



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

MEDICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO DE
MATERIALES EN UN TUBO DE TRANSMISIÓN,
INCORPORANDO UNA TERMINACIÓN
ACTIVA ABSORBENTE

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

FELIPE ARTURO MACHUCA TZILI

TUTOR PRINCIPAL:

DR. FELIPE ORDUÑA BUSTAMANTE, CCADET

COMITÉ TUTOR:

DR. ANDRÉS ESTEBAN PÉREZ MATZUMOTO, CENAM

DR. SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ, CCADET



Ciudad Universitaria, CD. MX., junio 2017

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Augusto García Valenzuela
Secretario: Dr. Pablo Roberto Pérez Alcázar
Vocal: Dr. Felipe Orduña Bustamante
1^{er}. Suplente: Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz
2^{do}. Suplente: Dr. Andrés Esteban Pérez Matzumoto

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

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

TUTOR DE TESIS:
Dr. Felipe Orduña Bustamante

Felipe Orduña B.

FIRMA

ÍNDICE

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1. 1 ESTRUCTURA DE LA TESIS	10
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	13
2. 1 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL NSTL	13
2. 2 CONTROL ACTIVO DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA.....	14
2. 3 PROPUESTA DE UNA TERMINACIÓN ABSORBENTE ACTIVA.....	16
2. 4 PROPUESTA DE UN TUBO DE CALIBRACIÓN.....	17
CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO	19
3. 1 COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN	19
3. 2 CONTROL ACTIVO.....	21
3. 3 MODELADO MATEMÁTICO DE UN CAMBIO EN LA IMPEDANCIA DE UN TUBO POR ESTRECHAMIENTO DE SU SECCIÓN TRANSVERSAL. 26	
3. 4 SIMULACIÓN DEL CAMPO ACÚSTICO EN UN TUBO CON UN ESTRECHAMIENTO DISCONTINUO DE SU SECCIÓN TRANSVERSAL.....	32
3. 5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.	34
CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	39
4. 1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUBO DE TRANSMISIÓN.....	39
4. 2 ARREGLO EXPERIMENTAL.....	41
4. 3 IGUALACIÓN DE FASES.....	43
4. 4 CONSTRUCCIÓN DEL TUBO DE CALIBRACIÓN.....	45
4. 5 DESEMPEÑO DEL CONTROL ACTIVO.....	46
4. 6 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	51
4. 7 MEDICIÓN DEL PARÁMETRO DE AISLAMIENTO MÁXIMO DEL TUBO DE TRANSMISIÓN, R_{MAX}	52
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	59
5. 1 MEDICIONES DE NSTL COMPARANDO LOS MÉTODOS PASIVO-ACTIVO Y PURAMENTE PASIVO	59
5. 2 MEDICIÓN DE LAS VARIACIONES RELACIONADAS CON EL INTERCAMBIO ACTIVO O PASIVO DE LAS TERMINACIONES.....	64
5. 3 NSTL DEL TUBO DE CALIBRACIÓN	65
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS EN ORDEN ALFABÉTICO	71
APÉNDICE. PUBLICACIONES RELACIONADAS	75

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presentan los resultados del diseño de un tubo de transmisión para la medición de pérdida de transmisión sonora en incidencia normal, modificado con la adición de una terminación absorbente activa. El método convencional para medir la pérdida de transmisión en tubo de transmisión (nSTL), que está descrito en la norma ASTM E2611-09 "*Standard test method based on the transfer matrix method*", requiere de dos terminaciones absorbentes distintas al final de la segunda sección del tubo, lo que implica interrumpir el proceso de medición para poder cambiar físicamente esta terminación. La manipulación física del tubo es una posible fuente de error, debido principalmente a que puede ocasionar cambios no deseados en la posición de la muestra a medir, o en el re-ensamblado del tubo. El tubo de transmisión propuesto tiene la capacidad de proporcionar absorción sonora controlada en la terminación del tubo sin la necesidad de manipular físicamente el aparato durante las pruebas. Esto elimina el riesgo de errores asociados a la manipulación del aparato y simplifica la implementación del método de dos cargas. Se llevaron a cabo mediciones de pérdida de transmisión en condiciones y materiales representativos que muestran mejoras sobre las implementaciones actuales del método de la norma, reduciendo casi en un 50% las variaciones asociadas al cambio de las terminaciones absorbentes.

Se propone también una muestra para calibración que consiste en un estrechamiento de la sección transversal del tubo de transmisión. Comparando la medición del nSTL de este estrechamiento con su modelo analítico obtenido, es posible utilizar esta muestra geométrica como referencia de calibración para la medición de materiales.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Un problema importante en el área de acústica es el control del ruido por medio de materiales acústicamente aislantes. Con frecuencia se requiere que el ruido que se transmite al interior de un recinto o a través de una barrera, sea de un nivel bajo o controlado. Son diversas las situaciones en las que el abatimiento de los niveles de ruido transmitido es deseable o necesario: vivienda, estudios de grabación, salones de clase, hospitales, industria, interior de vehículos motorizados, e incluso en instalaciones destinadas a mediciones acústicas especializadas. El diseño acústico de recintos o de soluciones para control de ruido requiere, entre otras cosas, materiales cuyas características de aislamiento sean conocidas mediante medición directa.

Los parámetros más utilizados para cuantificar el aislamiento acústico de distintos materiales son el coeficiente de transmisión sonora (τ) y el índice de pérdida de transmisión sonora (STL)ⁱ. Existen dos métodos normalizados para llevar a cabo la medición de dichos parámetros: la evaluación en una cámara de transmisión [ISO 10140-2:2010; ASTM E90-09] y el método con tubo de impedancias modificado, o tubo de transmisión [ASTM E2611-09]. El método en cámara de transmisión requiere dos espacios cerrados separados por la muestra de prueba, que comparten como muro en común. En uno de los cuartos se coloca una fuente de sonido, generalmente una fuente omnidireccional (con características de desempeño según la norma ISO 10140-5:2010 [ISO 10140-5:2010]), y un micrófono para cuantificar la energía del campo acústico generado; en el otro cuarto se coloca también un micrófono que mide la energía transmitida a través de la muestra. La dirección de incidencia del campo acústico sobre la muestra de prueba es idealmente aleatoria. El tamaño de la muestra es de aproximadamente 10 m² y los tiempos de reverberación en cada cuarto deben ajustarse para cada banda de octava. El método con tubo de transmisión tiene la ventaja de requerir sólo muestras pequeñas del material a caracterizar, lo que permite efectuar mediciones más rápidas y menos costosas, y la posibilidad de repetir las fácilmente cada vez que se haga un cambio en la muestra, por ejemplo, al diseñar un material. En términos generales, resulta una opción más práctica que el método con cámara de transmisión, sin embargo, la interpretación de sus resultados es limitada a aplicaciones en las que el campo sonoro tiene una incidencia aproximadamente normal a los materiales. Ésta es la diferencia más importante entre el método con cámara y el método con tubo; para el primero, los ángulos de incidencia de las ondas sonoras sobre la muestra a caracterizar son aleatorias, mientras que en tubo de transmisión, la incidencia es normal. Algunos ejemplos en los que la incidencia de ondas sonoras es aproximadamente normal son las cabinas de control de aviones y automóviles con volúmenes acústicamente pequeños; en estos casos, la incidencia normal no representa una limitante. La principal desventaja de realizar mediciones con tubo de transmisión es que, si se desea cubrir todo el espectro de frecuencias audibles, es necesario contar con la posibilidad de implementar distintas configuraciones con diferentes separaciones entre micrófonos y, posiblemente, aparatos de distinto diámetro interno.

Las técnicas actuales para medir el índice de pérdida de transmisión en incidencia normal, o nSTL, con un tubo de transmisión, requieren la implementación de dos terminaciones o cargas absorbentes distintas al final de la segunda sección del tubo, también llamada *downstream* (la primera sección, suele llamarse *upstream*). El documento que recopila los procedimientos y características de estas mediciones es la norma ASTM E2611-09 *Measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method*.

ⁱ Del inglés *Sound Transmission Loss*.

El proceso de manipular físicamente las dos terminaciones absorbentes requeridas es una fuente de posibles errores de medición, debidos principalmente a cambios involuntarios en la posición de la muestra de prueba, ya sea entre mediciones, o en el re-ensamble de las piezas que componen el tubo.

Para intercambiar de forma no invasiva la carga acústica de la segunda sección del aparato, en este trabajo se propone aprovechar las ventajas que ofrecen las técnicas de control activo de sonido, modificando el tubo de transmisión típico para dicho fin. Por medio de una terminación combinada pasiva-activa, es posible proporcionar una absorción de sonido controlada y variable que simplifica la implementación de las técnicas de medición de dos cargas sin necesidad de manipular físicamente el aparato durante las pruebas, lo que elimina virtualmente el riesgo de tener errores asociados al manejo de terminaciones pasivas típicas.

Ni en la norma ASTM ni en la literatura consultada se establece un método apropiado para la calibración del sistema, por lo que la correcta calibración es un problema pendiente por resolver. En respuesta a dicha necesidad, en este trabajo también se propone y caracteriza una alternativa de referencia, o muestra patrón, para calibración que resulta más representativa del nivel de aislamiento típicamente medido en materiales de prueba.

Se llevaron a cabo mediciones con diferentes condiciones y muestras de prueba representativas, cuyos resultados coinciden satisfactoriamente con aquellos obtenidos mediante métodos puramente pasivos descritos en la norma ASTM.

Los resultados de las mediciones coinciden dentro de un margen de 0.4 a 1.5 dB (diferencia máxima en banda ancha de alta resolución) y 0.04 a 0.08 dB (diferencia promedio en bandas de tercios de octava), con aquellos obtenidos usando métodos pasivos estándar.

Durante la realización de este trabajo fue posible presentar parte de los resultados obtenidos en el *22nd International Congress on Acoustics, ICA2016*, celebrado en Buenos Aires, Argentina [Machuca-Tzili et al, 2016]. Otra parte del trabajo se publicó en *The Journal of the Acoustical Society of America* [Machuca-Tzili et al, 2017]. Ambas publicaciones se incluyen en los apéndices al final de esta tesis.

1. 1 Estructura de la tesis

La estructura de la presente tesis comprende 6 capítulos principales y un apéndice. En el primer capítulo se esboza la problemática que aborda el trabajo de investigación, así como la propuesta y metodología seguida para alcanzar los objetivos. En el capítulo 2 se hace una reseña de los trabajos previos en las áreas de medición de pérdida de transmisión en incidencia normal y los métodos de control activo orientados a la absorción acústica. A partir de este marco de referencia, se enuncian dos propuestas de trabajo cuyo objetivo es mejorar la técnica metrológica actual del tubo de transmisión. En el capítulo 3 se lleva a cabo el desarrollo de la teoría para los siguientes objetivos:

- El cálculo del coeficiente de transmisión por el método de dos cargas, de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM E2611-09.
- Desarrollo de un control para la absorción activa de sonido en la terminación del tubo de transmisión.

-
- Modelado matemático, en régimen de ondas planas, de un cambio de impedancia por discontinuidad de la sección transversal (estrechamiento para calibración). Como complemento del modelo matemático unidimensional, se incluye una simulación tridimensional del estrechamiento por el método de elemento finito.

En el capítulo 4 se detalla el diseño y construcción del tubo de transmisión, una cavidad para la igualación de fases entre micrófonos y el estrechamiento para calibración. También se describe el procedimiento de medición y el arreglo experimental, incluyendo el reporte de desempeño del control activo de absorción y la caracterización del parámetro de máximo aislamiento medible por el aparato, R_{max} . El capítulo 5 muestra los principales resultados alcanzados en esta investigación, enlistados a continuación,

- Comparación de las mediciones de nSTL, por el método pasivo-activo vs. el método puramente pasivo, para distintas condiciones y materiales de prueba:
 - Sin muestra de prueba,
 - Muestra de fibra de poliéster-polipropileno,
 - Muestra de espuma de melamina.
- Cuantificación de la variabilidad de los resultados obtenidos por métodos pasivo-activo y puramente pasivo.
- Medición del nSTL para el tubo estrecho para calibración.

El capítulo 6 resume las contribuciones más relevantes y novedosas de este trabajo de investigación:

- Implementación exitosa de una terminación absorbente activa que facilita y mejora la aplicación del método de dos cargas normalizado.
- Propuesta de una referencia de calibración (muestra patrón) con modelo analítico para la calibración de las mediciones en el tubo de transmisión.

Asimismo, se discuten las posibilidades de mejora a los resultados obtenidos, proponiendo líneas de trabajo de investigación para el futuro. Finalmente, el apéndice incluye una copia de las publicaciones elaboradas a partir de los resultados de este trabajo.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2. 1 Técnicas de medición del nSTL

La medición de nSTL usando las técnicas para tubo en régimen de ondas planas es una manera eficiente y relativamente económica de estimar las características de transmisión acústica de materiales. En la literatura se reportan esencialmente dos formulaciones para medir el nSTL: el método de descomposición de onda y el método de matriz de transferencia.

El método de descomposición de onda consiste en considerar dentro de la formulación, de manera explícita, las múltiples ocasiones en que el sonido se refleja y transmite dentro del tubo, tanto en la muestra, como en los extremos del tubo. Esta aproximación fue relegada por mucho tiempo debido a que la manera de considerar las reflexiones y transmisiones, así como la elección del número de ellas a incluir, era tratada de manera inconsistente por diferentes autores [Ho, 2005; Bonfiglio, 2008; Dong-Li, 2008]. El modelado incrementa su complejidad conforme se añaden más términos de reflexión y transmisión, lo cual resultaba en formulaciones largas y/o incompletas, pues al final, no consideraban todas las reflexiones de las ondas viajeras dentro del tubo, o bien, el análisis se apoyaba en idealizaciones y simplificaciones de índole físico. En 2009, Salissou y Paneton [Salissou, 2009], basándose en el análisis del campo acústico de ondas reflejadas y transmitidas realizado por Ho [Ho, 2005], lograron reducir el análisis a expresiones de convergencia de las series de términos que representan el conjunto infinito de reflexiones del sonido, alcanzando resultados confiables.

Una de las razones por las que el método de descomposición de onda no fue estudiado a detalle sino hasta tiempos relativamente recientes, es que desde el principio de la década de los 80 se propuso utilizar el método de matriz de transferencia y dos micrófonos para la caracterización acústica de materiales [Chung, 1980; Lung, 1983].

El método de matriz de transferencia modela las propiedades acústicas de un sistema como elementos concentrados de una red de dos puertos. En el caso de un tubo de transmisión, las variables de entrada y salida son la presión acústica y la velocidad de partícula, mientras que la matriz de 2×2 que relaciona a dichas variables, corresponde a las características acústicas de la muestra de prueba. La teoría de matriz de transferencia es ampliamente usada en circuitos eléctricos, sistemas ópticos y otras disciplinas. Al tratarse de una formulación bastante conocida y aplicada en varios ámbitos de la ingeniería, por ejemplo, en el análisis de puertos en circuitos eléctricos, la tendencia de los siguientes años en el estudio y perfeccionamiento del tubo de impedancias giró en torno al método de matriz de transferenciaⁱⁱ [Lung, 1983; Munjal, 1990; Song, 2000; Tao, 2003; Barnard, 2004; Li, 2005; Wang, 2008; Lee, 2009]. En el año 2000, Song y Bolton [Song, 2000] publicaron un trabajo donde revisan exhaustivamente las principales características de los trabajos de sus predecesores y, basados en estos trabajos anteriores, proponen un método que incluye la utilización de dos cargas acústicas (método de dos cargas) en la terminación de la segunda sección del tubo de transmisión, debido a la necesidad de contar con suficientes ecuaciones para resolver las cuatro incógnitas de la matriz de transferencia. La actual norma [ASTM E2611-09] para el tubo de transmisión se basa principalmente en el artículo de Song y Bolton.

ⁱⁱ En mi opinión, el método de matriz de transferencia es más conciso e intuitivo que el método de descomposición de onda. Es posible que esto haya constituido un argumento a su favor dentro de la comunidad acústica.

Tanto en el trabajo de Song y Bolton, como en la norma ASTM, la forma de implementar las dos terminaciones absorbentes se deja abierta a cualquier método, siendo la única condición el que sean suficientemente distintas una de otra.

En la Figura 1 se muestra un diagrama del tubo de transmisión en su configuración típica. Durante el proceso de medición, la terminación absorbente pasiva se cambia por otra, también pasiva, pero con distinta absorción, para poder generar la cantidad suficiente de ecuaciones que permitan resolver el sistema que representa la matriz de transferencia de dimensión 2×2 , es decir, con 4 incógnitas.

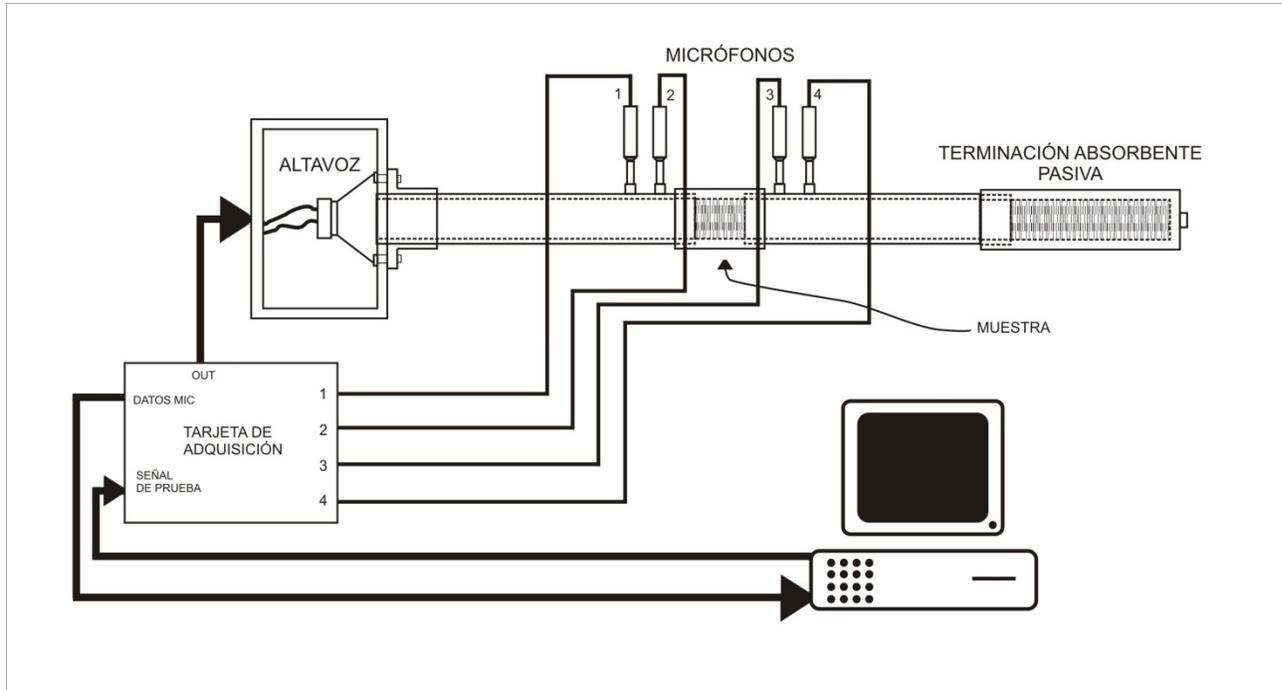


Figura 1. Tubo de transmisión en configuración típica, de acuerdo a la norma ASTM E2611-09. Las terminaciones absorbentes usadas son pasivas.

2. 2 Control activo de la absorción acústica

En sistemas unidimensionales, como los tubos de ondas planas, se sabe que es posible implementar exitosamente un sistema de control activo de la impedancia acústica en uno de sus extremos [Guicking, 1985; Orduña-Bustamante, 1992; Smith, 1999; Finneran, 1999]. El control activo de sonido es una técnica de procesamiento de señales que, en general, tiene como objetivo modificar campos acústicos mediante la reproducción de ondas sonoras que interactúan con el campo original. Entre muchas otras aplicaciones, puede emplearse para aproximar condiciones específicas de impedancia (absorción) sobre las fronteras de un espacio confinado, especialmente en bajas frecuencias.

En el ámbito del control activo de sonido, las fuentes sonoras de control son llamadas también fuentes “secundarias”, y cuyas ondas emitidas están arregladas para interferir de forma controlada con el sonido producido por la fuente original, o fuente “primaria”.

Con ayuda del control activo de sonido en ductos es factible tener control eficaz sobre la impedancia o coeficiente de absorción que encuentran las ondas que viajan en su interior, en particular cuando el régimen es de ondas planas. Por ejemplo, con la colocación de una fuente secundaria en una de las paredes de un ducto, a una cierta distancia de la fuente primaria, se puede controlar el coeficiente de reflexión que la onda incidente "encuentra" en la ubicación la dicha fuente secundaria, es decir que, con el ajuste apropiado de la fuente secundaria, se puede reflejar completamente la onda incidente e impedir que ésta se propague más allá de la posición de la fuente secundaria.

Otro caso bien estudiado de control de sonido en ductos [Elliot, 2001] es aquél en el que, con un arreglo de dos fuentes secundarias, es posible absorber por completo la energía incidente, en lugar de reflejarla de vuelta en dirección a la fuente primaria. También existen diversos estudios [Guicking, 1985; Elliot, 1991; Orduña-Bustamante, 1992; Furstoss, 1997; Samejima, 2003; Fleming, 2007; Lissek, 2011] que comprueban que es posible controlar la impedancia efectiva del cono o diafragma de un transductor electroacústico mediante técnicas de control activo. De acuerdo a lo anterior, es entonces factible utilizar altavoces como elementos de absorción acústica activa.

Históricamente, el control activo de sonido en ductos ha tenido una evolución que inició desde mediados de la década de los años 30 del siglo pasado, y ha caminado de la mano con los avances tecnológicos en temas de procesamiento de datos y señales. El primer trabajo que considera el control activo de sonido (de hecho, en un tubo de ondas planas) es la patente de Lueg de 1936 [Lueg, 1936], en la que propone la réplica del disturbio en contrafase con respecto al sonido original para lograr la cancelación del sonido en una región finita dentro del tubo. Posteriormente, Olson y May [Olson, 1953] introducen a un sistema semejante un micrófono de error que retroalimenta al altavoz de control a través de un controlador electrónico y utilizan el altavoz como un elemento de absorción acústica. En 1984, Guicking y Karcher [Guicking, 1985] implementan el control del coeficiente de reflexión al interior de un tubo para frecuencias discretas inferiores a 1000 Hz, por medios electroacústicos. En el artículo de Orduña y Nelson [Orduña-Bustamante, 1992], ya haciendo uso de técnicas computacionales, se reporta un algoritmo LMS de entrada filtrada con el que se logra la absorción de ondas planas dentro de un tubo en el intervalo de 30 a 400 Hz; en 1999, Smith et al [Smith et al, 1999], realizan una combinación de absorción pasiva y activa para lograr el mismo objetivo, también mediante algoritmos adaptivos LMS.

Puesto que el tubo de transmisión trabaja en el régimen de ondas planas, el diseño de una terminación absorbente por métodos de control activo [Orduña-Bustamante, 1992] se dibuja como una alternativa viable para conseguir en la segunda rama del tubo de transmisión una terminación con características modificables de manera no invasiva.

Como se verá a lo largo de este trabajo, la combinación de estas dos tecnologías existentes (medición de nSTL en tubo y control activo), permite una implementación más conveniente y metrológicamente exacta y precisa de éste método para medir el aislamiento acústico de materiales.

2. 3 Propuesta de una terminación absorbente activa

Como alternativa al cambio manual de la terminación pasiva absorbente del tubo de transmisión, se propone implementar la automatización que permite el control activo de sonido. En esencia, la característica acústica que se desea modificar en la terminación del tubo es la absorción, es decir, la cantidad de sonido reflejado en ese punto específico. Haciendo uso de técnicas de control, es posible diseñar un filtrado de señal que minimice la reflexión de sonido en una frontera, que en este caso es la terminación de la segunda sección del tubo de transmisión, donde se coloca el driver o altavoz de control, o fuente secundaria. Cualitativamente hablando, el objetivo de esta absorción activa de sonido es convertir al altavoz en un sumidero de energía acústica, contrariamente a la función que típicamente desempeña.

Como ya se mencionó, un tubo de transmisión es un sistema unidimensional, ya que funciona en un régimen de ondas planas, lo cual simplifica y facilita tanto el diseño como el desempeño de un sistema de control, pues hay menos variables y/o fuentes secundarias involucradas. Para el caso del tubo de transmisión, se conoce la fuente primaria de antemano y cuenta con micrófonos para medir presión acústica dentro del aparato y, a partir de ella, posibilita la síntesis de una señal de error.

En la Figura 2 se muestra un esquema simplificado que muestra el funcionamiento de la terminación absorbente activa. Un elemento pasivo de absorción es asistido por un segundo driver que hace la función de elemento absorbente activo. Este driver es alimentado con la señal de control obtenida a partir de un filtrado de la señal de excitación que toma en consideración el error calculado a partir de las presiones registradas por los micrófonos de la rama *downstream* del tubo de transmisión.

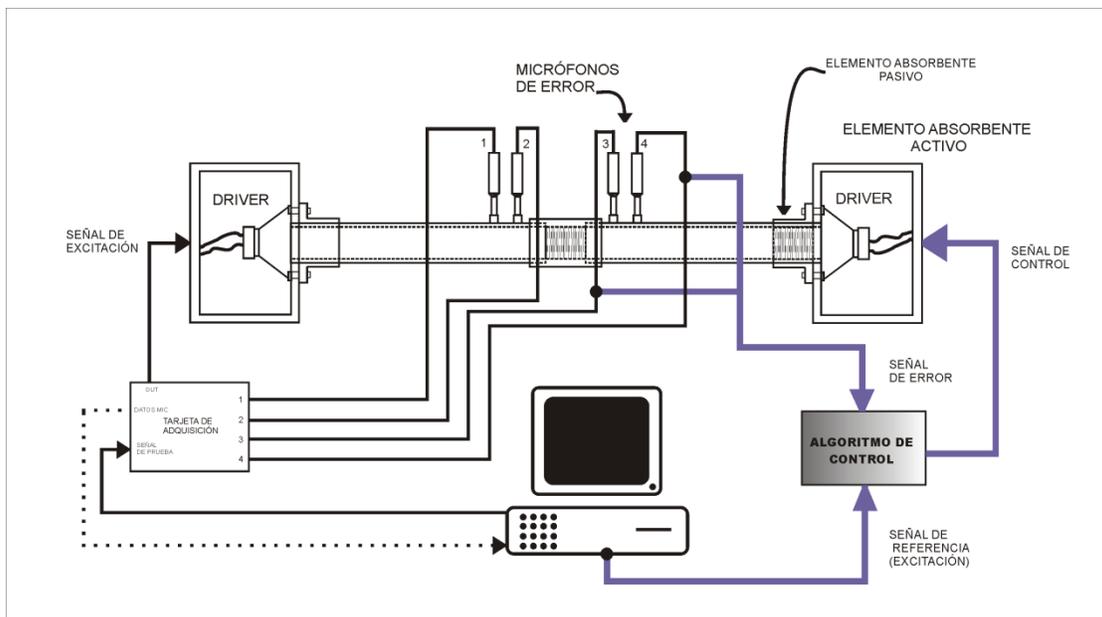


Figura 2. Implementación sobre el tubo de transmisión de los elementos de control activo para la terminación absorbente activa.

En su mayoría, los trabajos de control activo están orientados a cancelar el ruido, por ejemplo, en ductos, donde suele ser deseable que los sonidos que se propagan en ellos sean de un nivel mínimo. Es importante enfatizar que la finalidad de la terminación absorbente activa no es

reducir el nivel de presión acústica dentro del tubo de transmisión, sino evitar la reflexión de ondas en la terminación de la segunda sección.

Partiendo de lo expuesto hasta el momento, una opción aparentemente viable para el mejoramiento de la técnica de medición de nSTL con tubo de transmisión consiste, no únicamente en automatizar el cambio en la impedancia de la terminación del tubo, sino incluso, alcanzar una absorción activa total, lo cual haría posible simplificar el método de dos cargas estándar a una sola carga anecoica. Esto último, como se verá en el capítulo 4, no fue posible alcanzar de momento, pero se considera factible.

En el trabajo que se presenta, fue posible combinar métodos pasivos y activos de control de absorción acústica que permitieron el cambio de impedancia necesario para realizar mediciones de nSTL en un amplio rango de frecuencias; de 178 a 5680 Hz, cubriendo de 200 a 5000 Hz en bandas de tercios de octava, mejorando la repetibilidad de las mediciones a través de la ausencia de manipulaciones mecánicas del dispositivo durante la medición.

2. 4 Propuesta de un tubo de calibración

Aunque hay muchos trabajos sobre mediciones de nSTL en tubo de transmisión, casi ningún autor ha reportado detalles sobre el método de calibración que utilizó para las mediciones. Una excepción es Doutres, et al. [Doutres et al, 2012]. La calibración que utiliza es la referida al caso sin muestra, es decir, utiliza una referencia de “muestra” patrón que consiste en sólo aire, que implica un nSTL de 0 dB. Esto resulta poco representativo de cualquier caso de interés y la necesidad de contar con una muestra patrón es evidente. La norma ASTM E2611-09 incluye un procedimiento para caracterizar algún material que se elija como referencia de calibración y especifica algunas características generales que debe tener dicho material, como la estabilidad de sus características físicas con respecto al paso del tiempo, pero aun sin especificar el cómo ha de ser utilizada en el proceso de medición. El método de caracterización de la muestra patrón es tedioso (se deben promediar varios grupos de 50 mediciones cada uno [ASTM Manual Series: MNL 7]) y, aun cumpliendo con ello, la necesidad de contar con un modelo analítico del patrón no se satisface.

