



**II CAIM 2010**  
*Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica*  
**San Juan - Noviembre 2010**

## **Implementación de un equipo de monitoreo de máquinas basado en imágenes acústicas: Un estudio paramétrico**

Jorge Muract<sup>(1)</sup> y Patricio Ravetta<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba  
Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina. e-mail: [jmuract@efn.uncor.edu](mailto:jmuract@efn.uncor.edu)*

<sup>(2)</sup> *AVEC, Inc., 3154 State Street Suite 2230, Blacksburg, VA, 24060, USA*

### **RESUMEN**

Para incrementar la confianza y la seguridad de equipos tales como: compresores, motores eléctricos y trenes de engranajes; se los monitorea periódicamente en busca de daños. Un método convencional de monitoreo, consiste en realizar mediciones de vibraciones de los equipos, tarea desarrollada por un técnico especializado. El estado del equipo se puede determinar comparando las vibraciones medidas en el equipo monitoreado con datos correspondientes a un estado previo conocido donde el equipo funcionaba correctamente.

El proceso mencionado puede ser repetido en forma regular, pero consume tiempo y trabajo. Por ello es conveniente en términos de tiempo y costo, desarrollar un sistema remoto basado en emisiones acústicas para detectar el estado de equipos industriales. El análisis de espectros de señales acústicas es conocido desde hace varios años, y es similar al análisis de vibraciones usando acelerómetros, con la ventaja de que el transductor no debe ser montado sobre la máquina. Además, la técnica de "Microphone Phased Arrays" (MPA) se ha usado extensamente por varios años para generar imágenes acústicas en diferentes aplicaciones.

El estado del arte en MPA generalmente requiere que un operador experto interprete los datos producidos por el equipo, y por consiguiente no es apto para ser automatizado para monitoreos en línea. En este trabajo se desarrolla un sistema MPA inteligente para identificar y clasificar fallas en máquinas a distancia. La implementación de un monitoreo basado en imágenes acústicas para detectar fallas de equipos en un ambiente industrial presenta varios desafíos particulares dado que las plantas industriales configuran un ambiente acústico altamente reverberante que provoca reflexiones y altos niveles de ruido.

Para investigar la implementación del sistema propuesto, se desarrolló un modelo numérico del MPA en un ambiente altamente reverberante. Este trabajo presenta un estudio paramétrico para la implementación de la tecnología en una planta industrial típica. Estos parámetros incluyen las dimensiones del cuarto, coeficiente de absorción, nivel de ruido base, y número de máquinas, entre otros. Este estudio paramétrico es luego utilizado para determinar el arreglo de micrófonos (o MPA) apropiado, para una planta en particular, en términos de número de micrófonos, patrones y dimensiones generales.

**Palabras Claves:** Microphone phased array, Monitoreo, Espectros y daños.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los equipos industriales tales como compresores, motores eléctricos y engranajes son monitoreados periódicamente para detectar posibles fallas. Normalmente este monitoreo es realizado por medio de transductores de vibraciones (acelerómetros o sensores de proximidad) localizados en la superficie de los equipos a analizar. Cuando los transductores están instalados permanentemente sobre la máquina tienen la desventaja de la rápida degradación de los transductores debido a la hostilidad del ambiente, problemas de cableado, pérdida de calibración, etc. Por otro lado, el monitoreo periódico por medio de un técnico especializado, genera un consumo alto de tiempo de máquina y recursos. Por lo tanto, es de gran interés tener un método de monitoreo que no tenga contacto ni interfiera con la zona de trabajo. Por otro lado, el análisis de espectros de señales acústicas ha existido por mucho tiempo, y es similar al análisis de vibraciones usando acelerómetros, con la ventaja de que los sensores no necesitan ser montados en la superficie del equipo a monitorear. Paralelamente, el sistema de imágenes acústicas usando un arreglo de micrófonos (MPA) ha sido también extensamente utilizado para el procesamiento de señales acústicas en diferentes aplicaciones [1-7]. En este marco, se propone un sistema de monitoreo de máquinas utilizando la técnica de imágenes acústicas. El sistema y la secuencia de procesamiento de datos son esquematizados en la Figura 1.

