



JORNADAS NACIONALES DE ACUSTICA

Zaragoza, Abril 1989

RUIDO DEL TRAFICO AEREO

Juan Lladó Paris *; José Luis Pelegrín Duce **

* Profesor Titular de Universidad Area Ing. Mecánica. ETSIIIZ

** Profesor Asociado del Area de Estadística. ETSIIIZ
María de Luna 3. 50015 Zaragoza

INTRODUCCION

El aumento de la potencia de los motores de propulsión de las aeronaves y la importancia cada día más creciente del tráfico aéreo traen consigo unos niveles de ruido muy elevados y molestos a los que se encuentran sometidos los pasajeros y tripulantes de las aeronaves y en mayor grado las personas que viven o trabajan en zonas próximas a los aeropuertos, y a las trayectorias de los vuelos, es por ello que desde principios de los años 60, diversos organismos públicos y privados le están prestando una atención especial, sin solucionarlo de forma satisfactoria para todos los implicados.

De otra parte, el cada día más frecuente sobrevuelo de las ciudades, y el aterrizaje en zonas de las mismas, por parte de helicópteros, introduce una nueva dimensión al tema del ruido generado por aeronaves, al aumentar de modo considerable el número de personas que se verán afectadas.

Pero quizás, el punto más conflictivo del ruido de aeronaves hace referencia a la estrategia militar ¿acaso no interesa una aeronave silenciosa en su modo de operar? Las ventajas de disponer de una aeronave de estas características y capaz de volar en cotas bajas, la haría indetectable por los medios de defensa terrestres. Estas consideraciones inducen a pensar que las investigaciones y adelantos en la reducción del ruido producido por una aeronave, sin disminuir sus prestaciones, es un tema de la máxima seguridad y secreto.

El planteamiento del estudio sobre el ruido emitido por aeronaves requiere contestar e indagar en tres cuestiones:

- ¿A qué se debe y cómo se transmite ruido?, es decir definir y analizar las fuentes sonoras, así como la forma de propagación de las ondas a través de la atmósfera.
- ¿Quiénes resultan afectados y qué molestias les ocasiona?, donde se tendrá presente el sujeto, ya sea tripulante, pasajero, personal de tierra de un aeropuerto, o vecino de un aeropuerto, entre otros, y su respuesta fisiológica y psicológica con vistas a plantear una política de reducción y control.

- ¿Qué posibilidades existen para aminorar el ruido y qué acciones deberán emprenderse?, en definitiva, reducir los niveles sonoros a valores aceptables que no ocasionan molestias en la persona.

Para abordar estas tres cuestiones, se precisan una serie de conocimientos científico-técnicos y sociales, que es difícil reunir en un único individuo. Debido a lo complejo y laborioso que resultaría tratar o exponer con sumo detalle cada uno de estos puntos aplicados a las aeronaves actuales, se ha estimado más interesante efectuar una visión global del tema, sin particularizar en aspectos concretos para los que se precisan unos fundamentos básicos de tipo teórico muy especializados. En esta comunicación, se describirán: las principales fuentes sonoras de una aeronave, en concreto los turboreactores; los principios de propagación de las ondas sonoras en el aire, donde la atenuación debida a las condiciones climatológicas tiene su importancia; las magnitudes que permiten evaluar el efecto que en la población ocasiona el ruido generado por el sobrevuelo de aeronaves; y, finalmente se efectúan unas breves consideraciones relativas a la reducción y control del ruido con vistas a establecer medidas que permitan mejorar la calidad de vida de los vecinos de aeropuertos, y zonas de sobrevuelo de aeronaves.

PROPAGACION DE ONDAS SONORAS EN EL AIRE

La energía sonora de una fuente viaja por el medio, ya sea a través de estructuras sólidas o en el aire. Al tratar del ruido producido por aeronaves, se deberá hacer especial mención de las ondas que se propagan a través de la atmósfera, y de los mecanismos que reducen su energía a lo largo del medio de transmisión. Estos mecanismos son: la difracción o dispersión de la energía (si las ondas se suponen de tipo esférico, emitidas por una fuente puntual, en condiciones de campo libre, se produce una disminución de 6 dB en la presión sonora cada vez que se dobla la distancia a la fuente, mientras que si la fuente es lineal, la atenuación será de 3 dB al duplicar la distancia); la reflexión de la energía; y la absorción. En este apartado, se presenta un tratamiento muy simplificado de un problema mucho más completo.

Una fuente sonora puede ser considerada como un foco de emisión puntual, siempre que sus dimensiones sean pequeñas en relación a la distancia que la separa del receptor. La fuente puntual ideal, produce una perturbación que en condiciones de campo libre, se propaga con un frente de onda esférico en 3D, como las ondas que generaría una aeronave volando a 1000 metros de altura, por ejemplo, para un individuo situado en tierra. En este caso, se dispone de un espacio de propagación ilimitado (figura 1), midiéndose el mismo campo sonoro en todas direcciones. La intensidad sonora, I , es el flujo de energía, W , por unidad de superficie, viene dada por la expresión:

$$I = W/4 \pi r^2$$

donde: r , distancia del frente de ondas a la fuente.

Si la aeronave se encuentra en vuelo rectilíneo, pero no muy alejada del receptor situado en tierra, se tendrá una fuente lineal (figura 1). Se admite, que el ruido procede de la superposición de los ruidos, ocasionados por fuentes puntuales, distribuidas linealmente a lo largo de la trayectoria de la aeronave, con la misma potencia acústica, de modo que puede definirse una potencia acústica por unidad de longitud. El frente de propagación de la onda será una superficie cilíndrica, de eje la trayectoria rectilínea de la aeronave.

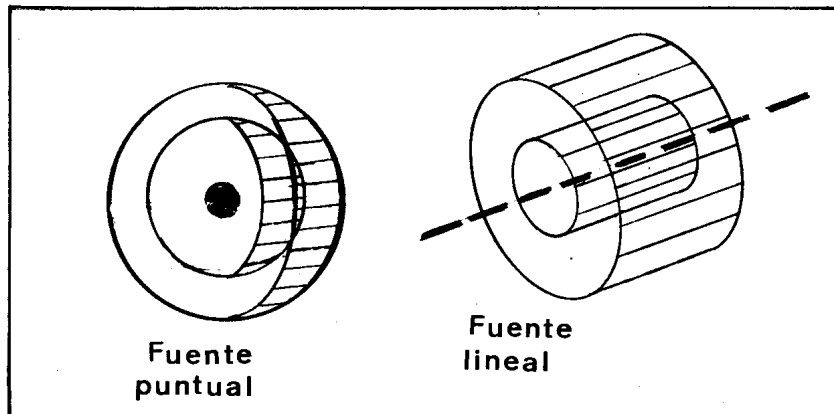


Figura 1.- Propagación esférica y cilíndrica de las ondas sonoras

Cálculo teórico aproximado del nivel efectivo de exposición sonora. L_{AE}

En la norma ISO 3891, se definen los valores aproximados de los niveles efectivos de ruido percibido durante el sobrevuelo de aeronaves, L_{AE} y L_{EPN} (aprox.).