En este trabajo de investigación también se diseñó una muestra analíticamente bien caracterizada que consiste en un estrechamiento de la sección transversal del tubo de transmisión. Si bien, el comportamiento del nSTL con respecto a la frecuencia para un cambio de impedancia de este tipo no tiene una tendencia suave, similar a la de la mayoría de los materiales, los valores entre los cuales tiene sus variaciones pueden considerarse mucho más representativos de las muestras típicas que una referencia de 0 dB, además de contar con un modelo teórico suficientemente definido. En los capítulos 3 y 5 se presenta el modelado teórico y mediciones de una “muestra geométrica” o estrechamiento que puede utilizarse como referencia de calibración del tubo de transmisión.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO

3. 1 Coeficiente de transmisión

La representación de un sistema acústico como matriz de transferencia relaciona la presión y la velocidad de partícula a ambos lados de la muestra (p_0, u_0 y p_d, u_d , respectivamente). La matriz de coeficientes de dicho sistema contiene la información acústica de la muestra de manera intrínseca. En este tipo de formulación hay 4 incógnitas (matriz 2×2) y solamente 2 ecuaciones. Una manera de resolver este inconveniente, es cambiando la condición de absorción al final de la segunda sección y volviendo a medir. De ésta manera se obtienen dos ecuaciones adicionales, diferentes, pero vinculadas a las primeras porque la muestra de prueba sigue siendo la misma. Las expresiones 1 y 2 representan los dos sistemas de ecuaciones descritos. El ancho de la muestra de prueba es d y los subíndices a y b indican las dos terminaciones diferentes del tubo.

$$\begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=d} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=d} \quad \text{Ec. 2}$$

Los coeficientes de la matriz de transferencia que, como puede observarse en las ecuaciones anteriores, es la misma en ambos sistemas, pueden expresarse en términos de las presiones y velocidades a ambos lados de la muestra de prueba, como se muestra en las ecuaciones 3a-3d.

$$T_{11} = \frac{p_{0a}u_{db} - p_{0b}u_{da}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \quad \text{Ec. 3a}$$

$$T_{12} = \frac{p_{0b}p_{da} - p_{0a}p_{db}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \quad \text{Ec. 3b}$$

$$T_{21} = \frac{u_{0a}u_{db} - u_{0b}u_{da}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \quad \text{Ec. 3c}$$

$$T_{22} = \frac{p_{da}u_{0b} - p_{db}u_{0a}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \quad \text{Ec. 3d}$$

La presión dentro del tubo se mide con cuatro micrófonos localizados en las posiciones x_1, x_2, x_3 y x_4 , referidas a x_0 de acuerdo a la Figura 3. Con excepción de la terminación activa, ésta es la configuración típica para mediciones de transmisión en tubo.

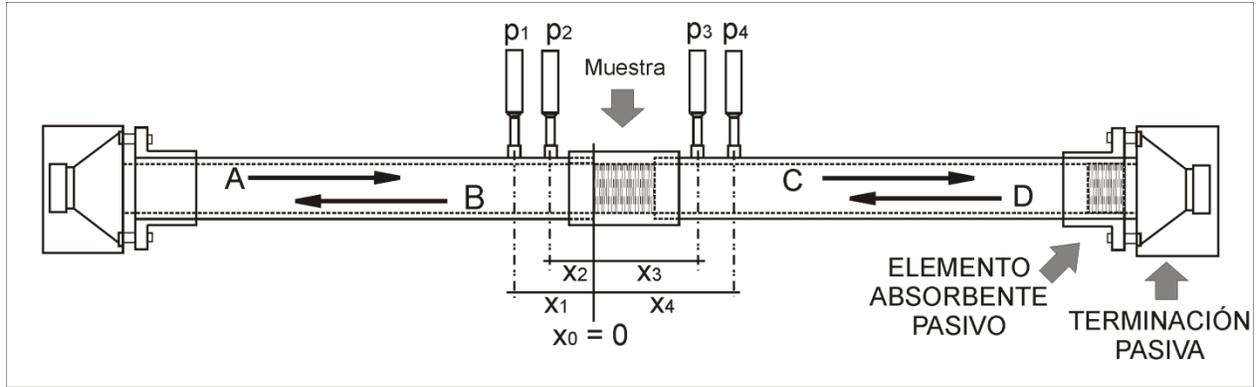


Figura 3. Ondas viajeras al interior del tubo de transmisión y posiciones de los micrófonos referidas al plano frontal de la muestra (primera sección del tubo).

Es así que, a partir de las mediciones con los micrófonos, es posible obtener los coeficientes de la matriz de transferencia, sin embargo, el cómo calcular el coeficiente de transmisión T a partir de estos datos, todavía no es explícito.

Por definición, el coeficiente de transmisión es el cociente entre la energía transmitida y la energía incidente ($T = C / A$). Esto implica que la obtención de una expresión para T debe partir del caso idealizado en que la terminación del tubo es anecoica. Para que, bajo estas condiciones, el cálculo de T sea en términos de los coeficientes de la matriz de transferencia (Ec. 3a-3d), es necesario establecer el siguiente sistema de ecuaciones adicional:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_d \\ u_d \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4}$$

donde las presiones y velocidades, en este caso anecoico, y en términos de las ondas viajeras en ambas direcciones del tubo (ver Figura 3) son:

$$p_0 = A + B; \quad u_0 = (A - B)/Z_0; \quad p_d = C e^{-jkd}; \quad u_d = (C e^{-jkd})/Z_0,$$

donde, Z_0 es la impedancia característica del medio de propagación. Ahora bien, se harán las siguientes consideraciones: se define R_a como el coeficiente de reflexión de la muestra para la condición anecoica, T el coeficiente de transmisión y, por simplicidad, la onda incidente $A = 1$, es decir:

$$B = R_a A = R_a,$$

$$C = T A = T.$$

Expresando el sistema de la Ec. 4 de forma algebraica, e incorporando las consideraciones anteriores se tiene:

$$1 + R_a = T_{11} \cdot T e^{-jkd} + T_{12} \cdot T e^{-jkd} / Z_0 \quad \text{Ec. 5}$$

$$1 - R_a = Z_0 T_{21} \cdot T e^{-jkd} + T_{22} \cdot T e^{-jkd} \quad \text{Ec. 6}$$

Y sumando las ecuaciones 5 y 6:

$$T = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}} \quad \text{Ec. 7}$$

Cabe mencionar que, al igual que Song y Bolton [Song, 2000], el estándar de ASTM también sugiere simplificaciones de esta formulación para muestras geoméricamente simétricas. Bajo esta suposición, se pueden establecer relaciones entre los coeficientes de la matriz de transferencia que simplifican el sistema a dos incógnitas, con lo que, según el artículo citado, es posible utilizar una sola carga acústica (impedancia) al final de la segunda sección. En éste trabajo no se consideraron tales suposiciones para evitar incrementar la cantidad de factores que potencialmente puedan contribuir al error en las mediciones, por lo cual, se utiliza la ecuación 7 para todos los cálculos del coeficiente T .

Por último, el coeficiente de pérdida de transmisión en incidencia normal (nSTL) queda definido de la siguiente manera:

$$nSTL = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

3. 2 Control activo

Dentro de la teoría de control, el carácter del esquema de filtrado elegido obedece a las circunstancias en que será aplicado, por ejemplo, en un filtrado adaptivo, se realizan verificaciones periódicas de la evolución temporal de las características del sistema en el que existe la variable que se desea controlar, a través de una señal de error. Los esquemas de control adaptivo son de lazo cerrado, es decir, se lleva a cabo una retroalimentación de la salida al algoritmo de control para verificar si la señal de error que desea minimizarse realmente está convergiendo a un valor suficientemente pequeño, y así saber si se debe continuar o corregir esa tendencia, ajustando (adaptando) su salida de manera acorde.

Por otra parte, en los esquemas de lazo abierto la salida no modifica el cálculo del filtro de control, por lo que un resultado satisfactorio depende de una correcta configuración y calibración inicial del sistema. Si cambian las condiciones en que se realizaron los ajustes iniciales, el sistema no es capaz de corregir su desempeño, por lo que, en esos casos, no se obtienen los resultados esperados. El control de lazo abierto tiende a ser más sencillo en su diseño e implementación y demanda menos recursos de tiempo, procesamiento, hardware, etc., pero sólo es exitoso en la resolución de problemas cuyas entradas y entorno no varían significativamente con el tiempo y se conocen con anticipación.

El esquema de control escogido para este trabajo es el de lazo abierto, ya que después de haber realizado suficientes experimentos con control adaptivo, se determinó que las características del sistema en cuestión permanecen suficientemente estables durante las mediciones como para prescindir de una técnica de control de convergencia progresiva. Evidentemente, esto simplifica el diseño al no requerir un control con retroalimentación, ni varias iteraciones antes de lograr la minimización del error.

Como se observa en la Figura 4, correspondiente a un sistema de control de lazo abierto, no existe una retroalimentación en el sistema de control que involucre a la señal de salida, sin embargo, es importante contar con un parámetro que refleje si la aplicación del control resultó exitosa. Dicho parámetro es la señal de error, cuya síntesis se puede argumentar con ayuda del esquema de la Figura 5.

La señal de error a minimizar debe contemplar la condición de que no existan reflexiones en la terminación del tubo. Con este fin, se consideran las presiones acústicas en los micrófonos 3 y 4 en términos de las ondas viajeras C y D , a la derecha y la izquierda, respectivamente,

$$P_3 = C e^{-jkx_3} + D e^{+jkx_3} \quad \text{Ec. 9}$$

$$P_4 = C e^{-jkx_4} + D e^{+jkx_4} \quad \text{Ec. 10}$$

La onda reflejada D , es el parámetro que se desea minimizar y, utilizando las ecuaciones anteriores, puede expresarse como:

$$D = \frac{[P_4 - P_3 e^{-jk(x_4-x_3)}] e^{-jkx_3}}{2j \operatorname{sen} k(x_4 - x_3)} \quad \text{Ec. 11}$$

A partir de esto, y asumiendo que $0 < k(x_4 - x_3) < \pi/2$, de forma que $\operatorname{sen} k(x_4 - x_3) > 0$, lo cual mantiene un cociente bien determinado, la señal de error se define como el término entre corchetes de la Ec. 11, el cual es proporcional a D . Manipulando la Ec. 11:

$$E(\omega) = 2j D e^{+jkx_3} \operatorname{sen} k(x_4 - x_3) \quad \text{Ec. 12a}$$

$$= P_4 - P_3 e^{-jk(x_4-x_3)} \quad \text{Ec. 12b}$$

Considerando que $k(x_4 - x_3) = \omega\tau$, donde $\tau = (x_4 - x_3)/c_0$ es el tiempo de retraso de propagación entre los micrófonos 3 y 4, la señal de error puede escribirse finalmente en los dominios de la frecuencia y del tiempo, respectivamente, como:

$$E(\omega) = P_3(\omega) - e^{-j\omega\tau} \cdot P_4(\omega) \quad \text{Ec. 13}$$

$$e(t) = p_3(t) - p_4(t - \tau) \quad \text{Ec. 14}$$

De esta manera, la señal de error a minimizar se obtiene como la resta de las presiones acústicas en los micrófonos 3 y 4. La señal de control resultante se alimenta al altavoz de control o fuente secundaria, en la segunda sección. La exactitud de la absorción activa depende fuertemente de la compensación de fase entre los micrófonos, así como de la relación señal-a-ruido (SNR, por sus siglas en inglés) en las posiciones de los micrófonos de la segunda sección.

Como cualquier sistema de control, el filtrado de lazo abierto, o filtrado óptimo requiere conocer las propiedades del sistema para calcular el filtro de control apropiadamente. En la Figura 4 se muestra un esquema simplificado del sistema descrito.

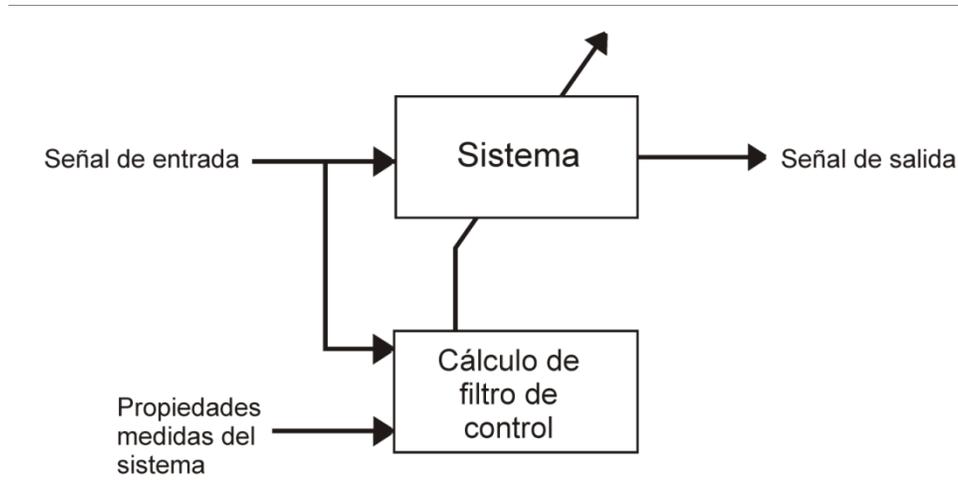


Figura 4. Sistema de control de lazo abierto. En este tipo de filtros no hay señal de retroalimentación, pero sí es necesario conocer el comportamiento del sistema (caracterización) para poder diseñar el filtro de control.

Para calcular el filtro de control, al que llamaremos $H(\omega)$, se requiere convertir la señal de error al dominio de la frecuencia, resultando:

$$E(\omega) = [G_1(\omega) + G_2(\omega)H(\omega)]X(\omega); \quad \text{Ec. 15}$$

donde $G_1(\omega)$ es la función de transferencia entre la fuente primaria y la señal de error (ver Figura 5), $G_2(\omega)$ es la función de transferencia entre la fuente secundaria y la señal de error, y $X(\omega)$ es la amplitud compleja de la señal de prueba a la frecuencia ω .

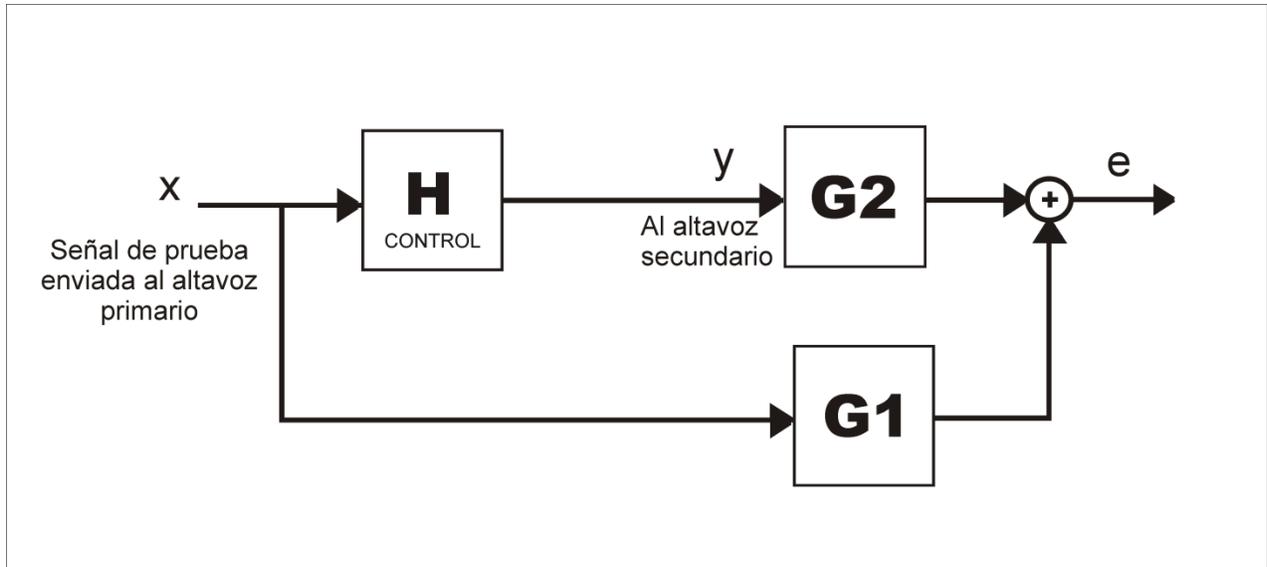


Figura 5. Señal de error a partir del filtrado de la señal de prueba. G1 y G2 son funciones de transferencia que contienen las características electroacústicas del sistema.

Para poder medir las funciones de transferencia $G_1(\omega)$ y $G_2(\omega)$, la señal de prueba se envía secuencialmente a los altavoces para hacer la identificación de cada sistema o ruta por separado. En términos de estas funciones de transferencia, el error cuadrático de la Ec. 15 sería:

$$|E(\omega)|^2 = [(G_1(\omega) + G_2(\omega)H(\omega)) (G_1(\omega) + G_2(\omega)H(\omega))^*] X^2(\omega) \quad \text{Ec. 16}$$

Desarrollando el producto entre corchetes,

$$|E(\omega)|^2 = [|G_1(\omega)|^2 + G_1^*(\omega)G_2(\omega)H(\omega) + H^*(\omega)G_2^*(\omega)G_1(\omega) + H^*(\omega)G_2^*(\omega)G_2(\omega)H(\omega)] X^2(\omega) \quad \text{Ec. 17}$$

derivando e igualando a cero la expresión anterior, la " $H(\omega)$ " que minimiza el error cuadrático es la función de transferencia inversa regularizada de $G_2(\omega)$ con respecto a $G_1(\omega)$ que, en su versión regularizada [Kirkeby, 1998] es:

$$H(\omega) = -\frac{G_1(\omega)G_2^*(\omega)}{|G_2(\omega)|^2 + r^2}, \quad \text{Ec. 18}$$

donde * indica el complejo conjugado y r^2 es el nivel de regularización. En los experimentos, el nivel de regularización se especificó en decibeles con respecto a $|G_2(\omega)|^2$ y a su media cuadrática. La regularización del filtro H es necesaria ya que, siendo el resultado de un cociente de funciones, es susceptible a tomar valores muy grandes, e incluso a indeterminarse, condiciones

que resultarían imposibles de reproducir con un altavoz, que es un sistema físico de respuesta no ideal.

Sustituyendo $H(\omega)$ en la Ec. 17, se obtiene el valor mínimo regularizado del error cuadrático $|E(\omega)|^2$,

$$|E_{\min}(\omega)|^2 = |G_1(\omega)|^2 X(\omega)^2 - \frac{(G_2^*(\omega)G_1(\omega))}{[G_2^*(\omega)G_2(\omega) + r^2]} X^2(\omega) \quad \text{Ec. 19}$$

donde $|G_1(\omega)|^2$ es el error típico, es decir, el error cuadrático que se tendría sin aplicar el filtrado óptimo:

$$|E_{\text{típico}}(\omega)|^2 = |G_1(\omega)|^2 \quad \text{Ec. 20}$$

En el proceso de medir el nSTL, el driver de excitación o fuente primaria en la primera sección del tubo provee una señal de prueba (barrido senoidal) que pasa a través de la muestra de prueba. Posteriormente, la señal de error es sintetizada usando las señales de los micrófonos de la segunda sección, como se muestra en la Figura 6.

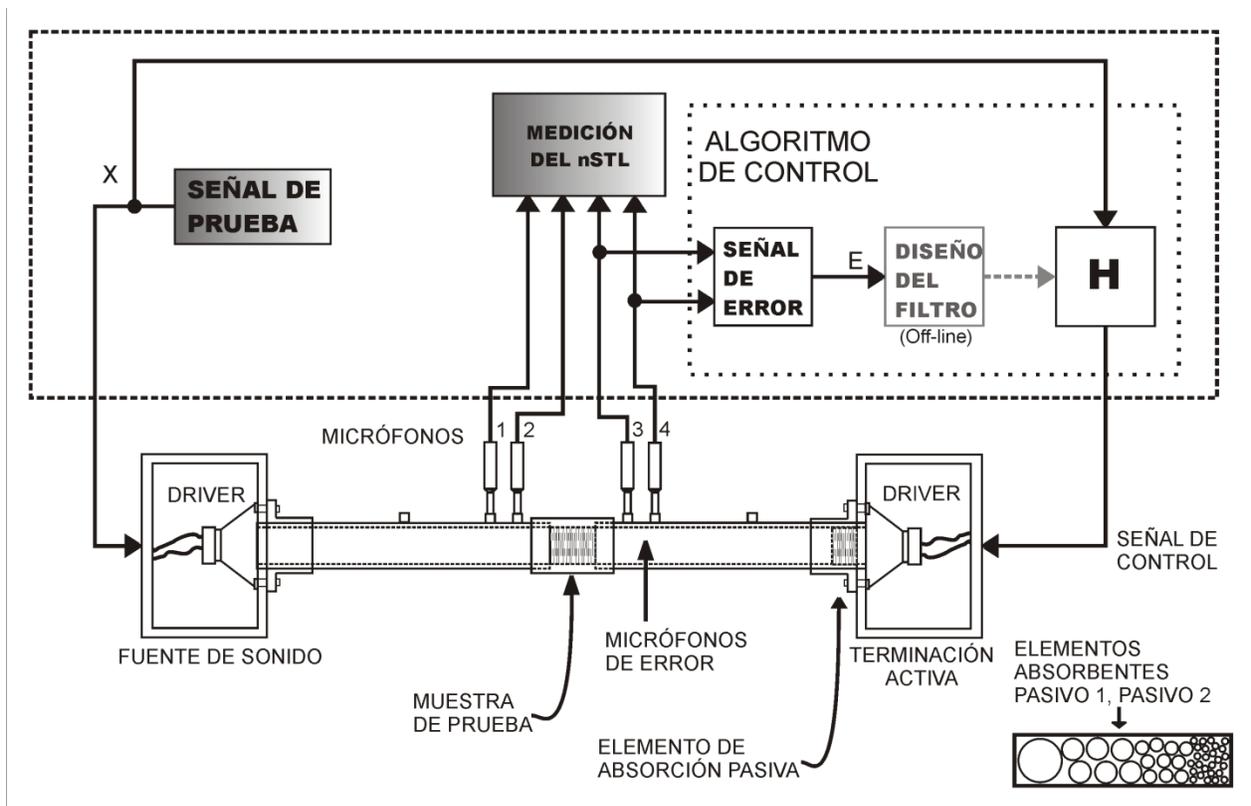


Figura 6. Representación esquemática del sistema de control activo. La señal de error se sintetiza a partir de los micrófonos 3 y 4 de la segunda sección del tubo de transmisión.

La señal de prueba se hace pasar también por el filtro H , previamente calculado, para alimentar a la fuente secundaria, adoptando una estrategia típica de control prealimentado. Esta acción se realiza dos veces, una con el control activo encendido (on), y luego apagado (off), lo cual provee las dos terminaciones distintas que requiere el método de dos cargas de la norma ASTM E2611-09.

3.3 Modelado matemático de un cambio en la impedancia de un tubo por estrechamiento de su sección transversal

Para obtener un modelo analítico del estrechamiento, se hará la consideración de que el régimen dentro de todas las secciones involucradas es de ondas planas. Para el planteamiento de la transmisión de presión acústica, se considerará una onda viajando primeramente en un ducto con tres tramos de distinta impedancia acústica, de acuerdo al esquema de la Figura 7.

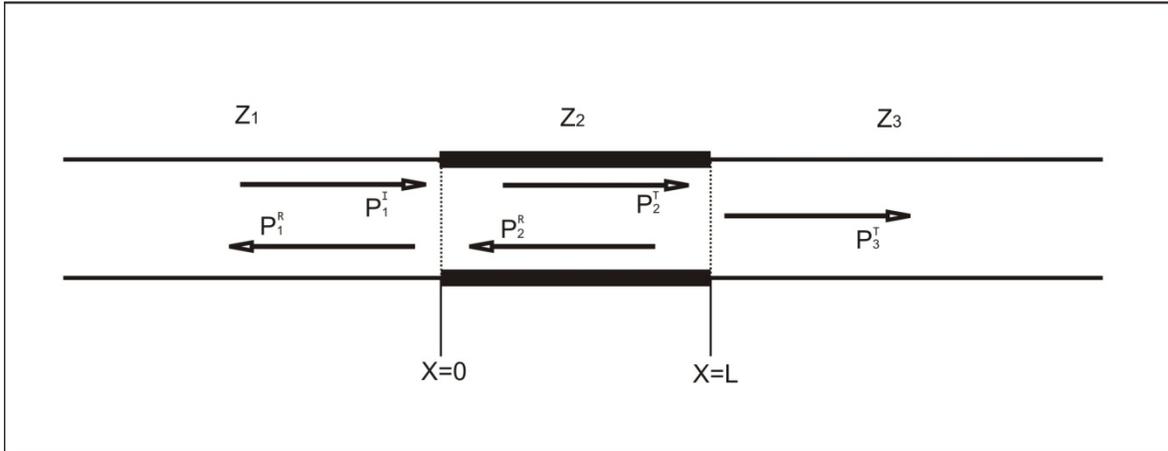


Figura 7. Esquemización de un cambio de impedancia en un tubo de ondas planas. Se ilustran las ondas de presión viajeras en ambos sentidos, para cada sección. El tubo es de longitud infinita.

De acuerdo al esquema anterior, las ondas involucradas en estado estacionario pueden definirse de la siguiente forma,

Onda incidente en la interfaz en $x = 0$:

$$p_1^i(x, \omega) = p_1^i e^{-jk_1 x}$$

$$U_1^i(x, \omega) = \frac{p_1^i}{Z_1} e^{-jk_1 x}$$

Onda reflejada en la interfaz en $x = 0$:

$$p_1^r(x, \omega) = p_1^r e^{+jk_1 x}$$

$$U_1^r(x, \omega) = -\frac{p_1^r}{Z_1} e^{*jk_1 x}$$

Onda transmitida al medio 2 y que incide en la interfaz en $x = L$:

$$p_2^r(x, \omega) = p_2^r e^{-jk_2 x}$$

$$U_2^r(x, \omega) = \frac{p_2^r}{Z_2} e^{-jk_2 x}$$

Onda reflejada en la interfaz en $x = L$:

$$p_2^r(x, \omega) = p_2^r e^{+jk_2x}$$

$$U_2^r(x, \omega) = -\frac{p_2^r}{Z_2} e^{+jk_2x}$$

$$U_3^r(x, \omega) = \frac{p_3^r}{Z_3} e^{-jk_3x}$$

Onda transmitida al medio 3:

$$p_3^r(x, \omega) = p_3^r e^{-jk_3x}$$

donde p es la presión acústica, U la velocidad de volumen; los superíndices indican si la onda es incidente (i), reflejada (r) o transmitida (τ) en una interfaz, y los subíndices (1, 2 ó 3) indican el medio o tramo del tubo por el cual se propagan. Si consideramos que los cambios de impedancia se deben a su vez a cambios del área de sección transversal a lo largo del tubo, las impedancias pueden expresarse en función del área transversal de cada sección (A_1, A_2, A_3):

$$Z_1 = \frac{\rho_0 c}{A_1}, \quad Z_2 = \frac{\rho_0 c}{A_2}, \quad Z_3 = \frac{\rho_0 c}{A_3}$$

Es posible organizar un sistema de ecuaciones a partir de las condiciones de continuidad de presión y velocidad de volumen en cada interfaz. La continuidad en la primera interfaz, localizada en $x=0$, formada por la primera y segunda sección del tubo, se expresa de la siguiente manera:

$$p_1^i + p_1^r = p_2^\tau + p_2^r \quad \text{Ec. 21}$$

$$\frac{p_1^i}{Z_1} - \frac{p_1^r}{Z_1} = \frac{p_2^\tau}{Z_2} - \frac{p_2^r}{Z_2} \quad \text{Ec. 22}$$

Y la continuidad en la segunda interfaz, ubicada en $x = L$,

$$p_2^\tau e^{-jk_2L} + p_2^r e^{+jk_2L} = p_3^\tau \quad \text{Ec. 23}$$

$$\frac{p_2^\tau}{Z_2} e^{-jk_2L} - \frac{p_2^r}{Z_2} e^{+jk_2L} = \frac{p_3^\tau}{Z_3} \quad \text{Ec. 24}$$

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones 21 a 24, se puede escribir p_3^τ en términos de p_1^i y las impedancias,

$$p_3^\tau = \frac{4Z_3Z_2p_1^i}{(Z_2 + Z_1)(Z_3 + Z_2)e^{jk_2L} + (Z_2 - Z_1)(Z_3 - Z_2)e^{-jk_2L}} \quad \text{Ec. 25}$$

Multiplicando y dividiendo por $(Z_2 + Z_1)(Z_3 + Z_2)$, y manipulando los factores exponenciales:

$$p_3^\tau = \frac{\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_2} e^{-jk_2L} p_1^i}{1 + \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} e^{-2jk_2L}} \quad \text{Ec. 26}$$

donde se identifican los cocientes de impedancias como los coeficientes de reflexión y transmisión de cada una de las dos interfaces,

$$\begin{aligned} R_{x=0} = R_0 &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, & T_{x=0} = T_0 &= \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \\ R_{x=L} = R_L &= \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, & T_{x=L} = T_L &= \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_2} \end{aligned} \quad \text{Ec. 27}$$

Reescribiendo, el cociente de p_3^τ entre p_1^i da el coeficiente de transmisión teórico en función de los coeficientes acústicos:

$$T_{\text{teórico}} = \frac{p_3^\tau}{p_1^i} = \frac{T_0 T_L e^{-jk_2L}}{1 + R_0 R_L e^{-2jk_2L}} \quad \text{Ec. 28}$$

donde, R_0, T_0 y R_L, T_L , son los coeficientes de reflexión y transmisión al inicio y final del medio 2, respectivamente. La relación entre el coeficiente de reflexión y el coeficiente de transmisión en la interfaz es $T = 1 + R$; reescribiendo la Ec. 28:

$$T_{\text{teórico}} = \frac{(1 + R_0)(1 + R_L) e^{-jk_2L}}{1 + R_0 R_L e^{-2jk_2L}} \quad \text{Ec. 29}$$

Para el caso del tubo de transmisión, los tramos 1 y 3 tienen la misma sección transversal. Dada esta simetría, $Z_3 = Z_1$, por lo tanto, $R_L = -R_0$ (ver Figura 8), y el coeficiente de transmisión se simplifica a:

$$T_{\text{teórico}} = \frac{(1 - R_0^2) e^{-jk_2L}}{1 - R_0^2 e^{-2jk_2L}} \quad \text{Ec. 30}$$

Además, sabiendo que para un estrechamiento, el coeficiente de reflexión en términos de las áreas de sección transversal de los tramos involucrados es $R_0 = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$, es posible también obtener el coeficiente de transmisión teórico a partir de las áreas de sección transversal del tubo de transmisión y el tubo de estrechamiento.