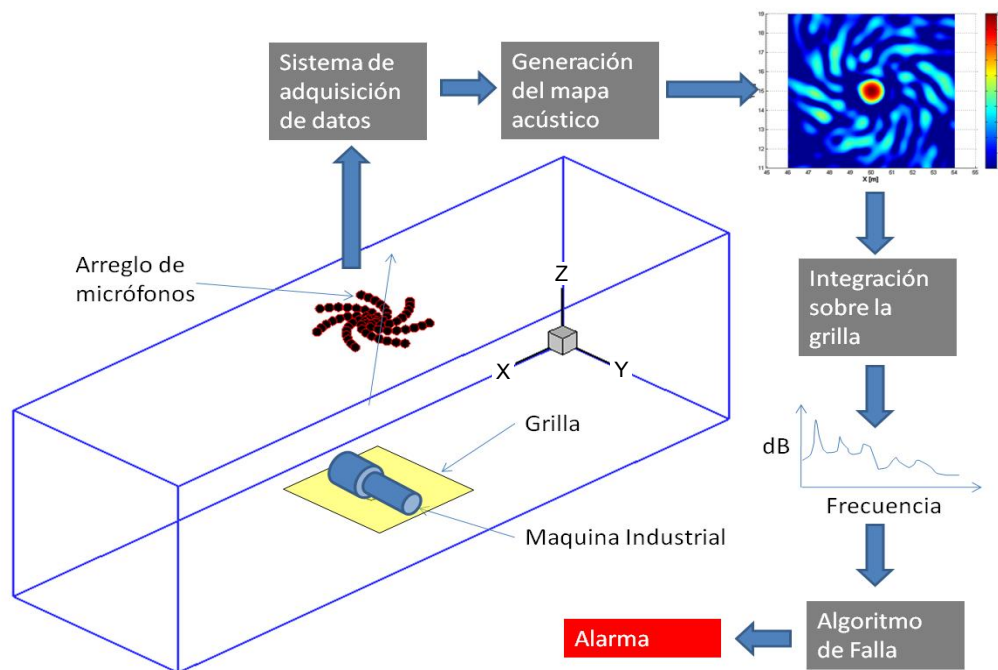


Figura 1: Esquema del sistema de detección de falla

Uno de los mayores desafíos de esta implementación, es el ambiente altamente reverberante característico de las plantas industriales (bajo coeficiente de absorción del sonido), que resulta en alta reflexión y niveles de ruido. Además, el sistema debe ser capaz de monitorear varias máquinas sin interferir con el normal funcionamiento de las mismas ni sobre las tareas para su mantenimiento.

A los fines de caracterizar los parámetros principales de diseño y performance de estos sistemas, Ravetta y otros [6] desarrollaron un modelo numérico que simula el monitoreo remoto de equipos en un ambiente industrial por medio de señales acústicas adquiridas por un arreglo de micrófonos. El modelo es capaz de simular el ambiente de una planta industrial, incluyendo reverberación y reflexión, múltiples máquinas, diseños arbitrarios del MPA, y escenarios de daño simple.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un estudio paramétrico, destinado a entender el efecto del coeficiente de absorción sobre la performance del modelo de monitoreo propuesto.

## 2 MODELO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE FALLA USANDO UN ARREGLO DE MICRÓFONOS

En esta sección se detallan las características principales del modelo numérico desarrollado para simular el sistema de diagnósticos de daños propuesto por Ravetta y otros [6], sin entrar en la rigurosidad matemática del modelo.

### 2.1 Definición del problema

El problema que se trata de simular incluye un cuarto con múltiples superficies, donde existen reflexiones y por ende campos reverberantes uniformes y radiación directa. El nivel del campo reverberante depende del coeficiente de absorción del cuarto. Por ejemplo, una baja absorción del ruido, algo típico en una planta industrial, resulta en altos niveles de reverberación. En el modelo propuesto, se asume que el cuarto o la planta industrial es un rectángulo de dimensiones  $L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  como muestra la Figura 2. Además, dentro de esta planta industrial se encuentran los equipos a ser monitoreados, por ejemplo motores eléctricos, cajas de engranajes y compresores, que son las únicas fuentes de emisión acústica dentro del cuarto. En adelante llamaremos a estos equipos con el nombre genérico de máquinas. Por último, en el techo de este cuarto se encuentra el arreglo de micrófonos, montado de forma tal que provee una visión directa de las máquinas. La configuración del problema se esquematiza en la Figura 2.

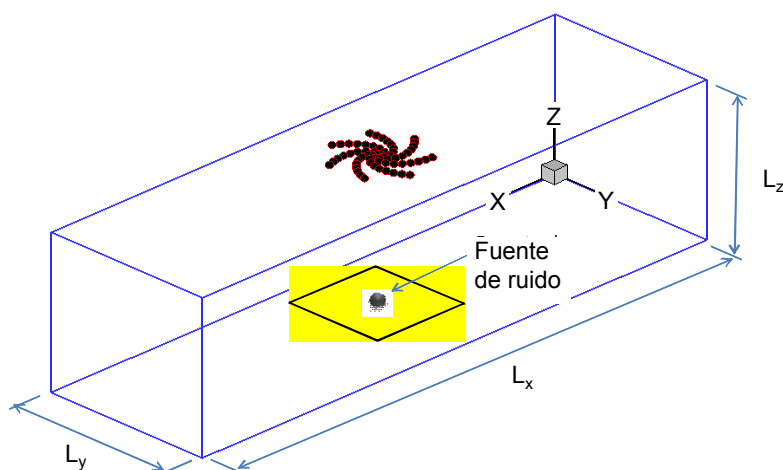


Figura 2: Planta Industrial modelada como un cuarto rectangular. Ruido generado por el arreglo de máquinas modelado como un monopolo

### 2.2 Características del modelo numérico

El modelo se basa en el análisis de la energía estática en un cuarto acústico que es válido para frecuencias por arriba de la frecuencia de "cross-over" [7]. La frecuencia de cross-over para una planta industrial típica es normalmente muy baja (menor a 100 Hz). El modelo es capaz de predecir el campo de sonido medido por el arreglo de micrófonos debido a las fuentes de ruido presentes en el cuarto (máquinas). Dichas máquinas son modeladas como un monopolo, es decir, la radiación es omnidireccional. Así, la característica acústica de la máquina es definida únicamente por el contenido espectral de su potencia acústica.

El modelo calcula independientemente las contribuciones del (i) campo de ruido directo y (ii) del campo de ruido reverberante.

- i. El campo directo es el sonido emitido por la máquina que se propaga hasta que la primera reflexión ocurre. Luego de esto, el ruido es considerado como parte del campo reverberante. Por lo tanto, el campo de ruido directo puede ser fácilmente calculado asumiendo una máquina en un campo libre. Es decir, asumiendo que el cuarto no tiene paredes. El campo de ruido directo contiene información vital para el arreglo de micrófonos en términos de magnitud y fase.

- ii. Por otro lado, el campo de reverberación se asume que no está correlacionado al campo directo debido al efecto de reflexión/scattering. Además el campo de reverberación no tiene correlación espacial y es básicamente uniforme. Así, el campo de ruido reverberante se comporta como un ruido de fondo contaminando el campo directo y no proveyendo ninguna información relevante para el arreglo de micrófonos.

