

# Ruido de aeropuertos: Caracterización acústica de una aeronave a partir del ruido del sobrevuelo

Federico Miyara,<sup>a</sup> Susana Cabanellas,<sup>a,b</sup> Patricia Mosconi,<sup>b</sup> Vivian Pasch,<sup>a,b</sup>  
Marta Yanitelli,<sup>a,b</sup> Juan Carlos Rall,<sup>b</sup> Jorge Vazquez<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Facultad. de Arquitectura., Planeamiento y Diseño, Universidad Nacional de Rosario (UNR),  
Riobamba 220 bis, 2000 Rosario, Argentina

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura., Universidad Nacional de Rosario (UNR),  
Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Argentina  
E-mail:fmiyara@fceia.unr.edu.ar

## RESUMEN

*El Anexo 16 de la OACI sobre el ruido de aviación, así como la Circular N° 205 proponen métodos para predecir el ruido en las proximidades de los aeropuertos, incluyendo la determinación de varios indicadores que han demostrado ser útiles para la evaluación del ruido ambiental de origen aeronáutico. Sin embargo, requieren el uso intensivo de datos de emisión de ruido de las aeronaves que en la práctica son difíciles y costosos de obtener. En este trabajo se propone una metodología para obtener dichos datos a partir de la medición del ruido durante los sobrevuelos de despegue y aproximación. Para ello se graba el ruido digitalmente y la señal de audio registrada se procesa por computadora obteniendo su correspondiente espectrograma. En general pueden apreciarse dos patrones bien diferenciados de líneas espectrales. Primero, un conjunto de líneas que representan los armónicos de la componente tonal predominante de los motores (ya sean turbojet o turbohélice). Éstas responden al efecto Doppler, y su análisis permite aproximar la velocidad de la aeronave. Segundo, un conjunto de bandas con forma hiperbólica, con eje de simetría aproximadamente vertical. Son la consecuencia del efecto de interferencia entre el sonido directo y reflejado sobre el ruido de banda ancha de origen aerodinámico (filtro peine). Su estudio permite determinar la altura y el ángulo del sobrevuelo. Una vez establecida la geometría del sobrevuelo, se procede a vincular cada punto con el ruido medido (y analizado espectralmente) por computadora en cada dirección de interés, para confeccionar así el diagrama polar de emisión de ruido de la aeronave.*

## 1. Introducción

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) es la entidad que se ocupa de regular los diversos aspectos de la actividad aeronáutica civil, según el Convenio sobre Aviación Civil Internacional surgido en la Convención de Chicago, en 1944. En 1971 se cristaliza por primera vez el tratamiento de la cuestión del ruido aeronáutico en las proximidades de aeródromos, con la publicación del Anexo 16 al Convenio.<sup>[1]</sup> En 1981 se incorporan al Anexo las emisiones de los motores, quedando el Anexo titulado “Protección del Medio Ambiente”, cuyo Volumen I se refiere al Ruido de las Aeronaves. En este documento se exponen las normas y métodos recomendados internacionalmente.

Además del Volumen I del Anexo 16 hay otras publicaciones, de las cuales se destaca la Circular 205, “Método Recomendado para Calcular las Curvas de Nivel de Ruido en la Vecindad de los Aeropuertos”.<sup>[2]</sup> Estas publicaciones proporcionan métodos y recomendaciones para la evaluación del impacto acústico de los aeropuertos. Una di-

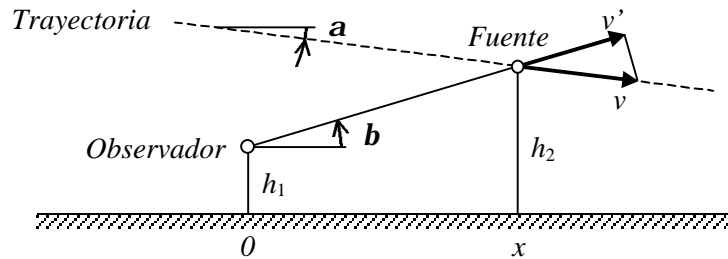
ficultad para ello es que requieren el uso de datos sobre la emisión de ruido de diversas aeronaves, datos cuya obtención es costosa, ya que requiere una serie de operaciones de sobrevuelo controladas a realizar fuera de las operaciones habituales. Esto exige apartar la aeronave de su uso comercial, lo cual implica pérdidas económicas, además del gasto de combustible y personal de tripulación.

Se propone aquí una metodología que promete ser útil para la determinación de los datos requeridos a partir de mediciones efectuadas durante las aproximaciones y despegues rutinarios de las aeronaves. Esta metodología involucra la grabación digital del ruido de sobrevuelo, y, a partir de su espectrograma, reconstruir primero la trayectoria (posición de la aeronave en función del tiempo). Una vez asociado cada instante de tiempo con una posición determinada, es posible obtener el espectro del ruido emitido en cada dirección, para lo cual se procede a efectuar correcciones por medio de las Normas ISO 9613-1 y 9613-2.<sup>[3,4]</sup> El resultado obtenido es el espectro de nivel de potencia sonora corregido por directividad de la aeronave como fuente de ruido.