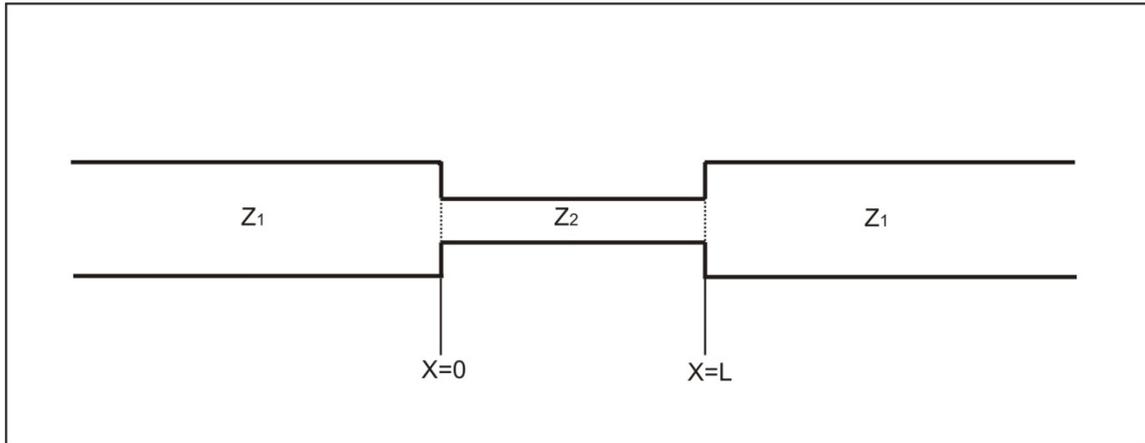


Figura 8. Esquema del estrechamiento propuesto como referencia de calibración; la impedancia del tercer medio es la misma que en el primero, por lo que la expresión del coeficiente de transmisión se simplifica.

En la ecuación 30, la longitud del estrechamiento se define como $L = l + l'$, es decir, es la longitud del estrechamiento considerando un término de corrección l' , dependiente de la frecuencia. El número de onda k_2 , al que ahora llamaremos k , por simplicidad, es de carácter complejo, es decir $k = k_{real} + jk_{imag}$. La parte imaginaria del número de onda, que representa las pérdidas termoviscosas, se calcula de acuerdo a la recomendación de la norma ISO 10534-2:2001:

$$k_{imag} = 1.94 \times 10^{-2} \frac{\sqrt{f}}{c_0 d} \quad \text{Ec. 31}$$

El factor 1.94×10^{-2} proviene de considerar las propiedades termodinámicas del medio de propagación, tales como la viscosidad, la relación de calores específicos y la conductividad térmica del aire [Rossing, 2004].

Es necesario considerar la corrección de extremo l' para realizar los cálculos usando la longitud efectiva del tubo $L = l + l'$, pues en los extremos abiertos del tubo, según su longitud de onda, las ondas de presión se reflejan en un punto nodal de presión que ocurre a una distancia mayor que la terminación del tubo, es decir, que la condición idealizada de tubo abierto se da un poco más allá del final físico del tubo. Este efecto se acentúa al aumentar la frecuencia, por lo que es necesario proponer una corrección de extremo dependiente de la frecuencia. Se llevaron a cabo dos cálculos teóricos de la corrección de extremo, una basada en un modelo hipotético de la radiación de una esfera pulsante en los extremos del tubo estrecho, y otra apoyada en la corrección propuesta por Karal [Karal, 1953], que aparece como consecuencia de corregir el valor de impedancia

(inductancia, en este caso) en este tipo de discontinuidad, en función de la relación de radios de cada sección transversal.

Para el modelo de esfera pulsante, considérese la impedancia de radiación de una esfera de radio a_E [Blackstock, 2000]:

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{jka_E}{1 + jka_E}, \quad \text{Ec. 32}$$

Separando los términos real e imaginario, y sabiendo que $Z_0 = \rho c$,

$$Z = \frac{\rho c (ka_E)^2}{1 + (ka_E)^2} + j \frac{\omega \rho a_E}{1 + (ka_E)^2} \quad \text{Ec. 33}$$

Como ya se ha expuesto (Ec. 27), el coeficiente de reflexión en una discontinuidad se puede expresar en términos de impedancias. Normalizando el primer término en el numerador y denominador:

$$R = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{Z/Z_0 - 1}{Z/Z_0 + 1}, \quad \text{Ec. 34}$$

donde, en este caso, Z_0 es la impedancia característica del aire. Puesto que el cociente Z/Z_0 será pequeño, es factible utilizar la aproximación

$$\frac{1 + x}{1 + y} \approx \frac{e^x}{e^y} = e^{x-y}, \quad \text{Ec. 35}$$

resultando que,

$$R = -e^{-2\frac{Z}{Z_0}} \quad \text{Ec. 36}$$

Sustituyendo la Ec. 33 en ésta última expresión:

$$R = -e^{\frac{-2(ka_E)^2}{1+(ka_E)^2}} \cdot e^{-2jk \frac{a_E}{1+(ka_E)^2}} \quad \text{Ec. 37}$$

El primer factor representa la atenuación, mientras que la segunda exponencial es un retardo, a partir del cual, se deduce que la longitud $\frac{2a_E}{1+(ka_E)^2}$ corresponde a un viaje de ida y vuelta fuera del tubo, por lo que resulta claro que representa la corrección de extremo:

$$l' = \frac{a_E}{1+(ka_E)^2} \quad \text{Ec. 38}$$

Durante el trabajo experimental, ya contando con la medición de nSTL para el tubo estrecho, se ajustó el valor de a_E a prueba y error, buscando que los máximos y mínimos del patrón teórico calculado coincidieran en frecuencia con sus similares experimentales. La relación obtenida de esta manera entre el radio de la esfera pulsante y el radio del estrechamiento fue aproximadamente:

$$a_E \approx \frac{a_T}{\sqrt{2}} \approx 0.71 a_T \quad \text{Ec. 39}$$

donde, a_T es el radio del estrechamiento. Al sustituir esta relación en el área de la esfera radiante, $A_E = 4\pi a_E^2$,

$$A_E = 4\pi \left(\frac{a_T}{\sqrt{2}} \right)^2 = 2\pi (a_T)^2, \quad \text{Ec. 40}$$

que es interpretable como el área de una hemi-esfera de radio a_T igual al del estrechamiento. La variación de la corrección de extremo en milímetros, con respecto a la frecuencia, para este caso específico, puede verse en la Figura 9. El radio a_T del estrechamiento es 6.25 mm. De acuerdo a la gráfica, el valor de corrección para el intervalo de interés del tubo de transmisión (178 a 5680 Hz), está entre 3.7 y 4.7 mm, con un comportamiento descendente respecto a la frecuencia.

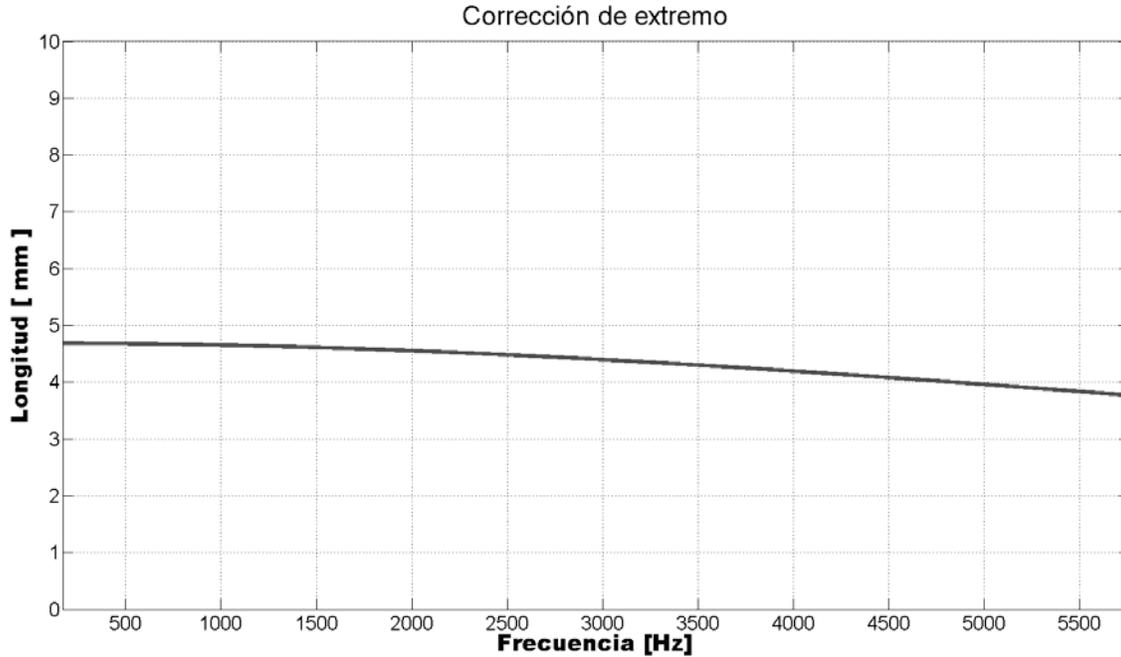


Figura 9. Corrección de extremo en milímetros con respecto a la frecuencia, según el análisis presentado en esta sección.

Por otra parte, el modelo de Karal parte de la impedancia que aparece en el modelo del campo acústico al interior del tubo cuando hay un cambio de sección abrupto. El valor de la impedancia, en ambos extremos del tubo estrecho, está ponderado por un factor de corrección dependiente de la relación del radio de la sección transversal menor entre el radio de la sección transversal mayor. Karal demuestra que esta corrección puede traducirse en una corrección de la longitud del estrechamiento, según la siguiente expresión:

$$l' = \frac{8a_T}{3\pi} [H_u(\alpha) + H_d(\alpha)] \quad \text{Ec. 41}$$

donde, $H_u(\alpha)$ y $H_d(\alpha)$ son las correcciones de la impedancia por discontinuidad en la sección *upstream* y *downstream* del tubo, respectivamente. Las correcciones dependen del cociente entre radios α (radio menor entre radio mayor), que para este caso particular, es $\alpha = 0.3571$. Las expresiones para obtener los valores de corrección de las impedancias, se encuentran en el artículo citado de Karal. El valor de corrección hallado con esta aproximación es de 5.4 mm, y es constante con respecto a la frecuencia.

3. 4 Simulación del campo acústico en un tubo con un estrechamiento discontinuo de su sección transversal

El análisis de la sección anterior se centró en conocer el coeficiente de transmisión teórico del estrechamiento, bajo la suposición de un régimen de ondas planas a lo largo de las tres secciones de tubo involucradas. Fue menester llevar a cabo una simulación numérica detallada del campo acústico en el interior del tubo de transmisión, ensamblado con la muestra geométrica o tubo de

calibración y analizando en detalle la vecindad de la salida del estrechamiento, donde ocurre un cambio abrupto de sección transversal que, por difracción, causa la deformación del frente de onda (ver Figura 10 y Figura 11). Es de interés saber a qué distancia de esta discontinuidad se puede considerar que el frente de onda vuelve a ser plano, por lo que se calcularon parámetros que ayudaran a identificar si un frente de onda ha recuperado su carácter de onda plana al cabo de ciertas distancias. El software utilizado para hacer esta simulación fue COMSOL Multiphysics®, programa de simulación numérica por el método de elemento finito.

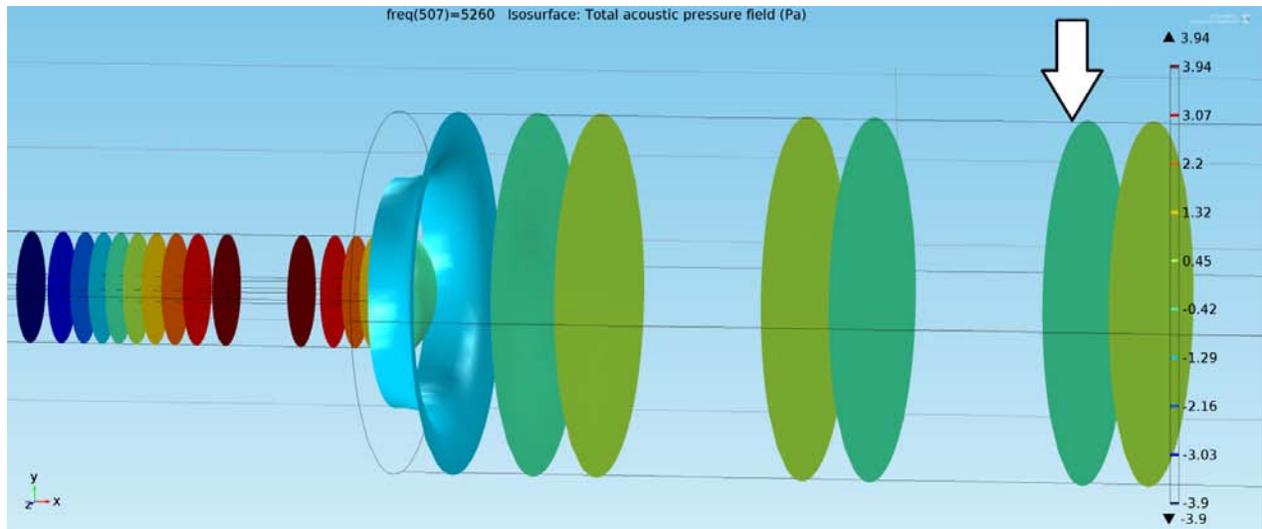


Figura 10. Superficies isobáricas a lo largo del final del estrechamiento y el inicio de la segunda sección del tubo de transmisión. Se puede observar que al pasar por el cambio de sección transversal, el frente de onda sufre una deformación apreciable. El objetivo de la simulación fue determinar si la distancia en la que se ubican los micrófonos de medición, es suficientemente lejana a esta perturbación. La flecha blanca señala la posición del primer micrófono después de la muestra geométrica, a 70 mm de la misma.

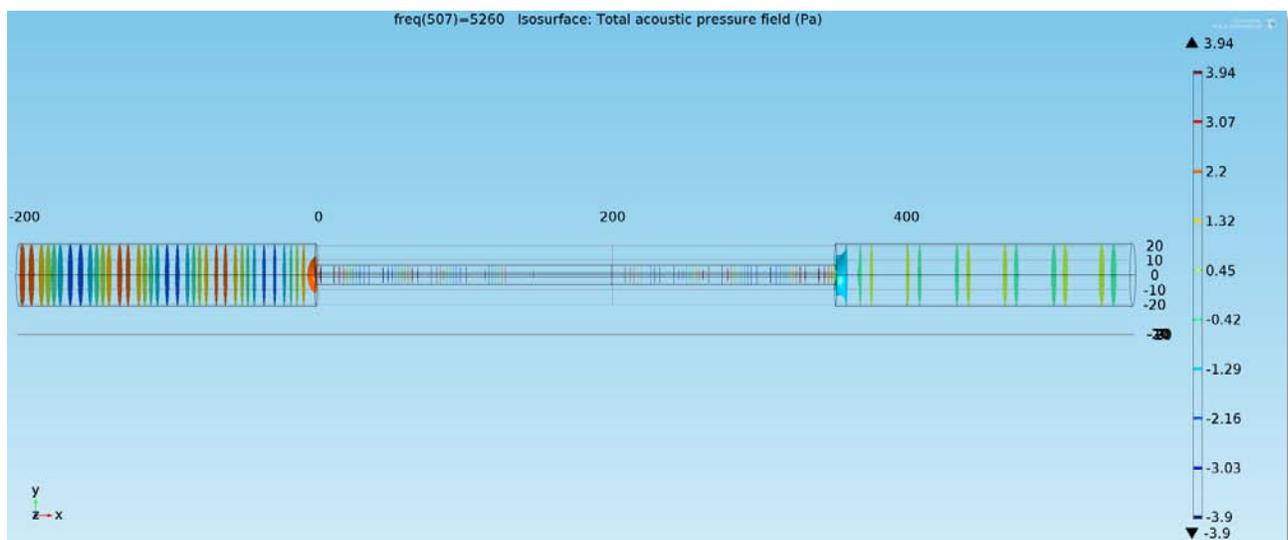


Figura 11. Vista lateral del tubo de transmisión con muestra geométrica o estrechamiento. Simulación para la frecuencia de 5260 Hz. Presión en pascales.

La simulación del campo acústico en este software es tridimensional y se realizó bajo las siguientes características de mallado y condiciones de frontera:

- Tamaño de elemento de malla: $mín = 4$ mm, $máx = 12$ mm.
- En la entrada del la primera sección del tubo se posicionó la fuente virtual de sonido; en ese plano se combinan ondas viajando en ambos sentidos de la dirección axial (hacia dentro y hacia afuera del tubo), es decir, el extremo es abierto y hay una condición de radiación que funciona correctamente sólo para ondas planas.
- El extremo de salida de la segunda sección del tubo también es abierta.
- Fronteras rígidas (velocidad normal a las paredes, $v = 0$).

Del campo acústico resultante, se tomaron los datos del nivel de presión sonora (NPS) del plano transversal al tubo de transmisión en la posición que tendría el primer micrófono, con la finalidad de demostrar si el frente de onda ya recuperó su planicidad, y por tanto, si es viable el uso del estrechamiento como elemento de calibración. También se analizó el campo acústico en cortes transversales cada vez más próximos al cambio de sección, hasta encontrar una deformación significativa del frente de onda

3. 5 Resultados de la simulación.

Al resolver la ecuación de Helmholtz, el software COMSOL Multiphysics® puede entregar los resultados de dos maneras: en una representación gráfica tridimensional del modelo del tubo en el que el campo acústico se puede visualizar como superficies isobáricas, o bien, como un campo continuo usando paletas de colores; también se pueden extraer los datos del campo de presión o del nivel de presión sonora (NPS) en archivos de texto. De esta última manera, se exportaron los datos a MATLAB® para su procesamiento, mientras que las gráficas se utilizaron sólo con fines ilustrativos.

De la solución mencionada, se analizó un disco o corte transversal a 70 mm, distancia a la que se localizaría el primer micrófono en la segunda sección del tubo de transmisión, y se obtuvo la diferencia entre el promedio de valores NPS en la periferia del disco y el promedio del NPS de toda la sección transversal. La Figura 12 ilustra el procedimiento en un diagrama de flujo.

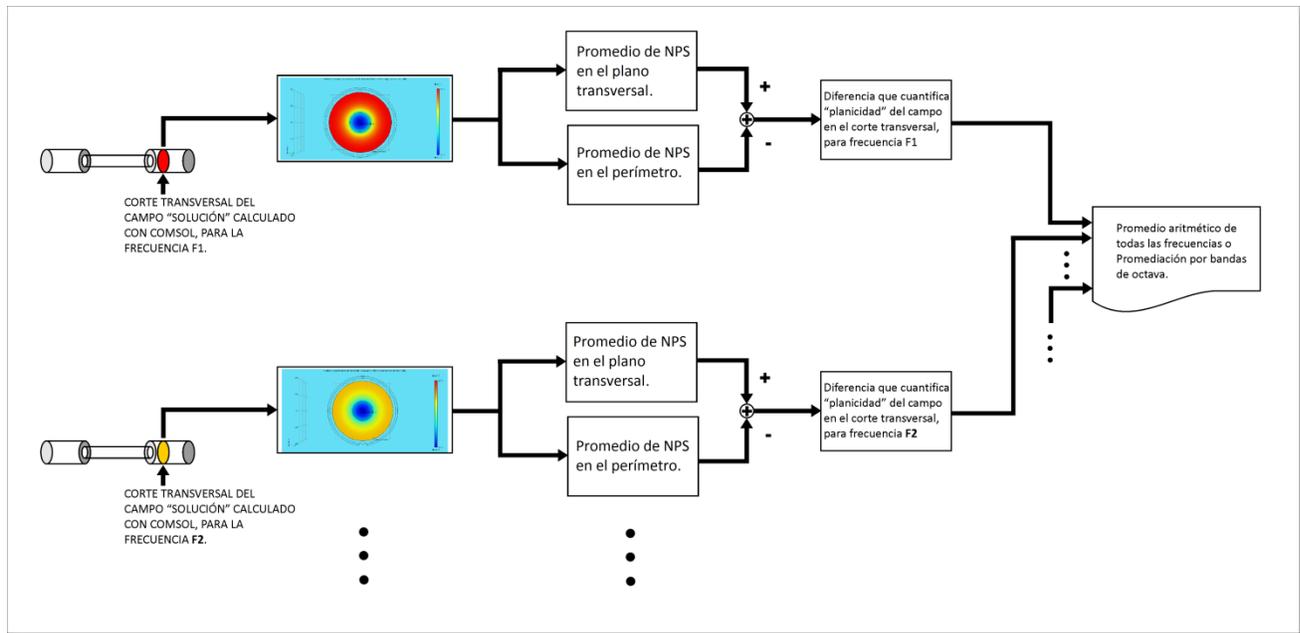


Figura 12. Diagrama de flujo del post-procesamiento de los datos obtenidos de COMSOL®.

En el primer renglón de la Tabla 1 se muestran los resultados de los promedios en frecuencia para la posición del micrófono y, en los siguientes renglones, los resultados en posiciones cada vez más cercanas al cambio de sección.

Tabla 1. Diferencia máxima encontrada en las frecuencias analizadas. Diferencia entre el NPS en la periferia del disco o corte analizado y el NPS promedio del disco completo, promediado además en todas las frecuencias de análisis.

Distancia al cambio de sección [mm]	Dif. Máxima [dB]	Dif. Promedio de todas las frecuencias [dB]
70	0.005 (a 4820 Hz)	0.000
35	0.021 (a 4820 Hz)	0.002
14	3.116 (a 5300 Hz)	0.053
7	3.740 (a 5300 Hz)	0.140

Al disminuir la distancia, las diferencias en el NPS se hacen más grandes, evidenciando una mayor deformación del frente de onda y alejándolo de la condición de onda plana. Sin embargo, a 70 mm de distancia la diferencia es claramente despreciable. Para poder juzgar objetivamente los resultados, se consideró la exactitud de los micrófonos que se utilizaron en el tubo de transmisión (± 0.11 dB)ⁱⁱⁱ, así como la exactitud mínima para sonómetros de tipo 0 que marca la norma ANSI S1.4 (± 0.4 dB). Con base en estas referencias, se sugiere que la máxima diferencia permisible del NPS entre dos puntos cualesquiera de un corte transversal preferentemente sea menor a 0.1 dB.

ⁱⁱⁱ Micrófono de campo de presión B&K, modelo 4938, 1/4 de pulgada. El valor de ± 0.1 dB es para el intervalo de interés: 178 – 5680 Hz.

También en la Tabla 1 se observa que la diferencia de nivel máxima entre puntos para cada distancia es uno o dos órdenes de magnitud mayor que el promedio correspondiente, esto obedece a que las diferencias tienen grandes variaciones con respecto a la frecuencia (ver Figura 13, como ejemplo), es decir, a altas frecuencias puede haber alguna diferencia mucho mayor que en las frecuencias aledañas; al hacer la promediación, es imposible de apreciar esa diferencia. Las variaciones disminuyen conforme el punto de análisis se aleja del cambio de sección; la Figura 13 ilustra el caso más acentuado, ya que el corte o punto de medición está a sólo 7 mm de la muestra.

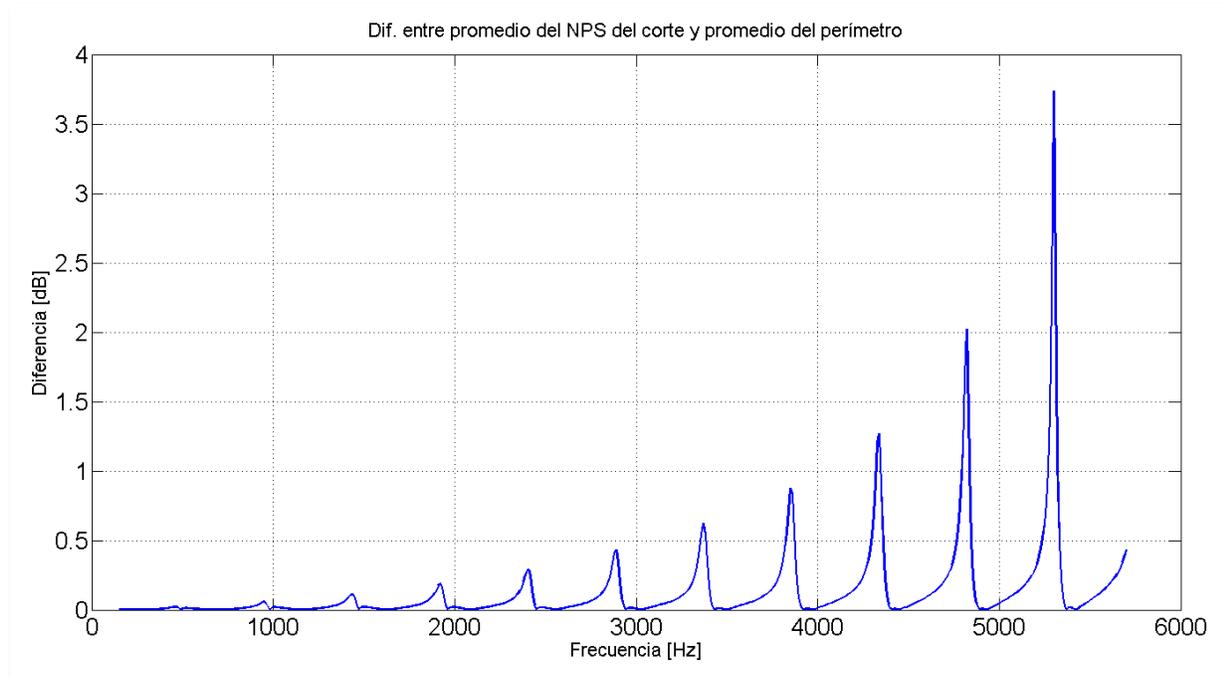


Figura 13. Evolución de las diferencias en dB de promedio con respecto a la frecuencia, para la distancia de 7 mm.

En la Tabla 2, se corrobora que al incrementarse la frecuencia y/o disminuir la distancia a la discontinuidad en el tubo, el frente de onda pierde planicidad. Esta deformación progresiva, sin embargo, no alcanza niveles críticos pues, en la Tabla 1 se mostró que en la posición del micrófono (70 mm) la mayor diferencia es de 0.005 dB. Esto significa que el micrófono de medición probablemente no registraría tal diferencia, o suponiendo que se usara un micrófono suficientemente sensible, el NPS tendría un error promedio mucho menor que una décima de decibel.

Tabla 2. Diferencias promediadas por bandas de octava.

Distancia al cambio de sección [mm]	Diferencias por bandas de octava [dB]				
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
14	0.000	0.002	0.004	0.012	0.095
7	0.001	0.008	0.017	0.047	0.238

CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4. 1 Diseño y construcción del tubo de transmisión

El aparato que se mostró en las figuras anteriores está constituido por un tubo de aluminio de 1¼" de diámetro interior blindado por un tubo externo concéntrico de 2" con fines de aislamiento del ruido exterior. Las dimensiones y parámetros de diseño del tubo de transmisión se calcularon de acuerdo a las normas ASTM E2611-09 e ISO105354-2 [ISO105354-2 *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*] que aparece entre las referencias de la norma ASTM. También se utilizó el análisis de Boden y Aborn [Boden, 1986], específicamente para determinar el límite inferior del intervalo útil del aparato. El ancho de banda útil está determinado por dos frecuencias de corte $f_{inf} < f < f_{sup}$, que dependen de la velocidad del aire en el medio c , el diámetro interior del tubo \emptyset y una constante K que depende de la geometría de la sección transversal del tubo, en este caso, $K = 0.586$, de acuerdo a la norma. En la Tabla 3, se enlistan las dimensiones más importantes y su impacto en el desempeño del tubo construido.

Tabla 3. Dimensiones críticas del tubo de transmisión construido.

DIMENSIÓN O PIEZA	CÁLCULO	FUNCIÓN
Diámetro interior \emptyset del tubo	$\emptyset < \frac{Kc}{f_{sup}}$; $\emptyset = 3.5 \text{ cm}$	Frecuencia límite superior de operación
Longitud L de las secciones principales (“upstream”, “downstream”)	$L > 3\emptyset + x_1$; $L = 42 \text{ cm} > 3(3.5 \text{ cm}) + 9.43 \text{ cm} = 19.8 \text{ cm}$	Permite al frente de onda progresar lo suficiente para alcanzar la condición de onda plana
Separación s entre micrófonos	$s < \frac{0.1c}{2f_{sup}}$ [Boden, 1986]; $s = 2.43 \text{ cm}, 9.7 \text{ cm}$	Determinan la frecuencia inferior del intervalo útil
Longitud de las terminaciones pasivas	42 cm, 12.7 cm	Distintas longitudes para tener un cambio de impedancia suficiente para la medición (método de dos cargas)
Portamuestras	4 pulg, 5 pulg	Alojar la muestra y mantenerla a una distancia conveniente de los micrófonos más cercanos (ver ASTM E2611-09).

La combinación de mediciones realizadas con las separaciones de 2.43 y 9.7 cm, permite analizar los datos desde 250 hasta 4000 Hz en bandas de octava^{iv}, o de 200 a 5000 Hz en bandas de

^{iv} Intervalos de frecuencia en que el valor central de una banda corresponde al doble de la frecuencia central de la banda inmediata inferior [ISO-266:1997].

tercios de octava^v. Es importante destacar que este diseño no requiere de dos tubos de diámetros diferentes, como ocurre con algunos modelos comerciales. En la Figura 14 se muestra una fotografía del aparato completamente terminado y los elementos periféricos necesarios para su utilización: laptop, fuente de polarización para los micrófonos, tarjeta de adquisición de datos de audio y amplificador de potencia.

