



VALIDACIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES DE RUIDO DE AERONAVES MEDIANTE EL PROGRAMA INM

PACS: 43.50.Rq

Sánchez Venegas, A; Jiménez Díaz, S; Capdevila Pagés, R; Cardona Gonyalons, J
Laboratori d'Enginyeria Acústica i Mecànica (Universitat Politècnica de Catalunya)
Colom, 11
08222 Terrassa. España
Tel: +34 937 398 718
Fax: +34 937 398 022
E-mail: angel.sanchez-venegas@upc.es

ABSTRACT

The aim of this work is to prove the Informatic Model efficiency Integrated Noise Model (INM) for Noise impacts studies due to aircraft. The study was done by means of experimental noise measurements done for different aircraft models near an airport and the simulation in the same conditions, to compare latterly the results between real measurements and simulated model. The study shows the lateral attenuation problems of the model and the necessity of doing experimental measurements to adjust the model when noise impact study are made.

RESUMEN

El objetivo de este estudio es comprobar la eficiencia del modelo informático Integrated Noise Model (INM en adelante) para el estudio de impacto acústico producido por aeronaves. El estudio fue realizado mediante la toma de medidas experimentales del ruido producido por varios modelos de aeronaves alrededor de un aeropuerto y la simulación del mismo escenario, para la posterior comprobación de resultados entre medidas reales y modelo simulado. El estudio pone de manifiesto los problemas de atenuación lateral que presenta el modelo y la necesidad de realizar medidas experimentales, que ayuden a ajustar el modelo informático cuando se realizan estudios de impacto acústico.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de un estudio de impacto acústico producido por el tráfico de aeronaves, ha de ser la cuantificación del territorio que está expuesto a un determinado nivel. Además, y según la Directiva Europea, los valores obtenidos deben ser representativos de las condiciones medias anuales. Entonces no es posible realizarlo mediante medidas de campo, porque estas nada más son representativas de las condiciones dadas en el momento y lugar de las medidas.

El impacto acústico que producen las aeronaves en las proximidades de los aeropuertos está asociado al número de operaciones de vuelo que en él se producen. El incremento de la actual demanda del tráfico aéreo provocará un aumento del ruido que se genera. Para evaluar estos incrementos es necesario de disponer de herramientas adecuadas. Estas herramientas deben de estar bien calibradas, ya que al tratar de fuentes que se desplazan rápidamente en grandes

extensiones de terreno, las áreas de influencia que generan son también grandes. La utilización estas herramientas sin una validación pueden dar como resultado errores elevados, pudiendo obtener escenarios no reales.

Una de las herramientas más utilizadas para el cálculo de ruido provocado por aeronaves es el modelo informático INM, propuesto por la FAA (Federal Aviation Administration de los EEUU), de amplia difusión a nivel mundial y utilizado por las autoridades aeroportuarias españolas. Previamente a la simulación es recomendable realizar medidas experimentales en las inmediaciones de los aeropuertos para la comparación entre medidas reales y simuladas, para dar una idea de la exactitud del modelo informático.

Para evaluar las medidas hay que guiarse del marco legal existente, la directiva 2002/49/CE de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, y, en el caso del territorio catalán, la ley de protección contra la contaminación acústica de la Generalitat de Catalunya. La directiva explica, en su Anexo II, que los métodos de cálculo provisional de L_{den} y L_{night} , para el cálculo de ruido de aeronaves, deberán utilizar la técnica de segmentación de trayectorias de vuelo, técnica que utiliza el INM. La ley es una de las pocas normativas que, además de tomar los niveles equivalentes para evaluar la contaminación acústica, toma el nivel L_{max} como parámetro de medida. La importancia que tiene es que en aeropuertos donde el tráfico aéreo no es muy elevado y los niveles equivalentes pueden dar una idea de que no se provoca molestias en los alrededores. En estos casos, los niveles máximos pueden dar una idea más acertada, ya que el paso de una sola aeronave puede provocar molestia debida a la diferencia entre el ruido de fondo y el máximo.

MODELO INM

El programa informático INM se utiliza para calcular el impacto acústico producido por aeronaves al realizar distintas operaciones en los aeropuertos: aterrizaje, despegue, touch and go o sobrevuelo. Es una herramienta útil ya que permite valorar distintos escenarios de operaciones, como afectará la modificación del tráfico aéreo por un incremento o descenso del número de vuelos, modificación de trayectorias de entrada y salida a aeropuertos, cambios de flota de aeronaves que trabajan en un aeropuerto.

