

# LOCALIZACIÓN SONORA EN DRONES MEDIANTE UNA ACOUSTIC CAMERA

Pablo Alloza<sup>1</sup>, Benjamin Vonnrhein<sup>2</sup>

<sup>1</sup> gfai tech GmbH  
{e-mail: alloza@gfaitech.de}  
<sup>2</sup> gfai tech GmbH  
{e-mail: vonrhein@gfaitech.de }

## Resumen

La reducción de ruido es uno de los grandes desafíos para las próximas generaciones de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sistemas aéreos no tripulados (UAS). Para algunas aplicaciones, la reducción de ruido en drones puede ser deseable, pero para otras es obligatoria. Para vincular la relación entre la emisión de ruido y las fuentes de ruido en función de otras variables, como la potencia de los motores, las rpm o el tipo de hélice, se puede utilizar un análisis basado en *arrays* de micrófonos y algoritmos de *beamforming* (*Acoustic Camera*) para este propósito.

Este artículo presenta la aplicación de la *Acoustic Camera* para localizar y analizar las emisiones sonoras desde dos puntos de vista diferentes, el primero determina la huella de ruido generada por el paso de varios drones. El segundo se centra en las hélices, verificando varios modelos para una evaluación comparativa, utilizando algoritmos de *beamforming* avanzados para proporcionar imágenes acústicas precisas.

**Palabras clave:** localización sonora, drones, ruido, beamforming, huella sonora.

## Abstract

Noise reduction is one of the big challenges for the upcoming generations of unmanned aerial vehicles (UAV) and unmanned aerial systems (UAS). For some applications noise reduction in drones can be desirable but for other ones it is mandatory. In order to link the relation between noise emission and noise sources depending on other variables such as engine power, rpm or propeller type, analysis based on spaced-microphone arrays and beamforming algorithms (*Acoustic Camera*) can be used for this purpose.

This paper introduces the application of the *Acoustic Camera* localizing and analyzing the sound emissions from two different points of view. The first one is about determining the noise footprint when a drone is passing by. The second one is focused on the propellers, checking several models for benchmarking, using beamforming advanced algorithms in order to provide accurate acoustic pictures.

**Keywords:** sound localization, drones, noise, beamforming, noise footprint

PACS n°. 43.50.Nn, 43.60.Jn

## 1 Introducción

El sector de los vehículos y sistemas aéreos no tripulados ha crecido rápidamente en los últimos años. Esto se debe principalmente a dos razones. Por un lado, al aumento en el uso de pequeños drones con fines recreativos como grabación de fotos y videos, carreras de drones, etc. Por otro lado, hay un mayor desarrollo de UAV / UAS medianos y grandes para aplicaciones profesionales como realización audiovisual, vigilancia y seguridad, tareas industriales, etc. Esta tendencia ha dado lugar a una gran variedad de dispositivos con diferentes tamaños, tipos de hélices, geometrías de brazos o potencia de motores. Pero independientemente de esta heterogeneidad, todos emiten ruido.

Podemos pensar en la necesidad de reducir el ruido desde dos puntos de vista. El primero está relacionado con la audición humana. El ruido emitido por los drones a corta distancia puede producir altos niveles de ruido en los oídos. Esta emisión de ruido puede variar desde ser un sonido molesto hasta representar un peligro para la salud. El segundo motivo para la reducción del ruido está relacionado con situaciones en las que se requiere que un dron minimice su emisión de ruido para que no sea detectado.

Independientemente del propósito de la reducción de ruido, conocer con precisión las principales fuentes de ruido y su rango de frecuencia es un paso importante para definir soluciones y mejorar el diseño de futuros sistemas aéreos no tripulados. Los sistemas de beamforming basados en *arrays* de micrófonos, conocidos como cámaras acústicas, pueden proporcionar el análisis necesario con respecto a la emisión de ruido [1]. En el campo de los UAV y UAS, existe una gran variedad de posibles aplicaciones en la localización de fuentes de sonido, que van desde la medición e identificación rápida de fuentes de ruido en hélices, hasta la visualización de huellas sonoras durante el paso de un dron.

Esta publicación muestra las aplicaciones de la cámara acústica localizando las huellas acústicas de tres modelos de dron diferentes que vuelan sobre el *array* de micrófonos y localizando las emisiones de sonido de las hélices en un banco de pruebas.

## 2 Tests

Se han desarrollado dos tipos de pruebas diferentes; la primera campaña de medición se centró en drones medianos y pequeños, que volaban de forma estable sobre un *array* de micrófonos y aceleraban para tomar de altura. El segundo se centró en las emisiones sonoras de las hélices en un banco de pruebas.

Para ambas campañas de medición se utilizó la misma cámara acústica. El sistema de medición se basa en un registrador de datos multicanal para la adquisición de señales con una frecuencia de muestreo de 192 kHz y tarjetas de adquisición de 32 bits; el conjunto de micrófonos utilizado es el RING 48 AC PRO, una geometría circular de carbono con 48 micrófonos electret y una cámara *RealSense* con información de profundidad. Este sistema permite el análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia, proporcionando resultados de localización de la fuente de ruido en fotos y videos.



Figura 1 – Array de micrófonos RING 48 AC PRO y sistema de adquisición mcdRec de *gfai tech*.