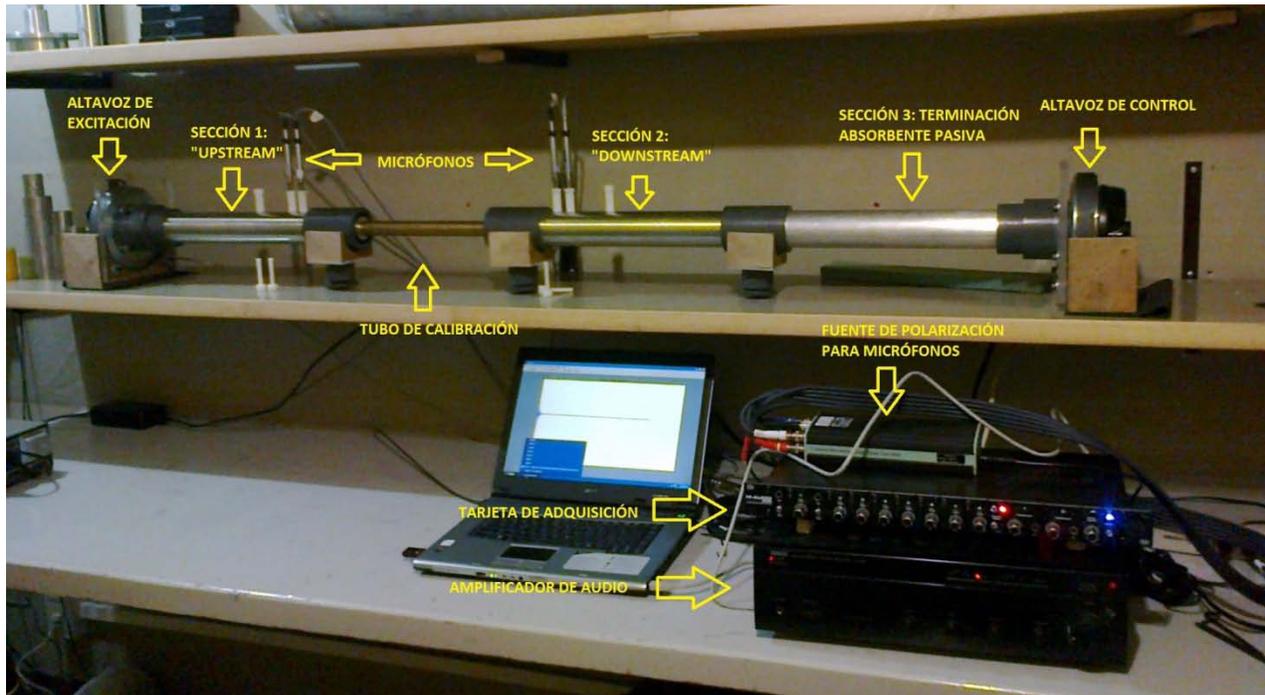


Figura 14. Fotografía que muestra el tubo de transmisión terminado y su equipo periférico: Una laptop, tarjeta de adquisición de audio, fuente de alimentación para micrófonos, amplificador de audio. El tubo consta de 2 secciones principales ("upstream" o sección 1, y "downstream" o sección 2), además de un portamuestras, que en esta foto se sustituyó con un tubo estrecho para calibración, y una sección 3 con material absorbente pasivo.

En la figura anterior, en la posición donde habitualmente se coloca la muestra a medir, también se puede apreciar un "tubo de calibración", que corresponde a un estrechamiento de la sección transversal del tubo de transmisión, cuyo modelo analítico se obtiene a continuación.

^v Intervalos cuyos límites inferior y superior guardan una relación un factor igual a $2^{1/3}$.

4. 2 Arreglo experimental

Por medio de dos separaciones diferentes para los micrófonos, una de 2.43 cm y otra de 9.7 cm (es decir, hay 6 portamicrofonos a lo largo del tubo), fue posible cubrir un intervalo útil de 178 a 5680 Hz; de 178 a 1420 Hz con la separación de 9.7 cm y de 710 a 5680 Hz con la separación de 2.43 cm. En la Tabla 4 se indican las bandas de octava y tercios de octava que cubren estos intervalos.

Tabla 4. Ancho de banda útil del tubo diseñado.

Intervalo útil completo	Intervalo útil de cada separación	Bandas de tercios de octava	Bandas de octava
178 – 5680 Hz	178 – 1420 Hz (@ 9.7 cm)	200 – 1250 Hz	250 – 1000 Hz
	710 – 5680 Hz (@ 2.43 cm)	800 – 5000 Hz	1000 – 4000 Hz

Estos límites en frecuencia están determinados por el diámetro interno del tubo y las distancias entre los micrófonos. El diámetro interno del tubo asegura una propagación de ondas puramente planas dentro del intervalo de frecuencias de operación (límite superior), mientras que las separaciones entre micrófonos permiten un muestreo espacial apropiado del campo sonoro y la compensación de diferencias de fase de los micrófonos (límite inferior y superior).

El siguiente equipo y software fue utilizado para los experimentos realizados: 4 micrófonos Brüel & Kjaer type 4938, fuente de polarización para 4 micrófonos Brüel & Kjaer type 2829, interfaz de audio M-Audio modelo M-Track Eight, amplificador de potencia estéreo Yamaha modelo AX-380, computadora personal de escritorio CPU Intel i7-4770 3.40 GHz, 12.0 GB RAM, Windows 10 64-bit, con Matlab® versión R2015a 64-bit, y DSP System Toolbox versión 9.0.

El procedimiento de medición y procesamiento de señal involucró dos tareas principales: el control activo de la terminación y la adquisición de datos para calcular el nSTL. Ambas tareas se realizaron dos veces con diferentes condiciones de absorción en la terminación, de acuerdo a la norma ASTM. Además, se llevaron a cabo dos tipos de medición: pasiva-activa (la propuesta en este trabajo), y puramente pasiva (de acuerdo a la norma). Para las mediciones del tipo pasiva-activa, el control activo está apagado (off) la primera “pasada” o medición, y los elementos absorbentes son la absorción pasiva del cono del altavoz y una pequeña sección de espuma de poliuretano de 3.5 cm de largo con forma de cuña (**Pasiva 1**), ver Figura 15. Este pequeño elemento, de absorción relativamente baja, se incluyó con la finalidad de asegurar un tiempo de amortiguamiento acústico menor que la duración del bloque de adquisición de 1.486 s, correspondiente a 65536 muestras a 44.1 kHz. En la segunda adquisición de datos, el control activo está encendido (on), de manera que los elementos de absorción pasivos antes referidos se combinan con el efecto de la señal de control proveniente de la fuente secundaria (**Activa**).



Figura 15. Espuma de poliuretano en forma de cuña utilizada para disminuir el tiempo de reverberación dentro del tubo y, en consecuencia, obtener una respuesta al impulso más corta.

Para las mediciones del tipo puramente pasivas, la misma condición Pasiva 1 es utilizada la primera vez, mientras que para la segunda adquisición se utilizó como absorción pasiva (**Pasiva 2**) un arreglo de 12.7 cm de longitud de bolitas suaves de fibra de acrílico con diámetros progresivamente decrecientes (3.0, 1.8, 1.2 y 0.7 cm), en secciones de unos 3 cm para cada diámetro, y mantenidos en su sitio por mallas de alambre muy delgado. Ver Figura 16.



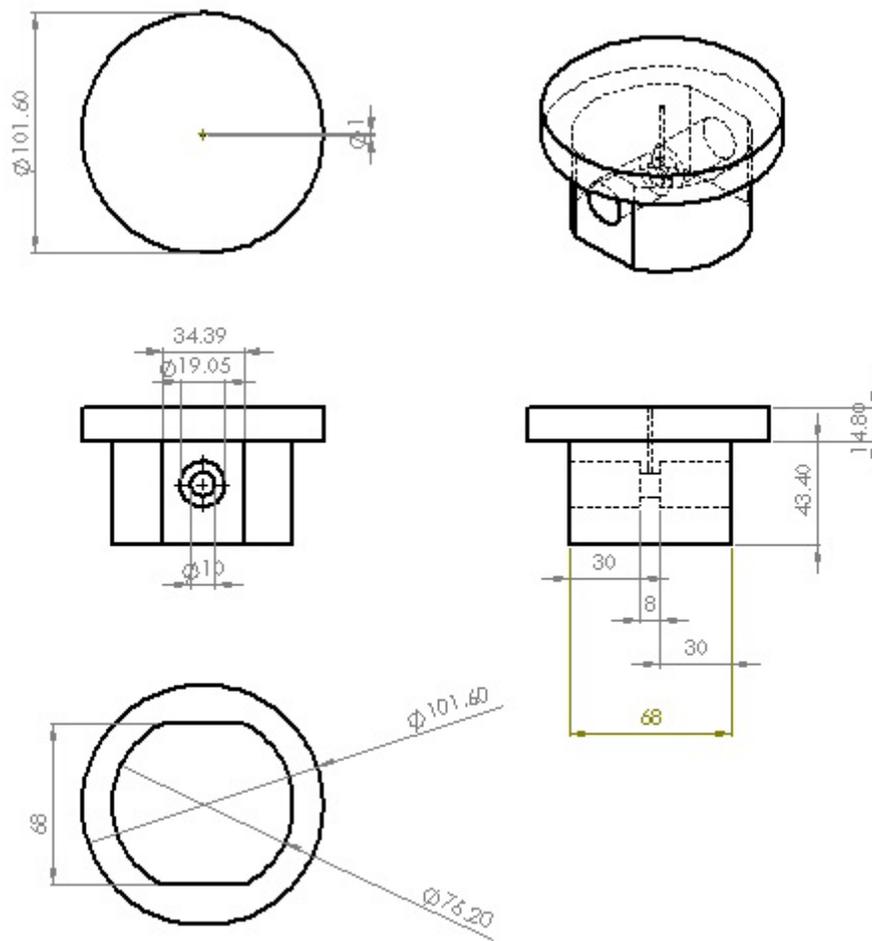
Figura 16. Bolitas de fibra de acrílico para la absorción progresiva del sonido en la terminación del tubo de transmisión.

Los coeficientes de absorción de todas las terminaciones fueron calculados utilizando el método de dos micrófonos de la norma ISO 10534-2, y se muestran en la Figura 25, en la sección 4. 5 "Desempeño del control activo".

4. 3 Igualación de fases

El procedimiento de medición requiere en distintos momentos de funciones de transferencia entre los micrófonos de medición. Ya que estas funciones son relaciones de espectros cruzados entre las señales medidas, las variaciones de fase o amplitud provocan inexactitudes importantes en los cálculos. Para compensar la amplitud y fase entre los micrófonos, la norma ASTM E2611-09 sugiere la obtención de funciones de transferencia de corrección, para lo cual es necesario medir la función de transferencia entre los micrófonos a calibrar, una vez en su posición de medición habitual, y otra con posiciones intercambiadas. Con estas dos funciones de transferencia se obtiene una nueva función de transferencia que representa las diferencias de fase y amplitud entre ambos micrófonos. También se sugiere un método en el que se colocan los micrófonos en un mismo plano transversal al tubo, en cuyo caso, se requiere al menos un orificio adicional en el tubo de transmisión (por ejemplo, colocado a 90° de cualquier posición de los micrófonos de medición). En todos los casos se recomienda tener una terminación del tubo lo más absorbente posible, ya que de lo contrario, las funciones de corrección no cumplirían su cometido.

Teniendo en consideración que una de las ventajas de utilizar una terminación activa es evitar que el tubo sea manipulado durante la medición, sería también deseable minimizar la manipulación de los micrófonos y las piezas que los sujetan (portamicrófonos), evitando así su desgaste y posibles diferencias o errores en su colocación. Para este fin, se diseñó y construyó una cavidad de calibración que somete a un par de micrófonos a un campo acústico idéntico, que permite observar las diferencias de fase y amplitud también a través de una función de transferencia entre los transductores. El dispositivo se construyó a partir de una barra de aluminio de sección circular, a la cual se le horadaron receptáculos de 19 mm para dos portamicrófonos diametralmente opuestos y conectados por una pequeña sección cilíndrica de 10 mm de diámetro y 8 mm de longitud (Figura 17).



Cotas en milímetros

Figura 17. Diagramas de diseño de la cavidad para calibración de los micrófonos.

La sección cilíndrica queda sellada en ambos extremos por los micrófonos ya montados y tiene un volumen de 0.63 cm^3 . Las dimensiones de la cavidad son mucho menores que la longitud de onda más pequeña del ancho de banda útil del tubo, en este caso 6 cm, que corresponden a 5760 Hz, con lo que está garantizado un campo acústico homogéneo. La señal de prueba entra a la cavidad por un ducto de 2 mm de diámetro y alrededor de 1 cm de longitud, que es acoplado a un audífono capaz de reproducir la señal de prueba (barrido senoidal) en el intervalo de interés.

En la Figura 18 se muestra un corte transversal del dibujo realizado con el software SolidWorks®, para fines de diseño, y en la fotografía de la Figura 19, el dispositivo terminado.

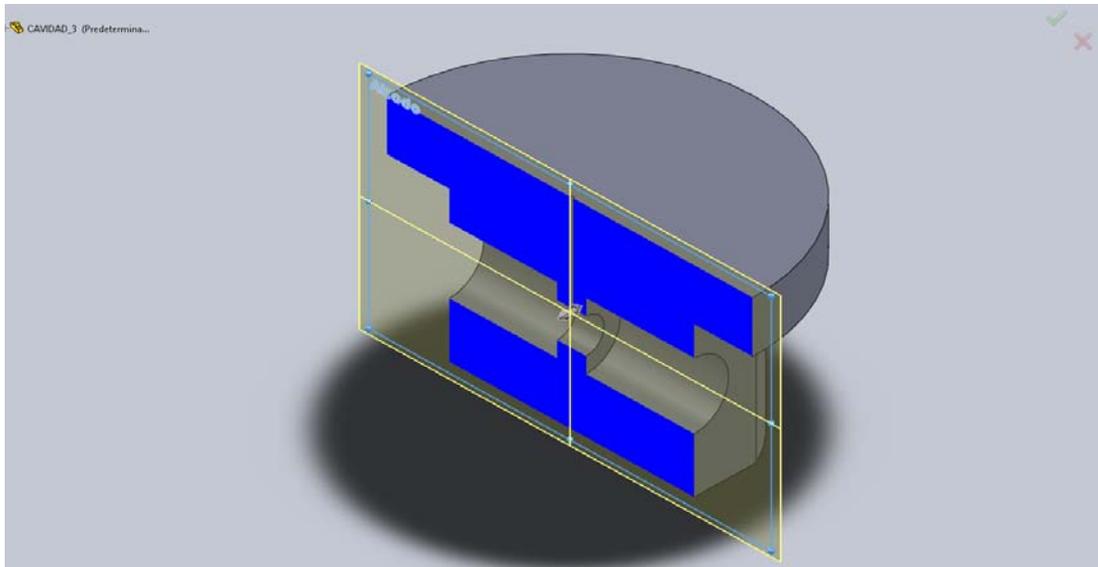


Figura 18. Corte transversal de un dibujo en 3D de la cavidad para calibración (dibujo elaborado en SolidWorks®).

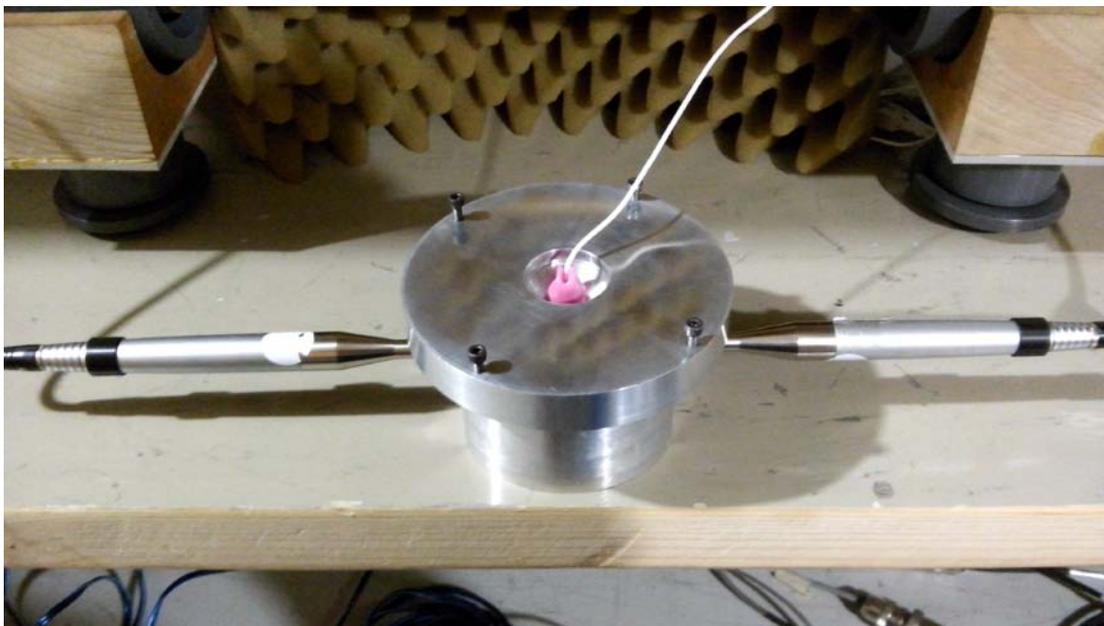


Figura 19. Fotografía de la cavidad para calibración con un audífono común, como fuente de sonido, y dos micrófonos de ¼" montados.

4. 4 Construcción del tubo de calibración

El tubo de calibración construido constituye una sección intermedia del tubo de transmisión, la cual fue maquinada a partir de un buje de bronce, con un diámetro interior nominal de ½ pulgada, y reduce el área de la sección transversal del tubo de transmisión a un 13% con respecto a la secciones adyacentes. Con esta reducción se logra una pérdida de transmisión máxima dependiente de la frecuencia de hasta alrededor de 12 dB (máximo teórico).

Dimensiones del estrechamiento:

- Diámetro interior: 1.25 cm
- Longitud: 36.4 cm (espaciamiento en frecuencia entre resonancias $\Delta f=455$ Hz)
- Relación de áreas entre el estrechamiento y diámetro interior del tubo de transmisión:
 $A_2/A_1 = 0.1276$ (máx. $nSTL \approx 12$ dB).



Figura 20. Fotografía del tubo de estrechamiento construido a partir de un buje de bronce de 1.25 cm de diámetro interno. Para adaptar la pieza al diámetro de los coples del tubo de transmisión, se incorporaron camisas de aluminio en los extremos.

Los resultados experimentales de $nSTL$ para el estrechamiento mostrado en la Figura 20, aparecen en el capítulo 5, contrastados con el modelo teórico de la Ec. 30.

4. 5 Desempeño del control activo

La señal de error sintetizada a partir de los micrófonos 3 y 4 es el parámetro de referencia para identificar si el control activo de absorción tiene un desempeño aceptable, es decir, en la medida de la disminución del nivel de la señal de error se juzga el desempeño del control activo. Evidentemente, se espera que la magnitud de la señal de error disminuya en los casos en que el control activo esté encendido y que, por tanto, la diferencia entre el error con el control apagado y con el control encendido, sea mayor a cero.

La señal de error puede calcularse, en forma teórica, en términos de las funciones G_1 , G_2 y H , usando las ecuaciones 17 y 20, para el caso de error con el control encendido (error mínimo) y con el control apagado (error típico), respectivamente. Las versiones experimentales de estas señales de error se obtienen mediante las pruebas de desempeño del control activo.

En un tubo de transmisión, las características acústicas del sistema cambian según la muestra de prueba que está colocada en su interior. Esta información está contenida en las funciones de identificación G_1 y G_2 . Lo anterior hace necesario realizar la caracterización del sistema de control cada vez que se cambie o modifique la muestra de prueba, para así poder calcular adecuadamente la señal de error para cada condición acústica.

Las gráficas de error que aparecen en las Figuras 21, 22 y 23, permiten comparar los valores experimentales con los valores teóricos, para cada muestra de prueba que se caracterizó. En ambos casos se muestra el error con el control encendido y con el control apagado.

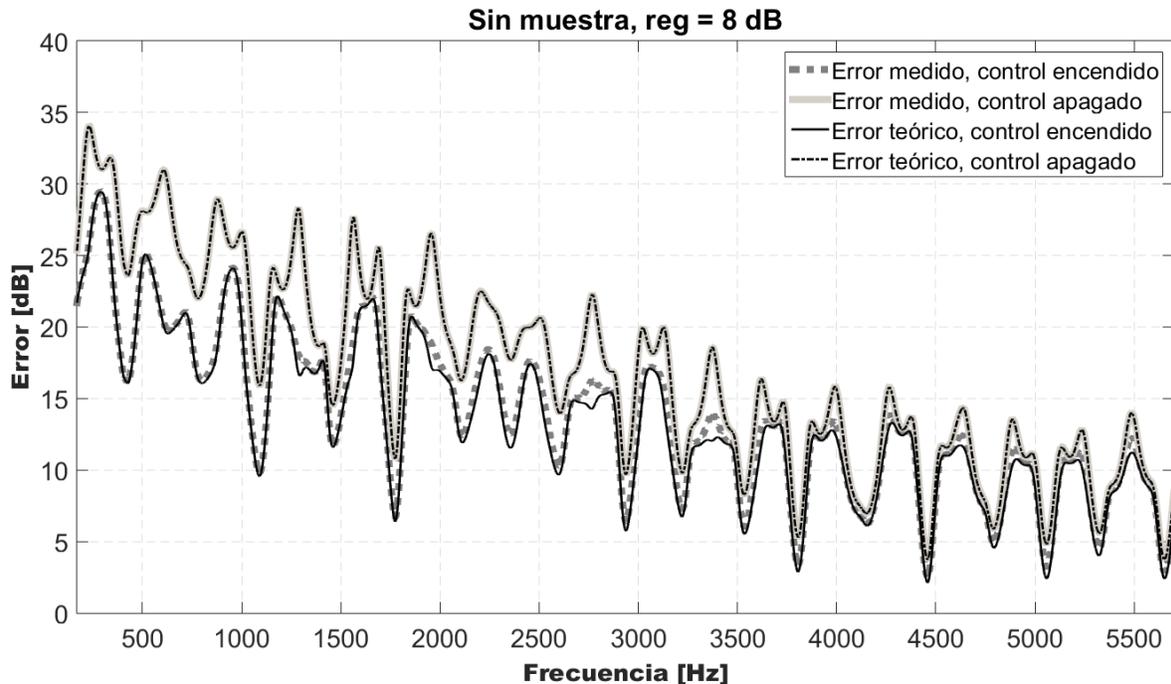


Figura 21. Errores teóricos y medidos para el caso sin muestra. Para cada tipo de error se presenta tanto el valor con control encendido, como apagado. Valor de regularización es 8 dB con respecto a la media geométrica de $|G_2|^2$.

En la Figura 21 se muestran los valores de error teórico y medido para el caso sin muestra. La diferencia promedio entre el error teórico con control y sin control es de 3.5 dB (con una diferencia mínima de 0.38 dB y una máxima de 11.58 dB), mientras que para el error medido, esa diferencia es de 3.1 dB (mín = 0.31 dB, máx = 10.88 dB). Puesto que las diferencias entre valores teóricos y medidos son similares, se puede afirmar que el sistema físico responde de buena forma a los requerimientos del filtrado, como velocidad de respuesta e intervalo dinámico. A juzgar por los resultados de la medición del nSTL, que se presentan en el capítulo 5, la diferencia alcanzada de 3.1 dB es suficientemente buena. Además, a pesar de que la diferencia promedio es de 3.1 dB, hay varios intervalos de frecuencia donde la señal de error se reduce en varios decibeles más, es decir, se anticipa una absorción alta de sonido en la terminación.

El error teórico con el control apagado tiene un trazo casi idéntico al valor del correspondiente error medido (promedio de 0.02 dB), lo cual es indicio de que los errores aleatorios y sistemáticos dentro de la medición se mantienen en un rango de valores despreciables. Esta alta correlación también se observó en los cálculos y mediciones realizadas con muestras de prueba colocadas en el interior del tubo.

Por otra parte, la diferencia entre el error teórico y el error medido con control encendido, donde la diferencia promedio fue de 0.45 dB, refleja el desempeño del filtro de control diseñado y el

sistema físico (particularmente la respuesta del altavoz). En general, entre más pequeña sea esta diferencia, se puede interpretar que la implementación del filtrado está más cerca de un desempeño óptimo.

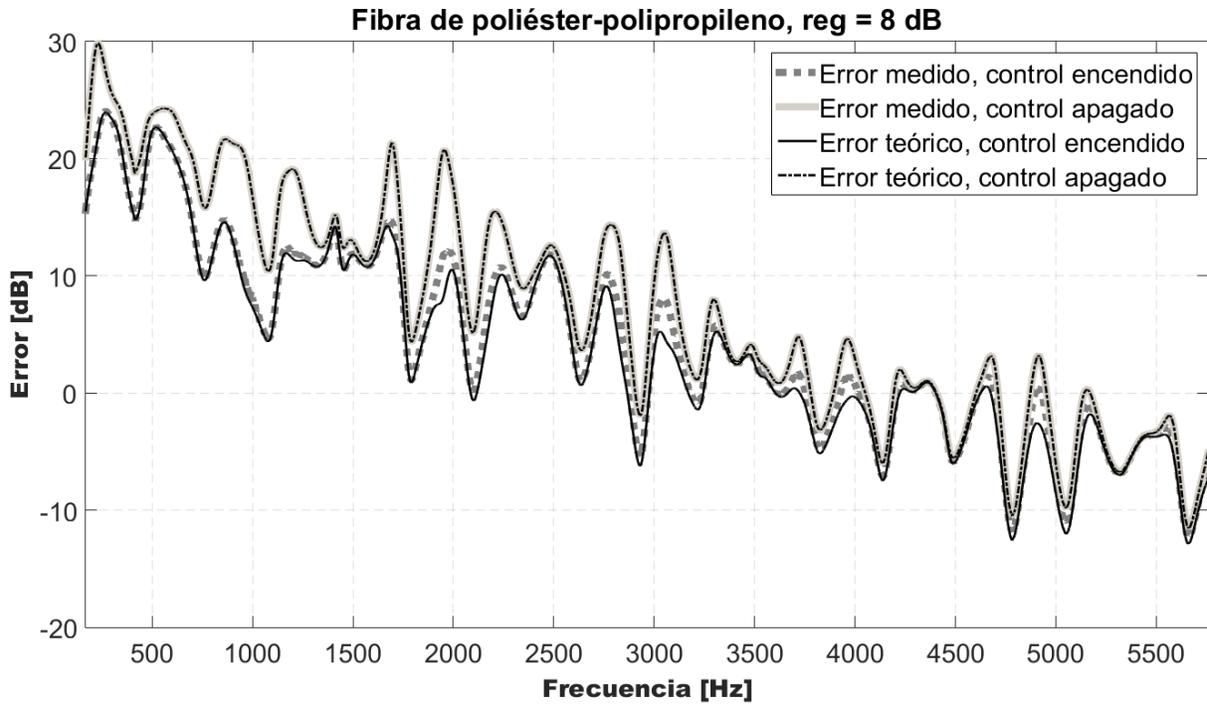


Figura 22. Errores teóricos y medidos para el caso con muestra de fibra de poliéster-polipropileno. Para cada tipo de error se presenta tanto el valor con control encendido, como apagado. Valor de regularización es 8 dB con respecto a la media geométrica de $|G_2|^2$.

Para el caso del poliéster-polipropileno (Figura 22), la diferencia promedio entre los errores teóricos con y sin control, fue de 3.37 dB (con una mínima de 0.13 dB y máxima de 12.55 dB); la diferencia entre los valores medidos correspondientes fue de 2.78 dB (mín = 0.06 dB y máx = 10.64 dB). Nuevamente, se observan zonas en frecuencia en las que la disminución de la señal de error es mayor al promedio. La diferencia entre el error teórico y medido con control encendido fue de 0.62 dB.

Al igual que en el caso sin muestra, con el control encendido, hay zonas donde el cálculo teórico predijo un nivel de error inferior al que se logró experimentalmente y, en altas frecuencias, la capacidad del control se observa disminuida. Es muy probable que estas discrepancias en desempeño se deban a la demanda que el filtro hace al driver de control (fuente secundaria).

Los valores medidos en las Figuras 21 y 22, se obtuvieron usando un nivel de regularización de +8 dB con respecto a la media geométrica de $|G_2|^2$. El valor de regularización (ver Ec. 18) determina el "peso" que debe darse a $|G_2|^2$ en el denominador de la función de transferencia H . Para valores muy grandes de regularización, el efecto del filtrado desaparece y se alcanza una condición equivalente a cuando el control está apagado. Para valores muy pequeños de regularización, dependiendo de las características del sistema (G_1 y G_2), es probable que el filtrado entregue una señal de control difícil o imposible de reproducir por el altavoz secundario, ya sea por niveles de señal muy altos o de intervalo dinámico muy grande. En ambos casos, el

control no cumple con el desempeño esperado, por lo que el valor de regularización, si bien, arbitrario en principio, debe escogerse con prudencia y meticulosidad.

Al realizar mediciones con otros materiales, particularmente la espuma de melamina, o "sonex", se encontró que un valor de referencia constante (la media geométrica) con respecto a la frecuencia no era lo más conveniente en todos los casos, por lo que se utilizó una regularización dinámica igual a $2|G_2|^2$.

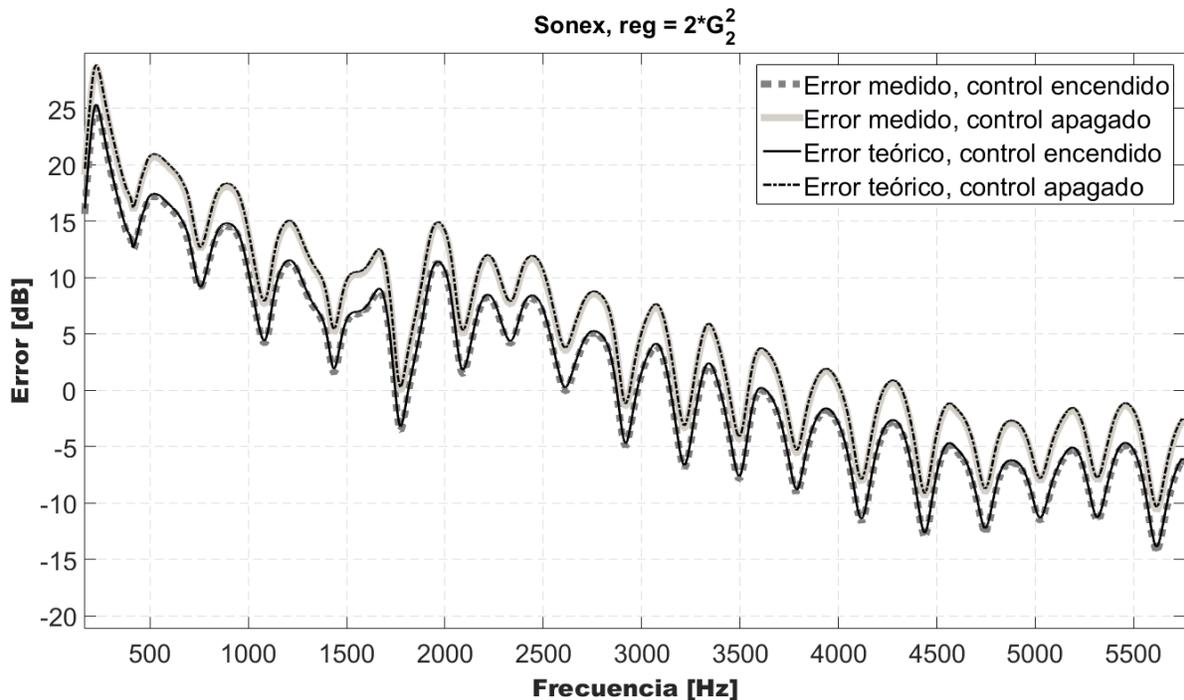


Figura 23. Errores teóricos y medidos para el caso con muestra de espuma de melamina (sonex). Para cada tipo de error se presenta tanto el valor con control encendido, como apagado. Valor de regularización variable $2|G_2|^2$.

