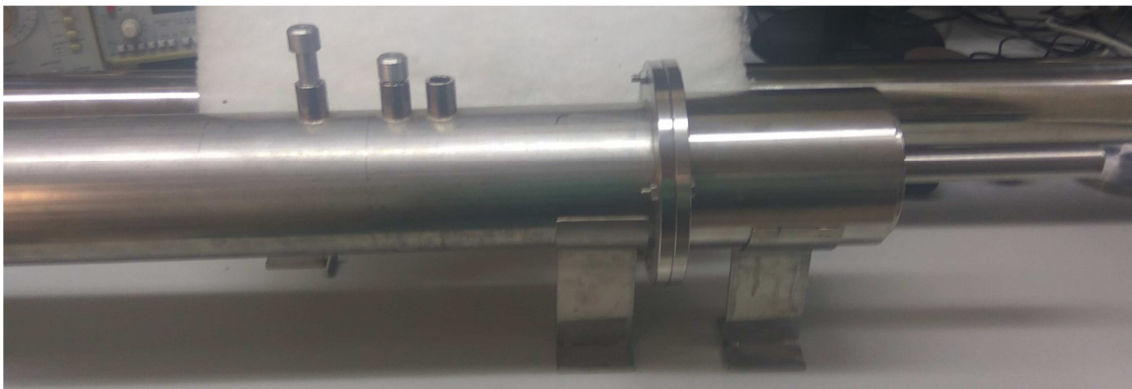


Figura 3.7. Detalle del final del tubo en montaje experimental

3.3. Perdidas por transmisión

3.3.1. Normativa / Referencia asociada: ASTM E2611-09 [4]

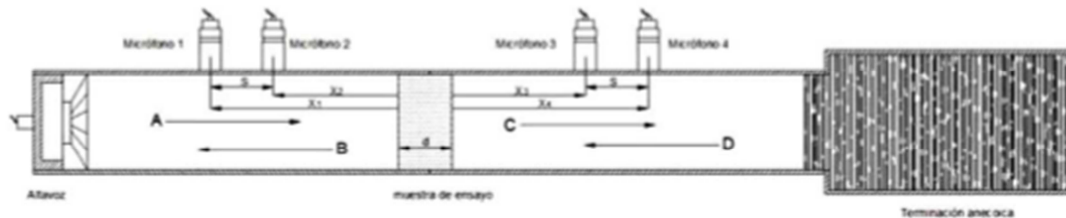


Figura 3.8. Diagrama del montaje para medir las pérdidas por transmisión.

El presente apartado es un resumen de la normativa (Medida de sonido transmitido en materiales acústicos bajo incidencia normal mediante el método de la función de transferencia).

En éste método, se utiliza un tubo y cuatro micrófonos, dos de los cuales están localizados delante de la muestra y dos detrás. El procedimiento implica la utilización de una fuente sonora (altavoz) generando una señal de banda ancha. El patrón de onda estacionario se descompone en ondas que viajan en el sentido positivo y negativo que se pueden determinar midiendo simultáneamente el nivel de presión sonora en las cuatro posiciones y examinando su amplitud y fase relativa. La matriz de transferencia acústica se calcula a partir de la presión y la velocidad de la partícula, o equivalentemente de la impedancia acústica, de las ondas que viajan en cada cara del espécimen. La pérdida por transmisión, como otras importantes propiedades de los materiales, incluyendo el coeficiente de absorción para incidencia normal, se puede obtener a partir de la matriz función de transferencia.

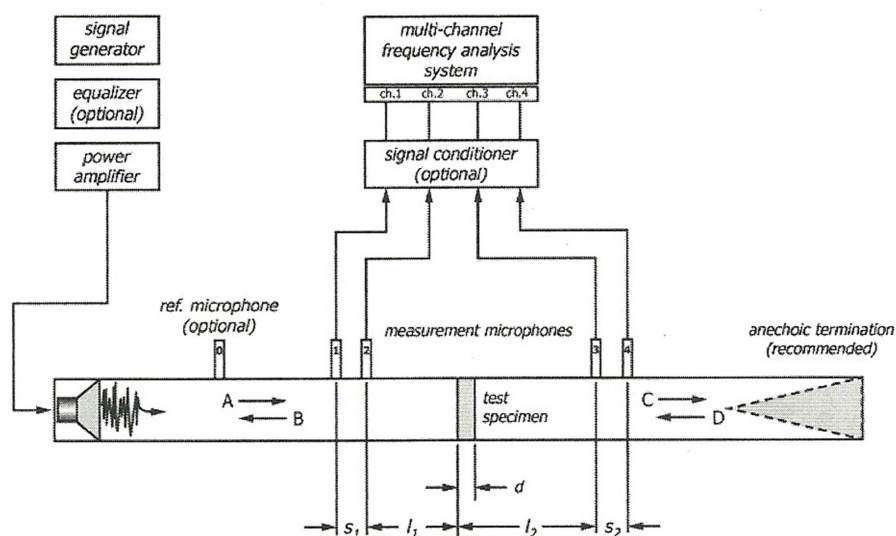


Figura 3.9. Diagrama esquemático del setup de medida descrito en la normativa. Se aconseja una terminación anecoica

En la norma se ofrecen especificaciones para las características de tubo (longitud, terminación,...), la forma de colocar las muestras a caracterizar, la fuente sonora, los micrófonos (tipos, colocación, ...), la señal de test, el equipo de medida, etc.

Como sabemos, el coeficiente de transmisión de un material en una banda de frecuencia específica se define mediante la ecuación:

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (57)$$

W_t y W_i potencias transmitida e incidente, respectivamente.

Se define el parámetro *Pérdidas por transmisión sonora, TL*:

$$TL = 10 \log\left(\frac{W_i}{W_t}\right) = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (58)$$

Habitualmente, se utiliza el subíndice “n” para especificar que sonido incide perpendicularmente a la muestra, para distinguirlo de un ángulo de incidencia arbitrario o una incidencia aleatoria.

En cuanto a símbolos, a partir de este momento, se utilizarán los siguientes:

$$\begin{aligned} c &= \text{velocidad del sonido,} \\ \rho &= \text{densidad del aire;} \\ f &= \text{frecuencia (Hz)} \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} G_{11}, G_{22}, \dots &= \text{autoespectro de la señal de presión acústica para las posiciones de micrófono 1, 2, ...} \\ G_{21}, G_{32}, \dots &= \text{espectro cruzado de la señal de presión acústica para las posición 2 relativo a la} \\ &\text{posición 1, 3 relativo a 2, ... (En general será complejo)} \\ \hat{H}_{21}, \hat{H}_{31}, \dots &= \text{Función de transferencia medida de la señales de presión acústica en la posición} \\ &\text{2 relativa a la posición 1, 3 relativa a la 1, ... (En general será complejo, aunque } H_{11} \text{ es puramente} \\ &\text{real e igual a 1)} \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} H^I, H^{II} &= \text{Función transferencia de calibración entre los micrófonos en la configuración} \\ &\text{estandar y cambiada} \\ H^C &= \text{Factor de calibración complejo del micrófono teniendo en cuenta la adaptación de la} \\ &\text{respuesta del micrófono} \\ H_{21}, H_{31}, \dots &= \text{Función de transferencia medida de la señales de presión acústica corregidas} \\ &\text{(En general será complejo, aunque } H_{11} = 1) \end{aligned} \quad (61)$$

Procedimiento:

La determinación de la función de transferencia requiere la medida de la presión sonora compleja (amplitud y fase) en cuatro posiciones, dos en cada cara de la posición del espécimen. Esto se consigue en la práctica en la práctica midiendo la función de transferencia H entre una referencia y las cuatro posiciones.

Hay varios métodos para adquirir las cuatro funciones de transferencia, que se han resumido en la tabla 2. El proceso requiere al menos un analizador de dos canales y un micrófono. Más canales y más micrófonos hacen más rápido el proceso pero implicará corrección para amplitud y fase de los micrófonos.

| Nº de canales | Nº de micros | Función de transferencia referencia | Funciones de transferencia medidas | Corrección | Procedimiento |
|---------------|--------------|-------------------------------------|--|--|---|
| 2 | 1 | Señal fuente | $H_{1S}, H_{2S}, H_{3S}, H_{4S}$ | ninguna | El micro se mueve de la posición 1 a la 4 |
| 2 | 2 | Micrófono 1 en posición 0 | $H_{10}, H_{20}, H_{30}, H_{40}$ | ninguna | El micro 2 se mueve de la posición 1 a la 4 |
| 2 | 2 | Micrófono 1 en posición 1 | $H_{11}=1, H_{21}, H_{31}, H_{41}$ | ninguna | El micro 2 se mueve de la posición 2 a la 4 |
| 4 | 4 | Micrófono 1 en la posición 1 | $H_{11}=1, H_{21}, H_{31}, H_{41}$ | $H_{21}^C, H_{31}^C, H_{41}^C$ | Micrófonos 1-4 fijos en sus posiciones |
| 5 | 4 | Señal fuente | $H_{1S}, H_{2S}, H_{3S}, H_{4S}$ | $H_{1S}^C, H_{2S}^C, H_{3S}^C, H_{4S}^C$ | Micrófonos 1-4 fijos en sus posiciones |
| 5 | 5 | Micrófono 5 en la posición 0 | $H_{1S}, H_{2S}, H_{3S}, H_{4S}$ | $H_{10}^C, H_{20}^C, H_{30}^C, H_{40}^C$ | Micrófonos 1-4 fijos en sus posiciones |

Tabla II: Configuraciones de medida y procedimientos especificados en la norma E2611-09 de ASTM

Respecto a la calibración, el procedimiento se describe la sección 8.4 de la norma. El procedimiento descrito proporciona un método para corregir la función de transferencia medida por desadaptación tanto de amplitud como de fase.

En concreto, Se contemplan dos posibilidades: a) Corrección de micrófono cuando se usan perforaciones a lo largo del tubo (figura 3.10) y b) Corrección de micrófono cuando se usan perforaciones en el mismo plano transversal (figura 3.11)

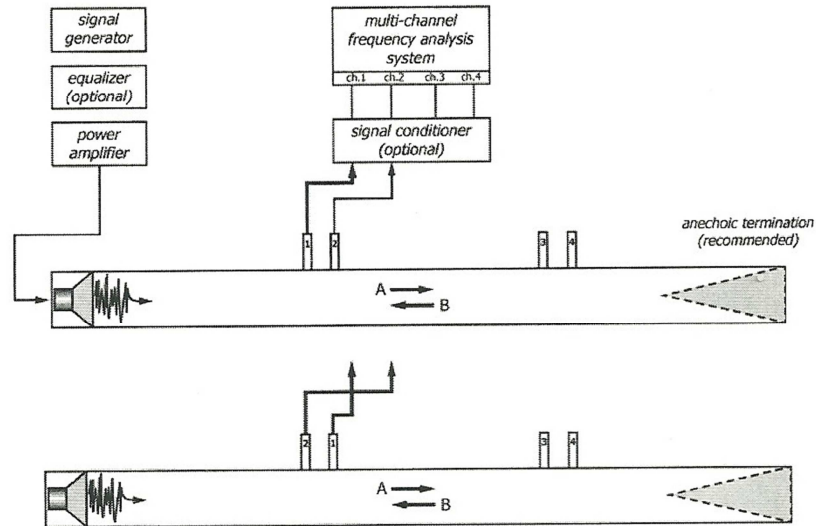


Figura 3.10. Calibración de micrófonos en la dirección longitudinal

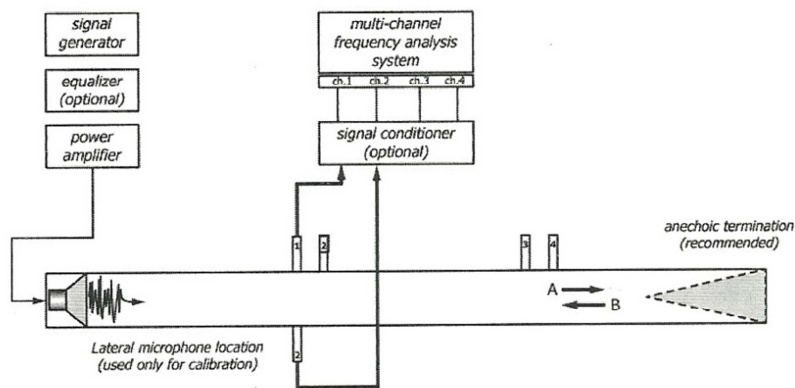


Figura 3.11. Calibración de micrófonos en la dirección transversal

La opción implementada es la que corresponde a penetraciones a lo largo de eje del tubo por lo que nos referiremos exclusivamente a ella.

Paso 1. Se deben medir las dos siguientes funciones de transferencia usando los mismos algoritmos computacionales para cada par de micrófonos. Se sitúan los micrófonos en la configuración directa de la figura 3.10 y se mide:

$$H_{n,ref}^I = |H^I| e^{j\phi^I} = H_r^I + jH_i^I \quad (62)$$

Se intercambian los micrófonos como se muestra en la figura 3.10 para obtener

$$H_{n,ref}^{II} = |H^I| e^{j\phi^{II}} = H_r^{II} + jH_i^{II} \quad (63)$$

Paso 2: Las siguientes ecuaciones son válidas si para el caso de que se use siempre el canal 1 como canal de referencia. Se puede encontrar un conjunto alternativo de ecuaciones en el apéndice de la norma.

Se computa la función de corrección de transferencia H^C , con su amplitud y su fase usando la siguiente ecuación

$$H_{n,ref}^C = (H^I * H^II)^{1/2} = |H^C| e^{j\varphi^C} \quad (64)$$

Medidas

Se inserta la muestra y se miden las funciones de transferencia acústica complejas entre la referencia y los micrófonos:

$$H_{n,ref} = \frac{G_{n,ref}}{G_{ref,ref}} = |H| e^{j\varphi} = H_r + jH_i \quad (65)$$

Una vez obtenidas las variables de la ecuación (65), se puede obtener la *Matriz de transferencia para incidencia normal* que nos permitirá determinar las pérdidas por transmisión.

