

## DETERMINACIÓN DE LA HUELLA ACÚSTICA DE AERONAVES

PACS: 43.50.Lj

Lillo Cuadrado, Alejandra; Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, María Soledad  
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal  
Universidad de Alicante  
Escuela Politécnica Superior de Alicante  
Edif. Politécnica II  
Campus de San Vicente del Raspeig. Apdo. 99  
03080 Alicante. España  
Tlf: 965 909 756  
Fax: 965 909 750  
Email: [jenaro@disc.ua.es](mailto:jenaro@disc.ua.es)

### ABSTRACT

In this work is developed a methodology [6] in order to determine the power emission pattern of different aircrafts in first place, and later on the acoustic print that these generate on the ground. This technique implies the recording of the noise of the approaches and routine taking off flights. Starting from their spectrogram, the trajectory (position of the aircraft in function of the time) is reconstructed. We will obtain also the spectrum of noise emitted (polar diagram directivity) taking on corrections by means of the ISO Norms 9613- 1, 9613- 2. With all these factors in mind, we determined the terminal-area noise mapping of the airport of the Altet (Alicante) by means of several techniques of calculation (LPN, LEPN), drawing the level contour noise, in NNI and NEF scale, in order to quantify the annoyance response for the population and household estimates.

### RESUMEN

En este trabajo se desarrolla una metodología [6] para determinar, el patrón de emisión de distintas aeronaves y posteriormente la huella acústica que éstas generan. Esta técnica implica la grabación del ruido de las aproximaciones y despegues rutinarios. A partir de su espectrograma, se reconstruye la trayectoria. También obtendremos el diagrama de potencia espectral de ruido emitido, se aplican correcciones por medio de las Normas ISO 9613 – 1 y 9613 – 2. A partir de estos primeros resultados, determinamos la huella acústica del aeropuerto del Altet (Alicante) mediante diferentes técnicas de cálculo (LPN, LEPN), y expresamos los resultados para la molestia estimada en mapas para las escalas de NNI y NEF.

### INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica es, en la actualidad, un fenómeno inherente a toda área urbana, y constituye un factor ambiental de singular impacto sobre la calidad de vida de sus habitantes. De todos los medios de transporte, la aviación es la que genera mayor cantidad de energía acústica, lo que unido a su dependencia de los aeropuertos, hace que las molestias que se ocasionan en las localidades situadas en las inmediaciones de éstos sean realmente importantes.

Mediante el método desarrollado, se obtendrán resultados del impacto acústico que las aeronaves generan. Para ello nos vamos a apoyar en las recomendaciones propuestas en el Anexo 16 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), entidad que se ocupa de regular los diversos aspectos de la actividad aeronáutica civil.

## OBJETIVOS

Determinar por métodos acústicos indirectos, a partir de los niveles de presión medidos en campo, basados en el "Filtro Peine" y el "Efecto Doppler", la geometría descriptiva de la trayectoria de sobrevuelo y la potencia de radiación de las aeronaves.

Obtener la huella acústica individual originada por distintos tipos de aeronaves, teniendo en cuenta el tipo de maniobra ya sea despegue o aterrizaje. Y la generada en un periodo de 24 horas, en función del número de operaciones que se efectúen en ese tiempo.

## METODOLOGÍA

Haciendo uso de un sistema de grabación relativamente sencillo, pero robusto y fiable:

- Micrófono de condensador G.R.A.S. 40AF type con protección anti-viento.
- Preamplificador e interfaz acústico ACOP 9200.
- MiniDisc Sony MZ-R37.

Nos situamos en cabecera de pista, alineados con la trayectoria de los aviones y se recoge su paso durante 30 segundos aproximadamente.

Una vez se dispongan las señales en el PC, el procesado de éstas se efectúa mediante el software *dBFA32* de 01dB, con el fin de realizar dos análisis:

- En banda estrecha, para calcular los correspondientes sonogramas y visualizar el Efecto Doppler y el Filtro Peine que se originan en el momento de la grabación.
- En tercios de octava desde 50Hz hasta 10kHz cada 100ms, para obtener la evolución espectral y exportarla como datos numéricos en ficheros texto al programa MATLAB® para su postprocesado.