En la gráfica anterior (Figura 23) la diferencia entre los errores teóricos con control encendido y apagado se mantienen en 3.52 dB, constantes para todo el intervalo de frecuencias; para el caso medido, el promedio de la diferencia es 3.5 dB, con un mínimo de 3.32 dB y un máximo de 3.65 dB. El promedio de diferencias entre el error teórico y medido con control encendido fue 0.26 dB.

Este cambio en el parámetro de regularización mantiene una diferencia más uniforme entre el error típico y el error mínimo, además, los valores experimentales guardan una correspondencia más estrecha y consistente con los valores teóricos calculados. Es importante observar que el parámetro de regularización dinámico $2|G_2|^2$, no reduce el intervalo dinámico del filtro de control, pero sí disminuye el nivel de potencia de señal requerido. Esto se muestra en la Figura 24.

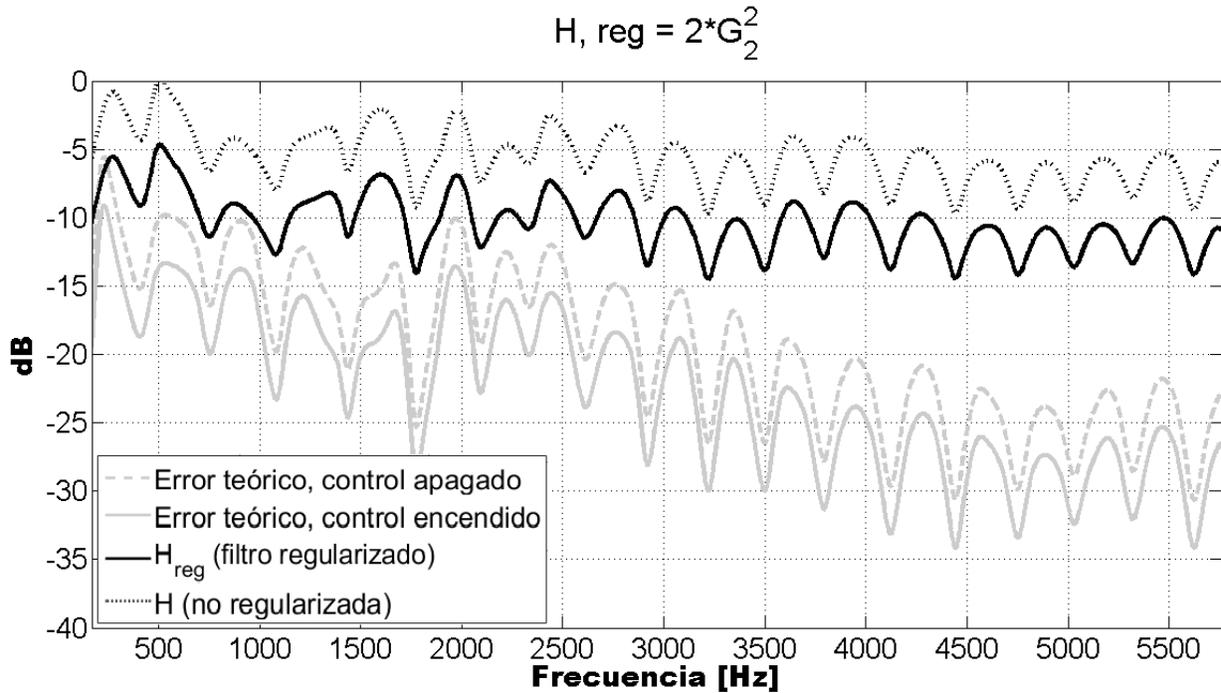


Figura 24. Comparación entre el filtro regularizado y sin regularizar. Es notable la reducción de nivel en alrededor de 5 dB.

Lo más importante de encontrar una forma eficaz de regularizar el filtro H , es que ello se traduzca en mejores resultados de la medición de nSTL, tal fue el caso de la regularización dinámica (ver la sección de resultados).

La absorción acústica lograda con la aplicación del control activo regularizado con $r = 2|G_2|^2$ se muestra en la Figura 25, junto con los coeficientes de absorción de las terminaciones pasivas usadas en los experimentos. Los coeficientes de absorción fueron obtenidos de acuerdo a la norma ISO 10534-2 para mediciones de absorción en tubo de impedancias. Como se explicó con anterioridad, en el caso de la absorción activa, la señal de error del sistema de control se diseñó para evitar reflexiones al final del segundo tubo (downstream), esto con la finalidad de obtener una mayor absorción que con las condiciones puramente pasivas.

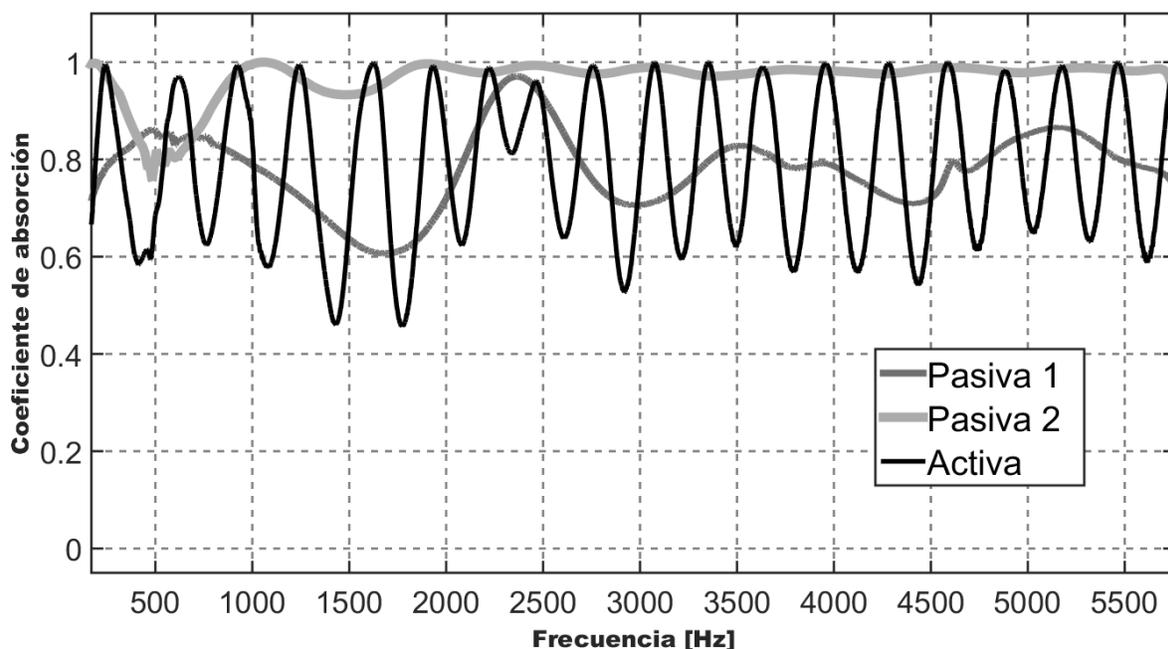


Figura 25. Coeficientes de absorción de las tres terminaciones usadas en los experimentos. Valores obtenidos de acuerdo a la norma ISO 10534-2.

Los altibajos del coeficiente de absorción medido cuando el control está encendido (Activa), revelan los límites de desempeño del control activo en las condiciones específicas de esta aplicación, posiblemente causados por bajos niveles de la señal en las posiciones de los micrófonos 3 y 4, alrededor de las frecuencias de anti-resonancia, provocando una estimación inexacta de la señal de error. Por otra parte, alrededor de las frecuencias de resonancia, la absorción activa es muy cercana al 100%, y lo que es más, como se mostrará más adelante en los resultados de nSTL obtenidos (capítulo 5), aun cuando no se alcanza una absorción activa alta a todas las frecuencias, los cambios obtenidos en la terminación activa de la segunda sección del tubo permiten una aplicación exitosa de las técnicas normalizadas para medir el nSTL.

4. 6 Procedimiento de medición

A manera de resumen, en la Figura 26 se muestra un diagrama de flujo simplificado de los pasos a seguir en el proceso de medición de nSTL, tanto para el caso puramente pasivo, como el caso pasivo-activo.

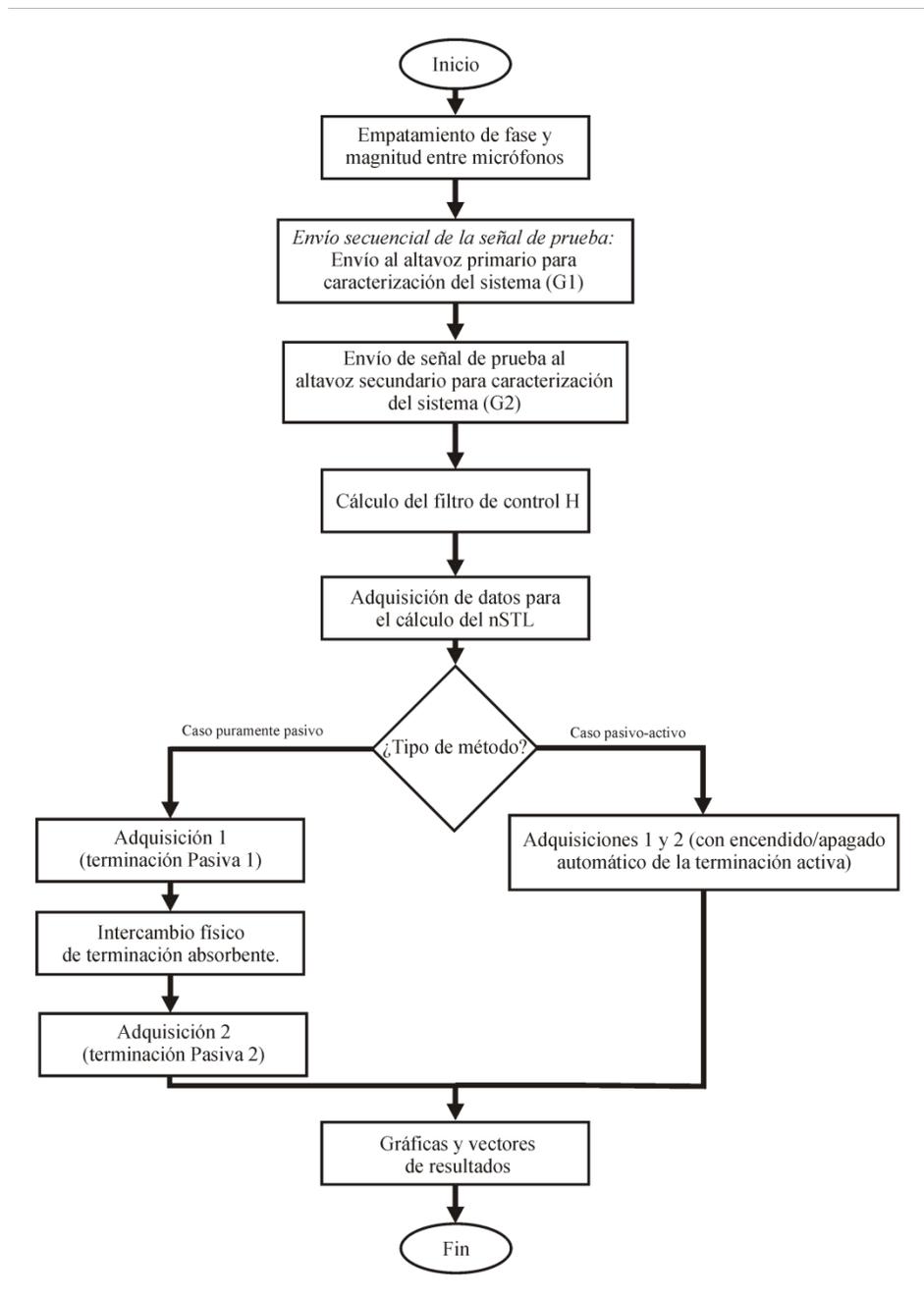


Figura 26. Diagrama de flujo que ejemplifica el proceso de medición de nSTL de una muestra de prueba con el tubo de transmisión.

4. 7 Medición del parámetro de aislamiento máximo del tubo de transmisión, R_{max}

Al medir muestras particularmente aislantes, es posible que una parte relativamente grande del nivel de energía al interior de la segunda sección del tubo provenga no sólo del sonido que directamente atravesó la muestra, sino también de sonido y vibraciones que llegaron al mismo punto por rutas de flanqueo (Figura 27). La energía proveniente de estas rutas no contiene información útil sobre el comportamiento de la muestra bajo prueba, contaminando el resultado final de la medición. Resulta entonces indispensable tener conocimiento, previo a la medición, de

los valores límite de aislamiento medible por el sistema, a partir de los cuales, la correlación entre la energía medida antes y después de la muestra empieza a disminuir significativamente. En la norma para el método de medición de aislamiento con cámara de transmisión [ISO 10140-5:2010], se dan lineamientos y una metodología para calcular el "máximo índice de reducción sonora medible" R_{max} , pero actualmente no existen en la literatura reportes referentes a alguna técnica para determinar el "máximo índice de pérdida de transmisión en incidencia normal" que un tubo de transmisión es capaz de medir. El parámetro de máximo nSTL (al que, por analogía, también se llamará R_{max}), representa los valores máximos de aislamiento medible por el tubo de transmisión, antes de que la energía transmitida por vibración de las paredes y otras rutas alcance un nivel que afecte el resultado, lo cual permite juzgar la validez de los resultados de una medición en una muestra que se desempeñe cerca de esos límites.

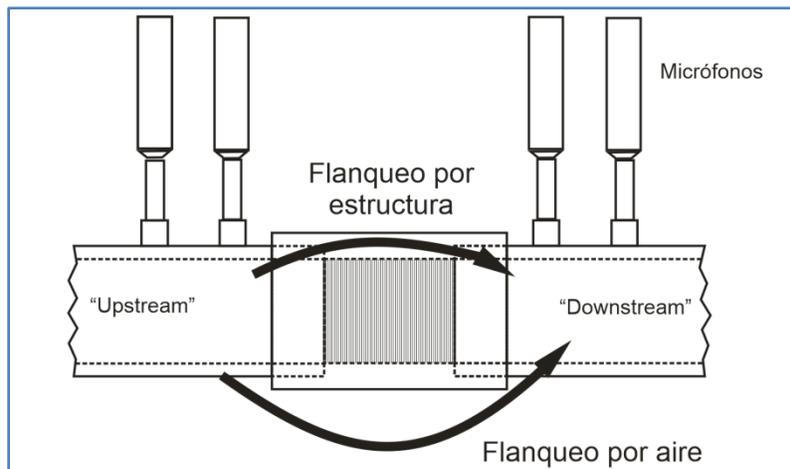


Figura 27. Ilustración de las posibles rutas de flaqueo. La energía que alcanza la segunda sección del tubo por estas rutas no es representativa de la muestra de prueba.

Aprovechando el hecho de que se cuenta con un par de micrófonos a ambos lados de la muestra (y con una separación apropiada para las longitudes de onda de interés más pequeñas), se propuso obtener R_{max} como el cociente de la intensidad acústica antes y después de la muestra. La intensidad acústica se define como la cantidad de flujo de energía que atraviesa una cierta área, sus unidades son watts sobre metro cuadrado y es una magnitud física de carácter vectorial. De acuerdo a esta definición, se anticipa que debe existir un flujo neto de energía para que la parte real de la intensidad (intensidad activa) sea distinta de cero. Por ejemplo, en un tubo de ondas planas estacionarias, con terminaciones idealmente rígidas, no hay un flujo neto de energía, por lo que se dice que hay un campo acústico puramente reactivo y la intensidad activa es nula. En contraste, si hay absorción en alguno de los extremos del tubo, el vector de intensidad será distinto de cero y apuntará en dirección a la terminación que está absorbiendo energía.

La intensidad acústica instantánea es la razón por unidad de área a la que un elemento de fluido hace trabajo sobre otro elemento adyacente, y está dada por el producto de la presión acústica por la velocidad de partícula [Kinsler, 2000]. Sus unidades son watts sobre metro cuadrado,

$$I(t) = p(t)u(t) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ec. 42

Habitualmente, se promedia esta cantidad sobre algún intervalo de tiempo. A partir de las presiones adquiridas con dos micrófonos separados una distancia Δr , la intensidad acústica se puede calcular como el producto del promedio de las presiones por la velocidad de partícula, calculada a partir del gradiente de presión [Fahy, 1977]:

$$I(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \cdot \int -\frac{(p_1(t) - p_2(t))}{\rho \Delta r} dt, \quad \text{Ec. 43}$$

donde ρ es la densidad del medio y Δr es la separación entre los micrófonos. El primer factor de la Ec. 43 es el promedio de la presión y la integral se hace sobre el gradiente de presiones para obtener la velocidad. Pasando al dominio de la frecuencia, la Ec. 43 puede escribirse de la siguiente manera:

$$I(\omega) = \frac{P_1(\omega) + P_2(\omega)}{2} \cdot \frac{(P_1(\omega) - P_2(\omega))^*}{-j\omega\rho \Delta r} \quad \text{Ec. 44}$$

Desarrollando el producto del numerador de la Ec. 44,

$$I(\omega) = \frac{|P_1|^2 + (P_1^*P_2 - P_1P_2^*) + |P_2|^2}{-2j\omega\rho \Delta r} \quad \text{Ec. 45}$$

$$I(\omega) = \frac{Im\{P_1P_2^*\}}{\omega\rho \Delta r} - \frac{|P_1|^2 + |P_2|^2}{2j\omega\rho \Delta r} \quad \text{Ec. 46}$$

De la Ec. 46 es posible obtener las intensidades activa I_A y reactiva I_R :

$$I_A = \frac{1}{2} Re\{I(\omega)\} = \frac{Im\{P_1P_2^*\}}{2\omega\rho \Delta r} \quad \text{Ec. 47}$$

$$I_R = \frac{1}{2} Im\{I(\omega)\} = -\frac{|P_1|^2 + |P_2|^2}{4j\omega\rho \Delta r}$$

Ahora bien, para llevar a cabo la caracterización de R_{max} , es necesario colocar como muestra un material que represente la condición más aislante (masiva) posible. Para cumplir esta función, se utilizó una muestra de latón macizo de 4 pulgadas de largo y 3.5 cm de diámetro, que coincide con la sección transversal del tubo de transmisión. El parámetro R_{max} se calcularía como el cociente de las intensidades activas después y antes de la muestra (ramas *downstream* y *upstream*), respectivamente:

$$R_{max} = \frac{Re\{I_{down}\}}{Re\{I_{up}\}} \quad \text{Ec. 48}$$

En la práctica, la expresión anterior no es utilizable, pues analizando la primera rama (*upstream*) del tubo, al tener una absorción despreciable del sonido incidente sobre la muestra, la intensidad activa en dirección hacia ella es muy pequeña o casi nula o, dicho de otra forma, el campo al interior de la primera rama del tubo es predominantemente reactivo. Por esta razón, se utilizó la intensidad reactiva en ambas ramas para el cálculo:

$$R_{\max} = \frac{\text{Im}\{I_{\text{down}}\}}{\text{Im}\{I_{\text{up}}\}} \quad \text{Ec. 49}$$

La Figura 28 evidencia esta necesidad. En ella se aprecia la enorme diferencia en dB que hay entre la intensidad activa en la primera sección y los otros tres casos, particularmente con las intensidades reactivas.

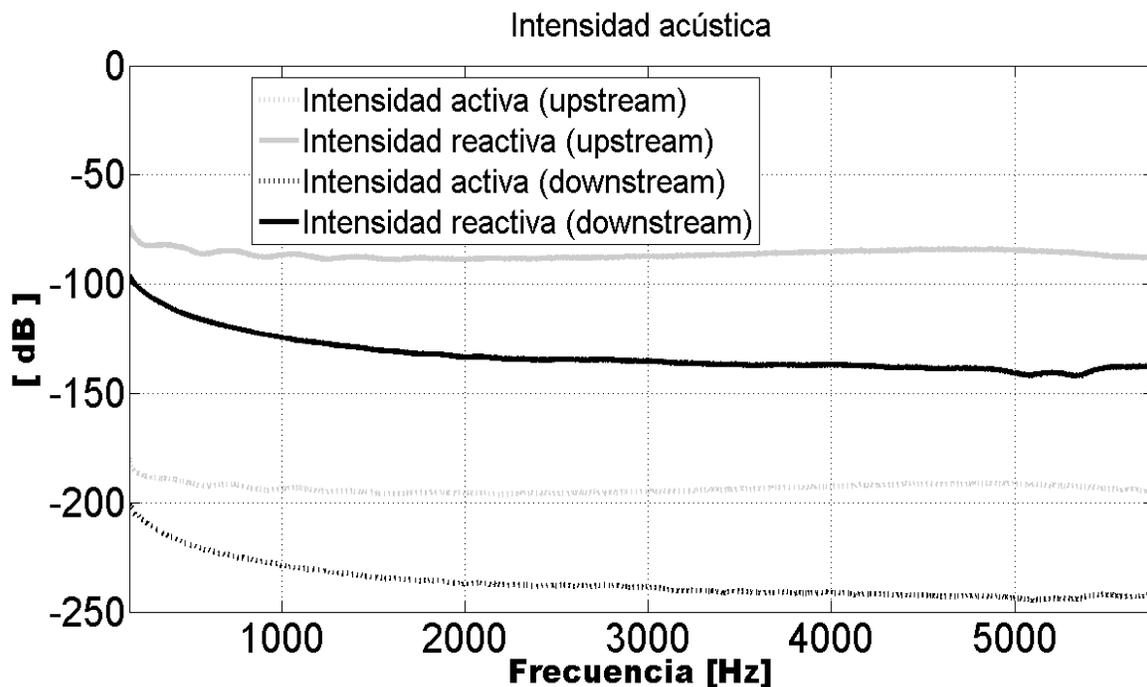


Figura 28. Intensidad activa y reactiva para cada rama del tubo con el bloque masivo de latón como muestra.

Los resultados de la medición de R_{\max} usando el cálculo de la intensidad reactiva y activa, para comparación, se muestran en la Figura 29. En altas frecuencias se alcanza un aislamiento hasta de más de 30 dB mayor que en frecuencias por debajo de los 500 Hz. Todo el intervalo útil está entre unos 10 dB y 48 dB. Puesto que la intensidad reactiva I_R es mucho mayor que la intensidad activa I_A (diferencias del orden de 100 dB), la magnitud de la intensidad compleja es prácticamente igual a la magnitud de I_R , por lo que no resulta ilustrativo reportarla.

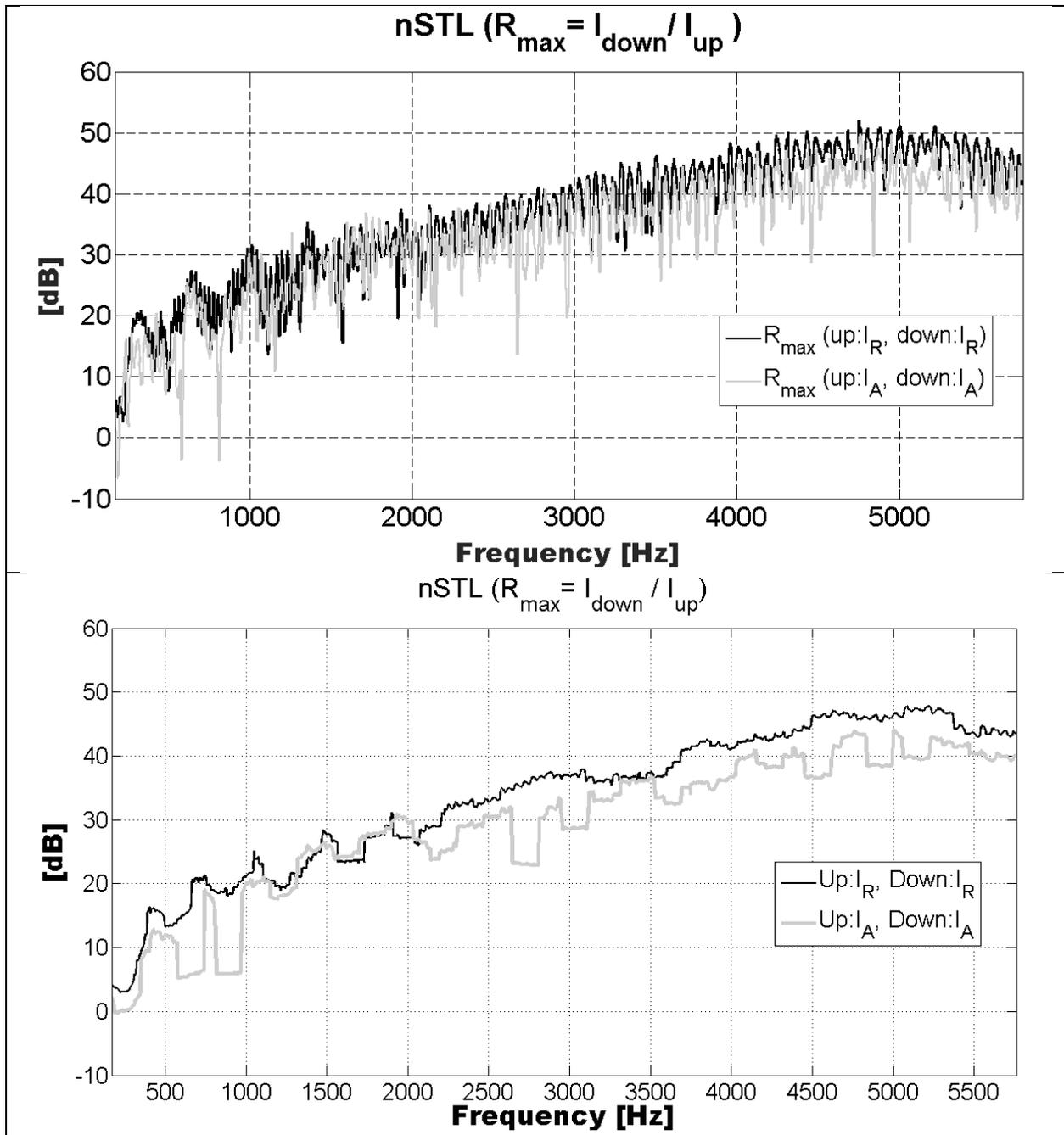


Figura 29. Parámetro de máximo aislamiento (R_{max}), calculado con las intensidades acústicas medidas antes y después de la muestra masiva. En ambas gráficas se aplicó una promediación móvil a los datos en frecuencia para suavizar sus perfiles; en la gráfica superior la promediación es de 25 puntos, mientras que en la gráfica inferior es de 250 puntos.

En la Figura 29 se observa que el efecto de la aplicación de una promediación móvil sobre el eje de frecuencias^{vi} es diferente según la longitud o número de elementos de promediación

^{vi} Esta promediación en el dominio de la frecuencia sería análoga a la aplicación, sobre una serie de tiempo, de un filtro FIR, con N coeficientes unitarios en el polinomio numerador y denominador igual a la constante N .

empleado; cuando R_{max} es calculado con intensidades activas, el promedio con 250 puntos no es capaz de revelar una tendencia suficientemente clara, como en el caso reactivo (aunque para el promedio con 25 puntos, los resultados den la apariencia de ser muy parecidos). Esto se debe muy probablemente a que las intensidades activas tienen un valor muy pequeño, tal como se mostró en la Figura 28, comprometiendo el cociente de intensidades con valores poco confiables. Por lo anterior, se considera que el cálculo de R_{max} utilizando intensidades reactivas es el más apropiado para representar las capacidades de medición de máximo aislamiento de un tubo de transmisión.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5. 1 Mediciones de nSTL comparando los métodos pasivo-activo y puramente pasivo

Los experimentos se llevaron a cabo siguiendo el método de dos cargas de la norma ASTM E2611-09. Como fue descrito en el capítulo 4, se utilizaron dos pares diferentes de terminaciones absorbentes: Pasiva 1 / Activa on, y Pasiva 1 / Pasiva 2. Se midieron dos muestras de diferentes materiales; una muestra de fibra de poliéster-polipropileno de 1 cm de longitud y densidad de 16.2 kg por metro cuadrado; y una muestra de 2 pulgadas de longitud compuesta de una espuma de melamina (sonex) con densidad de 9.6 kg por metro cúbico. Cada muestra se preparó para ajustar en el portamuestras de acuerdo a las recomendaciones de la norma. Las pruebas se realizaron sin desmontar o mover la muestra de prueba en turno. En las mediciones en que se usó la terminación pasiva-activa, los elementos absorbentes de la configuración Pasiva 1 permanecieron en su lugar durante toda la medición, y el cambio en la condición del final del tubo se debió solamente al encendido o apagado de la absorción activa. Las mediciones con las terminaciones puramente pasivas (Pasiva 1, Pasiva 2) se usaron como referencia de comparación. La Tabla 5 resume las mediciones que se reportan en este trabajo.

Tabla 5. Mediciones reportadas. Las características de las terminaciones Pasiva 1, Pasiva 2 y Activa on están explicadas al inicio de esta sección.

<i>Material</i>	<i>Terminación (física)</i>	<i>Condición de absorción</i>
Sin muestra	Puramente pasiva	Pasiva 1 / Pasiva 2
	Pasiva – activa	Pasiva 1 / Activa on
Fibra de poliéster-polipropileno	Puramente pasiva	Pasiva 1 / Pasiva 2
	Pasiva – activa	Pasiva 1 / Activa on
Espuma de melamina (sonex)	Puramente pasiva	Pasiva 1 / Pasiva 2
	Pasiva – activa	Pasiva 1 / Activa on

Los resultados obtenidos para el nSTL del caso sin muestra y la muestra de fibra de poliéster-polipropileno están en las Figuras 30 y 32, respectivamente, y en la Figura 33 para la muestra de espuma de melamina.

