

## TÉCNICAS AVANZADAS PARA LA DETECCIÓN DE FUENTES SONORAS

Ronald J. O'Brien<sup>a</sup>, Leonardo Molisani<sup>a</sup> y Ricardo Burdissio<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Acústica y Vibraciones (GAV), Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nac. N° 36 Km 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, e-mail: robrien@ing.unrc.edu.ar, lmolisani@ing.unrc.edu.ar.

<sup>b</sup>Vibration and Acoustics Laboratories, 153 Durhan Hall, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 24061-0238, USA, rburdiss@vt.edu, <http://www.val.me.vt.edu>

**Palabras Claves:** Beamforming, Robust Adaptive Beamforming, MUSIC, Delay and Sum, Cepstrum.

### Resumen.

En la actualidad existen diferentes tipos de técnicas para cuantificar y detectar la posición de una fuente sonora. Las técnicas modernas más utilizadas son las imágenes acústicas, éstas se obtienen mediante el proceso de datos adquiridos por un arreglo de micrófonos localizado a una distancia relativa del aparato emisor de ruido.

En cuanto a los tipos de post procesos, “Beamforming” (BF) es uno de los más utilizados pero desafortunadamente presenta poca capacidad de distinguir la localización de dos fuentes de ruido emitiendo a baja frecuencia. Para superar esta desventaja, en este esfuerzo se investigaron diferentes técnicas. En primera instancia, se implementó “Robust Adaptive Beamforming” (RABF), en el cual se utiliza la información recolectada mediante los micrófonos para eliminar ruido blanco en la imagen acústica y evitar fuentes espurias en el mapa de ruido. Luego, se utiliza un método de alta resolución como es el caso de “Multiple Signal Clasification” (MUSIC). En este método como desventaja, se puede señalar, que falla con señales altamente correlacionadas y cuando la relación señal - ruido es baja. Estas técnicas se utilizan en el dominio de la frecuencia.

Por último, se utilizó “Delay and Sum” (DS), el cual en comparación con los métodos anteriores, se realiza en el dominio del tiempo, lo que permite tener mayor resolución temporal de los mapas de ruido. Se presenta como desventaja, que para señales con bajo contenido señal-ruido (SNR) la reconstrucción del mapa de ruido no permite ubicar con exactitud las fuentes de ruido. Para superar este inconveniente, el método se utiliza en el dominio de la frecuencia.

En este trabajo se propone utilizar la transformada Cepstrum para mejorar la formación del mapa de ruido. Esta nueva técnica de “Delay and Sum – Cepstrum” permitirá eliminar ecos de la señal y detectar periodicidad en el espectro para mejorar la relación SNR y así optimizar los mapas de ruidos para ser utilizados en aplicaciones tecnológicas.

## 1 INTRODUCTION

La emisión de ruido por parte de un cuerpo de geometría compleja lo constituye el aporte de diferentes fuentes que lo componen. Para ello, es necesario determinar la contribución y ubicación de los principales radiadores acústicos del cuerpo. La metodología propuesta para la localización de las diferentes fuentes de emisión de ruido es a través de imágenes acústicas. Éstas nos brindan información sobre el nivel de presión sonora en cada frecuencia o intervalo de tiempo de interés.

Los métodos de las imágenes acústicas se basan en la adquisición de datos por medio de un arreglo de sensores de presión llamado antena. Mediante los resultados adquiridos y un post proceso adecuado de los mismos es posible crear una “fotografía acústica”. Ésta permite observar la posición, frecuencia y magnitud de las fuentes sonoras de un cuerpo de geometría complejo (Christensen, 2004; Ravetta 2005).

Una de las posibles aplicaciones de este tipo de tecnología puede ser la detección de fallas en maquinaria asociando los diferentes mapas de ruido a posibles fallas. En este aspecto, se han realizado diferentes implementaciones de imágenes acústicas. En el año 2001, Hood et al. (2001) utilizaron un arreglo de micrófonos lineal para encontrar fallas en ruedas dentadas. Luego, Ravetta et al. (2007) a través de simulaciones estudiaron las capacidades de instalar un arreglo de micrófonos en el techo de una fábrica para realizar el mantenimiento predictivo de las maquinarias. Camargo et. al. (2009) realizaron una comparación de tres métodos de imágenes acústicas para la detección de fuentes sonoras a baja frecuencia. Otra aplicación reciente de imágenes acústicas, es en la detección de pérdidas en circuitos neumáticos (Eret et. al. 2012), en donde se comparó la técnica de beamforming en el dominio del tiempo y frecuencia.

En referencia a los algoritmos de post procesamiento de imágenes acústicas, “beamforming” es el más utilizado para la formación de mapas de ruido pero presenta dificultades en cuanto a su resolución para distinguir dos fuentes de ruido a baja frecuencia. Una alternativa a este inconveniente es aumentar el tamaño del arreglo de micrófonos (Eret et. al. 2012; Camargo et. al. 2009) o trabajar con algoritmos alternativos que permitan aumentar la resolución para distinguir dos fuentes cercanas de ruido y disminuir los lóbulos laterales o fuentes fantasmas.

Con el paso de los años, se fueron encontrando variantes para mejorar sus capacidades. Las técnicas de deconvolución son las más utilizadas en el caso de fuentes aeroacústicas como por ejemplo, DAMAS (Brooks, 2004), DAMAS2 (Dougherty, 2005), LORE (Ravetta, 2006), CLEAN-SC (Sijtsma, 2007) y TIDY (Dougherty, 2009), etc. Una desventaja de estos métodos es el insumo de tiempo computacional para realizar el pos proceso. Para poder superar este inconveniente, se comenzaron a probar métodos de “adaptive beamforming”, para lo cual utilizan los datos captados por los micrófonos para mejorar el “steering vector” o vector dirección. En el año 1987, Cox et. al. (1987) desarrolló el algoritmo “robust adaptive beamforming”, que permite reducir el ruido blanco no correlacionado en el mapa de ruido. En el año 2012, Huang et al. (2012) compararon esta técnica con el método DAMAS en mediciones aeroacústicas reduciendo así un 60 % el costo computacional. Una técnica utilizada en el campo de las telecomunicaciones es MUSIC, la cual también es aplicada en la localización de fuentes sonoras (Schmidt et. al. 1986; Ito et. al. 2010; Lo et. al. 2004). En el año 2011, Avarvand et al. (2011) la utilizaron para realizar imágenes acústicas y aumentar su robustez. Su ventaja reside en la capacidad de detectar fuentes sonoras a bajas frecuencias con mejor resolución que beamforming pero presenta inconvenientes en casos donde la cantidad de fuentes de ruido es cercano a la cantidad de micrófonos y cuando la relación SNR de la señal es baja.

En este trabajo se implementaron las técnicas de “beamforming”, “robust adaptive beamforming”, “MUSIC”, “delay and sum” y “delay and sum - cepstrum”. Para evaluar estos algoritmos se utilizó un sistema de adquisición de datos y un arreglo optimizado de 35 sensores de presión (O’Brien et al. 2011). Una vez obtenidos los datos, se realizaron diferentes post procesos mediante técnicas aplicadas a la formación de imágenes acústicas, las cuales fueron implementadas en un software propio. Para poder comparar los diferentes métodos se utilizó un banco de ensayos de bomba de engranajes para evaluar diferentes mapas de ruido.