### 2.3 Funcionalidades del código

El modelo numérico fue implementado en FORTRAN 95. Se programó en forma modular, lo que permitirá su fácil adaptación a futuras mejoras. A continuación se describen las principales funcionalidades del modelo.

#### 2.3.1 Imágenes acústicas

Los algoritmos para obtener las imágenes acústicas están basados en el método convencional de retardo y suma de señales de micrófonos en el dominio de la frecuencia. En el código se implementaron dos algoritmos:

- i) Usando únicamente la información de la fase en el cálculo del vector de dirección (steering vector).
- ii) Usando únicamente la información de la fase en el cálculo del vector de dirección en conjunto con la remoción de la diagonal de la matriz de covarianza (cross spectral matrix). Este método es recomendado para ambientes con altos niveles de contaminación de ruido como el caso en estudio.

La imagen acústica es calculada sobre una grilla de puntos. El código permite definir arbitrariamente la posición y dimensiones de la grilla.

#### 2.3.2 Integración sobre la grilla

Sobre cada grilla definida, se realiza el cálculo de la integración de la imagen acústica como una estimación del contenido espectral de la potencia acústica de la fuente de ruido dentro de la grilla de escaneo.

## 3 ESTUDIO PARAMÉTRICO

El estudio paramétrico se realiza sobre una planta industrial de dimensiones 30x30x100 metros. En todos los casos el arreglo de micrófonos es posicionado en el centro del cuarto, soportado desde el techo. Dos tipos de arreglos de micrófonos fueron utilizados para el desarrollo de las simulaciones, espiral de 63 micrófonos y espiral de 117 micrófonos, los cuales se muestran en la Figura 3.

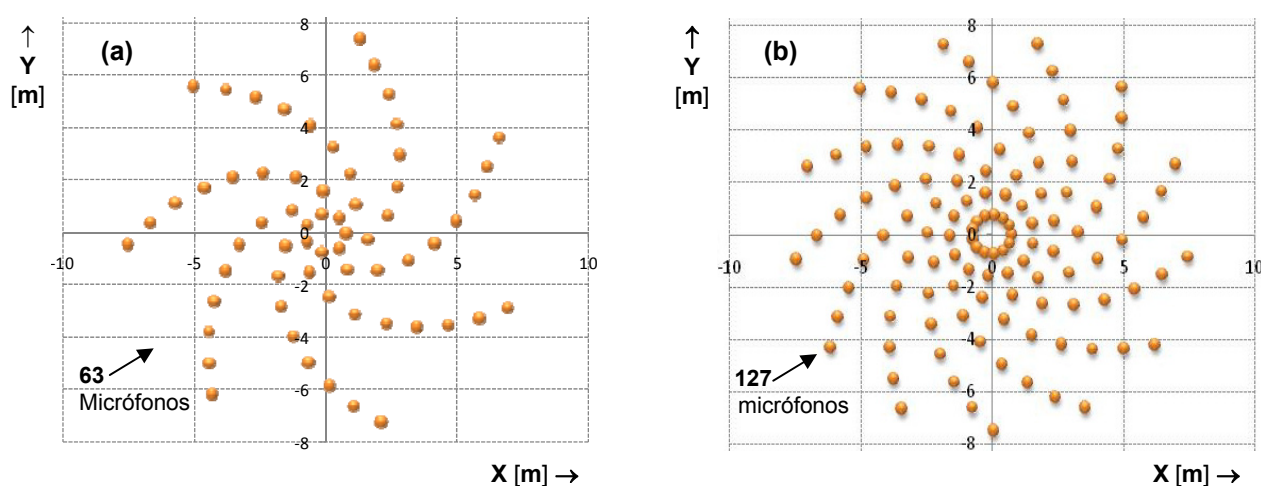


Figura 3: Arreglo de micrófonos en espiral utilizados para la simulación (a) 63 microfonos y (b) 127 micrófonos

El ambiente acústico reverberante de la planta se investiga considerando 5 valores del coeficiente de absorción promedio del cuarto  $\alpha$ . La Tabla 1 lista los coeficientes de absorción investigados. Los valores bajos de 0,033 indican un cuarto altamente reverberante que conlleva a un ruido de fondo significativo. El valor 1 indica una planta "perfecta" sin ninguna reverberación (similar a una cámara anecoica) y por lo tanto sin ruido de fondo. Los casos con un coeficiente de absorción de 0,05, 0,1 y 0,2 son probablemente los coeficientes típicos de plantas industriales.

Tabla 1: Valores del coeficiente de absorción promedio del cuarto investigados

Caso	Coeficiente de absorción promedio del cuarto: $\alpha$	Comentarios
1	0,033	Ambiente extremadamente reverberante.
2	0,05	Rango esperado de coeficientes de absorción para una planta industrial típica sin tratamiento sonoro.
3	0,1	
4	0,2	
5	1	Situación "ideal" donde no hay reverberación y por lo tanto, ningún ruido de fondo contaminando las señales de los micrófonos.

A los fines de analizar el efecto de estos coeficientes de absorción, se realizaron simulaciones con una sola fuente localizada en el centro del cuarto. En cada caso se calculó el cociente entre la señal y el ruido de fondo para cada una de las frecuencias. En la Figura 4, se muestra una vista superior y lateral de una imagen acústica típica obtenida a 1100 Hz para un  $\alpha = 1$ . En la vista lateral se puede observar la relación señal-ruido de 9,5 dB.