Figura 1: Interconexiones del sistema

## Caracterización Física y Acústica de las Aeronaves

El efecto Doppler, permite estimar la velocidad de aproximación y alejamiento de la aeronave. Para su cálculo se aplica la ecuación (1), obtenida a partir de la geometría física que genera este efecto.

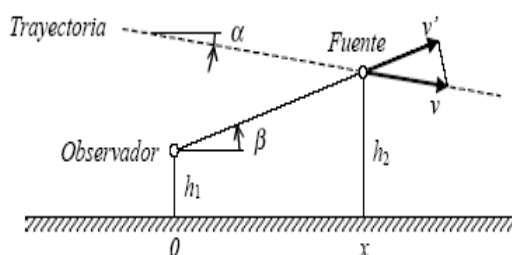


Figura 2: Geometría del efecto Doppler.

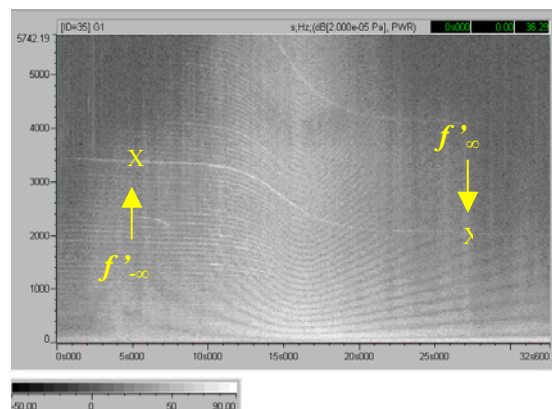


Figura 3: Sonograma. Señalización de las frecuencias detectadas.

$$v = \frac{c - v_w}{\cos \alpha} \cdot \frac{f'_{-\infty} - f'_{\infty}}{f'_{-\infty} \frac{c - v_w}{c + v_w} + f'_{\infty}} \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $v_w$  es la velocidad del viento,  $f'_{-\infty}$  es la frecuencia detectada por el observador cuando el avión se acerca y está todavía lejos y  $f'_{\infty}$  cuando ya ha pasado y se ha alejado considerablemente, dichas frecuencias se seleccionan del sonograma. En los aterrizajes, el ángulo de aproximación  $\alpha$  es aproximadamente  $3^\circ$  y en los despegues,  $\alpha$  es aproximadamente  $7.5^\circ$ .

El filtro-peine será aprovechado para estimar la altura de la aeronave unos segundos después de pasar por encima del micrófono, aplicando la siguiente ecuación:

$$h_2 = \sqrt{\frac{2(x^2 + h_1^2) \frac{c^2}{8f_1^2} - \left(\frac{c^2}{8f_1^2}\right)^2}{2\left(2h_1^2 - \frac{c^2}{8f_1^2}\right)}} \quad (2)$$

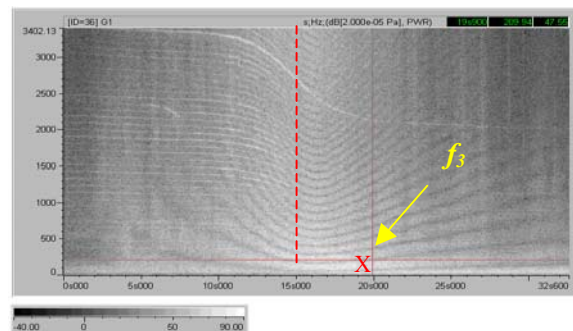


Figura 4: Sonograma. Señalización de  $f_3$ .

donde  $x$  es la posición de la aeronave en el suelo,  $h_1$  la altura del micrófono a 1.5 metros, y  $f_1 = f_3 / 3$ . Para ello se selecciona del sonograma la tercera frecuencia cancelada  $f_3$  por ser la más claramente visible.

