

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ACUSTICA



Profesor Patrocinante:
José Luis Barros Rojas
Instituto de Acústica
Universidad Austral de Chile

Profesor Informante:
Jorge Iván Cárdenas Mansilla
Instituto de Acústica
Universidad Austral de Chile

Profesor Informante:
Alfio Yori Fernández
Instituto de Acústica
Universidad Austral de Chile

***“Desarrollo de un Sistema de Medición de
Intensidad Acústica con Fines Didácticos”***

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Acústica y al Título
Profesional de Ingeniero Acústico.

SEBASTIAN ADOLFO ACEVEDO ALVAREZ

Valdivia, 2006

Agradecimientos

En estas líneas me gustaría agradecer a todas las personas que de alguna u otra manera ayudaron a que pudiera llegar a esta etapa de mi vida.

Primero que todo quiero agradecer a mis compañeros por su compañía en estos largos años de estudio, en el que compartimos algunas veces largos períodos de estudios, en otras gratas conversaciones y en algunas oportunidades encuentros deportivos. Especialmente a Pedro (Brito), Edgard, Pedro (masa), Benja, Juan Navarro. Y a todos aquellos con los que compartimos un cuaderno, un estudio, a los que me aclararon algunas dudas y a quienes me permitieron ayudarles en ciertas circunstancias.

También quiero agradecer a José Luis Barros por su siempre agradable disposición a resolver los problemas que surgieron en este trabajo y por todas las enseñanzas que me brindó durante todos estos años en la Universidad. Agradezco también a Jorge Cárdenas y Alfo Yori por su disposición a participar de ésta tesis. A Jorge Sommerhoff por ser un gran profesor y por contar con su ayuda cuando lo requerí.

Quiero agradecer además a la señora Hilda y al Profesor Víctor Poblete por su amabilidad en todos estos años.

Un agradecimiento especial para Víctor Cumián que me ayudo siempre que lo molesté y necesité, y que no fueron pocas (especialmente para desarmar los micrófonos). Víctor, muchísimas gracias.

Gracias a toda mi familia por su apoyo en todos los aspectos de mi vida durante estos largos años de estudio, especialmente a mi mamá, mi papá, Pame y Cata. Gracias Lela y Tata por su apoyo, especialmente durante el desarrollo de mi práctica profesional en Santiago.

Por último quiero agradecer a Lissette por su compañía en estos últimos años de estudio y a mi hijo Gustavo por hacerme cada día un poco más feliz.

A todos, muchas gracias.

INDICE

	<u>Página</u>
Agradecimientos	1
1. Resumen	4
Summary	6
2. Objetivos	7
2.1. Objetivos Generales	8
2.2. Objetivos Específicos	8
3. Introducción	9
4. Marco Teórico	11
4.1. Ecuación de Estado	12
4.2. Ecuación de Continuidad o de Conservación de la masa	12
4.3. Ecuación de Euler	12
4.4. Ecuación de Onda	14
4.5. Caracterización del Campo sonoro mediante la Intensidad	15
4.6. Propagación de la Energía: Intensidad Sonora	17
4.7. Notación compleja	18
4.8. Impedancia Acústica Específica	20
5. Formas de Medición de Intensidad Acústica	21
5.1. Método de Aproximación de diferencias finitas (Método Directo)	22
5.2. Estimación con análisis FFT (Método Indirecto)	23
5.3. Cantidades Teóricas	27
5.4. Cantidades Estimadas	28
5.5. Errores Estimados	30
6. Desarrollo del Programa de Medición	36
6.1. Esquema del Proceso de Medición	37
6.2. PC y Software de Adquisición	38
6.3. Cadena de Medida	41

7.	Mediciones	50
7.1.	Mediciones Realizadas con Señales Simuladas	51
7.2.	Tarjeta Puenteada	56
7.3.	Misma Señal en Ambos Canales del Preamplificador	58
7.4.	Mediciones con micrófonos	60
7.5.	Efecto de la fase en la estimación de la Intensidad	70
8.	Conclusiones	73
9.	Bibliografía	76
10.	Anexos	78
	Anexo A: Práctico “Medida de la Potencia Acústica In Situ por el Método de Intensidad”.	
	Anexo B: Práctico “Medición de Intensidad y Mapas de Intensidad”.	
	Anexo C: Expresiones de Intensidad para Campos Simples.	
	Anexo D: Ayuda software IntensiSeba v.1.	
	Anexo E: Programa Matlab para la visualización de vectores de Intensidad.	

1. Resumen

El trabajo que se presenta a continuación fue elaborado con el fin de realizar un instrumento de medición que permita realizar una actividad, o varias, con fines académicos acerca del tema de la Intensidad Sonora (conocida también como Intensidad Acústica y en inglés como Sound Intensity). Se incluye además la teoría necesaria para comprender dicho fenómeno. Se describe también la forma en que puede ser medida la Intensidad en función del tiempo y en función de la frecuencia a través de una técnica FFT a dos canales, aunque solo este último método fue aplicado para desarrollar el software de medición, uno de los principales objetivos de esta tesis.

El sistema empleado consta de dos micrófonos ubicados en una posición muy cercana uno frente al otro (configuración cara - cara), y el cálculo de Intensidad se realiza a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado entre las señales. Para hacer posible la medición de Intensidad se desarrolló un software empleando Testpoint 3.0 ^[1], un lenguaje de programación que permite la adquisición de datos desde una tarjeta conversora analógica digital.

Para la realización de la sonda de Intensidad como la especificada es necesario que ambos canales, considerando toda la cadena de medida, tengan un comportamiento similar en cuanto a amplitud y fase. Para ello se realizaron mediciones controladas para estudiar el comportamiento de cada elemento de la cadena de medida. También se realiza un análisis de la influencia de un pequeño desfase entre las señales en el cálculo de la Intensidad.

Summary

The present work was elaborated with the purpose of making a measuring instrument that would allow to carry out one or several activities, with academic goals about Sound Intensity (also well-known as Acoustic Intensity). In addition, the necessary theory to understand this phenomenon is included. The form in which the Intensity can be measured is also described, in function of time and frequency through a two-channel FFT technique, although only the latter was applied to develop the measurement software, one of the main objectives of this thesis.

The system consists of two opposing microphones located very near each other (face to face configuration), and the calculation of Intensity is made from the imaginary part of the cross spectrum between the signals. In order to make the measurement of Intensity possible, a software was developed using Testpoint 3.0 ^[1], a programming language that allows the data acquisition from an analogous digital card converter.

To accomplish the Intensity probe like the one specified, it is necessary that both channels, considering the entire measurement chain, have a similar behaviour as far as amplitude and phase. To do this, controlled measurements were carried out to study the behaviour of each element of the measurement chain. Also, an analysis of the influence of a small phase angle between the signals is made when calculating of the Intensity.

2.1. Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un sistema Software - Hardware que permita realizar mediciones de Intensidad Acústica.

2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta tesis son:

- ❑ Construir el algoritmo necesario para luego ser programado en el Software Testpoint 3.0.
- ❑ Verificar el buen funcionamiento del programa desarrollado.
- ❑ Instalar y controlar el funcionamiento del sistema de micrófonos.
- ❑ Instalar el sistema de micrófonos acorde a la programación, cumpliendo con las necesidades de medición.
- ❑ Realizar mediciones con el equipo construido en situaciones de campo sonoro conocido y desconocido.
- ❑ Realizar actividades prácticas para la asignatura Control de Ruido con la teoría correspondiente.

3. Introducción ^[2] ^[3] ^[4]

La Intensidad Sonora describe la razón del flujo de Energía (Energía por unidad de tiempo) a través de una unidad de superficie. Así, la unidad de la Intensidad Sonora es Watts por metro cuadrado [W/m^2].

La teoría de la Intensidad Acústica existe desde hace ya varias décadas, y sólo la implementación de sistemas digitales hizo posible su medición. La técnica de medición a través de la parte imaginaria del espectro cruzado, entre las señales captadas por dos micrófonos ubicados muy cerca entre si, fue desarrollada en forma independiente por Chung y Fahy a fines de los años '70.

Dentro de las ventajas que presenta la medición de Intensidad está la capacidad de medir en cualquier campo sonoro sin la necesidad de asumir ninguna condición especial, a diferencia de las mediciones de presión sonora que dependen de las condiciones de campo sonoro presente en el lugar en el cual se desea medir.

Una de las aplicaciones de la sonda de Intensidad es la medida de la potencia acústica *in situ*, incluso con otras máquinas emitiendo ruido. Esto debido a que un ruido de fondo estable no contribuye a la potencia acústica cuando esta medición se realiza a través de Intensidad. La medición de potencia sólo era posible a través de la presión sonora, trasladando la fuente sonora a salas donde los campos sonoros son bien conocidos y controlados, como en el caso de la cámara anecoica y cámara reverberante.

La Intensidad entrega una medida de dirección como de magnitud, por lo que es útil para la realización de diagramas que permiten localizar fuentes de ruido individuales. Otras aplicaciones de la medición de Intensidad son la medida de la absorción sonora, medida del aislamiento acústico, eficiencia en la radiación de superficies vibrantes, fuentes sonoras transitorias, transformación espacial de campos sonoros, intensidad sonora en conductos de flujo, etc.

Este capítulo muestra las ecuaciones principales que rigen la Intensidad Acústica y caracterizan los campos sonoros desarrollados en el Anexo C. Se deduce una fórmula que permite calcular la Intensidad a través del producto entre la presión y la velocidad de partículas y además se señalan los conceptos de Intensidad Activa y Reactiva a través de la notación Compleja.

4.1. Ecuación de Estado

La ecuación de estado relaciona la variación de densidad s de un elemento de fluido con las fluctuaciones de presión p . Esta ecuación es:

$$p = \beta s = \beta \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (4.1) \quad \text{siendo} \quad \beta = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \quad (4.2)$$

donde:

β es el módulo adiabático de Volumen, coeficiente que relaciona las variaciones de presión con la deformación volumétrica (o dilatación).

p es la sobrepresión o presión acústica en cualquier punto: $p(\mathbf{r}, t) = P(\mathbf{r}, t) - P_0$

P es la presión instantánea en cualquier punto: $P(\mathbf{r}, t)$

P_0 es la presión de equilibrio en el fluido, que es constante.

ρ es la densidad instantánea en cualquier punto: $\rho(\mathbf{r}, t)$

ρ_0 es la densidad de equilibrio del fluido, que es constante.

4.2. Ecuación de Continuidad o de Conservación de la masa

Esta ecuación relaciona el movimiento del fluido, caracterizado por la velocidad de una partícula de fluido \vec{u} , con su compresión y dilatación, que se expresan mediante la densidad instantánea ρ .

La forma linealizada de la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}) = 0 \quad (4.3)$$

4.3. Ecuación de Euler

Para poder relacionar la presión sonora p con la velocidad u de las partículas de aire es necesario obtener la ecuación de Euler (también llamada ecuación de movimiento o ecuación de la

fuerza). Para obtener esta ecuación es necesario imaginar un pequeño volumen de gas encerrado en una caja cúbica con paredes flexibles e ingrávidas, como se aprecia en la figura 4.1.

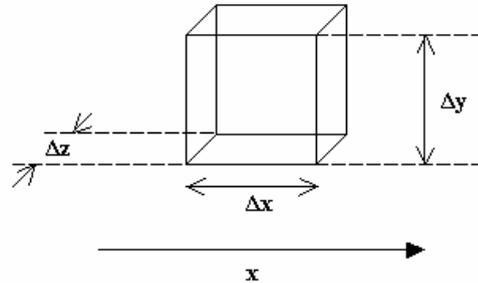


Figura 4.1. Pequeño cubo de aire que es parte de un medio gaseoso en el que la presión aumenta de izquierda a derecha con la velocidad espacial $\partial p / \partial x$.

Se debe suponer que la caja está situada en un medio donde la presión sonora aumenta de izquierda a derecha con la velocidad espacial $\partial p / \partial x$, y que los lados de la caja están libres de fricción (o sea todo arrastre viscoso entre las partículas de gas dentro de la caja y las de afuera son despreciables). Entonces las únicas fuerzas que actúan sobre el gas interior son las debidas a la presión ejercida sobre las paredes de la caja.

La diferencia entre las fuerzas que actúan sobre dos caras opuestas de la caja cúbica es igual a la velocidad de variación de la fuerza con la distancia, multiplicada por la distancia incremental entre las dos caras, es decir:

Fuerza que actúa en sentido de acelerar caja en dirección de las x positivas

$$f = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (4.4)$$

Si se dividen ambos miembros de la ecuación anterior por $\Delta x \Delta y \Delta z = V$ se obtiene la fuerza por unidad de volumen que acelera a la caja:

$$\frac{f}{V} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.5)$$

Según la segunda ley de Newton, la fuerza por unidad de volumen (f/V) debe ser igual a la velocidad de variación de la cantidad de movimiento por unidad de volumen de la caja. Asumido ya que es constante la cantidad de gas dentro de la caja se tiene:

$$\frac{f}{V} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{M}{V} \frac{\partial u}{\partial t} = \rho' \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.6)$$

donde u es la velocidad media del gas en la caja según la dirección x , ρ' es la densidad media espacial instantánea del gas dentro de la caja y $M = \rho'V$ es la masa total del gas contenido en la caja.

Si la variación de densidad del gas debida a la onda sonora es lo suficientemente pequeña, la densidad instantánea ρ' es aproximadamente igual a la densidad media ρ_0 . Entonces:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.7)$$

Para una dirección n cualquiera se obtiene:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad (4.8)$$

y despejando el valor u_n :

$$u_n = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial n} d\tau \quad (4.9)$$

4.4. Ecuación de Onda

La ecuación de onda linealizada (ecuación 4.10) es una expresión matemática que relaciona las variaciones de magnitudes físicas en el espacio y en el tiempo, esta ecuación se obtiene combinando la ecuación de estado, la ecuación de continuidad y la ecuación de Euler:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4.10)$$

donde c representa la velocidad de fase para ondas acústicas: $c = \sqrt{\beta / \rho_0}$ (4.11)

La ecuación de onda se cumple también para otras variables acústicas:

$$\nabla^2 \rho - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = 0 \quad (4.12)$$

$$\nabla^2 s - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0 \quad (4.13)$$

4.5. Caracterización del Campo sonoro mediante la Intensidad

Para realizar una caracterización del campo sonoro mediante la Intensidad es necesario plantear esta caracterización desde el punto de vista energético, evaluando el transporte de energía durante el proceso de propagación de una onda sonora. Para este efecto se considerará despreciable el flujo de calor en las zonas alejadas de las paredes sólidas y la influencia de la viscosidad, de manera que se produce un proceso adiabático, es decir un proceso en el que no se produce intercambio de energía térmica entre las partículas.

La energía transportada por las ondas acústicas a través de un medio fluido tiene dos contribuciones: la Energía Cinética debido al movimiento de las partículas y la Energía Potencial del fluido cuando este se comprime.

La Energía Cinética asociada a este movimiento de un elemento de fluido V_0 del fluido sin perturbar y que se mueve con velocidad u esta dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot V_0 \cdot u^2 \quad (4.14)$$

Donde $\rho_0 \cdot V_0$ corresponde a la masa del elemento de volumen del fluido sin perturbar.

La Energía Potencial asociada a un cambio de volumen de V_0 a V será igual al trabajo realizado por la presión acústica, que es la única fuerza que actúa sobre el mismo:

$$E_p = - \int_{V_0}^V p dV \quad (4.15)$$

Para evaluar esta integral, habrá que encontrar una relación entre p y V . De la ecuación de conservación de la masa se tiene que:

$$\rho V = \rho_0 V_0 \quad (4.16)$$

de forma que

$$dV = -\frac{V}{\rho} d\rho = -\frac{V_0}{\rho_0} d\rho \quad (4.17)$$

Relacionando la densidad con la presión mediante la ecuación de estado

$$p = c^2(\rho - \rho_0) \quad (4.18)$$

$$dV = -\frac{V_0}{\rho_0 c^2} dp \quad (4.19)$$

y considerando esta última expresión e integrando la presión acústica de 0 a p se obtiene la Energía Potencial:

$$Ep = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c^2} V_0 \quad (4.20)$$

Al sumar las Energías Potencial y Cinética se obtiene la Energía Acústica Total del elemento de volumen V_0 , que se denota por E . A partir de esto se define la Densidad Instantánea de Energía ε_i como la energía por unidad de volumen, y vendrá dada por:

$$\varepsilon_i = \frac{E}{V_0} = \frac{1}{2} \rho_0 \left[u^2 + \frac{p^2}{\rho_0^2 c^2} \right] \quad (4.21)$$

debido a que tanto u como p son funciones de espacio y del tiempo, la densidad Instantánea de Energía no es constante a través del fluido. Su promedio temporal entrega la densidad de energía $\langle \varepsilon_i \rangle$, que es constante en cualquier punto del fluido.

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon_i \cdot dt = \frac{1}{2} \left[\frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c^2} + u_{rms}^2 \right] \quad (4.22)$$

La densidad instantánea ε_i refleja la energía en un determinado instante y en una posición concreta; se suele utilizar en situaciones en las que existen ondas estacionarias (habitaciones, tubos, etc). Por el contrario $\langle \varepsilon_i \rangle$ es independiente de la posición y del tiempo, y sirve para caracterizar las situaciones en las que hay flujo neto de energía.

4.6. Propagación de la Energía: Intensidad Sonora

Para efectuar un estudio que permita conocer como se produce la propagación de la energía se debe suponer que no hay transformación de energía acústica en otro tipo de energía y viceversa. Por lo tanto se desprecian las fuerzas disipativas. No existen fuentes ni sumideros de calor o de trabajo externo y la conducción de calor es despreciable. Esto implica que los cambios de energía interna (y por lo tanto, de temperatura) sólo están asociados al trabajo realizado sobre un elemento por el fluido que le rodea durante la dilatación.

Se define la Potencia Instantánea W como el producto entre la fuerza que actúa sobre la partícula de fluido (o sea, sobre la superficie imaginaria que contiene dicha partícula) y la velocidad u que esta adquiere:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{u} = p \cdot \delta \vec{s} u \quad (4.23)$$

donde $\delta \vec{s}$ es el elemento vectorial de área. Evaluando esta potencia por unidad de área se obtiene la Intensidad Acústica Instantánea $I(\vec{r}, t)$ de una onda:

$$I(\vec{r}, t) = p(\vec{r}, t) \cdot u(\vec{r}, t) \quad (4.24)$$

Que refleja la variación de flujo de energía a través de un área unitaria perpendicular a la dirección de propagación. Notar que, en general, la magnitud y la dirección de I en cualquier punto del espacio varía con el tiempo.

La Intensidad Promedio $\langle I(\vec{r}) \rangle$ vendrá dada por

$$\langle I(\vec{r}) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(\vec{r}, t) \cdot \vec{u}(\vec{r}, t) \cdot dt \quad (4.25)$$

donde, si se supone una dependencia temporal armónica, T corresponde al periodo.

4.7. Notación compleja

La presión p y la velocidad \vec{u} normalmente no están en fase, esto se refleja más claramente utilizando notación compleja para todas las variables acústicas. Esta notación compleja también se usa para ver qué efectos produce dicho desfase.

A partir de esto la presión pasa a ser una magnitud compleja, pero solo su parte Real tiene significado físico. Con esto la componente de la velocidad en una dirección se expresa como la suma de dos componentes: una es la componente activa u_a , que es la parte real que está en fase con la presión, y la componente reactiva u_r , que es la parte imaginaria que está en cuadratura donde existe un desfase de 90° .

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = u_a(\vec{r}, t) + j u_r(\vec{r}, t) \quad (4.26)$$

De las dos expresiones anteriores se determinan dos componentes de la Intensidad instantánea: la activa y la reactiva respectivamente:

$$I(\vec{r}, t) = I_a(\vec{r}, t) + j I_r(\vec{r}, t) \quad (4.27)$$

$$I_a = p \cdot u_a$$

$$I_r = p \cdot u_r$$

Cuando p y u están en fase, se dice que el campo es activo. En este caso existe un flujo neto de energía y su producto da como resultado una Intensidad instantánea cuyo promedio natural es una Intensidad neta.

A diferencia del caso anterior, cuando p y u están en cuadratura, el campo es reactivo. El producto es una señal que varía en forma senoidal en torno a 0 y por lo tanto su promedio temporal es cero. En este caso no existe un flujo neto de energía.

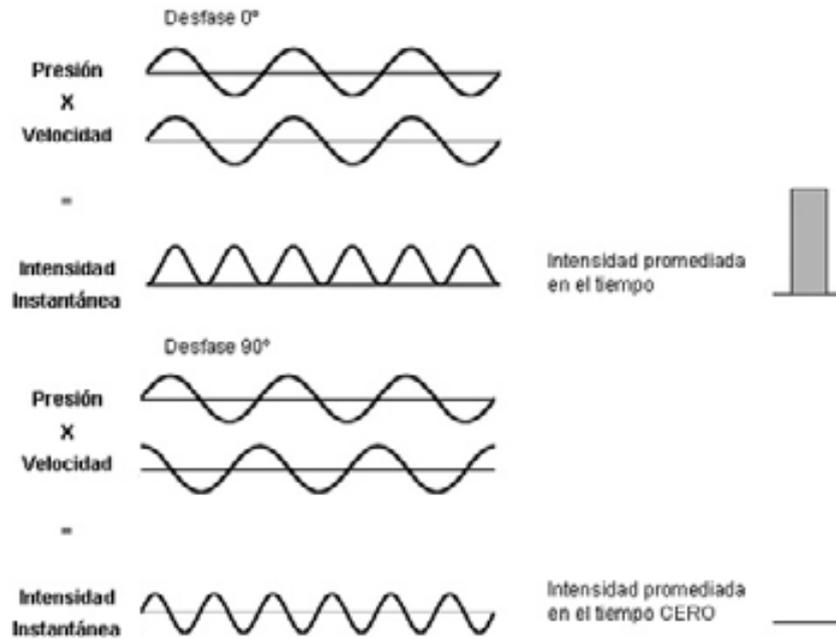


Figura 4.2. Presión y velocidad en fase (0°) y Presión y velocidad en cuadratura (90°). Y su respectiva Intensidad promediada en el tiempo.

Por esto, la componente activa de la Intensidad I_a , refleja el transporte de energía sonora local neto, en cuanto la Intensidad reactiva I_r , refleja el transporte de energía local oscilatorio. Cuando se calcula la Intensidad promedio $\langle I \rangle$, queda:

$$\langle I \rangle = \langle I_a \rangle + j \langle I_r \rangle = \langle I_a \rangle \quad (4.28)$$

Habitualmente se utilizará la notación:

$$I_a = I$$

$$I_r = J$$

La presencia de Intensidad activa en un campo no indica necesariamente que exista un transporte neto de energía a través de una región extendida del espacio.

La presión y la Intensidad, expresadas con magnitudes complejas, toman la forma:

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{2} \text{Re}[p \cdot p^*] \quad (4.29)$$

$$I = \frac{1}{2} \text{Re}[p \cdot u^*] \quad (4.30)$$

4.8. Impedancia Acústica Específica

Se denomina Impedancia Acústica Específica Z_a a la magnitud compleja que expresa el cociente entre presión y el módulo de la velocidad de la partícula, es decir:

$$Z_a = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} \quad (4.31)$$

Al separar parte real e imaginaria, esta última expresión se denotaría así:

$$Z_a = R + j\chi \quad (4.32)$$

donde R corresponde a la resistencia acústica específica y χ es la reactancia acústica específica.

Ocupando la notación compleja de la impedancia de la siguiente manera:

$$Z_a = |Z_a|e^{j\theta} \quad (4.33)$$

θ es la fase entre presión y velocidad. Con esta notación la presión y la velocidad se pueden expresar como:

$$p = P \cos(\omega t - kr) \quad (4.35) \quad \text{y} \quad u = U \cos(\omega t - kr - \theta) \quad (4.34)$$

Teniendo por definición que la Intensidad es, básicamente, $p \cdot u$, son necesarios dos transductores que puedan medir cada uno de estos valores, presión y velocidad (sonda pu). Pero un transductor que pueda medir velocidad es muy sofisticado y aumentaría los costos de realización de una sonda de Intensidad. Para ello se ocupan dos micrófonos (sonda pp) ubicados muy cerca el uno del otro y a través de una relación entre las presiones se puede estimar el valor de u , utilizando la llamada ecuación de Euler. Otra opción consiste en realizar un análisis FFT a dos canales y medir la Intensidad a través del Espectro Cruzado entre las señales.

5.1. Método de Aproximación de diferencias finitas (Método Directo)

Mediante la ecuación de Euler (ecuación 4.9), se obtiene la componente de velocidad de la partícula en una dirección determinada.

$$u_n = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial n} d\tau$$

Para evaluar el gradiente de presión se ocupa la aproximación de diferencias finitas que consiste en ubicar dos micrófonos A y B lo suficientemente cerca para que en el punto medio (centro acústico de la sonda) se pueda estimar la derivada parcial como el cociente entre la diferencia de presión entre los dos puntos y la separación Δr que los separa:

$$\frac{\partial p(\tau)}{\partial n} = \frac{(p_B(\tau) - p_A(\tau))}{\Delta r} \quad (5.1)$$

Por lo tanto se obtiene la siguiente expresión para la componente de velocidad en la dirección de propagación:

$$\hat{u}_n = -\frac{1}{\Delta r \cdot \rho_0} \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau \quad (5.2)$$

(^ : estimación en el centro acústico)

Esta aproximación de diferencias finitas es válida siempre y cuando la separación de los micrófonos sea pequeña en comparación a la longitud de onda. En la práctica se establece que la frecuencia máxima está limitada por la expresión $k \cdot \Delta r = 1$, donde k corresponde al número de onda de la frecuencia más alta a considerar.

Como se ha estimado la velocidad en el centro acústico de la sonda, la presión también deberá estimarse en dicho punto. Esta estimación se realiza calculando el valor medio entre las presiones captadas por ambos micrófonos:

$$\hat{p}(t) = \frac{(p_A(t) + p_B(t))}{2} \quad (5.3)$$

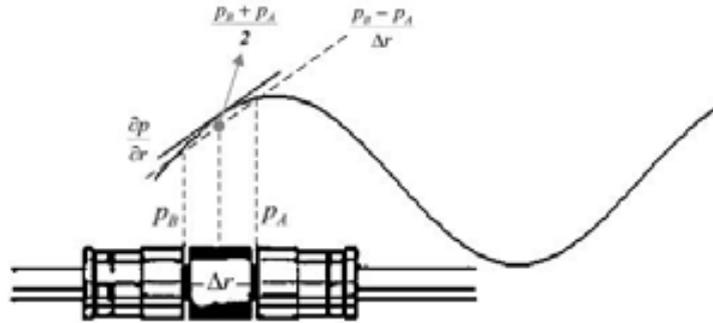


Figura 5.1. La línea segmentada representa la aproximación de la derivada parcial. La línea continua es la derivada parcial. Se muestra también el punto donde se realiza la aproximación de la presión promedio.

Por lo tanto la estimación de la Intensidad en el centro acústico de la sonda queda:

$$\hat{I}_n(t) = \hat{p}(t) \cdot \hat{u}_n(t) = - \left(\frac{I}{2 \cdot \Delta r \cdot \rho_0} \right) [(p_A(t) + p_B(t))] \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau \quad (5.4)$$

Esta expresión permite calcular la Intensidad sonora en función del tiempo, y es la expresión comúnmente utilizada por los equipos disponibles en forma comercial. Para el desarrollo de esta tesis se prefirió un análisis espectral en el cual la Intensidad sonora se presenta en función de la frecuencia (método indirecto), dicho valor se mide a través de una técnica que obtiene la FFT de ambos canales adquiridos.

5.2. Estimación con análisis FFT (Método Indirecto)

El método directo presenta una dependencia temporal de la Intensidad, sin embargo en la práctica se busca una representación frecuencial y se utiliza el llamado método indirecto, que solo puede ser implementado a través de un análisis digital y que está basado en la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para ello es necesario conocer la definición de Auto espectro y Espectro Cruzado, ya que la Intensidad se calcula a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado de las señales de ambos micrófonos.