Si se admite una fuente de ruido, P , de tipo puntual (figura 2), que se mueve según una recta con velocidad constante, v (la potencia acústica emitida será constante), y que la propagación sonora se efectúa en condiciones de campo libre, es decir, no existe atenuación, se verifica, para un receptor situado a una distancia, l , de la fuente emisora, que el nivel sonoro detectado, $L(t)$, es:

$$L(t) = L_{Amax} + 10 \log\left(\frac{h}{l}\right)^2$$

siendo: L_{Amax} , nivel sonoro máximo que se percibe cuando l coincide con h . En esta posición se elegirá el origen de tiempos, $t = 0$.

La relación $\left(\frac{h}{l}\right)^2$, representa el factor de atenuación del nivel sonoro debido a la distancia entre receptor y fuente. La posición de la fuente para obtener una atenuación de 10 dB respecto del valor máximo, L_{max} , vendrá dado por:

$$\left(\frac{h}{l}\right)^2 = \frac{1}{10}$$

y, al verificarse: $l^2 = x^2 + h^2$, con $x = vt$, resultará:

$$\frac{vt}{h} = \pm 3$$

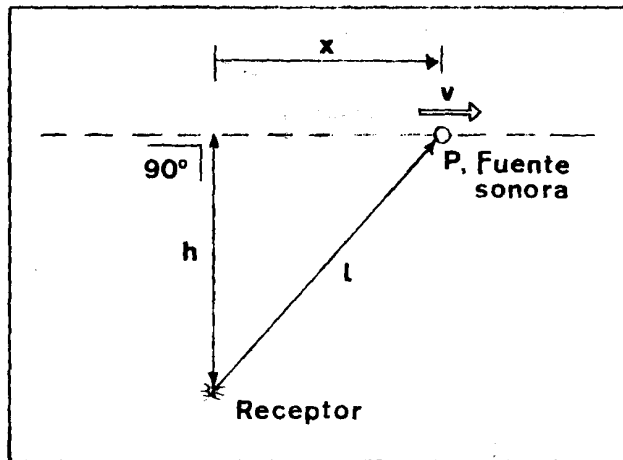


Figura 2.- Fuente puntual desplazándose con movimiento rectilíneo uniforme

Por otra parte, el nivel efectivo de exposición sonora, L_{AE} , es:

$$L_{AE} = L_{max} + 10 \log \frac{1}{T_{Ref}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{v}{h}\right)^2 t^2} dt$$

si se define: $\sigma = \arctg \frac{vt}{h}$, y se diferencia, se obtiene:

$$dt = \frac{h}{v} \frac{d\sigma}{\cos^2 \sigma}$$

siendo: $\frac{1}{1 + \left(\frac{v}{h}\right)^2 t^2} = \cos^2 \sigma$, valores que sustituidos en la expresión

del L_{AE} :

$$L_{AE} = L_{Amax} + 10 \log \frac{h}{v \cdot T_{Ref}} \cdot \pi$$

si se toma $\pi = 3$ en lugar de 3'1416, el error teórico que se comete es del orden de 0,2 dB.

A partir de esta expresión final, puede afirmarse que el nivel efectivo de exposición sonora, L_{AE} , se incrementa con la distancia, +3 dB al doblarse la distancia, pero como L_{Amax} disminuye 6 dB al doblarse la distancia, el valor definitivo del nivel sonoro L_{AE} disminuirá en 3 dB. También, es destacable que una velocidad, v , muy elevada disminuye el valor del L_{AE} .

Mecanismos de atenuación del ruido en la atmósfera

La propagación del sonido a través de la atmósfera, generalmente, decrece de nivel con el incremento de la distancia entre la fuente o foco emisor y el receptor. Esta atenuación viene producida por varias circunstancias, que deberán considerarse si se admite una propagación a gran distancia, así se tendrán:

- Atenuación causada por la divergencia geométrica de la fuente
- Atenuación debida a barreras u obstáculos emplazados entre el receptor y la fuente
- Absorción de la energía acústica en la atmósfera
- Atenuación como resultado de una atmósfera no ideal, en la que dominan los vientos y las variaciones de temperatura, y donde se encuentran gases no ideales, niebla, humo.

En la práctica, se debe calcular el nivel sonoro a una determinada distancia de la fuente emisora, y restarle las diversas atenuaciones teniendo en cuenta que dependen de la frecuencia.

La atenuación causada por la divergencia de la fuente, se centra en dos aspectos:

- Si la radiación, supuesta de tipo esférico, no alcanza todo el espacio, afectando solo a un ángulo sólido, w , se producirá una variación del nivel sonoro, de valor:

$$+10 \log \frac{4\pi}{w}$$

en el supuesto de radiación según una semiesfera, es decir, el foco puntual sonoro se halla sobre el suelo, se deduce un aumento de nivel de 3 dB.

- Si el sonido no es radiado uniformemente según todas las direcciones, la atenuación dependerá de la distancia entre el receptor y la fuente. Para distancias superiores a 100 metros no es preciso considerar este tipo de atenuación.

La atenuación debida a barreras, se presenta cuando las ondas sonoras se difractan al encontrarse un obstáculo, siendo desviadas y variando su dirección. La mayoría de los cálculos necesarios para ser aplicados a la difracción se refieren a ecuaciones generales para ondas en torno a obstáculos que son obtenidas cuando las integrales de Fresnel, tabuladas en diversos libros de Cálculo Matemático. El valor de la atenuación, A_{barr} , será:

$$A_{barr} = -3 + \log \left[(0'5 - X_F)^2 + (0'5 - Y_F)^2 \right]$$

siendo: X_F , Y_F , las integrales de Fresnel

La energía acústica es absorbida en la atmósfera al amortiguarse las ondas a causa del rozamiento interno y de la conductibilidad calorífica del aire. El valor de la amortiguación fue calculada teóricamente, por Stokes y Kirchoff, pero los valores experimentales medidos en el aire son muy superiores, puesto que no se tenían presente los procesos de relajación, en particular de uno de los componentes del aire, las moléculas de oxígeno, produciéndose una absorción molecular que origina el error en el valor teórico, de ahí que la humedad del aire tenga una importancia fundamental.

La constante de amortiguación, α , para la absorción molecular, se determina con ayuda de abacos en función de la humedad relativa del aire para distintas frecuencias y temperaturas. La atenuación del sonido debido a la absorción atmosférica A_{atm} , a una distancia, d , de la fuente, viene dada por:

$$A_{atm} = \alpha \frac{d}{100} \text{ dB}$$

siendo: α , el coeficiente de absorción en dB a 100 metros.

Finalmente, se consideran las condiciones climatológicas o meteorológicas como causa de la atenuación de las ondas sonoras. El calentamiento de la atmósfera se realiza a partir de la superficie de la tierra cuya temperatura depende en gran parte de la radiación solar, debido a las diferencias de temperatura se producen irregularidades en la presión del aire que tienen como consecuencia movimientos del mismo, modificándose su velocidad debido a los remolinos producidos por la rugosidad de la superficie terrestre, vegetación y edificaciones. El viento será uno de los diferentes factores que influyen en la propagación del sonido, así como la temperatura del aire.