A continuación, para reconstruir la trayectoria de sobrevuelo, se calculan las distintas alturas, distancias y posiciones, tomando como referencia la posición del micrófono y, en instantes tales, que los ángulos subtendidos por la línea que une la aeronave con el micrófono respecto a la vertical estén equiespaciados. En el presente caso se eligen múltiplos de  $15^\circ$ , calculando 11 puntos en total. Debido a la inclinación de  $3^\circ$  que llevan las aeronaves en los aterrizajes, los puntos donde se calculan los parámetros deben corregirse. Para los despegues se realizará la misma corrección pero en  $7.5^\circ$

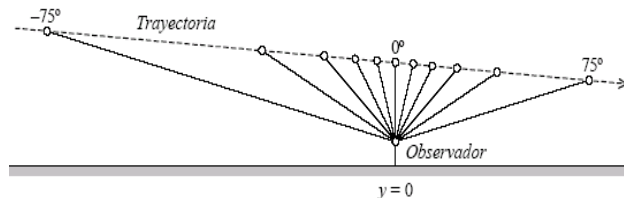


Figura 5: Determinación de los puntos en una trayectoria descendente.

Por último, para obtener los niveles de potencia corregidos por directividad de cada aeronave, a los niveles de presión obtenidos del espectrograma, que han sido sometidos a la directividad implícita en los 11 puntos seleccionados, se les añade los niveles de tres atenuaciones: por divergencia geométrica, atmosférica y por efectos en el terreno. El procedimiento de cálculo seguido en cada una de ellas se basa en la Norma ISO 9613 – 2. Obteniendo con la siguiente ecuación los niveles de potencia en las primeras 24 bandas de 1/3 de octava y en los 11 puntos.

$$L_w(24,11) = L_p(24,11) + A_{diver}(24,11) + A_{atmos}(24,11) + A_{terreno}(24,11); \text{ (dB)} \quad (3)$$

### Implementación de la Huella Acústica

El primer punto fue la elección del terreno donde se van a representar los resultados. Se eligió un nivel de presión umbral de recepción de 56dB, resultando una extensión de

aproximadamente 77x39 Kilómetros cuadrados. A continuación, se procesa la topografía correspondiente a esta área, en la cual se consideran como obstáculos para la transmisión del sonido, las grandes montañas o mesetas que superen la altura que lleve en ese punto la aeronave. Para facilitar los cálculos, no hemos tenido en cuenta las reflexiones y difracciones que pudiesen generar el encuentro con éstos obstáculos.

La superficie del terreno se procesa a modo de matriz, seleccionando el número de filas y columnas en que ésta se divide (NxM). La trayectoria de la aeronave se muestrea en intervalos de tiempo, obteniendo K posiciones. Como premisa, antes de procesar el terreno, se determinan las zonas donde se producen sombras acústicas debidas a la topografía. Si existe sombra, este punto se descarta para el análisis omitiendo los cálculos en él.

Se obtiene la huella acústica individual de cada aeronave, el parámetro descriptor del ruido es el **LEPN** (*Nivel Efectivo Percibido de ruido*) recomendado en la OACI y en la Norma ISO 3891. Para implementarlo, se procesan previamente los niveles de presión que se reciben en los distintos puntos del terreno, para cada posición de aeronave y en las 24 primeras bandas de 1/3 de octava [5]. Se debe establecer una correspondencia en el terreno con el patrón de emisión que conocemos bajo la trayectoria, bajo esta aproximación obtendremos los niveles de presión restando a los niveles de potencia las atenuaciones más influyentes: por divergencia geométrica, según la ISO 9613 – 2, y por efectos laterales según el método propuesto por la ECAC (European Civil Aviation Conference) [1], lo que corrige la simetría, asumida cilíndrica, para el patrón de directividad de la fuente.