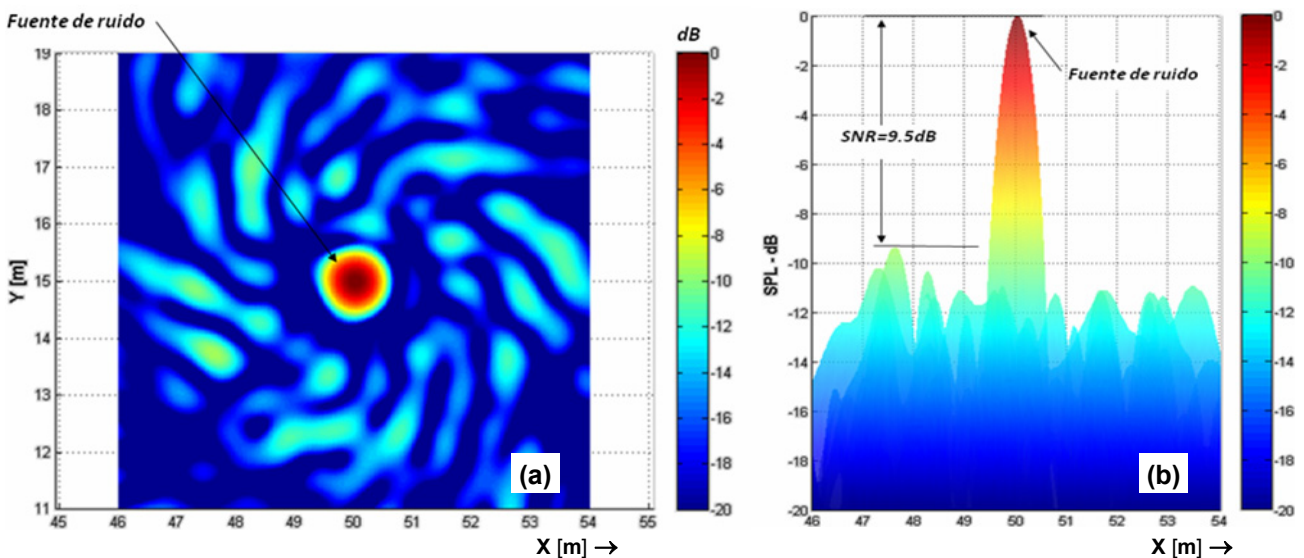


Figura 4: Imagen acústica calculada para una única fuente de ruido en el cuarto usando el arreglo de 63 micrófonos a 1100 Hz – (Sin reflexión  $\alpha = 1$ ). (a) Vista Superior y (b) Vista lateral

### 3.1 Efecto del tamaño de la grilla

A los fines de interpretar el efecto que puede tener el tamaño de la grilla sobre la relación señal-ruido, se realizaron simulaciones con el arreglo de micrófonos 63 micrófonos con un coeficiente de absorción promedio del cuarto  $\alpha = 1$ , para 3 tamaños de grilla diferentes (8x8 metros, 15x15 metros y 30x30 metros).

En la Figura 5 se muestra una secuencia de imágenes acústicas para diferentes frecuencias. Para cada frecuencia se consideran 3 tamaños de grillas diferentes. Como es de esperar, para un mismo arreglo de micrófonos, a medida que la frecuencia aumenta, los lóbulos no asociados a la fuente de ruido (o sidelobes) tienden a moverse hacia el centro del arreglo de micrófonos. Esto hace que el espacio circundante a la

fuente, a bajas frecuencias, se encuentre menos contaminado por el ruido de fondo y por ende mejore la relación señal-ruido para un mismo tamaño de grilla.