5.2.1. Auto espectro y Espectro Cruzado

Una vez captadas las señales de los micrófonos, y de acuerdo al método empleado para medir Intensidad en este trabajo, toma una gran importancia el cálculo de los auto espectros de cada señal y el espectro cruzado entre las señales.

Si las señales se representan como $a(t)$ y $b(t)$, la Transformada de Fourier de estas señales define los espectros complejos $A(f)$ y $B(f)$, dados por:

$$A(f) = F\{a(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.5)$$

$$B(f) = F\{b(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} b(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.6)$$

Y sus auto espectros se definen por:

$$S_{AA}(f) = A^*(f) \cdot A(f) \quad (5.7)$$

$$S_{BB}(f) = B^*(f) \cdot B(f) \quad (5.8)$$

donde * indica el complejo conjugado.

La Transformada de Fourier que se mide en la práctica es la llamada Transformada Discreta de Fourier (DFT). La transformada Rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo que calcula la DFT con un número muy reducido de operaciones matemáticas comparado con el cálculo directo.

La DFT es una transformada que trabaja con tiempos finitos de longitud T . La señal de tiempo es sampleada en puntos discretos en tiempos $n \cdot \Delta t$, donde Δt es el tiempo de muestreo (o muestreo) y n es un entero. La DFT resulta en el Espectro de Fourier de una muestra finita de tiempo en frecuencias discretas $k \cdot \Delta f$, donde k es un entero y Δf es la resolución y se relaciona con T como $\Delta f = 1/T$.

Cada bloque de tiempo (i) entrega un valor estimado $\hat{A}_i(f)$ de la Transformada de Fourier $A(f)$:

$$\hat{A}_i(f) = \int_T a(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.9)$$

y análogamente para $B(f)$:

$$\hat{B}_i(f) = \int_T b(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.10)$$

en las frecuencias $k \cdot \Delta f = k \cdot 1/T$.

El valor esperado de $\hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{A}_i(f)$ es el auto espectro $S_{AA}(f)$:

$$S_{AA}(f) = E[\hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{A}_i(f)] = \lim_{n_d \rightarrow \infty} \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{A}_i(f) \quad (5.11)$$

y el auto espectro $S_{BB}(f)$ es:

$$S_{BB}(f) = E[\hat{B}_i^*(f) \cdot \hat{B}_i(f)] = \lim_{n_d \rightarrow \infty} \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \hat{B}_i^*(f) \cdot \hat{B}_i(f) \quad (5.12)$$

En la práctica la promediación es efectuada sobre un número finito de bloques de tiempo n_d .

El auto espectro es real y entrega una distribución de la potencia (o energía) de la señal en función de la frecuencia.

El espectro cruzado $S_{AB}(f)$ entre las señales $a(t)$ y $b(t)$ está definido por $A^*(f) \cdot B(f)$. Cuando se usa la DFT el espectro cruzado se encuentra al promediar los valores estimados $\hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{B}_i(f)$, entonces:

$$S_{AB}(f) = E[\hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{B}_i(f)] = \lim_{n_d \rightarrow \infty} \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{B}_i(f) \quad (5.13)$$

Se puede demostrar que $\hat{A}_i(f)$ y $\hat{B}_i(f)$ son pares conjugados, es decir $\hat{A}_i(-f) = \hat{A}_i^*(f)$ y $\hat{B}_i(-f) = \hat{B}_i^*(f)$. Los auto espectros $S_{AA}(f)$ y $S_{BB}(f)$ son además reales y pares y el espectro cruzado $S_{AB}(f)$ es par conjugado. La información presente en las frecuencias negativas contiene la misma información que las frecuencias positivas. Frecuentemente es más conveniente trabajar con el correspondiente espectro de un lado (one-sided spectra) $G_{AA}(f)$, $G_{BB}(f)$ y $G_{AB}(f)$ definidos por:

$$G_{AA}(f) = \begin{cases} 2 S_{AA}(f) & f > 0 \\ S_{AA}(f) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad G_{BB}(f) = \begin{cases} 2 S_{BB}(f) & f > 0 \\ S_{BB}(f) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases}$$

$$G_{AB}(f) = \begin{cases} 2 S_{AB}(f) & f > 0 \\ S_{AB}(f) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases}$$

La energía está entonces distribuida solo en frecuencias no negativas.

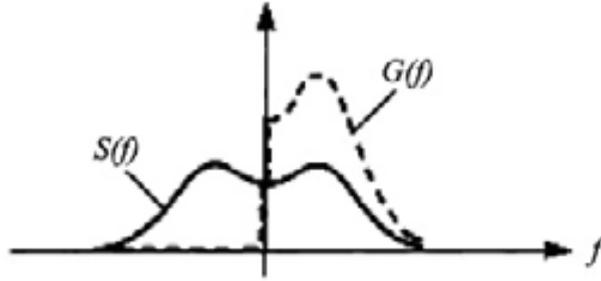


Figura 5.2. Distribución de frecuencias no negativas ($G(f)$).

El espectro cruzado es la función fundamental que relaciona las señales de ambos canales. Las estimaciones individuales del espectro cruzado $\hat{A}_i^*(f) \cdot \hat{B}_i(f)$ se puede escribir como:

$$|\hat{A}_i^*(f)| \cdot |\hat{B}_i(f)| e^{j\Delta\phi_i(f)} = |\hat{A}_i^*(f)| \cdot |\hat{B}_i(f)| e^{j(\phi_B(f) - \phi_A(f))} \quad (5.14)$$

donde las barras $||$ significan un valor numérico y $\Phi_A(f)$ y $\Phi_B(f)$ son la fase de $\hat{A}_i(f)$ y $\hat{B}_i(f)$ respectivamente. Así la amplitud del espectro cruzado individual estimado es el producto de las amplitudes individuales y la fase es la diferencia entre las fases de $\hat{B}_i(f)$ y $\hat{A}_i(f)$. La amplitud de $S_{AB}(f)$ tendrá un valor entre 0 y

$$\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} |\hat{A}_i(f)| \cdot |\hat{B}_i(f)|$$

dependiendo de la fluctuación de la diferencia de fase $\Delta\Phi_i(f)$ entre cada toma de tiempo.

5.3. Cantidades Teóricas

5.3.1. Espacio Temporal

Se tienen dos funciones temporales $p(t)$ y $u(t)$, que representan la presión y la velocidad en el centro acústico (se omitirá la dependencia espacial \vec{r} en todo el desarrollo posterior). La función de correlación cruzada entre $p(t)$ y $u(t)$ esta dada por.

$$R_{pu}(\tau) = \langle p(t) \cdot u(t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int p(t) \cdot u(t + \tau) dt \quad (5.15)$$

$\langle \rangle$: Promedio temporal

Esta función evaluada en $\tau = 0$ coincide con la definición de Intensidad Promedio:

$$I = \langle I \rangle = R_{pu}(0) = \langle p(t) \cdot u(t) \rangle \quad (5.16)$$

En este capítulo la Intensidad promedio se denotará simplemente por $I = \langle I \rangle$.

5.3.2. Espacio Frecuencial

Cuando se trabaja en el espacio de las frecuencias, las funciones que se obtienen son $P(f)$ y $U(f)$; las Transformadas de Fourier de la presión y la velocidad, respectivamente:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (5.17)$$

$$U(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (5.18)$$

y la función que corresponde a la correlación cruzada, es el Espectro Cruzado $S_{pu}(f)$, que es una magnitud compleja que contiene información acerca del desfase entre presión y velocidad:

$$S_{pu}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{pu}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5.19)$$

$$R_{pu}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pu}(f) \cdot e^{j\omega\tau} df \quad (5.20)$$

Ahora, la expresión de Intensidad Promedio en el centro acústico es:

$$I = R_{pu}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[S_{pu}(f)df] \quad (5.21)$$

Donde se evalúa la parte real del espectro, correspondiente a la parte activa de la Intensidad, que es la única que tiene un promedio no nulo.

5.4. Cantidades Estimadas

5.4.1. Espacio Temporal

Poniendo las expresiones en función de las cantidades estimadas se tiene:

$$\hat{p}(t) = \frac{(p_A(t) + p_B(t))}{2} \quad (5.22)$$

$$\hat{u}_n = -\frac{1}{\Delta r \cdot \rho_0} \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau \quad (5.23)$$

$$\hat{I}_n(t) = \hat{p}(t) \cdot \hat{u}_n(t) = -\left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot \rho_0}\right) [(p_A(t) + p_B(t))] \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau \quad (5.24)$$

5.4.2. Espacio Frecuencial

$P_A(f)$ y $P_B(f)$ son las Transformadas de Fourier de $p_A(t)$ y $p_B(t)$. La expresión de las cantidades estimadas es:

$$\hat{P}(f) = \frac{1}{2} (P_B(f) + P_A(f)) \quad (5.25)$$

$$\hat{U}(f) = -\frac{1}{j2\pi f \cdot \Delta r \cdot \rho_0} (P_B(f) - P_A(f)) \quad (5.26)$$

y teniendo en cuenta la definición de espectro cruzado, se obtiene:

$$S_{pu}(f) = -\frac{1}{\omega \cdot \Delta r \cdot \rho_0} [j(S_{BB}(f) - S_{AA}(f)) + 2 \text{Im}(S_{AB})] \quad (5.27)$$

Donde S_{AA} y S_{BB} son los autoespectros de los canales A y B respectivamente, S_{AB} el espectro cruzado definido en el rango de frecuencias que va desde $-\infty$ hasta $+\infty$ y G_{AB} el espectro cruzado que va desde 0 hasta $+\infty$.

La parte real que representa el espectro de la Intensidad Activa se evalúa a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado, entonces:

$$\hat{I}(f) = -\frac{\text{Im} G_{AB}}{2\pi \cdot f \cdot \rho_0 \cdot \Delta r} \quad (5.28)$$

Esta última expresión es la fórmula empleada en este trabajo para el cálculo de Intensidad.

Se puede demostrar que en ciertas condiciones el Nivel de Intensidad Li se puede expresar a través del Nivel de Presión Lp . En una onda plana, o esférica, libre y progresiva, la intensidad en la dirección de propagación es:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (5.29)$$

El Nivel de Intensidad es diez veces el logaritmo en base 10, de la relación de la intensidad de este sonido a la intensidad de referencia, es decir:

$$Li = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ [dB]} \quad (5.30)$$

donde $I_0=10^{-12}$ [W/m²].

El Nivel de Intensidad y el Nivel de Presión Sonora (Lp) se pueden relacionar solo en condiciones en la que existe onda plana o esférica progresiva. Para ello basta con reemplazar la ecuación 5.29 en la ecuación 5.30.

$$Li = 10 \log\left(\frac{p^2}{\rho_0 c I_0}\right) \quad (5.31)$$

La expresión dentro del paréntesis se puede amplificar por p_0^2 , y queda:

$$Li = 10 \log \left(\frac{p^2 \cdot p_0^2}{p_0^2 \rho_0 c I_0} \right) \quad (5.32)$$

donde $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [N/m²]

Reordenando esta expresión:

$$Li = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) + 10 \log \left(\frac{p_0^2}{\rho_0 c I_0} \right) \quad (5.33)$$

El primer sumando de la derecha de esta igualdad corresponde al Nivel de Presión Sonora Lp , por lo que la ecuación 5.33 queda:

$$Li = Lp + 10 \log \left(\frac{400}{\rho_0 c} \right) \quad (5.34)$$

En condiciones normales, en el cual la temperatura es $T = 22^\circ\text{C}$ y la presión barométrica es $P_0 = 0.751$ mHg, el valor $\rho_0 c$ es igual a 407 rayl MKS. El Nivel de Intensidad es menor al Nivel de Presión en cerca de 0.1 dB, por esto, en condiciones de una onda sonora plana o esférica progresiva el Nivel de Intensidad puede estimarse a través del Nivel de Presión.

$$Li \approx Lp \quad (5.35)$$

5.5. Errores Estimados

5.5.1. Limitación en altas frecuencias

5.5.1.1. Error de Aproximación, Ondas planas

Para campos sonoros sinusoidales e integración de tiempo ideales, la presión sonora es definida como:

$$p(x, t) = p_0 \cdot e^{j(\omega t - kx)} \quad (5.36)$$

Si tomamos las presiones medidas por los micrófonos A y B , respectivamente, en el tiempo inicial igual a cero en la dirección de propagación r , se obtiene:

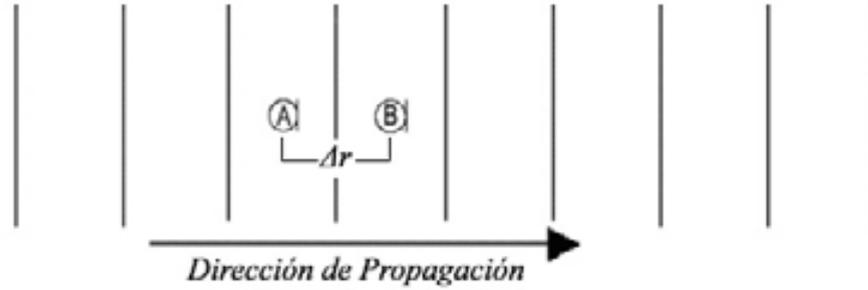


Figura 5.3. Onda plana y micrófonos ubicados en la dirección de propagación separados una distancia Δr .

$$p_A = p_0 \cdot e^{j(kr)} \quad (5.37)$$

$$p_B = p_0 \cdot e^{jk(r+\Delta r)} \quad (5.38)$$

La presión media p_m es entonces:

$$p_m = \frac{(p_B + p_A)}{2} = \frac{1}{2} p_0 (e^{-jk\Delta r} + 1) e^{-jkr} \quad (5.39)$$

y la diferencia de las presiones:

$$(p_B - p_A) = p_0 (e^{-jk\Delta r} - 1) e^{-jkr} \quad (5.40)$$

La ecuación de velocidad compleja en estado estacionario de un campo sinusoidal es:

$$u_r = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.41)$$

Al combinar las ecuaciones 5.40 y 5.41 queda:

$$u_r = -\frac{1}{\rho\Delta r} \frac{1}{j\omega} p_0 (e^{-jk\Delta r} - 1) e^{-jkr} \quad (5.42)$$

$$u_r^* = \frac{1}{\rho\Delta r} \frac{1}{j\omega} p_0 (e^{jk\Delta r} - 1) e^{jkr} \quad (5.43)$$

Calculando la Intensidad estimada en su parte real y parte imaginaria:

$$\hat{I}_r + j\hat{J}_r = \frac{I}{2} p \cdot u_r^* \quad (5.44)$$

$$\hat{I}_r + j\hat{J}_r = \frac{p_0^2}{2\rho c} \frac{I}{k\Delta r} \frac{(e^{-jk\Delta r} + 1)(e^{jk\Delta r} - 1)}{2j} \quad (5.45)$$

$$\hat{I}_r + j\hat{J}_r = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \frac{I}{k\Delta r} \frac{(e^{jk\Delta r} - e^{-jk\Delta r})}{2j} \quad (5.46)$$

$$\hat{I}_r + j\hat{J}_r = I_r \frac{I}{k\Delta r} \text{sen}(k\Delta r) \quad (5.47)$$

Como $jI_r=0$, se demuestra que una onda plana sinusoidal representa un campo sonoro puramente activo: Toda la energía es transportada. Así, el error entre la Intensidad teórica y la real es:

$$\frac{I_r}{I} = \frac{\text{sen}(k\Delta r)}{k\Delta r} \quad (5.48)$$

Por lo tanto para controlar este error es necesario restringir el producto $k\Delta r$. Para ello se asume el compromiso que este producto sea como máximo igual a 1.

5.5.2. Limitación en bajas frecuencias

La cantidad de desfase entre los dos canales en el sistema de análisis determina el límite a bajas frecuencias. La longitud de onda puede ser expresada en términos de una rotación de 360°. La distancia entre ambos micrófonos puede ser expresada como una fracción de la longitud de onda o, en forma equivalente, como un cambio de fase entre los dos puntos. La Intensidad está directamente relacionada con este cambio de fase: si no existe un cambio de fase no hay propagación y, por lo tanto, no hay Intensidad. Esta fase es equivalente al tiempo que le toma a la onda propagarse en este espacio (distancia entre los micrófonos). Esta diferencia de fase debe considerarse para medir una Intensidad correcta.

Sin embargo, en todos los sistemas de análisis habrá un pequeño retraso ente ambos canales, el cual introducirá un pequeño cambio de fase, llamado error de desfase. Para un buen sistema sonda – analizador, este desfase debe ser como máximo $\pm 0.3^\circ$. El error de desfase produce que la Intensidad sea subestimada o sobreestimada, de acuerdo al signo del error de

desfase. Para una precisión de 1 dB, el cambio de fase sobre el espacio entre los micrófonos debe ser mayor a 5 veces el error de fase del sistema.

Si se mide una frecuencia baja, por ejemplo 63 Hz, la longitud de onda es aproximadamente 5.5 metros y el cambio de fase, utilizando un espacio entre los micrófonos de 12 mm es sólo 0.8° , por lo que un error de fase del sistema de $\pm 0.3^\circ$ causará un error significativo en la Intensidad.

Si se mide la misma frecuencia con una distancia entre los micrófonos de 50 mm (aproximadamente 4 veces 12 mm) el cambio de fase es 3.3° y por lo tanto el resultado será lo suficientemente exacto.

Estos ejemplos solos son válidos para campos sonoros de propagación libre en la dirección de la sonda.

Por lo tanto para medir bajas frecuencias se necesita ocupar un espacio entre los micrófonos más extenso.

5.5.3. Limitaciones en campo cercano

5.5.3.1. Error de aproximación. Ondas Esféricas.

Se asumirá para una onda esférica radiada por una fuente monopolar, que la línea que une los centros de los micrófonos pasa a través de la fuente puntual.

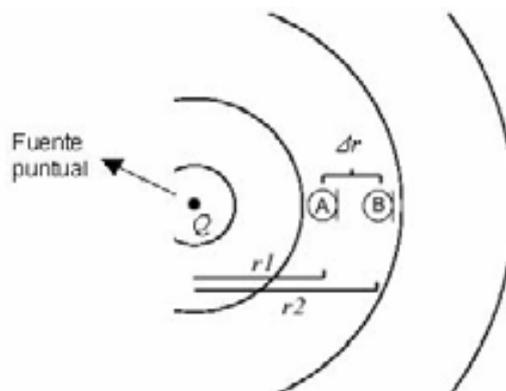


Figura 5.4. Fuente omnidireccional puntual. La línea que une ambos micrófonos pasa también por la fuente puntual.

se define Q como la velocidad de volumen de la fuente y Θ es el potencial de velocidad.

$$\Theta = \frac{Q}{4\pi r} \cdot e^{j(\omega t - kr)} \quad (5.49)$$

las expresiones de velocidad, presión e Intensidad son:

$$u_r = -\frac{\partial \Theta}{\partial r} = \left(\frac{1}{r} + jk \right) \left(\frac{Q}{4\pi r} \right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (5.50)$$

$$p_r = \rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = jk\rho c \left(\frac{Q}{4\pi r} \right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (5.51)$$

$$I_r = \frac{1}{2} \text{Re}(p_r \cdot u_r^*) = \frac{1}{2} \omega k \rho \left(\frac{Q}{4\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{r^2} \quad (5.52)$$

Al ocupar la técnica de los dos micrófonos:

$$p_m = \frac{(p_B + p_A)}{2} = -\frac{\omega \rho}{2j} \left(\frac{Q}{4\pi} \right) \left(\frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \right) \quad (5.53)$$

$$u_m = -\frac{jk\rho c}{j\omega\rho\Delta r} \left(\frac{Q}{4\pi r_2} e^{-jkr_2} - \frac{Q}{4\pi r_1} e^{-jkr_1} \right) \quad (5.54)$$

$$u_m^* = -\frac{1}{\Delta r} \left(\frac{Q}{4\pi r_2} e^{jkr_2} - \frac{Q}{4\pi r_1} e^{jkr_1} \right) \quad (5.55)$$

La Intensidad estimada es:

$$\hat{I}_r + j\hat{J}_r = \frac{1}{2} p_m \cdot u_m^* = \frac{\omega \rho}{4j\Delta r} \left(\frac{Q}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \right) \left(\frac{e^{jkr_2}}{r_2} - \frac{e^{jkr_1}}{r_1} \right) \quad (5.56)$$

Y la Intensidad media:

$$\hat{I}_r = \frac{\omega \rho}{2\Delta r} \frac{1}{r_1 r_2} \left(\frac{Q}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{e^{jk\Delta r} - e^{-jk\Delta r}}{2j} \right) = \frac{\omega \rho}{2\Delta r} \frac{1}{r_1 r_2} \left(\frac{Q}{4\pi} \right)^2 \text{sen}(k\Delta r) \quad (5.57)$$

Por lo tanto:

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{\text{sen}(k\Delta r)}{k\Delta r} \cdot \frac{r^2}{r_1 r_2} \quad (5.58)$$

Notar que:

$$\frac{r^2}{r_1 \cdot r_2} = \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5.59)$$

Esto indica que la influencia del campo cercano es una función del radio entre la separación del micrófono Δr y la distancia r entre el micrófono de la sonda y el centro acústico de la sonda.

Para efectuar el programa que permite medir Intensidad Acústica se utilizó el lenguaje de programación Testpoint versión 3.0. Testpoint presenta un stock de comandos que permite efectuar variadas acciones, una de las más importantes es el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de las señales que adquieren los micrófonos.

El programa desarrollado IntensiSeba v.1 permite entre otras cosas, realizar mediciones de Intensidad y comparar estos niveles con los niveles de Presión, analizar la Intensidad por tercio de octava y realizar mediciones en una cuadrícula para realizar mapas vectoriales de Intensidad.

6.1. Esquema del Proceso de Medición

La forma contemplada para medir Intensidad en este trabajo, está basado en una técnica FFT a través del Espectro Cruzado entre las dos señales captadas por los micrófonos, como se explicó anteriormente. El esquema básico de medición, y que fue el contemplado para la realización del software, se muestra en la figura 6.1. Las acciones que realiza el software de medición de Intensidad son:

- Adquirir las señales de ambos micrófonos.
- Tomar la FFT a ambos canales. En este punto se genera una lista de las frecuencias con una resolución dada por el cociente entre la frecuencia de sampleo y el número de muestras. Esta lista es importante para efectuar las curvas de Intensidad y, si se requiere, el análisis por tercio de octava.
- Calcular y promediar la amplitud del espectro cruzado y la diferencia entre las fases para cada una las frecuencias de la lista generada.
- Obtener la Intensidad a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado y calcular el cociente entre este valor y el producto de la densidad, separación de los micrófonos y frecuencia angular correspondiente.

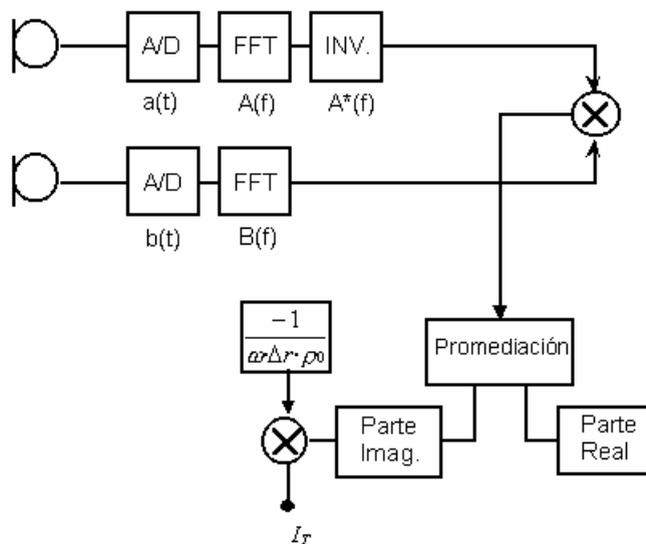


Figura 6.1. Diagrama de bloques del sistema de medición de Intensidad sonora a partir del método indirecto.

Con esto se obtiene una curva de Intensidad y de Nivel de Intensidad que depende de la frecuencia. Cuando sea necesario, se puede realizar un análisis por tercio de octava desde la banda de 100 Hz hasta la banda de 5000 Hz. Este análisis se realiza separando las frecuencias que componen la banda y sumando sus componentes de Intensidad. Si la separación es 12 mm, la

frecuencia más alta a medir es 4562 Hz. Esta frecuencia corresponde al máximo valor que contempla la banda de tercio de 5000 Hz al realizar un análisis por tercio de octava.

6.2. PC y Software de Adquisición

Para realizar el programa que permita medir Intensidad según el diagrama de la figura 6.1 se utilizó un computador personal con el software Testpoint 3.0 para adquirir y analizar los datos. El software Testpoint 3.0 tiene la capacidad de trabajar con la tarjeta **A/D DAS-1802HR/HR-DA** de Keithley Metrabyte. Con este software se desarrolló, básicamente, una rutina que permite adquirir las señales de ambos micrófonos, realizar un análisis FFT de cada canal, para posteriormente realizar el cálculo de espectro cruzado, necesario para la medida de la Intensidad.

El software de adquisición Testpoint 3.0 presenta un Stock de objetos que permiten la realización de cálculos matemáticos, insertar botones, displays, gráficos, tablas, objetos A/D, etc.

La descripción de los objetos más importantes se detallan a continuación:

a.- BOTONES

Los objetos *botones* son importantes ya que dentro de estos botones se encuentra la línea de acciones que va a permitir realizar una acción global determinada. Se pueden configurar para que se desactiven cuando otra acción se este llevando a cabo, para que realice la línea de acción apenas se ejecute el programa y para que no sea visible en determinadas situaciones. Dentro de la línea de acción se ejecutan los objetos matemáticos, objetos gráficos, tablas, etc.

b.- OBJETOS MATEMÁTICOS

Entre los comandos utilizados más importantes dentro de los objetos matemáticos están los siguientes:

FFT(fs,señal)

Comando que calcula la Transformada Rápida de Fourier de una señal, donde fs es la frecuencia de muestreo de la señal a analizar. El software Testpoint recomienda que la cantidad de datos presentes en la señal sea un número potencia de 2 (2^n con n entero). Este comando entrega una lista de tres columnas que son frecuencia, amplitud de cada componente de frecuencia y fase en radianes de la misma. Estos datos se pueden utilizar para su posterior visualización en un objeto gráfico y/o en un objeto del tipo tabla.

LIST(vect 1,vect 2,...,vect N) Este comando genera una lista de N columnas, es útil para generar gráficos X v/s Y, por ejemplo si el primer vector corresponde a las frecuencias (X) y el segundo a las amplitudes (Y) de las componentes de frecuencia tomadas a partir del cálculo de la FFT. Este comando fue utilizado para generar una lista que permita ser guardada en un archivo, entre otras utilidades.

SELECT(list,M) Selecciona la columna M de una lista generada previamente. Si se requiere seleccionar la primera columna el valor de M debe ser cero.

SUBARRAY(list,a,b) Selecciona las filas a hasta la fila b de una lista de datos, cuando se requiere seleccionar desde la primera fila, el valor de a debe ser cero.

LOG10(X) Calcula el logaritmo en base 10 del argumento X, X puede ser un número, un vector o una lista y el resultado va a ser de las mismas características.

INDEX(A,H) Obtiene el elemento ubicado en la posición H de una lista A, el primer valor de la lista corresponde al valor cero.

BANDPASS(señal,fs,fmín,fmáx) Este comando filtra una señal usando un filtro de frecuencia pasabanda digital. Los parámetros requeridos son el vector que contiene la señal, la frecuencia de muestreo y las frecuencias baja y alta del rango de frecuencia, respectivamente. El algoritmo de filtración es tomar la FFT de la señal para obtener su espectro, establecer en cero las componentes de frecuencia fuera del rango de frecuencias establecido y finalmente tomar la transformada inversa de este resultado.

c.- VENTANAS

Las funciones de ventana multiplican cada elemento en el argumento por una ponderación. Si el argumento es un vector de tamaño N, el parámetro K en las ecuaciones siguientes va de $-N/2$ a $N/2$.