La norma ofrece dos alternativas: opción con dos cargas y opción con una carga (que es la implementada)

- a) Método de las dos cargas
 - 1) Se deben hacer dos medidas con dos terminaciones distintas (dos impedancias distintas al final del tubo), representadas por los índices a y b (a podría significar "anecoica" y b una pared rígida o bien un tubo abierto).

$$\begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=d} \quad (66)$$

Matriz de transferencia, terminación "a"

$$\begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=d} \quad (67)$$

Matriz de transferencia, terminación "b"

Para cada caso de carga, se descompone el campo acústico en el interior obteniendo:

$$\begin{aligned}
A &= j \frac{H_{1,ref} e^{-jkl_1} - H_{2,ref} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \sin(ks_1)} \\
B &= j \frac{H_{2,ref} e^{-jk(l_1+s_1)} - H_{1,ref} e^{+jkl_1}}{2 \sin(ks_1)} \\
C &= j \frac{H_{3,ref} e^{+jkl_2} - H_{4,ref} e^{+jkl_2}}{2 \sin(ks_2)} \\
D &= j \frac{H_{4,ref} e^{-jkl_2} - H_{3,ref} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \sin(ks_2)}
\end{aligned} \tag{68}$$

Para cada caso de carga, igualmente, se determina la presión acústica y la velocidad de la partícula en ambas caras del espécimen (en $x=0$ y en $x=d$).

$$\begin{aligned}
p_0 &= A + B \\
u_0 &= (A - B) / \rho c \\
p_d &= C e^{-jkd} + D e^{+jkd} \\
u_d &= (C e^{-jkd} - D e^{+jkd}) / \rho c
\end{aligned} \tag{69}$$

$$T = \begin{bmatrix} \frac{P_{0a} u_{db} - P_{0b} u_{da}}{P_{da} u_{db} - P_{db} u_{da}} & \frac{P_{0a} P_{da} - P_{0a} P_{db}}{P_{da} u_{db} - P_{db} u_{da}} \\ \frac{u_{0a} u_{db} - u_{0b} u_{da}}{P_{da} u_{db} - P_{db} u_{da}} & \frac{P_{da} u_{0b} - P_{db} u_{0a}}{P_{da} u_{db} - P_{db} u_{da}} \end{bmatrix} \tag{70}$$

b) Método de una carga

Para especímenes simétricos (con propiedades físicas similares en las dos caras) , el procedimiento se puede simplificar y se puede asumir:

$$\begin{aligned}
T_{11} &= T_{12} \\
T_{11} T_{22} - T_{12} T_{21} &= 1
\end{aligned} \tag{71}$$

Esto conduce a que los elementos de la matriz pueden determinarse mediante la medida de la función de transferencia con una sola terminación, preferiblemente el caso anecoico.

$$T = \begin{bmatrix} \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} & \frac{p_0^2 - p_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} \\ \frac{u_0^2 - u_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} & \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Las propiedades del material, con estos datos, serán:

Coefficiente de transmisión (terminación anecoica):

$$t = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + (T_{12} / \rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}} \quad (73)$$

Pérdidas por transmisión para incidencia normal

$$TL_n = 20 \log \left| \frac{1}{\tau} \right| \quad (74)$$

Factor de reflexión (no anecoica –Hard-backed)

$$R = \frac{T_{11} - \rho c T_{21}}{T_{11} + \rho c T_{21}} \quad (75)$$

Coefficiente de absorción (no anecoica –Hard-backed)

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (76)$$

Constante de propagación en el material

$$k' = \frac{1}{d} \cos^{-1} T_{11} \quad (77)$$

Impedancia característica del material

$$z = \sqrt{T_{12} / T_{21}} \quad (78)$$

3.3.2 Problemática asociada:

- Al contener dos métodos de cálculos, puede parecer en principio que surgirán incompatibilidades, más los requerimientos de montaje son parecidos.
- La mayor diferencia producida a nivel de montaje es la cercanía de la terminación anecoica (añadir más material absorbente).

3.3.3. Montaje Experimental

Se utiliza el mismo tubo utilizado en el programa de resistencia al flujo (figuras 3.2 y 3.3) con una terminación de material anecoico.

3.4 Movilidad mecánica de un material (IH)

3.4.1 Normativa asociada: ASTM E1876-09 [5]

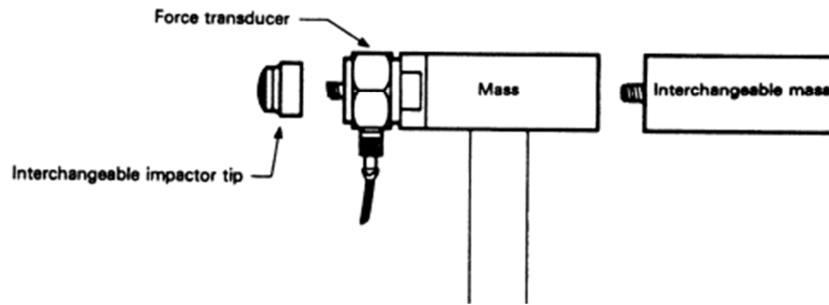


Figura 3.12. Esquema de componentes del martillo

La aplicación hará uso de dos entradas de la tarjeta de adquisición para capturar por un lado la señal procedente del sensor de fuerza instalado en el martillo de impactos y por otro lado, del acelerómetro situado sobre el objeto golpeado. Del tratamiento de ambas señales se extraerá la función de transferencia del sistema y a partir de ella, podrá determinarse la movilidad mecánica del material. Esta aplicación se encargará de capturar las señales involucradas en el proceso y realizar el cálculo de la función de transferencia. El procesamiento posterior necesario para la obtención de la movilidad mecánica del material, deberá ser realizado mediante una herramienta distinta a la que aquí se detalla

En este caso particular, no se ha aplicado la normativa, pues lo único que se extrae en el programa es la frecuencia de resonancia del material. A través de este dato, se puede calcular la rigidez dinámica, así como el módulo dinámico de Young,

Estas opciones no han sido implementadas.

3.4.2. Problemática asociada

- La masa del martillo debe ser aproximadamente un 5% del peso de la probeta a analizar.
- Depende de la medida concreta a realizar. Si se trata de la obtención de la rigidez dinámica de una material, el golpe debe ser en el sitio correcto pues si no podrían aparecer flexiones o torsiones en la pieza que falseen los resultados obtenidos.

4.4.3. Montaje experimental

Se muestra en la figura 3.13 el montaje experimental correspondiente a la medida de la rigidez dinámica de una material. El acelerómetro debería estar cerca del centro geométrico de la placa de acero



Figura 3.13. Montaje experimental para obtener la rigidez dinámica de un material

4 Introducción a LabVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica desarrollado por National Instruments¹, principalmente caracterizado por ser un código de programación gráfica. Al estar destinado a la utilización en varios campos de la ingeniería, LabVIEW presenta la ventaja de que incluye una serie de funciones que facilitan la estructuración de la aplicación que se quiere implementar, simplificando la programación de algunos procesos complejos. Para corresponder esta vinculación con la ingeniería a diferentes niveles, LabVIEW presenta soporte en diferentes plataformas: Windows, MacOS, Linux, Solaris i HP-UX..

Además, presentan una comunidad² bastante considerable de usuarios que está en constante formación y ampliación – haciendo posible que haya programas o *vi* que hayan sido desarrollados por un usuario particular que sean útiles a tareas que queremos realizar – así como se puede encontrar información con relativa facilidad, aportada en muchos casos por el propio NI, para formarse en el uso del mismo. En la propia web de NI³ se encuentra vídeos que parten desde las bases elementales de la programación hasta la utilización de sistemas DAQ. En los propios foros de NI⁴ se prestan a ayudar cualquier duda relacionada con la propia programación, la compatibilidad de complementos, así como dudas relacionadas con cualquier proyecto que se esté realizando. .

La elaboración de un código se basa en la creación de un instrumento virtual (de ahora en adelante en este proyecto será nombrado como *vi*) el cual está formado por dos ventanas diferentes: el panel frontal y el diagrama de blocs. (**Figura 4.1**)

- El panel frontal es la parte que se mostrara del programa mientras se ejecute, también llamado la interfaz de usuario. En este panel el usuario interactuara con el programa, pulsando botones, seleccionando opciones o introduciendo valores en el caso de que fuera necesario. A su misma vez, es donde se muestran los resultados del programa (en este caso).
- En el diagrama de bloques es donde realmente se encuentra el código del programa. El código se implementa con una serie de iconos que representen funciones o subrutinas ejecutables dentro del programa. Cada icono posee un conjunto de entradas y salidas.

Cualquier icono de control o indicador situado en el panel frontal – este dentro del cuadro visible durante su ejecución **o no** - tiene su respectivo terminal en el diagrama de bloques.

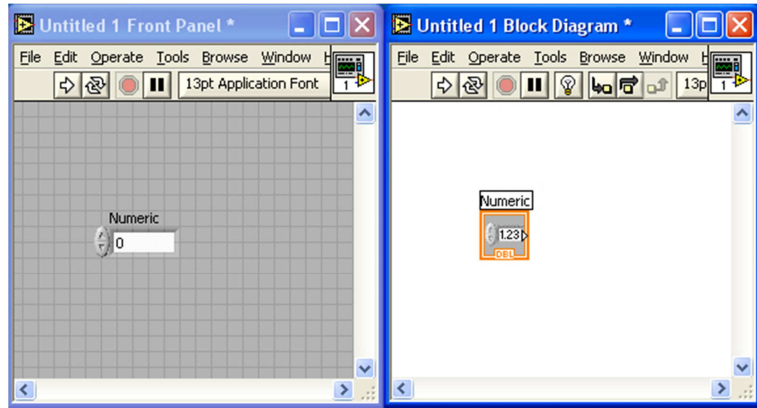


Figura 4.1 Panel Frontal (izq.) y diagrama de bloques (der.)

Un *vi* generado por el usuario – o programado por NI y disponible en una biblioteca – se pueden utilizar dentro de otros programas como subrutinas. Esto es una gran ventaja, pues permite al usuario disponer de una biblioteca elaborada acorde a su tipo de trabajo ,que facilita que pueda trabajar cada vez con mayor rapidez y eficiencia que si tuviera que repetir todos los procesos cada vez.

En la figura situada a continuación (**Figura 4.2**) se muestra la paleta de funciones de LabVIEW 14.0, utilizado en este proyecto. Desde este menú se hace posible el acceso a todas las funciones disponibles para situar el diagrama de bloques, así como las funciones creadas por el usuario.

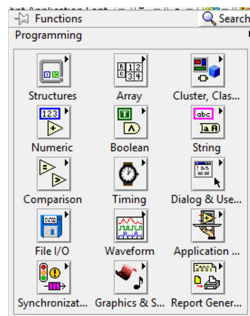


Figura 4.2 Paleta de funciones.

De igual forma, en el panel frontal se dispone también una paleta de elementos que sirven para añadir nuevos elementos al programa, tal como son gráficas, botones, tablas anidadas, etc... (**Figura 4.3**)

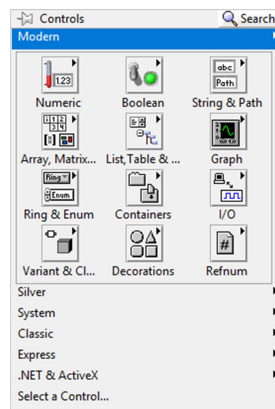


Figura 4.3 Paleta de controles e indicadores.

4.1 Estructuras de control.

4.1.1 Estructuras de control principales.

El control de la ejecución del programa, comúnmente conocido en la programación textual por rutinas “while”, “for”... se representa en forma de una casilla que ejecutara el código que contienen de una determinada forma (de acuerdo a la naturaleza de la misma). En la **Figura 4.4** se muestran estas casillas.

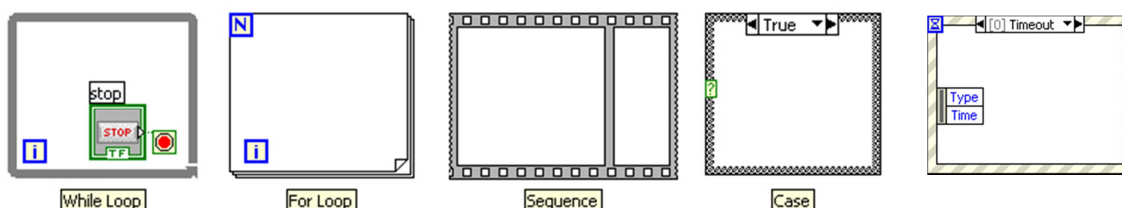


Figura 4.4 Estructuras de control del programa.

WHILE LOOP

Ejecuta el código del interior mientras no se ordene la parada con el control Stop – o la condición que se le haya impuesto para parar no se cumpla. El nombre de iteraciones realizadas hasta el momento se indica en **i**.

FOR LOOP

Ejecuta el código que contiene el número de veces que se imponga a través de **N**, mostrando el número de iteraciones realizadas de la misma forma que en el caso anterior, en **i**.

SEQUENCE

Normalmente se utiliza para estructurar la ejecución del código, de tal manera que no se realiza la escena siguiente hasta que se finaliza la escena actual

CASE

Ejecuta un código diferente para cada una de las opciones implementadas, dependiendo del valor conectado a **?**.

EVENT

En este caso, el código al interior de la casilla se ejecuta cuando se produce el evento para el cual está programado.

4.1.2 Estructuras de control secundarias.

Hay otro tipo de estructuras de contención de código, que pueden ser convenientes en algunos momentos debido a que ya dispongamos de elementos programados en otros lenguajes. Para ello, se encuentra disponible un conjunto de

funciones que hacen posibles introducir estos otros lenguajes en el código de LabVIEW.

El inconveniente de estas funciones es que para ejecutarlas, es necesario tener instalado el programa al cual hace referencia; es decir, que no se podrá ejecutar el código de un script de MATLAB si no se dispone del motor de funcionamiento de aplicaciones de MATLAB instalado. En la **Figura 4.5** se muestran algunas de las diferentes opciones disponibles en la versión LabVIEW utilizada en este proyecto.

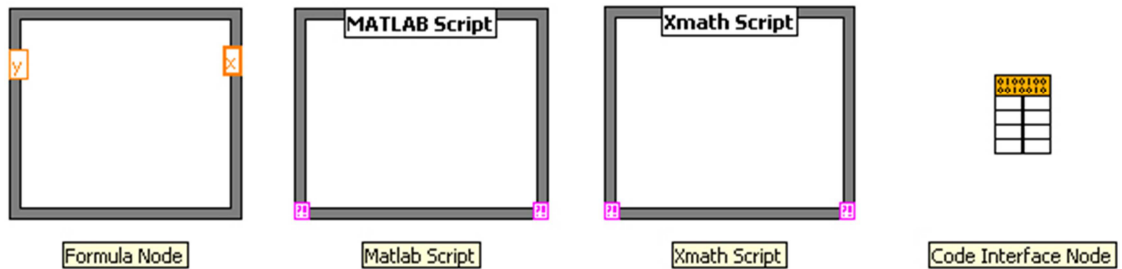


Figura 4.5 Scripts de programación en texto.

FORMULA NODE

Utiliza una sintaxis propia del LabVIEW, similar a la empleada en MS Excel o MATLAB, para la realización de cálculos que programas con las funciones visuales resultarían extensos y complicados de entender.

MATLAB/XMATH Script

El resto de funciones, "MATLAB script", "Xmath script" y "Code interface node" (para la programación en C) ejecutan el código del interior (o el conectado) como si se tratase del lenguaje de programación respectivo.

4.2 Formatos de datos.

Los datos con los cuales trabaja LabVIEW tienen un formato definido. Pueden ser un valor numérico (de 8, 16 o 32 bits, entero o racional, complejo...), booleano, una ruta de acceso, una serie de caracteres o una referencia a un objeto; o bien una agrupación de diferentes formatos o una matriz. El color y la forma de la conexión indican el formato de los datos que circulan. **Figura 4.6**

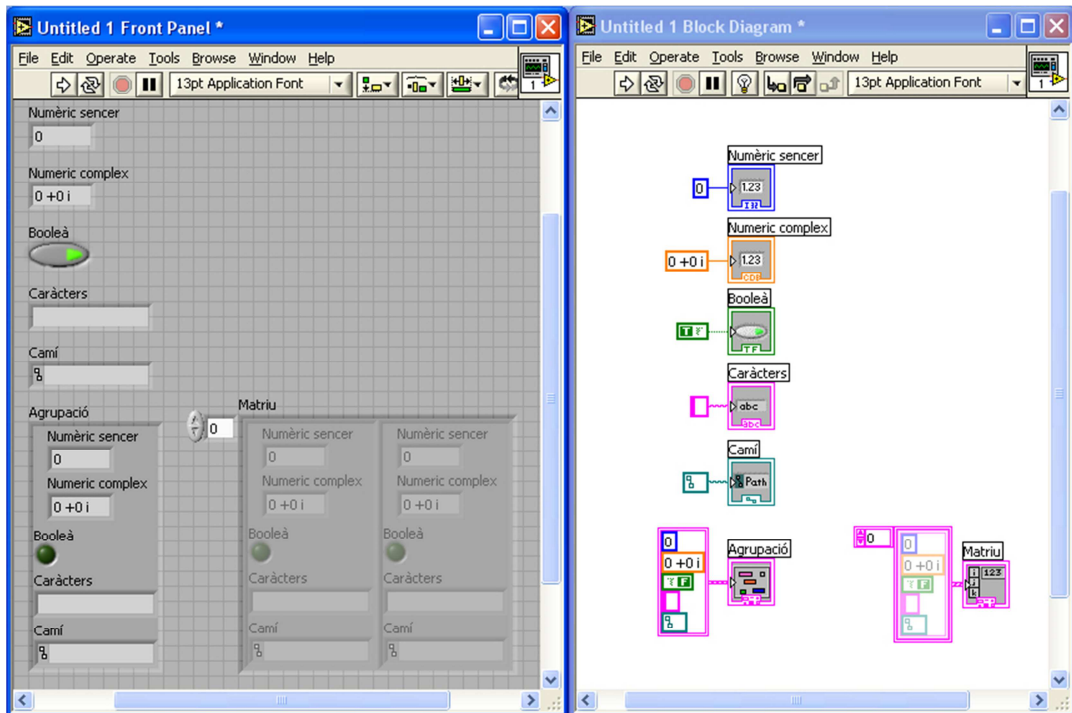


Figura 4.6 Diferentes indicadores, dependiendo del contenido.