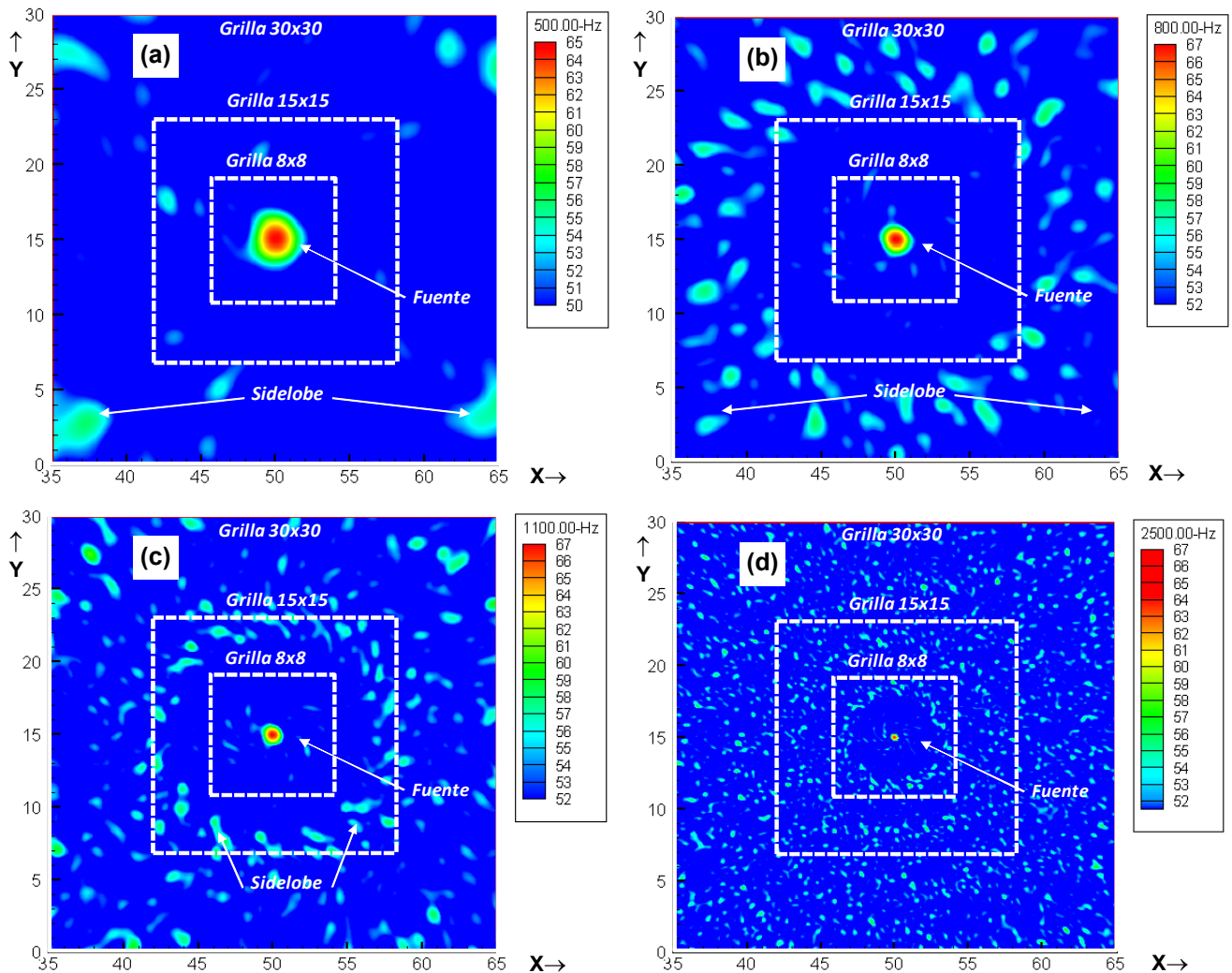


Figura 5: Secuencia de imágenes acústicas para diferentes frecuencias para observar el comportamiento de los Sidelobes. (a) 500Hz, (b) 800Hz, (c) 1100Hz y (d) 2500Hz.

Las relaciones señal-ruido obtenidas en la Figura 5, son representados en función de la frecuencia en la Figura 6. Como se comentó anteriormente, en las frecuencias por debajo de los 2000 Hz, se produce una discrepancia entre la relación señal-ruido obtenida para cada grilla.

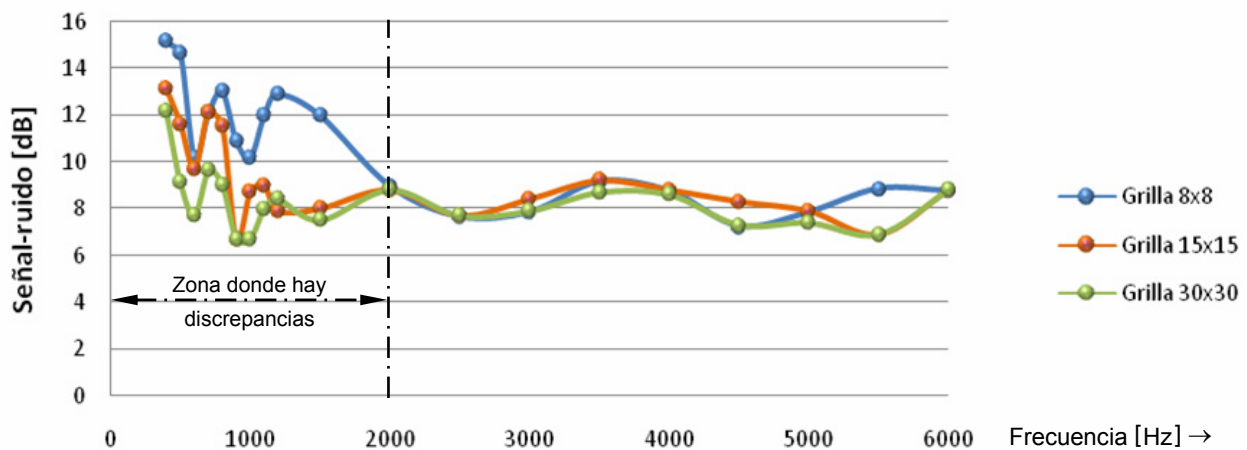


Figura 6: Variación de la relación señal-ruido en función de la frecuencia para un arreglo de 63 micrófonos en espiral

Debido a que dentro de una planta coexisten varias máquinas, el ruido de las mismas se contamina mutuamente en un ambiente altamente reverberante, haciendo que los sidelobes de otras máquinas aparezcan en las inmediaciones de la máquina observada. Por tal motivo y a los fines de estudiar el efecto del coeficiente de absorción en todo el rango de frecuencia con una única fuente y que sea representativa de un entorno con varias fuentes, las simulaciones se realizaron sobre una grilla de 30x30metros para incluir el efecto de los principales sidelobes.

### 3.2 Efecto de la reverberación – Coeficiente de absorción

Se realizaron simulaciones para diferentes valores del coeficiente de absorción, sobre un cuarto rectangular con una única fuente de ruido. Los resultados fueron obtenidos con el arreglo de 63 micrófonos, usando el algoritmo convencional para obtener mapas acústicos, sin la remoción de la diagonal de la matriz de covarianza y teniendo en cuenta la reflexión de las paredes. En la Figura 7 se grafica la relación señal-ruido en función de la frecuencia, para 4 valores diferentes del coeficiente de absorción del sonido.