## 2.1 Drones

La primera campaña de medición se desarrolló en una sala normal (Dimensiones: 56 m<sup>2</sup> de superficie, 5 m de altura) sin tratamiento de absorción acústica pero con algunos paneles de absorción en el suelo alrededor del *array* de micrófonos. Los drones volaron sobre el *array* de micrófonos a un metro. Se midieron tres drones diferentes con las características descritas en la Tabla 1, todos ellos montando hélices de plástico técnico:

Tabla 1 – Modelos de drones evaluados

Dron	Fabricante	Modelo	Motor	Hélice
1	DJI	450	M2212 (920 KV)	H9450
2	Homemade	Inspection 250	M2202 (2300 KV)	H5045
3	DJI	Phantom	M2312 (980KV)	H9450

Los tres modelos eran de tamaño mediano con cuatro brazos, con las hélices montadas en la parte superior del motor. Los modelos 2 y 3 tenían una distancia pequeña entre las puntas de las hélices cuando estas estaban una frente a la otra.

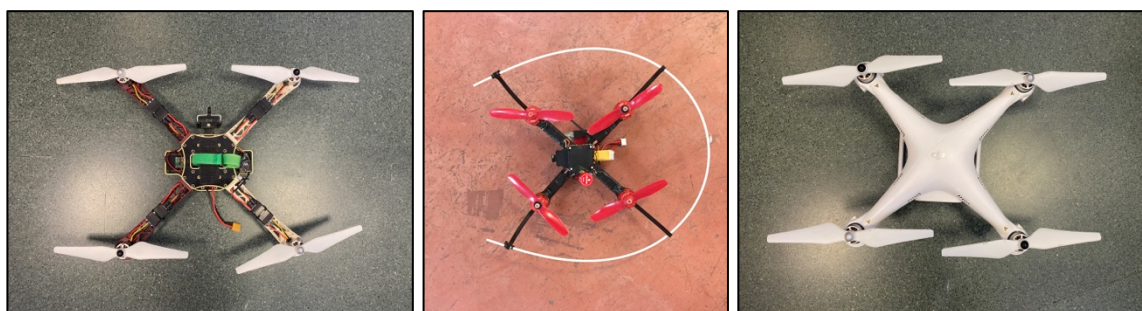


Figura 2 – De izquierda a derecha: Dron 1, 2 y 3

## 2.2 Hélices

La segunda campaña de medición se desarrolló en cámara anecoica (Dimensiones: 25 m<sup>2</sup>, 5 m de altura). El banco de pruebas consistió en un soporte metálico, simulando un brazo de dron, con un motor (Modelo U7 V2.0 490 rpm / V), que se colocó en el medio de la cámara anecoica mediante una plataforma metálica. El *array* de micrófonos se instaló frente al banco de pruebas, a un metro de la hélice.



Figura 3 – Montaje dentro de la cámara anecoica

Se midieron tres hélices diferentes con las características que se muestran en la Tabla 2. Las tres palas están hechas de carbono, lo que representa un buen equilibrio entre dureza y flexibilidad, aunque de con un coste elevado.

Tabla 2 – Modelos de hélices evaluadas

Hélice	Fabricante	Modelo	Tamaño	Material	Plegable
A	T-Motor	CF Prop	22x6.6R	Carbono	No
B	T-Motor	CF Prop	18x6.0L	Carbono	No
C	T-Motor	CF Prop	18.2x5.9L	Carbono	Yes



Figura 4 – De izquierda a derecha: Hélices A, B y C

El motor fue conectado a una fuente de alimentación (Modelo Polaron SMPS 1500) y controlado con un controlador PWM para poder seleccionar diferentes velocidades. El motor utilizado no es la mejor opción para este tamaño de hélices, por lo que se realizaron mediciones a media y máxima potencia. El número de revoluciones a media potencia se ajusta mejor a las recomendaciones para las hélices estudiadas.

### 3 Resultados

En este punto se muestran los resultados de las dos campañas de medición. Los resultados se basan en imágenes acústicas, tanto para el dominio del tiempo como para el de la frecuencia.

#### 3.1 Resultados huellas sonoras

Los siguientes resultados muestran un tiempo de integración de un segundo mientras el dron vuela estable sobre el *array* de micrófonos, a un metro de distancia, por bandas de tercio de octava de 630 a 8.000 Hz.