## 2 OPTIMIZACIÓN DE ANTENAS ACÚSTICAS.

La antena acústica está constituida por un arreglo espacial de sensores de presión, en la cual la distribución fue optimizada y constatada experimentalmente. La misma, afecta al rango dinámico de la antena y se manifiesta a través del Máximo Lóbulo Lateral (MLL). Para optimizar dicho parámetro se utilizaron algoritmos genéticos, para mayor detalles consultar (O’Brien et al. 2011).

En una primera instancia, se hicieron pruebas con 16 canales de adquisición realizando ensayos experimentales y simulaciones para evaluar el comportamiento de la optimización. En un segundo caso, se efectuó con 35 sensores de presión (Figura 1(a)), privilegiando aumentar su rango dinámico, su fácil construcción y transportabilidad. En la Figura 1(b) se observa el aumento en el rango dinámico y la disminución del parámetro MLL comparado con otro arreglo de micrófonos tomados como referencia.

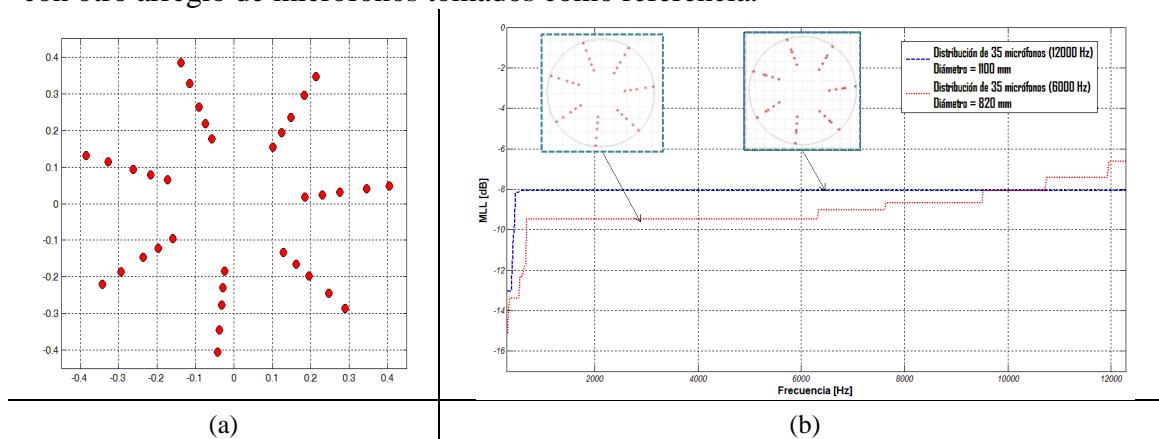


Figura 1: (a) Sistema optimizado de 35 sensores de presión, (b) comparación de una distribución optimizada (rojo) vs distribución de micrófonos no optimizada (azul).

Una vez obtenida la distribución de sensores optimizada se realizó la construcción de la antena. En la Figura 2 se muestra el sistema de adquisición y la antena de micrófonos desarrollados. Los sensores de presión utilizados son de bajo costo comparados con los que actualmente se utilizan para este tipo de sistemas. El diámetro de la antena es de 800 mm y se utiliza en un rango de frecuencias de 500 a 12000 Hz.



Figura 2: Sistema de adquisición y antena de micrófonos (hardware).

### 3 POST PROCESO DE DATOS.

En la literatura existen diferentes algoritmos para la detección de fuentes de ruido. Entre los más conocidos se encuentran el método “Beamforming” (BF) y “Near field Acoustic Holography” (NAH). La primera, se utiliza extensamente en la detección de fuentes de ruido aeroacústicas, ya que tiene una buena resolución a las frecuencias requeridas y el tamaño de la antena es relativamente pequeño en comparación con la zona a evaluar. La segunda, se aplica a la detección de fuentes vibroacústicas, ya que “Beamforming” no puede diferenciar fuentes a bajas frecuencias. Una desventaja, es que el tamaño de la antena de micrófonos debe ser mayor que la zona donde se necesita reconstruir el mapa de ruido (O’Brien et al. 2012).

En el caso de “Beamforming”, para poder aprovechar las ventajas y extender su uso a fuentes de baja frecuencia se investigaron diferentes métodos. En el caso de las fuentes aeroacústicas los más utilizados son los de deconvolución, pero la desventaja reside en el esfuerzo computacional que implica. Otra alternativa, es “Robust Adaptive Beamforming” (RABF), en el cual utiliza la información recolectada mediante los micrófonos para poder eliminar el ruido blanco en la imagen acústica.

Una variante a lo expuesto es el método “Multiple Signal Classification” (MUSIC). El mismo, separa el subespacio de la señal con respecto del ruido de la matriz espectral cruzada (CSM). En el subespacio de la señal se encuentra el vector dirección o “steering vector”, por lo tanto, el producto entre la matriz espectral cruzada del ruido y el vector dirección serán cero en el lugar donde se encuentre la fuente de ruido, ya que estos espacios son ortonormales. Como desventaja se puede señalar la falla con señales altamente correlacionadas y cuando la relación señal - ruido es baja.

Los métodos expuestos trabajan en el dominio de la frecuencia. Utilizan la estructura de la matriz espectral cruzada para desarrollar métodos alternativos que mejoran la resolución del mapa de ruido pero como desventaja generalmente limitan el análisis a un ancho de banda angosto. Una alternativa simple para superar este inconveniente es “Delay & Sum” (DS), este método trabaja en el dominio temporal. DS es más general que las técnicas en el dominio de la frecuencia ya que es de banda ancha y se adapta muy bien para el caso de fuentes no estacionarias (Daugherty et al. 2011). Adicionalmente, se propone la técnica de “delay and sum - cepstrum” la cual realiza un pre proceso a los datos utilizando la transformada

cepstrum. Esto permite mejorar el mapa de ruido en situaciones donde se desee eliminar familia de armónicas o deconvolucionar la señal.

Para poder comparar las técnicas mencionadas se implementaron en un software de desarrollo propio (Figura 3), en el cual se ubica el mapa sonoro. En este caso, se analiza la posición de las fuentes de ruido aeroacústicas emitidas por un ventilador.

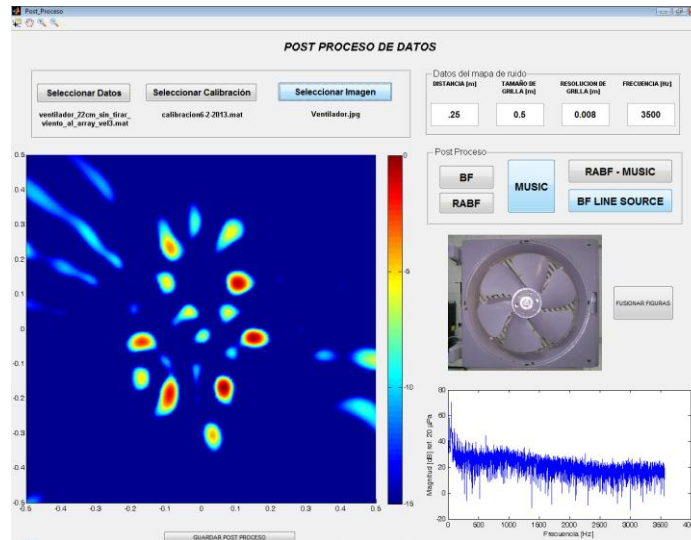


Figura 3: Sistema de detección de fuentes sonora en funcionamiento (software).

### 3.1 “Beamforming” (BF)

El objetivo es calcular la presión acústica en un punto  $n$  de la grilla, esto se logra conociendo la ubicación de los micrófonos y la del punto  $n$  a considerar.

