

PROCESAMIENTO DE SEÑALES VIBRO-ACÚSTICAS Y CONTROL ACTIVO DE RUIDO

**FRIEDRICH, GUILLERMO¹; GIRÓN, PABLO²; REGGIANI, GUILLERMO¹;
AZZURRO, ADRIAN³; COPPO, RICARDO¹; SEQUEIRA, MARTIN³; BALDINI,
PATRICIA¹; BAMBILL, HECTOR¹; CERDA, EZEQUIEL²; COFRÉ, LORENA¹ Y
GABRIELA VELÁSQUEZ¹**

1: Grupo Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (SITIC)

2: Departamento de Ingeniería Mecánica

3: Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Bahía Blanca
11 de abril 461

e-mail: {gfried,pgiron,ghreggiani,azzurro,rcoppo,martins,pnbaldi,hbambill}@frbb.utn.edu.ar

Resumen: *Los niveles excesivos de ruido y vibraciones presentan una gran variedad de efectos nocivos para el hombre y su entorno. Podría decirse, en forma general, que hay confort auditivo hasta los 65 dBA y que a niveles superiores se presentan molestias e incluso, en función de las dosis de tiempo, daño auditivo. En ambientes industriales, una exposición de 85 dBA para 8 horas se considera como la dosis máxima a la que puede estar expuesta una persona. Sin llegar a estos niveles inclusive, fuentes de ruido pueden generar molestia en ámbitos de trabajo y estudio, dificultando la comunicación entre las personas. Por encima de esos niveles, ya sea en el caso del confort o del cuidado de la salud, o por la perturbación de la comunicación, los niveles de ruido deben controlarse mediante técnicas activas, pasiva o una combinación de ambas. En base al relevamiento preliminar efectuado en empresas del polo petroquímico de Bahía Blanca se han detectado algunos casos de estudio para los que sería de interés poder desarrollar soluciones innovadoras a fin de mitigar el ruido y sus consecuencias.*

El Control Activo de Ruido y/o Vibraciones es la transformación favorable del campo vibro-acústico empleando medios electrónicos, sensores y actuadores. El trabajo en desarrollo incluye la profundización en el conocimiento del estado del arte y las tecnologías vinculadas al tema, mediante el relevamiento y estudio de bibliografía y publicaciones. Una parte del trabajo a realizar comprende tareas de análisis y simulación basadas en el uso de herramientas de software. Complementando al trabajo de análisis y simulación, se pretende también avanzar en el desarrollo de prototipos experimentales, que involucren hardware y su software asociado, con la finalidad de ensayar y evaluar no sólo la parte algorítmica sino también la eficacia de distintos dispositivos sensores y actuadores. Se pretende también desarrollar modelos de laboratorio que luego puedan ser escalados para su implementación en escenarios reales. Hasta el momento se ha avanzado en la realización de ensayos preliminares en laboratorio, con buenos resultados, como así también en la evaluación y ensayo de algunas plataformas de hardware y software a utilizar para el desarrollo de los equipos a usar en el campo.

Palabras clave: *control activo de ruido; procesamiento digital de señales; tiempo real;*

*medición de ruido y vibraciones***1. INTRODUCCIÓN**

Los niveles excesivos de ruido y vibraciones presentan una gran variedad de efectos nocivos para el hombre y su entorno. Podría decirse, en forma general, que hay confort auditivo hasta los 65 dBA; niveles superiores presentan molestia e incluso, en función de las dosis de tiempo, pueden causar daño auditivo.

Otro aspecto a destacar es la interferencia en la comunicación, lo que lleva a las personas a elevar la voz forzando sus cuerdas vocales [1]. Por otro lado, existe un gran número de efectos no auditivos del ruido, entre los cuales se hallan la hipertensión arterial pasajera, las cefaleas, el nerviosismo y estrés, la reducción del rendimiento físico y la pérdida de concentración y atención.

En particular, en determinados sectores de ciertas plantas industriales es frecuente encontrar niveles muy elevados de ruido, que obliga a reforzar las protecciones auditivas y limitar los tiempos de exposición, a fin de evitar la aparición de daños auditivos en los operarios. Para mitigar estos problemas se recurre a técnicas de control, que comprenden "el conjunto de medidas técnicas o estratégicas para corregir una situación en la cual el ruido sea o pueda ser un problema" [2].