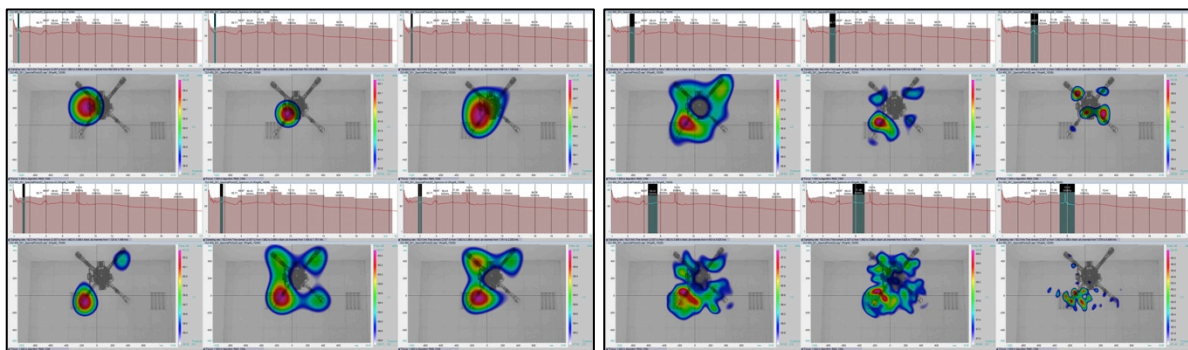


Figura 5 – Dron 1, análisis frecuencial por tercios de octava

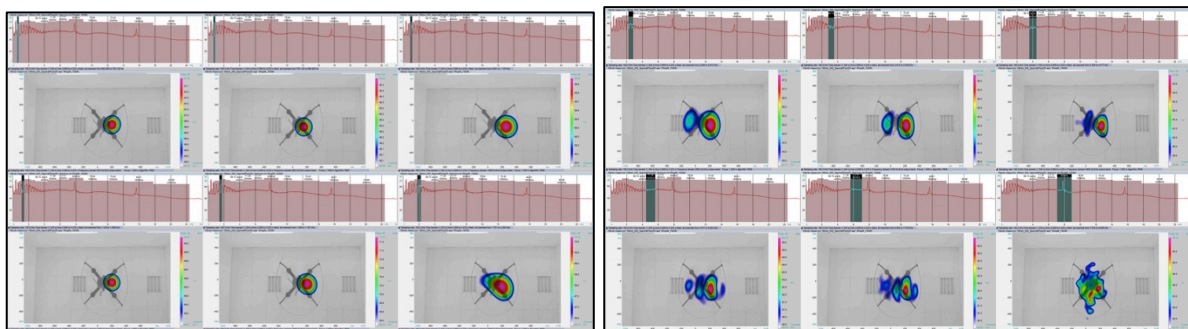


Figura 6 – Dron 2, análisis frecuencial por tercios de octava



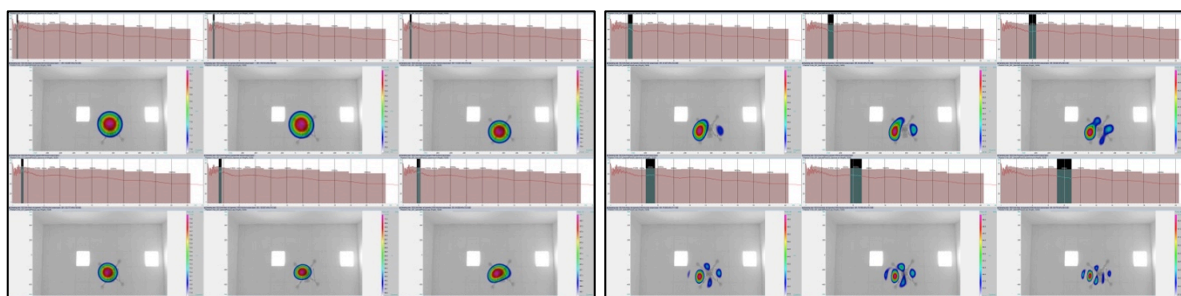


Figura 7 – Dron 2, análisis frecuencial por tercios de octava

Si queremos evaluar las emisiones de ruido desde el punto de vista humano, el análisis psicoacústico es la opción más adecuada para comparar resultados según estándares universales [2]. El enfoque no debe estar exclusivamente en el nivel de ruido, ya que la percepción del oído humano no es una ecuación lineal, lo que implica que algunas frecuencias son mejor identificadas por el oído humano y algunos tipos de ruidos son más molestos que otros. Los siguientes resultados se refieren a una medición que comienza con el dron volando estabilizado sobre el *array* de micrófonos a 1 metro y realiza una rápida aceleración ganando altura hasta aproximadamente 4,5 metros. Los gráficos muestran los niveles de ruido, *loudness*, *sharpness* y *roughness* referidos a una medición de 8 segundos.

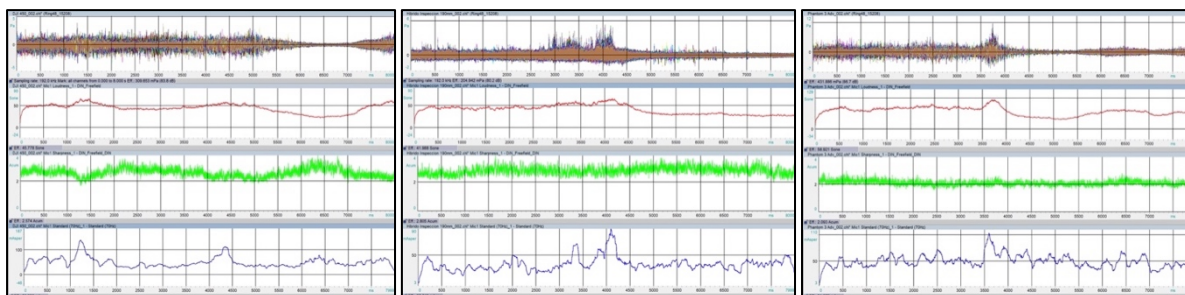


Figura 8 – De izquierda a derecha, análisis psicoacústico en dron 1, 2 y 3

Según los resultados, el nivel de *loudness* aumentó cuando los drones aceleraron, relacionado con el nivel de ruido, especialmente en el dron 3. Los niveles de *sharpness* se mantuvieron constantes, independientemente del momento de aceleración; y el parámetro *roughness* duplicó el nivel en un pico cuando comienza la aceleración.

En cuanto a los niveles de ruido, el valor global mayor es 86,7 dB para el dron 3; el más silencioso haciendo esta aceleración es el dron 2, emitiendo 80,2 dB. El dron 1 genera 83,2 dB.

### 3.2 Resultados Hélices

Los resultados desarrollados en hélices se centran en el ruido aerodinámico que generan las hélices y la afección dentro del brazo metálico, además de la emisión de ruido del motor; dado que las mediciones se realizaron dentro de una cámara anecoica, ninguna reflexión del suelo o las paredes influyó en las grabaciones.

Las primeras mediciones se realizaron utilizando una posición en contra del viento generado por la hélice, simulando la posición del receptor cuando el dron está volando. Luego, el brazo de metal se giró 180° para tomar una imagen acústica desde el punto de vista opuesto, con el motor frente al micrófono.