Además, en el aire se encuentran pequeñas partículas sólidas en forma de polvo o niebla. En pequeñas concentraciones estas mezclas son de influencia despreciable sobre la propagación del sonido, pero en grandes concentraciones ocasionan una absorción apreciable.

Si se valoraran en conjunto las condiciones meteorológicas de la atmósfera en el momento de efectuar una medición sonora, se pueden encontrar dos casos extremos de valor considerable, para una misma distancia entre foco emisor y receptor:

- En una atmósfera estable, sin viento, con un gradiente de temperatura casi nulo, se obtendrían fluctuaciones del nivel sonoro en torno a 4 dB.
- Si la atmósfera presenta condiciones de inestabilidad, con viento y gradiente de temperatura no nulo, se tendrán variaciones entre 15 dB y 20 dB.

DESCRIPCION DE LAS FUENTES DE RUIDO EN AERONAVES

Una aeronave se puede considerar como un sistema mecánico donde existen una serie de elementos o fuentes generadoras de ruido con características físicas completamente diferentes, entre las que, actualmente, destaca el motor a reacción (turboreactor) como una de las más potentes fuentes sónicas creada por el hombre.

Las fuentes sonoras, que se tratarán, van parejas a la evolución del tráfico aéreo, desde las aeronaves propulsadas a helice y dotadas de motores de tipo alternativo, hasta las equipadas con turboreactores. El ruido generado por otras fuentes, como serían: los sistemas de ventilación y aire acondicionado, los ejes de transmisión y engranajes, los sistemas de tipo hidráulico, entre otras, que podrían tener su efecto e importancia relativa para los tripulantes y pasajeros de la aeronave, no se analizarán puesto que su potencia sonora es mínima frente al ruido del turboreactor.

Aeronaves con motor de tipo alternativo propulsadas por helices

El ruido producido por las aeronaves propulsadas por helices, es generado, principalmente, por las propias helices, y por el grupo motor tipo alternativo que las mueve. En la mayor parte de los casos el nivel de ruido de la propia helice es mucho más importante.

La contribución principal de ruido de los motores alternativos es debida al escape de los gases de la combustión, que puede reducirse mediante el empleo de silenciadores, cuyo diseño básico, se fundamenta en la teoría sobre filtros acústicos.

Una pala o helice giratoria, emite ondas sonoras que se originan, ya sea por las vibraciones por flexión de las palas, de escasa importancia puesto que en la fase de diseño se impone que no superen un valor determinado, y, básicamente, por la rotación de la pala, y por los remolinos que se producen debido a la inestabilidad del flujo existente detrás de una pala en movimiento, siendo más significativos a bajas velocidades.

Existen teorías que explican de forma adecuada el comportamiento de una pala aerodinámica en rotación como foco sonoro, basándose en el empuje ocasionado por el ángulo de la pala y por su forma arqueada, y en el espesor de la pala. Estas mismas teorías, tratan de la amortiguación del ruido producido por la pala, así la disposición de un mayor número de palas (se aumenta el peso de la aeronave), una variación en el diámetro de la helice, o una disminución del número de Mach en el extremo de la pala (v/c , siendo c la velocidad del sonido y v , la velocidad en el extremo de la pala), son factores que atenuan la emisión de ruido pero que afectan al rendimiento de la aeronave.

Turboreactores o motores a chorro

En la propulsión de las aeronaves, para conseguir grandes velocidades, se utiliza el chorro de gas que sale de una turbina de combustión. Este tipo de motor (figura 3), se denomina turboreactor, siendo su funcionamiento muy simple: el aire se aspira a través de un difusor en el cual se transforma en presión parte de la energía cinética adquirida como consecuencia de la velocidad de la aeronave, de ahí pasa a un compresor axial o centrífugo, que lo comprime y lo envía a la cámara de combustión donde sirve para quemar el combustible inyectado. El aire y los gases de la combustión (gases residuales), atraviesan una turbina, cediéndole a ésta la energía necesaria para mover el compresor, y por último, se expanden en un eyector que transforma la energía de presión residual en energía cinética, siendo expulsados a gran velocidad.

Al estudiar el ruido emitido por un turboreactor, se pueden distinguir tres fuentes que se corresponden con la toma de aire (ruido del compresor, del tipo sirena o aullido, y caracterizado por su contenido en frecuencia de banda estrecha centradas por encima de 800 Hz), con la cámara de combustión (este tipo de ruido es, generalmente, aislado por la carcasa del motor), y con la salida de los gases de escape (donde se incluye el ruido de la turbina, que es enmascarado por el ruido del chorro a la salida de la tobera, al mezclarse el gas residual expandido con el aire circundante, presentando un espectro sonoro de banda ancha con un valor máximo entre 100 y 400 Hz). El ruido del gas residual de salida, es netamente superior en potencia sonora al resto de ruidos emitidos, excepto para velocidades de régimen del motor bajas, predominando entonces el ruido típico del compresor.

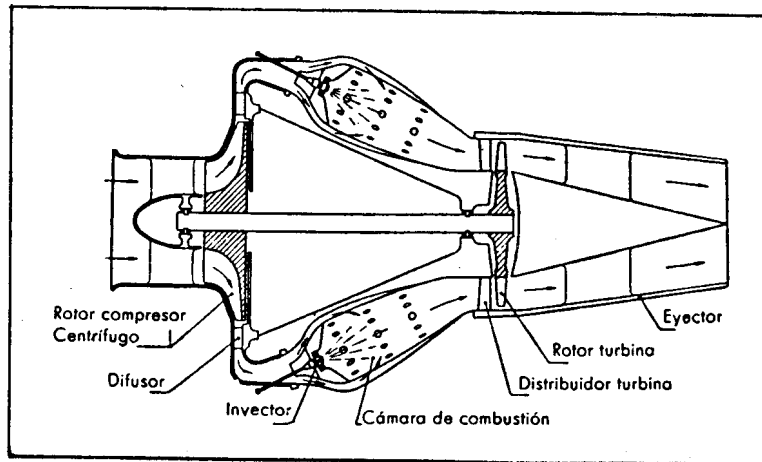


Figura 3.- Esquema de un turboreactor

Los turboreactores se diseñan con el fin de obtener una propulsión elevada con una configuración estructural lo más sencilla y económica posible, lo que influye directamente en el nivel de potencia sonora emitida. La obtención de un turboreactor más silencioso, implica la necesidad de reducir la velocidad de salida de los gases residuales por la tobera, disminuyendo de este modo el empuje del motor, que se podría tener para una carga determinada.

Este problema se ha solventado, en parte, utilizando turboreactores de doble flujo (figura 4), que permiten mantener el rendimiento de propulsión a velocidades inferiores, sacrificando algo la simplicidad de diseño. En los turboreactores de doble flujo, parte del aire aspirado por un compresor de baja presión es desviado a través de un conducto, expeliéndose junto con los gases procedentes de la combustión por una tobera común. Se basan en el principio de que puede obtenerse el mismo empuje a partir de un flujo de aire mucho mayor, que el requerido por un turboreactor "clásico", movido a velocidad menor, reduciéndose la emisión de ruido de modo considerable.