Tabla 6a. Expresión de la ponderación por cada ventana.

VENTANA	PONDERACION
Hamming(x)	$0.543748+0.456252 \cdot \cos(2\pi \cdot K/N)$
Hanning(x)	$0.5+0.5 \cdot \cos(2\pi \cdot K/N)$
Blackman(x)	$0.42659+0.49656 \cdot \cos(2\pi \cdot K/N)+0.076848 \cdot \cos(4\pi \cdot K/N)$
Blackmanharris3(x)	$0.42323-0.49755 \cdot \cos(2\pi \cdot K/N)+0.07922 \cdot \cos(4\pi \cdot K/N)$
Blackmanharris4(x)	$0.35875-0.48829 \cdot \cos(2\pi \cdot K/N)+0.14128 \cdot \cos(4\pi \cdot K/N)-0.01168 \cdot \cos(6\pi \cdot K/N)$

d.- IF

Otro objeto empleado en el desarrollo del software corresponde al objeto **IF**. Este objeto permite establecer una o más condiciones para la ejecución de una serie de acciones. Al utilizarse dentro la línea de acción de otro objeto existen dos posibilidades, una es, si la condición se cumple, entonces se ejecutan las acciones determinadas. Si no se cumple, no ocurre nada (**IF / THEN**). La otra opción, corresponde a si la condición se cumple, entonces se ejecuta una línea de acciones, y si no se cumple, ejecuta otra línea de acciones (**IF / THEN / ELSE**). Las más utilizada fue esta última.

e.- FILE

El objeto **FILE** permite guardar en un archivo una medición realizada o abrir un archivo existente. En este objeto se puede configurar la extensión del archivo guardado o de los archivos a abrir. Para guardar se debe arrastrar el objeto a su misma línea de acciones y seleccionar la opción *output to* y arrastrar el objeto matemático que va a ser guardado. Para abrir un archivo se debe seguir un procedimiento similar, pero esta vez se debe elegir la opción *input from* y establecer el tamaño en bytes del archivo que va a ser abierto.

f.- A/D

Uno de los objetos más importantes corresponde al objeto **A/D**. Este objeto permite acceder a una tarjeta análoga digital. Testpoint permite un máximo de 4 tarjetas A/D a la vez. Al arrastrar este objeto a la línea de acciones de otro objeto se disponen de diferentes opciones, entre ellas:

- Adquirir A/D (*Acquire A/D*), en esta opción se debe entrar número de muestras (*# samples*, se permite de 1 hasta $2e^9$ muestras), frecuencia de sampleo (*rate*) en Hertz limitada por la tarjeta A/D y canales (*channel(s)*) que van a ser muestreados.
- Establecer la ganancia (*Set A/D gain*) que fue establecida en 1.
- *Set A/D burst mode*, opción que permite que los canales sean muestreados lo más rápido posible.

Existen otras opciones en este objeto que no fueron utilizadas para la realización del software.

g.- LOOP

Este permite realizar una acción repetidamente. Este objeto fue ocupado principalmente para realizar un promedio entre los valores obtenidos. La serie utilizada correspondió a una serie lineal, existiendo también series geométricas y series de décadas.

6.3. Cadena de Medida

6.3.1. Micrófonos y Preamplificador

Los micrófonos utilizados en la sonda corresponden al modelo **ECM8000** de marca Behringer, estos micrófonos son de condensador prepolarizado (electret) de $\frac{1}{2}$ pulgada, omnidireccionales y una respuesta plana en el rango audible de frecuencias (15 Hz a 20000 Hz). Para crear esta sonda se dispusieron los micrófonos cara a cara, uno de ellos debió desarmarse como se aprecia en la figura 6.2.

El preamplificador utilizado, modelo **MIC2200** (Behringer), consta de dos canales de entrada y dos de salida para conectores XLR y Jack de $\frac{1}{4}$ de pulgada (señal de micrófono y señal de línea). Los niveles de entrada se ajustan de acuerdo al calibrador utilizado y antes de que encienda el LED (Clip) correspondiente. Los niveles de salida del preamplificador se ajustan de acuerdo al calibrador utilizado y al Nivel de Presión que señala la ventana “Calibrar” del Software desarrollado.

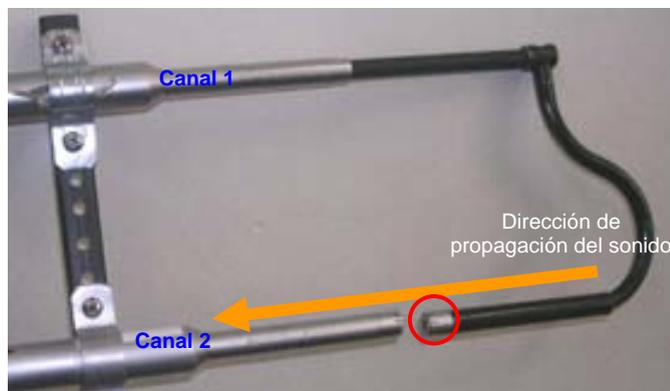


Figura 6.2. Ubicación de los micrófonos en la sonda de Intensidad para medir Intensidad positiva según dirección de la propagación del sonido. Se aprecia que uno de los micrófonos (círculo rojo) fue desacoplado para ubicarlos en configuración cara a cara.

6.3.2. Tarjeta Conversora

La tarjeta conversora multicanal **A/D DAS-1802HR/HR-DA** digitaliza las señales análogas provenientes del preamplificador. La conexión de los terminales de entrada de la tarjeta A/D hacia el computador se realiza a través de un cable serial que llega a una tarjeta interna ubicada en la placa madre. Esta tarjeta se utilizó en *Differential Mode*, modo que dispone de 8 canales balanceados (*Bipolar*) a diferencia del *Single mode* que permite 16 canales, donde la señal es una fase y su tierra (*Unipolar*). La tarjeta cuenta con diferentes ganancias de entrada a sus canales (Gain = 1, 2, 4, 8). Esta ganancia se controla desde un comando en Testpoint 3.0, así como la frecuencia de muestreo, número de muestras consideradas para el análisis y los canales de adquisición. Los canales utilizados fueron el 1 y el 2 con una ganancia igual a uno (1). Con esta ganancia la tarjeta soporta un máximo de ± 10 Volts de entrada por canal.



Figura 6.3. Tarjeta conversora Análogo – Digital A/D DAS-1802HR/HR-DA (Keithley Metrabyte).

La tarjeta multicanal tiene la capacidad de muestrear a 100 KHz. Si se trabaja con más canales a la vez esta frecuencia de muestreo se reparte equitativamente según sea la cantidad de canales empleados. Como se utilizaron dos canales, la frecuencia de muestreo máxima permitida es de 50 KHz por canal. La tarjeta **A/D DAS-1802HR/HR-DA** cuenta con una resolución de cuantización de 16 bits para cada uno de los canales. Esta tarjeta conversora A/D realiza los siguientes pasos:

- a) Muestrear: Esta etapa convierte una señal continua en una señal discreta por medio de un dispositivo muestreador. El tiempo entre cada muestra se denomina *intervalo de muestreo* (T), que corresponde al inverso de la *frecuencia de muestreo* o *frecuencia de sampleo* (fs).

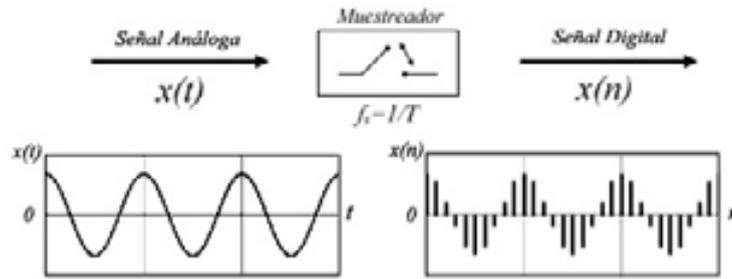


Figura 6.4. Representación de la etapa de muestreo que realiza la tarjeta.

Para evitar distorsiones al realizar un análisis de frecuencia se debe tener en cuenta el *Teorema de Nyquist*, que establece que para evitar los problemas descritos (Aliasing) la frecuencia de muestreo f_s debe ser al menos el doble de la mayor componente de frecuencia de interés $f_{máx}$, es decir:

$$f_s > 2 \cdot f_{máx}$$

- b) **Cuantificar:** Los valores discretizados en la etapa de muestreo son aproximados a un conjunto de valores posibles. Esta aproximación dependerá de la resolución en *bits* de la tarjeta A/D. Se disponen de 2^n estados de cuantización para un rango específico de amplitud, n corresponde al número de bits disponibles. La tarjeta disponible presenta la capacidad de cuantificar a 16 bits, o sea 65536 estados de cuantización y el rango de amplitud utilizado es de ± 10 Volt. La diferencia entre la señal analógica sin cuantificar y la señal cuantificada se denomina *error de cuantización*.
- c) **Codificar:** En esta etapa cada valor discretizado y cuantificado se transforma en una secuencia binario digital.

6.3.3. Descripción del programa desarrollado en Testpoint

Al abrir el programa desarrollado, que permite medir Intensidad Sonora, se despliegan 4 ventanas (tres superiores y una inferior) estas ventanas comprenden botones, displays, datos a ingresar, gráficos y switches (Figura 6.5).

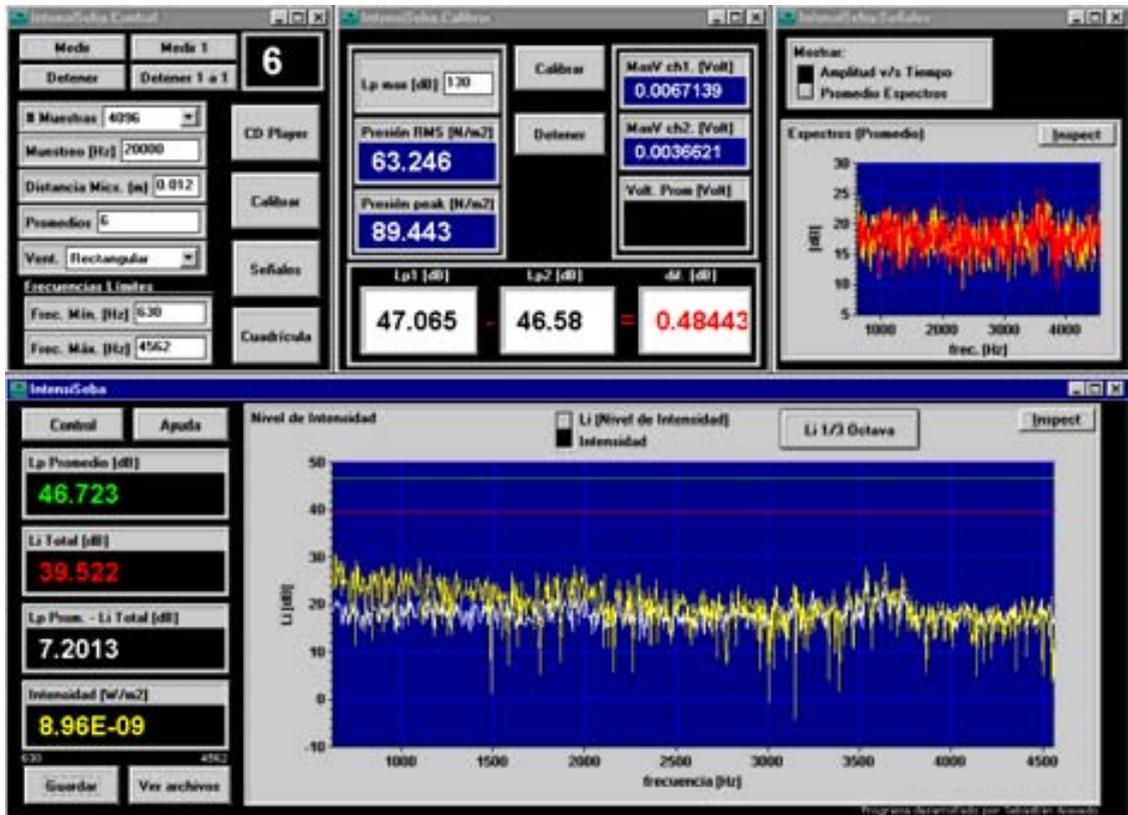


Figura 6.5. Presentación al usuario.

Se explicará a continuación la función de cada elemento presente en el programa:

6.3.3.1. Botones

El botón *Medir* presente en la ventana superior izquierda permite comenzar la medición, esta medición realizará una cantidad determinada de promedios y se detendrá. Si se requiere detener antes la medición existe el botón *Detener* que está bajo el botón descrito.

El botón *Medir 1* realiza una cantidad finita de mediciones, cada una independiente de otra, o lo que es lo mismo muchas mediciones con promedio igual a uno, botón útil para encontrar mínimos y máximos de Intensidad. El botón *Detener 1 a 1* detiene esta acción en el momento que se desee.

El botón *CD Player* abre el reproductor de discos compactos presente en Windows '98 (que es el sistema operativo que posee el PC utilizado). El botón *Calibrar* bajo este botón despliega la ventana superior central si es que está oculta. La misma acción realiza el botón *Señales* con la ventana superior derecha y el botón *Control* con la ventana superior izquierda.

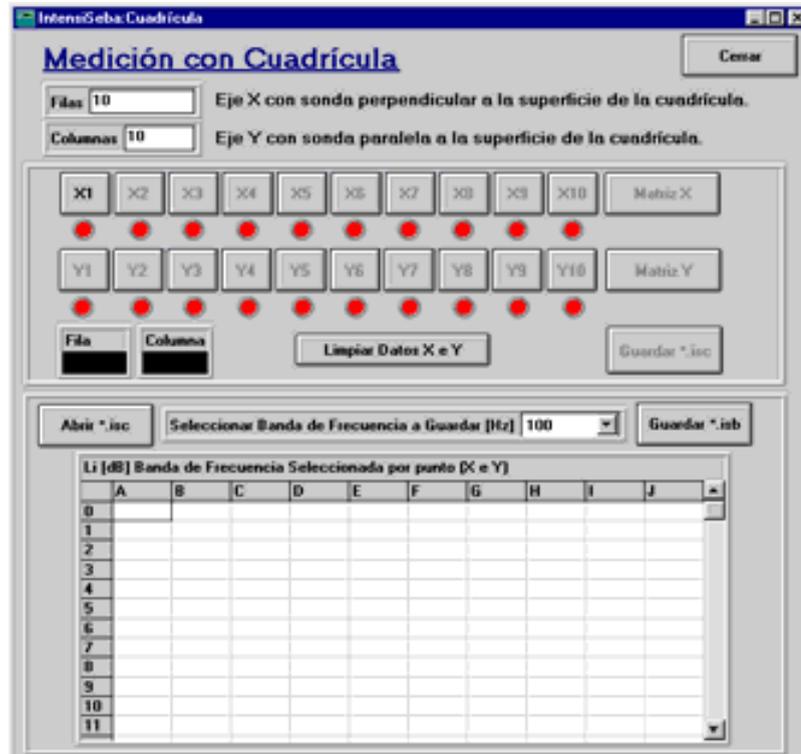


Figura 6.6. Ventana que se abre al presionar el botón *Cuadrícula*.

El botón *Cuadrícula* despliega una nueva ventana que permite registrar los valores de una cuadrícula imaginaria que puede ser guardada y posteriormente visualizada con ayuda de Matlab (Anexo E). Por cada punto se guardan los Niveles de Intensidad por tercio de octava con el signo de Intensidad correspondiente.

El botón *Ayuda* abre una guía para realizar las mediciones en formato PDF, documento que se adjunta en Anexo D. El botón *Guardar* permite guardar los datos de una medición para luego ser revisada presionado el botón *Ver archivos*. El botón *Li 1/3 Octava* permite visualizar el Nivel de Intensidad sonora por bandas de tercio desde la frecuencia de 100 Hz hasta 5000 Hz, este análisis puede ser guardado para luego ser revisado también a través de una opción ubicada en la ventana que se despliega al presionar el botón *Ver archivos*.

Al guardar una medición el archivo con extensión “seb” que se genera contiene una serie de números divididos en diez columnas organizadas de la siguiente manera:

- Columna 1: Listado de las frecuencias [Hz].
- Columna 2: Valores de Intensidad para cada una de las frecuencias [W/m^2].
- Columna 3: Nivel de Presión del canal 1 [dB].
- Columna 4: Nivel de Presión del canal 2 [dB].

- Columna 5: Fase entre las señales de las componentes de frecuencia [radianes].
- Columna 6: Número de muestras.
- Columna 7: Frecuencia de sampleo utilizada durante la medición [Hz].
- Columna 8: Separación entre los micrófonos utilizada [metros].
- Columna 9: Cantidad de promedios realizados en la medición.
- Columna 10: Nivel de Presión Sonoro Promedio [dB].

Cuando se guarda el análisis por tercio de octava se genera un archivo "ist" que contiene tres columnas, estas son:

- Columna 1: Listado de las frecuencias centrales de las bandas de tercio [Hz].
- Columna 2: Nivel de Intensidad para cada una de las bandas [dB].
- Columna 3: Intensidad para cada una de las bandas [W/m^2].

En la ventana superior central existe la posibilidad de calibrar los niveles de entrada presionando el botón *Calibrar*. Realizado este proceso para cada uno de los canales se debe detener la calibración presionando el botón *Detener*.

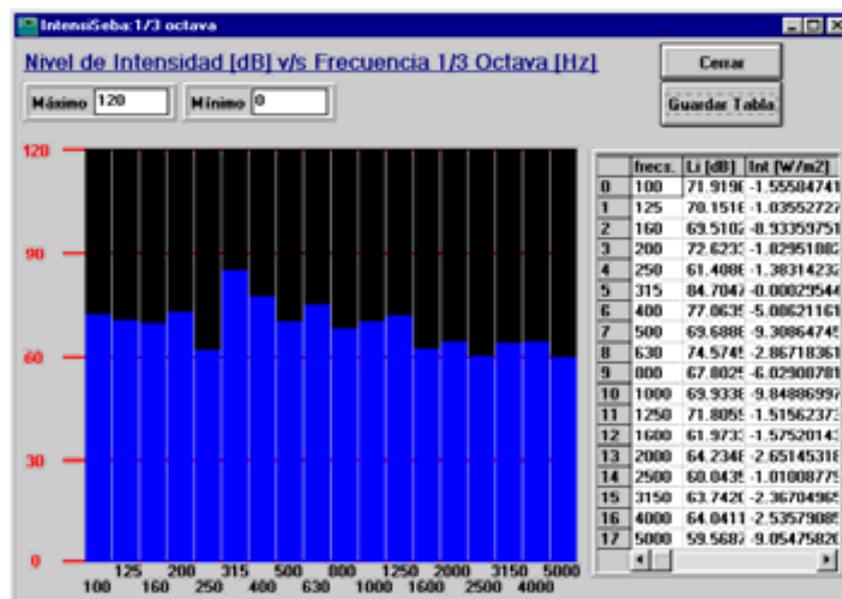


Figura 6.7. Ventana que se despliega al presionar el botón *Li 1/3 Octava*.

La ventana de la figura 6.7 muestra el análisis por 1/3 de Octava que realiza el programa, este análisis se produce siempre desde la banda de los 100 Hz hasta la banda de los 5000 Hz, independiente de los límites de frecuencia establecidos. Se muestra a un costado una tabla con los Niveles de Intensidad e Intensidad por cada banda de frecuencia. Esta tabla se puede guardar en

un archivo *.ist. Estos valores de Niveles de Intensidad se calculan con el valor absoluto de la Intensidad y siempre se presentan y se guardan con signo positivo.

La figura 6.8 se abre cuando uno presiona el botón *Ver archivos* de la ventana principal, esta contiene los botones necesarios para abrir, mostrar los parámetros de medición y graficar un archivo que contenga una medición previamente realizada y guardada.

El botón *Li 1/3 Octava* presente en la ventana de la figura 6.8 permite abrir un análisis por 1/3 de octava guardado previamente.

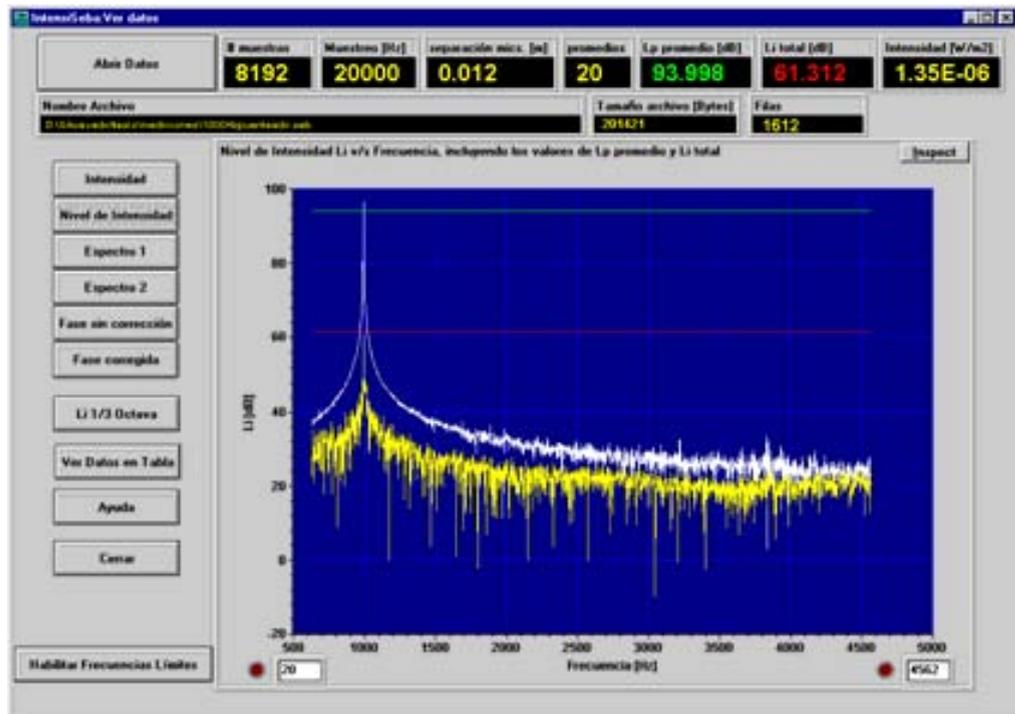


Figura 6.8. Ventana que permite revisar mediciones guardadas.

6.3.3.2. Datos de Entrada

Seis datos de entrada pueden ser configurados por el usuario previo a la medición, dichos valores se describen en la siguiente tabla.

Tabla 6b. Datos de entrada presentes en el programa y su descripción.

Dato Entrada	Descripción
# Muestras	Este valor especifica la cantidad de muestras por promedio de las señales captadas.
Muestreo [Hz]	Es la frecuencia de muestreo por canal a ser utilizada.
Distancia Mics. (m)	Corresponde a la separación entre los micrófonos que va a ser utilizada.
Promedios	Es la cantidad de promediaciones que va a realizar el programa.
Vent.	Corresponde a la ventana a ser utilizada durante la medición, son 6 opciones (Rectangular, Hanning, Hamming, Blackman, Blackmanharris3, Blackmanharris4).
Frec. Mín. [Hz]	Es la mínima frecuencia a ser analizada y límite inferior del filtro pasabanda.
Frec. Máx. [Hz]	Es la máxima frecuencia a ser utilizada, valor limitado por la separación entre los micrófonos. También corresponde el límite superior del filtro pasabanda.
Lp máx. [dB]	Especifica el máximo Nivel de Presión Sonora que se espera no sea superado durante la medición.

6.3.3.3. Displays

La ventana superior izquierda presenta un display que corresponde a la cantidad de promedios que han sido efectuados, este número va desde 1 hasta la cantidad de promedios especificada.



Figura 6.9. Display que muestra la cantidad de promedios realizados hasta el momento.

A continuación se explican los displays restantes:

Tabla 6c. Display presentes y descripción de lo que señala cada uno.

Nombre Display	Descripción
Presión RMS [N/m ²]	Corresponde al valor de presión sonora que permite obtener un Nivel de Presión sonora especificado en el dato de entrada <i>Lp max [dB]</i> .
Presión peak [N/m ²]	Es el máximo valor de presión sonora de un tono puro que tiene un valor RMS correspondiente a <i>Presión RMS [N/m²]</i> .
MaxV ch1. [Volt]	Es el máximo valor de voltaje que se obtiene del canal 1 durante la calibración y durante la medición.
MaxV ch2. [Volt]	Es el máximo valor de voltaje que se obtiene del canal 2 durante la calibración y durante la medición.
Volt. Prom [Volt]	Es el promedio de los máximos valores de voltaje que se obtienen de los canales 1 y 2 durante la calibración.
Lp1 [dB]	Es el Nivel de Presión sonora del canal 1 que se ajusta durante el proceso de calibración y se observa durante la medición.
Lp2 [dB]	Es el Nivel de Presión sonora del canal 2 que se ajusta durante el proceso de calibración y se observa durante la medición.
Dif. [dB]	Es la diferencia de Nivel de Presión sonora entre los dos canales.
Lp Promedio [dB]	Es el Nivel de Presión sonora promedio durante las promediaciones efectuadas en la medición.
Li Total [dB]	Es el Nivel de Intensidad total.
Lp Prom – Li Total [dB]	Es la diferencia entre el Nivel de Presión promedio y el Nivel de Intensidad total.
Intensidad [W/m ²]	Es el valor de Intensidad que permite el cálculo del Nivel de Intensidad total.

6.3.3.4. Gráficos y Switches

Los dos switches presentes permiten cambiar la gráfica bajo ellos. Uno de los switches permite cambiar entre un gráfico Amplitud v/s tiempo de las señales o el espectro de cada señal. El otro switch permite cambiar entre un gráfico que muestra el Nivel de Intensidad v/s frecuencia o Intensidad v/s frecuencia. Los Niveles de Intensidad graficados se calculan con el valor absoluto de la Intensidad y solo son negativos cuando los valores de Intensidad son menores que el valor de referencia respectivo I_0 ($I_0=10^{-12}$ [W/m²]).



Figura 6.10. Switches presentes en el programa.

Ambos switches pueden ser cambiados durante la medición o finalizado este proceso.

En este capítulo se presentan las mediciones de Intensidad realizadas con el software desarrollado. Primero se describen las mediciones con señales simuladas con un desfase conocido entre ellas. Luego las mediciones realizadas con la misma señal entrando a ambos canales de la tarjeta A/D. Posteriormente, la medición que se presenta es con la misma señal en ambos canales del preamplificador. Finalmente, se describen las mediciones realizadas con los dos micrófonos en posiciones diferentes. Se incluye además la influencia de la fase entre las señales en la medición del Nivel de Intensidad.

7.1. Mediciones Realizadas con Señales Simuladas

La rapidez máxima con que la tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA muestrea ambas señales es de 100 KHz, es decir, pasa un tiempo de 1/100000 segundos entre que la tarjeta A/D muestrea un canal y luego el otro. Esta capacidad de muestreo se establece en Testpoint utilizando la opción "Burst Mode" (opción que se explica en el capítulo anterior). Esta diferencia de tiempo entre el muestreo de un canal y el otro produce un pequeño desfase (que depende de la frecuencia) aún cuando está llegando la misma señal (en amplitud y fase) a ambos micrófonos. Este desfase es compensado en el cálculo de la parte imaginaria del espectro cruzado necesario para el cálculo de la Intensidad. Por lo tanto el desfase, en radianes, añadido por la tarjeta $\phi_{A/D}$ para una frecuencia f que es corregido es:

$$\phi_{A/D} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{100000} \quad (7.1)$$

El posible desfase producido en otras etapas de la cadena de medida no ha sido compensada en la programación.

Una forma de corroborar la programación es generando dos tonos puros de una frecuencia f , desfasados una cantidad $\phi_{A/D}$, y realizar la medición simulando que estas señales son las adquiridas por los micrófonos ubicados a la misma distancia de la fuente sonora, es decir, simulando que la sonda se ubica en una dirección perpendicular a la dirección de propagación del sonido. En este caso el Nivel de Intensidad debe ser mucho menor al Nivel de Presión.