En campo libre las fuentes monopolo se comportan de acuerdo a las funciones de Green (Ec. (1)), estas se utilizan para formar el vector de propagación

$$C_m(x_n) = \frac{e^{-ikr_m}}{4\pi r_m} \tag{1}$$

En la cual  $r_m$  es la distancia Euclidea desde el micrófono  $m$  hasta el punto de la grilla  $n$ . Para maximizar la salida del Beamforming, el vector de propagación es elegido paralelo al vector dirección.

$$\vec{w} = \frac{\vec{c}}{\|\vec{c}\|} \tag{2}$$

La salida del Beamforming del arreglo de micrófonos.

$$B_n(r, f) = \frac{w_n^\dagger \text{CSM } w_n}{M^2} \quad \text{con } \dagger: \text{Hermitiano} \tag{3}$$

Donde CSM representa la matriz espectral cruzada (“Cross Spectral Matrix”). La matriz espectral cruzada contiene los aportes de cada uno de los micrófonos en el dominio de la frecuencia. La matriz se define de la siguiente manera

$$\text{CSM}_{ij} = \frac{p_i(f)p_j^*(f)}{2} \tag{4}$$

$$CSM_{ii} = \frac{p_i(f)p_i^*(f)}{2} \quad (5)$$

La matriz dada por la Ec. (5) contiene el auto espectro de las señales y la Ec. (4) contiene el espectro cruzado fuera de la diagonal principal. Luego, cada punto de la grilla es evaluado con la Ec. (3), si en el punto se encuentra la fuente sonora, las señales de los micrófonos funcionan aditivamente, en cambio si no se encuentra la fuente en ese punto las señales se suman destructivamente.

Este proceso se repite para distintos planos en el espacio tridimensional y para las líneas espectrales del rango de frecuencias de interés. De esa forma se obtienen una lista de valores que al graficarlos nos permiten observar el mapa de ruido de la zona en unidades de energía. Y cuantitativamente los puntos de emisión de ruido son ubicados y caracterizados. Para mayor detalle de la técnica consultar [Ravetta et al. \(2004\)](#).

### 3.2 “Robust Adaptive Beamforming” (RABF)

El objetivo de las técnicas de beamforming adaptativo es la de extraer la señal de interés minimizando los lóbulos laterales y el ruido blanco.

$$\begin{aligned} SINR &\equiv \frac{\sigma^2 |\vec{d}^\dagger \vec{c}|}{\vec{d}^\dagger CSM \vec{d}} \\ \min_{\vec{d}} (\vec{d}^\dagger CSM \vec{d}) & \quad \vec{d}^\dagger \vec{c} = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

La solución a este problema de minimización es cerrada. Luego,

$$\vec{d}^\dagger = \frac{CSM^{-1} \vec{c}}{\vec{c}^\dagger CSM^{-1} \vec{c}} \quad (7)$$

Esta técnica se la conoce como “Capon Beamforming”. La desventaja que presenta es su sensibilidad a pequeños errores en ruido no correlacionado o ruido blanco. Para superar este inconveniente y darle robustez al método se le agrega un valor de ruido blanco artificial a la diagonal de la CSM, esto es una forma de regularizar el método mediante una penalización cuadrática en la función objetivo ([Li et.al. 2006](#)).

$$\min_{\vec{d}} (\vec{d}^\dagger [CSM + \gamma I] \vec{d}) \quad \vec{d}^\dagger \vec{c} = 1 \quad (8)$$

Esto fuerza a reducir a reducir más el ruido blanco que las interferencias.

$$\vec{d}^\dagger = \frac{[CSM + \gamma I]^{-1} \vec{c}}{\vec{c}^\dagger [CSM + \gamma I]^{-1} \vec{c}} \quad (9)$$

Donde  $\gamma$  es un valor elegido por el usuario. Esta mejora en el método se denomina “Diagonal Loading Capon Beamforming”.

### 3.3 “Multiple Signal Classification” (MUSIC)

El algoritmo MUSIC es un método de subespacios, este utiliza las propiedades de la CSM para aumentar la capacidad de distinguir dos fuentes de ruido muy cercanas ([Van Trees, 2002](#)). El objetivo es separar la CSM en subespacios a través de una descomposición por autovectores.

$$CSM v = v \Lambda \quad (10)$$

Donde  $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_0 \quad \lambda_1 \cdots \lambda_{M-1}\}$  son los autovalores y  $\lambda_0 > \lambda_1 > \cdots > \lambda_{M-1}$  corresponden a los autovectores de

$$v = [q_0 \quad q_1 \cdots q_{M-1}] \quad (11)$$



Luego, se puede separar la CSM en el subespacio del ruido y el subespacio de la señal+ruido para obtener una localización más precisa de la fuente sonora. El método se basa en que el vector dirección está muy cerca de los autovectores de la CSM, de hecho, cuando la CSM no contiene ruido y solo una fuente sonora llega al arreglo de micrófonos el vector dirección es el autovector de la CSM.

Por lo tanto si al arreglo llegan  $D$  fuentes sonoras existirán  $D$  autovectores en el subespacio señal+ruido y  $M - D$  correspondientes al subespacio del ruido. De esta forma, mediante los autovectores de ruido se puede formar una nueva  $CSM_R$ .

$$CSM_R = \sum_{i=1}^{M-D} v_i v_i^\dagger \quad (12)$$

Como el subespacio de las señales es ortonormal al del ruido el producto será nulo en la ubicación de la fuente sonora. Por lo tanto MUSIC se define,

$$b_{MUSIC}(r, f) = \frac{1}{\vec{c}^\dagger CSM_R \vec{c}} \quad (13)$$

Debido a que el producto será muy cerca de cero cuando se encuentre la fuente sonora se utiliza la inversa para que se manifieste un pico en el mapa de ruido al momento de realizar la gráfica. Esto se puede realizar ya que  $CSM$  es definida positiva por lo tanto su inversa tendrá los mismos autovectores.

La desventaja de este método es que requiere un arreglo de sensores muy preciso y calibrado como también información sobre la cantidad de fuentes que están incidiendo sobre la antena.

### 3.4 “Delay & Sum” (DS)

Por último se describirá la técnica de “Beamforming” en el dominio temporal la cual se denomina “Delay and Sum” (Dougherty, 2004). Esta se basa en la diferencia de tiempo que hay entre una onda sonora que impacta en un micrófono con respecto al siguiente, este retardo en tiempo se calcula según,

$$\Delta_m(r) = \frac{|r| - r_m(r)}{c} \quad (14)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido.

Luego, aplicando este retardo a cada señal mediante un operador “shift” y sumando las señales obtenemos la salida de DS.

$$b_{DS}(t, r) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m) \quad (15)$$

Donde  $w_m$  es un factor de peso que asegura que todos los micrófonos tengan el mismo impacto en el resultado sin importar que tan lejos se encuentren de la fuente.  $M$  es la cantidad de micrófonos y  $p_m$  es la presión medida.

$$w_m = \frac{|r| - r_m(r)}{r_0} \quad (16)$$

Y  $r_0$  es la distancia de referencia, en este caso utilizaremos la distancia desde el centro del arreglo de micrófonos.