Además, se calcula la huella acústica en un periodo de 24 horas, utilizando dos parámetros descriptores del impacto sonoro, como son: NNI (*Índice de ruido y número de eventos*) y NEF (*Noise Exposure Forecast*). Las ecuaciones que los describen son las siguientes:

$$NNI(PNdB) = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 10^{\frac{L_{PN \max,k}}{10}} \right] + 15 \log N - 80 \quad (4)$$

$$NEF(EPNdB) = 10 \log \left[ \sum_{i=1}^{n_D} 10^{\frac{L_{EPN,i}}{10}} + 16.67 \sum_{i=1}^{n_N} 10^{\frac{L_{EPN,i}}{10}} \right] - 88 \quad (5)$$

En la ecuación (4),  $N$  es el número de operaciones de sobrevuelo en el periodo considerado (en general 12 horas o 24 horas) y  $L_{PN \max,k}$  es el valor máximo del nivel  $L_{PN}$  correspondiente al  $k$ -ésimo sobrevuelo. En la ecuación (5),  $L_{EPN,i}$  es el nivel efectivo percibido del  $i$ -ésimo evento,  $n_D$  es el número de eventos diurnos (07-22h) y  $n_N$  el número de eventos nocturnos.

## RESULTADOS

En lo que sigue vamos a mostrar los resultados obtenidos para dos modelos de aeronave (Airbus 320 – 211 y Boeing 767 – 304ER) en las maniobras de despegue y aterrizaje:

### A) Diagrama polar de Potencia emitida por un Airbus 320 – 211 (Iberia)

En los diagramas de los aterrizajes se observan niveles más elevados en medias y altas frecuencias, sin embargo, en los despegues se encuentran en bajas y medias frecuencias

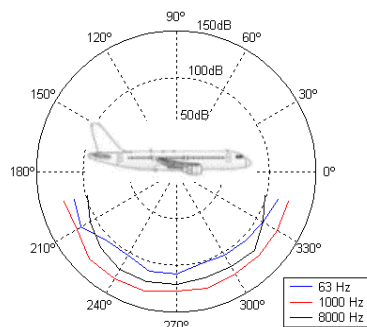


Figura 6: Diagrama polar ( $L_{WD}$ ) aterrizaje.

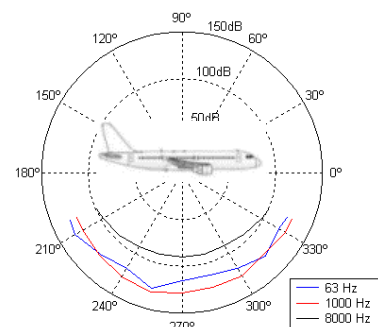


Figura 7: Diagrama polar ( $L_{WD}$ ) despegue.

## B) Huella acústica del paso de un Airbus 320 – 211 (Iberia)

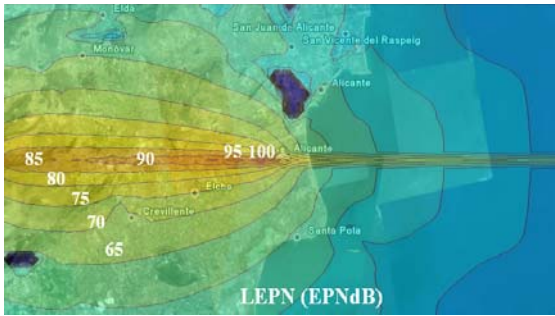


Figura 8: Huella acústica del aterrizaje.

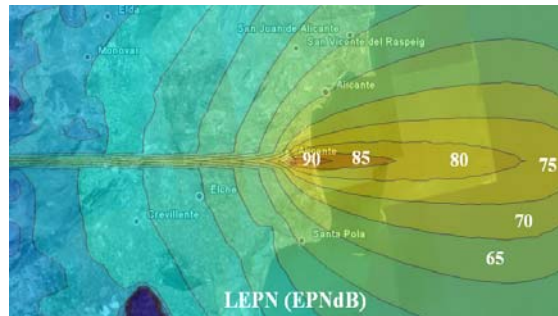


Figura 9: Huella acústica del despegue.