Otra situación consistió en simular que la dirección de propagación del sonido coincide con el eje que une ambos micrófonos ubicados en la sonda. En este caso el Nivel de Intensidad debe ser similar al Nivel de Presión. Para ello, las señales generadas, a parte de incluir el desfase producido por la tarjeta A/D, también incluyen el desfase producto de la separación de los micrófonos. Por lo tanto, el programa al hacer el cálculo de Intensidad, va a compensar el desfase producido por la tarjeta A/D, y va a mantener el desfase de la ecuación 7.2. Este desfase, en radianes, producto de la separación de los micrófonos se expresa de la siguiente manera:

$$\phi_{mics} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta r}{c} \quad (7.2)$$

donde f es la frecuencia del tono puro generado, Δr es la separación de los micrófonos (considerada 12 mm) y c es la velocidad del sonido (344 m/s).

Las señales simuladas consistieron en tonos puros de 1000 Hz, generadas con una frecuencia de muestreo de 20KHz y con un total de 8192 muestras por cada uno de los dos canales generados para cada caso. Las mediciones descritas en este capítulo se realizaron utilizando ventana Hanning para tonos puros y ventana rectangular al realizar mediciones con ruido de banda ancha. Se consideró una separación de 12 mm entre los micrófonos (al menos que se indique lo contrario), separación que limita la máxima frecuencia a ser medida a 4562 Hz.

7.1.1. Primer Caso: Desfase de las señales producto de la tarjeta A/D

Los gráficos de Niveles de Intensidad que se presentan en este capítulo están calculados a partir del valor absoluto de la Intensidad, por lo que si un Nivel de Intensidad es negativo, es sólo porque la amplitud de dicha Intensidad es menor que el nivel de referencia 10^{-12} [W/m²]. La primera situación simulada se observa en la figura 7.1.



Figura 7.1. Primera situación simulada. Sonda ubicada en forma perpendicular a la propagación del sonido.

Las señales simuladas se generaron en Testpoint utilizando la siguiente fórmula para la señal 1:

$$p_1(n) = \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n / fs) \quad (7.3)$$

y para la señal 2:

$$p_2(n) = \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n / fs + 2 \cdot \pi \cdot f / 100000) \quad (7.4)$$

Estas señales (y las siguientes señales generadas) se generaron con un loop en el cual n va de 1 hasta 8192, f es la frecuencia de la señal y fs la frecuencia de muestreo.

El Nivel de Presión promedio, para este caso en la frecuencia de 1000 Hz, fue de 106.1 [dB] y el Nivel de Intensidad fue de 70.4 [dB] con una Intensidad de $1.11 \cdot 10^{-5}$ [W/m²] (ver figura 7.2), por lo que existe una diferencia de 35.7 [dB] entre el Nivel de Presión y el Nivel de Intensidad en esta frecuencia. Al realizar el análisis por tercio de octava, la banda correspondiente a los 1000

Hz presenta un Nivel de Intensidad de 46 [dB]. El desfase entre las señales es $3.5 \cdot 10^{-30}$ en la frecuencia especificada, valor que incluye la corrección de fase que realiza el programa en la estimación de Intensidad.

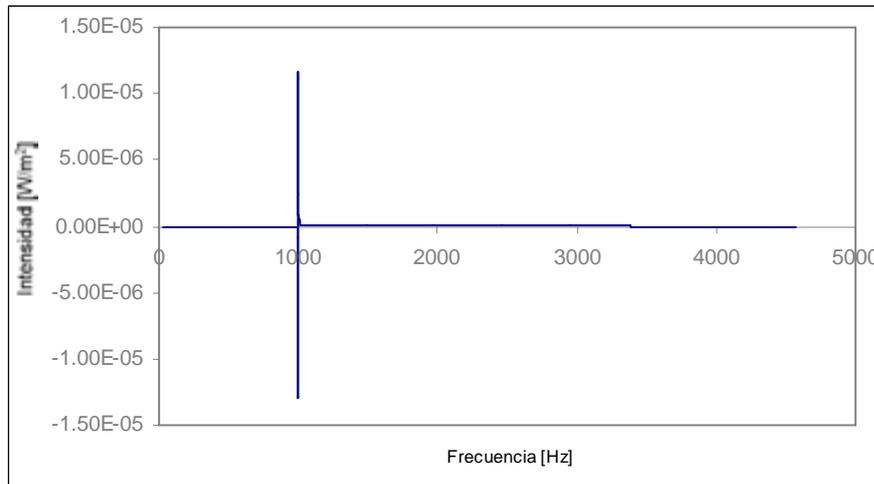


Figura 7.2. Medición de Intensidad con tonos puros generados con una fase conocida.

Los niveles obtenidos demuestran que en este caso el software desarrollado funciona de manera correcta.

7.1.2. Segundo Caso: Desfase de las señales producto de la tarjeta A/D y de la separación de los micrófonos

Si el sonido incide a 85° con relación a la dirección de la sonda, la Intensidad tendrá un signo determinado (positivo o negativo). Ahora si el sonido incide a 95° la Intensidad deberá marcar un signo contrario al anterior. Es decir, debe haber un cambio en la dirección de la Intensidad con un pequeño cambio en el ángulo de incidencia (figura 7.3).

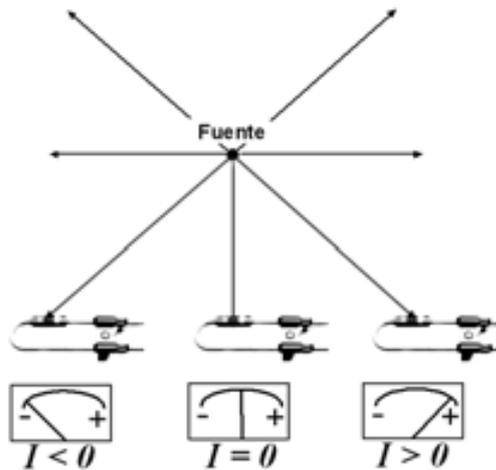


Figura 7.3. Característica direccional de una sonda de Intensidad.

La situación extrema consiste en realizar una medición con la sonda ubicada en la dirección de propagación del sonido (figura 7.4 a), en el que la Intensidad debe ser positiva; y luego “girar” la sonda 180°; asumiendo que el sonido viaja en dirección opuesta (figura 7.4 b), en la cual la Intensidad debe ser negativa y de magnitud similar. Este caso se simuló en forma similar al caso del punto 7.1.1., pero esta vez se añade el desfase de la ecuación 7.2 a la segunda señal.



Figura 7.4. (a) Situación de medida simulada con micrófono 1 más cercano a la fuente. (b) Situación contraria.

Para el primero de estos casos las señales generadas 1 y 2 respectivamente son las siguientes:

$$p_1(n) = \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n / fs) \tag{7.5}$$

$$p_2(n) = \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n / fs + 2 \cdot \pi \cdot f / 100000 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta r / c) \tag{7.6}$$

Para el segundo caso la señal 1 permanece igual y la señal 2 se expresa:

$$p_2(n) = \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n / fs + 2 \cdot \pi \cdot f / 100000 - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta r / c) \tag{7.7}$$

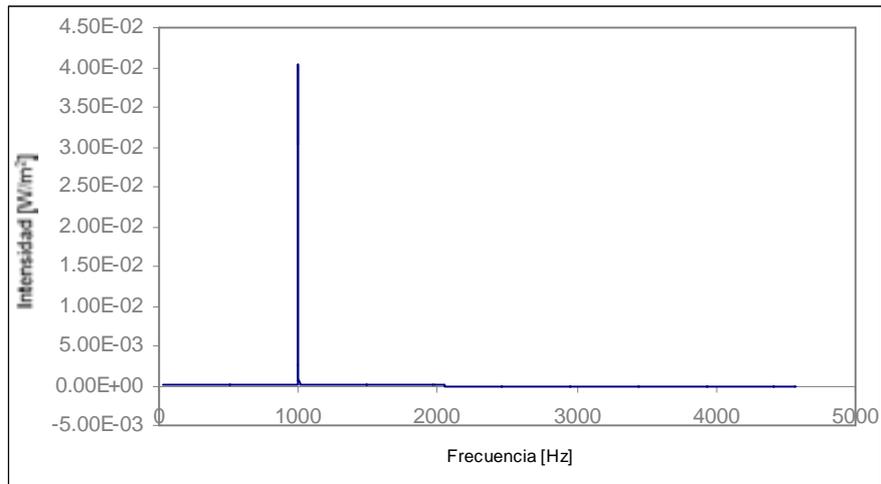


Figura 7.5. Medición de Intensidad simulando propagación en dirección del eje de la sonda.

La primera situación presenta una Intensidad de $0.039 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en la frecuencia de 1000 Hz como se aprecia en la figura 7.5, que corresponde a un Nivel de Intensidad de 105.9 [dB] , para un Nivel de Presión promedio de 106.1 [dB] . El desfase entre las señales producto de la separación de los micrófonos para dicha frecuencia debe ser 12.56° , y la fase que entrega el programa es de 12.54° .

La segunda situación entregó un Nivel de Presión promedio de 106.1 [dB] y un Nivel de Intensidad sonora de 105.9 [dB] con una Intensidad de $-0.039 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en la frecuencia de 1000 Hz , situación representada en la figura 7.6. El desfase entre las señales es el mismo, en magnitud, que el de la situación anterior, pero esta vez presenta signo opuesto, como debe ser.

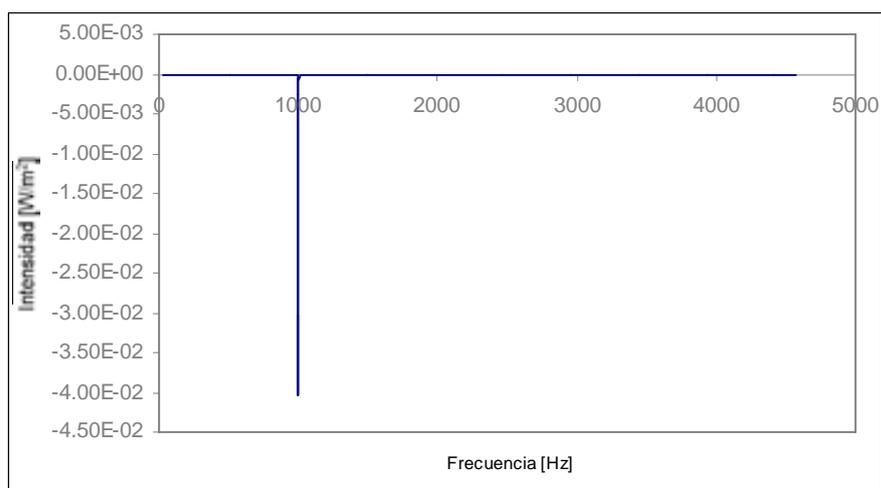


Figura 7.6. Medición de Intensidad simulando dirección contraria a la situación expuesta en la figura 7.5.

Se puede observar que la Intensidad presenta signo opuesto comparando ambos casos y una magnitud similar, además de que el Nivel de Presión es muy similar al Nivel de Intensidad, situación que cumple con lo esperado.

7.2. Tarjeta Punteada

Al puentear la tarjeta A/D se pretende simular el caso en el que la sonda se ubica en forma perpendicular a la propagación del sonido (figura 7.1). En este caso el Nivel de Intensidad debe ser mucho menor al Nivel de Presión. Se realizaron dos mediciones para este caso, una con un parlante generando ruido blanco y la otra con un tono puro nominal de 1000 Hz. Las mediciones fueron hechas con un total de 20 promediaciones, una frecuencia de muestreo de 20 KHz y un total de 8192 muestras, considerando una separación entre los micrófonos de 12 mm. El esquema de esta medición se muestra en la figura 7.7.

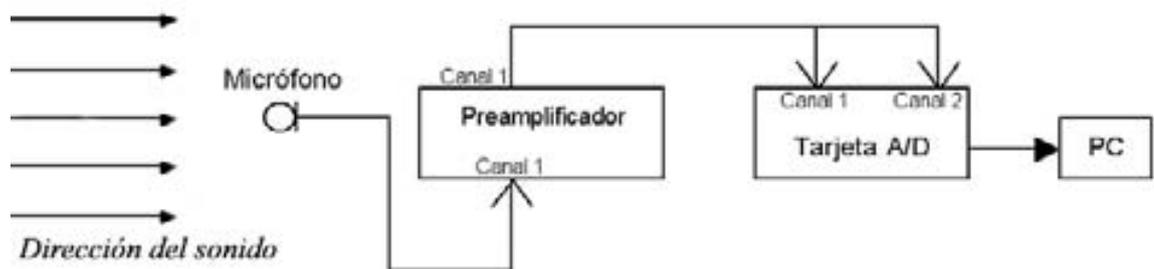


Figura 7.7. Esquema de medición con tarjeta punteada. Llega la misma señal a ambos canales de la tarjeta.

7.2.1. Ruido Blanco

Las mediciones con ruido blanco presentan un Nivel de Intensidad menor que el Nivel de Presión en todas las frecuencias (figura 7.8). Si comparamos el Nivel de Intensidad total con el Nivel de Presión promedio total se observará que para la Intensidad se tiene un nivel de 59.1 [dB] y para la presión un nivel de 90[dB]. El promedio de la diferencia de fase entre las señales se acerca a los 0.5°, para el rango comprendido entre los 20 y los 4562 Hz.

La diferencia entre el Nivel de Presión y el Nivel de Intensidad se mantiene en casi todo el rango de frecuencia en 20 [dB] aproximadamente, sólo en frecuencias bajo los 200 Hz y sobre los 4000 Hz esta diferencia es notoriamente menor (ver figura 7.8).

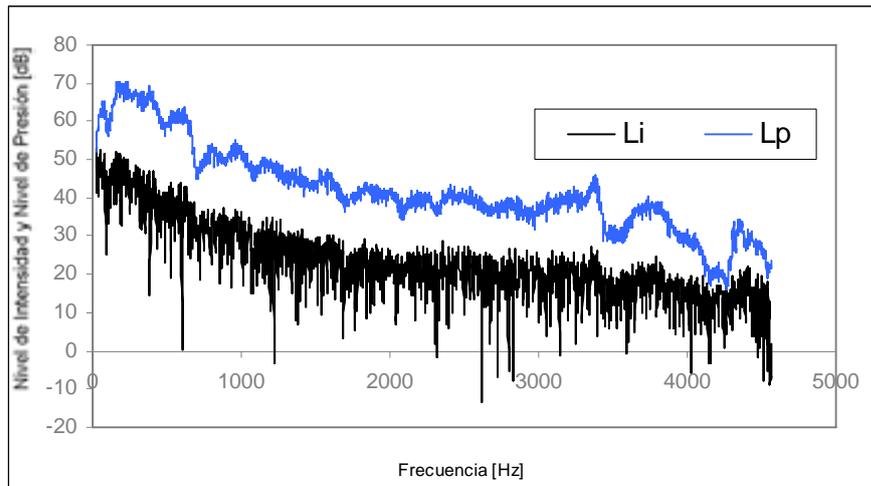


Figura 7.8. Nivel de Intensidad para la medición con ruido blanco con la tarjeta puenteada. La línea negra representa Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²) y la línea azul Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

7.2.2. Tono Puro 1000 Hz

Si bien nominalmente la frecuencia medida era un tono puro de 1000 Hz, la mayor cantidad de energía, al realizar la medición, se presentó en la frecuencia de 983 Hz aproximadamente. El Nivel de Presión promedio fue de 96.9 [dB] y el Nivel de Intensidad alcanzó los 63.3 [dB] en esta frecuencia, obteniendo una diferencia de 33.6 [dB] entre los Niveles de Presión e Intensidad. El desfase que se produce entre las señales para la frecuencia de 983 Hz es de $3.8 \cdot 10^{-30}$. La banda de tercio de 1000 Hz alcanza los 58.4 [dB] de Nivel de Intensidad. Esta medición se grafica en la figura 7.9.

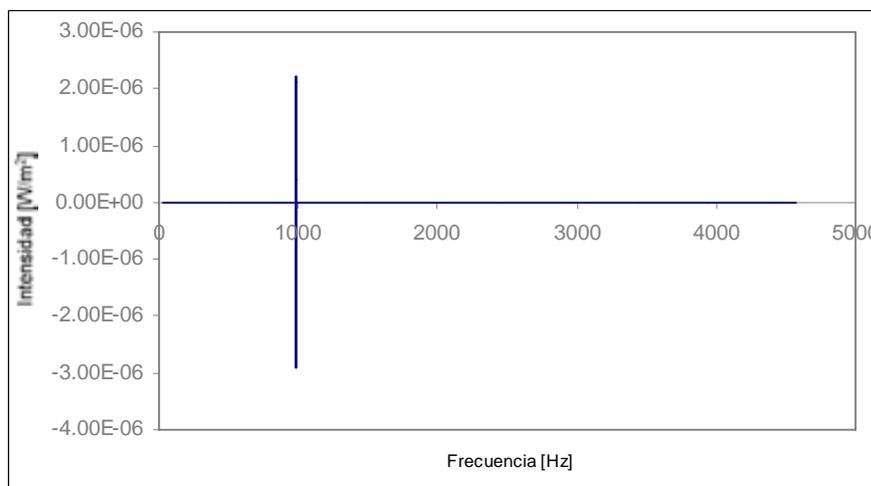


Figura 7.9. Medición de Intensidad Sonora de un tono puro de 1000 Hz con la tarjeta puenteada.

7.3. Misma Señal en Ambos Canales del Preamplificador

Al realizar esta medición se pretende estudiar cómo responde el preamplificador a utilizar durante las mediciones y simula el caso en el que la misma señal sonora llega a ambos micrófonos de una sonda de Intensidad. Para ello se introdujo directamente la misma señal a ambos canales del preamplificador directamente desde el reproductor de Discos Compactos como lo muestra la figura 7.10.

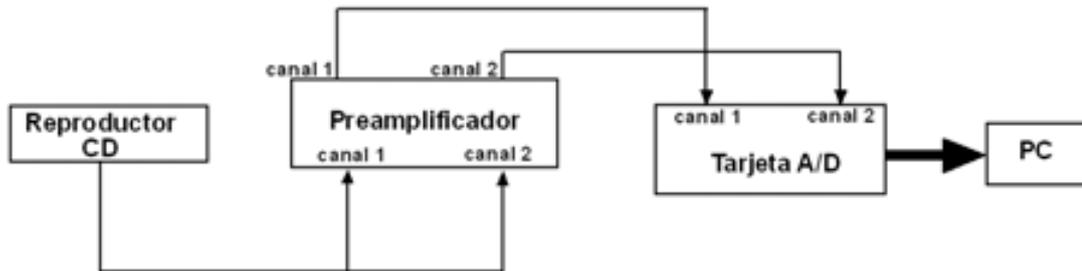


Figura 7.10 La misma señal del reproductor de CD llega a ambos canales del Preamplificador.

Se realizaron dos mediciones, la primera con un tono puro cuya frecuencia nominal es de 1000 Hz y la segunda con ruido blanco.

7.3.1. Medición con Tono Puro de 1000 Hz

Esta medición presentó un Nivel de Presión promedio de 93.4 [dB] en la frecuencia donde se concentra la mayor energía (983 Hz) y una Intensidad de $-6.92 \cdot 10^{-6}$ [W/m^2] que corresponden a una Intensidad de 68.4 [dB]. La diferencia que se produce entonces entre el Nivel de Presión promedio y el Nivel de Intensidad en la frecuencia especificada alcanza los 25 [dB], apreciable en la figura 7.11. El desfase en esta misma frecuencia es de $-1.9 \cdot 10^{-20}$.

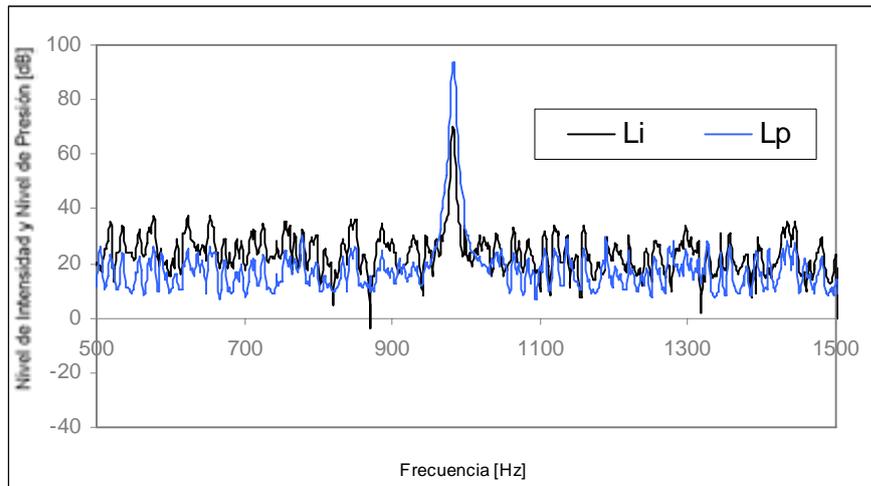


Figura 7.11. Nivel de Intensidad y Nivel de Presión al realizar la medición pasando directamente desde Reproductor de Discos Compactos al preamplificador. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

7.3.2. Medición con Ruido Blanco

Otra prueba realizada para este mismo caso consiste en medir Intensidad introduciendo ruido blanco a ambos canales del preamplificador, para ello se efectuó una medición con una frecuencia de muestreo de 20 KHz y otra con una frecuencia de muestreo de 40 KHz.

La medición efectuada con una frecuencia de muestreo de 20 KHz se presenta en la figura 7.12.

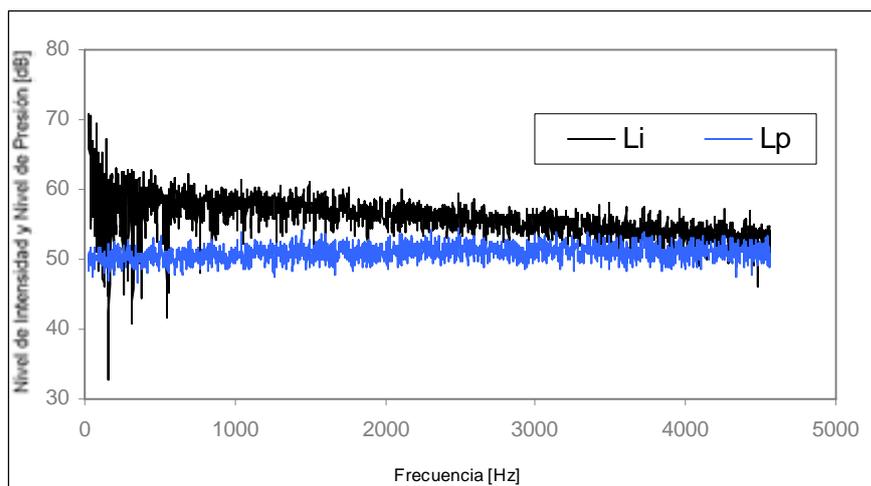


Figura 7.12. Nivel de Intensidad medido con ruido blanco con una frecuencia de muestreo de 20 KHz. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

Se observa que en la mayoría de las frecuencias el Nivel de Intensidad es mayor que el Nivel de Presión, situación que dista mucho de lo esperado. Para mejorar esta situación se aumentó la frecuencia de muestreo a 40 KHz y los resultados obtenidos se presentan en la figura 7.13.

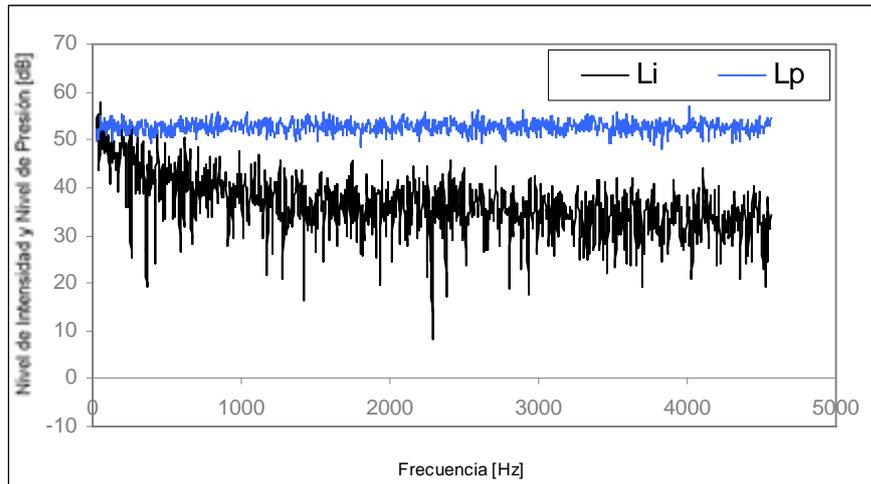


Figura 7.13. Nivel de Intensidad medido con ruido blanco con una frecuencia de muestreo de 40 KHz. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

Esta situación presenta un comportamiento más cercano a lo esperado, donde el Nivel de Intensidad es en un amplio rango de frecuencias menor al Nivel de Presión. Y la fase entre las señales presenta un promedio de 0.23° en el rango comprendido desde los 20 hasta los 4562 Hz.

7.4. Mediciones con micrófonos

Las siguientes mediciones que se describen fueron efectuadas en el tubo de onda plana utilizando todo el sistema de medida disponible (micrófonos, preamplificador, tarjeta A/D, PC y software). El esquema de medición se presenta en la figura 7.14. Este tubo presenta la posibilidad de ubicar ambos micrófonos a la misma distancia de la fuente, ubicada en un extremo del tubo, y la posibilidad de ubicarlos en la dirección de propagación de la onda sonora. Todas estas mediciones se efectuaron con una frecuencia de muestreo de 20 KHz y con 8192 muestras por cada uno de los 20 promedios para cada uno de los dos canales.

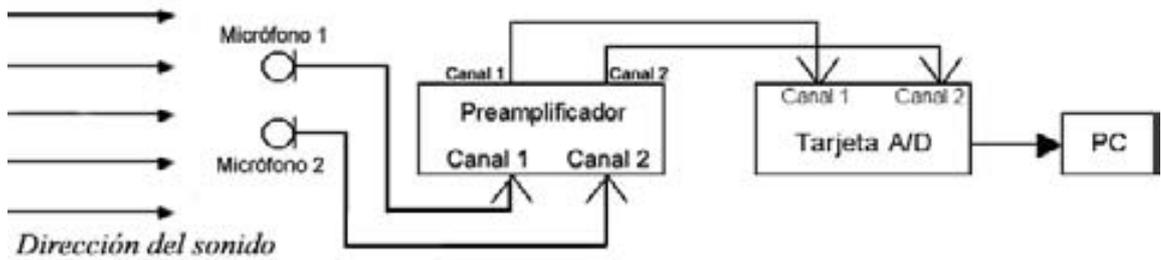


Figura 7.14. Esquema de las mediciones efectuadas con todo el equipamiento necesario.

7.4.1 Medición con Micrófonos a la Misma Distancia de la Fuente

Esta medición consistió en generar, primero, un tono puro en el altavoz y realizar la medición con la sonda ubicada en forma perpendicular a la dirección de propagación del sonido. En estas mediciones se espera que el Nivel de Intensidad sea superado ampliamente por el Nivel de Presión para cada uno de los casos. La figura 7.15 muestra la curva de Intensidad de la medición realizada con un tono puro nominal de 1000 Hz.