### 3.5 “Cepstrum”

Se introdujo en 1963 para utilizarse en señales sísmicas permitiendo obtener ecos y así determinar el epicentro del sismo (Bogert et. al. 1963). En ese momento se definió el “Power

cepstrum”.

$$C_p(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\text{Log}\{|\mathcal{F}\{x(t)\}|\}\} \tag{17}$$

La desventaja de esta transformación es la perdida de la fase, por lo tanto no se puede reconstruir la señal en el dominio del tiempo nuevamente. Para superar este inconveniente se introdujo la transformación “complex cepstrum” (Oppenheim et. al. 1968). Este utiliza el logaritmo complejo de la señal para poder conservar la fase como se muestra en las Ec. 19 y 20. Una vez aplicada la transformada “complex cepstrum” se puede obtener la señal nuevamente en el tiempo realizando los pasos inversos de la Ec. 18.

$$C_c(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\text{Log}\{\mathcal{F}\{x(t)\}\}\} \tag{18}$$

Por lo tanto,

$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = a(f) + ib(f) = A(f)e^{i\phi(f)} \tag{19}$$

Luego, aplicando el logaritmo complejo,

$$\text{Log}\{X(f)\} = \text{Log}\{A(f)\} + i\phi(f) \tag{20}$$

Notar que para calcular el logaritmo complejo se necesita que la función  $\phi(f)$  sea continua.

La transformada “cepstrum” se utiliza para poder localizar periodicidad dentro del espectro de señales (Konstantin-Hansen and Herlufsen, 2010). En el caso de máquinas rotativas, por ejemplo en una caja reductora, se utiliza para encontrar fallas de engrane por variación de carga, excentricidad del engranaje, desgaste de los engranajes, fallas en rodamientos, etc.

Las características principales de la transformación son:

- Detección de patrones repetidos dentro de las señales espectrales.
- Detección de periodicidad y de espaciado entre frecuencias.
- Separación de familia de armónicas.
- Separación de fuentes y “transmission path”
- La característica más importante es la propiedad de separar dos señales convolucionadas en el dominio del tiempo en una suma de su “cepstro” complejo.

$$x(t) * y(t) = x(\tau) + y(\tau) \tag{21}$$

El término “**cepstrum**” surge de parafrasear la palabra “**spectrum**”. A continuación se detallan los términos utilizados habitualmente y los que se utilizan en el dominio “cepstral” (Bogert et. al. 1963).

frequency	-----	quefrequency
spectrum	-----	cepstrum
phase	-----	saphe
amplitude	-----	gamnitude
filtering	-----	liftering
harmonic	-----	rahmonic
period	-----	repiod

### 3.5.1 Ejemplo: aplicación de filtros en el dominio cepstrum.

En el dominio cepstral el filtrado se lo llama “liftering”, se utiliza para poder remover los picos que corresponden a ecos en el dominio cepstral. Luego, invirtiendo el proceso llevamos la señal al dominio del tiempo lo que permite eliminar las reflexiones o separar señales convolucionadas.

Si estas señales resultantes están localizadas en bandas diferentes y cumplen el principio de señales lineales e invariantes en la frecuencia (Oppenheim & Schafer, 1989), entonces se pueden separar por un filtrado lineal simple (liftering).



Cada una de las señales separadas puede recuperarse por la transformación inversa. Dentro de la deconvolución homomorfica las técnicas basadas en el cepstrum son las de mayor aceptación (Adam & Michailovich, 2002), pero estas técnicas tienen el inconveniente de que el cepstrum complejo de una señal de duración finita siempre se extiende al infinito (Oppenheim & Schaffer, 1989), y su calculo mediante DFT produce errores de aliasing que no se resuelven con aumentar la frecuencia de muestreo, porque se incrementan los efectos del ruido en los componentes cepstrales (Taxt, 1997).

También es difícil fijar los parámetros para un filtro ideal (lifter) en el dominio del cepstrum (quefrecny), por lo que tiene que cambiarse sistemáticamente para obtener buenos resultados en la deconvolucion.

En el siguiente ejemplo se analizará un filtrado mediante el cepstrum complejo. El filtrado se realiza multiplicando por cero la parte de la señal a editar. Los datos que se utilizan para realizar los ensayos se extrajeron de la base de datos de “Case Western University” (Case Western University). En la Figura 4 se observa la disposición del motor, acople y dinamómetro. Los rodamientos en estudio soportan el eje del motor.

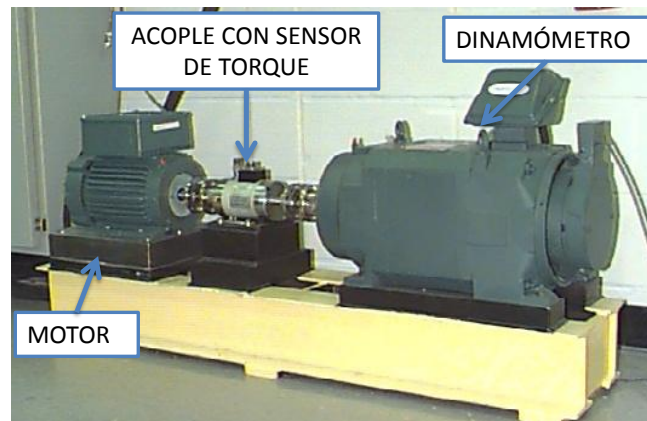


Figura 4: Banco de ensayos de rodamientos.

El rodamiento estudiado en este caso es del lado del ventilador del motor. En la Figura 5 se observa la señal en el tiempo para el rodamiento sin falla, con una falla en pista interna de 0.007” y 0.021” de diámetro para el motor trabajando en vacío.

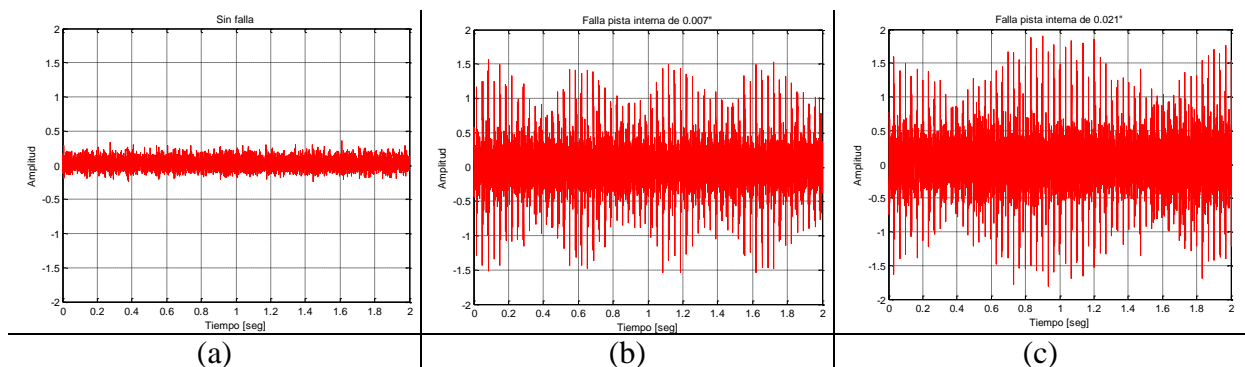


Figura 5: Motor sin carga. Rodamiento sano, (b) falla pista interna de 0.07”, (c) falla pista interna de 0.21”

En la Tabla 1 se colocaron los valores por los que multiplicados a la frecuencia de giro del motor (1797 rpm sin carga) en Hz nos devuelve la frecuencia de cada falla.

	Falla en pista interior	Falla en pista exterior	Jaula	Elementos rodantes
Constante	4.9469	3.0530	0.3817	3.9874
Constante x Frecuencia de giro [Hz]	148.15	91.43	11.43	119.42

Tabla 1: Constante del cinematismo de los rodamientos y frecuencia a las cuales aparecen las falla.