La definición anterior puede generalizarse para incluir a las vibraciones y señales acústicas en general. Dentro del espectro de medidas técnicas de control se encuentran el control pasivo y el control activo. El control pasivo está compuesto por todas aquellas acciones que se orientan a la disminución de la contaminación vibro-acústica sin realizar modificaciones esenciales en las fuentes que la producen (barreras acústicas, encapsulamientos con materiales aislantes y absorbentes, silenciadores, montajes antivibratorios, etc.).

El Control Activo de Ruido y/o Vibraciones (CAR/V), a diferencia, es la transformación favorable del campo vibro-acústico empleando medios electrónicos, sensores y actuadores. El CAR/V surge como una técnica complementaria al control pasivo en el rango de las frecuencias bajas. Consiste en la generación de una interferencia destructiva entre el campo primario y otro secundario, en contrafase, generado electrónicamente.

Haciendo mención al caso del ruido, se cancela el ruido primario indeseado según el principio de superposición, mediante un ruido secundario o antiruido, que posee igual amplitud y fase opuesta al primario. Al sumarse ambas señales se obtiene la cancelación deseada. La idea del Control Activo de Ruido como interferencia destructiva, fue planteada por Lueg [3] en 1933, aunque su aplicación se postergó varios años debido a las limitaciones de las tecnologías existentes entonces. En el rango de frecuencias bajas es prácticamente inviable el uso de técnicas pasivas, lo que hace atractivo el estudio y experimentación de técnicas activas. Por otra parte, no existen antecedentes a nivel local y regional con respecto a la aplicación de este tipo de técnicas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el principal objetivo del presente proyecto es estudiar la aplicabilidad de técnicas de control activo para solucionar problemas de ruido en plantas industriales. En tal sentido se propone trabajar a partir de casos de estudio que sean de interés en el ámbito local y/o regional, con la finalidad última de obtener resultados de aplicación

práctica. El trabajo a desarrollar incluye una profundización en el conocimiento del estado del arte y las tecnologías vinculadas al tema, mediante el relevamiento y estudio de bibliografía y publicaciones. En base al relevamiento preliminar efectuado en empresas del polo petroquímico de Bahía Blanca se han detectado algunos casos de estudio para los que sería de interés poder desarrollar soluciones innovadoras a fin de mitigar el ruido y sus consecuencias. Otro caso de interés tiene que ver con la reducción del ruido, no por sus efectos sobre la salud sino sobre el confort. En tal sentido, las instalaciones de aire acondicionado presentan escenarios de interés que pueden ser analizados y utilizados para realizar ensayos experimentales. En dependencias de nuestra misma Facultad se cuenta con una instalación de este tipo sobre la que se está trabajando.

Una parte del trabajo comprende tareas de análisis, modelación y simulación basadas en el uso de herramientas de software, como Matlab, Comsol, Labview u otras.

La parte experimental del proyecto consta de una fase de laboratorio, cuya finalidad es probar y validar modelos teóricos, como así también ensayar soluciones prácticas basadas en distintas plataformas de hardware y software, como paso previo a su implementación y ensayos en los escenarios de interés.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan los escenarios de interés; en 3 se describe el trabajo y las técnicas de modelación que están siendo consideradas; en 4 se analizan cuestiones referidas a la problemática de la localización de fuentes de ruido; en 5 se detallan los trabajos, técnicas y recursos involucrados en la realización de ensayos experimentales y por último, en 6 se delinear los pasos previstos para terminar de concretar los objetivos propuestos.

2. ESCENARIOS DE INTERÉS

El relevamiento de información (trabajos, publicaciones, etc.) se enfocó en los casos de aplicación en el campo de la industria (conductos, cabinas, etc.), con el objetivo de mitigar los efectos sonoros, reduciendo así la dosis de ruido (prevención de enfermedades profesionales en el campo laboral) o al solo efecto de mejorar las condiciones de confort humano (ruido comunitario).