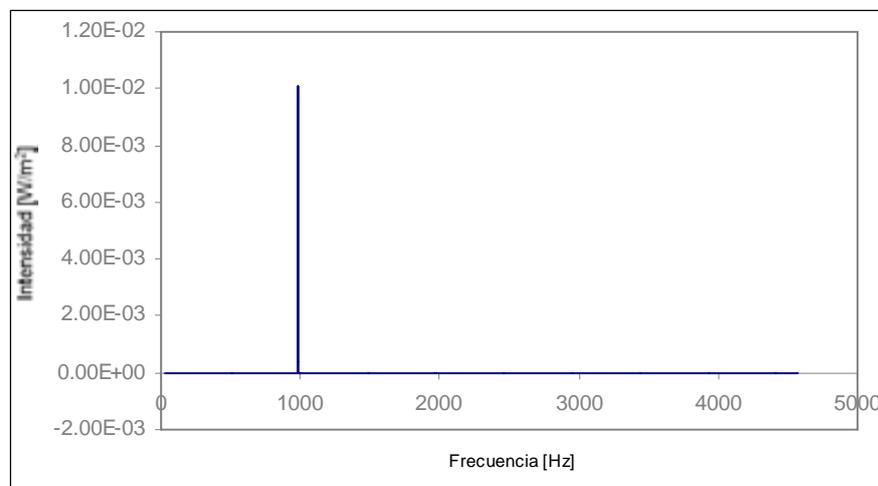


Figura 7.15. Curva de Intensidad medida con los micrófonos a la misma distancia de la fuente.

Como ocurre en casos anteriores la mayor energía se presenta en la frecuencia de 983 Hz aproximadamente. La Intensidad en esta frecuencia es $9.97 \cdot 10^{-3} \text{ [W/m}^2\text{]}$ lo que corresponde a un Nivel de Intensidad de 99.9 dB para un Nivel de Presión de 103.5 dB. La diferencia de fase entre las señales que llegan a ambos micrófonos y que es obtenida por el programa de medición es 3.95° , valor ampliamente mayor a los registrados anteriormente.

La siguiente medición sin cambiar de posición los micrófonos se efectuó con el altavoz generando ruido blanco, esta medición produjo los resultados de la figura 7.16.

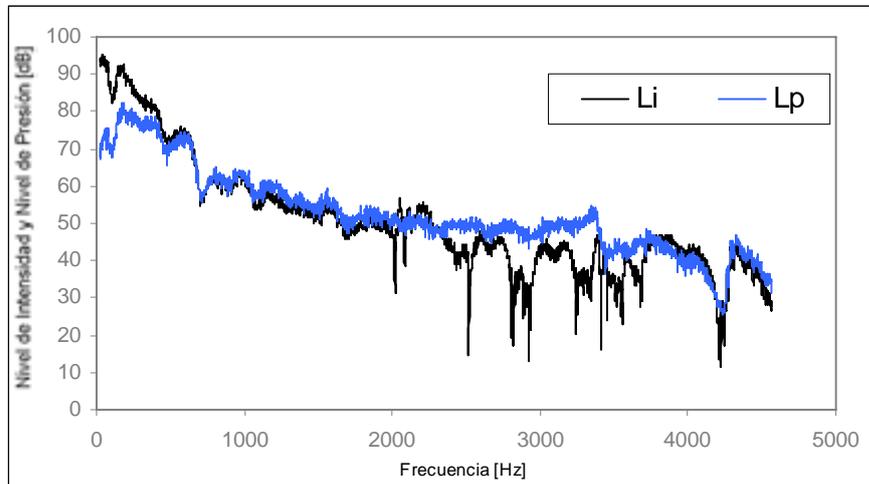


Figura 7.16. Nivel de Intensidad medido con ruido blanco con los micrófonos a la misma distancia de la fuente. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

Esta medición fue efectuada con una frecuencia de muestreo de 20 KHz y en la gráfica se aprecia que el Nivel de Intensidad es superado por el Nivel de Presión en ciertos rangos de frecuencia entre los 2500 Hz hasta los 3700 Hz aproximadamente. El desfase promedio para todo el rango de frecuencias considerado (20 a 4562 Hz) es de 10^0 . Al realizar la medición aumentando la frecuencia de muestreo a 40 KHz no se apreció una diferencia considerable con los resultados obtenidos con una frecuencia de muestreo de 20 KHz.

Los resultados expuestos no entregan conclusiones favorables para el sistema de medida.

7.4.2 Medición con Micrófonos en la Dirección de Propagación del Sonido

La posición de los micrófonos en el tubo para las mediciones de esta sección está esquematizada en la figura 7.4. El tubo presenta la posibilidad de ubicar los micrófonos a una distancia, entre sí, de 72 mm por lo que la frecuencia más alta a ser medida se reduce, con relación a las anteriores, a 762 Hz. Estas mediciones se efectuaron con el altavoz generando tonos puros y ruido blanco. La primera medición se realizó con un tono puro nominal de 630 Hz con el micrófono etiquetado como 1 más cerca de la fuente que el micrófono etiquetado como 2, los resultados de esta medición se aprecian en la figura 7.17.

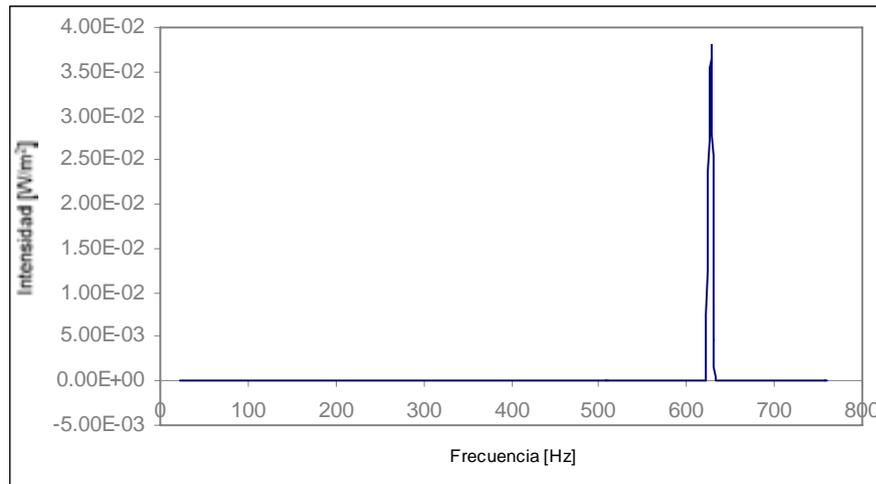


Figura 7.17. Medición de Intensidad con sonda ubicada en la dirección de propagación del sonido con el micrófono 1 más cerca del altavoz.

Para la frecuencia de 627 Hz (frecuencia donde se concentra la mayor energía) la Intensidad alcanza los $3.7 \cdot 10^{-2} \text{ [W/m}^2\text{]}$ lo que corresponde a un Nivel de Intensidad de 105.7 dB para un Nivel de Presión promedio en esta misma frecuencia de 106.7 dB. Para esta frecuencia y para la separación entre los micrófonos especificada, la fase “ideal” entre las señales debe ser 47.24° . La fase que entrega el programa es aproximadamente 5° menor a la “ideal”.

La situación inversa, es decir con el micrófono 2 más cercano a la fuente, produjo los resultados de la figura 7.18.

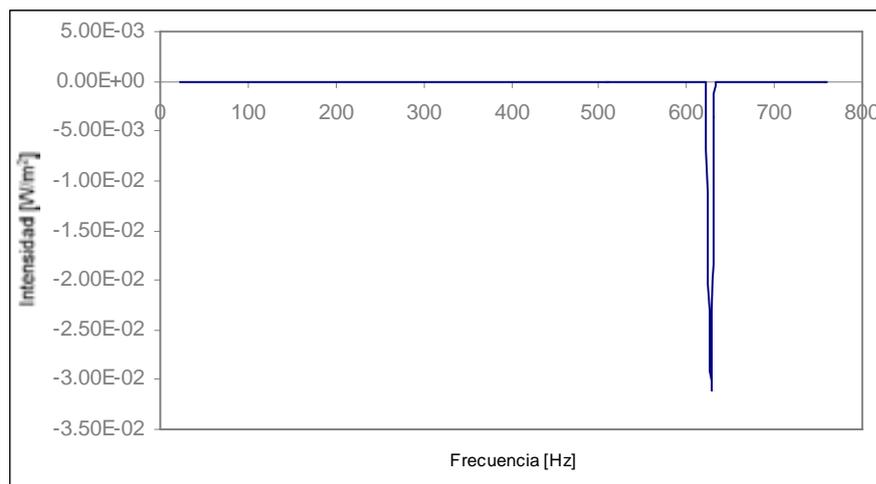


Figura 7.18. Medición de Intensidad con sonda ubicada en la dirección de propagación del sonido con el micrófono 2 más cerca del altavoz.

Esta nueva situación entregó un valor de Intensidad de $-3.09 \cdot 10^{-2}$ [W/m²] correspondiente a un Nivel de Intensidad de 104.9 dB y un Nivel de Presión promedio de 105.12 dB para la frecuencia de interés. El desfase, en este caso, para la misma frecuencia es de -34.3° . Valor que es 13° menor que el valor que debiera entregar el programa en esta situación (-47.24°).

Al realizar el mismo ejercicio con ruido blanco, también se consideró el rango de frecuencia desde 20 Hz hasta los 762 Hz, recordando que este valor es limitado por la separación de los micrófonos (72 mm). Las mediciones con ruido blanco entregan los siguientes resultados:

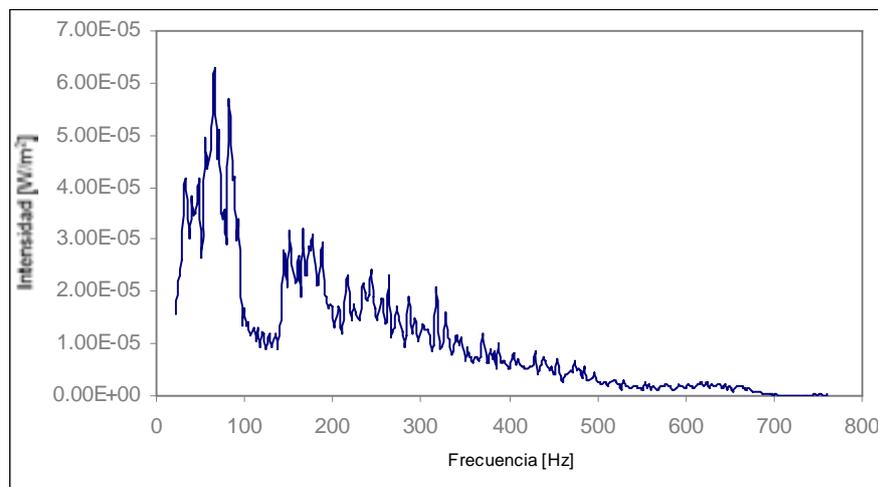


Figura 7.19. a) Curva de Intensidad para medición efectuada con ruido blanco y con micrófono 1 más cerca del altavoz.

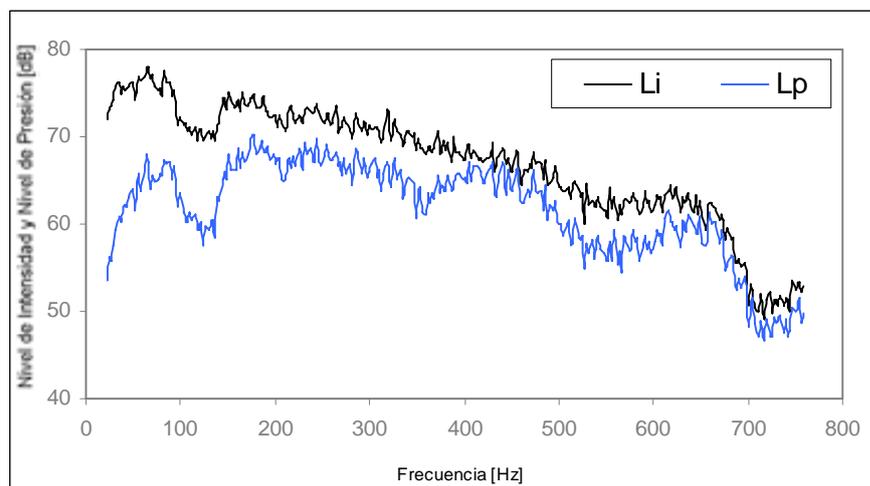


Figura 7.19. b) Curva de Nivel de Intensidad para medición efectuada con ruido blanco y con micrófono 1 más cerca del altavoz. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

Las figuras 7.19 a) y b) muestran las graficas correspondientes a la medición de Intensidad realizada con ruido blanco, en el cual el micrófono 1 se encuentra en una posición más cercana a la fuente de ruido que la posición del micrófono 2. Al repetir esta medición con los micrófonos ubicados en forma inversa se obtienen los resultados expuestos en las figuras 7.20 a) y 7.20 b).

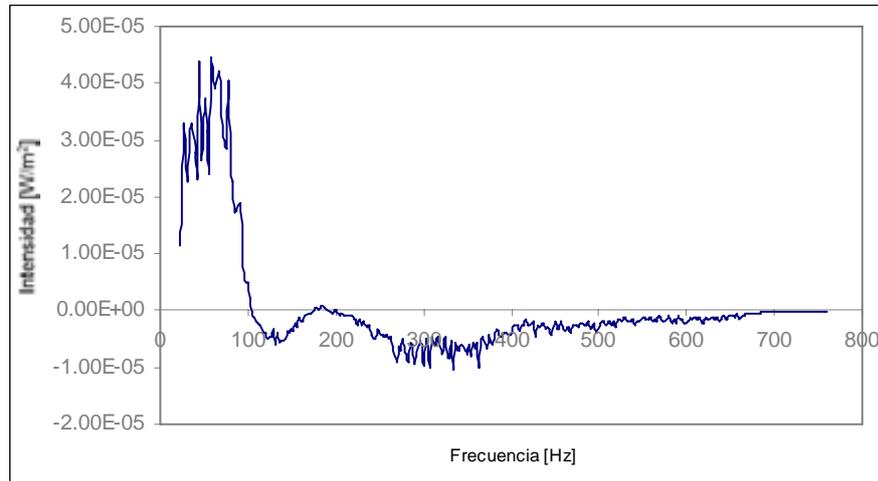


Figura 7.20. a) Curva de Intensidad para medición efectuada con ruido blanco y con micrófono 2 más cerca del altavoz.

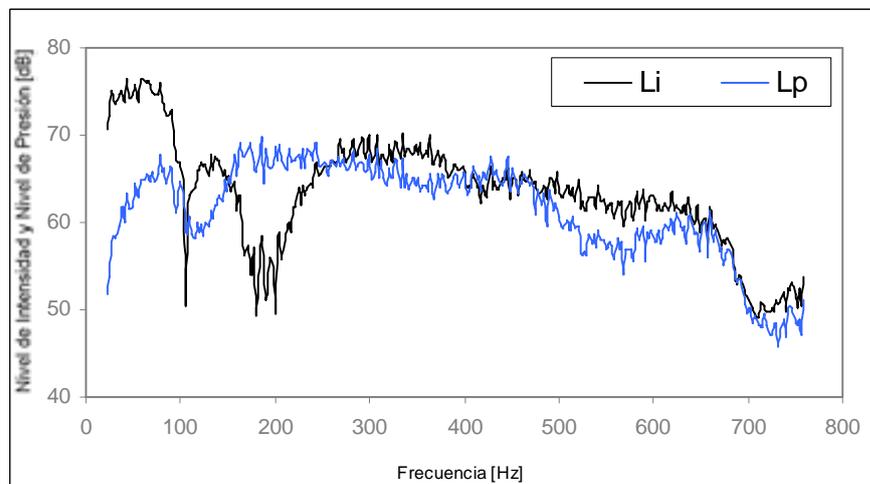


Figura 7.20. b) Curva de Nivel de Intensidad para medición efectuada con ruido blanco y con micrófono 2 más cerca del altavoz. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m^2), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$).

Es claramente visible que bajo los 100 Hz no existe el cambio de signo de Intensidad que se espera. Sobre esta frecuencia existe el cambio de signo, pero la amplitud de la Intensidad no es similar para todas las frecuencias.

7.4.3. Mediciones en Cámara Anecoica

Estas mismas mediciones se realizaron en la cámara anecoica utilizando la sonda de Intensidad fabricada para tal efecto (figura 7.21). Es decir, se ubicó la sonda en el sentido en el cual está diseñada para medir Intensidad positiva, con relación a la ubicación de la fuente, y posteriormente se giró 180° para realizar una comparación entre ambas mediciones. La separación entre los micrófonos fue de 12 mm, por lo que la máxima frecuencia a medir es 4562 Hz. Esta prueba se efectuó con un tono puro de 1000 Hz y posteriormente con ruido blanco.



Figura 7.21. Medición al interior de cámara anecoica con Sonda de Intensidad.

La medición con un tono puro de 1000 Hz, para el caso en el que la Intensidad debe ser positiva, entrega los resultados de la figura 7.22.

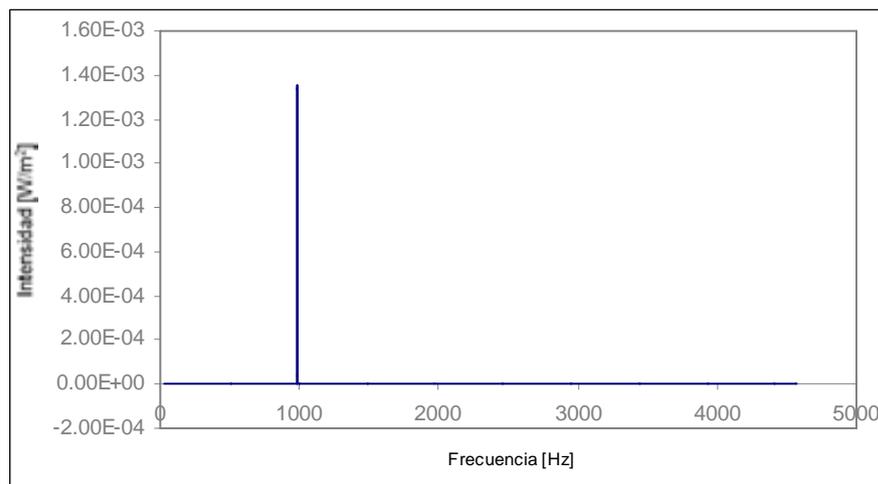


Figura 7.22. Intensidad en cámara anecoica de un tono puro, con la sonda ubicada de tal manera que la Intensidad debe ser positiva según la ubicación de la fuente sonora.

En este caso, la mayor energía se concentra en la frecuencia de 981 Hz, en la cual la Intensidad es $1.33 \cdot 10^{-3} \text{ [W/m}^2\text{]}$ que corresponde a un Nivel de Intensidad de 91.25 dB y presenta un Nivel de Presión promedio de 91.35 dB en esta misma frecuencia. El desfase que debe existir entre las señales para un caso de este tipo es de 12.3° . El desfase que registra el programa alcanza el valor de 6.13° . Al girar la sonda, los valores que se registran se presentan en la figura 7.23.

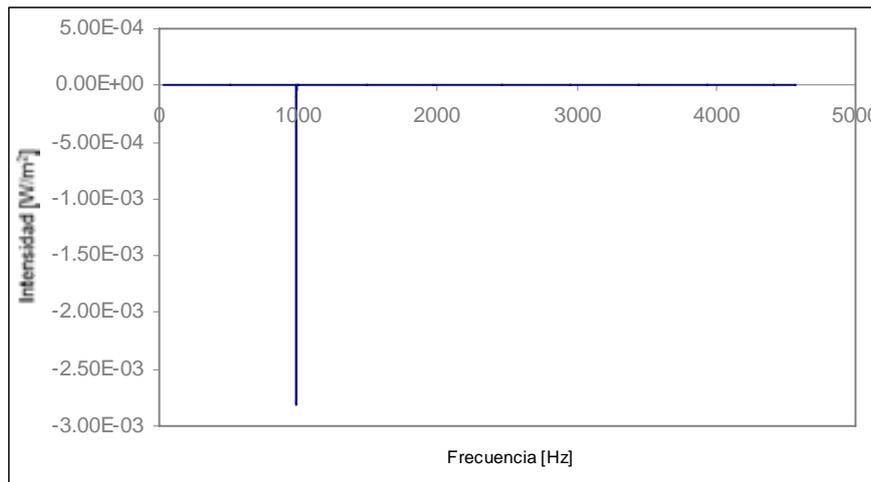


Figura 7.23. Intensidad en cámara anecoica de un tono puro, con la sonda girada 180° , con el centro acústico de la sonda en el mismo punto del caso anterior.

La Intensidad que se obtiene en la frecuencia de 981 Hz (figura 7.23) es $-2.79 \cdot 10^{-3} \text{ [W/m}^2\text{]}$, que corresponde a un nivel de Intensidad de 94.5 dB. El Nivel de Presión promedio en la misma frecuencia es 91.9 dB y la fase entre las señales captadas por los micrófonos es 11.98° . La norma UNE-EN ISO 9614-1 recomienda que para una prueba de este tipo, la diferencia, por banda, entre ambos Niveles de Intensidad no sea mayor a 1.5 dB. En la banda de frecuencia de 1000 Hz, esta diferencia supera los 3 dB.

Un análisis similar se realizó con la fuente sonora emitiendo ruido blanco. Para este caso también se midió con la sonda de Intensidad en dos posiciones, primero a 0° respecto a la fuente y luego a 180° . Los resultados se exponen a continuación.

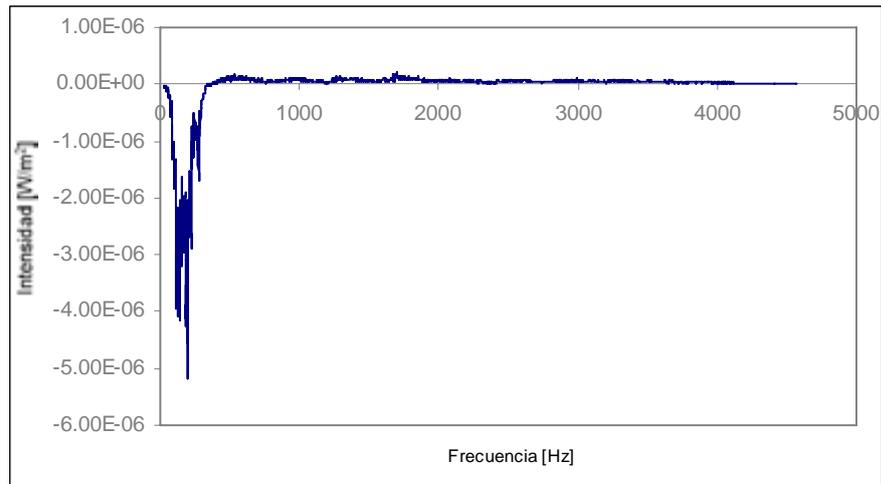


Figura. 7.24 Medición de Intensidad con sonda, para la fuente emitiendo ruido blanco.

La figura 7.24 indica la curva de Intensidad para la medición realizada con ruido blanco y la sonda ubicada a 0° respecto a la fuente sonora. Se aprecia que sobre los 400 Hz aproximadamente la Intensidad es positiva. La figura 7.25 muestra el Nivel de Intensidad sonora de esta misma medición.

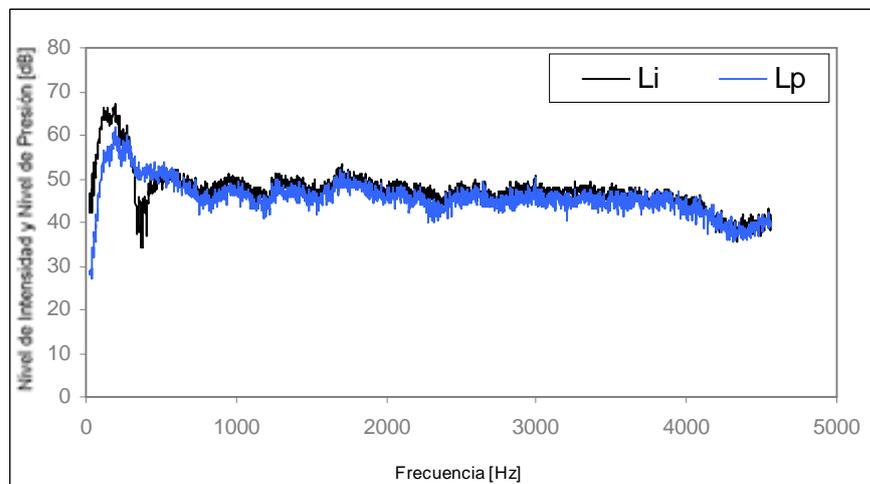


Figura 7.25. Niveles de Intensidad con la sonda ubicada a 0° respecto a la fuente. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m^2), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2).

Según los datos de la figura 7.25, desde aproximadamente los 500 Hz hasta los 4562 Hz, el Nivel de Intensidad presenta un comportamiento muy similar al Nivel de Presión, como debe ser en campo libre. El comportamiento de la sonda, y de todo el sistema de medida, se debe corroborar realizando la misma medición con la sonda ubicada ahora a 180° y realizar una

comparación entre los valores de Intensidad y Nivel de Intensidad para cada frecuencia. Al girar la sonda 180° se obtienen los resultados de las figuras 7.26. y 7.27.

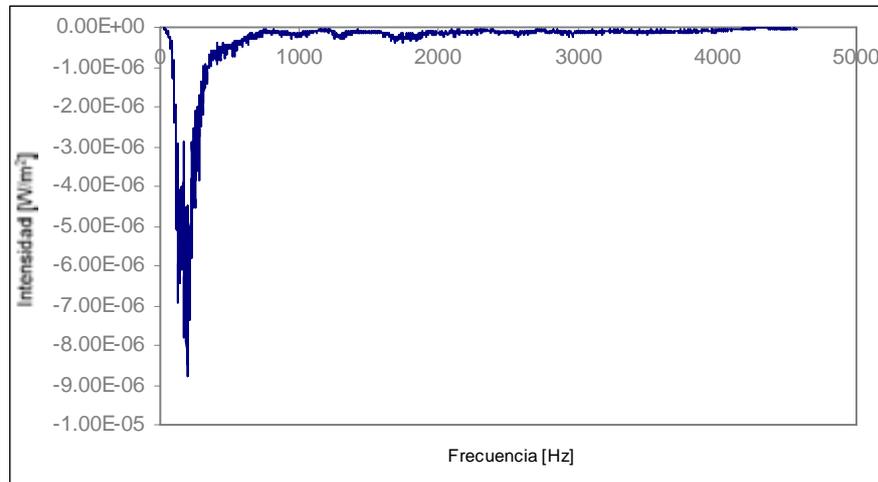


Figura 7.26. Medición con sonda ubicada de tal manera que la Intensidad debe ser negativa.

La medición de la figura 7.26 presenta Intensidad negativa en todo el espectro considerado. Sin embargo, la medición anterior también presenta valores negativos de Intensidad bajo los 400 Hz aproximadamente, por lo que el cambio de dirección de intensidad esperado se produce solo sobre esta frecuencia. Es importante destacar que es posible que la sala anecoica no se comporte como tal en el rango de frecuencias bajas, lo cual se traduce en que no exista condición de campo libre. El Nivel de Intensidad de esta medición se muestra en la figura 7.27.

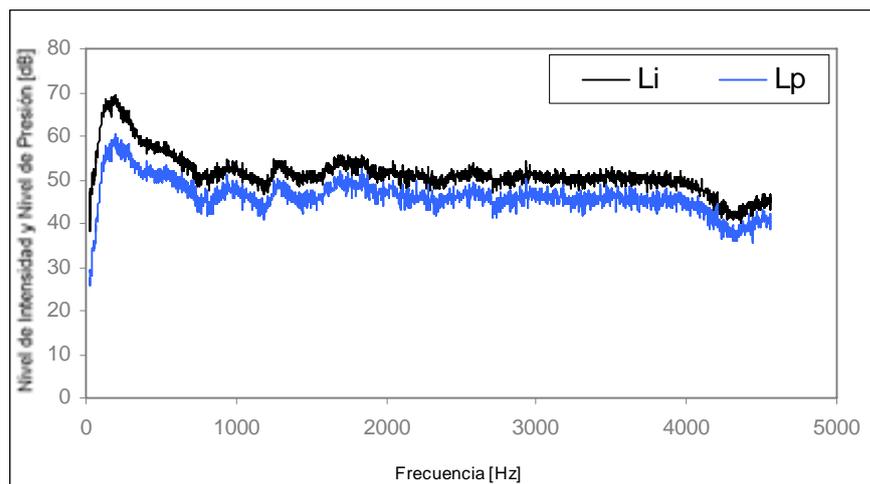


Figura 7.27 Valores de Nivel de Intensidad para los valores de Intensidad de la figura 7.26. Línea negra: Nivel de Intensidad (ref. 10^{-12} W/m²), Línea azul: Nivel de Presión (ref. $2 \cdot 10^{-5}$ N/m²).