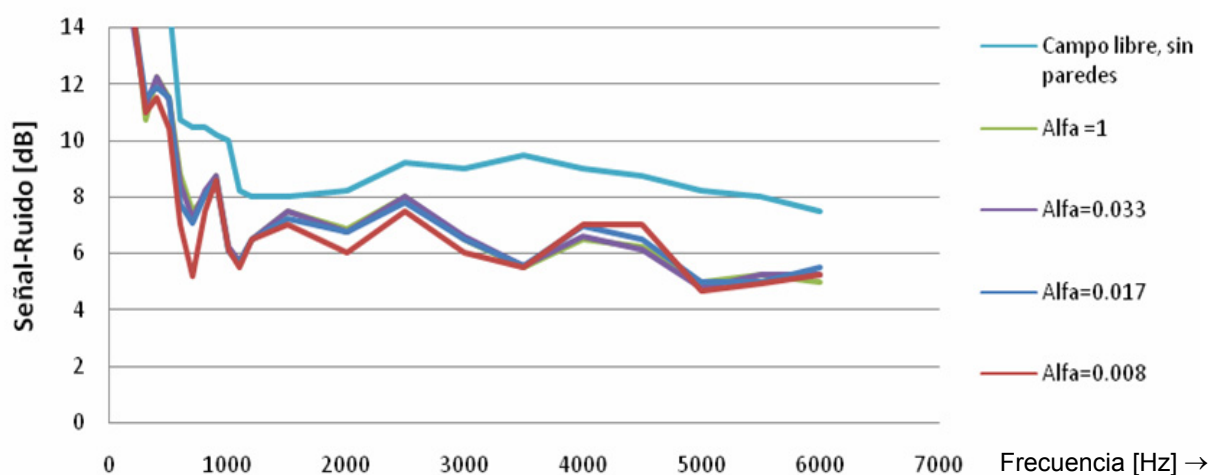


Figura 7: Variación de la relación señal-ruido en función de la frecuencia

En cada una de las respuestas para diferentes  $\alpha$  se observa una componente modulada similar. Comparando los casos límites del coeficiente de absorción (1 y 0,008), se observa que para ciertas frecuencias, se produce una reducción en la relación señal-ruido hasta 1dB a 2000 Hz. Esta variación, demuestra la alta influencia del coeficiente  $\alpha$  en la performance del arreglo de micrófonos. Por otro lado, se observa que para ciertas frecuencias, la relación señal-ruido tiende a aumentar, por ejemplo a 4500 Hz se observa un incremento de 0,8 dB.

La Figura 8 muestra los mapas acústicos correspondientes a las frecuencias de 2000 y 4500 Hz, para los dos valores límites de  $\alpha$  (1 y 0,008). Los resultados muestran un incremento en el número de lóbulos contaminantes como así también el efecto del incremento de la reverberación. Para el caso particular de 4500 Hz, se observa un incremento en el número de lóbulos contaminantes, resultando sin embargo en una reducción de sus amplitudes.

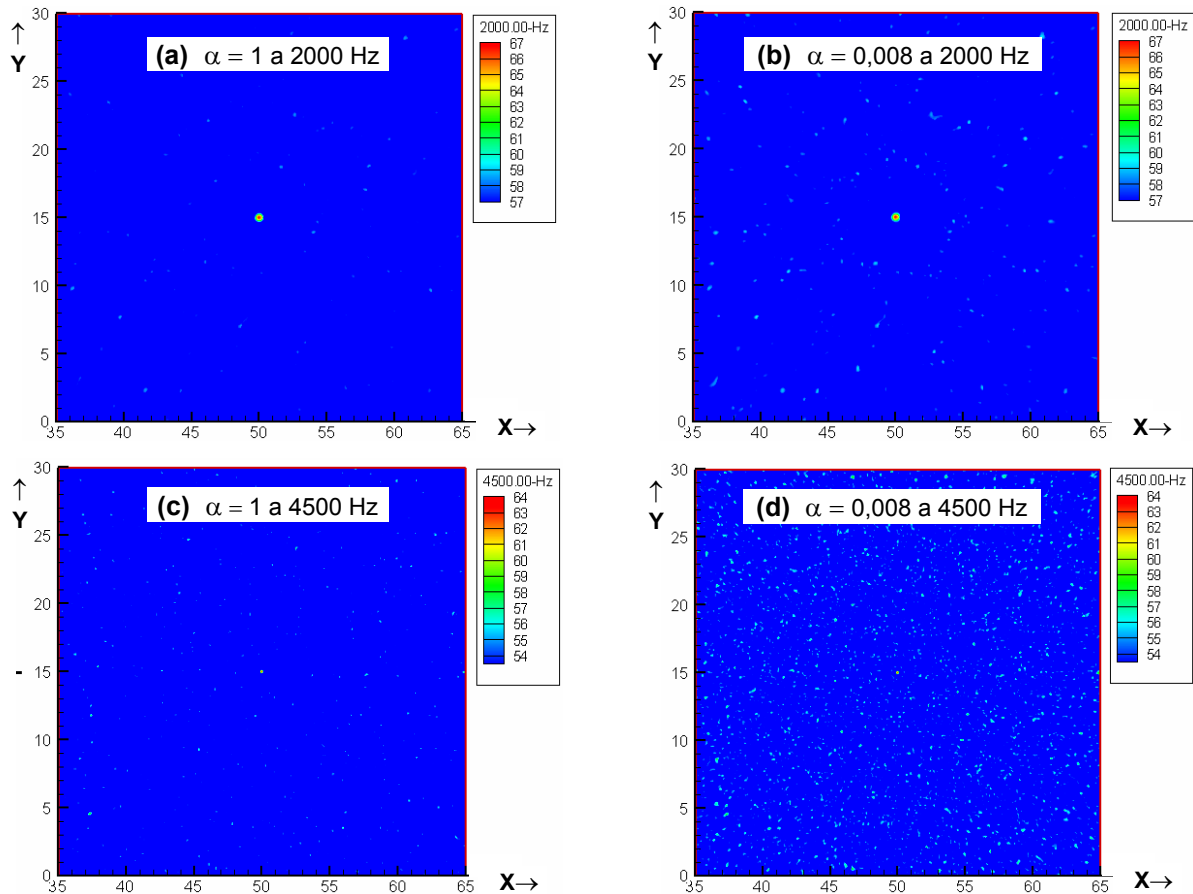


Figura 8: Imágenes acústicas a 2000 y 4500 Hz, para diferentes coeficientes promedio de absorción del sonido del cuarto