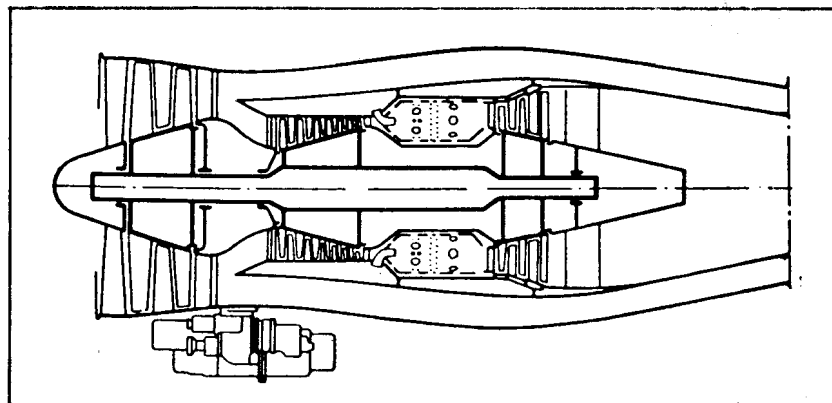


Figura 4.- Esquema básico de un turboreactor de doble flujo

El empleo de turboreactores de doble flujo, es muy común en aviones comerciales y de carga, así los BOEING 707, 727 y 737, y los DC 8 y 9, entre otros. En la figura 5, se muestran superpuestos, los espectros en banda de octava de los máximos niveles de presión sonora correspondientes al despegue de dos aviones con turboreactores de doble flujo, el BOEING-727 y el DC-8, y al despegue de una avión tipo BOEING-747, dotado de un motor tipo turbofan.

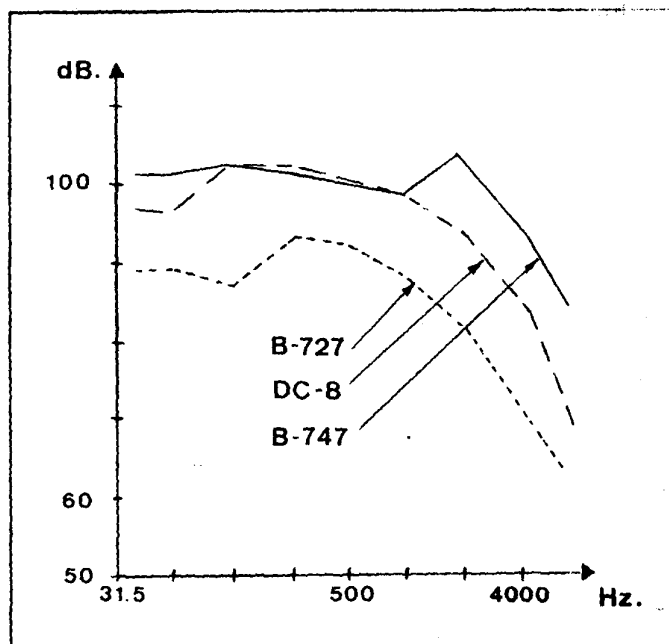


Figura 5.- Ruido producido durante el despegue de diversos aviones comerciales

Para estimar la potencia acústica emitida por los turboreactores, y más en concreto, la potencia referente al chorro de combustión, se han desarrollado curvas y tablas que representan de forma empírica la relación entre la potencia sonora, y la velocidad y diámetro del chorro de los gases de escape.

Turbofan o turboventilador

Con la finalidad de aumentar el rendimiento propulsivo del turboreactor de doble flujo, se sustituye el compresor por un gran ventilador, de este modo, a la masa de los gases de la combustión se le añade una notable masa de aire, interviniendo de forma notable en la acción propulsiva. La velocidad resultante del chorro disminuye, se produce una reducción de ruido, pero al aumentar la masa total de los gases de escape, se origina un empuje mayor. De las aeronaves equipadas con este tipo de motor, merecen destacarse el BOEING-747, el AIRBUS y el DC-10.

Aeronaves propulsadas por turbohelice

La turbohelice apareció para cubrir el campo de velocidad que separa el turboreactor del grupo motor alternativo-helice. El rendimiento propulsivo del motor a reacción es bajo para determinadas velocidades de avance, siendo más conveniente la propulsión por helice.

En la turbohelice "clásica" (figura 6), la helice es accionada por la misma turbina que acciona el compresor, y por otra turbina independiente colocada tras la primera. La potencia es transmitida a través de una caja reductora, al ser la velocidad de rotación de la turbina muy superior a la velocidad de giro de la helice. En este caso, las ondas sonoras provienen, primordialmente, de la rotación de las palas de la helice del compresor, de la turbina, del chorro de los gases de escape, y de la caja reductora.

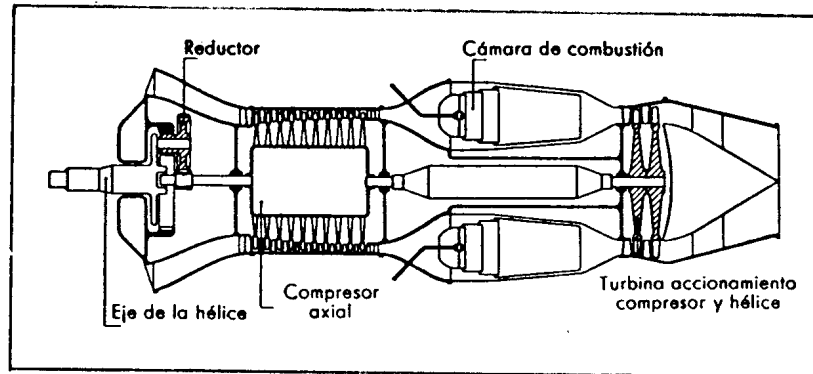


Figura 6.- Esquema de una turbohelice

Ruido generado por helicópteros convencionales

Los helicópteros no son fuentes sonoras muy potentes, a causa de la velocidad que alcanzan, en comparación con los aviones, pero sí muy molestas debido a su campo de operación, al sobrevolar, en muchos casos, a escasa altura, zonas con elevada densidad de población.

En un helicóptero convencional, dotado de motor alternativo, el ruido emitido (figura 7), se debe, principalmente, a los gases de escape del motor, pero no puede obviarse el ruido generado por la transmisión y engranajes que dificultan la comunicación oral en el interior, así como el ruido de los rotores, predominando el ruido rotacional del rotor de cola, y el ruido de remolino del rotor principal.