Algunos trabajos anteriores publicados por Ferguson<sup>[5,6]</sup> se han referido a algunos aspectos de la trayectoria de la aeronave basándose exclusivamente en el efecto Doppler acústico. En el presente trabajo se explora también el efecto denominado “filtro peine” para estimar la velocidad y la altura de la aeronave en función del tiempo.

## 2. El efecto Doppler acústico

El efecto Doppler es común a todos los fenómenos ondulatorios y se produce siempre que hay un movimiento relativo entre una fuente y un receptor. Se caracteriza por un cambio aparente de la frecuencia en el receptor con respecto a la realmente emitida.



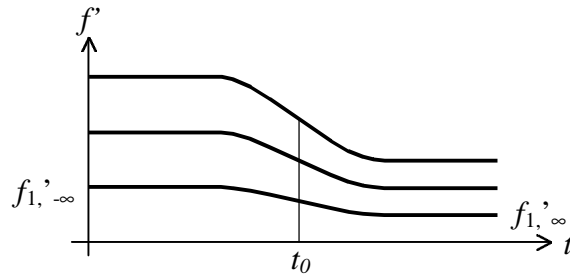
**Figura 1.** Trayectoria de una aeronave sobrevolando la posición del observador. Los ángulos por debajo de la horizontal se consideran negativos.

Llamando  $f$  a la frecuencia realmente emitida y  $f'$  a la frecuencia observada,  $c$  a la velocidad del sonido y  $v_w$  a la velocidad del viento (que suponemos paralelo al terreno), entonces

$$f' = \frac{c - v_w \cos \beta}{c - v_w \cos \beta + v \cos (\beta - \alpha)} f. \quad (1)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son respectivamente los ángulos entre la horizontal y la trayectoria de la aeronave y el subtendido por la línea que une al observador con la aeronave, según se muestra en la figura 1.

Habitualmente,  $f$  será la frecuencia de la hélice en el caso de los aviones propulsados a hélice (baja frecuencia), y la frecuencia principal de las turbinas en el caso de los turbojets (alta frecuencia). En la figura 2 se muestra el espectrograma idealizado correspondiente a los tres primeros armónicos de la frecuencia principal.



**Figure 2.** Representación espectrográfica del efecto Doppler, en la que se han indicado en forma idealizada los tres primeros armónicos del tono principal. En el espectrograma real las líneas aparecen en realidad como zonas sombreadas.

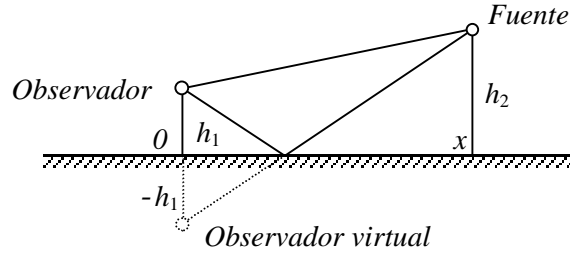
Para determinar la velocidad  $v$ , se seleccionan dos condiciones:  $x$  muy grande y positivo y  $x$  muy grande y negativo, lo cual permite que  $\beta$  se aproxime a 0 y  $\pi$  respectivamente. De aquí se obtienen dos ecuaciones de las que puede eliminarse una de las incógnitas,  $f$ , y despejarse  $v$  (suponiéndola aproximadamente constante):

$$v = \frac{c - v_w}{\cos \alpha} \frac{f'_{-\infty} - f'_{\infty}}{f'_{-\infty} \frac{c - v_w}{c + v_w} + f'_{\infty}}, \quad (2)$$

donde  $f'_{-\infty}$  es la frecuencia detectada por el observador antes del sobrevuelo y  $f'_{\infty}$  después del mismo.

### 3. El efecto del “filtro-peine”

El efecto filtro-peine es el resultado de la interferencia destructiva entre el sonido directo que llega a un micrófono (o al oído) y el que se ha reflejado en una superficie próxima, en general, el suelo. Este efecto es muy común, aunque generalmente no se le presta la misma atención que al efecto Doppler. Aparece, por ejemplo, al pasar caminando frente a un extractor de aire o equipo de aire acondicionado. Originalmente se observó en la microfónica de señales de audio (locución, música), donde suele ser un problema insidioso que debe ser evitado. En el presente caso será aprovechado para estimar la altura de una aeronave. En la figura 3 se puede apreciar la disposición geométrica para el análisis del filtro peine.