La figura 7.28 muestra los Niveles de Intensidad de ambas mediciones, en esta figura se puede apreciar la diferencia que existe entre ambos niveles, desde los 200 Hz hasta los 4562 Hz, cuando la sonda se ubica a 0° y luego a 180° .

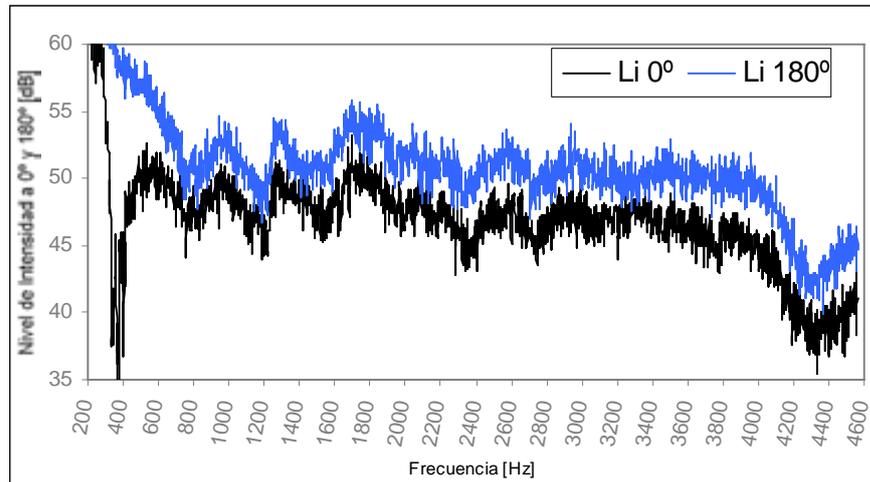


Figura 7.28. Niveles de Intensidad de la medición con ruido blanco con la sonda ubicada en dos posiciones diferentes.

Línea negra: Nivel de Intensidad con sonda a 0° (ref. 10^{-12} W/m²).

Línea azul: Nivel de Intensidad con sonda a 180° (ref. 10^{-12} W/m²).

Desde una frecuencia cercana a los 600 Hz hasta los 4562 Hz, es donde ambos niveles de Intensidad más se asemejan, en este rango de frecuencia la diferencia promedio entre ambos niveles es 3.7 dB. Es decir, desde los 600 Hz hasta los 4562 Hz, la Intensidad cuando la sonda se ubica a 180° con respecto a la fuente sonora, es en promedio, más del doble que la Intensidad que se obtiene cuando la sonda se ubica a 0° respecto a la fuente.

7.5. Efecto de la fase en la estimación de la Intensidad

Como se explicó anteriormente un pequeño desfase entre los canales hace que la Intensidad sea subestimada o sobreestimada según sea el signo de dicho desfase. Para verificar esta influencia se realizaron una serie de simulaciones como las especificadas en el punto 7.1.1., pero en esta ocasión se añadió un desfase extra a la señal número 2, este desfase se fue incrementando desde 0° hasta 2° y se calculó la Intensidad para cada uno de estos casos. La misma metodología fue seguida para las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz, los resultados se muestran en la figura 7.29 y en la tabla 7a.

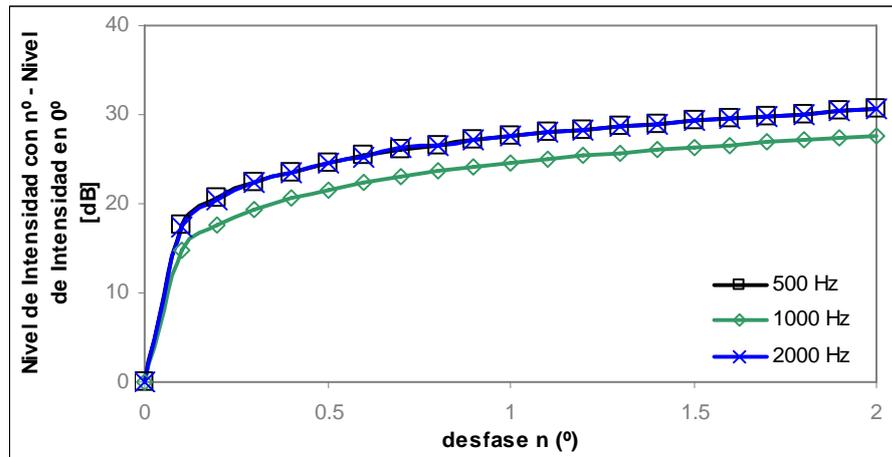


Figura 7.29. Diferencia en dB entre el Nivel de Intensidad con un desfase de n° y el Nivel de Intensidad con un desfase de 0° entre las señales.

Tabla 7a. Datos Figura 7.29.

Desfase n°	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
0	0	0	0
0.1	17.62	14.69	17.47
0.2	20.59	17.63	20.52
0.3	22.34	19.36	22.3
0.4	23.58	20.6	23.55
0.5	24.55	21.56	24.52
0.6	25.34	22.35	25.32
0.7	26.01	23.02	26.27
0.8	26.58	23.59	26.57
0.9	27.09	24.1	27.08
1	27.55	24.56	27.54
1.1	27.97	24.97	27.96
1.2	28.35	25.35	28.33
1.3	28.69	25.69	28.68
1.4	29.01	26.01	29
1.5	29.31	26.31	29.3
1.6	29.59	26.59	29.58
1.7	29.85	26.86	29.85
1.8	30.1	27.1	30.1
1.9	30.33	27.34	30.33
2	30.56	27.56	30.55

Para aclarar esto, si tomamos como ejemplo la frecuencia de 1000 Hz, cuando existe un desfase de 0.3° entre las señales se obtiene un Nivel de Intensidad en esta frecuencia 19.36 dB mayor que el Nivel de Intensidad que se obtiene cuando el desfase entre las señales generadas es nulo. Para la frecuencia de 2000 Hz y el mismo desfase del ejemplo anterior esta diferencia es de 22.3 dB.

Este error de fase es más notorio cuando la fase real, entre los dos puntos establecidos por la ubicación de los micrófonos, es pequeña, o sea, cuando la sonda de intensidad se ubica en forma perpendicular a la propagación del sonido. Si la sonda se ubica en la dirección de propagación libre de un tono puro de 1000 Hz, y se considera una separación de 12 mm, el

desfase que existe entre ambos puntos, según la ecuación 7.2, es 12.56° . Si para esta misma frecuencia el sistema presenta un desfase de $\pm 0.3^\circ$, es decir, la fase final que obtiene el sistema de medida es de $12,86^\circ$, ambos Niveles de Intensidad no presentan una diferencia mayor a 1 dB.

8. Conclusiones

Existen dos formas bien diferenciadas de realizar mediciones de Intensidad sonora utilizando un par de micrófonos, una de ellas corresponde a la aproximación de diferencias finitas, en el que la velocidad se estima a través del gradiente de presión, y la otra corresponde a la estimación de la intensidad mediante un análisis FFT, que fue la utilizada para desarrollar el software de medición con Testpoint 3.0.

Se desarrolló un programa de adquisición y análisis de datos que puede realizar mediciones de Intensidad sonora, que entre otras cosas, tiene la capacidad de realizar un análisis por tercio de octava y de realizar mediciones en una cuadrícula imaginaria para crear mapas vectoriales de Intensidad con ayuda de Matlab. Este programa fue probado introduciendo señales conocidas y estas mediciones resultaron de acuerdo a lo esperado. El código de programación de este programa queda abierto para cualquier cambio que se estime conveniente.

Según las mediciones realizadas, como en el caso de las mediciones con la tarjeta A/D puenteada y las mediciones con señales generadas, el desfase producto de la tarjeta Análoga – Digital es compensado de buena manera en el proceso de medición y no produce un error significativo en la estimación de Intensidad.

Considerando las mediciones realizadas con todo el sistema de medida (incluyendo los micrófonos), cuando se pretendió encontrar un Nivel de Intensidad muy bajo, situación que se cumple cuando llega la misma señal en amplitud y fase a los micrófonos, se encontraron niveles altos con relación a los niveles obtenidos cuando la tarjeta A/D se puentea y cuando se hace llegar la misma señal a ambos canales del preamplificador. Esto se produce debido a que los dos canales durante todo el sistema presentan una respuesta en fase adecuada, a excepción de los micrófonos disponibles para realizar las mediciones.

Tomando en cuenta las mediciones realizadas en la cámara anecoica, con la sonda ubicada a 0° y a 180° respecto a la ubicación de la fuente, los niveles de Intensidad se asemejan bastante a los Niveles de Presión, principalmente desde los 600 Hz hasta los 4562 Hz. Por las características sonoras de la cámara, la Intensidad se puede expresar aproximadamente en función del cuadrado de la presión, en el rango de frecuencias señalado.

Los resultados de las diferentes mediciones y simulaciones, permiten establecer que la principal deficiencia del sistema diseñado está en la falta de un par de micrófonos con respuestas de amplitud y fase realmente idénticas (matched pair microphones). El sistema de medición de Intensidad puede ser mejorado considerablemente con la adquisición de un par de micrófonos

adecuados, ya que se observó que el error que produce un pequeño desfase entre ambas señales genera grandes desviaciones en la estimación de la Intensidad en ciertas situaciones.

El principal problema que enfrenta esta sonda, es que cuando la fase debe ser cero entre ambas señales, la Intensidad puede llegar a ser tan alta como en el caso en el que la dirección del sonido coincide con el eje que une ambos micrófonos, o sea cuando la Intensidad es máxima. Por esto, no es práctico realizar mediciones buscando la componente máxima de Intensidad.

Finalmente se debe mencionar que el no contar con el financiamiento necesario para la adquisición de los micrófonos impidió lograr el objetivo del trabajo en un ciento por ciento, sin embargo, es importante destacar que se cumplió con los objetivos específicos y que lo único que falta para que el sistema de software y hardware desarrollado funcionen eficientemente es adquirir los micrófonos adecuados.

9. Bibliografía

- [1] Test-Point User's Guide. Techniques and Reference, Vol.2, 4^a ed.
- [2] Technical Review Bruel & Kjaer, 1993, "Sound Intensity".
- [3] Chung, J. Y., "Cross-Spectral Method of Measuring Acoustic Intensity Without Error Caused by Instrument Phase Mismatch", J. Acoust. Soc. Am. 64, 1613-1616 (1978).
- [4] Fahy, F., "Foundations of Engineering Acoustics", Academic Press, 2001.
- [5] Herráez, M; Machimbarrena, M; "Intensimetría", Universidad de Valladolid.
- [6] Beranek, Leo L., "Acústica", Editorial Hispano Americana, 1969.
- [7] Technical Review Bruel & Kjaer, 1984. "*Dual Channel FFT Analysis*" (Part 1)
- [8] Technical Review Bruel & Kjaer, 1984. "*Dual Channel FFT Analysis*" (Part 2)
- [9] Oppenheim, Alan V.; Schafer, Ronald W.; Buck, John R., "Tratamiento de Señales en Tiempo discreto" 2^a edición, Ed. Prentice Hall Iberia, Madrid, 2000.
- [10] Madariaga R., Yaninne; "Análisis Practico – Comparativo de los Métodos de Determinación de Potencia Sonora Usando Mediciones de Intensidad", Tesis Universidad Austral de Chile, Instituto de Acústica, Valdivia 1994.
- [11] Keithley Metrabyte User's Guide. DAS-1800 HC/ST/HR Series.
- [12] Cerna, Michael; Harvey, Audrey F.; "The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement", National Instruments, Application Note 041, Julio 2000.
- [13] Norma UNE-EN ISO 9614-1 "Determinación de los niveles de potencia acústica emitidos por las fuentes de ruido por intensidad del sonido" Parte 1: Medida en puntos discretos.

En esta sección se presentan los siguientes anexos:

- Anexo A: Práctico “Medida de la Potencia Acústica In Situ por el Método de Intensidad”.
- Anexo B: Práctico “Medición de Intensidad y Mapas de Intensidad”.
- Anexo C: Expresiones de Intensidad para Campos Simples.
- Anexo D: Ayuda software IntensiSeba v.1.
- Anexo E: Programa Matlab para la visualización de vectores de Intensidad.

ANEXO A

“Medida de la Potencia Acústica In Situ por el Método de Intensidad”

1. Objetivo General

- ◀ Medir la Potencia Acústica de una máquina in situ con una sonda de Intensidad.

1.1. Objetivos Específicos

- ◀ Aplicar y afianzar los conocimientos de Intensidad para realizar la medición.
- ◀ Establecer una forma de trabajo adecuada para realizar la medición.
- ◀ Realizar un análisis por tercio de octava de la Intensidad y de la Potencia Acústica.
- ◀ Comparar la potencia calculada a través del Nivel de Presión con la obtenida a través del método de Intensidad.
- ◀ Adquirir conocimientos sobre el procedimiento de medición descrito en la norma ISO 9614-1:1993.
- ◀ Entregar un informe dentro de una semana.

2. Introducción Teórica

La Intensidad sonora entrega una medida de la dirección de la energía sonora. Por lo tanto la Intensidad Sonora es una cantidad vectorial que tiene magnitud y dirección y es igual al producto de la presión acústica instantánea en un punto por la velocidad de la partícula asociada (ecuación 1). Usualmente se mide la Intensidad en una dirección normal (90°) a la unidad de área en la cual la energía está fluyendo. La manera de medir Intensidad utilizada en esta actividad práctica se basa en una técnica FFT, que utiliza dos transductores de presión (sonda p-p) en configuración cara – cara y calcula la Intensidad a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado entre las señales (ecuación 2) obteniendo una dependencia frecuencial (y no temporal) de la Intensidad. Este método es más simple de fabricar y menos costoso que una sonda que mida presión y velocidad (sonda p-u).

$$\mathbf{I}(t) = p(t) \cdot \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

$$\hat{I}(f) = -\frac{\text{Im} G_{AB}}{2\pi \cdot f \cdot \rho_0 \cdot \Delta r} \quad (2)$$

Usar la Intensidad Sonora en vez del método de presión para determinar la potencia sonora significa que estas mediciones pueden ser realizadas in situ, con un ruido de fondo estable y en el campo cercano de la máquina. La Energía Sonora radiada por una fuente se va propagando a través de un área cada vez mayor,

según la onda se aleja de la fuente. Seleccionando una superficie S que encierre la fuente, se puede calcular la Potencia Sonora W radiada como la Integral:

$$W = \int_S \mathbf{I} \cdot d\vec{S} = \int_S \mathbf{I} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S I_n dS \quad (3)$$

donde W : Potencia Sonora emitida (Watts)

\mathbf{I} : Intensidad Sonora (W/m^2)

$d\vec{S}$: Elemento diferencial de superficie

S : superficie que rodea la fuente (m^2)

I_n : componente normal de \mathbf{I} (a partir de ahora se denotará I)

Como se puede observar, la integral de superficie integra la componente del vector Intensidad en la dirección normal a la superficie.

Si la fuente es omnidireccional y la integración se realiza sobre una superficie esférica de radio r , la relación entre potencia e Intensidad se simplifica:

$$I(r) = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (4)$$

En general, la fuente es direccional y la Intensidad no es la misma en todos los puntos de la superficie. Por lo tanto, se utiliza una aproximación para evaluar la integral: se divide la superficie en pequeñas áreas, cada una de tamaño S_i , de manera que la Intensidad en cada una de ellas sea constante. La potencia Sonora ahora se evalúa

$$W = \sum I_i \cdot S_i \quad (5)$$

donde I_i : componente normal de \mathbf{I} sobre S_i

S_i : i -ésimo elemento de área (m^2)

Si todas y cada una de las subáreas S_i tienen el mismo área, la expresión anterior se reduce a:

$$W = \bar{I} \cdot S \quad (6)$$

donde $\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$: Intensidad Sonora Promedio (espacial sobre todo S) (7)

$S = n \cdot S_i$: área total de la superficie de medida (m^2) (8)

Esta misma relación, expresada en forma logarítmica, toma la forma:

$$L_w = L_I + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (9)$$

donde $L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right)$: Nivel de Potencia (dBre 10^{-12} W) con $W_{ref} = 10^{-12}$ Watts (10)

$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)$: Nivel de Intensidad (dBre 10^{-12} W/m²) con $I_{ref} = 10^{-12}$ W/m² (11)

S : área total de la superficie de medida (m²) y $S_0 = 1$ m²

La expresión anterior es válida siempre que la fuente no sea altamente direccional, en cuyo caso, hay que elegir subáreas de distinta superficie, aumentando la discretización en la zona donde más se emite, para que la aproximación de que I_i sea constante siga siendo cierta.

2.1. Superficie de encierro

Se puede elegir cualquier superficie mientras no haya fuentes ni sumideros (absorbentes) de sonido dentro de la superficie. Se asume que el piso refleja toda la potencia así que no necesita incluirse en la superficie. La superficie, en teoría, puede estar a cualquier distancia de la fuente. La distancia promedio entre la superficie de medida y la superficie de la fuente bajo ensayo debe ser mayor que 0,5 metros. La superficie elegida puede incorporar cuando convenga, áreas que no sean absorbentes (coeficientes de absorción en campo difuso menor que 0,06) como, por ejemplo, un suelo de cemento o pared de fábrica.

Algunas de las superficies de encierro preferidas son:

La caja: Esta puede tener cualquier forma y tamaño, es fácil de definir y las superficies planas hace que la Intensidad promedio sea calculada en forma simple. Se puede encontrar la potencia acústica de cada superficie por separado y luego sumarlas.

La semiesfera: Esta forma permite realizar la medición con la menor cantidad de puntos. Para una fuente omnidireccional en campo libre la Intensidad será constante sobre una semiesfera. La norma ISO 3745 (potencia sonora a partir de mediciones de presión) recomienda comenzar con diez posiciones de medición. Si la Intensidad varía demasiado sobre la superficie, el número de posiciones debe aumentar.

Otras superficies utilizadas son el cilindro y el semicilindro.

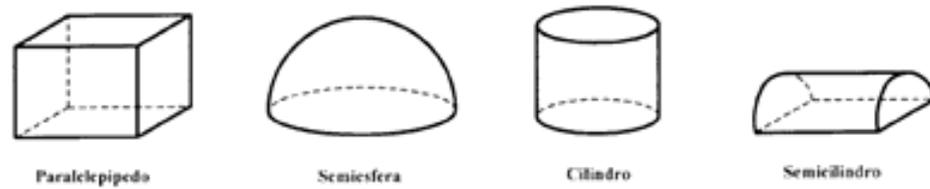


Figura 1. Superficies de encierro preferidas según norma ISO 9614.

2.2. Promedio Espacial

Luego de seleccionada una superficie, se requiere promediar espacialmente los valores de Intensidad normal a la superficie medidos. Notar que la superficie puede ser definida con una grilla o solo con puntos de referencia. Para obtener el promediado espacial se pueden utilizar dos métodos: *Barrido sobre la superficie* o *Promedio de puntos discretos*. El método usado en este práctico será este último.

Este método consiste en dividir la superficie en pequeños segmentos y medir la Intensidad sonora para cada una de ellos. Los puntos de medición son frecuentemente definidos por una grilla. Los resultados son promediados y multiplicados por el área de la superficie para encontrar la potencia sonora.

2.3. Ruido de fondo

Una de las principales ventajas del método de Intensidad es que niveles altos de ruido de fondo estable no contribuyen a la medida de la potencia sonora. Si se imagina una superficie en el espacio, como cualquier volumen cerrado y si una fuente sonora está presente dentro de esta superficie cerrada se puede medir el promedio de la Intensidad sobre la superficie de la caja y multiplicarla por el área para encontrar la potencia sonora total radiada por la fuente.

Si la fuente se mueve fuera de la superficie imaginaria y se intenta medir la potencia sonora, esta debería dar cero. Siempre se medirá energía sonora que fluye hacia dentro de la superficie. Pero la energía fluiría hacia fuera de la superficie en el otro costado. Así, la contribución de Potencia Sonora radiada por la superficie será nula.

Para que esto sea cierto el nivel de ruido de fondo no debería variar significativamente con el tiempo. Si se cumple esta condición se dice que el ruido de fondo es estacionario. Con un tiempo de promediación suficientemente largo, pequeñas fluctuaciones aleatorias en nivel no importarán. Otra condición es que no debe haber absorción dentro de la superficie, ya que el ruido de fondo no fluiría hacia fuera de la superficie nuevamente.

En la práctica y para equipos comerciales se puede medir la potencia sonora con una exactitud de 1 dB de fuentes que presentan un nivel 10 dB más bajo que el ruido de fondo. Si el ruido de fondo es un problema una superficie de medición más pequeña mejorará la relación señal-ruido.

3. Desarrollo de la Experiencia

Lo primero a efectuar para realizar esta experiencia es elegir una fuente sonora cuya señal sea estacionaria en el tiempo y una superficie de medida acorde a las dimensiones de la sala y de la máquina a medir. La norma ISO 9614-1 recomienda que esta superficie tenga la forma de un paralelepípedo, una semiesfera, un cilindro o un semicilindro. Para efectos prácticos se recomienda utilizar una semiesfera de un metro de radio y la misma fuente utilizada en el práctico "Potencia Acústica por el método de Presión", en el cual se utilizan 10 posiciones de medición que están distribuidos de tal forma que cada punto abarca la misma superficie (figura 2).

Antes de realizar cualquier medición se debe abrir el programa IntensiSeba v1 y realizar la correspondiente calibración de nivel (ver "Ayuda" si se tienen dudas al respecto), **el valor de $L_{p_{máx}}$ no debe cambiarse durante la medición**. La primera medida de corroboración de resultados consistirá en ubicar la sonda en una posición normal a la superficie y medir la Intensidad por tercio de octava (guardar estos datos). Luego se debe rotar la sonda 180° y ubicarla con su centro acústico en la misma posición anterior. Medir nuevamente la Intensidad y guardar. Verificar que el signo de Intensidad varía de una posición a otra y que la diferencia entre los niveles de Intensidad por cada tercio de octava sea pequeña (menor a 1 dB).

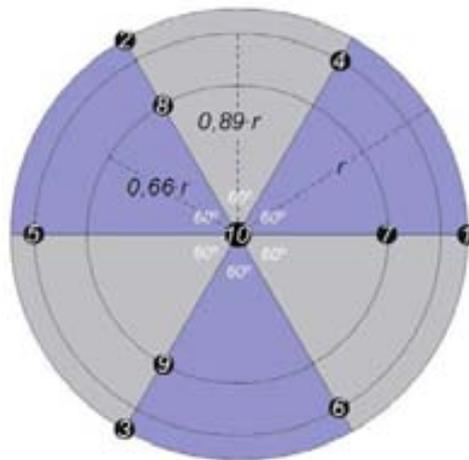


Figura 2. Ubicación de los puntos en superficie semiesférica de radio r .

Si se considera una superficie semiesférica los puntos deben situarse como se indica a continuación: Los puntos 1, 2 y 3 se ubican a una distancia r desde el centro de la esfera imaginaria y a una altura de $0,15 \cdot r$ desde el suelo. Los puntos 4, 5 y 6 a una distancia de $0,89 \cdot r$ desde el centro y a una altura de $0,45 \cdot r$ desde el suelo. Los puntos 7, 8 y 9 deben medirse a una distancia de $0,66 \cdot r$ desde el centro y a una altura de $0,75 \cdot r$ desde el suelo. Finalmente el punto 10 debe medirse en el centro y a una altura r . Considerar que la dirección

de la sonda debe ubicarse en forma perpendicular a la superficie imaginaria y con el centro acústico en la superficie de esta.

Para comenzar la medición por cada punto se deben establecer los siguientes valores

- ◀ Frecuencia de muestreo: sobre 20000 Hz
- ◀ Número de muestras: recomendado 8192 máximo
- ◀ Separación entre los micrófonos: 0.012 metros (12 mm)
- ◀ Promedios: se recomiendan 20
- ◀ Ventana: Por defecto se presenta la ventana Rectangular.
- ◀ Frecuencias límites: 630 y 4562

Luego se debe ubicar la sonda perpendicular a la superficie con el centro acústico sobre esta superficie en el primer punto de medición. Realizar la medición y una vez finalizada la medición guardar estos datos con extensión **seb**. Presionar Li 1/3 de Octava y guardar esta tabla con extensión **ist**. Continuar hasta completar los 10 puntos considerados.

3.1. Análisis de datos

Calcular la potencia acústica parcial en cada banda de frecuencia, para cada segmento de la superficie de medida, a partir de la ecuación 12:

$$W_i = I_{ni} \cdot S_i \quad (12)$$

donde W_i es la potencia acústica parcial para el segmento i ;

I_{ni} es el valor de la componente de la Intensidad acústica normal medida en la posición i sobre la superficie de medida;

S_i es el área del segmento i , recordar que cada punto abarca la misma superficie.

A continuación se debe calcular el nivel de potencia acústica de la fuente en cada banda de frecuencia a partir de la ecuación 13:

$$L_w = 10 \log \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{W_0} \text{ dB} \quad (13)$$

donde W_0 es la potencia acústica de referencia (= 10^{-12} W);

N es el número de posiciones y segmentos de medida.

Finalmente calcular la potencia acústica total L_{Wtotal} de la fuente con la ecuación 14:

$$L_{Wtotal} = 10 \log \sum_{i=1}^K 10^{L_{wi}/10} \quad (14)$$

donde K : número de bandas de frecuencias consideradas para la medición.

L_{wi} : Nivel de Potencia Acústica de la fuente en cada banda frecuencia.

4. Instrumentación requerida

- ◀ Sonda de Intensidad configuración cara - cara consistente en:
Dos micrófonos ½ pulgada Behringer ECM8000, un espaciador y soporte.
- ◀ Calibrador con adaptador de ½ pulgada.
- ◀ Preamplificador Behringer MIC2200.
- ◀ Tarjeta Análoga/Digital serie DAS-1800HC/ST/HR.
- ◀ Computador personal con software IntensiSeba v1.
- ◀ Fuente de ruido estable (Ej. Aspiradora).
- ◀ Cables de conexión, desatornilladores.

5. Informe

El informe a entregar en el plazo de una semana debe incluir:

- ◀ **Metodología de trabajo**, superficie utilizada, número de puntos, calibración, duración de la medición, etc.
- ◀ **Resultados**, expresados en tablas, gráficos, etc.
- ◀ En lo posible **Registros Visuales** de la medición, fotos, esquema de la superficie utilizada y de la fuente sonora, etc.
- ◀ **Conclusiones** y **Bibliografía** utilizada.

6. Referencias y Material de Apoyo

- ◀ Norma UNE-EN ISO 9614-1 “Determinación de los niveles de potencia acústica emitidos por las fuentes de ruido por Intensidad del sonido” Parte 1: Medida en puntos discretos.
- ◀ Bruel & Kjaer, booklet “Sound Intensity”, septiembre de 1993.
- ◀ Herráez, M; Machimbarrena, M; “Intensimetría”, Universidad de Valladolid.

ANEXO B

“Medición de Intensidad y Mapas de Intensidad”

1. Objetivo General

- ◀ Realizar mediciones de Intensidad Sonora y ser capaz de efectuar un mapa vectorial con las mediciones realizadas.

1.1. Objetivos Específicos

- ◀ Introducir en forma práctica la aplicación de la Intensidad Sonora.
- ◀ Realizar un mapa de Intensidad para las bandas de frecuencia que sean de interés.
- ◀ Establecer una grilla de puntos que permita realizar mediciones de Intensidad Sonora en una grilla rectangular de puntos.
- ◀ Medir Intensidad Sonora en cada punto con la sonda ubicada en dos direcciones perpendiculares entre sí.
- ◀ Establecer una forma de trabajo adecuada y acorde al equipamiento disponible.
- ◀ Conocer los métodos que existen para efectuar mapas de Intensidad Sonora.
- ◀ Establecer la utilidad de realizar este tipo de mapas vectoriales.
- ◀ Entregar un informe en el plazo de una semana.