Las siguientes figuras muestran los resultados en el dominio temporal, con una selección de tiempo de dos segundos y el uso del algoritmo *High Dynamic Range* (HDR) para aumentar el rango dinámico y localizar las fuentes de ruido con menor nivel que la principal. El HDR es un algoritmo basado en el algoritmo de *beamforming* y que trabaja en el dominio del tiempo. Además, HDR es una técnica de deconvolución iterativa que aumenta la dinámica de una fotografía acústica y con ello facilita la separación de fuentes. Por lo tanto, este procedimiento es especialmente adecuado para señales que contienen varias fuentes que no se pueden identificar por separado porque la diferencia entre sus niveles de presión sonora excede el rango dinámico del *array* de micrófonos utilizado [3]. La imagen acústica muestra varios focos de ruido, los principales (dos o tres según la hélice analizada) se seleccionan con un icono con forma de chincheta, con el espectro relacionado con este punto a la derecha. De esta forma, es fácil identificar las frecuencias relacionadas con cada punto de ruido. En estas pruebas, el motor funciona a potencia media. Los resultados comparan la posición en contra del viento (izquierda) y la posición girada 180 grados (derecha).

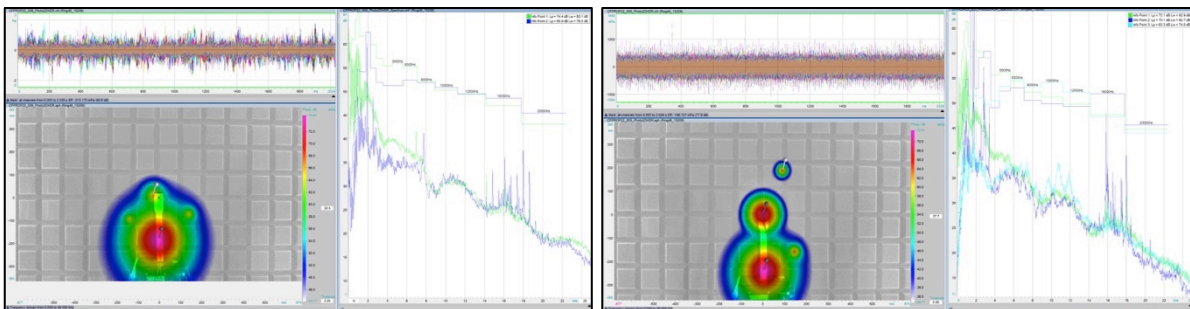


Figura 9 – Espectro frecuencial de los puntos seleccionados en la fotografía acústica, hélice A

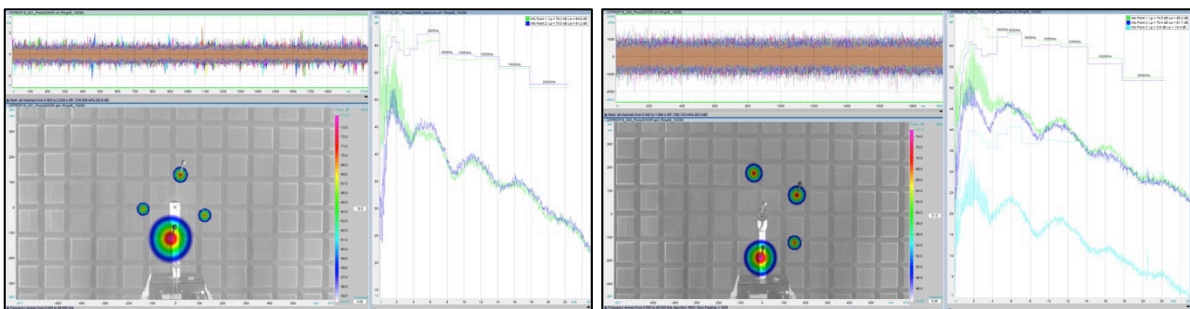


Figura 10 – Espectro frecuencial de los puntos seleccionados en la fotografía acústica, hélice B

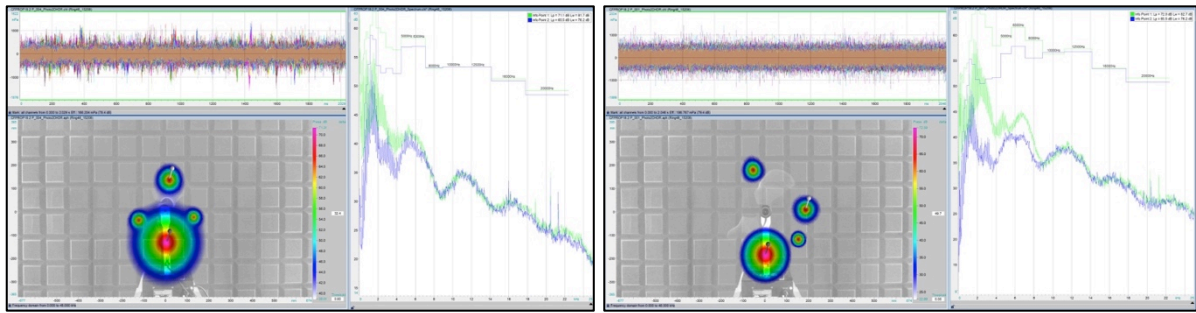


Figura 11 – Espectro frecuencial de los puntos seleccionados en la fotografía acústica, hélice C

Las siguientes figuras comparan los resultados entre las posiciones a un lado y al otro del motor para cada hélice, filtrado por tercios de octava entre 630 y 8.000 Hz, a potencia media, durante dos segundos de registro. Para aumentar el rango dinámico y visualizar más puntos de ruido se ha utilizado el algoritmo avanzado Clean-SC ("*Clean based on Source Coherence*"). Descrito de forma general, el algoritmo minimiza la influencia de la función de dispersión de puntos dependiente de la matriz (PSF) en un mapa previamente calculado para que varias fuentes se puedan distinguir claramente entre sí y especialmente de los lóbulos laterales dependientes de PSF, también conocidos como "fuentes fantasma".