**Figura 3.** Interferencia entre el sonido proveniente directamente de la fuente y el reflejado produce el efecto de filtro-peine

Si la diferencia entre la longitud del camino directo y el reflejado es igual a media longitud de onda del sonido, o a cualquiera de sus múltiplos impares, las ondas llegan al observador en contrafase, produciéndose una interferencia destructiva por la cual ambas ondas (directa y reflejada) se cancelan. Esta situación se presenta cuando

$$\sqrt{(h_2 + h_1)^2 + x^2} - \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + x^2} = (2n - 1) \frac{\lambda}{2} = \frac{2n - 1}{f} \frac{c}{2}, \quad (3)$$

por lo tanto

$$f = (2n - 1) \frac{c}{2} \frac{1}{\sqrt{(h_2 + h_1)^2 + x^2} - \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + x^2}}. \quad (4)$$

Los múltiplos pares, por el contrario, corresponderán a longitudes de onda coincidentes con la diferencia de longitudes de los caminos (o algún submúltiplo), por lo tanto llegarán al observador siempre en fase, reforzándose. Habrá, así, una alternancia de frecuencias acentuadas y otras atenuadas.

En la práctica, la absorción sonora del terreno (por ejemplo, por la presencia de césped o hierbas) puede reducir la amplitud del sonido reflejado y hasta producir algún desplazamiento de fase asociado a una impedancia acústica no resistiva. Esto tiene como consecuencia que la cancelación sea incompleta. En la figura 4 se muestra el espectrograma idealizado correspondiente al efecto peine, y la forma, más difusa, que adopta en la práctica. De todas las líneas consideradas, conviene seleccionar la tercera frecuencia suprimida, ya que suele ser la que está mejor definida desde el punto de vista gráfico.

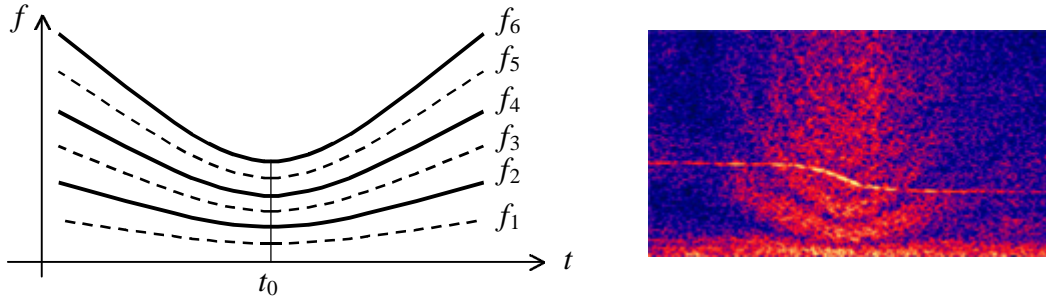
#### 4. Metodología

En primer lugar se debe identificar un patrón similar al de la figura 2. Las frecuencias discretas detectadas corresponden, según el caso, a la frecuencia debida a la hélice (baja frecuencia) o a la turbina (alta frecuencia). Para estimar la velocidad a partir de la ecuación 2 se utilizan las frecuencias detectadas unos segundos antes y unos segundos después de  $t_0$ . Debido a la considerable velocidad del aeroplano, estas frecuencias aproximan bastante bien a  $f'_{-\infty}$  y  $f'_{\infty}$ .

Una vez conocida la velocidad se puede determinar la proyección vertical del avión sobre el terreno  $x$  en el instante  $t$  por medio de la ecuación

$$x = v \cdot t \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Luego, para diversos instantes se estima la correspondiente frecuencia cancelada  $f_3$  por interpolación gráfica a partir del espectrograma, y de allí se puede determinar la correspondiente altura  $h_2$  a partir de la ecuación 4. Los instantes  $t_k$  se seleccionan de manera que la diferencia  $\beta - \alpha$ , es decir el ángulo subtendido por el observador desde el eje de la aeronave (que se encuentra inclinado debido a la inclinación de la trayectoria), adopte valores convenientes como  $15^\circ, 30^\circ, \dots, 165^\circ$ . De ser necesario, podría intentarse una resolución angular mayor.



**Figura 4.** Espectrograma representativo del efecto filtro-peine en el cual se supuso velocidad y altitud constantes (si n lo son, se pierde la simetría). Las líneas de trazos corresponden a las frecuencias canceladas, y las líneas continuas a las reforzadas. En la práctica son ambas en realidad áreas sombreadas, no líneas, como se muestra en el ejemplo de la derecha (en el cual se puede ver también una línea correspondiente al efecto Doppler). En el instante  $t_0$  la aeronave se encuentra justo sobre el observador.