2. Introducción Teórica

Existen dos formas generalizadas que permiten medir la Intensidad Sonora a partir de dos micrófonos ubicados uno muy cerca del otro, una es en el dominio del tiempo, para lo cual se usa el método de aproximaciones finitas (ecuación 1) y la otra es en el dominio de la frecuencia (ecuación 2), que es la forma en que se calcula la Intensidad en este laboratorio.

$$\hat{I}_n(t) = \hat{p}(t) \cdot \hat{u}_n(t) = - \left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot \rho_0} \right) [(p_A(t) + p_B(t))] \int_{-\infty}^t (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau \quad (1)$$

$$\hat{I}(f) = - \frac{\text{Im} G_{AB}}{2\pi \cdot f \cdot \rho_0 \cdot \Delta r} \quad (2)$$

La segunda ecuación establece que la Intensidad Sonora se mide a través de la parte imaginaria del espectro cruzado entre las señales, el espectro cruzado es un número imaginario y entrega la densidad de energía cruzada entre las señales A y B.

Al medir Intensidad Sonora con una sonda $p - p$ (sonda que consta con dos transductores de presión, dos micrófonos) se está midiendo la componente de Intensidad en la dirección que une los centros acústicos de ambos micrófonos. Para efectuar una representación espacial de la Intensidad se realizarán medidas con la sonda ubicada en dos posiciones perpendiculares entre sí.

2.1. Mapas de Intensidad

Cada problema de ruido es primero que todo un problema de localización e identificación de la fuente. La medición de Intensidad Sonora ofrece varias formas de hacerlo, la cual tiene considerables ventajas respecto a otros métodos.

Gráficos de Contorno y en tres dimensiones 3D entregan información detallada del campo acústico generado por la fuente. Varias fuentes y/o sumideros pueden ser identificadas con gran exactitud.

Para realizar estas mediciones se debe definir una cuadrícula imaginaria. Las mediciones de Intensidad normal a esta superficie se realizarán en un número de puntos igualmente distanciados uno del otro sobre la superficie. Estas mediciones pueden ser usadas para calcular la potencia sonora sobre la grilla. Realizadas las mediciones existe una matriz de datos (previamente guardados) y cada dato contendrá la información por cada banda de frecuencia estudiada. Con estos datos se pueden realizar figuras con líneas de igual Intensidad (o líneas de IsoIntensidad) para cada frecuencia que se desee.

Con las mismas mediciones se pueden generar gráficos 3D, el cual provee información visual del campo sonoro generado por una fuente. Gráficos en tres dimensiones son figuras del Nivel de Intensidad. Si bien las mediciones de Intensidad son posibles gracias al Software IntensiSeba v1., esta representación gráfica se realiza con la ayuda del MATLAB.

Notar que también se pueden realizar mapas de contorno y 3D con mediciones de presión. Pero los mapas de Intensidad pueden ser hechos en el campo cercano donde la correlación entre los niveles de Intensidad medidos y la posición de la fuente es grande. Además, fuentes y sumideros pueden ser identificados con Intensidad y las mediciones pueden ser hechas en cualquier ambiente sonoro.

2.2. Características direccionales de una sonda

Si el sonido incide a 85° con relación a la dirección de la sonda, la Intensidad tendrá un signo determinado (positivo o negativo). Ahora si el sonido incide a 95° la Intensidad deberá marcar

un signo contrario al anterior. Es decir debe haber un cambio en la dirección de la Intensidad con un pequeño cambio en el ángulo de incidencia (figura 1).

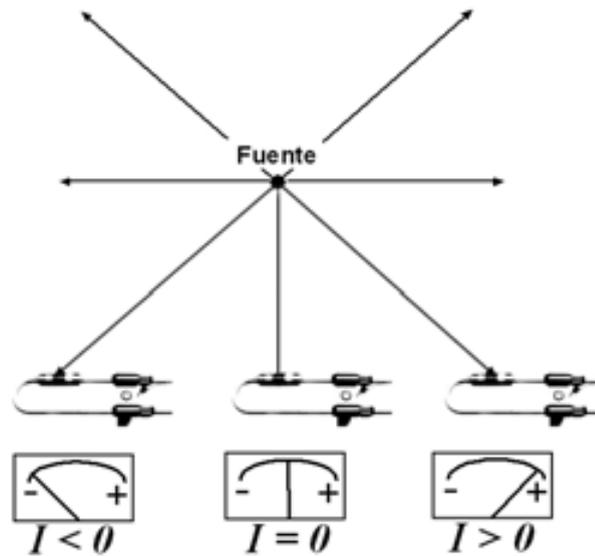


Figura 1. Característica direccional de una sonda de Intensidad.

Esta prueba se puede realizar en el software IntensiSeba v1. con la opción “Medir 1”, si se mueve la sonda ubicada en forma horizontal a la superficie imaginaria. En algún punto la dirección de la Intensidad cambiará de positiva a negativa, esta zona es identificada por cambiar rápidamente el signo de la Intensidad. En esta zona se asume que la sonda está ubicada a 90° con relación a la propagación de la fuente. Este método es útil cuando existe solo una fuente dominante – otras fuentes o sumideros pueden confundir los resultados.

La sonda está diseñada para que mida Intensidad positiva según se indica en la figura 2.

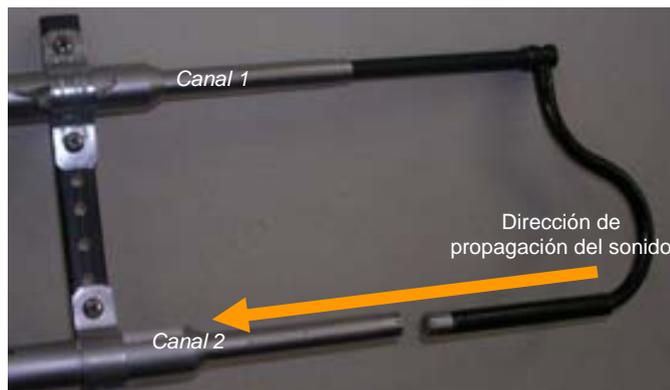


Figura 2. Ubicación de la sonda de Intensidad para medir Intensidad positiva según dirección de la propagación del sonido.

3. Desarrollo de la Experiencia

Para comenzar a realizar esta actividad se deben calibrar los niveles de ambos micrófonos en el preamplificador, utilizando la opción "Calibrar" del software IntensiSeba v1. Luego debe presionarse el botón "Cuadrícula" donde deben ingresarse el número de filas E y columnas C que van a establecer el número de mediciones a realizar, en total se van a efectuar un total de F·C mediciones.

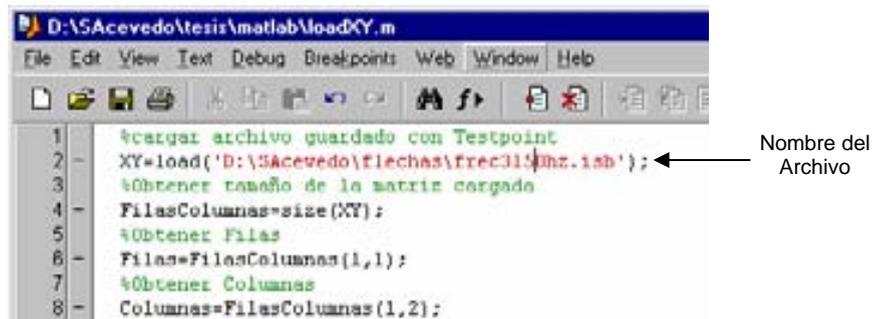
Luego debe ubicarse la sonda en dirección perpendicular a la superficie imaginaria en el punto superior izquierdo, considerando que la fuente se encuentra detrás de esta superficie. Establecer los datos de entrada adecuados para la medición (Número de muestras, Frecuencia de muestreo, Separación de los micrófonos, Promedios y la Ventana a utilizar). Presionar el botón "Medir" y finalizada esta medición presionar el botón "X1", posteriormente se debe cambiar la posición de la sonda al punto que está bajo el punto medido y efectuar la misma operación, recordando presionar el botón "X1" después de cada medición. Continuar hasta completar toda la columna y seguir hasta terminar con todas las columnas establecidas.

Al terminar las mediciones con la sonda en posición perpendicular a la superficie se pueden guardar estos datos (si desea puede no guardarlos). Para continuar con la medición se debe ubicar la sonda en forma paralela a la superficie con el **centro acústico de la sonda** (espacio entre los micrófonos) en la misma ubicación utilizada en las mediciones anteriores. Completar todas las mediciones presionando el botón "Y#" cada vez que termina una medición y guardar el archivo correspondiente. Este archivo guarda los datos de las mediciones con la sonda perpendicular y paralela a la superficie.

Por cada punto de medición se guarda el análisis por tercio de octava (Niveles de Intensidad con signo de Intensidad) desde los 100 Hz hasta los 5000 Hz, y el archivo "*.isc" contiene esta información para cada uno de los puntos. Si se desea seleccionar una banda de frecuencia se puede abrir este archivo, seleccionar la banda que se requiera y guardar estos datos en un nuevo archivo con extensión "*.isb". Este archivo se puede graficar con ayuda de MATLAB.

4. Análisis y resultados

Para poder ver los resultados de las mediciones se debe abrir el programa MATLAB y cargar el programa LoadXY.m, en la línea N° 2 debe ingresarse la ruta y el nombre del archivo que contiene la información de una banda de frecuencia (figura 3). El nombre de dicho archivo no debe comenzar con un número. Una vez ingresado el nombre del archivo se debe presionar la tecla de función F5 y se desplegará la ventana que contiene el gráfico vectorial de Intensidad.



```

1 %cargar archivo guardado con Testpoint
2 XY=load('D:\SAcevedo\flechas\freq315\Hz.ish');
3 %Obtener tamaño de la matriz cargada
4 FilasColumnas=size(XY);
5 %Obtener Filas
6 Filas=FilasColumnas(1,1);
7 %Obtener Columnas
8 Columnas=FilasColumnas(1,2);

```

Figura 3. Primeras líneas del programa LoadXY.m. En la línea 2 se ingresa la ruta y el nombre del archivo a graficar.

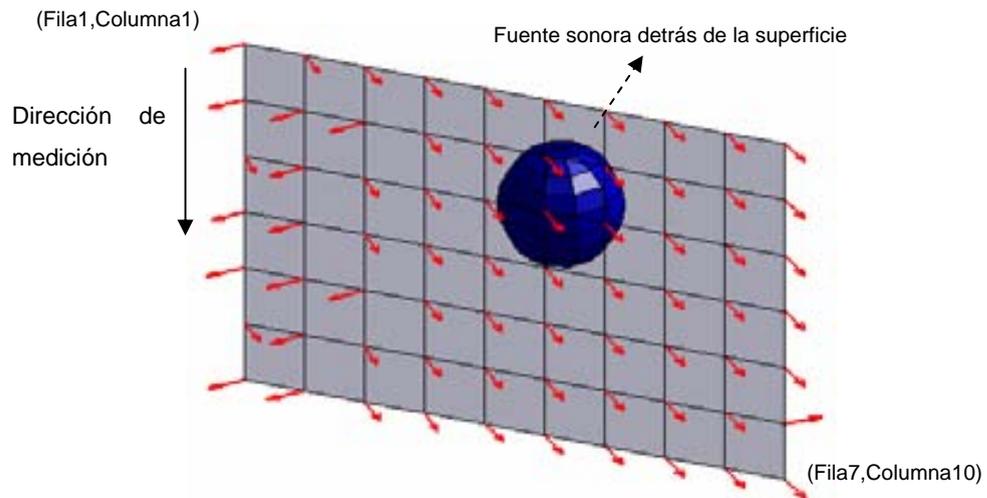


Figura 4. Visualización del vector Intensidad para cada uno de los puntos de una cuadrícula de 7 filas por 10 columnas para una banda de frecuencia determinada (1600 Hz, fuente omnidireccional excitada con ruido blanco). La fuente sonora se ubica detrás de esta superficie representada por una esfera. La primera medición se realiza en la esquina superior izquierda.

5. Instrumentación requerida

- ◀ Sonda de Intensidad configuración cara - cara consistente en:
 - ◀ Dos micrófonos ½ pulgada Behringer ECM8000, un espaciador y soporte.
- ◀ Calibrador con adaptador de ½ pulgada.
- ◀ Preamplificador Behringer MIC2200.
- ◀ Tarjeta Análoga/Digital serie DAS-1800HC/ST/HR.
- ◀ Computador personal con software IntensiSeba v1.
- ◀ Fuente de ruido estable o Disco Compacto “Ruidos Básicos” y Parlante.
- ◀ Cables de conexión, desatornilladores.

6. Informe

El informe a entregar en el plazo de una semana debe incluir:

- ◄ **Metodología de trabajo**, superficie utilizada, número de puntos, calibración, duración de la medición, etc.
- ◄ **Resultados**, expresados en tablas, gráficos, etc.
- ◄ En lo posible **Registros Visuales** de la medición, fotos, esquema de la superficie utilizada y de la fuente sonora, etc.
- ◄ **Conclusiones** y **Bibliografía** utilizada.

7. Referencias y Material de Apoyo

- ◄ Bruel & Kjaer, booklet "Sound Intensity", septiembre de 1993.
- ◄ Herráez, M; Machimbarrena, M; "Intensimetría", Universidad de Valladolid.
- ◄ Technical Review Bruel & Kjaer, 1984. "*Dual Channel FFT Analysis*" (Part 1)
- ◄ Technical Review Bruel & Kjaer, 1984. "*Dual Channel FFT Analysis*" (Part 2)

ANEXO C

C. Campos Sonoros Simples

A continuación se presentarán las expresiones de Intensidad para modelos de campos muy difícil de encontrar en la práctica, pero la importancia que tienen estos modelos es que la mayoría de los campos se pueden descomponer como superposición de estos modelos. Para encontrar las expresiones de Intensidad serán necesarias también las expresiones de presión y velocidad para cada uno de los campos a estudiar.

C.1. Onda Plana

El primer caso a estudiar corresponde a una onda viajando a través de un tubo uniforme, largo y de paredes rígidas. En este caso cada variable acústica es uniforme en un plano perpendicular el eje del tubo, es lo que se llama onda plana.

C.1.1. Ecuación de onda

La ecuación de onda para este caso presenta la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{c.1})$$

C.1.2. Solución, Presión Acústica

La solución general de esta ecuación es de la forma

$$p(x,t) = f(ct - x) + g(ct + x) \quad (\text{c.2})$$

cuyos términos representan una perturbación que viaja a velocidad c en la dirección x en sentido positivo y negativo. Las funciones f y g dependerán de las condiciones de contorno espaciales y temporales del sistema.

Si se considera una dependencia temporal del tipo armónico, la solución se puede expresar en términos complejos como:

$$p(x,t) = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \quad (c.3)$$

donde $k=2\pi/\lambda$, es el número de onda, λ corresponde a la longitud de onda; y ω es la frecuencia temporal.

Es importante destacar que solo la parte real de la expresión tiene sentido.

Una notación que permite una mayor claridad en cuanto a como se comporta el campo es la siguiente:

p_+ : onda progresiva, onda que se propaga en dirección de las x positivas, desde la fuente hacia fuera.

p_- : onda regresiva, onda que se propaga en sentido negativo, hacia la fuente.

Según esta notación la expresión de presión queda:

$$p(x,t) = p_+ + p_- \quad (c.4)$$

$$\text{con } p_+ = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (c.5) \quad \text{y} \quad p_- = Be^{j(\omega t + kx)} \quad (c.6)$$

Si consideramos que normalmente el estudio que interesa es el de las ondas viajando desde la fuente hacia fuera sin reflexiones, estamos en el caso de una onda progresiva en condiciones de campo libre. Así, la presión se expresa como:

$$p(x,t) = p_+ = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (c.7)$$

o la expresión módulo-argumento:

$$p(x,t) = P(x)e^{j(\omega t + \Phi_p(x))} \quad (c.8)$$

$$\text{donde } P(x) = \frac{p_{rms}}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad \Phi_p(x) \text{ es el desfase}$$

C.1.3. Velocidad de la partícula

A partir de la expresión obtenida para la presión y mediante la ecuación de Euler, se obtiene la correspondiente expresión para la función velocidad de la partícula:

$$u(x,t) = \frac{1}{\rho_0 c} f(ct - x) - \frac{1}{\rho_0 c} g(ct + x) \quad (\text{c.9})$$

Para una dependencia temporal de tipo armónico

$$\bar{u}(x,t) = \left[\frac{p^+}{\rho_0 c} - \frac{p^-}{\rho_0 c} \right] \bar{i} \quad (\text{c.10})$$

el cual es un vector en la dirección de propagación de la onda, y como tiene componente sólo en la dirección x , se referirá a ella como u .

En el caso de una onda plana la velocidad de partícula y la presión están en fase, y la relación entre ellas es, por lo tanto, independiente de la frecuencia.

Se puede ver que u es conocida sólo cuando se conocen los valores de p_+ y p_- , o sea con un solo micrófono no se puede determinar u . Para determinar u se utiliza el modelo de onda plana progresiva que considera una única onda y que permite la estimación de la velocidad a partir de la medida de un solo micrófono. Este modelo es muy difícil de encontrar en la práctica (terminación anecoica en un extremo del tubo), pero matemáticamente muy útil ya que permite analizar e interpretar campos sonoros más complejos.

La expresión módulo-argumento de la velocidad es:

$$u(x,t) = \frac{1}{\rho_0 \omega} \left[-P \frac{d\Phi_p}{dx} + j \frac{dP}{dx} \right] e^{j(\omega t + \Phi_p)} \quad (\text{c.11})$$

Cuya parte real corresponde a la parte activa de la velocidad (en fase con la presión) y su parte imaginaria corresponde a la parte reactiva (en cuadratura con la presión).

C.1.4. Impedancia Acústica

Para el caso de una onda plana:

$$Z_a = \pm \rho_0 c \quad (\text{c.12})$$

donde el signo + corresponde a una onda progresiva y el signo – a la regresiva.

Para una onda plana la impedancia toma un valor real, y al producto $\rho_0 c$ se le denomina impedancia (o resistencia) característica del medio.

C.1.5. Intensidad

La expresión de la Intensidad Instantánea será:

$$I(x, t) = p(x, t) \cdot u(x, t) \quad (\text{c.13})$$

donde se obvia la representación vectorial por que la Intensidad es un vector en la dirección x.

En general:

$$I(x, t) = \frac{1}{\rho_0 c} [(p_+)^2 - (p_-)^2] \quad (\text{c.14})$$

$$\langle I \rangle = \frac{1}{\rho_0 c} [(p_{rms+})^2 + (p_{rms-})^2] \quad (\text{c.15})$$

Si la Intensidad promedio es cero, significa que lo es en todas las posiciones, pero esta Intensidad en cada punto fluctúa alrededor de esta media, lo que indica que la energía fluye, “va y viene”, en cada región local. En un lugar y tiempo determinado, si ambas componentes p_+ y p_- , son del mismo signo y de amplitud parecida, la velocidad de partícula correspondiente es pequeña. En forma alternativa si ambas presiones son similares en módulo pero de signo opuestos, la presión total será pequeña pero la velocidad de partícula será grande. Esto corresponde a un intercambio de energía potencial en cinética, y viceversa, en cada región local del espacio.

En el modelo de onda plana progresiva, las componentes activa y reactiva de la Intensidad Instantánea vienen dadas por:

$$I_a(x,t) = -\frac{1}{\rho_0\omega} P^2(x) \frac{d\Phi_p(x)}{dx} \cos^2(\omega t + \Phi_p(x)) \quad (c.16)$$

$$I_r(x,t) = -\frac{1}{4\rho_0\omega} \frac{dP^2(x)}{dx} \text{sen}(2(\omega t + \Phi_p(x))) \quad (c.17)$$

La componente activa de la Intensidad es proporcional al gradiente espacial de la fase. Los frentes de onda (superficies en los que la fase es constante) son perpendiculares al vector Intensidad activa.

La componente reactiva es proporcional al gradiente espacial de p_{rms} .

La expresión de la Intensidad instantánea en términos complejos toma la forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(x,t) &= I_a(x,t) + jI_r(x,t) = \\ &= -\frac{1}{\rho_0\omega} P^2(x) \frac{d\Phi_p(x)}{dx} \cos^2(\omega t + \Phi_p(x)) - j \frac{1}{4\rho_0\omega} \frac{dP^2(x)}{dx} \text{sen}(2(\omega t + \Phi_p(x))) \end{aligned} \quad (c.18)$$

donde si se separa la parte espacial de la temporal, se puede escribir:

$$I(x,t) = \text{Re}\{C(x)(1 + e^{-2j(\omega t + \Phi_p)})\} \quad (c.19)$$

$C(x)$: Intensidad Compleja

Cuando se evalúa el promedio temporal se obtiene la Intensidad Activa Promedio:

$$\langle I_a(x) \rangle = -\frac{1}{2\rho_0\omega} P^2(x) \frac{d\Phi_p(x)}{dx} = \frac{1}{\rho_{0c}} p_{rms}^2 \quad (c.20)$$

mientras que la Intensidad reactiva promedio:

$$\langle I_r(x) \rangle = 0 \quad (c.21)$$

La expresión de la Intensidad compleja promedio es:

$$C(x) = I(x) + jQ(x) = \langle I_a(x) \rangle + jI_r(x) \quad (c.22)$$

Entonces, en el caso de la onda plana la parte real de Intensidad promedio es la Intensidad activa promedio, mientras que la parte imaginaria es la amplitud de la Intensidad reactiva Instantánea.

Así las expresiones quedan:

$$\langle I(x) \rangle = \langle I_a(x) \rangle = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c} \quad (c.23)$$

C.2. Onda esférica

C.2.1. Ecuación de Onda

La ecuación de onda para la función p en coordenadas esféricas es

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r^2} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\text{sen} \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{1}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \right) \frac{\partial^2 p}{\partial \Phi^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (c.24)$$

válida para $r \neq 0$

Suponiendo una simetría esférica para el campo, desaparecerá la dependencia con θ y Φ y, por lo tanto la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} = 0 \quad (c.25)$$

Que es la misma ecuación para una onda plana, pero ahora para la función pr .

C.2.2. Solución: Presión Acústica

La solución será, por lo tanto:

$$p(r,t) = \frac{1}{r} (f(ct-r) + g(ct+r)) \quad (c.26)$$

f : es la onda generada en el origen y cuyo valor decrece con la distancia

g : es la onda que viene del ∞ y que se acerca al centro. Por tener poco significado físico se considera despreciable.

Considerando una dependencia armónica con el tiempo, la expresión de la presión es:

$$p(r,t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (c.27)$$

A es un valor complejo y k el número de onda.

Considerar que solo la parte real de esta expresión tiene significado físico preciso.

C.2.3. Velocidad de la partícula.

Utilizando la expresión de la presión y aplicándola en la ecuación de Euler se llega a la siguiente expresión de la velocidad de partícula:

$$\vec{u}(r,t) = \left(\mathbf{1} - \frac{j}{kr} \right) \frac{p(r,t)}{\rho_0 c} \hat{r} \quad (c.28)$$

que es un vector en la dirección radial, por lo que en adelante se denotará simplemente como u :

$$u(r,t) = \frac{A}{\rho_0 c r} \left(1 - \frac{j}{kr} \right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (c.29)$$

en la que se puede observar que la velocidad no está en fase con la presión, es decir la onda diverge. Además la fase entre p y u depende de r .

En función del desfase entre presión y velocidad θ :

$$u = \frac{A}{rZ} e^{j(\omega t - kr)} \quad (c.30)$$

$$u = \frac{I}{\rho_0 c} \frac{A}{r} \frac{I}{\cos \theta} \cos(\omega t - kr - \theta) \quad (c.31)$$

donde se puede observar que la amplitud de la velocidad no es solo inversamente proporcional a la distancia a la fuente, depende de algo más, por eso cuando se trabaja con ondas esféricas, se suele aludir a la amplitud de la presión y no de la velocidad.

C.2.4. Impedancia Acústica

La impedancia acústica específica es:

$$Z_a = \rho_0 c \left[\frac{kr}{kr - j} \right] \quad (c.32)$$

que en este caso es una magnitud compleja.

Al separar parte real e imaginaria:

$$R = \rho_0 c \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} \quad (\text{Resistencia Acústica Específica}) \quad (c.33)$$

$$\chi = \rho_0 c \frac{(kr)}{1 + (kr)^2} \quad (\text{Reactancia Acústica Específica}) \quad (c.34)$$

Cuando domina la parte resistiva significa que la presión y la velocidad están en fase y se produce radiación de potencia sonora. En cambio, si domina la componente reactiva es porque están en cuadratura y se produce un intercambio de energía sonora reactiva.

Expresando en forma módulo-argumento:

$$Z_a = \rho_0 c \left[\frac{kr}{\sqrt{(kr)^2 + 1}} \right] e^{j\theta} \quad (c.35)$$

θ es la fase entre presión y velocidad; $\operatorname{tg} \theta = 1/kr$

se tiene que

$$Z_a = \rho_0 c \cos \theta \cdot e^{j\theta} \quad (c.36)$$

El producto kr es un factor determinante a la hora de estudiar el comportamiento acústico, ya que va a indicar si p y u están en fase o no. Dicho producto expresa la razón entre la distancia a la fuente r y la longitud de onda λ :

$$kr = 2\pi \frac{r}{\lambda} \quad (c.37)$$

C.2.5. Campo Cercano y Lejano

Como se ha visto el campo sonoro varía con la distancia, por ello se separa este estudio en dos zonas del espacio.

a) Primer caso: $kr \ll 1$

Se denomina campo cercano a la región en la que se cumple que $kr \ll 1$, en esta región r es muy pequeño comparado con λ . En esta zona se producen variaciones apreciables de presión con la distancia. Y p con u se encuentran en cuadratura (u solo tiene componente reactiva), la velocidad no esta necesariamente en dirección de la propagación de la onda y su módulo depende del inverso del cuadrado de la distancia. El cociente entre u_{rms} y p_{rms} supera al caso de la onda plana en un factor $(kr)^{-2}$.

En relación con la Impedancia:

$$Z_a = jkr\rho_0c \quad (\text{c.38})$$

en esta zona tanto la resistencia como la reactancia tienden a cero. En esta zona la fuente no radia potencia.

b) Segundo caso: $kr \gg 1$

Esta zona corresponde a campo lejano, r es grande comparado con λ . La presión y la velocidad se encuentran prácticamente en fase, y se reproduce el comportamiento de onda plana, donde la velocidad se encuentra en la dirección de propagación de la onda y su módulo depende del inverso de la distancia. Hay radiación de potencia sonora. La onda esférica adquiere comportamiento de onda plana, ya que los frentes de onda se vuelven esencialmente planos.

En este caso la Impedancia toma la expresión:

$$Z_a = \rho_0c \quad (\text{c.39})$$

La reactancia tiende a cero y la resistencia a ρ_0c .

c) Caso: $kr = 1$

Tanto la resistencia como la reactancia tienden a $\rho_0c/2$. Se define un radio de transición $r = 1.6\lambda$ que separa el comportamiento que prevalece en cada zona, se puede ver que es función de la frecuencia.

C.2.6. Intensidad

La Intensidad se expresa por:

$$I = \frac{PU \cos \theta}{2} = \frac{P^2}{2\rho_0c} \quad (\text{c.40})$$

La Intensidad Activa viene dada por

$$Ia(r,t) = -\frac{A^2}{2r^2 \rho_0 c} [1 + \cos(2(\omega t - kr))] \quad (c.41)$$

ANEXO D

Documento de Ayuda Software IntensiSeba v. 1

Indice

1. Software “IntensiSeba v1”	pag. D1
1.1 Ventana “IntensiSeba: Control”	pag. D1
1.2 Ventana “IntensiSeba: Calibrar”	pag. D4
1.3 Ventana “IntensiSeba: Señales”	pag. D6
1.4 Ventana “IntensiSeba”	pag. D6
2. Ver archivos guardados	pag. D8

1. Software “IntensiSeba v1”

El programa desarrollado “IntensiSeba v1” permite realizar mediciones de Intensidad Sonora. Está diseñado para comenzar a realizar mediciones sin la necesidad de ir abriendo ventanas sucesivas previa calibración, cuando se ejecuta el programa todo lo configurable para realizar la medición se puede observar.