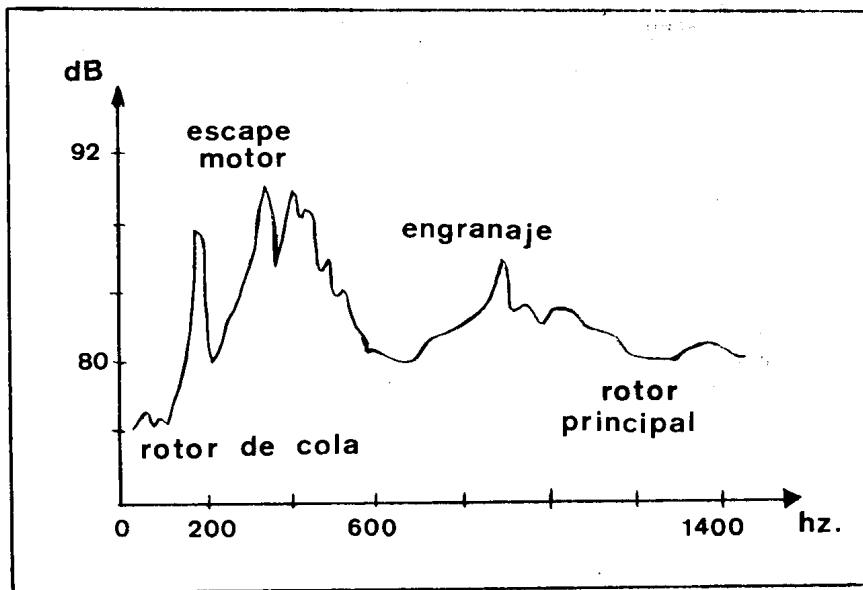


Figura 7.- Espectro del ruido emitido por un helicóptero "clásico"

Ruido supersónico

Una aeronave moviéndose a velocidad supersónica origina un fenómeno acústico denominado estampido sónico, en definitiva, un ruido tipo explosivo (del orden de 130 dB), que es independiente de la energía sonora radiada, por las fuentes anteriormente mencionadas, en un vuelo normal. El estampido sónico es generado por la distribución de onda de choque que se forma al desplazarse la aeronave a velocidad supersónica, y consiste en varios impulsos de presión separados por intervalos de décimas de segundo.

Los helicópteros actuales utilizan turboreactores para propulsarse y para accionamiento del rotor principal, desplazándose a plena potencia producen un ruido ensordecedor, debido a que los extremos de las palas del rotor principal entran en régimen de velocidad supersónica. Los típicos chasquidos de los helicópteros tienen lugar cuando los extremos de las palas generan microestampidos sónicos.

MEDIDA DEL RUIDO DE AERONAVES

Dentro del ámbito de la medida del ruido producido por una aeronave cabe considerar los siguientes aspectos:

- Medidas en las proximidades de aeropuertos y zonas de tráfico aéreo. Hacen referencia al sobrevuelo de la zona y a las operaciones de aterrizaje y despegue.
- Medidas tomadas con la nave en vuelo en su interior, que permitan evaluar la molestia experimentada por tripulantes y pasajeros.
- Medidas del ruido de las unidades de propulsión en bancos de prueba.

Este apartado se centrará en el ruido emitido por el sobrevuelo de una aeronave. Existen una gran diversidad de parámetros para valorar el nivel sonoro producido, siendo su objetivo: tabular el efecto que produce en los individuos afectados, o conocer la molestia ocasionada, a pesar de que ésta sea de un marcado carácter subjetivo.

Niveles de ruido de aeronaves según ISO-3891

La norma ISO-3891 describe dos métodos alternativos para la medida del ruido generado por el sobrevuelo de aeronaves: uno, utiliza la escala de ponderación A, dBA, para la obtención del nivel de presión sonora, L_A ; mientras que el otro método define el nivel de ruido percibido, L_{PN} , usado para clasificar molestias y determinado a partir de medidas en la escala de ponderación D, L_D , se cumple que:

$$L_{PN} \text{ (aprox.)} = L_D + 7 \text{ dB}$$

en algunos casos, y para ruidos de banda ancha sin tonalidades muy pronunciadas:

$$L_{PN} \text{ (aprox.)} = L_A + 13 \text{ (ó 12) dB}$$

El ruido producido por el sobrevuelo de una aeronave en la proximidad de un aeropuerto, se puede definir mediante: el nivel de presión sonora máximo y la energía media; y, un nivel efectivo de exposición sonora, L_{AE} , o un nivel efectivo de ruido percibido, L_{EPN} (aprox.), que se calculan a partir de los niveles L_A y L_{PN} , respectivamente, usando un tiempo de medida de 1 sg, y de 10 sg, en cada caso.

En las proximidades de un aeropuerto, debe tenerse, también presente, la frecuencia de utilización del mismo, el número de sobrevuelos, de ahí que se definan unos niveles equivalentes, L_{Aeq} , y L_{PNeq} , que tienen presente las diferentes operaciones que tienen lugar, así como el tiempo de exposición o duración del suceso.

En la tabla , se muestran los diferentes índices considerados en la norma ISO-3891.

	ESCALA DE PONDERACION	
	A	D
Nivel instantáneo	L_A	$L_{PN} \text{ (aprox.)} = L_D + 7 \text{ dB}$
Nivel máximo	$L_{A \text{ max}}$	$L_{PN} \text{ (aprox.)}_{\text{max}}$
Nivel efectivo de exposición	$L_{AE} = 10 \log \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{L_A/10} dt \right)$ $T_{\text{ref}} = 1 \text{ sg.}$	$L_{EPN} = 10 \log \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{L_{PN}/10} dt \right)$ $T_{\text{ref}} = 10 \text{ sg.}$
Nivel efectivo de exposición para un intervalo de tiempo, ΔT , en que el nivel sonoro está comprendido entre L_{max} y $L_{\text{max}} - 10 \text{ dB}$	$L_{AE} = L_{A \text{ max}} + \delta_A$	$L_{EPN} \text{ (aprox.)} = L_{PN} \text{ (aprox.)}_{\text{max}} + \delta_{PN}$
	$\delta = 10 \log \left(\frac{\Delta T}{2T_{\text{ref}}} \right)$	
Nivel equivalente sonoro durante un tiempo, T, para una operación	$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_A/10} dt \right)$	$L_{PNeq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_{PN}/10} dt \right)$
Nivel equivalente sonoro debido a varias operaciones	$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T} \sum_{i=1}^n 10^{L_{Ai}/10} \right)$	$L_{PNeq} = 10 \log \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T} \sum_{i=1}^n 10^{L_{PNI}/10} \right)$
	n , número de operaciones	

Indices de exposición

En las proximidades de un aeropuerto, la respuesta de los habitantes de la zona a las molestias ocasionadas por el ruido del tráfico aéreo, dependerá no solo del número de sobrevuelos y de su tiempo de duración, sino, también, del tipo de aeronave (no todas generan el mismo ruido), de la cantidad de operaciones, n , ya sean diurnas, n_d , o nocturnas, n_n , que tengan lugar en un determinado periodo de tiempo.

Los índices de tipo subjetivo, elaborados intentan cuantificar el nivel de ruido producido relacionándolo con la respuesta de la comunidad, permitiendo establecer criterios de limitación a la edificación en proximidades de aeropuertos y zonas de tránsito aéreo.

Composite Noise Rating (CNR)

La expresión inicialmente desarrollada en los años 50, fue:

$$CNR = \bar{L}_{PN \max} + 10 \log n - 12$$

siendo: $\bar{L}_{PN \max}$, el valor promedio de los niveles máximos percibidos durante las n operaciones

La ecuación definitiva, adopta la forma que a continuación se indica:

$$CNR = \bar{L}_{PN \max} + 10 \log (n_d + 10 n_n) - 12$$

en ella se penalizan las operaciones o vuelos nocturnos, n_n .