Se tomaron tres casos a los cuales aplicarles este tipo de solución, los cuales se encuentran bajo análisis. El primero en una empresa del Polo Petroquímico de la Ciudad de Bahía Blanca. En este caso particular se pretende desarrollar soluciones para la mitigación del ruido producido por los sistemas de transporte neumático ampliamente utilizados en esta industria. Estos sistemas están en general asociados a la utilización de soplantes de lóbulos que producen ruido tonal de niveles elevados.

El segundo caso está vinculado a una máquina para la fabricación de bloques de hormigón vibrado, la cual también produce durante este proceso ruidos tonales que afectan a los operadores. Se pretende aplicar este tipo de soluciones a la mitigación del ruido dentro de una cabina cerrada que ocupan los mismos.

También se analizó la aplicación en conductos de ventilación y aire acondicionado, los cuales suelen ser los casos de aplicación típicos de este tipo de soluciones. Aquí se tomó como referencia la instalación de aire acondicionado de la propia facultad, dada la

facilidad de acceso para los ensayos establecidos.

3. MODELACIÓN

3.1. Control activo de ruido: algoritmos adaptativos de procesamiento y control

La contaminación acústica de baja frecuencia es muy común tanto en el entorno laboral como doméstico, y sus efectos fisiológicos y psicológicos, son sufridos por gran parte de la población debido a la facilidad que tienen para propagarse y a la poca efectividad de los sistemas pasivos para controlarlo.

El control activo de ruido pretende reducir la amplitud del nivel de presión sonora para generar una zona de silencio, introduciendo un campo acústico secundario. El ruido secundario es de igual amplitud y fase opuesta al primario, y al combinarse ambos se genera interferencia destructiva resultando la cancelación de ambas señales (Fig. 1). Si bien no es posible obtener cancelación total, se logran grandes atenuaciones. Estos sistemas se implementan electrónicamente centrados, generalmente en un procesador digital de señal y deben ser adaptativos para poder adecuarse a las características no estacionarias del medio y las fuentes de ruido.

En la actualidad existe una amplia variedad de metodologías [4] para este fin orientadas particularmente a ductos de aire. Seleccionar una de ellas depende en parte de la caracterización de la fuente de ruido a cancelar. El ruido es producido por componentes del sistema tales como motores, sopladores, compresores. Las partes mecánicas rotativas producen componentes tonales mientras que la interacción de la parte rotativa con el eje y con el flujo de aire genera ruido de banda ancha. Los ruidos tonales, de banda angosta, son linealmente predecibles y, por lo tanto, más fácilmente atenuables. Entre los de banda ancha inherentes a la problemática planteada, el más representativo es el caótico no lineal que al ser determinístico también resulta predecible [5].

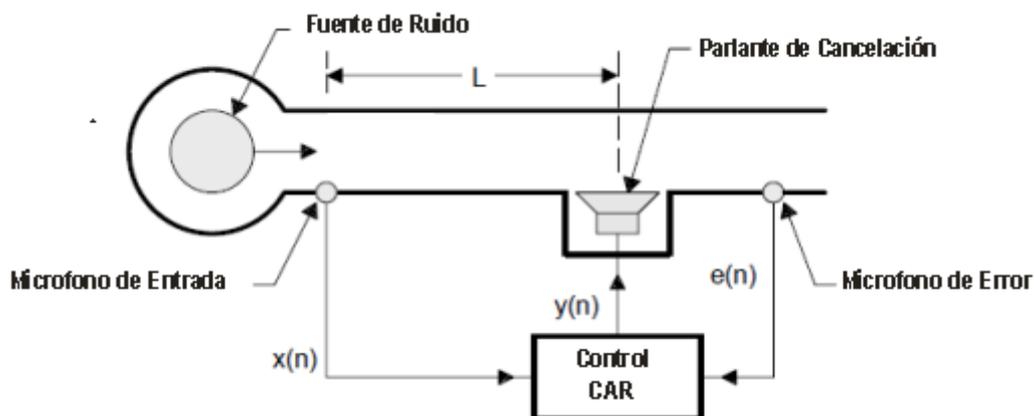


Fig. 1 Modelo del sistema de control activo de ruido.