Dentro de un *vi* se puede hacer referencia al valor de un indicador o control utilizando las variables locales. Las variables locales son una copia del terminal al cual hacen referencia, con el nombre de este, que se utilizan para leer o escribir un valor, tanto si es un indicador o un control. Cuando esta lectura o escritura de datos se quiere hacer externa al propio *vi*, con tal de intercambiar resultados entre *vis* diferentes, se utilizan las variables globales. Una variable global en LabVIEW es un *vi* formado únicamente por un panel frontal (no té diagrama de blocs) que contiene como mínimo un indicador o un control, del formato de datos deseado. De esta forma, un *vi* puede guardar información en una variable global que después será leída por otro *vi*. En la aplicación descrita en este proyecto se usan variables globales para disponer de la configuración de la medida en cualquier momento.

Otro punto importante de la programación en LabVIEW es la referencia a objetos. Los indicadores y los controles del panel frontal pueden ser modificados por el mismo programa gracias a los nodos de propiedades. A partir de la referencia a un objeto del panel frontal, un nodo de propiedades puede leer y modificar cualquier característica del objeto, desde el valor que tiene hasta el tamaño o el color. La referencia a objetos también permite la ejecución de otros *vis*, una forma alternativa a situar el icono en el diagrama de blocs, que además permite cambiar las propiedades.

4.3 DAQmx.

National Instruments proporciona, junto a los drivers de sus tarjetas, librerías con las funciones de Labview para la comunicación y el control de los distintos parámetros del hardware de adquisición, facilitando de esta forma la captación de señales y su posterior procesamiento. Estas librerías se encuentran embebidas en la paleta de herramientas del diagrama de bloques:

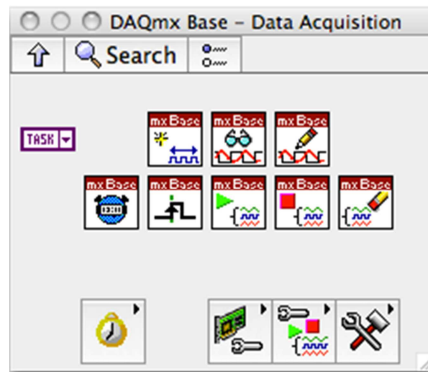


Figura 4.7. Librerías DAQmx.

4.4 Jerarquía de funciones.

Una aplicación en LabVIEW antes de compilar está formada por un conjunto de archivos “.vi” cada uno de los cuales realiza una función diferente. Algunos pueden ser variables globales, otros son funciones programadas por el usuario, y el resto son funciones de las librerías ya programadas en LabVIEW.

La estructura básica de un programa consiste en un *vi* raíz, que ejecutará otros “.vi” en el momento que necesite realizar cada función concreta. Una forma de entender esta estructura es la jerarquía de *vi*'s, como la que es muestra en la **Figura 4.8**.

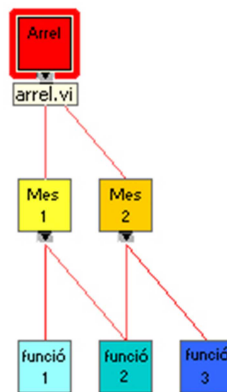


Figura 4.8 Jerarquía entre los *vi*'s que forman un programa.

En este esquema se observa fácilmente cual es el *vi* principal, y cual es la dependencia de este respecto a todos los *vi*'s que completan la aplicación. Una vez el programa está acabado, es necesario compilar todos los *vi*'s necesarios para poder ejecutar la aplicación. De entre las opciones que ofrece LabVIEW, la más usual consiste a crear un archivo ejecutable (“.exe”) y un conjunto de archivos de soporte y ayuda. Aquí aparece un problema, y es que el archivo ejecutable no funcionara si no está instalado el módulo de funcionamiento de programas “LabVIEW run-time engine”. Para eliminar este inconveniente se dispone de una opción de compilación con la cual el resultado es un programa instalable que contiene todos los archivos requeridos para ejecutar la aplicación en cualquier ordenador.

5 Desarrollo

Esta colección de métodos, ha sido agrupada dentro un programa donde se seleccionara la opción deseada para cada tipo de caracterización.

Así pues, el orden será el siguiente

Programa principal

Absorción

Resistencia al Flujo

Martillo

Perdidas por transmisión

A continuación, se presenta un apartado por cada programa (incluyendo la pantalla principal), para mostrar tanto su panel frontal como la parte del código correspondiente.

5.1 Programa principal

5.1.1 Panel frontal

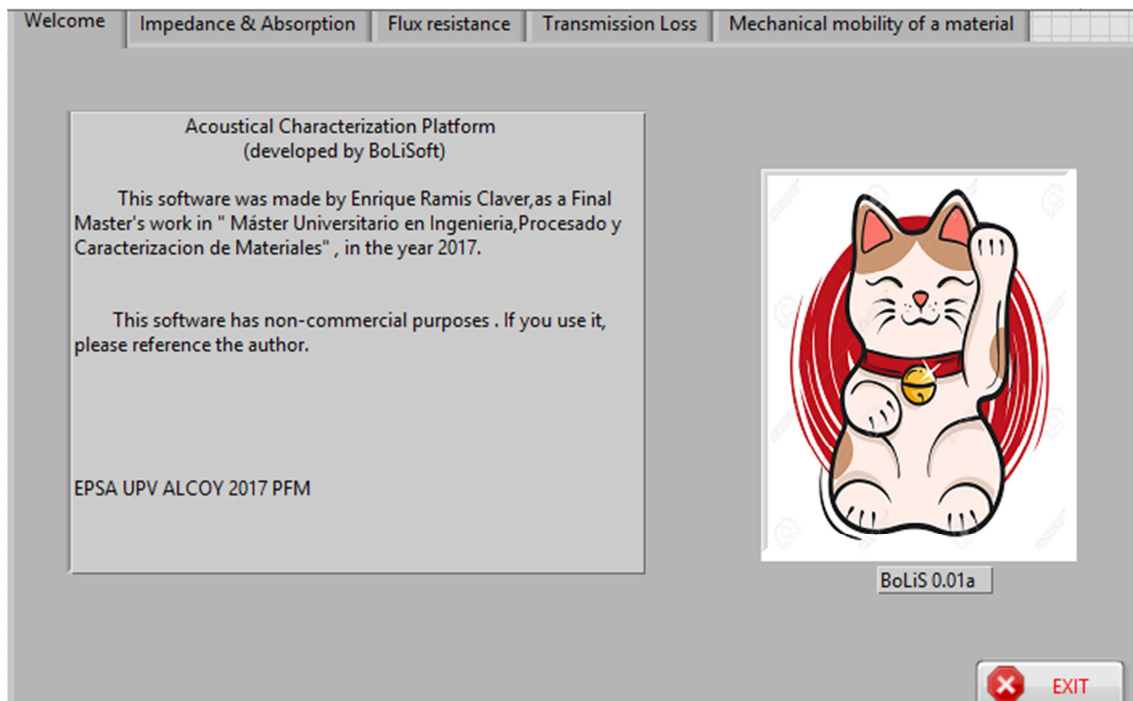


Figura 5.1. Pantalla “welcome” del programa principal.

Este programa cumple la función de agrupar los métodos de caracterización de forma ordenada por pestañas, para así evitar confusiones de métodos. El texto se ha redactado en inglés (ver figura superior).

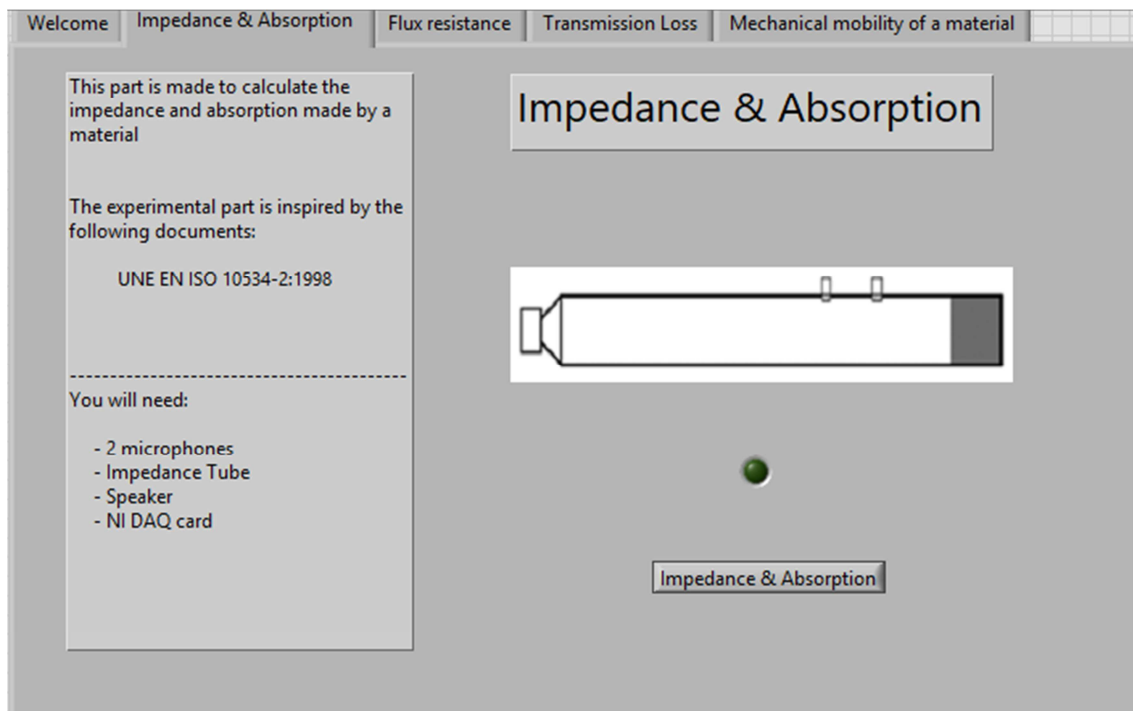


Figura 5.2. Pantalla de selección “Absorption” del programa principal.

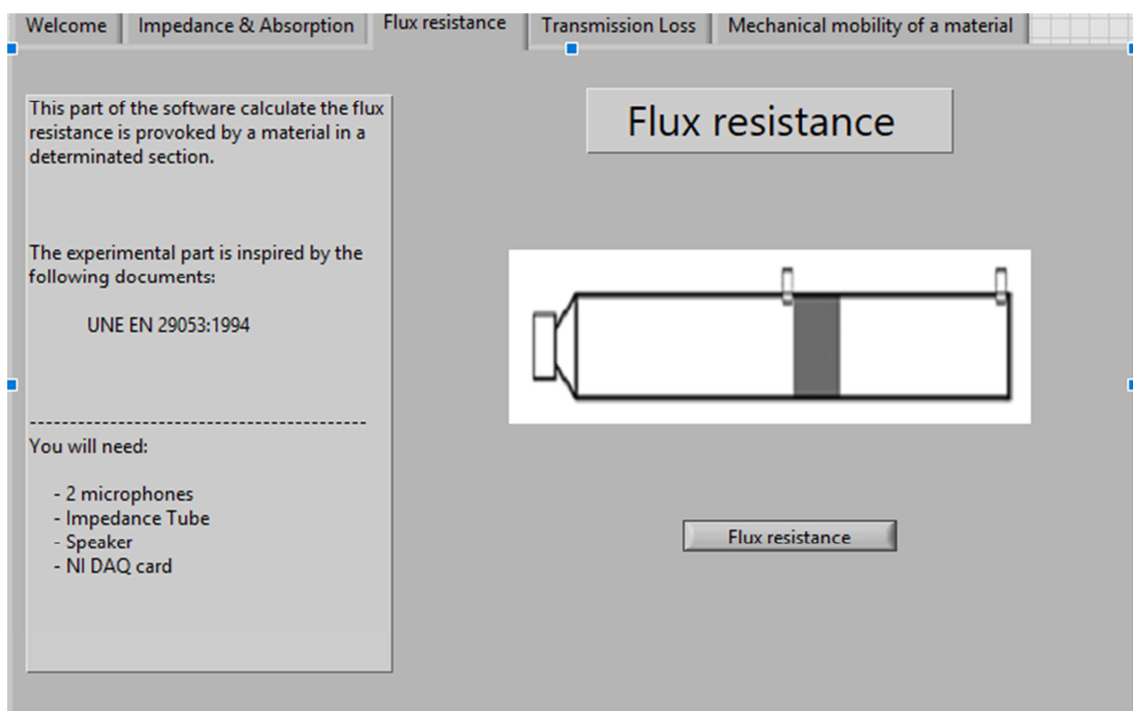


Figura 5.3. Pantalla de selección “Flux Resistance” del programa principal.