En la Figura 6 se observa las frecuencias del sistema dentro de las cuales algunas son debidas a la cinemática del rodamiento, se observa una ampliación de los primeros 150 Hz donde se visualiza la frecuencia de giro hasta su quinto armónico y la frecuencia de falla en pista interior.

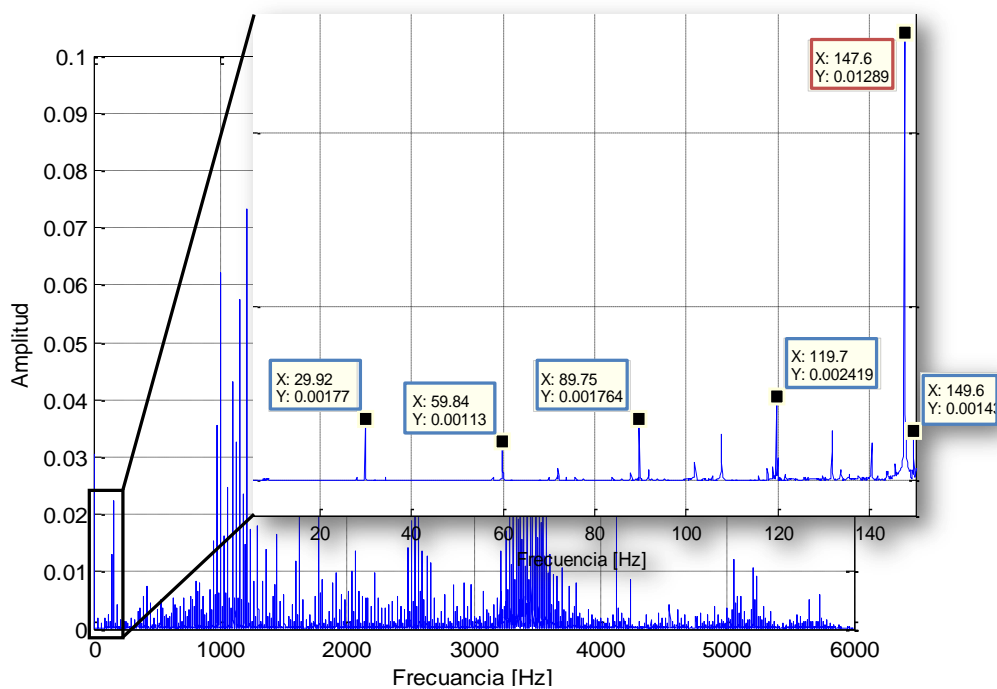


Figura 6: Las frecuencias en azul corresponden a la primera frecuencia de giro hasta su quinto armónico y la frecuencia en rojo corresponde a la falla de la pista interior.

En la Figura 7 se muestra el cepstrum complejo editado. Luego, en la Figura 8 se observa el logaritmo del espectro de la señal original y la señal editada. En este caso se removió de la señal todas las familias de frecuencias menores a la frecuencia de giro del eje. Esto permite deconvolucionar la señal y obtener un espectro limpio.

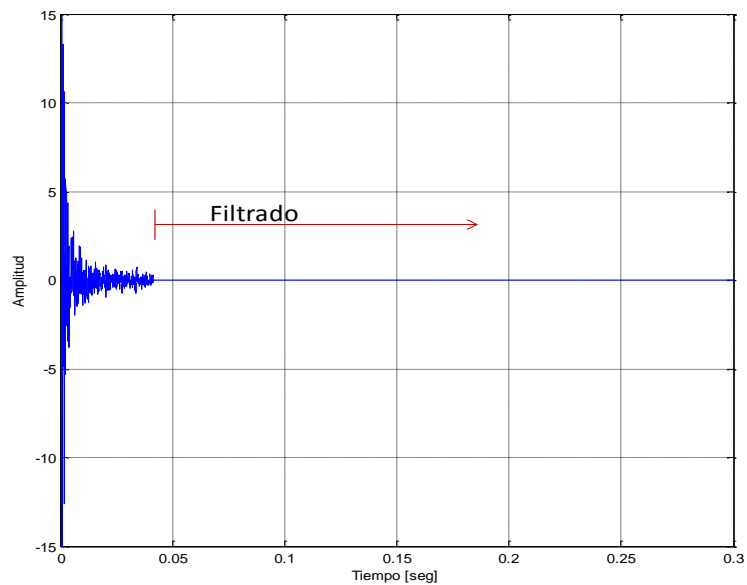


Figura 7: Espectro logarítmico de frecuencias.

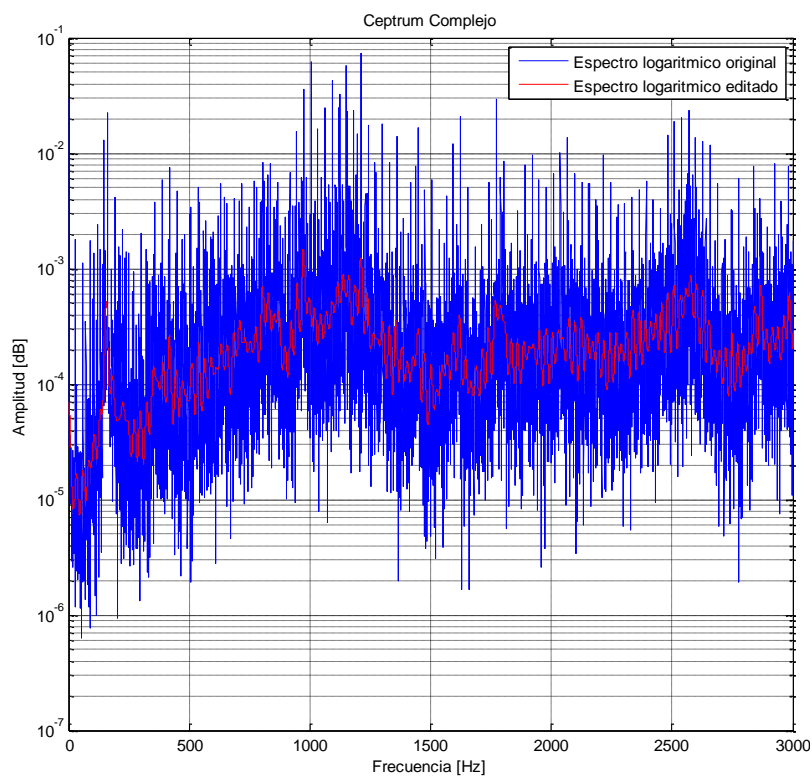


Figura 8: Espectro logarítmico de frecuencias.

## 4 APLICACIÓN PRÁCTICA DE IMÁGENES ACÚSTICAS.

### 4.1 Introducción de la máquina a ensayar.

Para realizar el testeo de los algoritmos propuestos se utilizó un banco de simulación de bombas de engranajes. Este se encuentra ubicado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas (LMTH) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto. En la Figura 9 (a) se puede observar la máquina, los elementos más importantes son la bomba

de engranajes y el motor eléctrico. El motor eléctrico es de  $\frac{3}{4}$  Hp. La capacidad de este banco de ensayos es la de modificar las condiciones de trabajo de la bomba mediante la apertura o cierre de las válvulas de entrada y salida (Figura 9 (b)). También consta de una válvula de alivio la cual abre a 9 bar. La bomba se muestra en detalle en la Figura 10 en la que se destacan los engranajes helicoidales doble o chevron.