Evaluadas las distintas alternativas, se seleccionaron los dos caminos que, según el estado del arte, presentan las mejores prestaciones potenciales para el caso de estudio. Por un lado, la dificultad inherente asociada a los retardos de tiempo propios de la propagación y el procesamiento son contempladas naturalmente en las estrategias de control predictivo basado en modelo [6]. En esta línea de investigación se basa el trabajo preliminar ya que no han sido totalmente estudiadas.

Por otro lado, dado que estos sistemas pueden presentar comportamientos de fase no mínima y no lineales con ruido de tipo caótico, los algoritmos de filtrado no lineal basados en redes neuronales con enlace funcional representan otra opción atractiva para su análisis y comparación[5, 7].

En ambos casos se contemplan las configuraciones de controlfeedforward ofeedback de acuerdo a que se disponga o no de sensado en la fuente.

4. MEDICIÓN Y VISUALIZACION DE PARÁMETROS ACÚSTICOS

Como disciplinas auxiliares a cualquier esfuerzo de control activo de ruido se pueden mencionar a la electrónica y a la informática. En ambos campos se han observado recientes avances que modifican la forma en que se mide la señal acústica y como se lo procesa para su visualización y estudio.

Inicialmente, limitado por costo y dificultad de montaje, los sistemas de medición de los campos acústicos se basaban en unos pocos micrófonos o sensores de presión que se desplazaban manualmente alrededor de los objetos de estudio para obtener una caracterización adecuada del campo sonoro. El proceso de medición era lento y tedioso ya que se debía realizar una gran cantidad de observaciones individuales para tener una cobertura espacial adecuada para la construcción de un modelo.

En años recientes los transductores necesarios para la construcción de micrófonos se ha reducido en tamaño y en costo. Se puede citar como ejemplo los dispositivos de reducido tamaño a los basado en tecnologías MEMS (Micro-mechanicalsystems)[8, 9], que se emplean como micrófonos en la construcción de celulares. Además, actualmente es posible integrar en el sistema de medición sensores de otras modalidades como el video, la presión, la temperatura, etc.

Los sensores se pueden disponer en arreglos (sensor arrays) cuyas señales individuales son correlacionadas y procesadas en forma paralela. La medición de la fase (desfasaje) entre las señales individuales brinda información importante en las tareas de localización e identificación de los objetos acústicos bajo estudio. Para ello se emplea circuitos avanzados de procesamiento digital de señales, procesadores de compuertas programables (FPGA) [9], procesamiento computacional en red y en paralelo que abren nuevas líneas de investigación de apoyo al problema de control activo de ruido.

Cualquiera que sea la modalidad de modelación o control de ruido adoptado el investigador se encuentra con la problemática de la imposibilidad de visualizar o “ver” el campo acústico [10]. El mismo es representado por parámetros físicos como presión, densidad relativa del medio, intensidad, o potencia sonora, valores que no son apreciables en forma directa por el aparato de visión humana.

En el dominio de las Ciencias de la Computación, y más específicamente la Computación Gráfica, la Visualización Científica es una especialidad de actividad creciente. Esta disciplina está fuertemente relacionada con el mapeo de parámetros físicos (simuladas o medidas) a expresiones gráficas interpretables por el sistema de visión humana [11]. Se beneficia actualmente por el aumento de velocidad y capacidad de las unidades de procesamiento, la aparición a bajo costo de placas gráficas con procesadores en paralelo (GPU/GPA), el procesamiento multicore, y de un creciente número de bibliotecas de programación especializadas (VTK) [12].

Si bien la medición y la visualización del campo sonoro se ha desarrollado con éxito desde los inicios de la acústica como disciplina científica, frecuentemente de la mano de los modelos de simulación basado en los modelos de elementos finitos, y en menor medida con la interpolación de los resultados de experimentación física de múltiples micrófonos, se espera en los próximos años avances significativos debido a los aportes de la electrónica y de la computación.