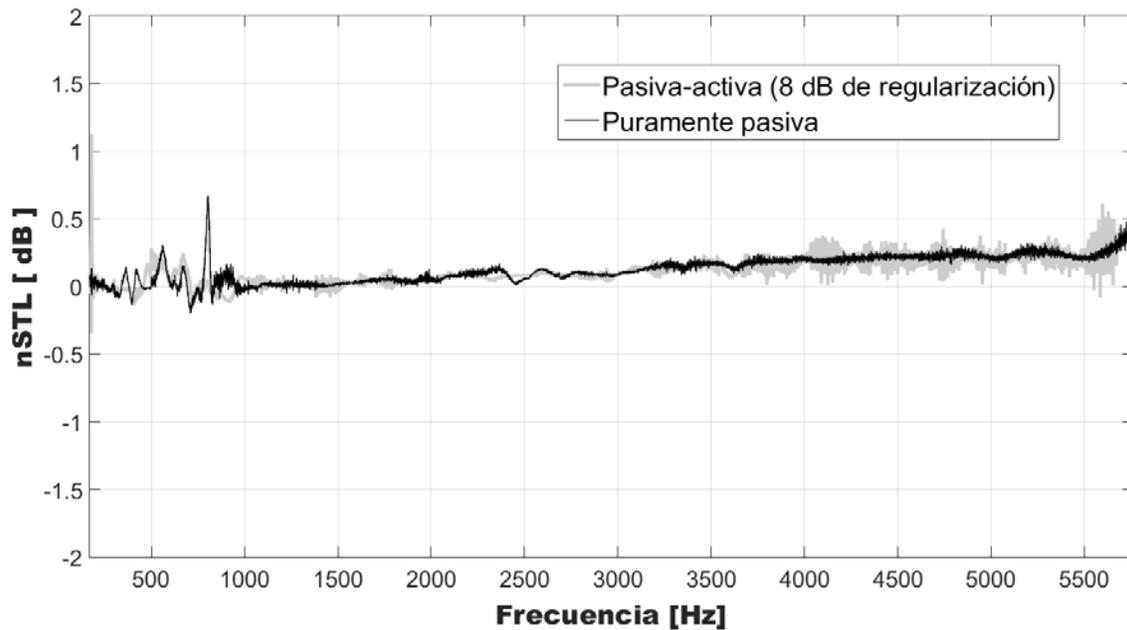


Figura 30. Valores medidos de nSTL con el método puramente pasivo y el método pasivo-activo para el caso sin muestra (valores cercanos a 0 dB).

En la Figura 30 se presentan los resultados para el caso trivial, es decir, cuando no hay muestra y la transmisión acústica debería ser total, o bien, el nSTL tiene un valor teórico de 0 dB. Los valores medidos coinciden con el valor teórico dentro de un margen de -0.05 y +0.25 dB. Al igual que para las muestras de poliéster y melamina, la medición se realizó en ambas modalidades; puramente pasiva y pasiva-activa.

Estos datos se utilizaron para efectos de validación de las mediciones con muestras de prueba, puesto que tales mediciones se llevaron a cabo antes de la construcción y caracterización de la muestra patrón para calibración propuesta en este trabajo (estrechamiento de sección transversal). Además, se realizó una calibración del sistema de forma que el nSTL, principalmente en bajas frecuencias, tuviera un valor lo más cercano posible a 0 dB. Para realizar el ajuste, se modificaron las ganancias de los micrófonos en la tarjeta de adquisición. Éste resultado comienza a tomar valores superiores a 0 dB hacia altas frecuencias, lo que revela pequeñas pérdidas, menores a 1 dB en las paredes del tubo y en el aire. Para prototipos a construir en el futuro, sería posible acortar más las longitudes de cada sección del tubo sin infringir las recomendaciones de la norma ASTM y con ello reducir las pérdidas observadas.

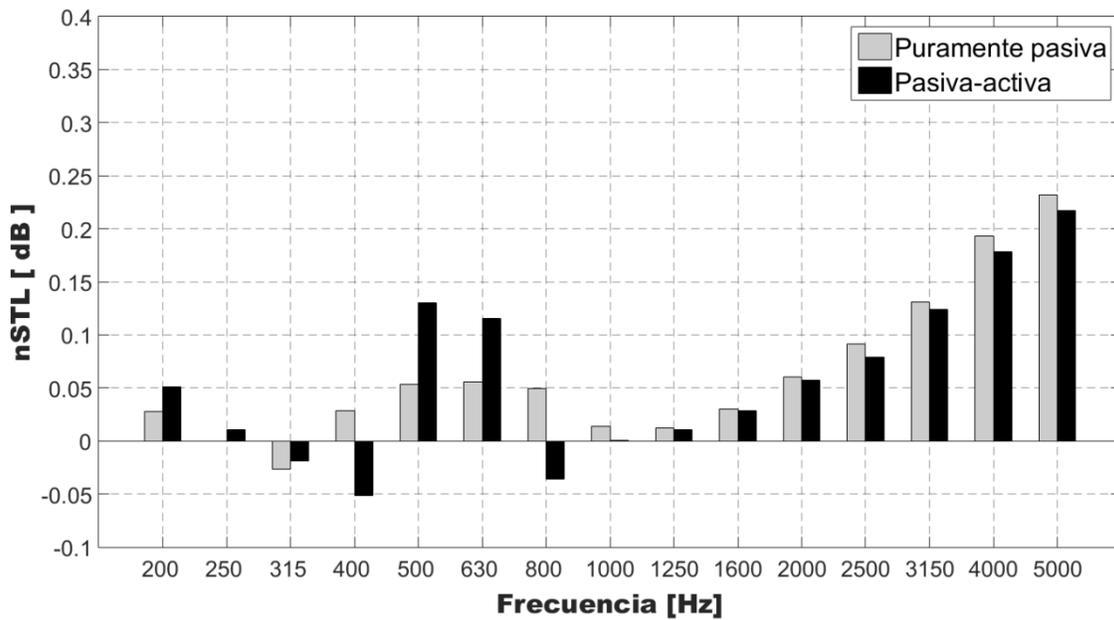


Figura 31. Valores medidos de nSTL, integrados en bandas de tercios de octava, para el caso sin muestra.

Integrada en bandas, la máxima diferencia en las mediciones sin muestra (Figura 31) fue de 0.08 dB para las bandas de tercios de octava de 400, 500 y 800 Hz, y la diferencia promedio es 0.03 dB. De acuerdo al artículo de Doutres [Doutres et al, 2012], ésta medición es suficiente para validar las subsecuentes caracterizaciones de materiales, sin embargo, y como se propuso con detalle en la sección del modelado de un estrechamiento, del capítulo 4, sería más apropiado utilizar una muestra no trivial que sea más representativa de los valores de aislamiento que típicamente se van a medir. La norma ASTM E2611-09 no especifica ningún método de calibración para el sistema, mientras que Doutres, et al, quienes ocupan esta técnica, cuentan al menos con el aval de una revista arbitrada. Ahora obsérvense los resultados de las muestras de fibra y espuma de las Figuras 32 y 33:

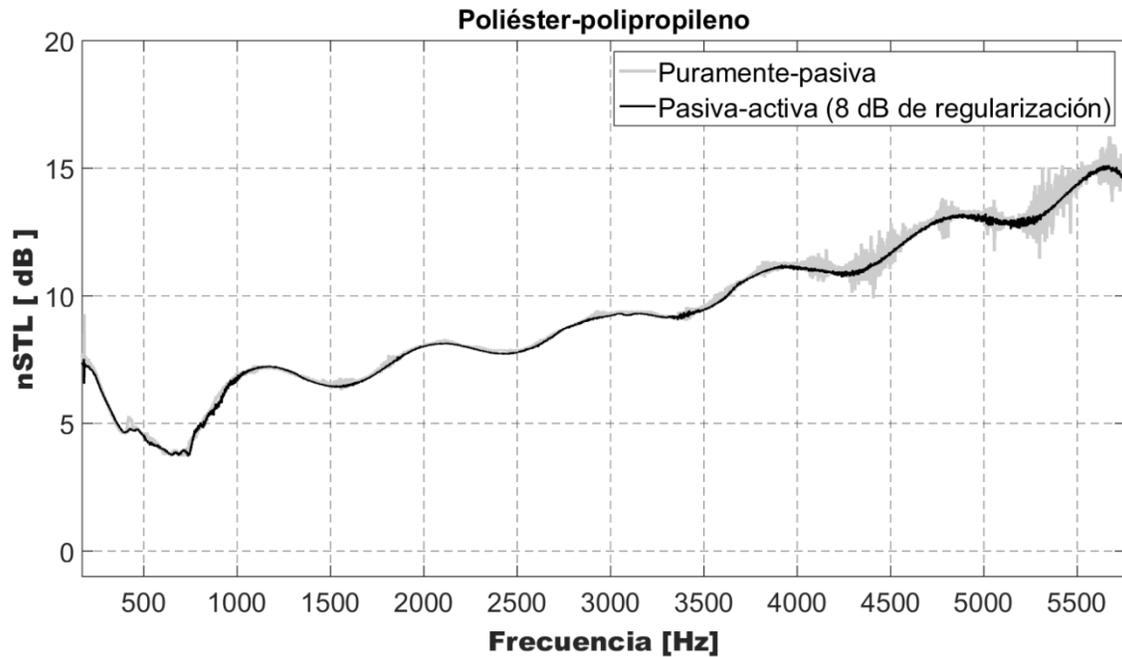


Figura 32. Valores medidos de nSTL con el método puramente pasivo y el método pasivo-activo para la muestra de fibra de poliéster-polipropileno.

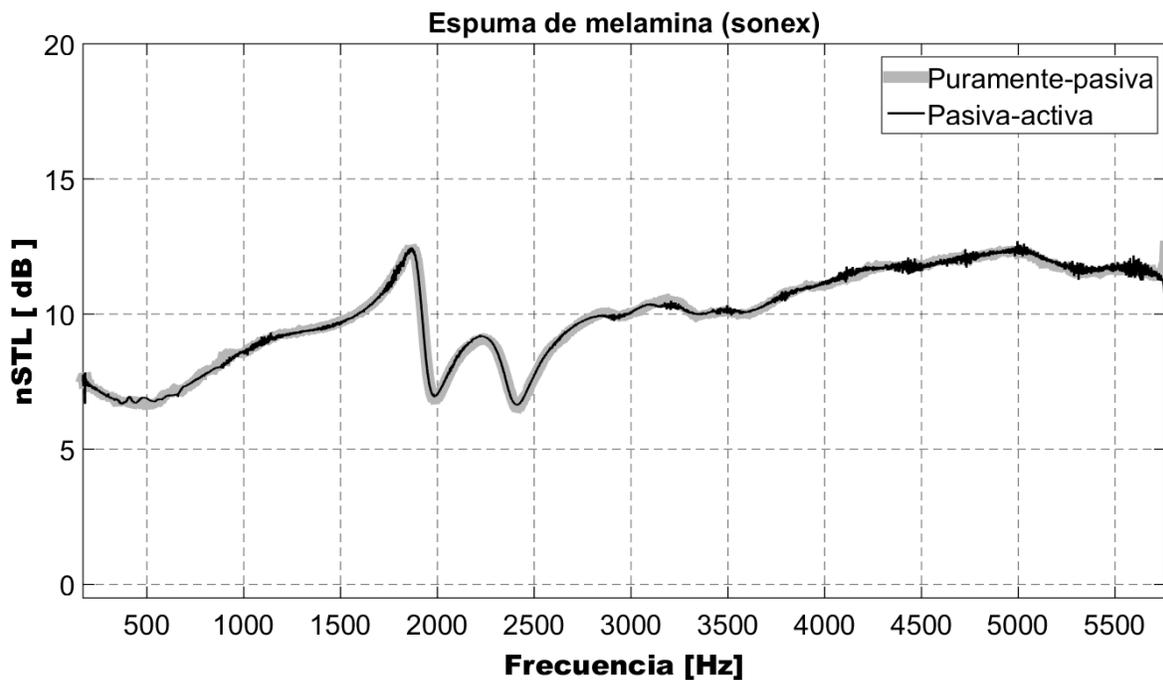


Figura 33. Valores medidos de nSTL con el método puramente pasivo y el método pasivo-activo para la muestra de espuma de melamina (sonex).

En ambos casos, el resultado del método pasivo-activo siguió razonablemente bien la tendencia de los resultados obtenidos con el método puramente pasivo. Se aprecia un rizo en altas

frecuencias con diferencias de hasta +/- 1.5 dB para el poliéster-polipropileno, y +/- 0.4 dB para la melamina.

Cuando los resultados se integran en bandas de frecuencia de tercios de octava (Figuras 34 y 35), la diferencia promedio se reduce a +/- 0.08 dB para poliéster polipropileno y +/- 0.04 dB para la melamina.

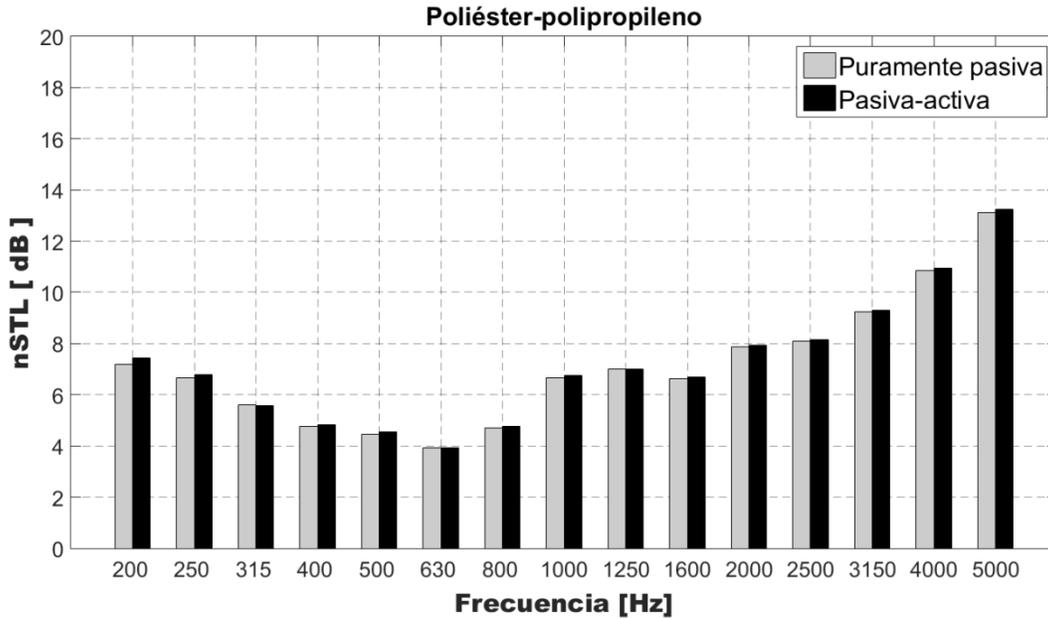


Figura 34. Valores medidos de nSTL, integrados en bandas de tercios de octava, para la muestra de fibra de poliéster-polipropileno.

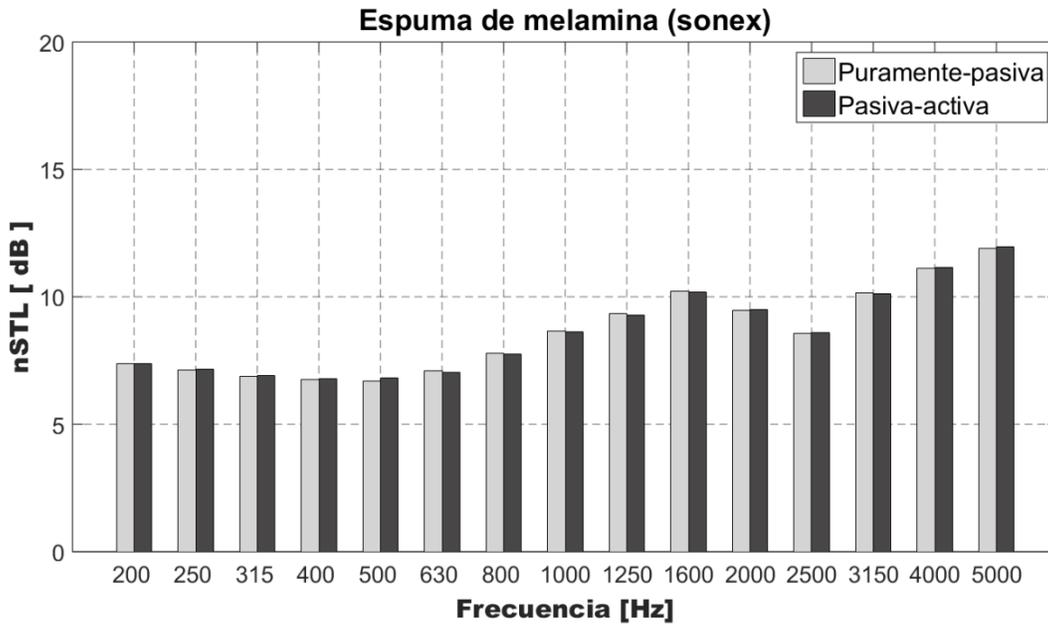


Figura 35. Valores medidos de nSTL, integrados en bandas de tercios de octava, para la muestra de espuma de melamina (sonex).

Es importante destacar que, siendo muy pequeñas las diferencias entre los valores obtenidos por ambos métodos, se puede juzgar como satisfactorio el desempeño del control activo.

5. 2 Medición de las variaciones relacionadas con el intercambio activo o pasivo de las terminaciones

Con la muestra de espuma de melamina montada en el tubo, se realizó un estudio de la variación en el resultado de las mediciones de nSTL. Las Figuras 36 y 37 muestran la desviación estándar de nSTL de dos grupos de 10 mediciones con cada uno de los métodos utilizados (puramente pasivo y pasivo-activo). Involucrando cambios únicamente en las terminaciones absorbentes durante la medición, este cálculo se realizó con la intención de demostrar la ventaja en la repetibilidad de los resultados al usar la terminación pasiva-activa sobre la puramente pasiva estándar. En las mediciones pasivo-activas la terminación activa se conmutó encendido/apagado 10 veces; mientras que las mediciones puramente pasivas requirieron cambiar físicamente las terminaciones absorbentes Pasiva 1 y Pasiva 2, también 10 veces.

Se puede observar que, en general (excepto en la banda de 200 Hz), la desviación estándar es menor cuando se utiliza la terminación pasiva-activa, lo que puede considerarse como una prueba de su ventaja práctica. La desviación estándar promedio se redujo de 0.089 a 0.045 dB, es decir, una diferencia a favor de 0.044 dB que, en comparación con el error promedio de 0.140 dB reportado por Bonfiglio y Pompoli [Bonfiglio, 2008] como valor de referencia encontrado en la literatura reciente, representa una mejora relativa significativa de casi el 50% en términos de reducción de error al usar la técnica propuesta en este trabajo, en contraste con la técnica puramente pasiva de la norma ASTM E2611-09.

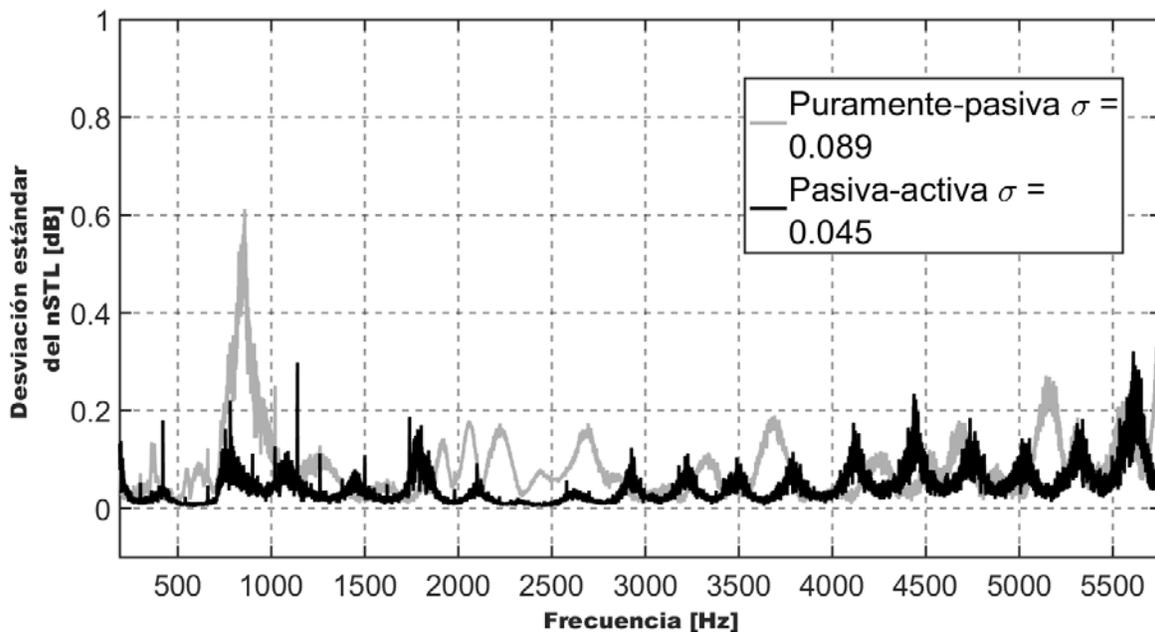


Figura 36. Promedio de la desviación estándar de 10 mediciones de nSTL por método puramente pasivo y pasivo-activo.

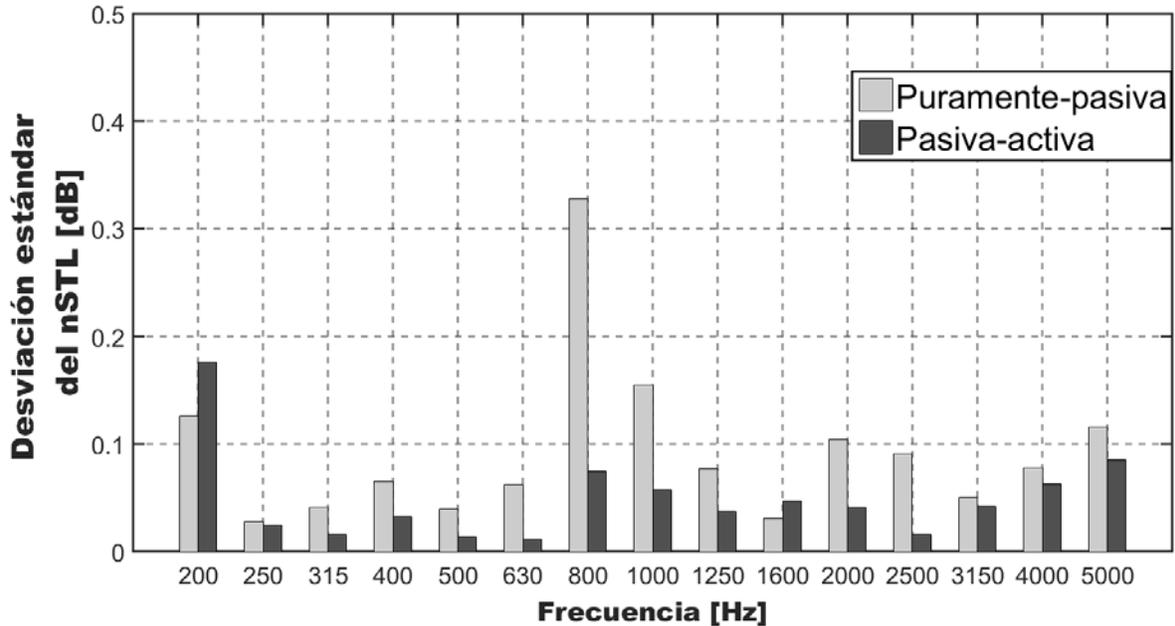


Figura 37. Integración por bandas de tercios de octava de la desviación estándar mostrada en la Figura 36.

5.3 nSTL del tubo de calibración

Teniendo como referencia de comparación un modelo analítico unidimensional (en ondas planas) de nSTL de un estrechamiento abrupto de la sección transversal y una simulación numérica tridimensional que verifica que se cumpla la condición de onda plana en los puntos críticos del tubo de transmisión, se realizó la medición de nSTL del estrechamiento mostrado en la sección "*Modelado matemático de un cambio en la impedancia de un tubo por estrechamiento de su sección transversal*" del capítulo 3, Figura 20.

El procedimiento de medición fue el estándar de dos cargas, puramente pasivo, que señala la norma ASTM E2611-09. No se utilizó el método activo porque, siendo un método nuevo, se prefirió evitar el involucramiento de otros factores.

El nSTL obtenido experimentalmente es comparado en la Figura 38 con el valor teórico de la Ec. 30, ajustada con las correcciones de longitud de extremo del modelo de esfera pulsante y el del artículo de Karal, ecuaciones 38 y 41, respectivamente.

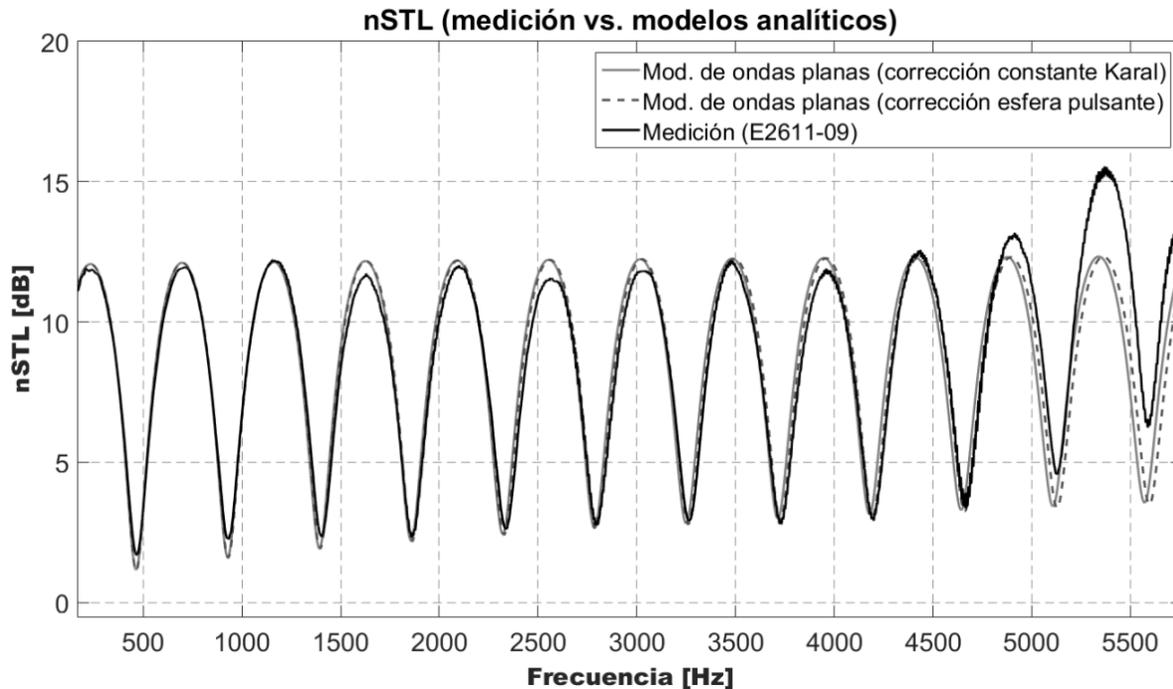


Figura 38. Comparación entre el valor teórico (modelo de ondas planas) y experimental de nSTL para el estrechamiento. El modelo de ondas planas se presenta en dos modalidades, con corrección de extremo dependiente de la frecuencia, basada en modelo de esfera pulsante; y con corrección de extremo constante basada en la aproximación de Karal.

En términos generales, los modelos teóricos ajustan bien con el resultado de la medición. Las diferencias más notorias son los niveles de los máximos locales, principalmente en altas frecuencias, en donde llega a haber diferencias de hasta cerca de 3 dB entre ambas curvas. Los altibajos en algunos máximos de la medición obedecen a un defecto de fabricación en el estrechamiento; en su interior, hay un borde o ligero escalón de menos de un milímetro, que angularmente se extiende unos 90° y cuya distancia a los extremos es 15.8 y 20.65 cm. Al reflejarse parte de la energía en la irregularidad, aparecen resonancias de pequeña amplitud, espaciadas $\Delta f_{15} \approx 1085 \text{ Hz}$ y $\Delta f_{20} \approx 830 \text{ Hz}$, suficientes para deformar el patrón de pérdida de transmisión (más notablemente en los máximos de entre 1500 y 4000 Hz). Hasta el momento, no se tiene una hipótesis satisfactoria del porqué se alejan tanto los valores teórico y medido en las frecuencias altas, sin embargo, esto da argumentos cualitativos y provisionales del porqué es necesaria una referencia de calibración diferente a la trivial de 0 dB, y poder así ponderar los resultados obtenidos con cada tubo de transmisión en particular.

Utilizando el mismo modelo que se creó para simular el campo acústico tridimensional dentro del tubo con COMSOL Multiphysics® (capítulo 3), se calculó el nSTL con diferentes consideraciones físicas que incorporan la simulación de pérdidas en las fronteras y en el medio. Los resultados de las simulaciones, modelo de onda plana y medición aparecen en la Figura 39.

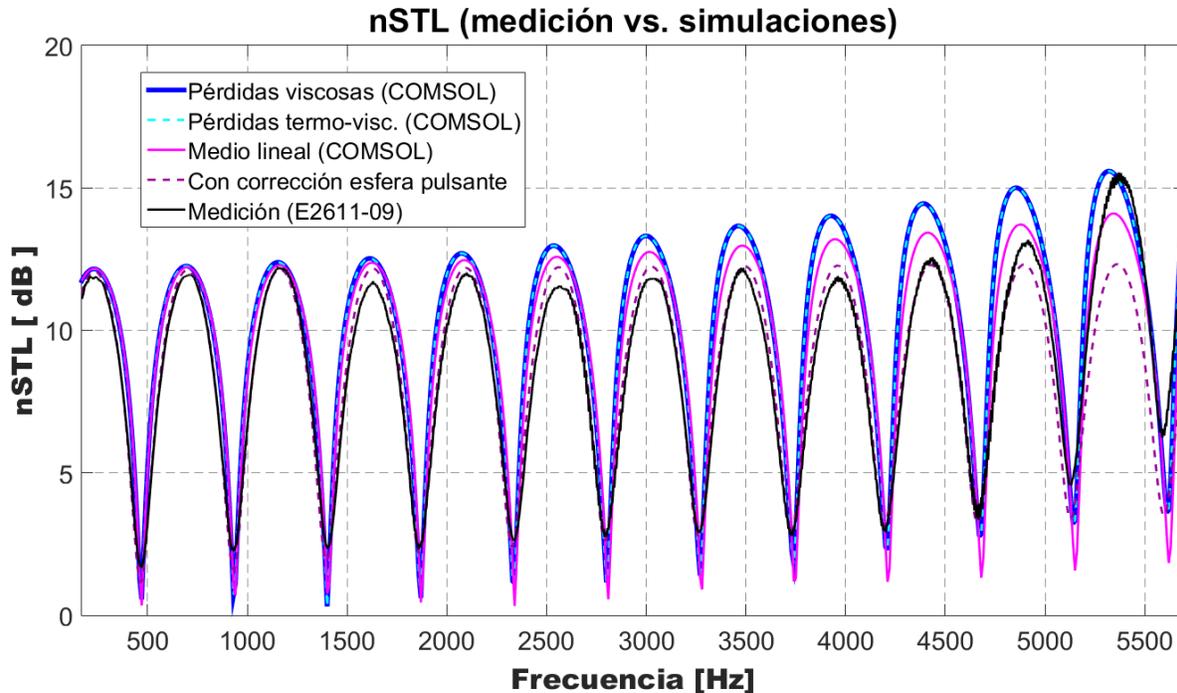


Figura 39. Comparación de nSTL del estrechamiento obtenido experimentalmente y por medio de diferentes simulaciones realizadas en COMSOL®.