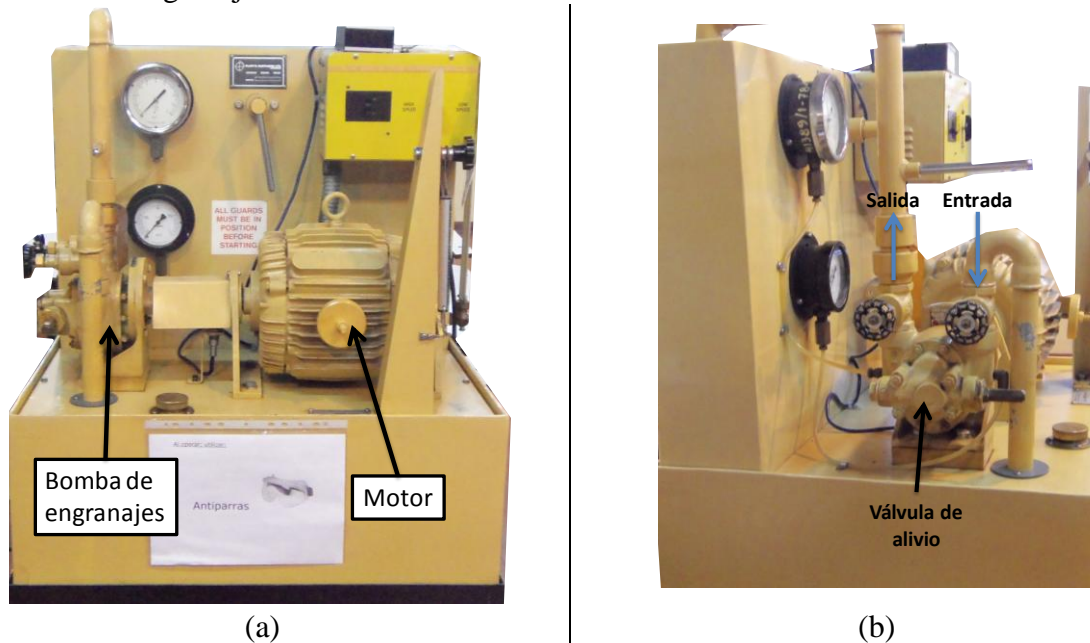


Figura 9: (a) Motor y Bomba de engranajes. (b) Entrada y salida de fluido de la bomba con su válvula de alivio.

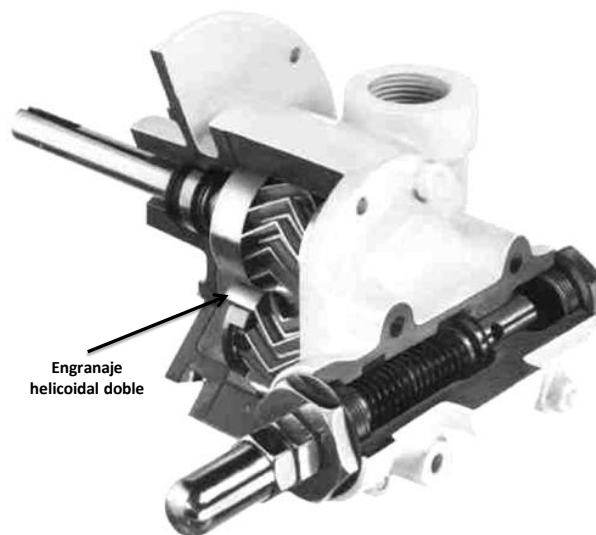


Figura 10: Detalle de la forma de los engranajes helicoidales doble.

#### 4.2 Procedimiento de prueba de la bomba.

Para comenzar se debe asegurar que las válvulas de entrada y salida estén abiertas completamente. Luego se coloca en marcha el motor a bajas vueltas y se deja recircular para asegurar que las burbujas de aire se escapen. Una vez concluido este proceso se puede colocar el motor en alta velocidad. Las velocidades nominales del motor son 750 o 1500 rpm.

Una vez puesto en régimen el sistema se procede con el cierre de las diferentes válvulas. En primera instancia se comienza por cerrar la válvula de succión a 0.5 vac, 0.75 vac y aprox.

1 vac. Esto provocará un vacío en la entrada de fluido lo que incrementará el ruido de la bomba debido al comienzo de la cavitación, este fenómeno es indeseado por su efecto destructivo, y reducirá el caudal que entrega la bomba.

Luego, se cerró la válvula de descarga lo cual incrementa la presión en la bomba. En este caso se analizaron tres condiciones de presión 2 bar, 5 bar y 9 bar (válvula de alivio abierta). En esta situación el motor trabajará de forma forzada lo cual provocará un aumento de ruido y reducirá la vida útil del mismo.

#### 4.3 Comparación de los diferentes métodos de imágenes acústicas.

Para realizar las comparaciones se realizaron los ensayos a una distancia relativa de 1 m entre la máquina y la antena. Se tomaron mediciones de las diferentes condiciones de la máquina. En la Figura 11 se observan las dimensiones del mapa de ruido y la ubicación del centro del arreglo de micrófonos.

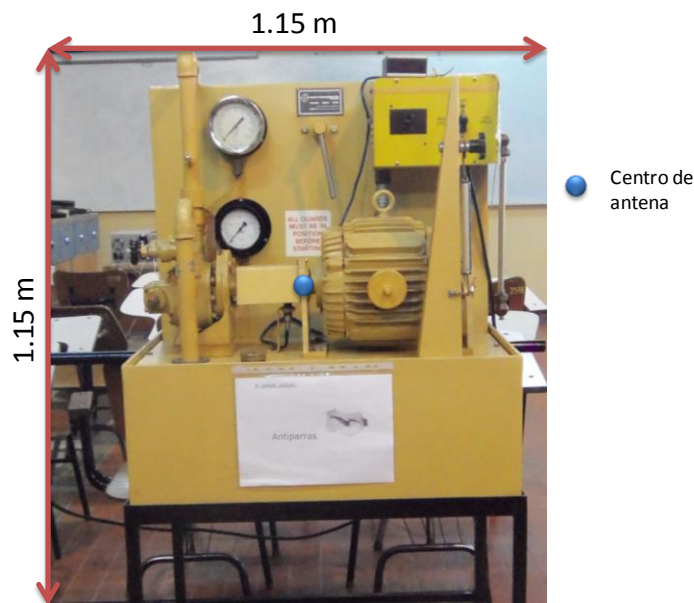


Figura 11: Dimensiones del mapa de ruido y posición del centro del arreglo de micrófonos a 1 m de distancia relativa entre arreglo y máquina.

La Figura 12 muestra el mapa de ruido a 600 Hz realizado mediante “beamforming” para la condición de válvulas abiertas de la bomba de engranajes. La escala se encuentra en dB referida al máximo valor de la condición de válvula de succión cerrada a una presión de vacío de 0.5. Se observa que el ruido a esa frecuencia proviene de la bomba.