Este índice, CNR, permitió estimar que para valores superiores a 115, obtenidos durante el aterrizaje y despegue de aeronaves se producirían quejas de la vecindad del aeropuerto y acciones comunitarias importantes. Para valores inferiores a 100 no se esperan protestas.

Noise Exposure Forecast (NEF)

El índice NEF (ij) define el nivel de exposición al ruido producido por una aeronave tipo i , a lo largo de la ruta j , para ello, engloba las aeronaves con similares características acústicas en categorías, se tendrá en un punto:

$$NEF (ij) = L_{EPN} (ij) + 10 \log (n_d (ij) + 16,67 n_n (ij)) - 88$$

el índice total, será:

$$NEF = 10 \log \left(\sum_i \sum_j \text{antilog} \frac{NEF (ij)}{10} \right)$$

Noise and Number Index (NNI)

$$NNI = \bar{L}_{PN \max.d} + 15 \log n_d - 80$$

con: $\bar{L}_{PN \max.d}$, el valor medio de los niveles $L_{PN \max}$ medidos durante el periodo diurno de 6 h. a 18 h.

Indice Isofónico (I)

$$I = 10 \log \left(\sum_i 10^{0,1 \overline{L}_{PNmax.i}} + \sum_j 10^{0,1(\overline{L}_{PNmax.j} + 10)} \right) - 32$$

siendo: i, j , los sobrevuelos diurnos y nocturnos, respectivamente

$\overline{L}_{PNmax.i}$, nivel medio de los sobrevuelos diurnos

Indice Stovindez (Q)

$$Q = 13,3 \log \left(\sum_i k_i \frac{t_i}{T_i} 10^{L_{Amax.i}/13,3} \right)$$

donde: i , es el subíndice de cada suceso

k_i , constante que depende del periodo del día en que ocurre el suceso

t_i , intervalo de tiempo en que el nivel sonoro disminuye 10 dB respecto del valor máximo

T_i , periodo diurno o nocturno, ya sea de 6 h. a 22 h. o de 22 h. a 6 h. respectivamente

Kosten Unit (K)

$$K = 20 \log \left(\sum_i \sigma_i 10^{L_{Amax.i}/15} \right) - 157$$

siendo: σ_i , constante similar a k_i definida anteriormente

Indices obtenidos a partir del Nivel Sonoro Continuo Equivalente (L_{eq})

Dado que el ruido producido por el tráfico aereo no es continuo, si no que presenta grandes fluctuaciones de modo que es muy intenso en determinados periodos del día o de la noche, y de relativa calma en otros, no es suficientemente significativa la medida absoluta del nivel sonoro a partir de los parámetros L_A o L_{PN} , por lo que se introducen magnitudes de tipo estadístico, como es el nivel continuo equivalente, L_{eq} .

El nivel sonoro continuo equivalente, L_{eq} en dBA, se define como el nivel de presión sonora en dBA, L_A , que permaneciendo constante durante todo el intervalo de tiempo de la medida, T , representa el mismo aporte de energía e implica el mismo riesgo de lesión auditiva que el ruido real variante, matemáticamente:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L_A} dt \right)$$

una aproximación más manejable discretiza el nivel de presión sonora, L_A , en función del tiempo, dividiendo el periodo de medida, T , en n intervalos de tiempo, T_{Ref} , iguales, obteniendo para cada intervalo, i , un nivel sonoro, L_{Ai} ; Resultará:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{Ai}} \right)$$

Este parámetro, L_{eq} , presenta un especial interés, en el ruido producido por el sobrevuelo de aeronaves, por el hecho de valorar la importancia de impulsos elevados en nivel pero de corta duración que son sumamente molestos.

El nivel sonoro continuo equivalente, aplicado al ruido de aeronaves es muy fácil de medir, con un sencillo sonómetro, al igual que el nivel de exposición sonora, SEL, que se define como el nivel sonoro que tiene la misma energía en un segundo que el suceso real de ruido. El parámetro SEL es útil para clasificar y comparar sucesos de ruido de relativa corta duración, como es el caso de los vuelos aéreos. La relación entre las magnitudes SEL y L_{eq} , viene dada por la expresión:

$$SEL = L_{eq} + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

donde: T , es el tiempo de duración del suceso sonoro
 $T_0 = 1$ sg.

A partir del L_{eq} , se han desarrollado una serie de parámetros para valorar el ruido del tráfico aéreo, diferenciados en aspectos concernientes al periodo de la medida: día, noche, tiempo de medida. Entre estos índices, se destacan:

- Nivel sonoro continuo equivalente horario, L_{eqh} , que corresponde a un L_{eq} en que $T = 1$ hora
- Nivel sonoro continuo equivalente diario, L_{eqd} , obtenido para 24 h. y calculado a partir del valor medio de los L_{eq} de cada hora
- Nivel sonoro medio día-noche, \overline{L}_{eqdn} , es un L_{eq} de 24 h. que penaliza el nivel nocturno con 10 dB, según la fórmula:

$$\overline{L}_{eqdn} = \overline{SEL} + 10 \log (n_d + 10 n_n) - 39'4$$

siendo: \overline{SEL} , el valor medio del SEL a lo largo del día
 n_d, n_n , el número de sucesos diurnos y nocturnos, respectivamente

- Nivel equivalente de ruido comunitario, CNEL, representa un L_{eq} durante las 24 h. incluyendo correcciones para sobrevuelos de tarde (de 19 h. a 22 h.), y de noche (de 22 h. a 7 h.), se adapta la ecuación:

$$CNEL = 10 \log \left[\frac{1}{24} (10^{0,1L_{eqhd}} + 3 \cdot 10^{0,1L_{eqht}} + 10 \cdot 10^{0,1L_{eqhn}}) \right]$$

donde: $L_{eqhd}, L_{eqht}, L_{eqhn}$, son los niveles equivalentes horarios durante el día, la tarde y la noche, respectivamente

- Nivel de contaminación sonora, L_{NP} , tiene presente la molestia ocasionada por las variaciones del nivel medido, alrededor del valor medio, viene dado por:

$$L_{NP} = L_{eq} + 2'56 \sigma$$

con: σ , desviación standard del valor principal (es difícil de medir y predecir)

Huellas sónicas

Si se mide el nivel de ruido percibido, L_{PN} (aprox.), en diversos puntos de la zona de sobrevuelo de una aeronave, y se unen todos los puntos donde se alcance el mismo valor del parámetro, L_{PN} (aprox.), se tendrá definida la huella sonora para un determinado valor de L_{PN} de dB. En la figura 8, se muestran las huellas sónicas para dos aeronaves distintas, un BOEING 747 y un AIRBUS A-300 B, correspondientes a un L_{PN} (aprox) = 90 dB.