INM contiene una base de datos de ruido vs. potencia vs. distancia (Noise vs. Power vs. Distance, NPD), aumentada por una base de datos de características espectrales (utilizados sólo para el cálculo de la absorción atmosférica). Los datos NPD de una aeronave, que no se pueden definir por el usuario, consisten en varios niveles de decibelios en función del estado de potencia de los motores de la aeronave y distancia del observador a la aeronave.

El INM divide el área de estudio en un malla de dimensiones que se pueden definir. Para calcular el nivel de presión sonora, el programa parte de las trayectorias de vuelo dividiéndolas en varios segmentos. La ventaja que presenta los modelos de segmentación de trayectorias de vuelo, es que cada segmento se puede evaluar bajo condiciones distintas dentro de una misma trayectoria, para cambiar las condiciones de potencia de motores en función del tipo de movimiento que realice la aeronave (subir a velocidad constante, acelerar manteniendo la altura, etc). Uno de los primeros cálculos que realiza es el geométrico, calcula la distancia más corta entre los distintos puntos de la malla y la trayectoria de vuelo, la línea perpendicular que los une. En cada segmento de cálculo, la perpendicular, puede estar delante, entre medio o detrás de los puntos que definen el segmento. Esta distancia calculada es importante, puesto que a partir de ella se calcula la energía de exposición sonora, de cada segmento.

$$E_{seg} = 10^{(L_{E,P,d-ADJ} + NF_{ADJ} - DUR_{ADJ} + DIR_{ADJ})/10} \quad (1)$$

$L_{E,P,d-ADJ}$ es el nivel de presión sonora que resulta del proceso de interpolación de la potencia de los motores con el logaritmo de la distancia, ajustándolo con la absorción atmosférica y la impedancia acústica; NF_{ADJ} es el ajuste de la fracción de ruido para pasar de una trayectoria recta infinita, a la cual se han calculado las curvas NPD, a una trayectoria de segmento; DUR_{ADJ} es el ajuste de la duración de la velocidad de la aeronave; LA_{ADJ} es el ajuste de la

atenuación lateral; DIR_{ADJ} es el ajuste de directividad, el cual sólo se aplica en el segmento de trayectoria que discurre por el suelo de la pista en las operaciones de despegue.

Una vez se calcula la energía de exposición sonora de cada segmento, se calcula la de vuelo, para acabar calculando la total.

$$E_{vuelo} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^{n_{seg}} E_{seg(i)} \right) \quad (2)$$

$$E_{total} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^{n_{vuelo}} E_{vuelo(i)} \right) \quad (3)$$

El algoritmo de cálculo que mayores problemas presenta es el algoritmo de cálculo de la atenuación lateral, como se ha comprobado en algunos estudios [3,5]. Este algoritmo se basa en la norma SAE-AIR-1751 "Prediction Method for Lateral Attenuation of Airplane Noise during Takeoff and Landing" de 1981. Este método de predicción comprende dos fenómenos físicos básicos, los efectos de la instalación de motores y los efectos del suelo. Aeronaves tales como los B-727 y los DC9/MD80 se adaptan mejor a la norma, en cuanto a los efectos de instalación de motores, que aeronaves más modernas como las familias B-737, B-757 y A-320. En cualquier modo, los efectos en cuanto a instalación de motores son despreciables en frente a los debidos por el suelo. La atenuación que se produce debida a efecto suelo según el método que utiliza la norma es excesivo, y esto ha llevado al replanteamiento de la forma de calcular la atenuación lateral. Actualmente, se está trabajando en la incorporación del modelo EPD. Este modelo tiene en cuenta las condiciones del terreno, siendo las ecuaciones de cálculo distintas en el caso de que el terreno sea duro o blando. En el futuro será posible cambiar las condiciones del terreno por parte del usuario y elegir entre terreno duro, blando o mixto, con lo que se prevé que el modelo será más aproximado a la realidad.