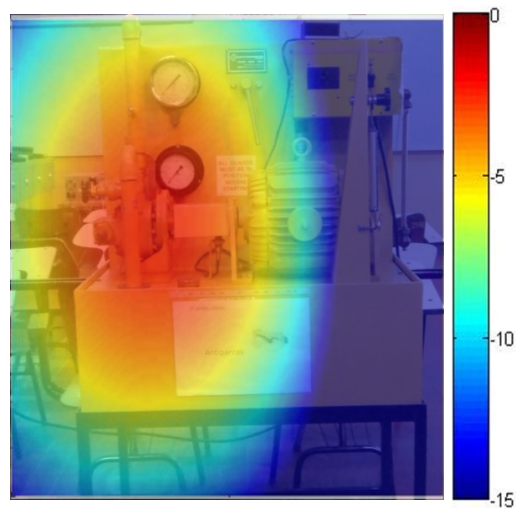
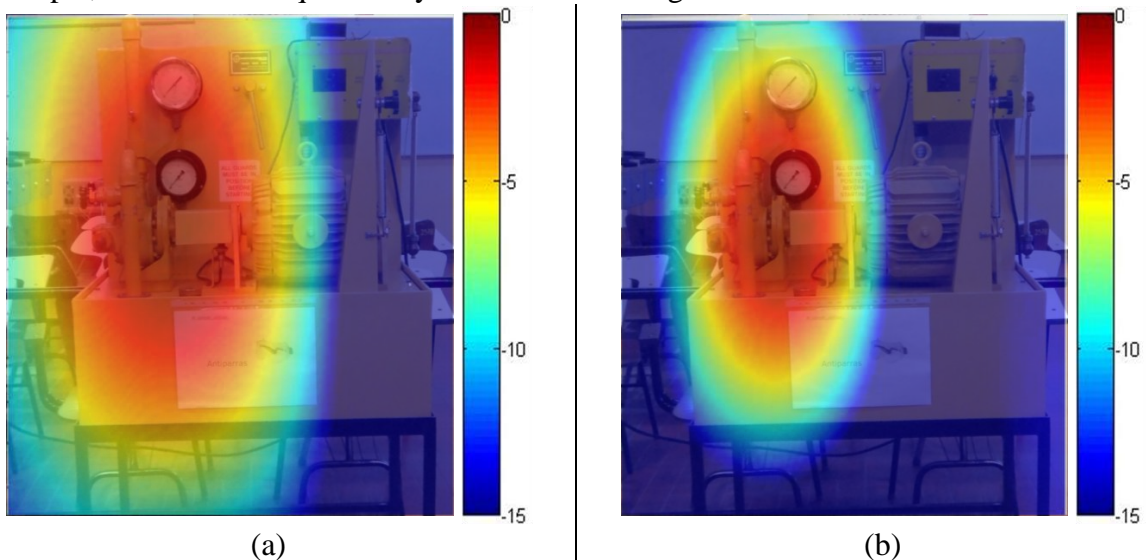


Figura 12: Mapa de ruido a 600 Hz con usando "beamforming" con válvulas abiertas.

En la Figura 13 se observa diferentes mapas de ruido en el momento que la bomba de engranajes tiene cerrada la válvula de succión a una presión de vacío de 0.5. La Figura 13 (a) muestra el mapa de ruido para la técnica de "beamforming" a una frecuencia de 600 Hz, localiza la posición de la bomba debido al ruido generado por la cavitación. Para el caso de la Figura 13 (b) se utilizó la técnica de "robust adaptive beamforming" para una frecuencia de 600 Hz y  $\gamma = 0.001$ , se observa como se reduce el ruido blanco en el mapa de ruido en comparación con la técnica de beamforming. Luego, en la Figura 13 (c) se utilizó MUSIC para la misma frecuencia pero debido a los inconvenientes de la técnica, mencionados anteriormente, el mapa de ruido no presenta mejoras en su resolución. Por último, en la Figura 13 (d) se aplicó la técnica de "delay and sum" para un intervalo de tiempo de 0.1 seg, se observa que el mapa de ruido es similar a los anteriores con respecto al tamaño del lóbulo principal, esto se debe a que la mayor emisión de energía acústica se encuentra a 600 Hz.





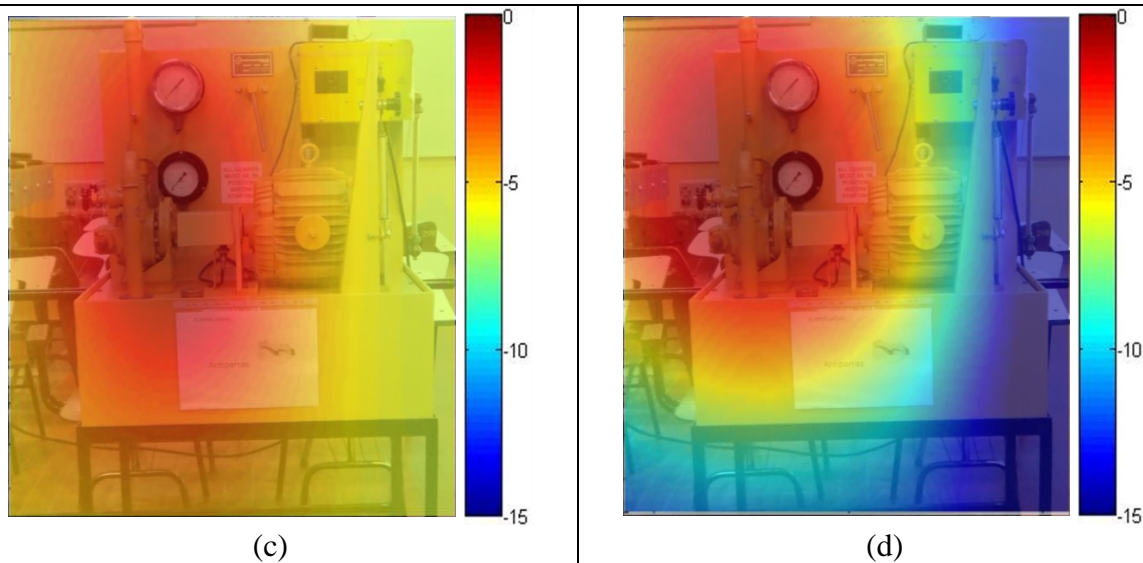


Figura 13: (a) “beamforming”, (b) “robust adaptive beamforming”, (c) MUSIC y (d) “delay and sum”.

En la Figura 14(a) se observa un tramo de la señal en el dominio cepstral. En color azul se muestra como se editó el pico de 0.08055 seg. el cual pertenece a la familia de armónicas de la frecuencia de giro del motor ya que  $1/0.08055$  es 12.4 Hz (745 rpm). Una vez editada, se vuelve a recuperar la señal en el dominio temporal para poder realizar “delay and sum” de la forma usual (Figura 14(b)). Este proceso permite eliminar de la señal la familia de frecuencias indeseadas y también es posible deconvolucionarla y evidenciar partes de la señal que se encuentran “escondidas”.