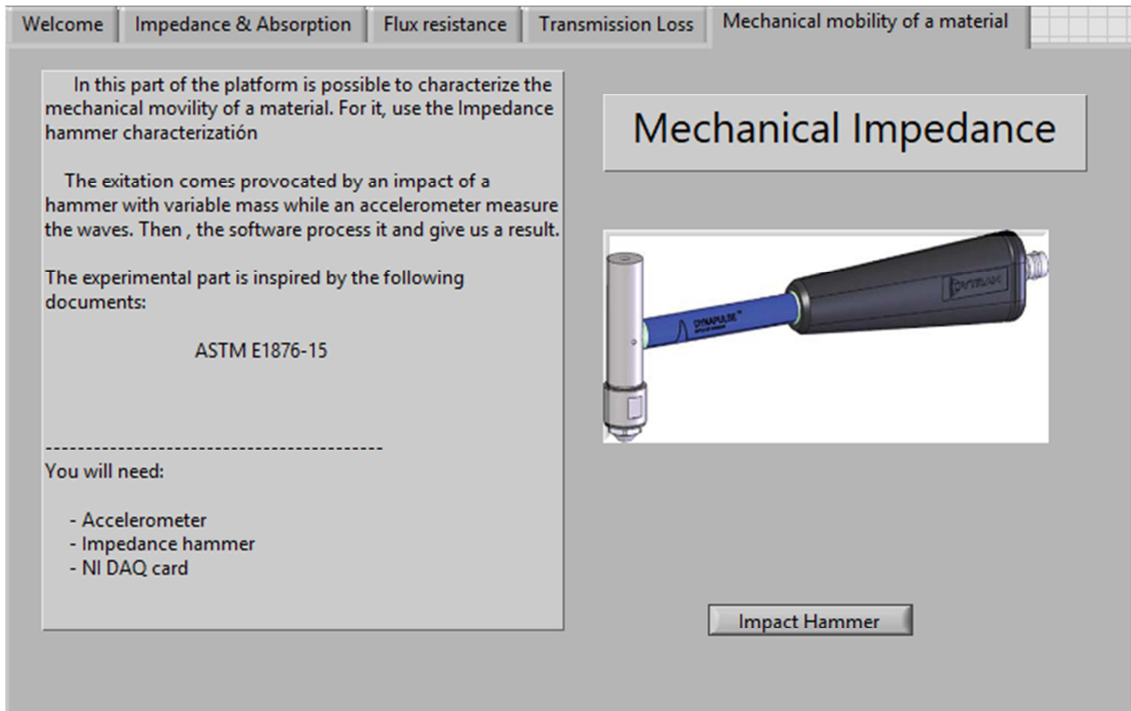


Figura 5.4. Pantalla de selección “Mechanical Impedance” en programa principal

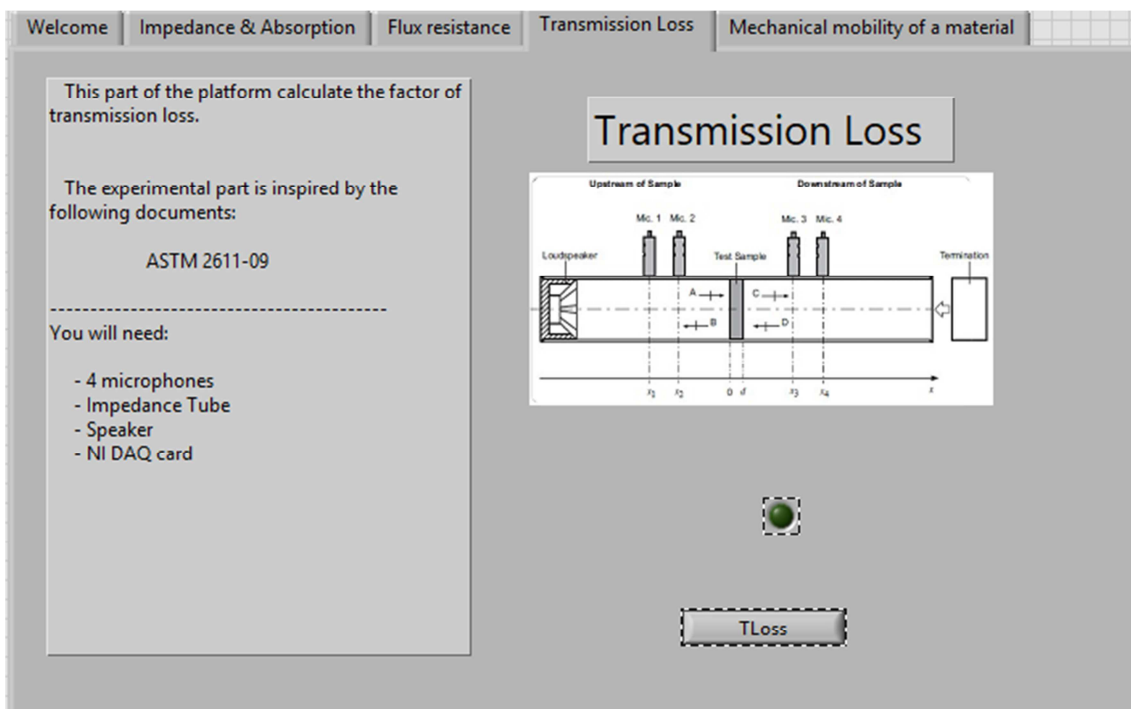


Figura 5.5. Pantalla de selección “TLoss” del programa principal.

5.1.2 Código

La base de este programa consiste en un cuadro de evento dentro de un bucle *while*. Como se ha explicado en anterioridad, los cuadros de eventos reaccionan ante pulsaciones de botones o acciones pre programadas. Así pues, se ha creado un evento para cada tipo de caracterización, contenido en un vi asociándolo a un botón que ejecuta el correspondiente evento.

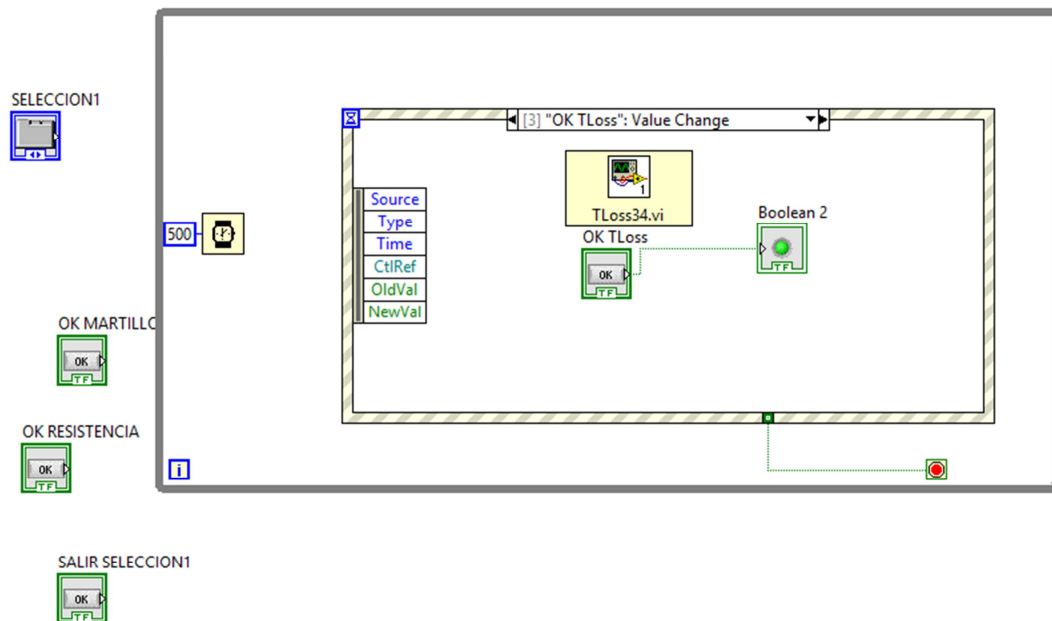


Figura 5.6. Diagrama de bloques de "Pantalla Principal".

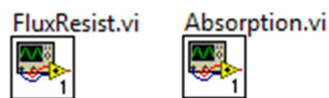


Figura 5.7. Vi's correspondientes a cada método de caracterización.

El otro evento que hay creado es uno asociado al cierre del programa, cuando se pulse el botón "exit" de la pantalla principal se ejecutara el código visible en la figura inferior

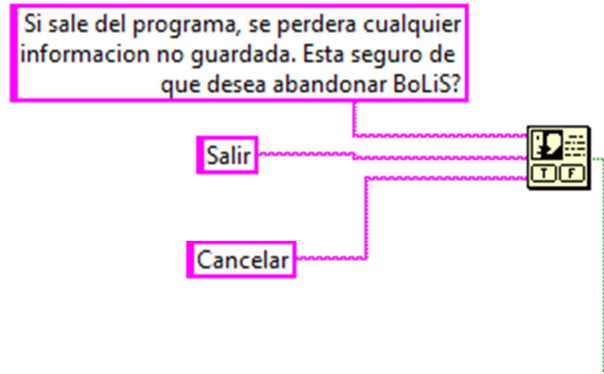


Figura 5.8. Mensaje de salida del programa principal.

5.2 Absorción

5.2.1 Panel frontal

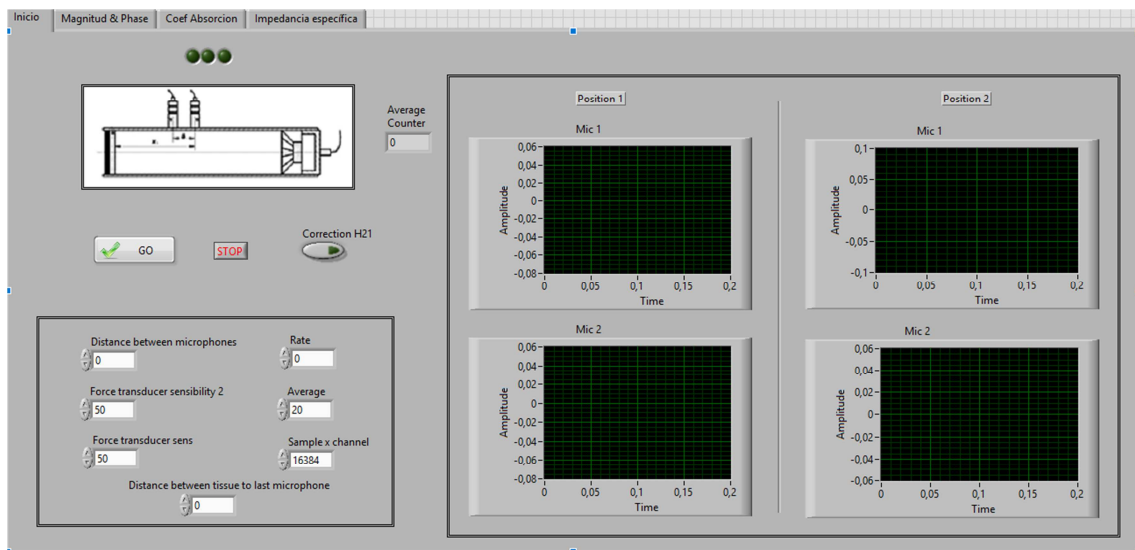


Figura 5.9. Pantalla de selección “TLoss” del programa principal.

La pantalla principal de este programa tiene tres aspectos principales. En la figura superior, la parte inferior izquierda corresponde a los parámetros necesarios en la caracterización mediante el uso de este programa. Dichos parámetros se exponen a continuación en una tabla indicativa.

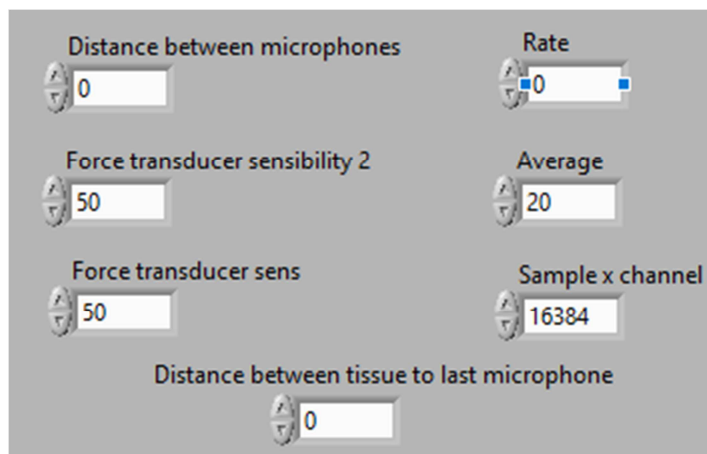


Figura 5.10. Detalle de los parámetros de configuración.

En la parte superior izquierda, se encuentran tres botones booleanos. Dichos botones corresponden a “Go”, “Exit” y “Correction H21”. Los dos primeros botones ejecutan las tareas que los nombran, mientras que el tercer botón corresponde a la posibilidad de activar la corrección de posición de los micrófonos para garantizar resultados con precisión (así como se recomienda en la norma). El proceso de cálculo se ha mostrado anteriormente, y el código que lo representa será mostrado en el apartado correspondiente al código.

En la parte de la derecha de la figura anteriormente descrita, se muestran las gráficas correspondientes a las señales recogidas por los micrófonos, tanto en la primera captura, como en el caso de activar la coherencia.

Las otras tres pestañas que contiene este programa contienen graficas que muestran los resultados.

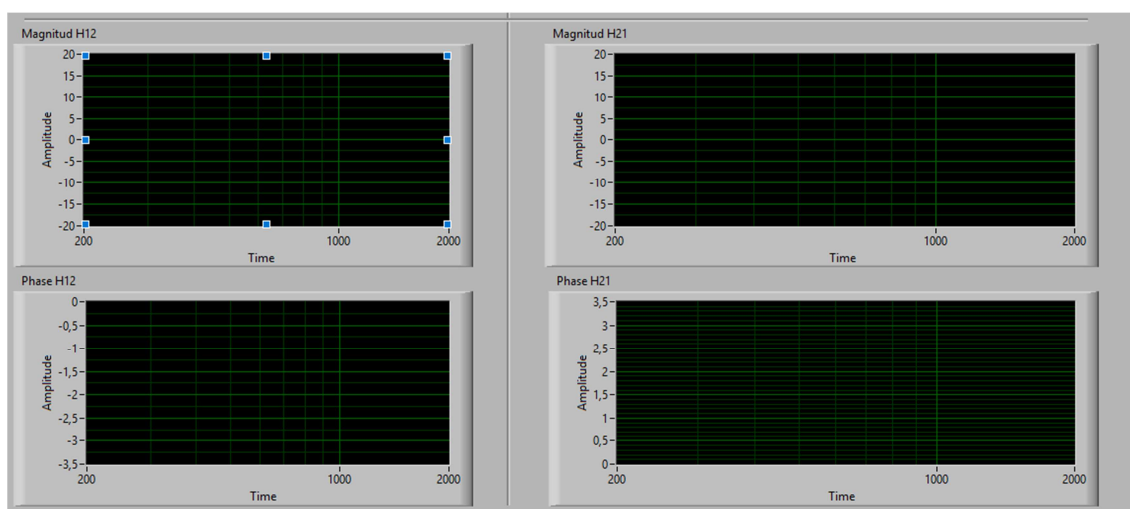


Figura 5.11. Pestaña de graficas de Magnitud y Fase.

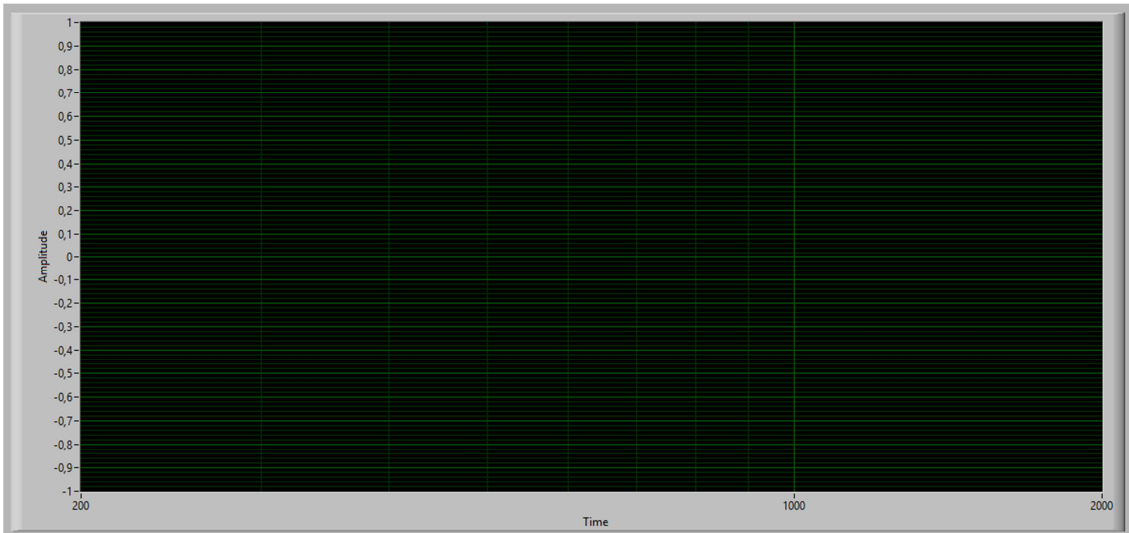


Figura 5.12. Pestaña con la gráfica de coeficiente de absorción.