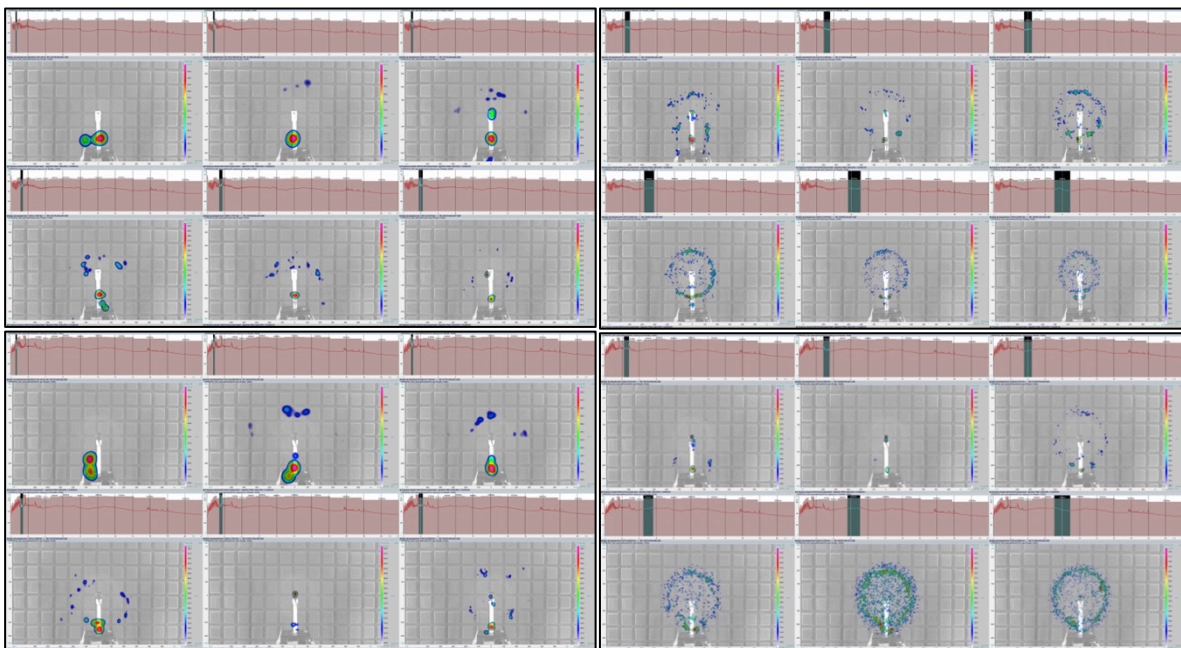


Figura 12 – Análisis frecuencial por tercios de octava, *downwind* (arriba), *upwind* (abajo), hélice A



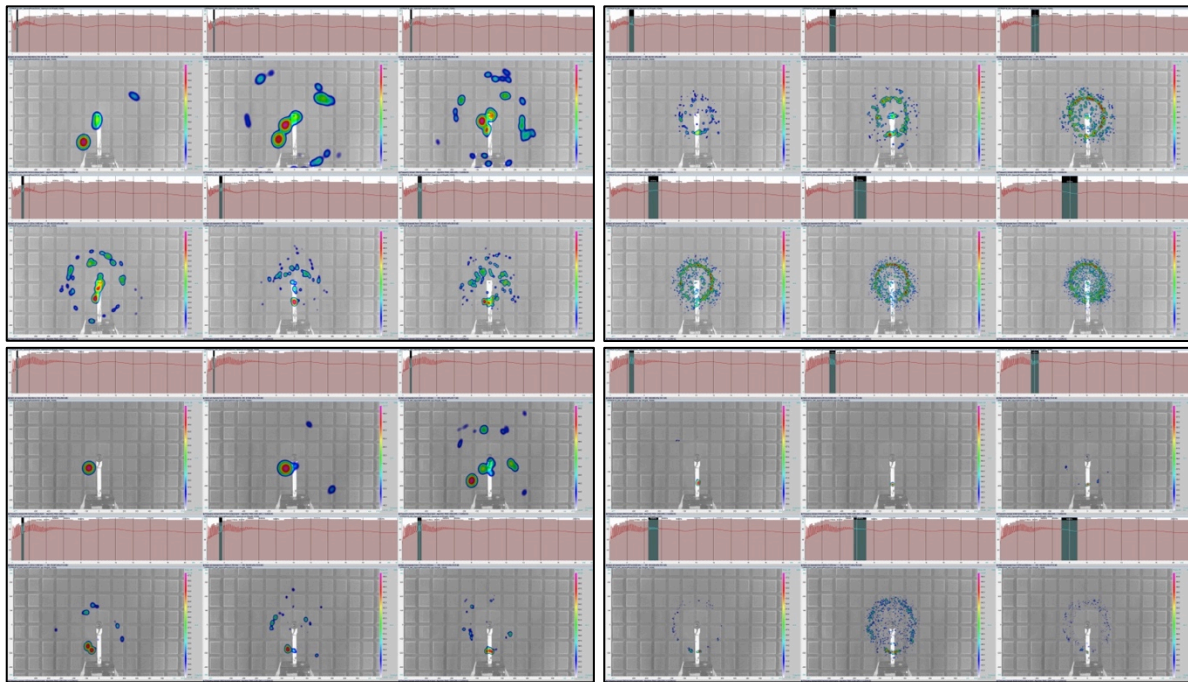


Figura 13 – Análisis frecuencial por tercios de octava, *downwind* (arriba), *upwind* (abajo), hélice B