Después de analizar estos resultados, se concluyó que el modelo de onda plana siguió siendo el más apropiado, no sólo por la sencillez de su formulación, sino también porque es el más cercano al comportamiento observado experimentalmente.

Una manera de utilizar el estrechamiento como referencia de calibración es efectuar la resta de la curva de sus valores de nSTL medidos menos los valores teóricos y, a su vez, restar este resultado (curva de compensación o calibración) al nSTL de las mediciones hechas en los materiales de interés. Después de haber analizado los resultados de la medición con el estrechamiento utilizado, resulta claro que se necesita contar con un estrechamiento de sección transversal constante, para tener una curva de calibración confiable. Desafortunadamente, no se contó con suficiente tiempo para construir y caracterizar un estrechamiento con mejores características que las del referido en este trabajo.

Por último, es importante mencionar que cabe la posibilidad de construir estrechamientos de distintos diámetros si se desea utilizar una referencia de calibración con diferentes valores de nSTL, por ejemplo, para utilizar en la medición de muestras acústicamente más, o menos aislantes (estrechamientos de diámetro interno menor o mayor, respectivamente), que las utilizadas aquí. Esto proporcionaría una referencia representativa de los valores que habitualmente se van a medir en muestras de prueba.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El uso de una terminación activa demostró ser una ventaja práctica para la medición de nSTL. Fue posible alcanzar resultados con mejor repetibilidad, que aquellos obtenidos con el uso de terminaciones puramente pasivas, ya que no se requirió de la manipulación física del aparato durante las mediciones pasivo-activas. La norma ASTM E2611-09 no especifica la manera en que se deben implementar las dos terminaciones absorbentes; y los resultados obtenidos en este trabajo indican que el cambio de impedancia que puede producirse con el uso de una terminación activa es una alternativa viable y efectiva para esos fines. Excluyendo el altavoz o driver de control y su adaptación al tubo, el sistema de control activo fue implementado con el mismo equipo que se utiliza en las mediciones hechas de acuerdo a la norma.

Los puntos más relevantes del trabajo realizado para esta tesis son los siguientes:

- Se diseñó y construyó un tubo de transmisión con un intervalo útil de 178 a 5680 Hz, en concordancia con las normas ASTM E2611-09 e ISO10534-2.
- Se diseñó y construyó una cavidad acústica para la igualación de fases y magnitudes de los micrófonos, lo que permite utilizar micrófonos de medición "no pareados". En contraste, las versiones comerciales del tubo de transmisión incluyen micrófonos "pareados" en fase y amplitud, lo cual incrementa considerablemente el costo del aparato.
- Se diseñó un esquema de control activo de lazo abierto (filtrado óptimo) para minimizar la reflexión del sonido incidente en la terminación del tubo de transmisión, con el objetivo de automatizar el cambio de carga y evitar el intercambio físico de la terminación durante las mediciones de nSTL por el método de dos cargas.
- Se propuso una versión regularizada del filtro óptimo obtenido. El valor de regularización es un término sumado en el denominador de la función de transferencia del filtro que tiene el efecto de acotar el intervalo dinámico de la función de respuesta del filtro y, a su vez, de la señal de control, de manera que sea reproducida adecuadamente por el sistema electroacústico. Se observó que es necesario aplicar criterios heurísticos en la elección del valor de regularización, de acuerdo a la calidad de los resultados obtenidos.
- Debido a que en la literatura consultada no existe un método estandarizado de calibración del tubo de transmisión, ni una muestra patrón con una adecuada representación teórica, se propuso, diseñó y construyó una muestra patrón con características geométricas sencillas (tubo de calibración con estrechamiento de la sección transversal) y un modelo analítico bien definido, así como un método de utilización del modelo analítico para la interpretación o ponderación de los resultados obtenidos con el tubo de transmisión.
- Se realizaron simulaciones del campo acústico en el tubo de transmisión con el método de elemento finito, prestando particular atención a la vecindad del

estrechamiento en el tubo de calibración. Esto permitió verificar que el frente de onda, deformado a la entrada y salida del estrechamiento, recupera su carácter plano al alcanzar los micrófonos más cercanos a la muestra.

- Se midieron dos muestras de distinto material, con $nSTL$'s en el rango de 4 a 13 dB, por los métodos puramente pasivos indicados en la norma ASTM y por el método pasivo-activo propuesto en este trabajo, encontrando diferencias muy pequeñas (del orden de décimas de decibel) entre ambos resultados de $nSTL$, validándose así el método activo-pasivo de forma exitosa [Machuca-Tzili et al, 2016; Machuca-Tzili et al, 2017].
- Se propuso un método experimental basado en la intensidad acústica, para determinar el máximo valor de aislamiento $nSTL = R_{max}$ que es posible medir con el tubo de transmisión.
- Se realizaron pruebas que demuestran una mejor repetibilidad en la medición de $nSTL$ con el método pasivo-activo propuesto en este trabajo que con el método de puramente pasivo de la norma ASTM E2611-09.

El dispositivo y la técnica de medición presentados en este trabajo utilizan una sola terminación pasiva del tubo, pero aun dependen del procesamiento de dos mediciones con dos condiciones distintas de la terminación activa. Por ello, el dispositivo propuesto, o una versión similar mejorada, incorporando también una terminación activa, tiene el potencial de rebasar los alcances de la norma ASTM E2611-09 para mediciones del $nSTL$ en un tubo de transmisión. La posibilidad de lograr en el futuro una absorción activa del 100% en todo el intervalo útil de frecuencias, permitiría el desarrollo de técnicas de medición utilizando una sola condición de terminación del tubo.

Para esto, y considerando que el desempeño de la absorción activa es afectada por nodos, o zonas estacionarias de baja presión cercanas a los micrófonos a ciertas frecuencias, una posibilidad a explorar es colocar portamicrofonos en otras ubicaciones a lo largo de la segunda sección del tubo (downstream), de manera que se pueda medir la presión sonora fuera de las zonas nodales, y así obtener una señal de error mejor conformada, que mejore el desempeño de la absorción activa. Por otra parte, tal estrategia debería considerarse también dentro de ciertos límites prácticos, a fin de no complicar demasiado el diseño del dispositivo. Atendiendo a estas consideraciones, el tema estudiado en esta tesis, ofrece el potencial para continuar investigando nuevas técnicas de medición de propiedades acústicas de materiales en tubos.

REFERENCIAS EN ORDEN ALFABÉTICO

NORMAS

American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements*. ASTM E90 – 09.

American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*. ASTM E2611–09.

American Society for Testing and Materials. Manual Series: MNL 7, *Manual on presentation of data and control chart analysis*. Sixth Edition, p. 54.

British Standard. Acoustics – *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method*. ISO 10534-2:2001.

British Standard. Acoustics – *Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation*. ISO 10140-2:2010.

British Standard. Acoustics — *Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 5: Requirements for test facilities and equipment*. ISO 10140-5:2010.

British Standard. Acoustics — *Preferred frequencies*. ISO 266:1997.

ARTÍCULOS Y LIBROS

A.R. Barnard y M. D. Rao. *Measurement of sound transmission loss using a modified four microphone impedance tube*. NOISE-CON 2004, July 12 – 14.

D. T. Blackstock. *Fundamentals of physical acoustics*. Wile-Interscience publication, pp 43. EUA, 2000.

H. Boden y M. Aborn. *Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 105, 65-73, 1986.

P. Bonfiglio y F. Pompoli. *A single measurement approach for the determination of the normal incident transmission loss*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 124, No. 3, September 2008.

J. Y. Chung y D. A. Blaser. *Transfer function method in-duct acoustic properties. I. Theory, and II. Experiment*. J. Acoust. Soc. Am. Vol.68, No. 3, Sept, 1980.

P. Dong-Li, H. Peng, Z. Bei-Li. *The modified method of measuring the complex transmission coefficient of multilayer acoustical panel in impedance tube*. Applied Acoustics. Vol. 69, 1240-1248, 2008.

O. Doutres, R. Panneton y Y. Salissou. *An additional configuration to standard ASTM E2611-09 for measuring the normal incidence sound transmission loss in a modified impedance tube*. Proc. of the Acoustics 2012 Nantes Conference. 2029-2033. Abril, 2012. Francia.

-
- S. J. Elliot. *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, 2001.
- S. J. Elliott, P. Joseph, P. A. Nelson y M. E. Johnson. *Power output minimization and power absorption in the active control of sound*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 90, 2501–2512 (1991).
- F. J. Fahy. *Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 129, No. 5, May (1977).
- J. J. Finneran y M. C. Hastings. *Active impedance control within a cylindrical waveguide for generation of low-frequency, underwater plane traveling waves*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 105, 3035-3043, 1999.
- A. J. Fleming, D. Niederberger, S. O. R. Moheimani, y M. Morari. *Control of resonant acoustic sound fields by electrical shunting of a loudspeaker*. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 15, 689–703 (2007).
- M. Furstoss, D. Thenail y M. A. Galland. *Surface impedance control for sound absorption: Direct and hybrid passive-active strategies*. J. Sound Vib. 203, 219–236 (1997).
- D. Guicking, K. Karcher y M. Rollwage. *Coherent active methods for applications in room acoustics*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 78, 1426–1434, 1985.
- K. M. Ho, Z. Yang, X. X. Zhang y P. Sheng. *Measurements of sound transmission through panels of locally resonant materials between impedance tubes*. Applied Acoustics. 66, 751-765, 2005.
- F. C. Karal. *The analogous acoustical impedance for discontinuities and constrictions of circular cross section*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 25, No. 2, March (1953).
- L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens y J. V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, Inc. 4th ed, USA, 2000.
- O. Kirkeby, P. A. Nelson, H. Hamada y F. Orduña-Bustamante. *Fast deconvolution of multichannel systems using regularization*. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 6, No. 2, March 1998.
- C. M. Lee y Y. Xu. *A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 326, 290-301, 2009.
- X. Li y C. H. Hansen. *Comparison of models for predicting the transmission loss of plenum chambers*. Applied Acoustics. Vol. 66, 810-828, 2005.
- H. Lissek, R. Boulandet y R. Fleury. *Electroacoustic absorbers: Bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 129, No. 5, May (2011).
- P. Lueg. *Process of silencing sound oscillations*. US Patent No. 2,043,416. (1936).
- T. Y. Lung y A. G. Doige. *A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 73, No. 3, March, 1983.
- F. A. Machuca-Tzili, F. Orduña-Bustamante, A. Pérez-López, J. Pérez-Ruiz y A. E. Pérez-Matzumoto. *"Modified acoustic transmission tube apparatus incorporating an active downstream termination"*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 141, No. 2, February 2017.

-
- F. A. Machuca-Tzili, F. Orduña-Bustamante, A. Pérez-López, J. Pérez-Ruiz y A. E. Pérez-Matzumoto. *"Simplified two-load transmission tube measurements using an active absorbing termination"*. Proc. 22nd International Congress on Acoustics (ICA). Paper ICA2016-548. Buenos Aires, Argentina, 2016.
- M. L. Munjal y A. G. Doige. *Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustics element*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 141, No. 2, 323-333, 1990.
- H.F. Olson y E.G. May. *Electronic sound absorber*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 25, 1130 – 1136 (1953).
- F. Orduña-Bustamante y P. Nelson. *An adaptive controller for the active absorption of sound*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 91, 2740–2747, 1992.
- T. Rossing y N. H. Fletcher. Principles of vibration and sound. Springer, segunda edición, pp 181. EUA, 2004.
- Y. Salissou y R. Panneton. *A general wave decomposition formula for the measurement of the normal incidence sound transmission loss in impedance tube*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 125, No. 4, April 2009.
- T. Samejima. *A state feedback electro-acoustic transducer for active control of acoustic impedance*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 113, No. 3, March 2003.
- J. P. Smith, B. D. Johnson y R. A. Burdisso. *A broadband passive-active sound absorption system*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 106, 2646-2652, 1999.
- B. H. Song y J. S. Bolton. *A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 107, No.3, March 2000.
- Z. Tao y A. F. Seybert. *A review of current techniques for measuring muffler transmission loss*. Society of Automotive Engineers, Inc. 03NVC-38. 2003.
- Y. S. Wang, H. He y A. L. Geng. *Comparison and application of the experimental methods for multi-layer prediction of acoustical properties of noise control materials in standing wave-duct systems*. Applied Acoustics. Vol. 69, 847-857, 2008.

APÉNDICE. PUBLICACIONES RELACIONADAS

En las páginas siguientes se anexan los trabajos presentados en congreso internacional y revista científica internacional indizada, respectivamente:

- a) F. A. Machuca-Tzili, F. Orduña-Bustamante, A. Pérez-López, J. Pérez-Ruiz y A. E. Pérez-Matzumoto. "*Simplified two-load transmission tube measurements using an active absorbing termination*". Proc. 22nd International Congress on Acoustics (ICA). Paper ICA2016-548. Buenos Aires, Argentina, 2016.

- b) F. A. Machuca-Tzili, F. Orduña-Bustamante, A. Pérez-López, J. Pérez-Ruiz y A. E. Pérez-Matzumoto. "*Modified acoustic transmission tube apparatus incorporating an active downstream termination*". J. Acoust. Soc. Am., Vol. 141, No. 2, February 2017.

SI - Acoustical Measurement and Instrumentation: Paper 548**Simplified two-load transmission tube measurements
using an active absorbing termination****F. Arturo Machuca-Tzili^(a), Felipe Orduña-Bustamante^(b), Antonio Pérez-López^(c), Jesús Pérez-Ruiz^(d), Andrés E. Pérez-Matzumoto^(e)**^(a) Universidad Nacional Autónoma de México, México, arturo.machuca@ccadet.unam.mx^(b) Universidad Nacional Autónoma de México, México, felipe.orduna@ccadet.unam.mx^(c) Universidad Nacional Autónoma de México, México, antoniopl2002@gmail.com^(d) Universidad Nacional Autónoma de México, México, jesus.perez@ccadet.unam.mx^(e) Centro Nacional de Metrología, México, eperez@cenam.mx**Abstract**

Current standard techniques (ASTM E2611) for measuring normal incidence sound transmission loss (nSTL) with a modified impedance tube, or transmission tube, require setting up two different absorbing termination loads at the end of the downstream tube. In this work, a modified apparatus and a new technique are proposed for non-intrusively changing the termination impedance. The standard transmission tube was modified with a downstream active termination, providing controlled variable sound absorption. The active termination allows performing standard two-load measurements, without physically modifying the passive absorbing load at the end of the tube, reducing potential measurement errors associated with the physical manipulation of the two passive terminations. Transmission loss measurements on two representative test conditions are found in good agreement with results obtained from standard passive two-load methods.

Keywords: normal incidence transmission loss, impedance tube, two-load method, active sound absorption

Simplified two-load transmission tube measurements using an active absorbing termination

1 Introduction

Two techniques to measure the nSTL with a plane wave tube exist, the wave decomposition [1] and the transfer matrix method [2]. The wave decomposition method, separates the sound field in traveling waves in both directions and takes into account the multiple reflections at both ends of each section of the tube [3]. Because there are too many unknowns involved in this analysis, two loads or two source locations are needed in order to determine all variables. These method yields an exact nSTL of an acoustical sample. On the other hand, ASTM E2611 standard [4] is based in the transfer matrix method, which also needs an additional set of equations, in this case obtained by using two different absorbing loads at the end of the downstream section. The standard does not establish restrictions on the method used to achieve the two loads, hence it opens the possibility of using the active control techniques that we incorporate in this work to the transmission tube.

It has been demonstrated that active control can be used to modify the acoustic termination of a one-dimensional system, such as a plane wave tube [5] [6] [7] [8]. Taking advantage of two of the four microphones used for nSTL measurements, it is possible to synthesize an error signal subtracting the downstream microphone signals, delayed for the sound to travel between microphone positions, as follows:

$$e(t) = p_3(t) - p_4(t - \tau) \quad (1)$$

Minimizing this error signal also minimizes the reflection of sound at the end of the downstream section of the tube. An optimum filter was calculated from transfer functions between the test signal and the error signal. In this manner, the experimental setup can operate under two load conditions without materially changing its termination: with passive-only absorption, i.e., with the active control "off", and with the control "on", that is to say, a combination of passive and active absorption. When the active control is "on", the filtering tries to maximize the absorption at the end of the tube, attaining a change of impedance sufficiently different, compared to the passive condition, that allows for a correct implementation of the standard measurement procedures.

When terminations are intrusively changed during a test, misplacing of the tube elements and the sample under test itself (for example, due to abrupt pressure changes at the closing of the tube) can easily occur. An automated system, which allows changing of the termination impedance without handling the tube, is desirable. In this work, nSTL measurements for a non-woven polyester-polypropylene fiber material are shown, as well as a measurement without a

test sample as a reference condition. Experiments using purely-passive and passive-active downstream absorption were carried out according to the ASTM E2611 standard.

2 Experimental setup

For the experiments, the typical transmission tube configuration was modified. A second sound source was added at the end of the downstream section in order to operate as an active absorbing termination. The upstream compression driver (or primary sound source, in a control scheme) reproduces a sine sweep test signal, while the secondary source tries to absorb the sound reaching the downstream side. The inner diameter of the aluminum tubes is 3.5 cm and is shielded with a 5.08 cm (2 in) tube to isolate it from the external noise. This tube array is rigid enough to avoid parasite vibrations of the apparatus. Both, upstream and downstream sections are 42 cm long, assembled with the drivers and the sample holder by PVC couplers. Two microphone separations were used (2.43 and 9.7 cm), allowing for a 170 to 5700 Hz measurement range. Distances between microphones, sample under test and drivers were calculated in accordance with ASTM E2611 standard guidelines. The downstream section of the tube is terminated with a 3.81 cm (1.5 in) wedge-like shaped polyurethane foam as a passive absorbing element, backed with a compression driver coupled at the end of the tube (second sound source). Figure 1 shows a diagram of the apparatus and signal processing.

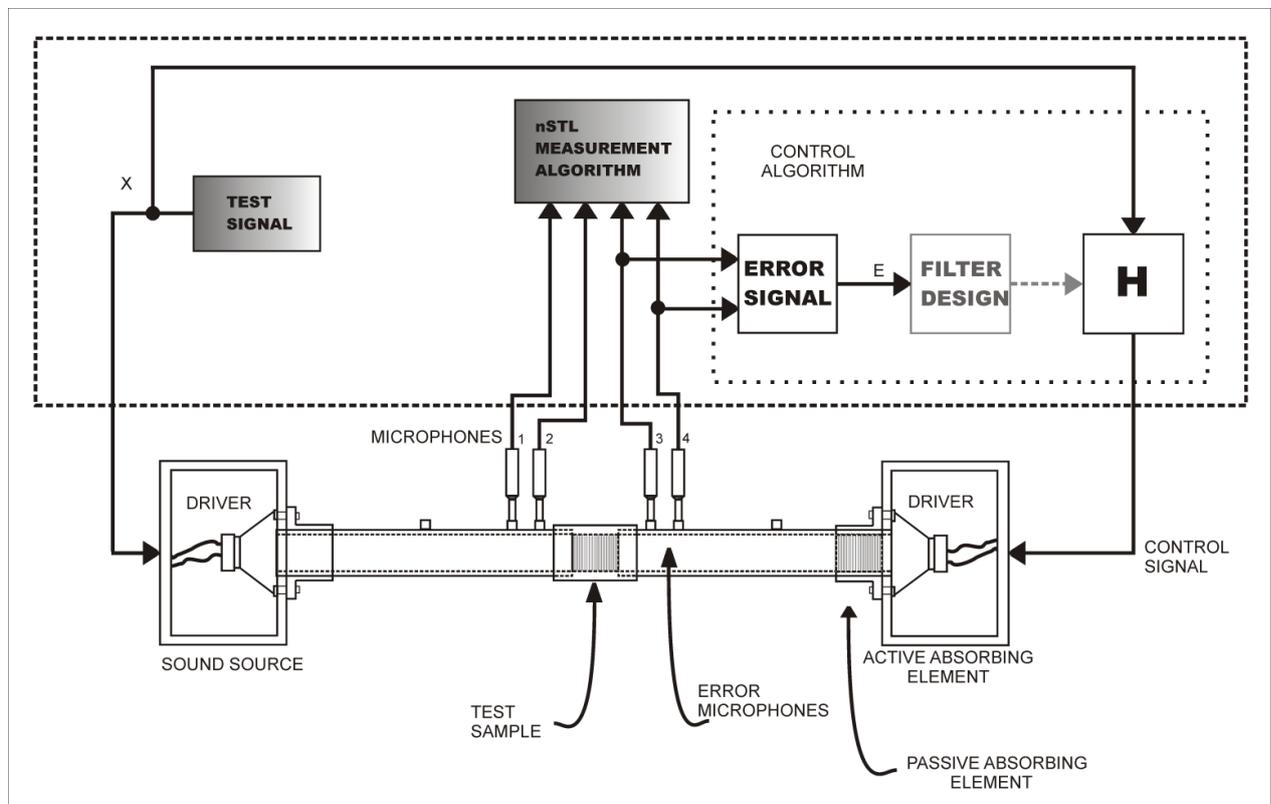


Figure 1: Schematic view of the transmission tube and signal processing.

The signal processing was implemented in MATLAB®, considering both the active control and the nSTL measurement algorithms. For the active control, signals from downstream microphones are used to synthesize the error signal E. A sine sweep is used as an excitation signal X and sent to the drivers, one at a time, for system identification. The transfer function between the primary driver and the error signal is represented by G_1 . Similarly, the transfer function between the secondary driver and the error signal is G_2 . The regularized filter H that minimizes E is given by

$$H = -\frac{G_1 G_2^*}{|G_2|^2 + r^2}, \quad (2)$$

where (*) denotes complex conjugate and r is the regularization level [9]. nSTL measurements were performed with the filter H feeding the secondary driver as the control signal. A second measurement without control presents a different condition at the end of the downstream tube, as required by the standard.

3 Experiments and results

3.1 Measurement of absorption coefficients

The absorption coefficient for the downstream termination was measured using the ASTM E1050 method [10]. Three different absorbing terminations were used for the nSTL measurements, "active 'off'", "active 'on'" and "passive". The "active 'off'" termination is actually passive, since the only absorbing elements are a slice of polyurethane and the secondary driver's cone. The "active 'on'" condition involves the same slice of polyurethane and active control of the secondary driver. The passive termination consists of an array of small acrylic fiber spheres (commonly called "pom poms") of different diameters for a progressive absorption condition. The absorption coefficients of the absorbing terminations are shown in Figure 2.

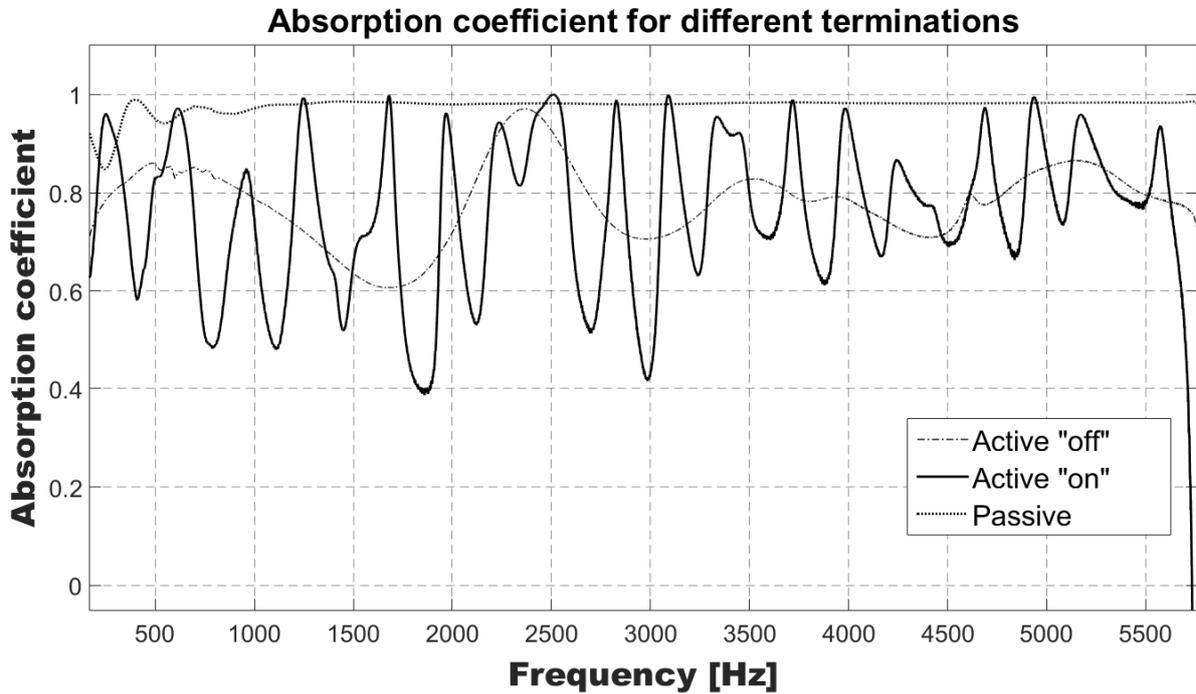


Figure 2: Absorption coefficients of passive and passive-active configurations of the termination.

The active absorbing termination achieves absorption coefficients α over 0.99 around resonance frequencies, but lower absorption at intermediate frequencies. In spite of this, the absorption changes over most of the frequency range (except where both absorption curves intersect), therefore, active control produces a different acoustic condition at the termination. Active absorption cannot reach high values at all frequencies mainly because a fixed downstream microphones location in a stationary plane wave field will show a variable signal to noise ratio at different frequencies due to resonances and anti-resonances. Because of that, the error signal is not always accurately observable or controllable at that precise location.

3.2 Sound transmission loss measurements

The ASTM E2611 standard procedure was followed for every measurement. Table 1 shows a summary of the tests carried out.

Table I: Tests performed and the type of termination used in each test.

Sample material	Method	Type of termination	Terminations used
Without sample	E2611 standard	Passive-Passive	Active "off"/ Passive
Without sample	E2611 standard	Passive-Active	Active "off" / Active "on"
Test sample	E2611 standard	Passive-Passive	Active "off"/ Passive
Test sample	E2611 standard	Passive-Active	Active "off" / Active "on"

The theoretical nSTL values without sample are 0 dB for all frequencies. As Figure 3 shows, measured values agree with such expectation within +0.25 and -0.05 dB. Both passive-passive and passive-active tests were carried out following the ASTM E2611 procedures.

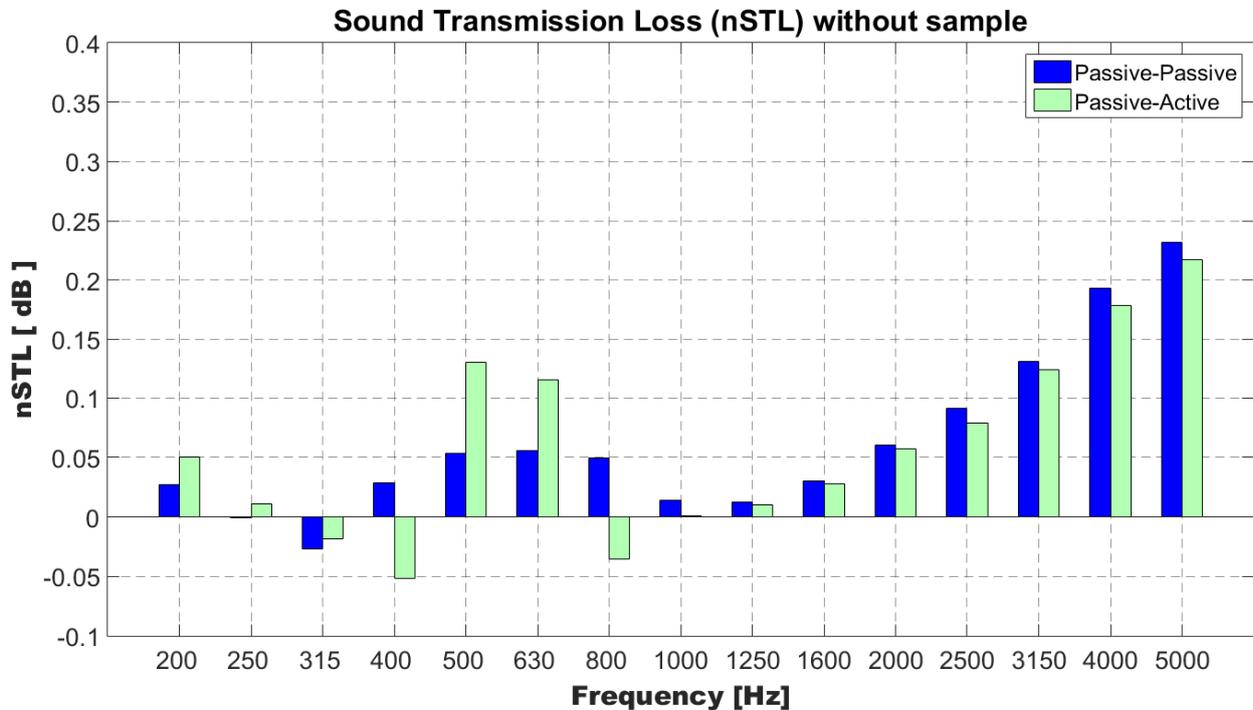


Figure 3: Normal incidence sound transmission loss (nSTL) measured without sample in the transmission tube. The increasing value towards high frequencies is probably due to viscous losses.

Furthermore, the maximum difference between passive-passive and passive-active results is 0.08 dB for 400, 500 and 800 Hz third-octave bands, and the mean difference is 0.03 dB. This validates system performance and reliability of measurements carried out with active control.