La pestaña que contiene la Impedancia específica es igual que esta última figura.

5.2.2 Código

Los micrófonos necesitan una ligera alimentación para ser activados (IEPE), por ello lo primero que se presenta en el código es nodo para configurar dicha corriente así como el canal de donde proceden las señales.

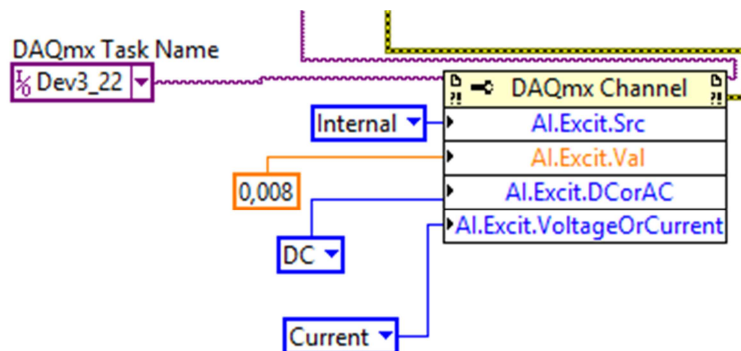


Figura 5.13. Código de activación de micrófonos IEPE.

A continuación se colocan paralelamente los vi de configuración de la emisión del ruido mediante la tarjeta de sonido del pc respecto al inicio de la grabación de los micrófonos. Esta solución tuvo que ser seleccionada debido a que la tarjeta que se utiliza, no contiene canales de salida, y por lo tanto no puede emitir desde ahí. Los bloques correspondientes a la tarjeta de sonido del pc pertenecen a la parte superior

de la figura inferior, mientras que la parte inferior pertenece al inicio de la tarea de grabar en los canales anteriormente descritos.

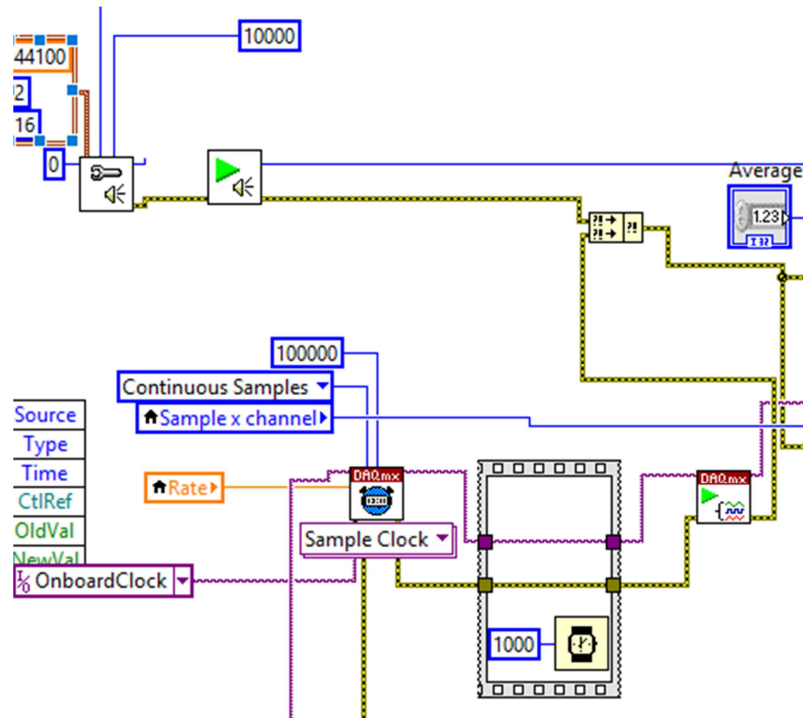


Figura 5.14. Código de sincronización de micrófonos y emisión de señal.

Tras esto, se coloca el código correspondiente, tanto a la emisión de ruido blanco como de la grabación, dentro de un bucle *while*. En el, el proceso de captura y de realizar las FFT (fast Fourier transformation) se realizara tantas veces como sea el valor introducido en Average (en la pantalla de configuración). Esto asegura unos resultados con mayor fiabilidad y unas señales más limpias.

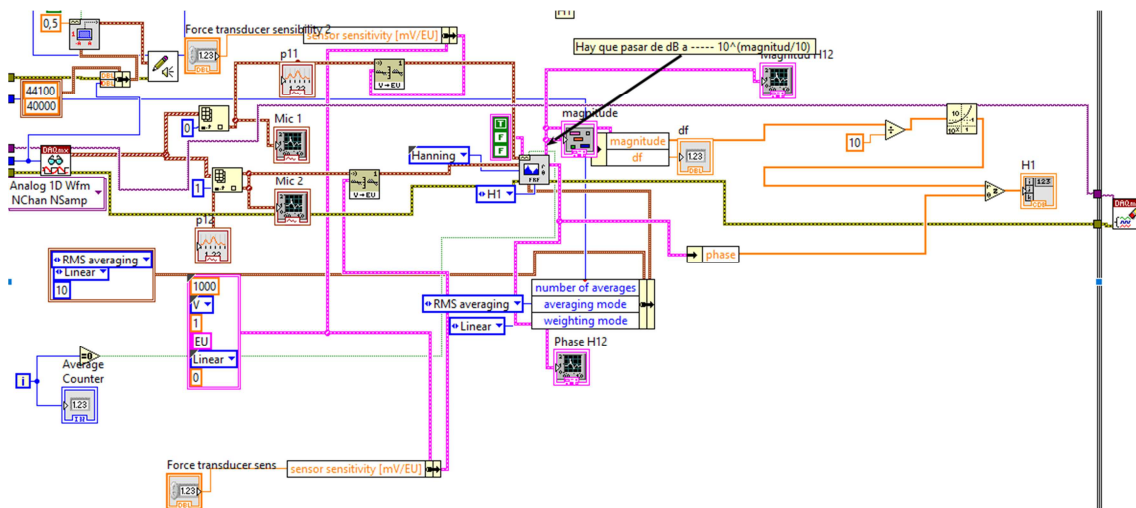


Figura 5.15. Código de adquisición de micrófonos y FFT.

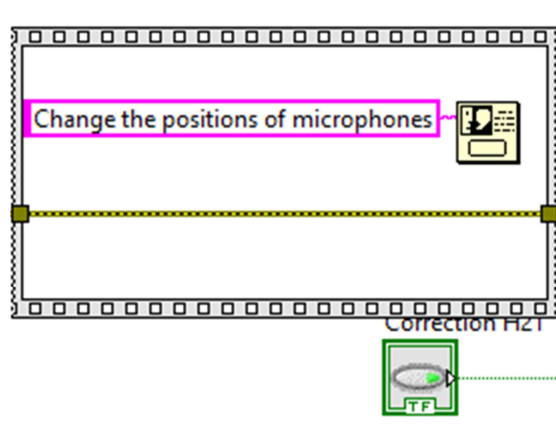


Figura 5.16. Código para mostrar un mensaje de advertencia para cambiar los micrófonos.

Tras realizar este proceso con la posición 12 (explicada en el apartado correspondiente) , y si se ha activado la opción de los cálculos con corrección, se sitúa un cuadro de dialogo que pide que se cambie la posición de los micrófonos. Tras darle a OK, se volverá a medir, y se realizaran los cálculos correspondientes (ver figura asdasdj)

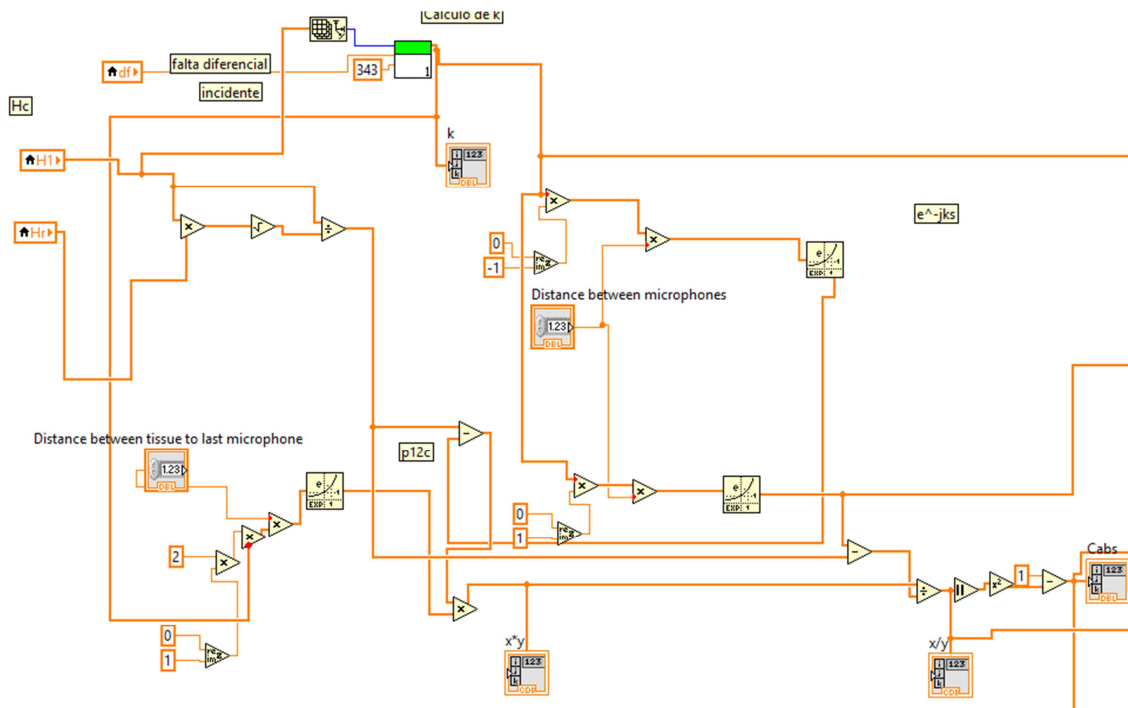


Figura 5.17. Código para calcular el coeficiente de absorción.

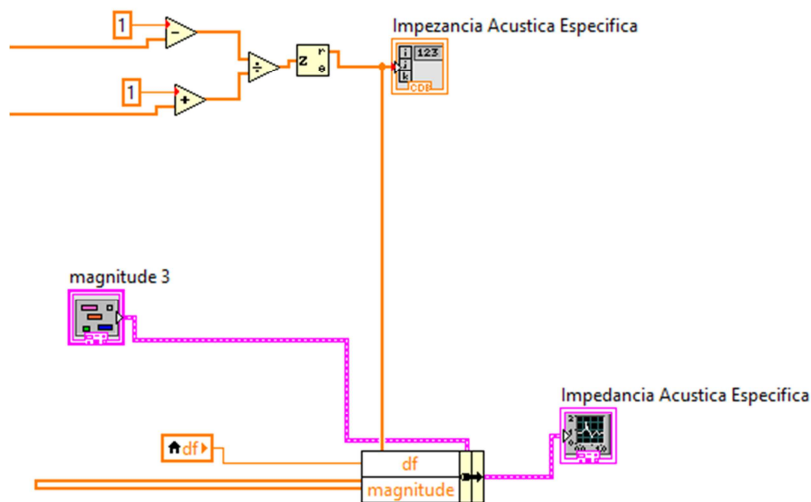


Figura 5.18. Código para calcular la impedancia acústica.

5.3 Resistencia al flujo

5.3.1 Panel frontal

Tal como se puede apreciar en la figura inferior, la pantalla se divide en dos zonas, la zona derecha con graficas y la de la izquierda como configuración. Las graficas corresponden a las señales registradas por los microfonos en su forma FFT (fast fourier transform), y tienen el objetivo de ayudar a decidir si la captura ha sido buena o no. Por otra parte, la zona de configuración (ver figura 5.20) requiere de la inserción de determinados parametros como son distancias entre microfonos, las muestras por canal, las sensibilidades de los microfonos, etc.

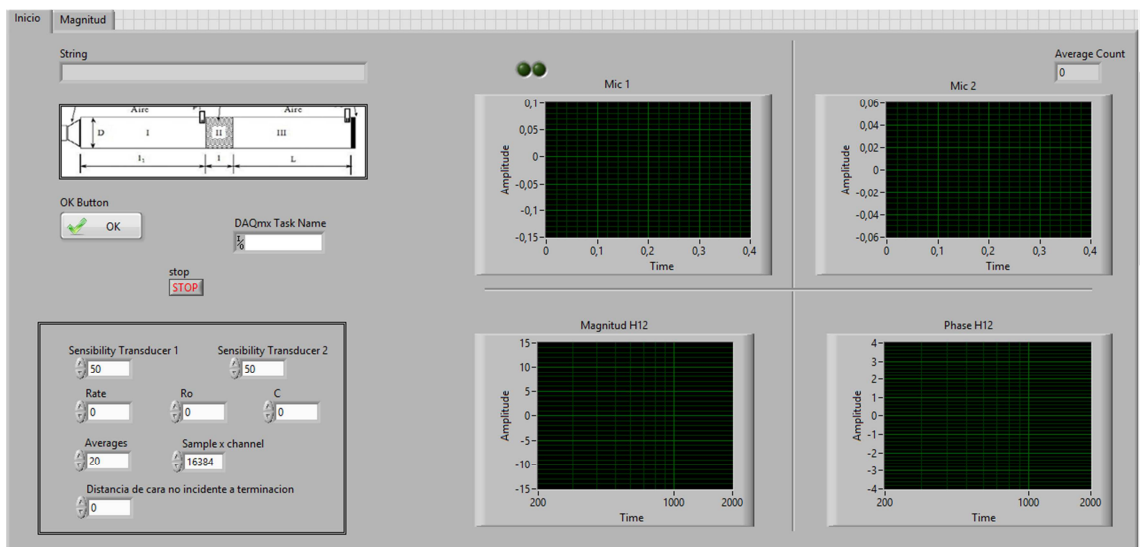


Figura 5.19. Panel frontal del programa "Flux Resistance".

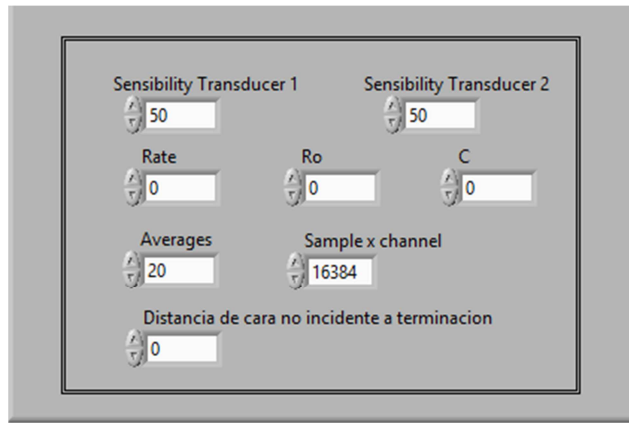


Figura 5.20. Detalle de la zona de configuración.

Como pantalla de resultados, solo se presenta una pestaña. Esto se debe a que el programa desarrollado no obedece a la norma (que requiere de equipos específicos y caros, no disponibles al alcance de todos) y ha seguido recomendaciones de diferentes artículos de investigación.