Para realizar las simulaciones se necesitan varios datos de entrada. Entre ellos destacan las condiciones meteorológicas, los modelos de aeronaves, trayectorias que describen y número de aeronaves por trayectoria. Combinando estas entradas con la base de datos del programa, se obtienen los niveles de presión sonora que producen las aeronaves. Los resultados pueden ser presentados de forma gráfica, en isófonas, o de forma numérica.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

El objetivo de las medidas de ruido es la calibración del modelo a utilizar en el cálculo de impacto acústico de diferentes circunstancias. Las medidas se realizaron en seis puntos simultáneamente y durante un periodo que comprende una semana laboral, siguiendo los criterios aplicados por AENA en sus estudios de impacto acústico. Los diferentes puntos de medida se situaron en función de las trayectorias de vuelo aportadas por la gerencia del aeropuerto, del ruido de fondo y de la representatividad del impacto acústico. El aspecto del ruido de fondo es el más crítico de todos, ya que es imprescindible poder realizar una discriminación absoluta del ruido ocasionado por las aeronaves y del ruido procedente de otro origen, como por ejemplo el tráfico. En consecuencia, la elección de los puntos de medida requiere la máxima atención para que la simulación de impacto acústico sea válida.

Se definió la zona de interés a estudiar y se eligió la correcta ubicación de los diferentes lugares de medida. Posteriormente se realizó un control previo "in situ", para validar los puntos de medida escogidos, que consistió en el registro en tiempo real de un suceso sonoro producido por el sobrevuelo de un avión para cada uno de los seis lugares de medida previamente escogidos. La tabla 4.1 muestra la relación ordenada de los lugares de medida con su altura respecto al suelo y la distancia a la cabecera de la pista.

Punto de medida	Altura respecto al suelo (metros)	Distancia a cabecera de pista (metros)
1	4	934
2	11	2.941
3	10	4.947
4	12	2.017
5	7	2.017
6	50	3.925

Tabla T1. Altura de los puntos de medida respecto al suelo y distancia a la cabecera de pista.

Los puntos 1, 2 y 3 se situaron en la misma dirección que tiene la pista del aeropuerto, y en función de las trayectorias nominales de las aeronaves en la operación de despegue contempladas en los procedimientos de salida SID facilitados por AENA. Estas tres posiciones permiten observar la variación del nivel de presión sonora del sobrevuelo de un avión, respecto a la trayectoria vertical. A medida que la aeronave consigue más altura, la distancia al receptor se incrementa y el nivel de presión sonora disminuye. En la Gráfica G1 se puede observar este efecto y el desplazamiento de la huella acústica en función de la distancia a la cabecera de la pista, así como la variación en la anchura en función de la altura de paso del avión sobre el receptor.

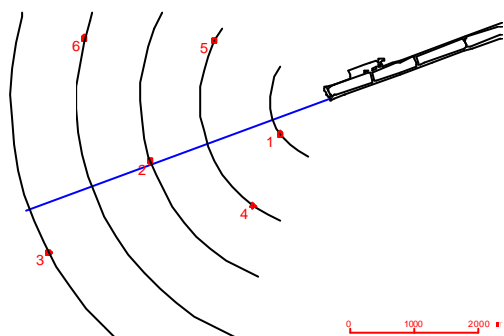
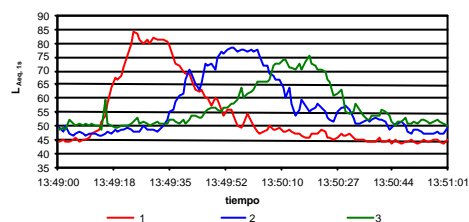
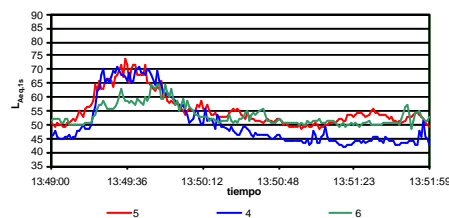


Figura F1. Distribución de los puntos de medida alrededor del aeropuerto de estudio



Gráfica G1. Evolución del nivel de presión sonora en función del tiempo en los puntos 1, 2 y 3.

Los puntos de control 4, 5 y 6 se situaron en la dirección perpendicular a la trayectoria horizontal de despegue, con el objetivo de poder valorar la atenuación en la propagación del ruido en esta dirección. El perfil acústico de los puntos 4 y 5 es similar, debido a la misma simetría en la localización de los lugares de medida. Gráfica G2.



Gráfica G2. Evolución del nivel de presión sonora en función del tiempo en los puntos 4, 5 y 6.

El estudio se ha realizado sobre una muestra de 79 aeronaves. 30 de la familia Boeing 757, 26 de la familia Airbus 320, 17 de la familia Boeing 737 y 6 de la familia Boeing 767. Estas aeronaves que se han elegido tienen los motores montados en las alas. Estos tipos son los que mayores problemas presentan en el modelo de cálculo de atenuación lateral que tiene el INM.