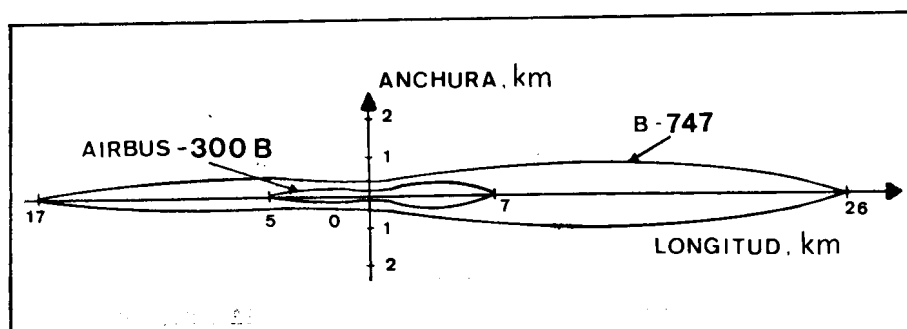


Figura 8.- Huellas sónicas para 90 dB

REDUCCION DEL RUIDO GENERADO POR EL TRAFICO AEREO

Ante un problema de control o de reducción de ruido deberá definirse hacia quien van dirigidas las medidas que se vayan a adoptar, en esta comunicación se consideran los vecinos de las zonas próximas a los aeropuertos y de las trayectorias de los vuelos de las aeronaves. La problemática que atañe a la tripulación, pasajeros y personal de tierra del aeropuerto, es completamente distinta, permitiendo un tratamiento bastante más simple, como sería el hecho de obligarles a utilizar protectores auditivos.

La reducción del ruido producido por una fuente sonora puede abordarse por los siguientes caminos:

- Actuando sobre la propia fuente, en este caso sobre los turboreactores y helices, principales focos emisores. ¿Es posible diseñar aeronaves que produzcan menos ruido sin disminuir sus prestaciones?
- Actuando sobre el receptor, desviando o atenuando las ondas sonoras, principalmente, en las proximidades del mismo, ya sea dotando a los edificios de un aislamiento acústico especial (mejora al mismo tiempo el aislamiento térmico de la vivienda, pero la encarece económicamente), o utilizando sistema de protección personal
- Introduciendo modificaciones relativas al aeropuerto, y a las operaciones que tienen lugar, se incluirían posibles variaciones: de las zonas y de la forma de aterrizaje, y despegue; del horario de vuelos; de las trayectorias de vuelo de las aeronaves

Atenuación del ruido debido al chorro de gases del turboreactor

La causa principal del ruido emitido por un turboreactor, es la mezcla turbulenta que se produce, en el exterior de la tobera, de los gases de la combustión, a elevada velocidad, con el aire circundante. Este tipo de ruido, presenta unas características: espectro de frecuencias, potencia sonora, y direccionalidad, semejantes al ruido generado por un chorro de aire al ser expulsado, a través de una tobera, a la atmósfera, por lo que la generación de ruido por estos motores, se estudia a partir de modelos a escala de chorro frío aplicando las técnicas del análisis dimensional.

Experimentalmente, para un chorro de característica subsónica se ha obtenido una relación entre la potencia sonora emitida, W , y la potencia mecánica del chorro, w_m en vatios, que viene dada por la ecuación:

$$W = \frac{8}{\pi} \cdot \delta \cdot k \cdot M^5 \cdot w_m$$

donde: δ , es la relación entre la densidad del flujo de los gases de la combustión y la densidad del aire atmosférico

k , es el coeficiente de potencia acústica, varía entre $0,3 \cdot 10^{-4}$ y $1,2 \cdot 10^{-4}$

M , es el valor medio del número de Mach a la salida del chorro

La potencia sonora emitida por un chorro subsónico ($0,3 < M < 1$), es proporcional, a la sexta u octava potencia de la velocidad, en el supuesto de un chorro supersónico, la potencia generada depende de la velocidad elevada a un exponente superior al caso subsónico.

Las investigaciones teóricas y/o experimentales en la reducción del ruido emitido por el chorro del turboreactor, apuntan a conseguir disminuir la velocidad de los gases de escape, y a reducir su turbulencia, para ello se realizan experiencias con modelos a escala, estando centrados todos los esfuerzos, principalmente en:

- La conversión del flujo de los gases de salida de alta velocidad y pequeña masa, en un flujo de baja velocidad y gran masa, haciendo uso de aspiradores y difusores de los tipos convergente-divergente, de toberas de doble flujo, o de pantallas perpendiculares al chorro.
- La variación de la forma geométrica de la tobera, cuadrada, rectangular, circular, elíptica, entre otras, o disminuyendo su diámetro, sustituyendo la tobera única por una serie de toberas de diámetro menor, toberas múltiples.
- El aumento del espesor de la zona de la tobera donde se mezclan los gases de la combustión y el aire atmosférico, ya sea colocando dispositivos de tipo dentado, toberas dentadas, o con muescas, o utilizando toberas corrugadas.

Al estimar el nivel sonoro percibido por un individuo en tierra, debido al vuelo de una aeronave, se considerará que la emisión de ruido del chorro del turboreactor disminuye al aumentar la velocidad de vuelo, puesto que se reduce la velocidad relativa de los gases del chorro respecto del aire. En la figura 9, se observan las curvas que relacionan el nivel de presión sonora detectado por el individuo, y producido por una aeronave (avión B-47 con seis turboreactores) en función del tiempo, para dos velocidades de vuelo, 300 km/h, y 790 km/h, a una altura de 300 m.

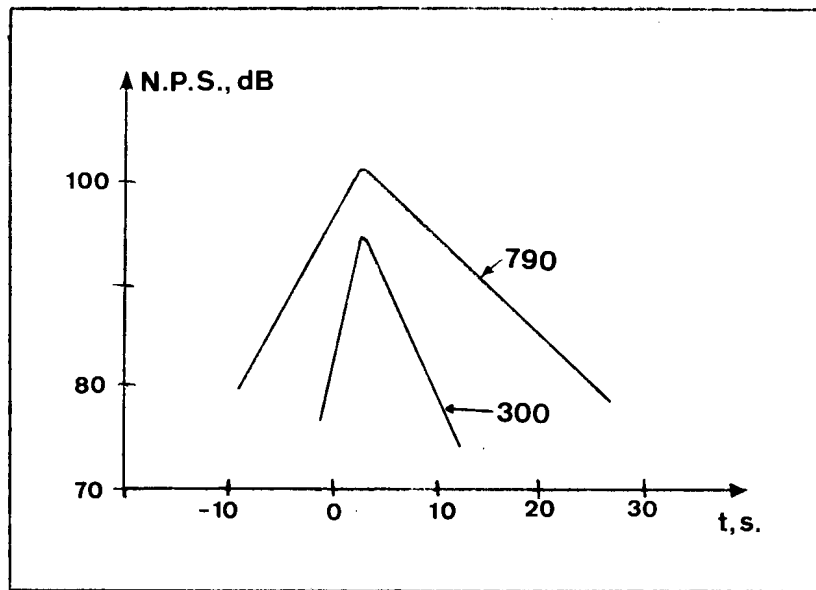


Figura 9.- Ruido emitido por el sobrevuelo de un B-47

Atenuación del ruido en las operaciones de vuelo

Los procedimientos para aminorar el impacto sonoro que en la vecindad de un aeropuerto y en zonas pobladas producen las operaciones de vuelo, se centran, preferentemente, en la modificación de las condiciones y características: del aterrizaje y del despegue; del sobrevuelo de ciertas zonas a baja altura; y del horario, diurno o nocturno, de las operaciones aéreas.