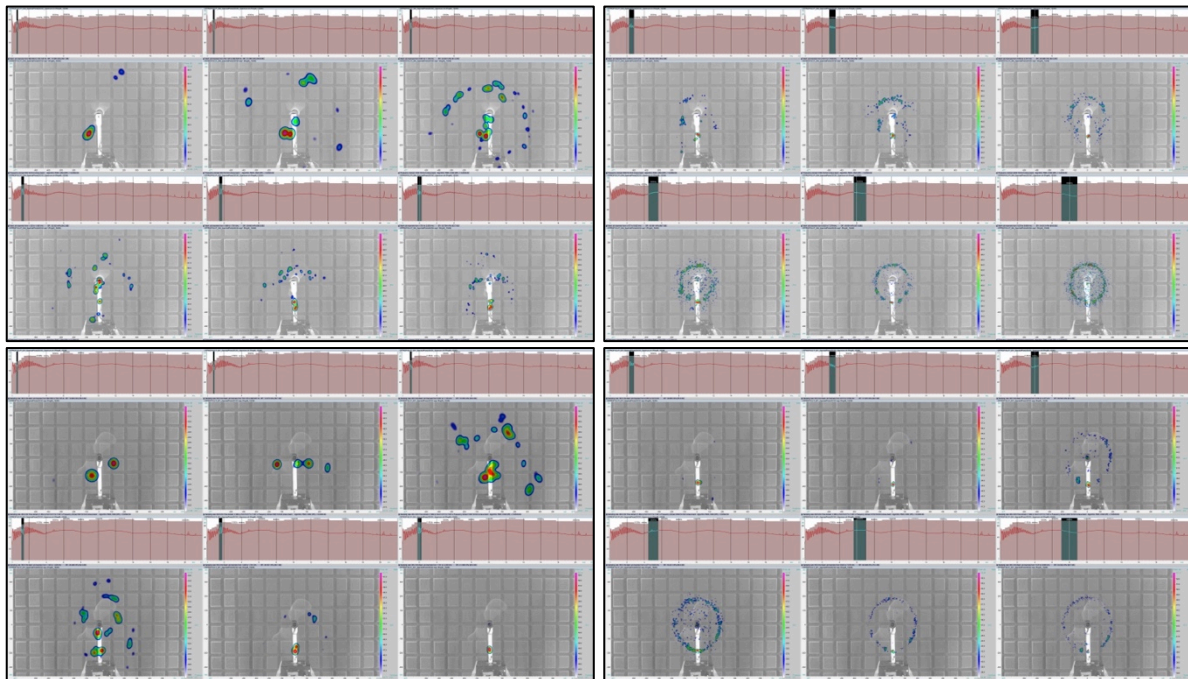


Figura 14 – Análisis frecuencial por tercios de octava, *downwind* (arriba), *upwind* (abajo), hélice C

Los resultados muestran la influencia del brazo, principalmente en las bandas de frecuencias medias-bajas. Esta influencia aparece en ambas posiciones, por lo que el vórtice creado alrededor del brazo produce una emisión sonora en ambos sentidos, hacia arriba y hacia abajo.

Al aumentar a la potencia máxima, el ruido creado alrededor del brazo es el de mayor emisión, enmascarando el ruido aerodinámico y la fuente de ruido sobre del motor. La siguiente figura representa los resultados de la hélice de tamaño 22 girando a máxima potencia en ambas posiciones de generación de viento.