La combinación de los arreglos de sensores de captura de bajo costo, la introducción de sensores de diferentes modalidades, hardware electrónico especializado y los avances informáticos de visualización permitirán crear sistemas que integran una gran cantidad de sensores operando en tiempo real, posiblemente en red, y con capacidades gráficas interactivas.

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Si bien el proyecto tiene como objetivo implementar y ensayar soluciones en campo, a fin de resolver problemas reales, también estuvo prevista la realización de ensayos en laboratorio, para probar distintos algoritmos y técnicas, como también diferentes plataformas de hardware y software.

A tal fin se montó la plataforma que se puede apreciar en la Fig. 2, que guarda relación con el modelo de la Fig. 1. Sobre el mismo se vienen realizando algunos ensayos preliminares con resultados aceptables, y se continúa trabajando para lograr soluciones adecuadas a los casos de estudio de interés.

En distintos ensayos realizados inyectando una señal de ruido monotonal se han obtenido atenuaciones del orden de los 12 dB, lo que resulta muy prometedor. Las mediciones se han realizado utilizando un medidor de nivel sonoro marca Svantek, modelo 958 y software específico Svan PC ++, como así también mediante el procesamiento de la señal adquirida mediante el micrófono ubicado a la salida del ducto.

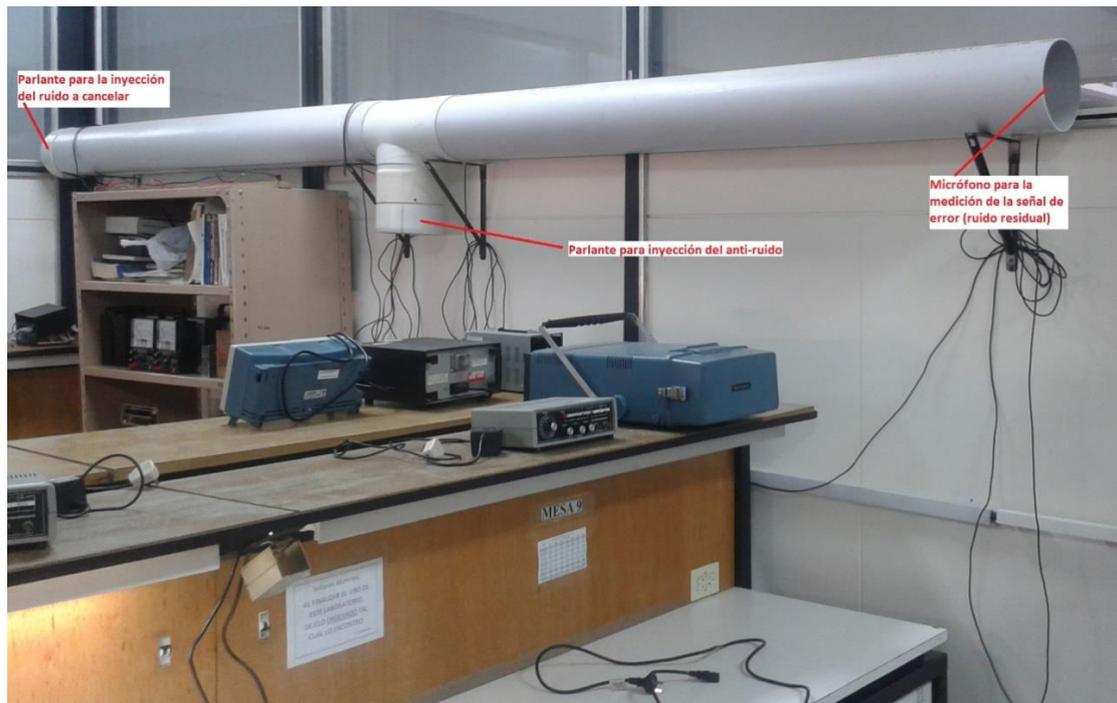


Fig. 2 Plataforma experimental de laboratorio

Actualmente se está trabajando en el diseño y desarrollo de soluciones adaptativas que puedan autoajustarse a cambios en las características del ruido. Estos trabajos se vienen realizando en distintas plataformas: computadoras portables, que facilitan el desarrollo y ensayo de distintas técnicas y algoritmos; procesadores de tipo DSP de Texas Instruments, por ser una posible arquitectura embebida a utilizar en el campo. También se aprovecha a evaluar otras arquitecturas embebidas, entre ellas Intel Galileo.