## C) Diagrama polar de Potencia emitida por un Boeing 767 – 304ER (Thomsonfly)

En los diagramas de los aterrizajes se observan niveles más elevados en medias y altas frecuencias, sin embargo, en los despegues se encuentran en bajas y medias frecuencias

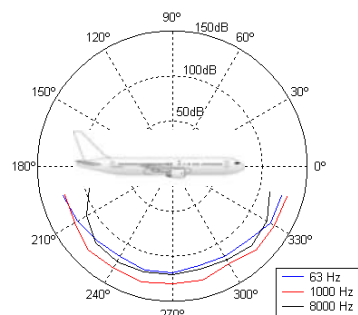


Figura 10: Diagrama polar ( $L_{WP}$ ) aterrizaje.

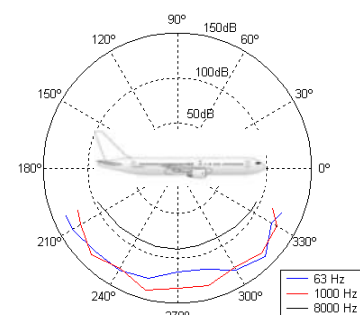


Figura 11: Diagrama polar despegue.

## D) Huella acústica del paso de un Boeing 767 – 304ER (Thomsonfly)

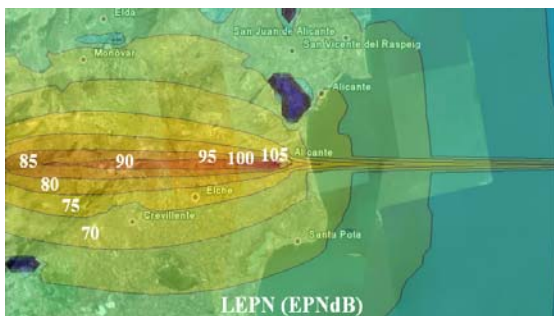


Figura 12: Huella acústica de un aterrizaje.

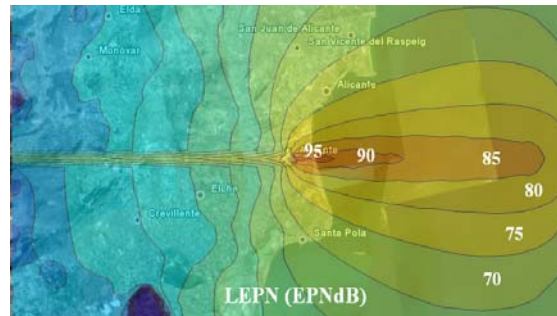


Figura 13: Huella acústica de un despegue.

## E) Huella diaria

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en un periodo de 24 horas mediante los parámetros NNI y NEF. Con el fin de poder comparar ambos indicadores, la huella generada pertenece al día 24 abril donde existieron 212 operaciones en total.

### E1) Niveles de Afección según el Índice de Ruido y Numero de eventos (NNI)

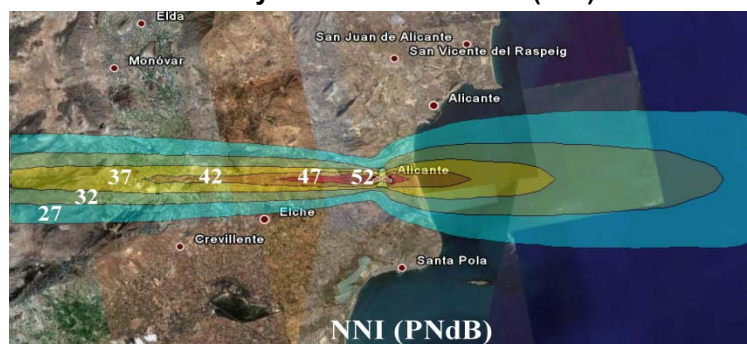
Según los valores [8] proporcionados para este parámetro por (*Wilson Committee on noise*):