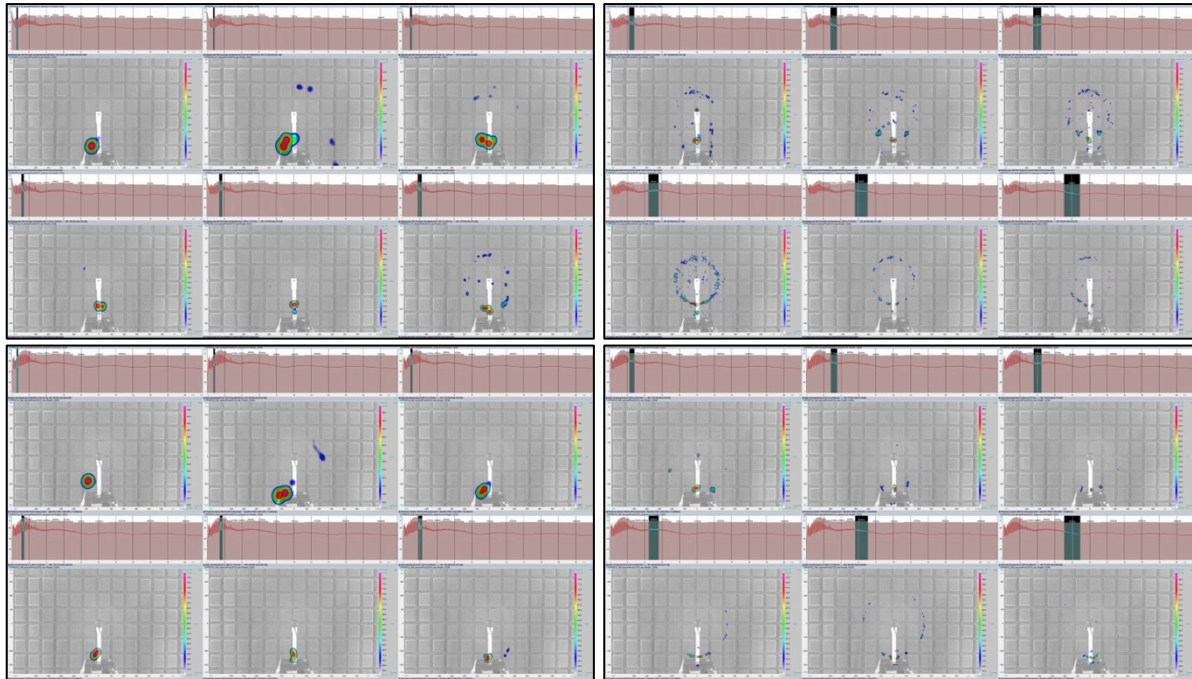


Figura 15 – Análisis frecuencial por tercios de octava, *downwind* (arriba), *upwind* (abajo), hélice A

Sobre las mismas medidas, a media y máxima potencia, se desarrolló un análisis psicoacústico para comprobar la diferencia entre distintas revoluciones por minuto y distintas hélices. Al igual que en el punto anterior sobre huellas acústicas en drones, los siguientes gráficos muestran los niveles de ruido, *loudness*, *sharpness* y *roughness* referenciados a la medición de 8 segundos, comenzando desde cero y acelerando hasta potencia media o máxima. Todos los resultados se refieren a una posición en contra del viento.

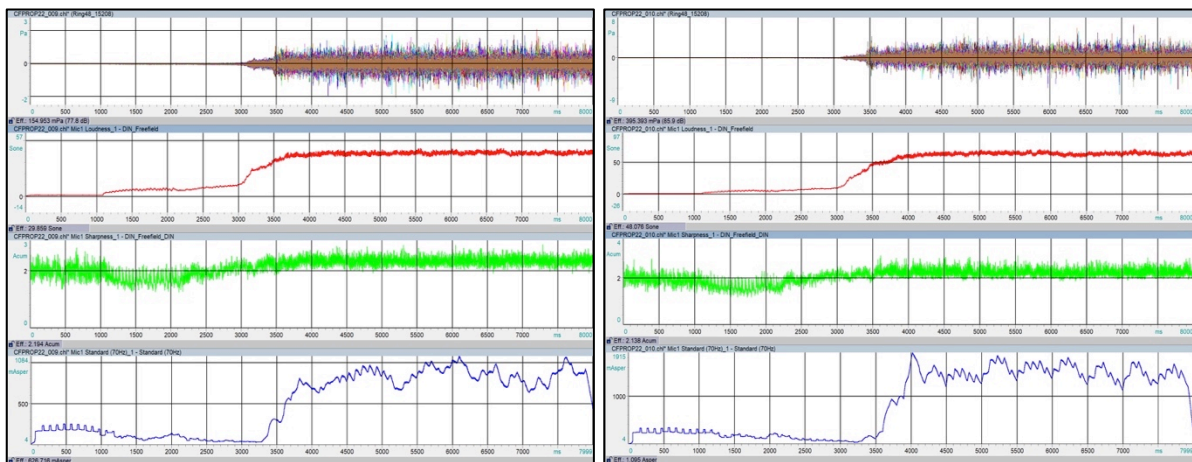


Figura 16 – Análisis psicoacústico, potencia media (izquierda) y máxima (derecha), hélice A

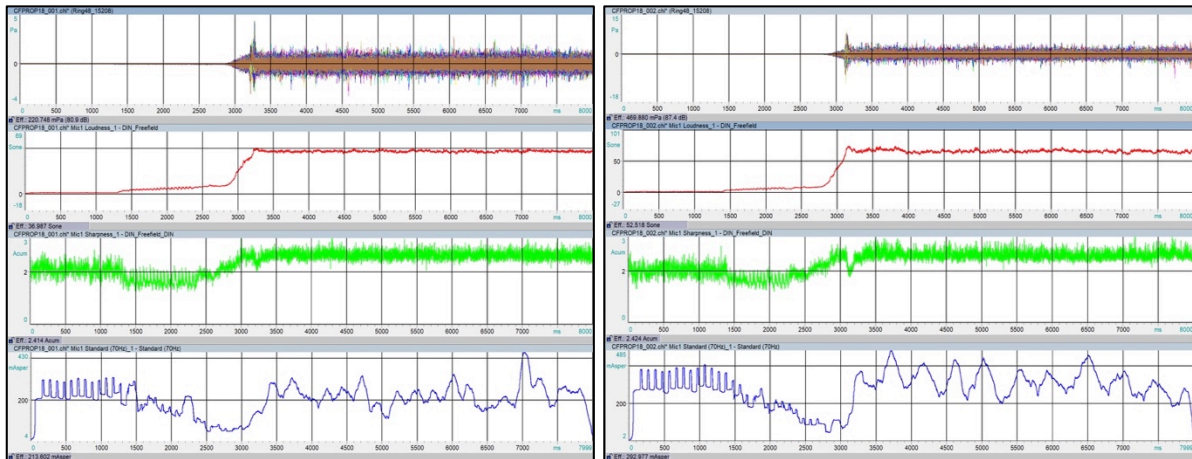


Figura 17 – Análisis psicoacústico, potencia media (izquierda) y máxima (derecha), hélice B