### 3.3 Efecto del incremento en el número de micrófonos

A los fines de contrarrestar la reducción de la señal-ruido para ciertas frecuencias, una posibilidad es incrementar el número de micrófonos en el arreglo con el consecuente incremento en el costo y la complejidad del sistema. A los fines de cuantificar la cantidad de micrófonos adicionales necesarios para contrarrestar la disminución de la relación señal-ruido debido al efecto del coeficiente de absorción (aprox. 1 dB), en la Figura 9 se comparan los resultados de una simulación realizada con un arreglo espiral de 63 y 117 micrófonos, en un cuarto con un coeficiente de absorción promedio de 0,008. Como se observa, la relación señal-ruido en promedio se incrementó aprox. 2,5 dB al pasar de un arreglo de 63 a uno de 117 micrófonos. El incremento en la relación señal-ruido se puede obtener fácilmente con la siguiente expresión que relaciona el número de micrófonos [8]:

$$\Delta \text{SNR} = 10 \log_{10} (63/117)$$

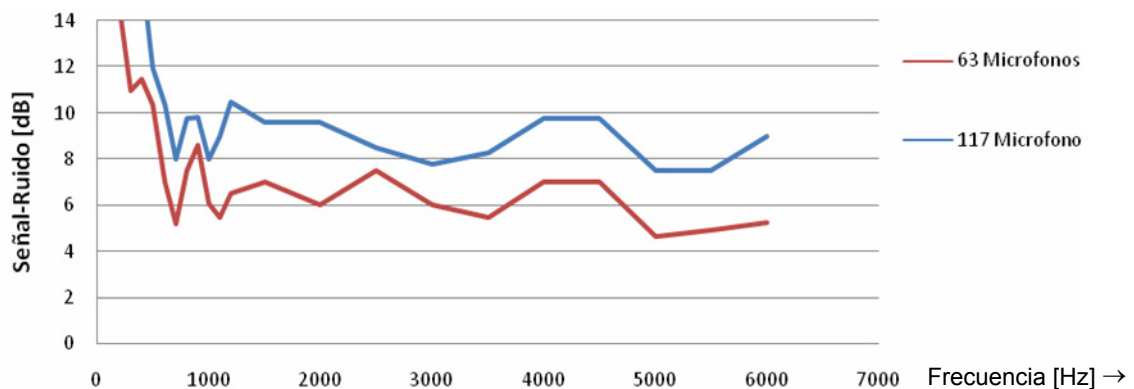


Figura 9: Comparación de resultados usando 63 y 117 micrófonos

### 3.4 Efecto de la eliminación de la diagonal de la matriz de covarianza

Otra alternativa para reducir el efecto de las fuentes de ruido contaminantes asociados a reverberaciones es la remoción de la diagonal de la matriz de covarianza antes de realizar el cálculo del mapa acústico. Para determinar el beneficio de esta alternativa, la Figura 10 muestra la reducción del efecto de la reverberación sobre el mapa acústico por medio de la remoción de la diagonal.