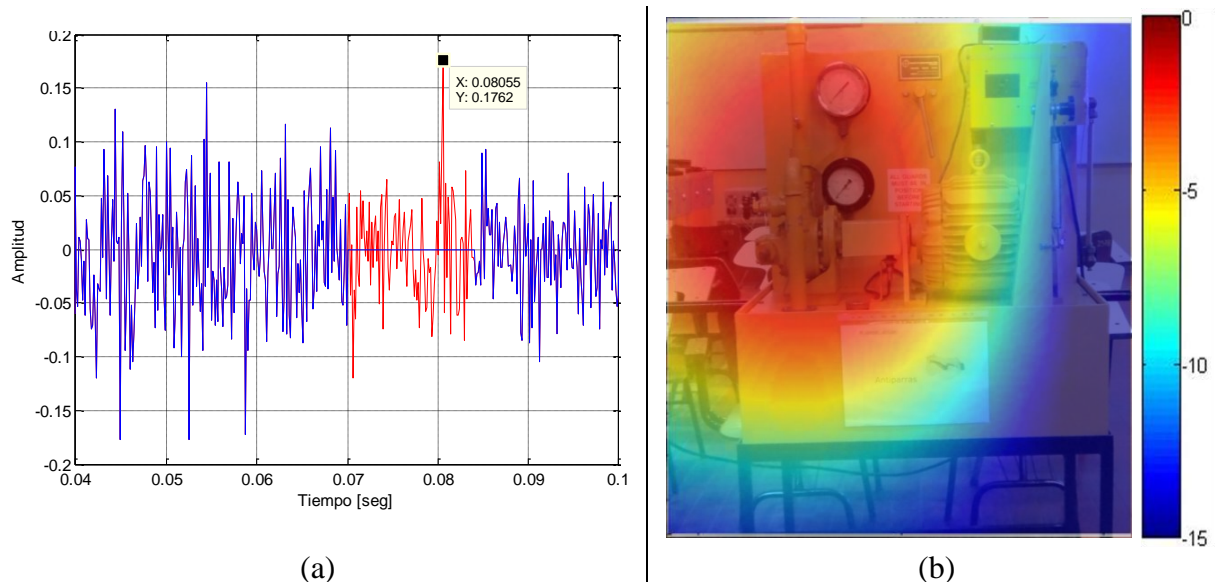


Figura 14: (a) Señal en el dominio cepstral. (b) Mapa de ruido mediante “delay and sum - cepstrum”.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó un arreglo de micrófonos para la formación de imágenes acústicas. Se estudiaron diferentes tipos de post proceso para la formación de mapas de ruido. De este estudio se puede concluir que las técnicas en el dominio de la frecuencia se complementan con la técnica en el dominio del tiempo. En el caso de “beamforming”, se observó la capacidad para distinguir la fuente de ruido emitida por la bomba de engranajes en

cavitación. En comparación con “robust adaptive beamforming”, este último presenta la capacidad de mejorar la resolución del mapa de ruido ya que elimina el ruido blanco. Con respecto a MUSIC, no se observaron mejoras en el mapa de ruido, esto se debe a la sensibilidad del método. En cuanto a “delay and sum” se puede decir que se complementa con los métodos anteriores ya que permite realizar el mapa de ruido de forma global para que luego se profundice el estudio de frecuencias en particular. En el caso de “delay and sum - cepstrum” se tiene la capacidad de editar la señal para separar familias de armónicas indeseadas y así mejorar el mapa de ruido, la desventaja de esto radica en que se debe tener conocimientos previos del cinematismo de la máquina en estudio para poder realizar la edición correcta.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al apoyo económico de CONICET y FONCyT. La ayuda del GAV (Grupo de Acústica y Vibraciones) y el LMTH (Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas) de la Facultad de Ingeniería de Río Cuarto.

### REFERENCIAS

- Adam, D. and Michailovich, O. Blind deconvolution of ultrasound sequences using nonparametric local polynomial estimates of the pulse. *IEEE Trans. Biomedical Eng.*, 49 (2), 118-131. 2002.
- Avarvand F., Ziehe A. and Nolte G., MUSIC algorithm to localize sources with unknown directivity in acoustic imaging *ICASSP 2011*.
- Bogert, B.P., Healy, M.J.R. and Tukey, J.W. The Quefrency Analysis of Time Series & for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autoco-, variance, Cross-cepstrum and Saphe Cracking, *Proceedings of Symposium on Time Series Analysis by Rosenblatt*, pp. 209—243. N.Y. 1963.
- Brooks T., Humphreys W. Jr. A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays, *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, May 10-12, 2004*.
- Camargo E., Ravetta P., Burdisso R., and Smith A. K., A Comparison of Beamforming Processing Techniques for Low Frequency Noise Source Identification in Mining Equipment, *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2009-12194, Lake Buena Vista, Florida, November 2009*.
- Case Western University, <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>.
- Christensen J.J. and Hald J., Beamforming, *Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement-Technical Review*, 2004.
- Cox H., Zeskind R. and Owen M., Robust adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Vol. ASSP-35, pp. 1365-1376. Oct. 1987.
- Dougherty R., Advanced Time-Domain Beamforming Techniques. *AIAA Paper 2004-2955, Manchester UK, Mayo 2004*.
- Dougherty, R. P. Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming. *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference)*, AIAA-2005-2961, Monterey, California, USA 2005.
- Dougherty, R. P. Phased Array Technology Applied to Aeroacoustics. *15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference)*. May 2009.
- Eret P. and Meskell C., Microphone arrays for compressed air leakage detection, *4th Berlin Beamforming Conference, 2012*

- Hood A. and Pines D.J. Feasibility of a linear phased acoustic array for health monitoring of gears, *Proc. SPIE 4327, Smart Structures and Materials 2001- Smart Structures and Integrated Systems*, 270. August 2001.
- Huang X., Bai L., Vinogradov I. and Peers E., Adaptive beamforming for Array signal processing in aeroacoustic measurements. *Acoustical Society of America*. 2012. Pages 2152 – 2161
- Ito N., Vincent E., Ono N., Gribonval R., and Sagayama S., Crystal-MUSIC: Accurate localization of multiple sources in diffuse noise environments using crystal-shaped microphone arrays. *LVA/ICA*, pp. 81–88, 2010
- Konstantin-Hansen H. and Herlufsen, H., Envelope and Cepstrum Analyses for Machinery Fault Identification. *Sound and Vibration*. Mayo 2010
- Li J. and Petre S., Robust adaptive beamforming, *John Wiley*, 2006
- Lo K.W., Adaptive array processing for wide-band active sonars, *IEEE Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 837 – 846, jul. 2004.
- O'Brien R.J., Molisani L., Burdisso R., Optimización del Rango Dinámico de Antenas Acústicas. *Mecánica Computacional*, Volume 30. Number 42. Pp 3217 – 3232. Noviembre 2011.
- O'Brien R.J., Molisani L., Burdisso R., Detección de fuentes sonoras mediante beamforming y near field acoustic holography. *Mecánica Computacional*, Volume 31. Number 26. Pp 4001 – 4012. Noviembre 2012.
- Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. & Stockham, T.G. Nonlinear Filtering of Multiplied and Convolved Signals, *IEEE Trans. Audio & Electroacoustics*, Vol. AU-16, No.3, Sept. 1968.
- Oppenheim, A. and Schafer, R. Discrete-time signal processing. *Prentice-Hall*. 1989
- Randall R. B. and Sawalhi N. A New Method for Separating discrete component from a signal. *Sound and Vibration*. Mayo 2011
- Ravetta P., LORE approach for phased array measurements and noise control of landing gears, *Tesis Doctoral*, Noviembre 2005.
- Ravetta P., Muract J., and Burdisso R., Feasibility Study of Microphone Phased Array Based Machinery Health Monitoring. *ENIEF2007, 17 Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*. 2007.
- Ravetta P., Burdisso R. and Ng W. F., Noise Source Localization and Optimization of Phased Array Results (LORE), *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics, Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference)*, Cambridge, Massachusetts, 8 - 10 May 2006.
- Schmidt R., Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, pp. 276–280, 1986.
- Sijtsma P., CLEAN Based on Spatial Source Coherence, *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA 2007-3436. 2007
- Taxt, T. Comparison of cepstrum-based methods for radial blind deconvolution of ultrasound images. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 44 (3), 666-674. 1997
- Van Trees, H. L. *Optimum array processing*, Wiley, 2002