Por otra parte se realizaron los primeros ensayos en conductos de aire acondicionado, tomando mediciones en bocas de salida de aire y de retorno, y grabando las señales de interés, con la intención de reproducirla y trabajar sobre ellas en condiciones de laboratorio. Estas señales fueron grabadas como audio, y también se adquirieron directamente las señales de ruido a través de un sonómetro Quest 2900 y se llevaron las mismas directamente a un analizador espectral Vibracheck modelo 200 de 2 canales, a través del cual se obtuvieron en forma directa los espectros de dicha señal, tanto en escala directa como logarítmica. La idea central de esto último fue identificar en forma directa las componentes tonales del ruido producido por el sistema de acondicionamiento de aire.

6. FUTURAS ETAPAS. CONCLUSIONES

En ensayos preliminares realizados sobre la plataforma experimental, inyectando una señal de ruido monotonal, se han obtenido atenuaciones del orden de los 12 dB, lo que resulta muy prometedor. Se pretende intensificar las tareas sobre dicha, como así también sobre otros prototipos que incluyan la utilización con soluciones mixtas (control

pasivo+activo), que permitan asemejarse a los casos reales y que, como ya se mencionó anteriormente, sean semejantes y aplicables a la industria local (conductos, cabinas, recintos confinados de fuentes de ruido como complemento de soluciones pasivas, etc.). Es de destacar que ya existen empresas de nuestra ciudad interesadas en los resultados para que, en función de los mismos, se puedan llevar a la práctica en situaciones particulares.

Tal como ya se mencionara, se pretende avanzar en una primera etapa sobre fuentes que produzcan ruidos tonales o de composición espectral sencilla. Los resultados logrados hasta ahora alientan a seguir trabajando en el desarrollo de este campo.

REFERENCIAS

- [1] Miyara F. *Acústica y Sistemas de Sonido*. UNR Editora, Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina, (2004).
- [2] Miyara F. *Control de Ruido*. UNR Editora, Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina, (1999).
- [3] Lueg, P. “*Process of silencing sound oscillations*”, U.S Patent 2,043,416, June 9, (1936).
- [4] SM Kuo y DR Morgan, *Active Noise Control System Algorithms and DSP Implementation*, New York, Wiley,(1996).
- [5] S.K. Behera, D.P. Das y B.Subudhi, “*Functional link artificial neural network applied to active noise control of a mixture of tonal and chaotic noise*”, Applied Soft Computing, 23, pp 51– 60, (2014).
- [6] Q.Z Zhang and W.S. Gan, “*A model predictive algorithm for active noise control with online secondary path modeling*”, Journal of Sound and Vibration, 270, pp 1056-1066, (2004).
- [7] L. Luo, J. Sun, B. Huang y Z. Bai, “*An adaptative recursive feedback active noise control system for chaotic noise*”, 3rd International Conference of Control, Automation and Robotic, pp. 423 – 427, (2017).
- [8] G. Ottoy, B. Thoen and L. De Strycker, “*A low-power MEMS microphone array for wireless acoustic sensors*”, 2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Catania, 2016,doi: 10.1109/SAS.2016.
- [9] H. A. Sánchez-Hevia, R. Gil-Pita and M. Rosa-Zurera, “*FPGA-based real-time acoustic camera using pdm mems microphones with a custom demodulation filter*”, 2014 IEEE 8th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), A Coruna, pp. 181-184, (2014).
- [10] Yang-Hann Kim, Jung-Woo Choi, “*Sound Field Visualization and Manipulation*”, Wiley, (2013).
- [11] A. Zunino, M. Crocco, S. Martelli, A. Trucco, A. D. Bue and V. Murino, “*Seeing the Sound: A New Multimodal Imaging Device for Computer Vision*”, 2015 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW), Santiago, pp. 693-701, (2015).
- [12] VTK.org, “*The Visualization Toolkit*”, www.vtk.org, (visitado Marzo 2017).