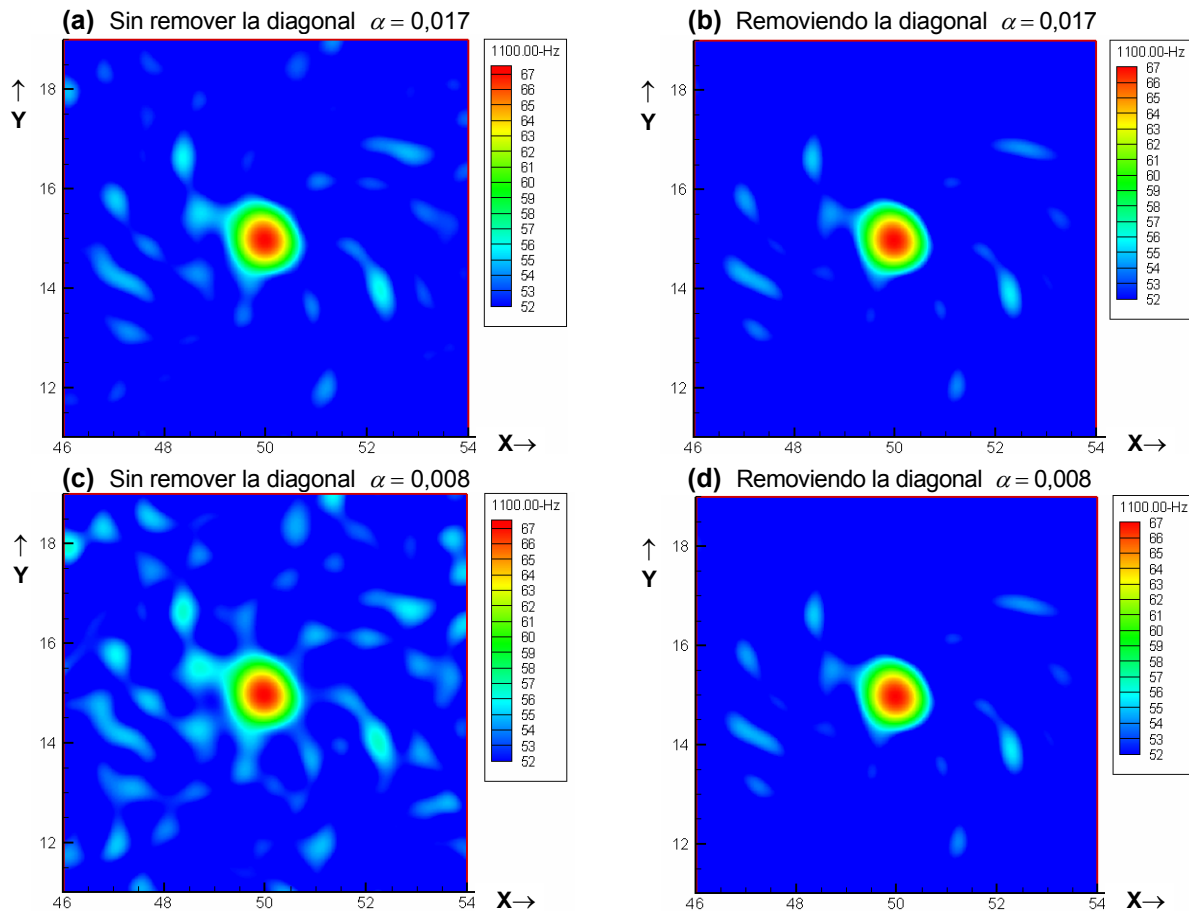


Figura 10: Efecto de remover la diagonal de la matriz "Cross Spectral" para reducir el efecto del ruido sobre la imagen acústica

Se realizó una simulación con un arreglo de 63 micrófonos en forma de espiral, con un  $\alpha = 0,008$  y se aplicó la técnica de remoción de la diagonal. Los resultados muestran que se obtiene una mejora promedio de aprox. 1dB. En ambientes donde los niveles de ruido contaminante son más altos que la fuente que se desea medir, la mejora en términos de señal-ruido en los mapas debido a la implementación de esta técnica es aun más notoria, llegando en ciertos casos a ser imprescindible. En la Figura 11, se comparan los resultados obtenidos.

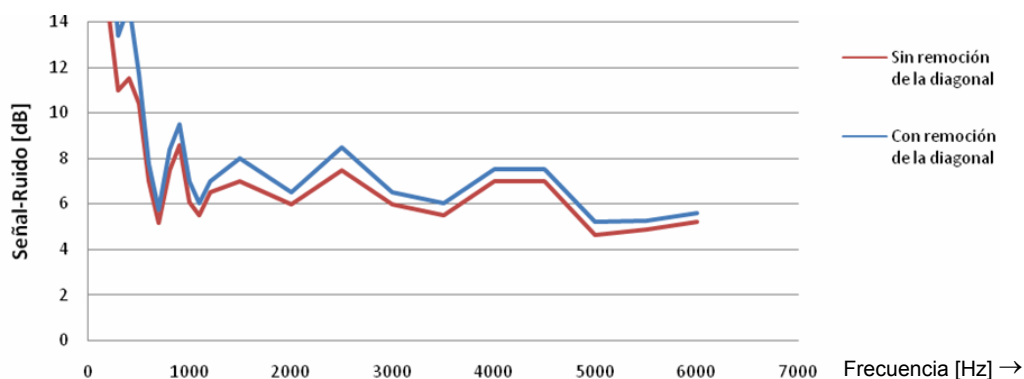


Figura 11: Efecto de remover la diagonal de la matriz "Cross Spectral"

#### 4 CONCLUSIONES

Se desarrolló un código que permite simular el campo de ruido directo y del reverberante en forma independiente. El campo de ruido directo es calculado asumiendo una fuente en un campo libre, por ejemplo no considerando ningún borde. El campo de reverberación se considera no correlacionado al campo directo debido al efecto de reflexión/scattering. Asimismo, se asume que el campo de reverberación tampoco tiene correlación espacial y es básicamente uniforme. Así, el campo de ruido reverberante se comporta como un ruido de fondo contaminando el campo directo y no proveyendo ninguna información relevante para el arreglo de micrófonos.

Por medio de las simulaciones, se demostró que el coeficiente de absorción promedio del cuarto, influye en la performance de un arreglo de micrófonos. El método de filtrado por medio de la remoción de la diagonal de la matriz de covarianza, elimina eficazmente los ruidos contaminantes.

#### 5 REFERENCIAS

- [1] T.F. Brooks, M.A. Marcolini and D.S. Pope, A Directional Array Approach for the Measurement of Rotor Noise Source Distributions with Controlled Spatial Resolution, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 112, Number 1, pp. 192-197, 1987.
- [2] F.R. Grosche, G. Schneider and H. Stiewitt, Wind Tunnel Experiments on Airframe Noise Sources of Transport Aircraft, *3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Atlanta, GA, AIAA-97-1642-CP, 1997.
- [3] W.H. Herkes and R.W. Stoker, Wind Tunnel Measurements of the Airframe Noise of a High-speed Civil Transport, *36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, January 1998. AIAA 98-0472, 1998.
- [4] M. Mosher, Phased Arrays for Aeroacoustic Testing: Theoretical Development, *2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, State College, PA, AIAA 1996-1713. 1996.
- [5] P. Sijtsma and H. Holthusen, Source Location by Phased Array Measurements in Closed Wind Tunnel Test Sections, *5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Bellevue, WA, AIAA 99-1814, 1999.
- [6] P.A. Ravetta, J. Muract and R.A. Burdisso. Feasibility Study of Microphone Phased Array Based Machinery Health Monitoring, *Mecánica Computacional*, Vol. 26, pp. 23-36 (ISSN 1666-6070), 2007.
- [7] D.A. Bies and C.H. Hansen, *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, 3rd edition, Spon Press, 1986.
- [8] T. Mueller (ed.), *Aeroacoustic Measurements*, Springer, ISBN 3-540-41757-5, 2002.