En dicha pantalla de resultados, se presenta la grafica obtenida de la diferencia de presiones que registran los microfones posicionados antes y despues de la muestra. Esto no es un resultado como tal, para ello se debe hacer una regresion lineal de la grafica y obtener la pendiente. Se ha añadido la apertura automatica de un excel con los datos de la grafica, para asi poder realizar de una forma más facil el tratamiento correcto (que quedara a manos del usuario)

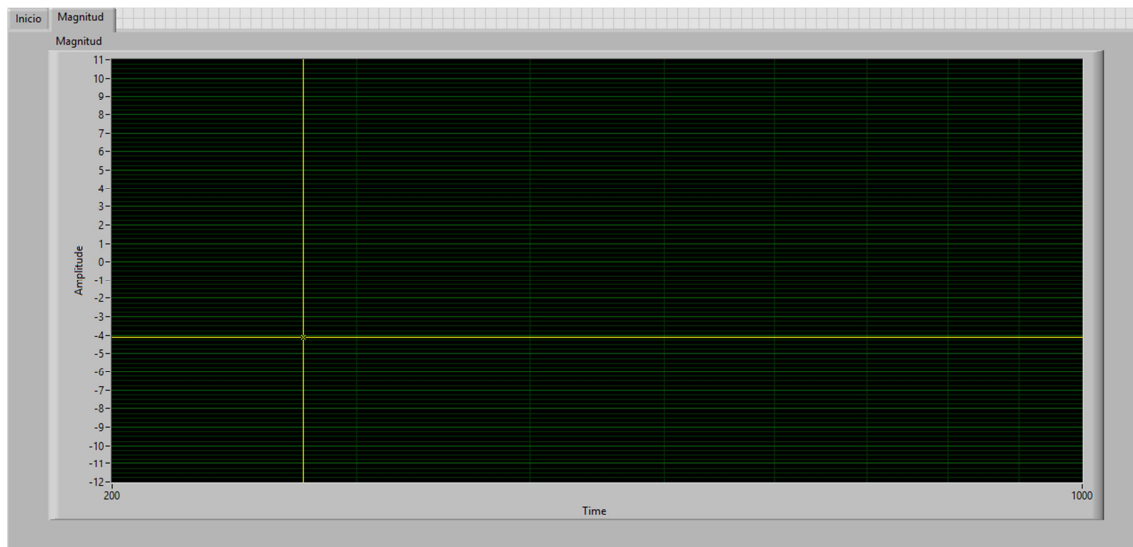


Figura 5.21. Pestaña de resultados “Magnitud”.

5.3.2 Código

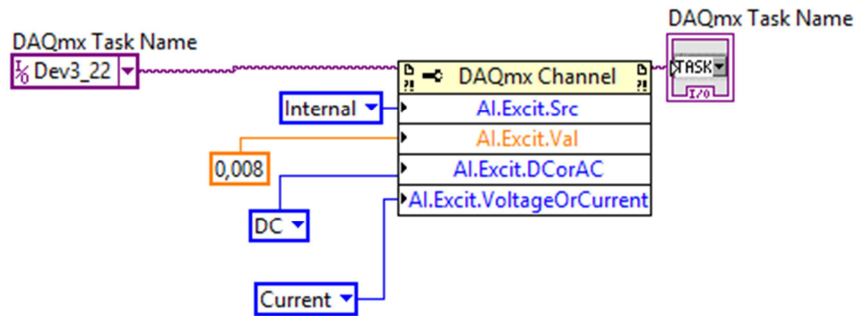


Figura 5.22. Código de activación de micrófonos IEPE.

Este programa presenta un código muy parecido al que se tiene en “Absorption&Impedance”, así pues la explicación se realizará de forma más resumida, considerando que gran parte de el código es igual .

El programa empieza, tal como hizo el anterior, activando los micrófonos al darle una corriente baja (IEPE), puesto que si no, no registrarían nada. (ver figura 5.22)

Tras la activación de los micrófonos, se pasa a configurar la emisión de sonidos mediante la tarjeta de sonido del pc (parte superior figura 5.23) , a la vez que se prepara la tarea de grabar con los micrófonos.

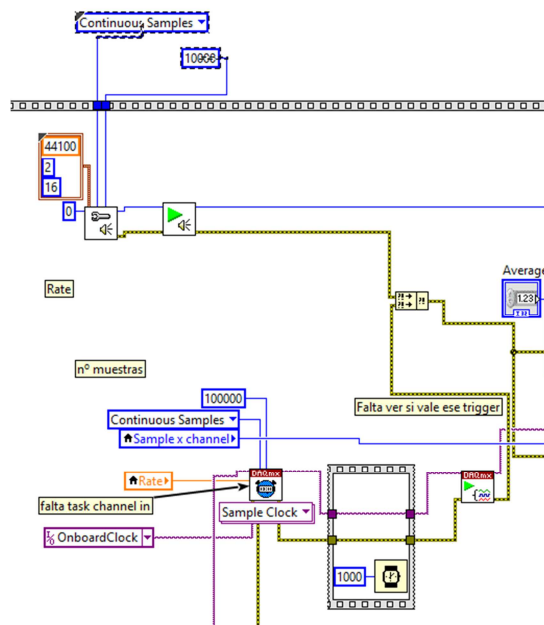


Figura 5.23. Código para configurar la emisión de señal y la grabación de micrófonos.

A continuación , se repite el esquema de adquisición de datos utilizado en el vi “Absorption&Impedance”. Este esquema , tal como se ha explicado en anterioridad, consiste en la emisión de un ruido blanco paralelamente a la grabación de los

microfonos, para luego realizar las correspondientes FFT. Este proceso, al estar incrustado dentro de un bucle For, provoca que se realicen medias de las señales, obteniendo señales limpias que posteriormente crearan menos problemas durante el calculo del coeficiente de flujo. Tras la realizacion de las capturas, y de las medias, se muestra un mensaje mediante el vi de la figura 5.25.

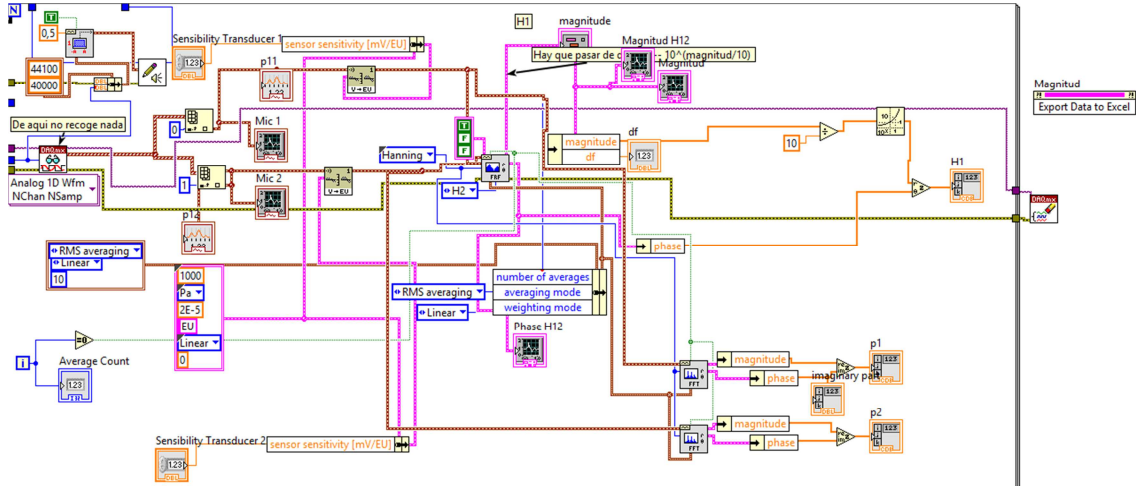


Figura 5.24. Código para la emisión de señal y la grabación de micrófonos, así como FFT.

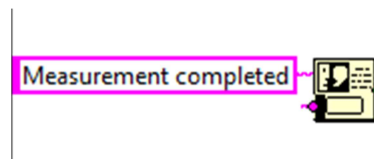


Figura 5.25 Código para mostrar un mensaje.

Una vez realizadas las medidas, se pasa a otra escena dentro del bucle principal, donde se realizan los cálculos necesarios de acuerdo comentadas en el capítulo 3.

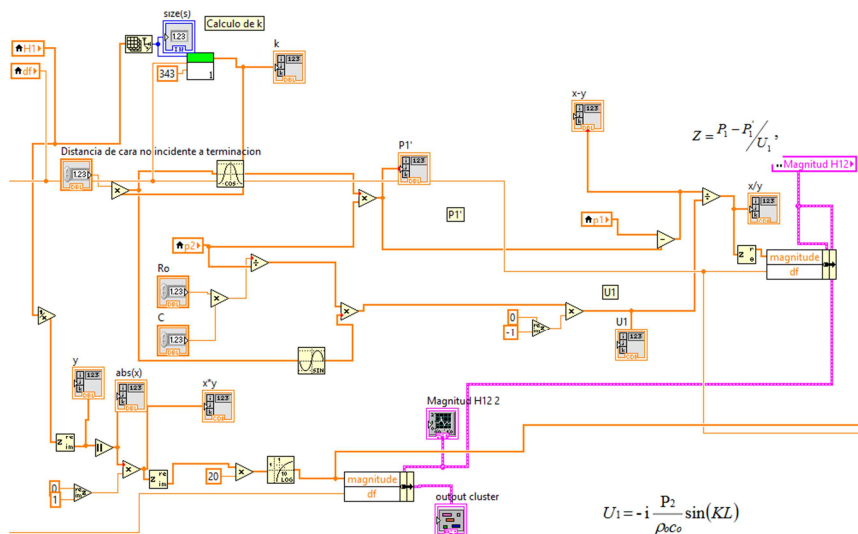


Figura 5.26. Código para la emisión de señal y la grabación de micrófonos, así como FFT.

5.4 Impedancia mecánica

5.4.1 Panel frontal

La pantalla principal del programa se diferencia en tres zonas claras: graficas, configuración, y botones.

La parte de los botones (izquierda) tiene como función activar el cálculo de la admitancia, poder registrar los nombres de los transductores y sus números de serie , así como activar o parar el programa. En la parte central se presentan las gráficas de resultados, la inferior representa el impacto en el tiempo, de forma que solo debe tener un pico, mientras que la superior representa la onda asociada al material que se quiere estudiar, y de ahí se obtiene la respuesta de frecuencia fundamental. La grafica de la parte superior derecha muestra la coherencia de los resultados obtenidos

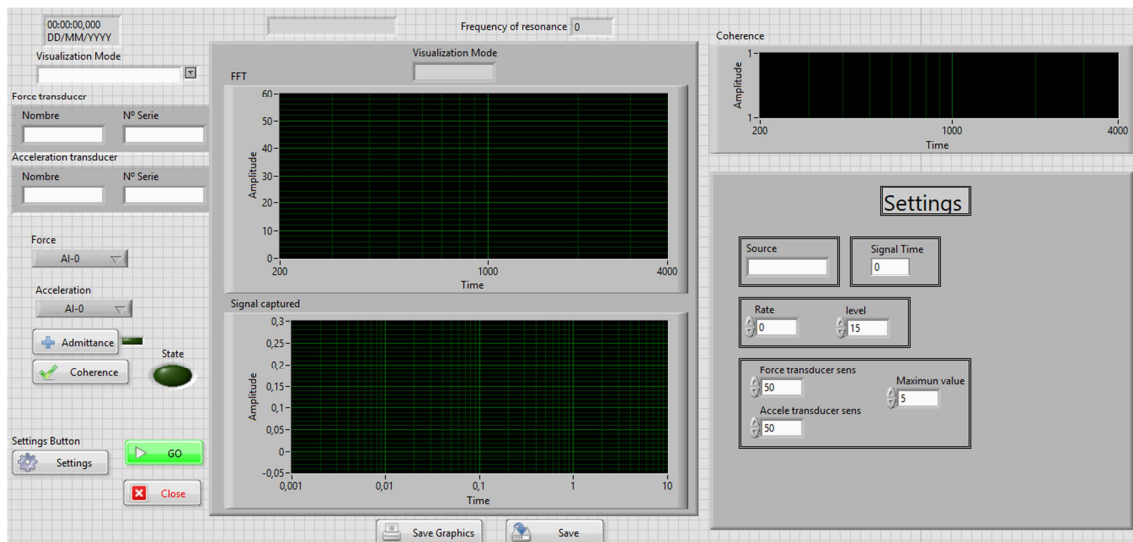


Figura 5.27. Panel frontal en la aplicación MMIH.

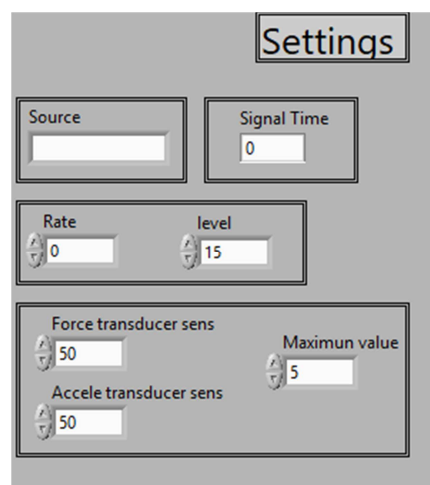


Figura 5.28. Detalle de la zona de configuración.

5.4.2 Código

Para el desarrollo de este programa, se ha utilizado un esquema de escenas (una tras otra), que ordene el proceso que se debe realizar. En la figura inmediatamente inferior debajo de este párrafo, se puede identificar diferentes elementos tales como la preparación de las variables mínimas necesarias para su ejecución (se precargan al iniciar el programa), así como se configuran las entradas de cada señal.

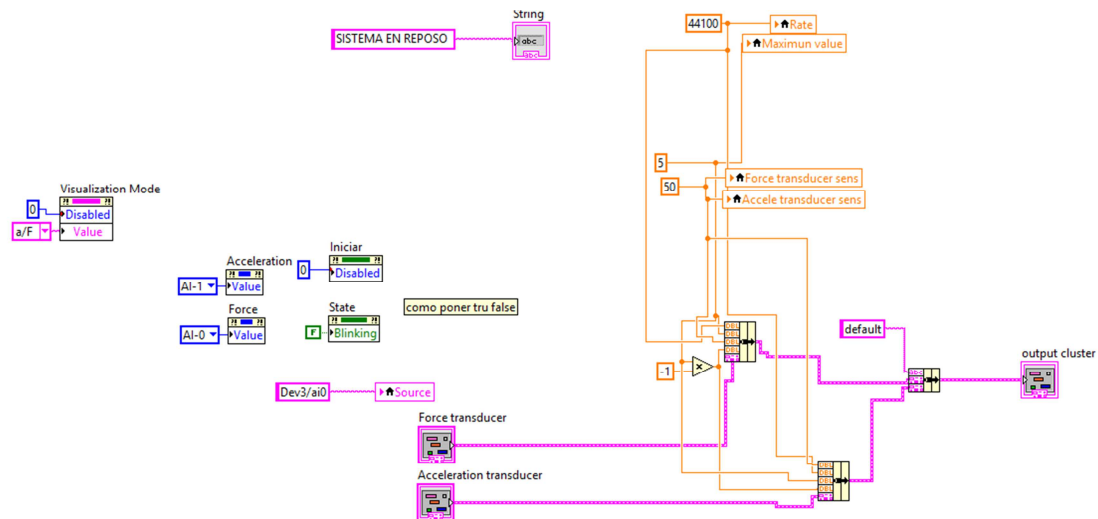


Figura 5.29. Código que precarga variables al programa.

Tras esto, y tras haber introducido el tiempo de captura, se calcula tanto las muestras por canal como el “pre-trigger”. El pre-trigger es un sistema que se ha tenido que desarrollar para llevar a cabo este tipo de ensayo con esta tarjeta, no compatible con trigger de hardware (se explicara en su correspondiente apartado).