50 ÷ 60 PNdB → Muy molesto

40 ÷ 50 PNdB → Molesto

30 ÷ 40 PNdB → Intrusivo

20 ÷ 30 PNdB → Notable





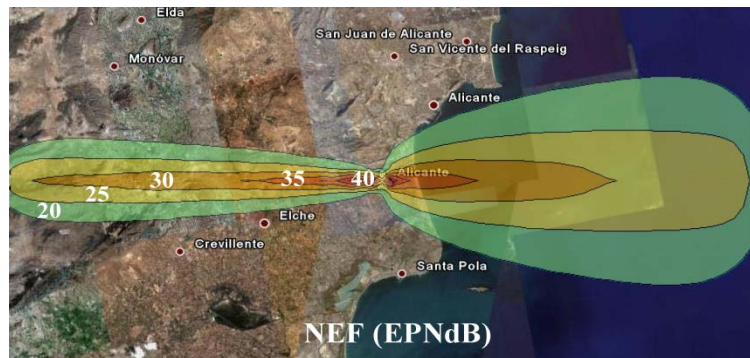
## E1) Niveles de Afección según el Índice de Previsión de Exposición al Ruido (NEF)

Observando los resultados según un criterio cercano al planeamiento del uso del suelo, se establece el siguiente criterio [8]:

>40 EPNdB → Suelo Industrial.

30 ÷ 40 EPNdB → Bloques Viv.

<30 EPNdB → V. Unifamilia.



## CONCLUSIONES

Se ha elaborado un método que permite determinar la huella acústica de aeronaves en el entorno de un aeropuerto, mediante el cálculo por métodos empíricos indirectos de la potencia de radiación sonora de los sistemas de propulsión, bajo los siguientes condicionantes:

- Diagrama de potencia corregido por directividad en el plano longitudinal, asumiendo simetría cilíndrica a la que se aplica posteriormente en el procesamiento de la huella acústica las correspondientes correcciones laterales.
- En una primera aproximación se suponen las trayectorias rectilíneas con un ángulo de inclinación y una potencia de radiación constante, puesto que las distancias procesadas (38 Km) se encuentran en el margen habitual en los protocolos de acercamiento.
- La topografía empleada sólo tiene en cuenta hitos de relativa importancia.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ECAC.CEAC Doc 29. *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports*. Adopted by the Twenty-First Plenary Session of ECAC (European Civil Aviation Conference), 2-3 July 1997.

[2] ISO 3891:1978 Acoustics – *Procedure for describing aircraft noise heard on the ground*.

[3] ISO 9613-1:1993 Acoustics – *Attenuation of sound during propagation outdoors – Part1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*.

[4] ISO 9613-2:1996 Acoustics – *Attenuation of sound during propagation outdoors – Part2: General method of calculation*.

[5] Lillo Cuadrado, Alejandra. *Determinación la huella acústica de aeronaves en el entorno de un aeropuerto, mediante el cálculo por métodos empíricos indirectos de la potencia de radiación sonora de los sistemas de propulsión*. Proyecto Fin de Carrera ITTSI, Universidad de Alicante, Junio 2006.

[6] Miyara, Federico; Cabanellas, Susana; Moscóni, Patricia; Pasch, Vivian, Yanitelli, Marta; Rall, Juan Carlos; Vazquez, Jorge. “*Manchas Acústicas: Ruido de aeropuertos*”. 4tas Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica, realizada en Rosario, Argentina, del 22 al 24 de octubre de 2001.

[7] OACI, *Protección del medio ambiente – Anexo16 al convenio sobre Aviación Civil Internacional – Volumen I: Ruido de las aeronaves*, Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1993.

[8] Truax, Barry. [Handbook for Acoustic Ecology](#), No. 5, Music of the Environment Series, World Soundscape Project. Vancouver: ARC Publications, 1978. [CD-ROM version](#), Cambridge Street Publishing, 1999.