The same experiments were carried out with a non-woven polyester-polypropylene fiber sample. Results for this are shown in Figure 4.

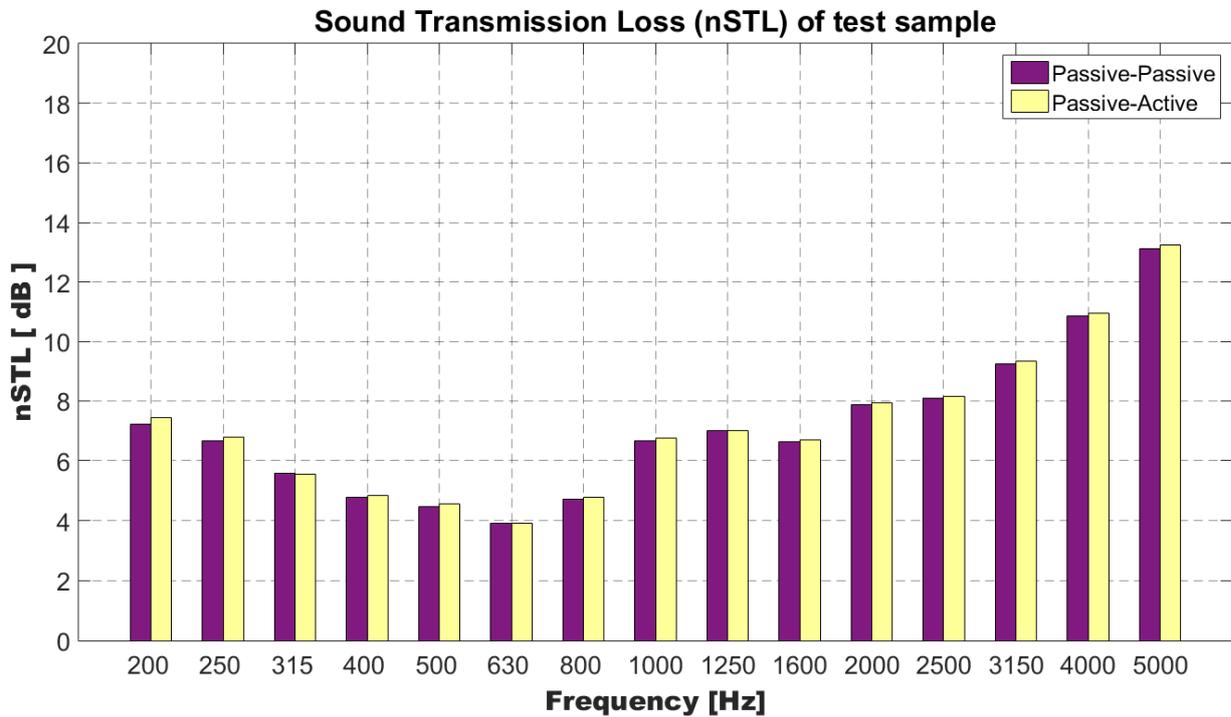


Figure 4: Normal incidence sound transmission loss (nSTL) measured for a polyester-polypropylene fiber test sample.

Again, there is good coincidence in the results since maximum difference between passive-passive and passive-active methods is 0.23 dB for the 200 Hz third-octave band, and the mean difference is 0.08 dB.

4 Conclusions

A modified transmission tube with an active absorbing termination was constructed and tested. Both purely-passive (standard) and passive-active (proposed) measurements agreed well. Active control successfully achieved higher absorption around resonance frequencies, but not at intermediate frequencies, where absorption was actually lower. However, the results indicate that these impedance changes obtained with the active termination "on" and "off" are sufficient for accurate nSTL measurements. In summary, it is possible to simplify the procedures of nSTL measurements using an active absorbing termination to non-intrusively change the load conditions avoiding the possibility of errors due to physically changing the absorbing termination.

Acknowledgments

The author wishes to acknowledge the Erik Daniel Sánchez Cruz at LAV, CCADET mechanical workshop.

References

- [1] Salissou, Y.; Panneton, R. A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 125 (4), 2009, pp 2083-2090.
- [2] Song, B.; Bolton, J. A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 103 (3), 2000, pp 1131-1152.
- [3] Ho, K.; Yang, Z.; Zang, X.; Sheng, P. Measurements of sound transmission through panels of locally resonant materials between impedance tubes, *Applied Acoustics*, 66, 2005, pp 751–765.
- [4] ASTM, International Standard Worldwide E 2611. *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*, United States, 2009.
- [5] Guicking, D.; Karcher, K. Active impedance control for one dimensional sound, *Journal of Vibrations and Acoustics*, 106 (3), 1984, pp 393–396.
- [6] Orduña-Bustamante, F.; Nelson, P. A. An adaptive controller for the active absorption of sound, *Journal of the Acoustical Society of America*, 91(5), 1992, pp 2740–2747.
- [7] Smith, J. P.; Johnson, B. D.; Burdisso, R. A. A broadband passive–active sound absorption system,” *Journal of the Acoustical Society of America*, 106 (5), 1999, pp 2646–2652.
- [8] Finneran, J. J.; Hastings, M. C. Active impedance control within a cylindrical waveguide for generation of low-frequency, underwater plane traveling waves, *Journal of the Acoustical Society of America*, 105 (6), 1999, pp 3035–3043.
- [9] Kirkeby, O.; Nelson, P.; Hamada, H.; Orduña-Bustamante, F. Fast deconvolution of multichannel systems using regularization. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 6 (2), 1998, pp 189-194.
- [10] ASTM, International Standard Worldwide E 1050. *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System*, United States, 1990.

Modified acoustic transmission tube apparatus incorporating an active downstream termination

F. Arturo Machuca-Tzili,^{1,a)} Felipe Orduña-Bustamante,¹ Antonio Pérez-López,¹ Santiago J. Pérez-Ruiz,¹ and Andrés E. Pérez-Matzumoto²

¹Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, C.P. 04510, México D.F., Mexico

²Centro Nacional de Metrología, km 4.5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, Mexico

(Received 14 October 2016; revised 6 January 2017; accepted 20 January 2017; published online 24 February 2017)

Current techniques for measuring normal incidence sound transmission loss with a modified impedance tube, or transmission tube, require setting up two different absorbing termination loads at the end of the downstream tube [ASTM E2611-09, *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method* (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2009)]. The process of physically handling the two required passive absorbing loads is a possible source of measurement errors, which are mainly due to changes in sample test position, or in test setup re-assembly, between measurements. In this paper, a modified transmission tube apparatus is proposed for non-intrusively changing the downstream acoustic load by means of a combined passive-active termination. It provides a controlled variable sound absorption which simplifies the setup of standard two-load techniques, without the need of physically handling the apparatus during the tests. This virtually eliminates the risk of errors associated with the physical manipulation of the two passive terminations. Transmission loss measurements in some representative test conditions are reported, showing improvements over current implementations, in reducing by approximately 50% the measurement variations associated with the setup of the two required absorbing terminations. Measurement results agree within 0.4 dB (maximum difference in high resolution broadband), and 0.04 dB (mean difference in 1/3-octave bands), with those obtained using standard passive two-load methods.

© 2017 Acoustical Society of America. [<http://dx.doi.org/10.1121/1.4976094>]

[TRH]

Pages: 1093–1098

I. INTRODUCTION

Measuring normal incidence sound transmission loss (nSTL) using plane wave tube techniques is an efficient, quick, and relatively inexpensive way to estimate transmission characteristics of acoustic materials. In the literature there are essentially two methods for measuring nSTL; one is the wave decomposition method, by Salissou and Panneton;¹ the other is the transfer matrix (TM) method, by Song and Bolton,² on which the current standard³ is based. The standard, and the method described by Song and Bolton are essentially two-load methods which allow freedom in the way these loads are implemented.

On the other hand, active control of sound can be applied to approximate specific impedance conditions (i.e., acoustic absorption or reflection) on the boundaries of an enclosed space, especially at low frequencies, by means of signal processing techniques. In one-dimensional systems, active control of acoustic impedance can be successfully achieved at the end of a plane wave tube.^{4–7}

This paper reports the results of improving the existing modified impedance tube (here called “transmission tube”), which uses passive absorbing terminations for measuring nSTL, with an active control system based on digital

filtering. The combination of passive and active control methods, as reported here, provided an impedance change in a wide range of frequencies (from 178 to 5680 Hz in this work, covering 1/3-octave bands from 200 to 5000 Hz), and the possibility of varying the impedance at the end of the tube downstream, thus allowing an easier non-mechanical modification of the downstream termination for standard two-load methods. Using the ASTM standard method along with the active termination, it was possible to obtain accurate measurements of the nSTL on a polyurethane foam sample with a measured nSTL in the range of 6–12 dB. This lies in the lower to middle range for typical applications of this technique, while, as with other types of transmission loss measurement, an upper limit can be expected, which measured in our setup, using a very massive obstacle, corresponds to nSTL around 25 dB.

II. THEORY

The proposed method for measuring nSTL based on an active termination was implemented on the setup shown in Fig. 1. For this configuration of the transmission tube, a broadband test signal is sent to the primary source to be reproduced. The outgoing wave travels along the upstream section and impinges on the test sample. Part of the incident sound is transmitted to the downstream section. Subsequently, the transmitted sound impinges on a passive absorbing element in front of

^{a)}Electronic mail: arturo.machuca@ccadet.unam.mx

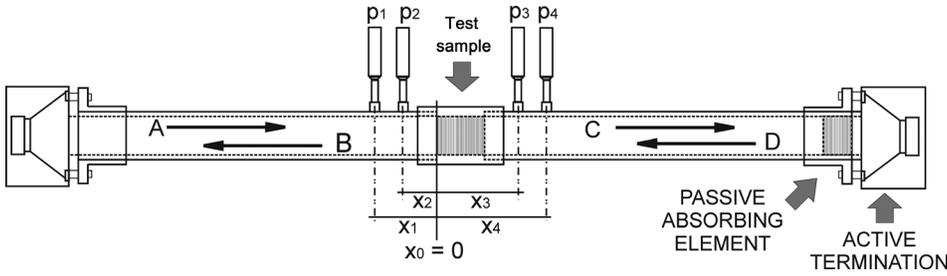


FIG. 1. Diagram of the transmission tube proposed in this work, with a combined passive-active termination, showing traveling waves inside: *A* and *B* in the upstream section of the tube, *C* and *D* in the downstream section.

the secondary source. At this point, sound absorption can be passive, or additionally complemented by active control of the termination. Sound pressure inside the tube is measured with four microphones located at x_1 , x_2 , x_3 , and x_4 , with respect to the upstream face of the test sample x_0 . Except for the active termination on the right, this is similar to the typical setup for normal incidence transmission measurements.

A. Transmission coefficient

Following the ASTM standard,¹ the TM representation of the acoustic system relates sound pressure and particle velocity at both sides of the test sample (p_0 , u_0 and p_d , u_d , respectively), intrinsically containing acoustical information of the test sample. In this formulation there are four unknowns and only two equations. Changing the impedance condition at the end of the downstream section yields a second set of equations. Equations (1) and (2) show the system equations with two different terminations, indicated with subscripts *a* and *b*:

$$\begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=d}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=d}. \quad (2)$$

The transfer matrix coefficients can be obtained by solving these equations. Additionally, taking into account that the pressures and velocities can be written in terms of traveling

waves (see Fig. 1), it is possible to obtain the transmission coefficient T as the ratio between the transmitted and incident waves in terms of the matrix coefficients, as follows:

$$T = \frac{2e^{ikd}}{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}}. \quad (3)$$

The ASTM standard also suggests mathematical simplifications of this formulation for geometrically symmetric test samples. Under the assumption that $T_{11} = T_{22}$ and $T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1$, it is possible to use only one set of equations and, consequently, only one load. This one-load technique is not considered here, since the aim of this work is to provide a general technique avoiding such mathematical or physical assumptions.

B. Active control

An active termination was implemented by passing the test signal through a control filter to feed the secondary driver, adopting a typical feedforward control strategy. The control filter is calculated from transfer functions measured from the primary and secondary sound sources, and an error signal calculated from the sound pressure signals p_3 , p_4 in the downstream section of the tube. In the process of measuring nSTL, an excitation driver or primary source in the upstream section of the transmission tube, provides a test signal (a sinusoidal sweep) that passes through the test sample. Then, an error signal is synthesized using the signals from the downstream microphones, as shown in Fig. 2.

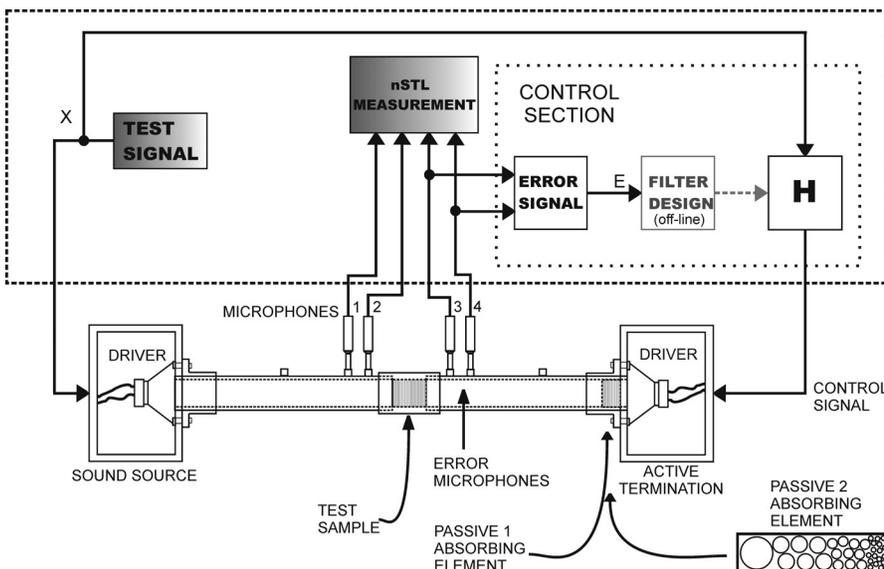


FIG. 2. Schematic view of the transmission tube and the signal processing used for active control of the termination, and for the calculation of the nSTL.

The error signal to be minimized is intended to correspond to the condition of no reflections at the end of the tube. To this end, we consider the following expressions for the sound pressures at microphones 3 and 4, in terms of traveling waves C and D to the right and left, respectively, in the downstream section of the tube:

$$P_3 = Ce^{-jkx_3} + De^{+jkx_3}, \quad (4)$$

$$P_4 = Ce^{-jkx_4} + De^{+jkx_4}. \quad (5)$$

The reflected wave, that we seek to minimize, can be calculated as follows:

$$D = \frac{[P_4 - P_3e^{-jk(x_4-x_3)}]e^{-jkx_3}}{2j \sin k(x_4 - x_3)}. \quad (6)$$

From this, and assuming $0 < k(x_4 - x_3) < \pi/2$, so that $\sin k(x_4 - x_3) > 0$, maintaining a well determined quotient, we define the error signal as the term in brackets in the denominator of Eq. (6), proportional to D , according to the following expressions:

$$E(\omega) = 2jDe^{+jkx_3} \sin k(x_4 - x_3) \quad (7a)$$

$$= P_4 - P_3e^{-jk(x_4-x_3)}. \quad (7b)$$

Considering that $k(x_4 - x_3) = \omega\tau$, where $\tau = (x_4 - x_3)/c_0$ is the acoustic propagation time delay between microphones 3 and 4, we finally write the error signal in the frequency and the time domain, respectively, as

$$E(\omega) = P_3(\omega) - e^{-j\omega\tau} \cdot P_4(\omega), \quad (8)$$

$$e(t) = p_3(t) - p_4(t - \tau). \quad (9)$$

In this way the error signal to be minimized, is obtained by subtraction of the sound pressures at microphones 3 and 4. These signals are processed digitally in real-time using Matlab[®] and the DSP System Toolbox; the resulting control signal is fed to the control driver, or secondary sound source, in the downstream section. The accuracy of the active absorption relies on the correct phase compensation of the microphones, as well as the signal-to-noise ratio in the downstream section at the microphone locations.

In order to calculate a control filter $H(\omega)$, we express the error signal in the frequency domain, as follows:

$$E(\omega) = [G_1(\omega) + G_2(\omega)H(\omega)]X(\omega), \quad (10)$$

where $G_1(\omega)$ is the transfer function between the primary source and the error signal (see Fig. 2), $G_2(\omega)$ is the transfer function between the secondary source and the error signal, and $X(\omega)$ is the complex amplitude of the test signal at frequency ω . In order to measure the transfer functions $G_1(\omega)$ and $G_2(\omega)$, the test signal is sent sequentially to the drivers for system identification. Then, using these transfer functions, a regularized minimization approach is taken, which

reduces the quadratic error $|E(\omega)|^2$, and a regularized filter is obtained, as follows:

$$H(\omega) = -\frac{G_1(\omega)G_2^*(\omega)}{|G_2(\omega)|^2 + r^2}, \quad (11)$$

where (*) indicates complex conjugate and r^2 is the regularization level.⁸ In the process of measuring nSTL, the test signal is passed through this filter and sent to the secondary driver. This is performed twice, once with the active control *on*, and then *off*, providing two different termination loads, as required by the ASTM E2611-09 standard.

III. EXPERIMENTAL SETUP

The apparatus shown in Figs. 1 and 2, has an internal $1\frac{1}{4}$ in. aluminum tube shielded by an external 2 in. tube for purposes of environmental noise isolation. The inner diameter of the internal tube is 3.5 cm, and each section (upstream/downstream) is 42 cm long. Sample holders are shorter sections that have the same double-walled structure. The different sections couplers are made of PVC. By means of two different microphone separations, one of 2.43 cm and other of 9.7 cm (six microphone holders), it is possible to cover a working frequency range from 178 to 5680 Hz; from 178 to 1420 Hz with the 9.7 cm separation, covering the octave bands from 250 to 1000 Hz, and 1/3-octave bands from 200 to 1250 Hz; and from 710 to 5680 Hz with the 2.43 cm separation, covering the octave bands from 1000 to 4000 Hz, and 1/3-octave bands from 800 to 5000 Hz. These frequency limits are determined by the internal tube diameter, the distances between microphones and between test sample, microphones, and drivers, which were all designed in accordance to the ASTM E2611-09 standard recommendations. In particular, the designed test tube diameter ensures purely plane wave propagation within the operating frequency range, and microphone separations fulfill conditions for proper spatial sampling of the sound field, and bounded microphone phase mismatch errors.

The following equipment and software was used: four 1/4 in. microphones Brüel & Kjaer type 4938, 4-channel microphone power supply Brüel & Kjaer type 2829, external audio interface M-Audio model M-Track Eight, stereo audio amplifier Yamaha model AX-380, desktop personal computer Intel i7-4770 3.40 GHz CPU, 12.0 GB RAM, Windows 10 64-bit, with Matlab[®] version R2015a 64-bit, and DSP System Toolbox version 9.0.

The measurement procedure and signal processing involved two main tasks: active control of the termination and data acquisition to calculate the nSTL. Both tasks were performed twice with different absorbing conditions, according to the standard. In addition, two types of measurement were conducted: passive-active (the one proposed in this work), and purely passive (standard). For the passive-active type measurement, the active control is *off* the first time, and the absorbing elements are the passive absorption of the secondary driver and a small 3.5 cm long wedge-shaped passive absorbing foam (Passive 1). See Fig. 2. This mildly absorbing element was included in order to ensure an acoustic

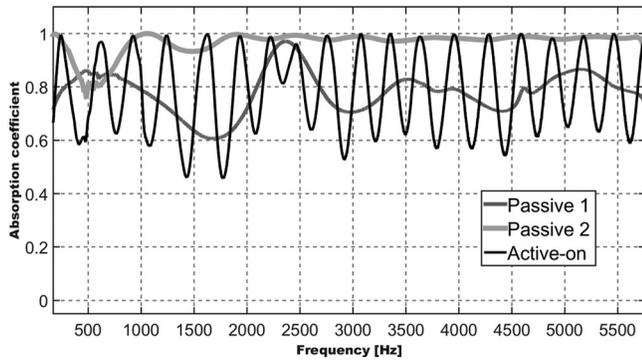


FIG. 3. Absorption coefficients of Passive 1, Passive 2, and Active-on configurations of the downstream termination.

damping time shorter than the acquisition data block duration of 1.486 s, 65 536 samples at 44.1 kHz. In the second acquisition, the active control is *on*, so the referred passive elements are combined with the effect of the control signal coming from the secondary driver (Active-on). For the purely passive type measurement, the same Passive 1 condition is used the first time, and for the second acquisition a stacked arrangement (12.7 cm long) of small soft acrylic fiber spheres of progressively increasing diameters (0.7, 1.2, 1.8, and 3.0 cm), in roughly 3 cm long sections for each diameter, kept in place by a very fine wire mesh, was used as passive absorption (Passive 2). See Fig. 2.

Absorption coefficients of all absorbing conditions were calculated using the two-microphone standard method⁹ and are shown in Fig. 3. As it was previously explained, the error signal was set to avoid reflections at the end of the downstream section of the tube, i.e., to attain more absorption than passive-only conditions. The ups and downs of the absorption coefficient measured when the active control is *on*, reveal some performance limits of the active control, caused possibly by low signal levels at microphone positions 3 and 4, around anti-resonance frequencies, leading to an inaccurate estimation of the error signal. On the other hand, around resonance frequencies, active absorption is very nearly 100%, and furthermore, as it will be shown in Sec. IV, even if a high active absorption is not achieved at all frequencies, the changes obtained in the downstream active termination allow

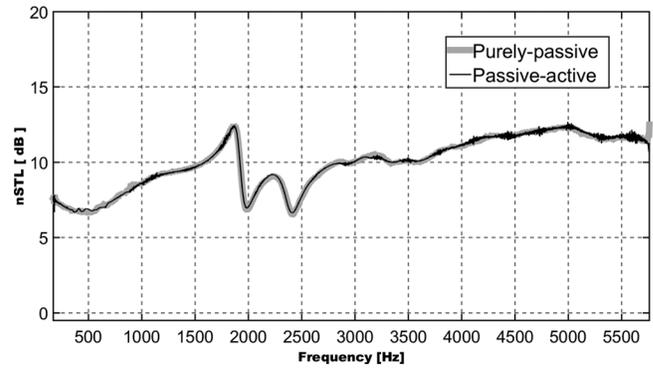


FIG. 4. Normal incidence sound transmission loss (nSTL) of the same test sample: using purely passive termination, and passive-active terminations.

the successful application of two-load standard techniques for measuring nSTL.

IV. TESTS AND RESULTS

A. Measurements of nSTL comparing passive-active and purely passive methods

The experiments were conducted at the Acoustics Laboratory at CCADET-UNAM using the ASTM E2611-09 standard two-load method. As it was described in Sec. III two different pairs of absorbing terminations were used: Passive 1/Active-on, and Passive 1/Passive 2. A 2 in. thick sample of melamine-based foam with a density of 9.6 kg per cubic meter was tested. The foam sample was prepared and fitted inside the transmission tube according to the recommendations of the ASTM standard. Tests were performed without dismounting or moving the sample. In the measurements using the passive-active termination, the Passive 1 absorbing elements were left in place, and the change in the end condition was only due to switching the active absorption system *on* and *off*. The measurements with the purely passive terminations (Passive 1, Passive 2) were used as a reference for comparison. The results obtained are shown in Fig. 4. The passive-active method results reasonably followed the trend of those obtained with the purely passive method. Some ripple can be seen at high frequencies, with a mean difference of ± 0.4 dB between

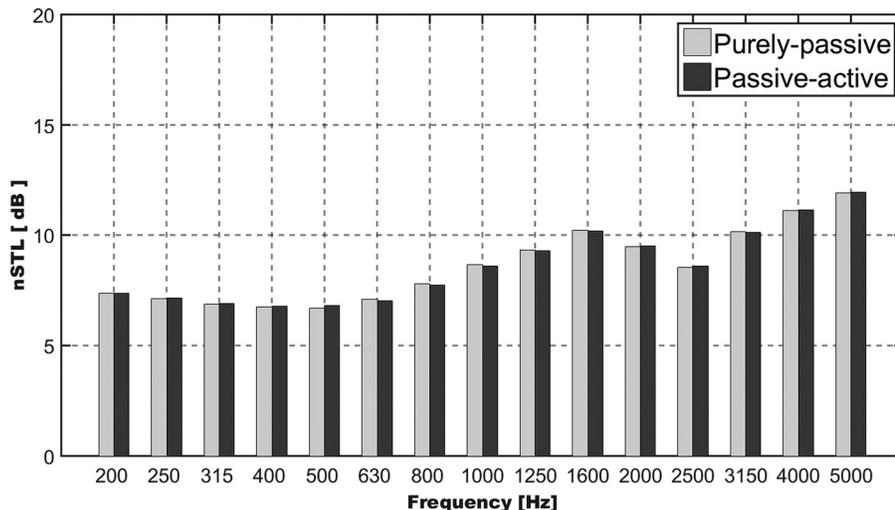


FIG. 5. nSTL of the test sample in third-octave bands using purely passive and passive-active conditions.

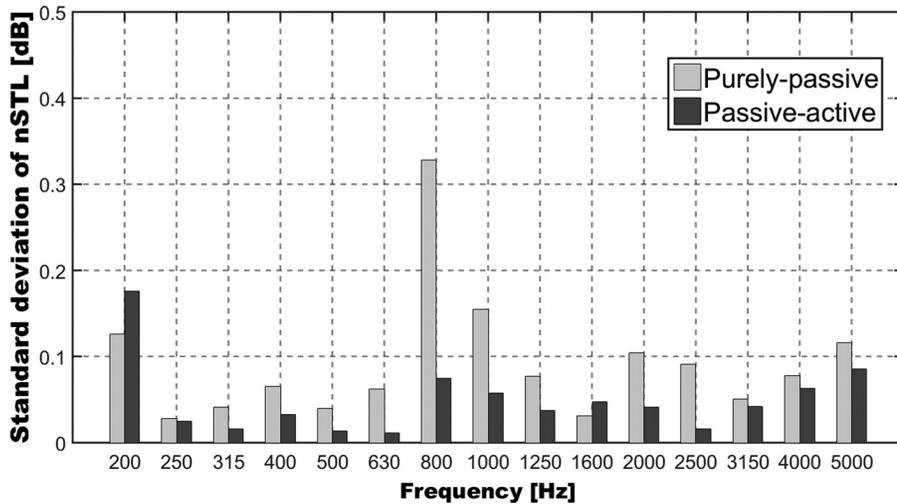


FIG. 6. Standard deviation of 10 nSTL measurements in third-octave bands, using purely passive and passive-active methods. The mean standard deviations, broadband from 200 to 5000 Hz, are 0.089 and 0.045 dB, respectively.

the passive-active and purely passive conditions. When the results are integrated in 1/3-octave frequency bands, the mean difference between the results reduces to ± 0.04 dB (see Fig. 5).

B. Measurement variations related to switching actively or passively between two load terminations

Figure 6 shows the standard deviation of two groups of 10 measurements with each method, involving changes in the absorbing terminations only, with the intention to demonstrate the advantage in the repeatability of the results using the passive-active termination over a standard purely passive one. In the passive-active measurements the active termination was switched *on* and *off*, 10 times; while purely passive measurements required physically changing the absorbing terminations Passive 1, Passive 2, 10 times. It can be observed that, in general (except in our tests at the lower 200 Hz third-octave band), the standard deviation is smaller when the passive-active termination is used, which proves the practical advantage of using this approach, relative to the purely passive technique prescribed by ASTM E2611-09. The difference of the mean standard deviation between the purely passive (as in ASTM E2611-09) and passive-active (as proposed here) nSTL measurements reduces from 0.089 to 0.045 dB, a reduction of 0.044 dB, which in comparison to the mean error of 0.140 dB reported by Bonfiglio and Pompili,¹⁰ as a reference value found published recently in the literature of transmission tube measurements, represents a significant relative improvement of the technique proposed in this work, relative to ASTM E2611-09, by nearly 50% in terms of error reduction.

V. CONCLUSIONS

The use of an active termination proved to be a practical advantage for measuring nSTL. We were able to achieve results with better repeatability, compared to the use of purely passive terminations, since physical manipulation of the apparatus was not required during the passive-active measurement. In addition, apart from the control loudspeaker and tube modification, the active control system was implemented with similar equipment setting as others

commonly available, with computer data acquisition, for standard measurements in a transmission tube. ASTM E2611-09 does not specify the way absorbing terminations are implemented; the results in this article indicate that the impedance change that can be produced with the use of an active termination is a viable and effective alternative to this end.

Finally, we consider that the proposed apparatus, or future improvements of it along the same lines, incorporating an active termination, has the potential to go beyond ASTM E2611-09 for nSTL measurements in a transmission tube, by making the development of new improved single-load techniques a forthcoming possibility. The technique presented here already uses a single passive load, but it still relies on the processing of two measurements with two different downstream conditions. A question that we leave here for future consideration is that of using active control techniques to possibly allow accurate nSTL results by processing the data set from a single measurement, instead of two.

ACKNOWLEDGMENTS

Participation of F.A.M.-T. has been additionally supported by a student grant from CONACYT (México), Grant No.: 210186. We appreciate the technical collaboration of Ricardo Dorantes Escamilla and Erik D. Sánchez Cruz at CCADET-UNAM.

¹Y. Salissou and R. Panneton, "A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube," *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 2083–2090 (2009).

²B. Song and J. Bolton, "A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials," *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, 1131–1152 (2000).

³ASTM E2611-09, *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method* (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2009).

⁴D. Guicking and K. Karcher, "Active impedance control for one-dimensional sound," *J. Vib. Acoust.* **106**, 393–396 (1984).

⁵F. Orduña-Bustamante and P. A. Nelson, "An adaptive controller for the active absorption of sound," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 2740–2747 (1992).

⁶J. P. Smith, B. D. Johnson, and R. A. Burdisso, "A broadband passive-active sound absorption system," *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 2646–2652 (1999).

- ⁷J. J. Finneran and M. C. Hastings, "Active impedance control within a cylindrical waveguide for generation of low-frequency, underwater plane traveling waves," *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 3035–3043 (1999).
- ⁸O. Kirkeby, P. Nelson, H. Hamada, and F. Orduña-Bustamante, "Fast deconvolution of multichannel systems using regularization," *IEEE Trans. Speech Audio Process.* **6**, 189–194 (1998).
- ⁹ASTM E1050, *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System* (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1990).
- ¹⁰P. Bonfiglio and F. Pompoli, "A single measurement approach for the determination of the normal incidence transmission loss," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 1577–1583 (2008).