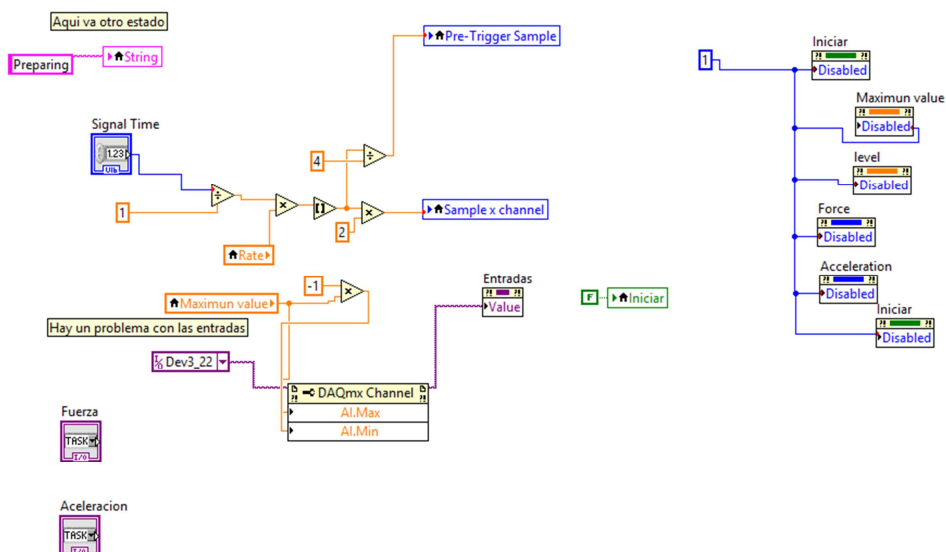


Figura 5.30. Código de cálculo de variables y activación IEPE.

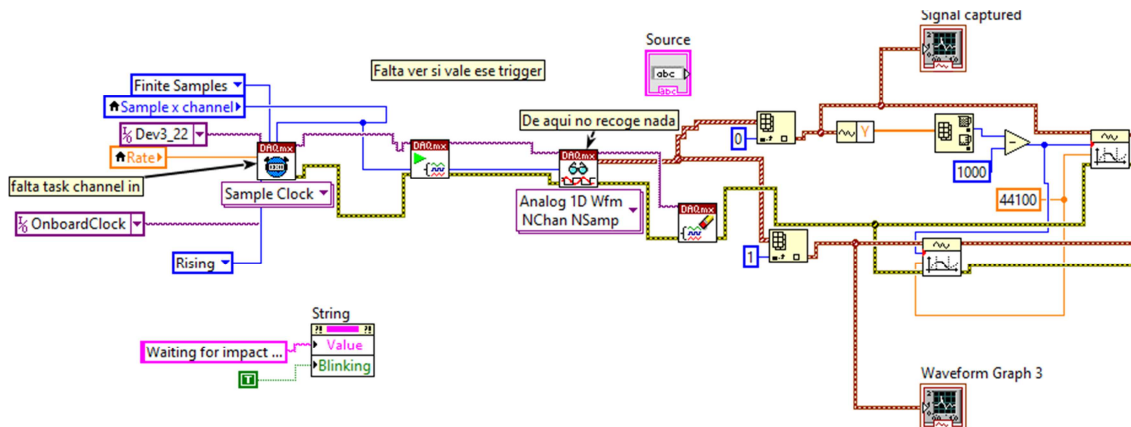


Figura 5.31. Código de cálculo de variables y activación IEPE.

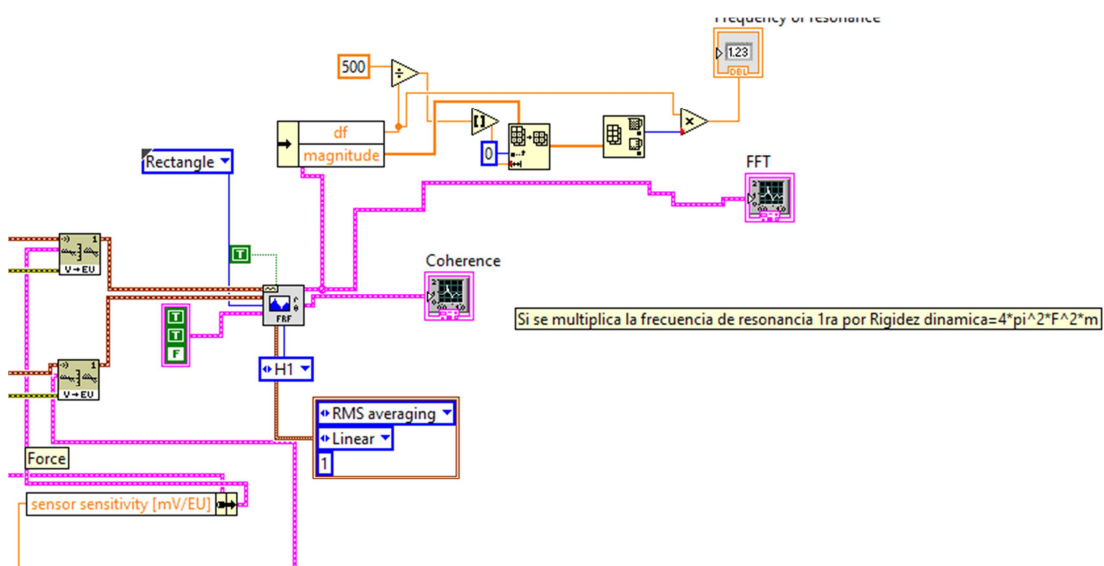


Figura 5.32. Código de cálculo de variables y activación IEPE.

5.5 Perdidas por transmisión

5.5.1 Panel frontal

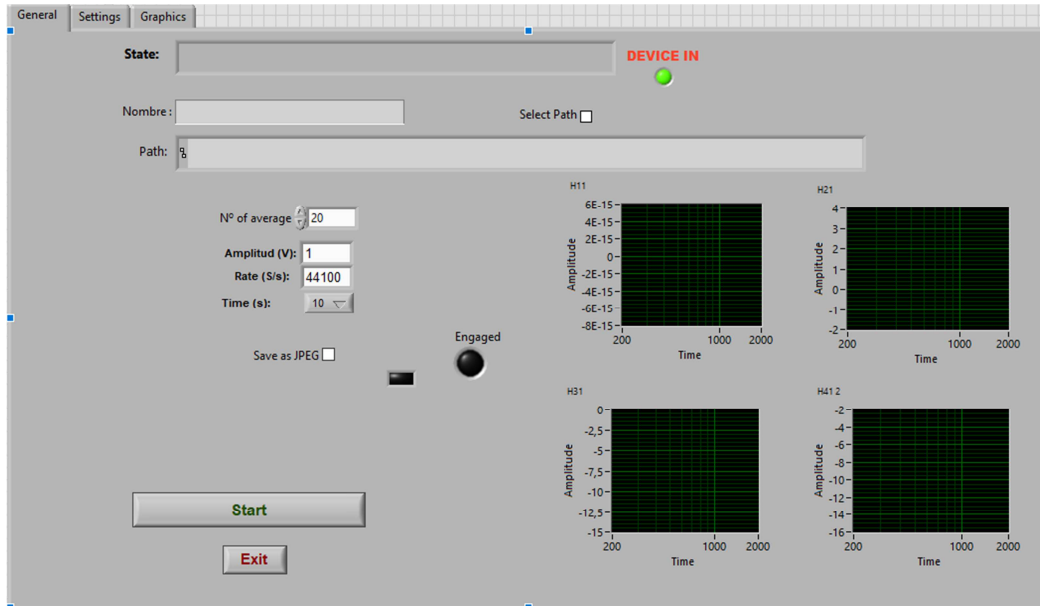


Figura 5.33. Panel frontal de aplicación “TLoss”.

Tal como se aprecia en la figura anterior, hay tres pestañas. La primera, corresponde a la captura como tal, donde se muestran los mensajes de estado en la parte superior del programa, se puede seleccionar la carpeta de destino, el tiempo de ensayo, la amplitud, así como ver las señales registradas por los micrófonos sin tratar.

La segunda pestaña, contiene la configuración del programa. Hay diversos factores, tal como son las sensibilidades (agrupadas arriba) o factores que dependen de las características del tubo (“tube properties”). En cuanto al NFFT, es un tamaño de bloque en el que se guarda la información capturada. Así pues, a mayor número, mayor precisión en la medida.

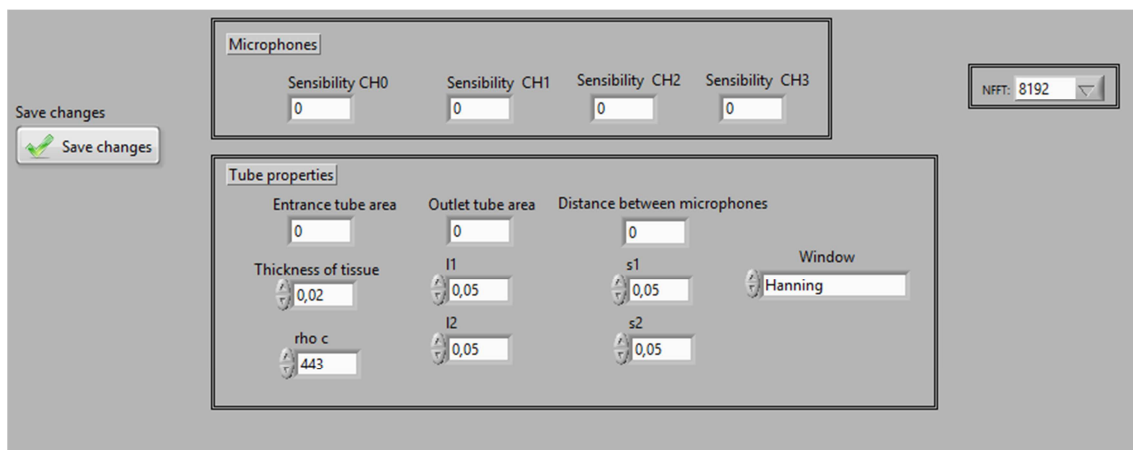


Figura 5.34. Pestaña de configuración.

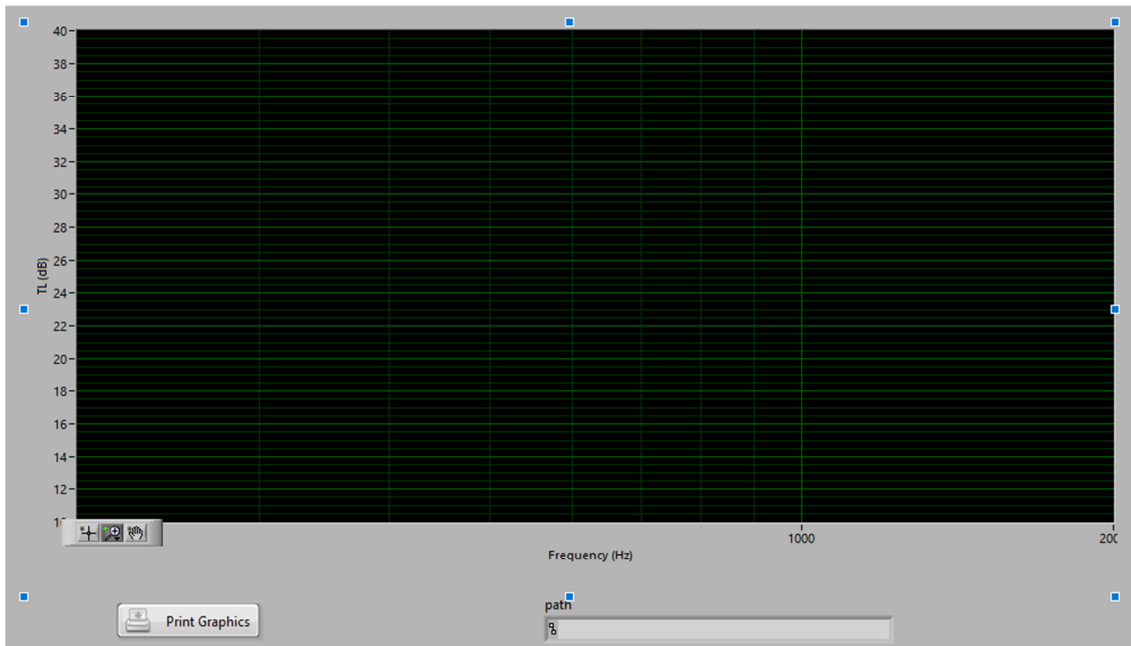


Figura 5.35 Pestaña de grafica con resultados de “TLoss”.

a la gráfica de resultados, donde se muestra la perdidas de transmisión (en dB). Hay posibilidad de guardar las gráficas, al pulsar el botón que hay en la parte inferior de la pantalla.

5.5.2 Código

La ejecución de este programa es secuencial en su mayoría, por ello se explicara la parte de adquisición la primera vez que se realiza, y las demás se explicaran simplemente que elementos han cambiado respecto de esa adquisición.

Según se aprecia en la figura inferior, se repite el esquema anterior : se prepara la configuración de la emisión del sonido mediante la tarjeta de sonido del pc a la vez que paralelamente se activan los micrófonos haciendo circular una pequeña corriente a través de ellos, y luego se lleva a término la adquisición.

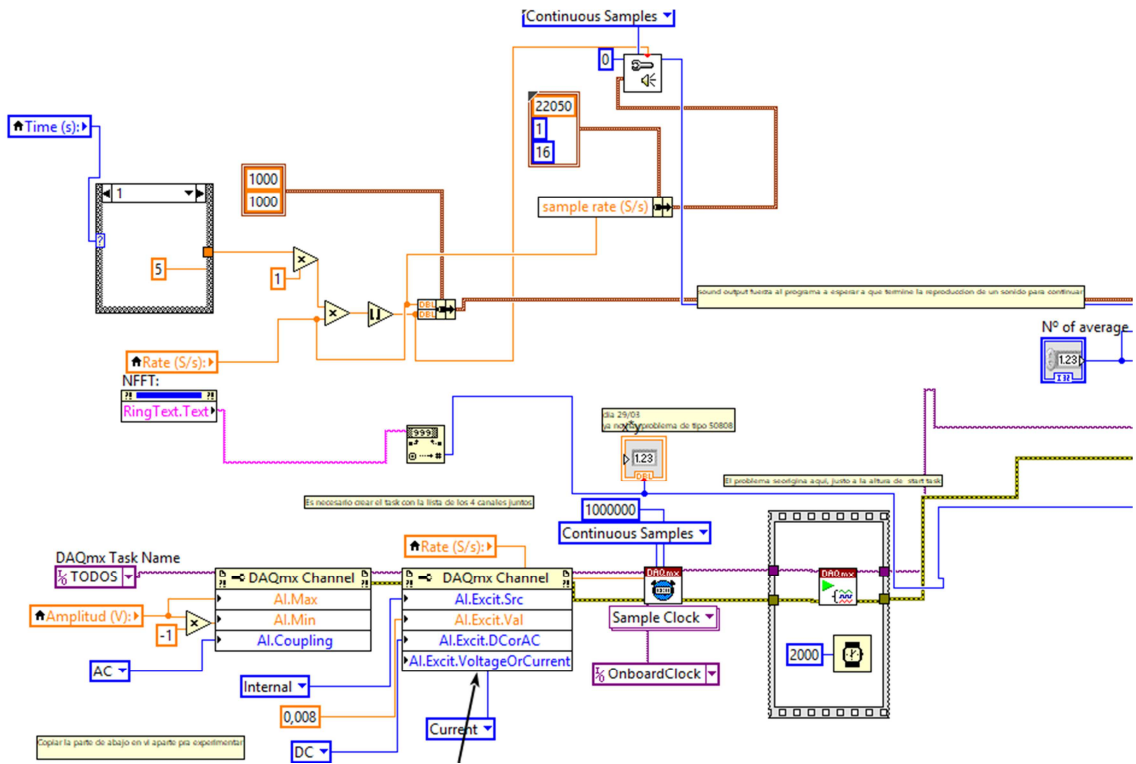


Figura 5.36 Código de activación IEPE y configuración de la emisión.