Al comenzar a utilizar el programa se abren cuatro ventanas:

- IntensiSeba: Control,
- IntensiSeba: Calibrar,
- IntensiSeba: Señales y,
- IntensiSeba.

1.1 Ventana “IntensiSeba: Control”

Esta ventana (figura D1) permite comenzar a realizar la medición, tiene como parámetros a ingresar el número de muestras, la frecuencia de muestreo, la separación de los micrófonos, la cantidad de promedios a realizar, la ventana a utilizar, la frecuencia mínima a ser analizada, la frecuencia máxima a ser analizada, además de los botones “Medir”, “Detener”, “Medir 1”, “Detener 1 a 1”, “CD Player”, “Calibrar”, “Señales” y “Cuadrícula”, incluyendo también el display de Promedios.



Figura D1. Ventana de Control.

El número de muestras a elegir va a ser siempre una potencia de 2, para realizar un análisis FFT correcto. La frecuencia de muestreo se recomienda que sea la presentada por defecto en el programa (20000 Hz), si se ingresa el valor cero se deshabilitará el botón “Medir”. La separación de los micrófonos (dr [metros]) aparte de incluir dicha separación también limita la frecuencia máxima a ser analizada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f_{\max dr} = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot dr}$$

donde $f_{\max dr}$ es la frecuencia limitada por la separación de los micrófonos y c es la velocidad del sonido en el aire (considerada 344 m/s). Cuando la separación se achica la frecuencia máxima de análisis aumenta (y viceversa). Esta separación debe ser superior a cero. En la casilla promedios se debe ingresar un valor entero superior a cero. Este promedio indica la cantidad de promedios a realizar.

El usuario tiene la opción de acotar las frecuencias a ser analizadas en las casillas correspondientes (f_{\max} y f_{\min}), si la frecuencia máxima f_{\max} es mayor que $f_{\max dr}$, no se podrá realizar la medición (f_{\min} debe ser positiva y menor que f_{\max}).

El botón “Calibrar” muestra la ventana “IntensiSeba: Calibrar” si es que esta ventana está oculta. El botón Señales despliega la ventana “IntensiSeba: Señales” si es que no está visible. El botón “CD Player” abre el Reproductor de Discos Compactos disponible en Windows '98. El botón “Medir” comienza el proceso de medición y desactiva todos los parámetros que pueden ser ingresados, también desactiva los botones “Calibrar” y “Detener” de la ventana “IntensiSeba: Calibrar” (se activan al finalizar la medición o al presionar el botón “Detener”). Si el botón “Medir” está desactivado es porque el botón “Calibrar” de la ventana “Calibrar” está en uso, para activarlo

se debe presionar el botón “Detener” que está bajo el botón “Calibrar”. El botón “Detener” detiene el proceso de medición en el momento que el usuario lo desee. El botón “Medir 1” realiza una serie de mediciones considerando un promedio igual a 1 y se desactivan los mismos elementos que se desactivan al presionar el botón “Medir”. Para detener este proceso se presiona el botón “Detener 1 a 1”.

El botón “Cuadrícula” despliega una nueva ventana que permite registrar el análisis por tercio de octava de cada punto de intersección de una cuadrícula imaginaria (figura D2). Los valores incluidos en este análisis incluyen sólo los valores de Nivel de Intensidad con su signo (positivo o negativo) respectivo, dicho signo está determinado por el signo de la Intensidad de la banda correspondiente.

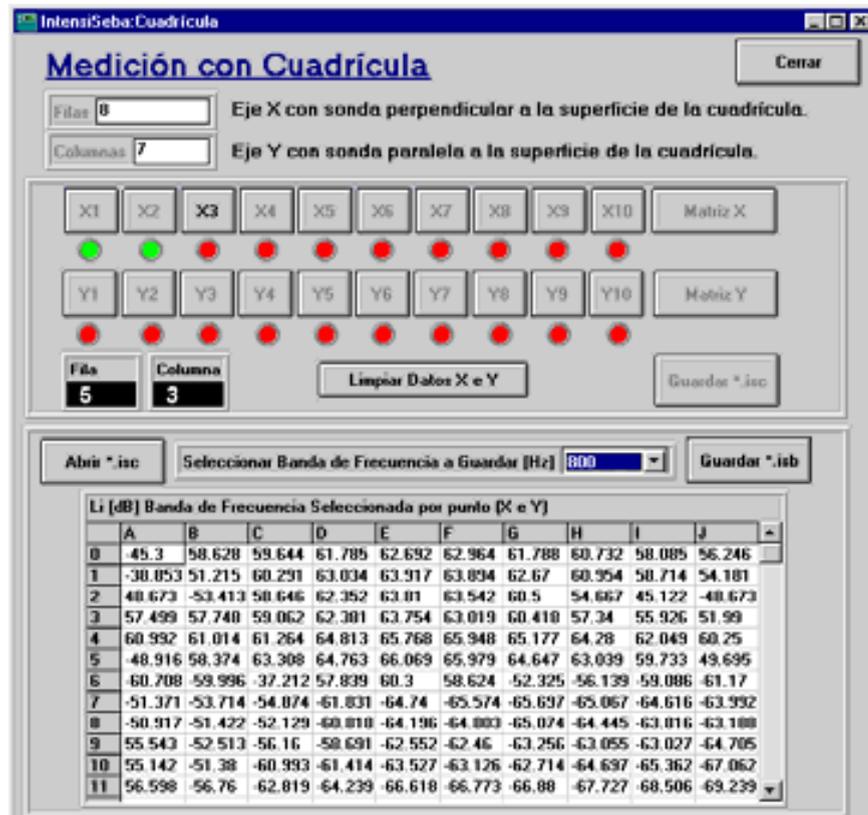


Figura D2. Ventana que permite realizar una medición en una cuadrícula.

Para realizar este registro de valores se debe seleccionar el número de filas y columnas con las que se desea trabajar antes de comenzar este registro. Se debe comenzar con la sonda en dirección perpendicular a la superficie de la cuadrícula en el punto superior izquierdo (considerando que se mira la superficie con la fuente sonora detrás de esta superficie), y continuar con el punto inmediatamente bajo este punto. Al completar la primera columna, habiendo realizado un número de mediciones igual al dato de entrada “Filas” determinado, se activa el botón

correspondiente a la siguiente columna, y así hasta completar la cantidad de columnas especificado en el dato de entrada "Columnas". Al realizar la última medición se activa el botón "Matriz X", que crea la matriz necesaria con todos los puntos medidos con la sonda en forma perpendicular a la superficie imaginaria..

Cuando se crea la "Matriz X" se activa el botón "Y1" que permite comenzar a medir con la sonda paralela a la superficie y con el espacio acústico entre los micrófonos en la misma posición de las mediciones anteriores. Al completar estas mediciones se activa el botón "Matriz Y" que permite crear la Matriz con todos los datos de la medición con la sonda paralela a la superficie.

Finalizada esta acción se activa el botón "Guardar *.isc", que permite guardar las matrices de datos creadas, en un solo archivo con extensión isc.

Los display "Fila" y "Columna" señalan el último punto que fue medido. El botón "Limpiar datos X e Y" borra todas las mediciones realizadas, previa confirmación, y permite comenzar nuevamente una serie de mediciones.

El botón "Abrir *.isc" abre un archivo guardado previamente con el botón "Guardar *.isc" y el dato de entrada "Seleccionar Banda de Frecuencia a Guardar [Hz]" permite seleccionar la banda de frecuencia que requiera ser guardada. Si la medición se realizó en una cuadrícula de $N \times M$, la tabla presente muestra una cantidad de $2N \times M$ datos, donde la mitad superior corresponde a los datos medidos con la sonda en forma perpendicular a la superficie y la mitad inferior con la sonda en forma paralela a la superficie.

Para guardar los datos de la banda de frecuencia seleccionada se debe presionar el botón "Guardar *.isb" que creará el archivo con extensión isb que posteriormente será graficado con ayuda de MATLAB.

Finalmente, si por deseo o accidente se cierra la ventana "IntensiSeba: Control" y la medición está (o no) en curso, existe la opción de abrirla desde la ventana "IntensiSeba" con el botón "Control".

1.2 Ventana "IntensiSeba: Calibrar"

Esta ventana muestra un parámetro a ingresar que es $L_p \text{ max [dB]}$ (figura D3), este valor es importante ya que establece el máximo Nivel de Presión sonora que puede ser adquirido por la tarjeta A/D y debe ser ingresado antes de realizar la calibración, si se cambia este valor se deben

calibrar nuevamente ambos canales. El valor por defecto es de 130 [dB]. El display “Presión RMS [N/m²]” muestra la presión sonora RMS del valor Lp max [dB]. El display “Presión peak [N/m²]” muestra el valor peak de una señal que genera un valor RMS mostrado en el display “Presión RMS [N/m²]” considerando un tono puro.

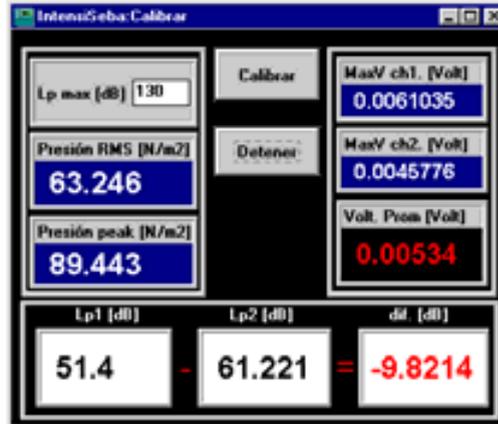


Figura D3. Ventana de calibración.

Los display “maxV ch1. [Volt]” y “maxV ch2. [Volt]” muestran los niveles peak de voltaje que están entrando a la tarjeta conversora A/D (la tarjeta permite un máximo de 10 Volt peak por canal). El display “Volt. Prom [Volt]” muestra el promedio de los dos voltajes máximos de ambos canales.

El botón “Calibrar” permite establecer la entrada y salida del preamplificador para obtener el valor deseado, por ejemplo si se calibra el canal uno con un calibrador de 1 KHz a 114 [dB] deben ajustarse los valor de ganancia y output del canal uno del preamplificador para que en el display “Lp1 [dB]” se obtengan los 114 [dB], lo mismo con el canal dos. Establecido esto, si se tiene una fuente que emite un Nivel de Presión sonora menor, estos display mostrarán dicho Nivel de Presión sonora. El display “dif. [dB]” muestra la diferencia en dB de los niveles de Presión sonora de los canales uno y dos cuando se está calibrando y cuando se está midiendo. Cuando se está realizando una medición, los display “Lp1 [dB]” y “Lp2 [dB]” muestran los niveles de Presión de los canales 1 y 2 respectivamente.

Al presionar el botón “Calibrar” se deshabilitan los botones “Medir”, “Detener”, “Medir 1”, “Detener 1 a 1” de la ventana “IntensiSeba: Control”, además de los parámetros a ingresar de la misma ventana. Para habilitarlos hay que presionar el botón “Detener” disponible. Si el botón “Calibrar” está desactivado es porque se está llevando a cabo una medición.

Si esta ventana se cierra es posible desplegarla presionando el botón “Calibrar” de la ventana “IntensiSeba: Control”.

1.3 Ventana “IntensiSeba: Señales”

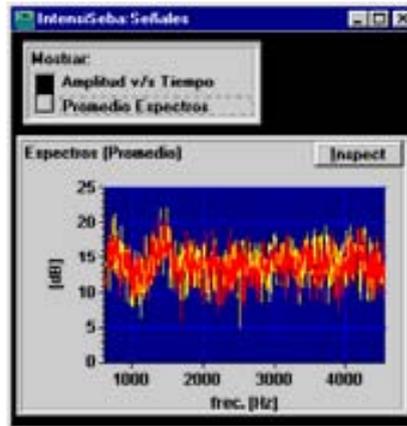


Figura D4. Visualización de las señales.

En esta ventana se pueden observar la señal que está siendo adquirida y los espectros de dichas señales durante o después de la medición (figura D4). Si se selecciona “Amplitud v/s Tiempo” se puede observar un gráfico de Amplitud versus tiempo. Si se elige “Espectro Señales 1 y 2” se observan los espectros de ambas señales en un gráfico [dB] versus frecuencia.

Si se cierra esta ventana se puede reabrir presionando en el botón “Señales” de la ventana “IntensiSeba: Control”.

1.4 Ventana “IntensiSeba”

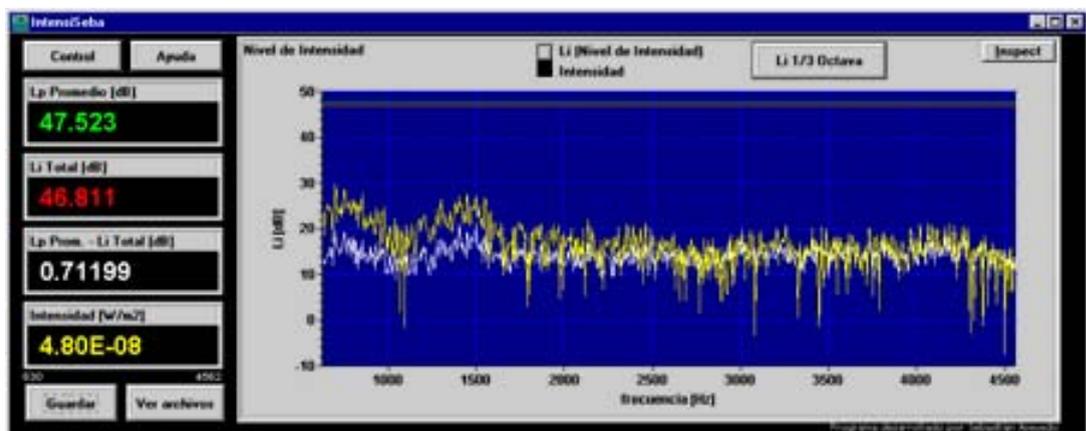


Figura D5. Ventana de Control.

Esta ventana tiene la opción de abrir la ventana “IntensiSeba: Control” si se presiona el botón “Control” (figura D5), además presenta la capacidad de guardar la medición realizada en un archivo (*.seb) presionando el botón “Guardar”, este archivo puede ser revisado presionando el botón “Ver

archivos” (se procederá a explicar esta opción más adelante en este documento). Al presionar el botón “Ver archivos” se ocultan las tres ventanas superiores si es que no están ocultas y se despliega una nueva ventana. El botón “Ayuda” muestra una guía para realizar las mediciones.

El display “Lp Promedio [dB]” muestra el Nivel de Presión sonora promedio entre las dos señales en cada promediación, el display “Li total [dB]” muestra la suma energética de los niveles de Intensidad de todas las frecuencias en cada promediación, el display “Lp Prom. – Li Total [dB]” muestra la diferencia entre los dos displays anteriores y el display “Intensidad [W/m²]” muestra la Intensidad total en las unidades indicadas y los números presentes bajo este display son las frecuencias límites, en Hz, que fueron consideradas el cálculo de este valor.

El gráfico presente en esta ventana tiene la capacidad de mostrar la Intensidad o el Nivel de Intensidad (cada una versus frecuencia) según cual se seleccione en el botón correspondiente. Si se selecciona “Li (Nivel de Intensidad)” además de mostrar el Nivel de Intensidad por frecuencia (en amarillo), muestra el espectro del Nivel de Presión Sonoro Promedio de los canales (en blanco), también como referencia se añaden el Nivel de Presión Promedio total del display “Lp Promedio [dB]” (línea verde) y el Nivel de Intensidad Total señalada en el display “Li total [dB]” (línea roja). Si se cierra esta ventana el programa también se cierra y es necesario abrirlo nuevamente.

El botón “Li 1/3 octava” muestra un análisis por tercio de octava hasta los 5 KHz de la última medición realizada (figura D6).

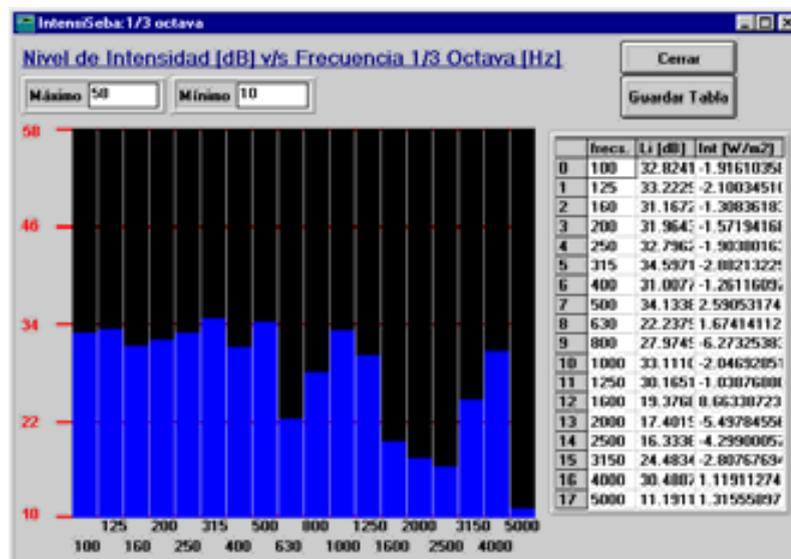


Figura D6. Análisis por tercio de octava.

Al realizar el análisis se despliega una ventana que muestra el Nivel de Intensidad por tercio de octava. Se pueden variar los valores máximos y mínimos del eje de Nivel de Intensidad modificando las casillas “Máximo” y “Mínimo” respectivamente (por defecto son 120 Máximo y 0 Mínimo). Se muestra también una tabla donde están presentes todos los datos que se grafican en las barras, esta tabla se puede guardar presionando el botón “Guardar Tabla”, el archivo guardado queda con extensión *.ist (IntensiSebaTercio). El botón “Cerrar” cierra esta ventana y despliega las ventanas originales.

2. Ver archivos guardados

Para poder ver los archivos guardados existe dentro del programa un subprograma que puede accederse a través del botón “Ver archivos” de la ventana “IntensiSeba” (figura D7).



Figura D7. Sección superior de la ventana que permite abrir mediciones guardadas.

Al abrirse este programa presenta un botón llamado “Abrir Datos”, este botón abre el archivo con extensión *.seb seleccionado con los datos de alguna medición. Al abrir se muestran todos los parámetros que se ocuparon durante la medición (número de muestras, Muestreo, separación de los micrófonos y la cantidad de promedios utilizados), además del Nivel de Presión promedio, Nivel de Intensidad total e Intensidad Total. Para saber que archivo se está revisando se incluye el nombre (en que parte del disco duro esta localizado) y el tamaño en Bytes de dicho archivo. El display “Filas” muestra la cantidad de filas presentes en el archivo.

Los seis botones superiores presentes a la izquierda de la gráfica (“Intensidad”, “Nivel de Intensidad”, “Espectro 1”, “Espectro 2”, “Fase sin corrección”, “Fase corregida”) grafican lo señalado en ese botón versus frecuencia luego de ser abierto un archivo (figura D8). Por ejemplo si se selecciona el botón “Espectro 1”, el gráfico mostrará el espectro de la señal 1 en [dB] versus el eje X correspondiente a las frecuencias. Si no se ha abierto ningún archivo con datos y se presiona uno de estos seis botones el gráfico quedará en blanco. El botón “Nivel de Intensidad” también grafica el espectro del Nivel de Presión Sonora en color blanco.

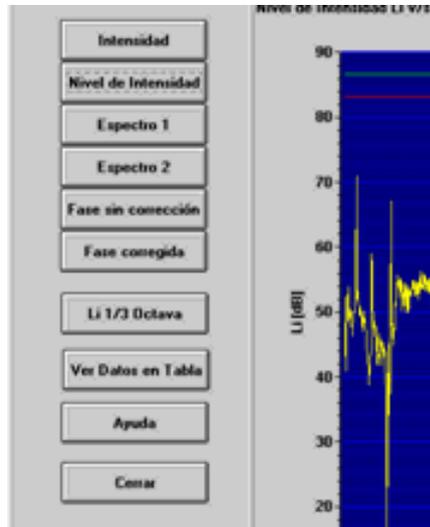


Figura D8. Botones presentes en el programa.

El botón “Li 1/3 Octava” permite abrir un archivo que contenga la información por tercio de octava de una medición previamente realizada (figura D9).

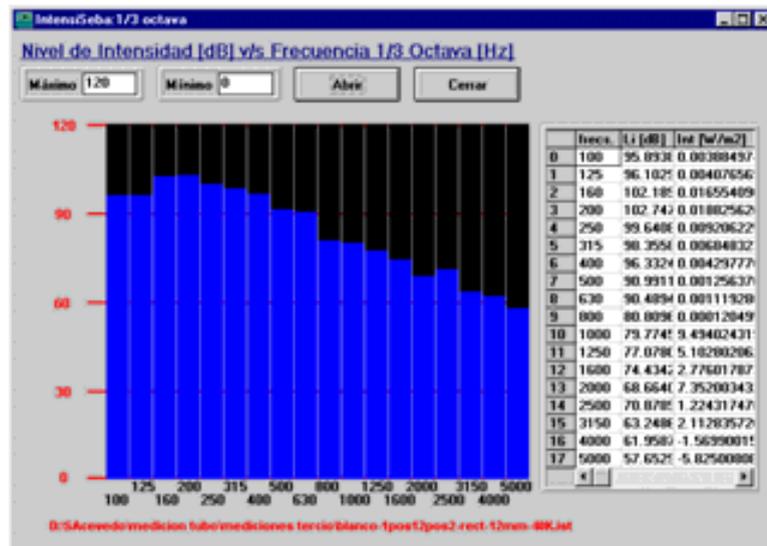


Figura D9. Análisis por tercio de Octava.

El botón “Abrir” abre el archivo *.ist seleccionado y el nombre de este archivo se muestra al costado del botón. Las casillas “Máximo” y “Mínimo” establecen los valores máximos y mínimos de las barras. Presionando el botón “Cerrar” se cierra esta ventana.

El botón “Ver Datos en Tabla” despliega una nueva ventana con una tabla de datos presentes en el archivo abierto y que son ocupados para graficar, esta tabla contempla las siguientes columnas en este orden: frecuencia [Hz], Intensidad [W/m^2], Nivel de Intensidad Li [dB], espectro de la señal

1 [dB], espectro de la señal 2 [dB], Fase sin corrección [rad], Fase corregida [rad]. Sobre esta tabla existe un botón para cerrar esta ventana.

El botón “Ayuda” muestra este documento. Si se presiona el botón “Cerrar” presente se cierra la ventana “IntensiSeba: Ver Datos” y se abren las tres ventanas superiores que se habían ocultado. Este botón está presente solo si se accede a través del programa “IntensiSeba v1”, si se accede en forma independiente este botón no está presente.

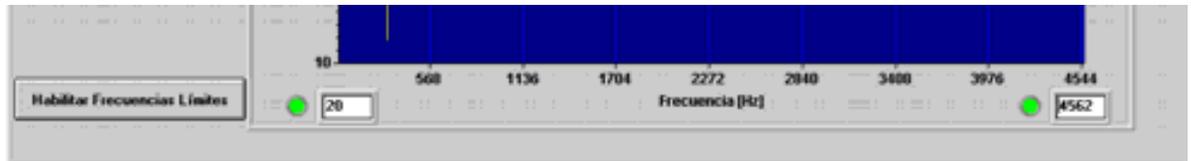


Figura D10. Límites de frecuencia en la visualización de los gráficos.

Al presionar los botones que están a la izquierda del gráfico, los ejes se ajustan de manera automática. Pero existe la posibilidad de que el usuario elija los valores límites del eje X (frecuencias), para ello basta presionar el botón “Habilitar Frecuencias Límites” y los “Led” que están rojos se tornan verdes y las casillas presentes bajo el gráfico se habilitan para ingresar los valores que se deseen (se recomienda presionar la tecla Enter cada vez que se ingresa un valor). Si el valor de la casilla correspondiente al valor superior del eje es igual o menor al casillero del valor inferior, el eje se vuelve automático.

Cada vez que se presiona un botón para cambiar el gráfico los casilleros se inhabilitan y es necesario presionar el botón “Habilitar Frecuencias Límites” para habilitarlos.

ANEXO E

E.1. Programa realizado en Matlab para la Visualización de Vectores de Intensidad

A continuación se presenta el programa creado en Matlab para visualizar la propagación sonora de una fuente medida a través de mediciones de Intensidad. La ubicación del archivo que contiene los datos de la frecuencia de interés debe ser ingresado entre las comillas simples en la segunda línea de programación. El grafico vectorial resultante será como el que se indica en la figura E1.

```
1. %cargar archivo guardado con Testpoint
2. XY=load('d:\SAcevedo\tesis\matlab\freq1000Hz.isb');
3. %Obtener tamaño de la matriz cargada
4. FilasColumnas=size(XY);
5. %Obtener Filas
6. Filas=FilasColumnas(1,1);
7. %Obtener Columnas
8. Columnas=FilasColumnas(1,2);
9. %Crear Grilla para graficar
10. [Y,Z]=meshgrid(1:Columnas,1:Filas/2);
11. %Establecer Distancia de Profundidad de la Grilla
12. X=1.*ones(Filas/2,Columnas);
13. %Valores de X para graficar las flechas
14. U=XY(1:Filas/2,1:Columnas);
15. %Valores de Y para graficar las flechas
16. V=XY(Filas/2+1:Filas,1:Columnas);
17. %Valores de Z para las flechas es cero, de tamaño Filas por Columnas
18. W=zeros(Filas/2,Columnas);
19. %Graficar flechas
20. c=quiver3(X,Y,Z,U,V,W,0.2);
21. axis equal;
22. axis off;
23. %Establecer color y grosor de flechas
24. set(c,'Color',[1,0,0],'linewidth',1.5)
25. hold on;
26. %Grafica Superficie plana con tamaño de la grilla
27. surf(X,Y,Z);
28. %Establece Color [R G B]
29. colormap([0 0 1]);
30. %Establece vista del grafico en 3D
31. view(-45,40);
32. %Transparencia de la superficie
33. alpha(0.2);
34. hold off;
```

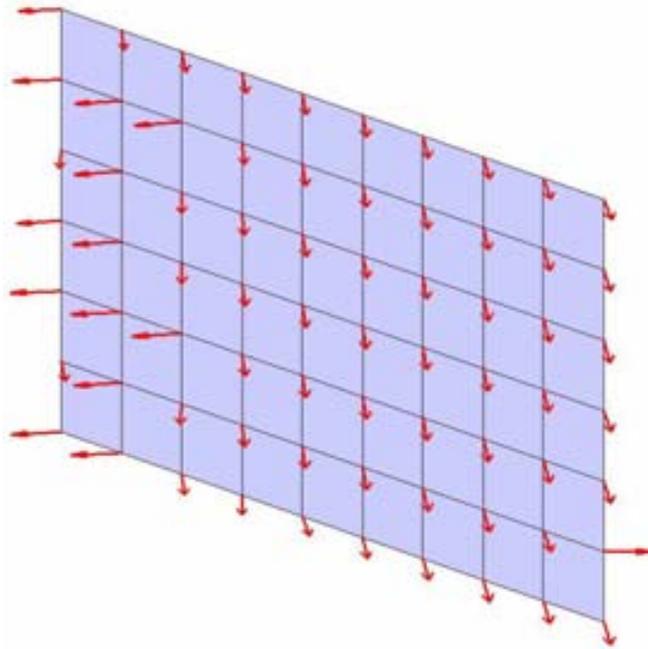


Figura E1. Diagrama resultante de vectores de Intensidad. La fuente sonora se encuentra atrás de esta superficie imaginaria.