Luego se procede a filtrar la señal registrada por medio de filtros de banda de octava de 63 Hz a 8 kHz o de tercio de octava desde 50 Hz a 10 kHz, y para cada banda  $i$  se obtiene el nivel equivalente (promedio energético) sobre intervalos cortos centrados alrededor de los instantes  $t_k$ , obteniendo los niveles de banda  $L_{i,k}$ . A partir de los  $L_{i,k}$  y la posición de la aeronave, se determina el nivel de potencia sonora corregido por efectos de la directividad, de acuerdo a lo prescrito por la Norma Internacional ISO 9613, Parte 2.<sup>[4]</sup>

$$L_{WD,i,k} = L_{W,i,k} + D_k = L_{i,k} - A_{i,k}, \quad (6)$$

donde  $D_k$  es un término de corrección por directividad, y  $A_{i,k}$  un término de atenuación debida a varios fenómenos, dado por

$$A_{i,k} = A_{div} + A_{atm} + A_{terreno} + A_{pantalla} + A_{misc}. \quad (7)$$

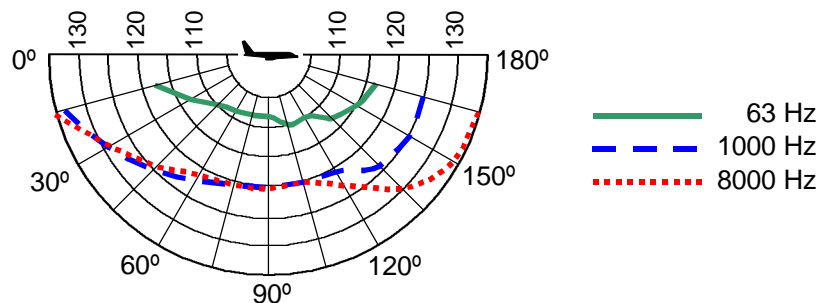
Este término contempla la divergencia geométrica atenuación atmosférica, efectos del terreno, efectos de apantallamiento si los hubiere, y efectos misceláneos como edificación, vegetación, etc. La atenuación por divergencia viene dada por

$$A_{div} = 20 \log (d/d_0) + 11 \text{ dB} \quad (8)$$

donde  $d$  es la distancia desde la fuente y  $d_0 = 1$  m (distancia de referencia). La atenuación atmosférica depende de la temperatura ambiente y la humedad relativa ambiente, además de la frecuencia, y puede estimarse por aplicación de la Norma Internacional ISO 9613 Parte 1.<sup>[3]</sup> El término  $A_{terreno}$  tiene en cuenta la interferencia entre el sonido directo y el reflejado, y está especificado por la norma ISO 9613 Parte 2. Se refiere al mismo fenómeno objeto de este estudio, pero enfocado desde un punto de vista diferente: conocida la posición, estimar el efecto de interferencia, mientras que en este trabajo se lo utiliza para identificar la posición a partir de las frecuencias canceladas o atenuadas. Por último, los dos términos restantes en el presente caso pueden ser descartados ya que se evitan intencionalmente los efectos de apantallamiento, las reflexiones de superficies que no sean el terreno, y las condiciones de vegetación densa (inexistente en los predios destinados a aeródromos)

## 5. Resultados

La figura 5 muestra un diagrama polar del nivel de potencia sonora corregida por directividad obtenido de acuerdo al método expuesto para una aeronave. Repitiendo las mediciones para varias aeronaves del mismo tipo, puede obtenerse un promedio representativo de las operaciones de aproximación y despegue en condiciones reales. Esta información puede ser utilizada para los estudios de impacto ambiental sin necesidad de recurrir a ensayos costosos.



**Figura 5.** Diagrama polar del nivel de potencia sonora corregido por directividad,  $L_{WD}$ , para tres valores de frecuencia.

## Reconocimientos

Los datos de campo utilizados en este estudio fueron obtenidos dentro del Aeropuerto Metropolitano “Jorge Newbery” (Aeroparque), gracias a las gestiones realizadas por el Dr. Víctor Alderuccio y con la autorización de sus autoridades. Se agradece asimismo la colaboración del Lic. Hugo Amaya

## Referencias

1. OACI, "Protección del Medio Ambiente - Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional - Volumen I: Ruido de las Aeronaves". Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1993.
2. OACI, "Método recomendado para calcular las Curvas de Nivel de Ruido en la Vecindad de los Aeropuertos". Circular 205-AN/1/25. Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1988.
3. ISO 9613-1:1993 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere
4. ISO 9613-2:1996 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation
5. Ferguson, Brian, "A ground-based narrow-band passive acoustic technique for estimating the altitude and speed of a propeller-driven aircraft". Journal of the Acoustical Society of America, 92 (3), September 1992.
6. Ferguson, Brian; Quinn, Barry, "Application of the short-time Fourier transform and the Wigner-Ville distribution to the acoustic localization of aircraft". Journal of the Acoustical Society of America, 96 (2), Part 1, August 1994.