Tras realizar esta preparación y dejar lista la sincronización de la emisión de sonido y la captura mediante la tarjeta de NI, se lleva a cabo la captura mediante el bucle for que se ha utilizado anteriormente en los otros programas, con la diferencia de que aquí hay 4 micrófonos.

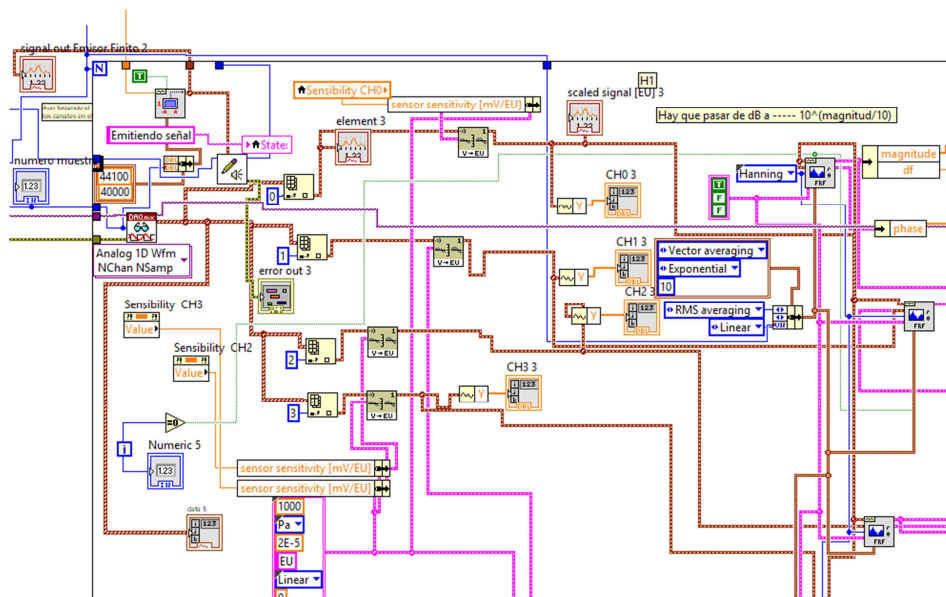


Figura 5.37 Código de adquisición y emisión de señal, además de tratamiento FFT.

Una vez han sido registrados los micrófonos, se guardan las señales tratadas en variables para su posterior uso en los cálculos.

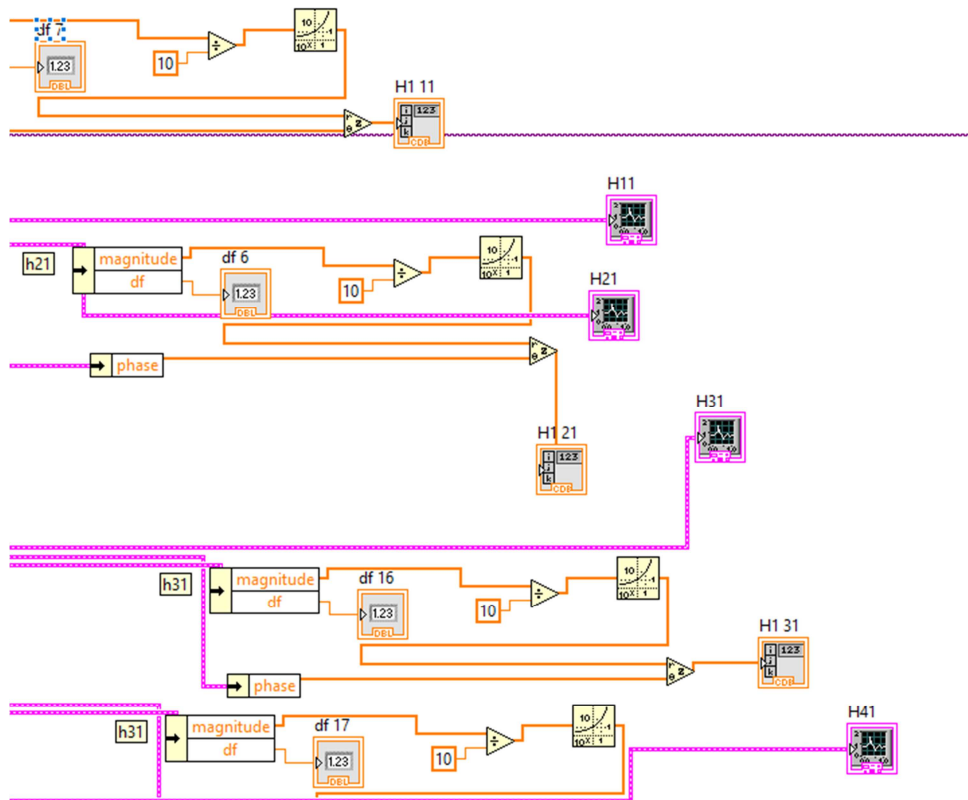


Figura 5.38 Código para guardar las FFT en variables.

Tras realizar la recogida y guardado de las señales, empieza el proceso de calcular las correcciones. Para ello, se para la tarea que se había iniciado en la grabación y emisión, y se muestra un mensaje como el que se puede ver en la figura 5.39.

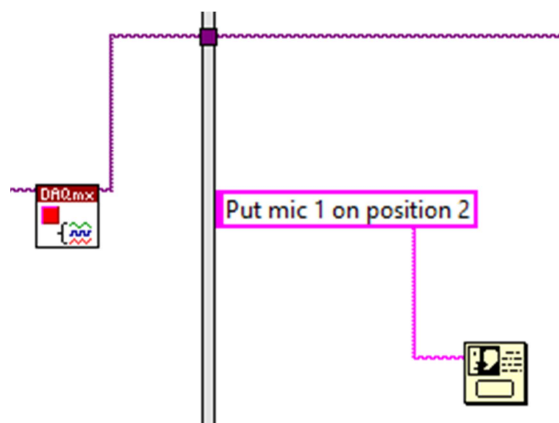


Figura 5.39 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

Una vez cambiada la posición del micrófono 1 y 2, se repite el mismo código que en figura 5.37 y se obtiene Hc21. Este proceso se repetirá dos veces más con los micrófonos 3 y 4.

De esta forma se obtiene las correcciones de posición y desfase entre los micrófonos.

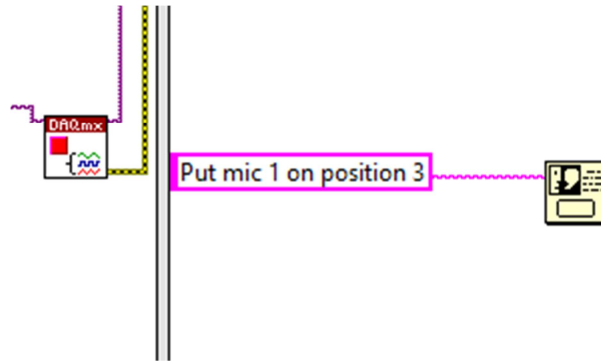


Figura 5.40 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

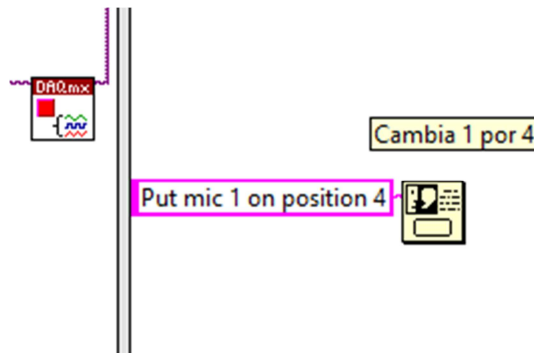


Figura 5.41 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

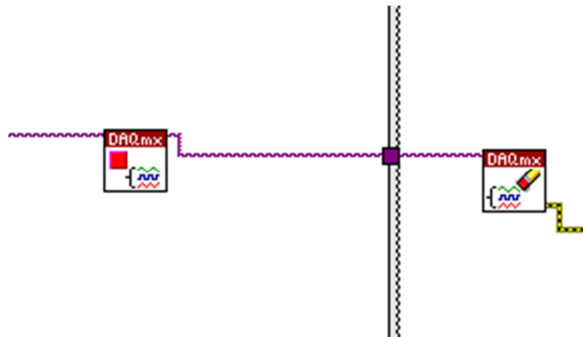


Figura 5.42 Código para detener la tarea iniciada y mostrar el mensaje.

Una vez han sido realizados todos los cambios necesarios para obtener las señales que interesan, se lleva a cabo el cálculo de las correcciones para cada posición, tal como se aprecia en la figura inferior

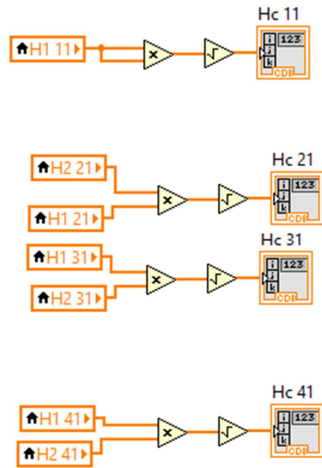


Figura 5.43 Código para calcular los factores de corrección.

Tras llevar a cabo esos simples cálculos, el programa mostrara otro cartel que reza “Normal” , haciendo referencia a que los micrófonos deben volver a su posición original, para que tras esto, obtener una medición y corregirlo con el factor recién adquirido.

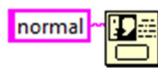


Figura 5.44 Código para mostrar un mensaje.

Así se repite por última vez el código correspondiente a la captación de los micros y la emisión de sonido

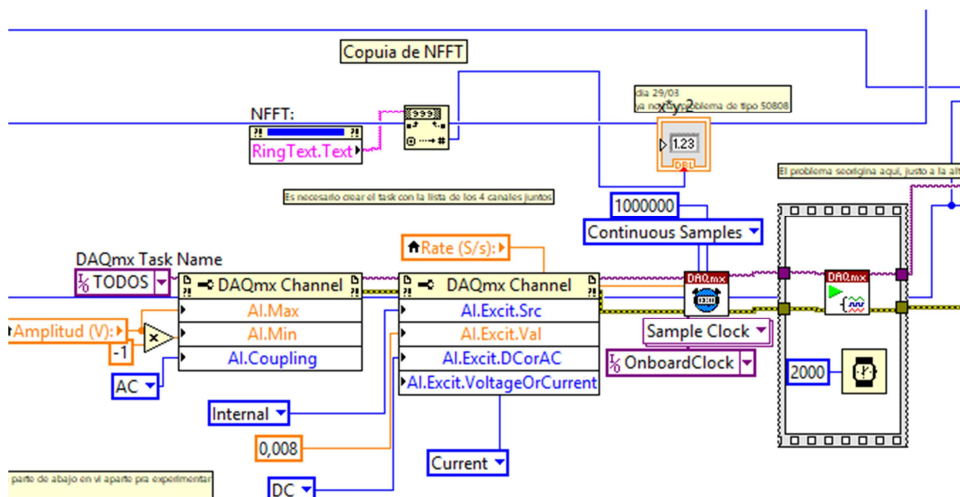


Figura 5.45 Código para activar IEPE e iniciar otra tarea de emisión/grabación.

La parte que calcula las pérdidas de transmisión esta explicada en el **Anexo 3** para facilitar la lectura del trabajo.

6 Conclusiones

El presente trabajo, que constituye mi Proyecto Final de Master, puede ser considerado una ampliación de mi trabajo final de grado, donde desarrollé un programa mediante *LabVIEW* para el cálculo de la pérdida por transmisión con tres micrófonos. Al igual que cuando se llevó a cabo el proyecto fin de grado, la realización de este trabajo ha implicado la consulta de diversas fuentes de información (citadas a lo largo del trabajo y en la sección de referencias) y la asimilación de conceptos que, aunque cercanos al que es, en principio, mi campo profesional, no eran del todo familiares. Ha sido necesario un periodo de asimilación de conceptos y métodos que, ahora, soy consciente de que nunca concluye ya que en cada nuevo proyecto se repetirá el proceso.

Los objetivos señalados en el primer apartado de este trabajo se han llevado a cabo con éxito. Los programas funcionan y pueden de utilidad para futuros usuarios. Como cualquier software, es susceptible de mejora, pero esa mejora de las prestaciones debe venir dado por el uso. Serán las personas que utilicen el programa, las que realicen medidas las que propondrán mejoras y, dado que la plataforma y el software lo permite, será posible. Este proyecto podría ser ampliable, y es algo que se tratará en el último tema de este trabajo.

En este proyecto se reúnen de forma esencial varias formas de caracterización inspiradas en las diversas normas (o publicaciones de referencia) que corresponden, cuatro programas útiles en la caracterización acústica de materiales utilizando una tarjeta NI-DAQ. Se ha comprobado que el software funciona correctamente.

Por lo tanto, aunque es una herramienta útil para un usuario introducido en la materia, aun es una semilla de una herramienta en desarrollo para un usuario menos conocedor del tema, por lo que su introducción en un ámbito práctico no será fácil.

Por último, es interesante valorar que ser conocedor de algún lenguaje de programación es útil en el desarrollo de herramientas que en principio uno no tiene acceso.

7 Líneas futuras

El presente trabajo es un software de apoyo para la realización de medidas acústica, que necesita una serie de mejoras para facilitar la accesibilidad al usuario no familiarizado. Se proponen las siguientes:

- Sustituir los cálculos realizados mediante lenguaje de programación gráfico, a lenguaje escrito en un *Math Node*.
- En el programa de martillo, incluir una herramienta auxiliar para el cálculo directo del coeficiente de amortiguamiento.
- En el programa de pérdidas por transmisión, incluir el software implementado en mi PFG ,correspondiente al grado de Ingeniería mecánica, (*Caracterización de pérdidas por transmisión mediante 3 micrófonos*)
- En el programa de resistencia al flujo, introducir una herramienta auxiliar para el cálculo del coeficiente de resistencia al flujo de forma más directa.
- En todos los programas, falta una redacción de un informe de acuerdo a la norma correspondiente en cada uno.
- Mejora estética del conjunto
- Un menú de selección de tarjeta de adquisición de datos en el panel principal, así como un bloque de auto configuración de las tarjetas.

Bibliografía

- [1] *Fundamentos de acústica* L.E.Kinsler, A.R.Frey, A.B Coppins, J.V.Sanders, Ed. Limusa, 1990.
- [2] UNE-EN ISO 10534-1:2002 Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: *Método de la función de transferencia*. (ISO 10534-1:1996).
- [3] *Measurement of acoustic flow resistance* U.K.Ingard, T.A.Dear, J. Sound and Vibration 103, 1985.
- [4] ASTM E2611 – 09 Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method
- [5] ASTM E1876 – 09 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration
- [6] <http://www.ni.com/es-es.html>
- [7] <http://www.ni.com/es-es/community.html>
- [8] <http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/esa/>
- [9] <http://forums.ni.com/t5/Discussion-Forums/ct-p/discussion-forums>