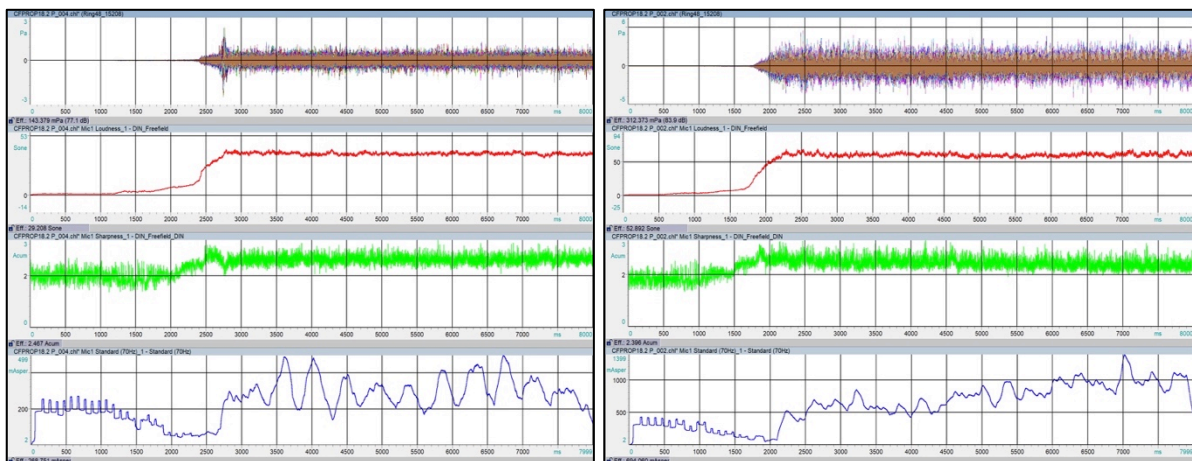


Figura 18 – Análisis psicoacústico, potencia media (izquierda) y máxima (derecha), hélice C

La segunda hélice, la más ruidosa, aumenta el nivel de ruido de 80,9 a 87,4 dB. La hélice A aumenta el nivel de ruido de 77,8 a 85,9 dB y la hélice C de 77,1 a 83,9 dB. Los niveles de *sharpness* se mantienen estables alrededor de 2.5 *acums* para todas las hélices, pero los niveles de *roughness* duplica su valor a máxima potencia, excepto para la hélice B (menos aumento).

Para estas campañas de medición no fue posible medir la señal de rpm de las hélices durante la prueba. Con la señal de rpm es posible utilizar el algoritmo *beamforming* rotacional, este algoritmo avanzado permite la detección de fuentes de sonido en las hélices en movimiento mediante una rotación virtual de los micrófonos [4]. Resultados utilizando este algoritmo avanzado se pueden encontrar en la publicación “*Validation of Optoacoustic Propeller Noise Examinations*” presentada en INTERNOISE 2019 [5].



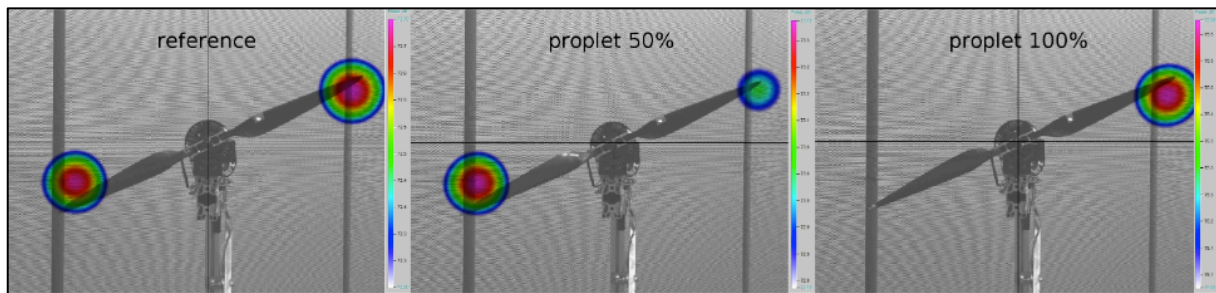


Figura 19 – Fig. 9 de la publicación “*Validaton of Optoacoustic Propeller...*” INTERNOISE

## 4 Conclusiones

Los análisis presentados proporcionan varios puntos de vista para abordar la localización de las emisiones de ruido de UAV / UAS y sus componentes. Los resultados generados mediante el uso de la cámara acústica muestran las diferentes huellas sonoras cuando un dron vuela sobre un *array* de micrófonos, en función de la frecuencia. Además, se ha analizado en detalle el impacto de hélices de diferentes tamaños y puntas, proporcionando información útil para validar el diseño de modelos según sus emisiones de ruido.

Además del nivel de ruido, los análisis psicoacústicos se pueden utilizar para comparar diferentes UAV / UAS o incluso diferentes modelos de hélice, proporcionando los estándares adecuados para establecer una comparativa.

La cámara acústica es un potente sistema capaz de proporcionar una amplia variedad de resultados basados en el dominio del tiempo y la frecuencia, identificando las emisiones de ruido en imágenes acústicas fáciles de entender.

## Referencias

- [1] Ralph Krause, Christian Friebe, Michael Kerscher and Christof Puhle. Investigations on noise sources on a contra-rotating axial fan with different modifications. *FAN*, 2018
- [2] Stefan Neugebauer, Benjamin Riebold and Dirk Döbler. Psychoacoustics in Imaging Localization of Sound Sources. *DAGA*, 2013
- [3] Knowledge base of the Acoustic Camera website. 2020
- [4] Michael Kerscher, Jan Heimann, Dr. Christof Puhle, Konrad Oeckel, Christian Friebe and Dr. Ralph Krause. Application of rotational beamforming algorithms on fast rotating sound sources. *BeBeC*, 2018
- [5] Konrad Oeckel and Sebastian Kümritz. Validation of Optoacoustic Propeller Noise Examinations. *INTERNOISE Madrid*, 2019