En el aterrizaje y despegue de las aeronaves, se puede actuar sobre la dirección de estas operaciones, y en el caso del despegue contemplar la posibilidad de una posible variación o viraje al tomar altura. También, debe considerarse el uso con carácter preferencial de una única pista donde se concentra el tráfico, frente a la distribución del mismo en varias pistas del aeropuerto. Quizás, un criterio a adoptar trataría de la limitación de la zona de ruido, a un área con el objeto de mi nimir el número de personas afectadas, ¿pero acaso no aumentaría la molestia para unos pocos?

De otra parte, determinadas maniobras del piloto durante el aterrizaje o el despegue siempre que no presenten problemas de seguridad pueden ser interesantes, así un ángulo máximo en el despegue, permite una rápida subida, pero aumenta de modo considerable el nivel sonoro emitido que afectará a una menor cantidad de personas, que en un despegue plano.

El seguimiento con precisión y rigor de las trayectorias de vuelo de las aeronaves por los pilotos, siempre y cuando dichas trayectorias estén perfectamente definidas, intentando no sobrevolar siempre las mis mas zonas, o que éstas no estén pobladas, y eliminar en lo posible el sobrevuelo a baja altura, reducirían las molestias a los individuos afectados, pero en el caso de tratarse de helicópteros, la problemática

que estos plantean es de difícil solución, excepto si se restringe la utilización de los mismos a operaciones especiales y necesarias, obligándoles a cumplir una serie de normas reglamentarias.

Finalmente, deben analizarse las restricciones de necesario cumplimiento que se impongan a la utilización de los aeropuertos. Básicamente, será una reglamentación de tipo local, para cada caso particular, centrada en los siguientes puntos:

- Limitación del ruido emitido por la aeronave. La reglamentación americana FAR-36 dicta los niveles efectivos de ruido percibido máximo, L_{EPNmax} , en función del peso de la nave, en tres puntos: a 1.865 metros del punto de aterrizaje, a 6.500 metros del inicio de la carrera de despegue, y, a 450 metros, o 650 metros paralelamente a la pista, según sean aeronaves con 2 y 3 motores, o 4 motores. En la figura 10 se comparan los niveles de ruido generado por distintas aeronaves con los valores dictados en FAR-36, en la aproximación a la pista de aterrizaje.

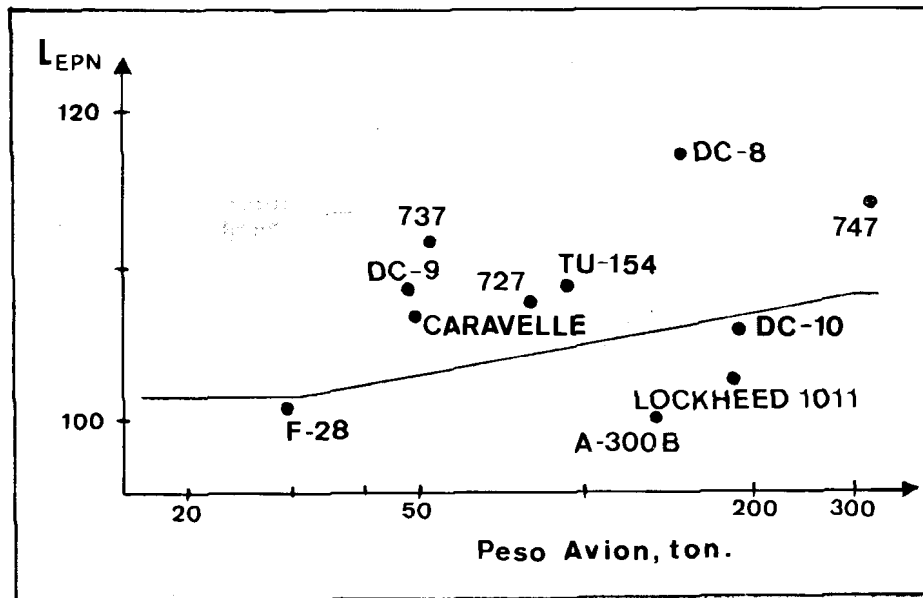


Figura 10.- Comparación del nivel fijado en FAR-36, con los niveles sonoros de varias aeronaves

- Restringir el número de vuelos nocturnos. Por ejemplo, en Suiza están prohibidos, mientras que en otros aeropuertos se ha preferido penalizar el máximo de ruido emitido por la aeronave.
- Distribuir las operaciones de vuelo entre varios aeropuertos. Este reparto será posible en grandes ciudades, si disponen de dos aeropuertos, o se tiene previsto ampliar el existente, ¿por qué no se construye uno nuevo, transfiriéndole a éste todos los vuelos nocturnos?

Atenuación del ruido actuando sobre el receptor

El riesgo de daño al oído, y el principio de determinadas alteraciones en el funcionamiento corporal, se producen al estar sometido el individuo a niveles sonoros superiores a 135 dB. De otra parte, las molestias causadas en el individuo por el ruido debido al tráfico aéreo, se centran, entre otras circunstancias, en: las alteraciones del sueño; las vibraciones en la vivienda; las interferencias en la actividad diaria; una sensación de miedo.

La mayoría de quejas de la comunidad, se deben a las operaciones y actividad de los aeropuertos ya existentes, y las soluciones planteadas hacen referencia a: la compra de las viviendas más afectadas; una posible compensación económica por la servidumbre de sobrevuelo; la insonorización de las viviendas. A partir de la problemática que plantean los aeropuertos ya existentes, pueden desarrollarse medidas preventivas de cara a la construcción de nuevos aeropuertos, no siendo interesante la ampliación de un aeropuerto puesto que es significativo de un aumento del tráfico aéreo en una misma zona, pero sí la compra de los terrenos posiblemente afectados por el ruido del tráfico aéreo, aún cuando la extensión para el nuevo aeropuerto sea mucho más amplia que la necesaria.

BIBLIOGRAFIA

- Mestre, V.: "Ruido de aeronaves", Cap. XX del libro: "El ruido como agente contaminante en el medio ambiente", Ed. Excmo. Ayuntamiento de Zaragoza y M.A.Z. 1987
- Von Gierke, H.E.: "Control de ruido en aviación", Cap. 34 del libro: "Manual para el control del ruido", Ed. McGraw-Hill, 1977
- Von Gierke, H.E.: "La aviación como fuente de ruido", Cap. 33 del libro: "Manual para el control del ruido", Ed. McGraw-Hill, 1977
- Hassall, J.R. and Zaveri, K.: "Acoustic noise measurements", Ed. Bruel & Kjaer, 1979
- Bernard, P.: "Environmental noise measurements", Technical review nº 1, Ed. Bruel & Kjaer, 1986
- Ford, R.D.: "Introduction to acoustics", Ed. Elsevier Publishing, 1970
- Giacosa, D.: "Motores endotérmicos", Ed. Científico-Médica, Barcelona 1970
- Piercy, J.E.: "Sound. Propagation in the open air"