RESULTADOS

A partir de los registros de presión sonora realizados en los distintos puntos de medida, se han calculado los niveles equivalentes de cada familia de aeronaves. La base temporal que se ha tomado ha sido la misma para todas las medidas. Primero se ha calculado el nivel de cada aeronave, después se han agrupado por familias para finalmente obtener un valor medio del nivel equivalente de cada familia.

En la tabla T2, quedan expuestas las diferencias que hay entre las medidas experimentales y los valores simulados. Se puede observar que las mayores diferencias se encuentran en los puntos 4, 5 y 6, que están ubicados más alejados de la parte inicial de la trayectoria de salida.

Aeronave \ Punto de medida	B-757	A-320	B-767	B-737
1	1,5	-0,7	0,8	1
2	3,1	-0,9	-0,3	1,7
3	3,7	0,8	1,5	1,4
4	6,5	6,5	3,3	5,8
5	6,8	8,7	3,1	6,1
6	8,4	9,7	3	7,9

Tabla T2. Diferencias de nivel de presión sonora, en decibelios ponderados A (dBA), en los receptores entre valores reales y simulados.

Otra comparación que se ha tenido en cuenta ha sido el impacto acústico producido por el conjunto de las 79 aeronaves. En la tabla T3, se ha comparado el impacto obtenido mediante medidas experimentales con el obtenido mediante simulación. Cuando la muestra de aeronaves comienza a ser elevada, además de eliminar la influencia del piloto, las diferencias entre puntos situados en la dirección de la trayectoria de salida (1, 2 y 3) y puntos más alejados lateralmente (4, 5 y 6), se acentúan más. Es en los puntos laterales, donde se observa un exceso de atenuación de los niveles por parte del INM. Así el impacto acústico que se calcula mediante simulación es más bajo, dando un área de influencia más pequeña. El obtener un área más pequeña, indica, que para zonas habitadas, el número de personas expuestas a un nivel de ruido será menor que las que realmente están.

Punto de medida	Diferencias $L_{Aeq,exp}$ $L_{Aeq,sim}$ (dBA)
1	1,1
2	1
3	2,6
4	4,7
5	4,7
6	5,5

Tabla T2. Diferencias de nivel de presión sonora, en decibelios ponderados A (dBA), en los receptores entre valores reales y simulados para la muestra total de 79 aeronaves

CONCLUSIONES

El uso de la modelización matemática para determinar los niveles de ruido en las inmediaciones de los aeropuertos, se está convirtiendo en una práctica habitual y de obligado

cumplimiento en los términos que establece la Directiva. Esta técnica es muy valiosa para estudiar distintos cambios que se pueden producir en el tráfico aéreo como puede ser, la incorporación de nuevos procedimientos de salida con nuevas trayectorias, cambios del volumen de tráfico debido a la estacionalidad de la demanda de vuelos, construcción de nuevas pistas, etc. Es una herramienta que ayuda a tomar decisiones en el estudio de alternativas para el cálculo de incrementos.

Por otro lado, los estudios de impacto acústico de aeropuertos realizados con medidas experimentales, sólo son representativos del día en que se realizan las medidas, no mostrando las variaciones del tráfico aéreo. En estos casos, las simulaciones pueden realizar mejores aportaciones al poder variar distintos parámetros, pero como se ha comprobado en este trabajo, las simulaciones sin validar pueden dar escenarios no reales, con unos niveles de presión sonora más bajos de los reales, sobre todo en la dirección perpendicular a la trayectoria en el plano horizontal. Por lo que se considera esencial la validación de las medidas experimentales.

Se ha comprobado que el modelo de atenuación lateral que utiliza actualmente el INM, produce una atenuación excesiva. Este problema podrá solventarse en un futuro al cambiar el modelo de cálculo utilizado en la norma SAE-AIR-1751 por el Modelo EPD, que tiene en cuenta el tipo de terreno en el cual se sitúa el observador.

REFERENCIAS

1. *INM Version 6.0 User's Guide*. FAA Office of Environment and Energy, 1999
2. *INM Version 6.0 Technical Manual*. FAA Office of Environment and Energy, 2002
3. G. G. Fleming et al. "Updated lateral attenuation in FAA's Integrated Noise Model" *Internoise 2000* Niza, France
4. D. P. Rhodes, J. B. Ollerhead "Aircraft Noise Model Validation". *Internoise 2001* The Hague, The Netherlands
5. K. H. Liasjo, K. Holen, N. I. Nilsen. "Aircraft Sound exposure, directivity and propagation". *Internoise 2002* Dearborn, MI, USA