



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Restricciones operativas relacionadas con el ruido en el aeropuerto de Barcelona

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTORS: Jordi Bartolomé Fernández
Brian Alcides Tubay Álvarez

DIRECTOR: Daniel Español Realp

DATA: 25 de setembre de 2013

TÍTULO DEL TFC: Restricciones operativas relacionadas con el ruido en el aeropuerto de Barcelona

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTORS: Jordi Bartolomé Fernández
Brian Alcides Tubay Álvarez

DIRECTOR: Daniel Español Realp

DATA: 25 de setembre de 2013

Resum

En este trabajo pretendemos reflejar la problemática en la que se ven inmersos los aeropuertos para combatir el ruido provocado por las aeronaves en las proximidades de éstos.

Una problemática en la que chocan dos intereses. Por un lado, el bienestar de las personas que viven en las proximidades del aeropuerto y por otro lado la creciente y necesaria utilización de la infraestructura aeroportuaria para el desarrollo económico de las ciudades.

Una de las medidas para mitigar el impacto acústico es la de restringir las operaciones de las aeronaves más ruidosas. Y a ésta medida le dedicaremos un estudio, en colaboración con el aeropuerto de Barcelona, el cual viene motivado por una resolución de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), publicada en el Boletín Oficial del Estado (BOE), en la cual se dice que se introducen restricciones operativas para las aeronaves marginalmente conformes (aeronaves más ruidosas) des del 1 de enero de 2012 en el aeropuerto de El Prat de Barcelona.

Para llegar a entender esta resolución y saber interpretarla, necesitaremos pasar por explicar aquellos conceptos de acústica que nos permiten cuantificar el ruido de las aeronaves y la clasificación de estas según sus niveles de ruido certificados. Una vez explicado esto sólo nos faltara explicar la legislación aplicable que lleva a los aeropuertos a tomar medidas como esta en sus planes de acción elaborados para mitigar el impacto acústico.

Cabe destacar que la legislación en cuanto a ruido en los aeropuertos se hace cada vez más restrictiva debido a que el uso del avión como medio de transporte aumenta año a año. Pero según hemos comprobado en nuestro estudio, los fabricantes y compañías aéreas utilizan muy bien las evoluciones tecnológicas para adelantarse a esta normativa cada vez más severa con flotas más silenciosas.

TÍTOL DEL TFC: Restricciones operativas relacionadas con el ruido en el aeropuerto de Barcelona

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTORS: Jordi Bartolomé Fernández
Brian Alcides Tubay Álvarez

DIRECTOR: Daniel Español Realp

DATA: 25 de setembre de 2013

Overview

In this essay we look to reflect on the problems of noise pollution emitted by aircrafts, in the vicinity of airports and how they seek to rectify this.

A complex issue with many conflicting interests, on one hand the welfare of the people who live near the airports, and on the other hand, the necessary growth and expansion of airport infrastructure, to provide economic development to the city and surrounding areas.

One of the measures to mitigate the noise impact is to apply operational restrictions on the loudest aircrafts. We will dedicate a study to this measure in collaboration with Barcelona airport, this is motivated by a resolution of the Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), published in the Boletín Oficial del Estado (BOE). This explains the operational restrictions to be introduced from the 1st of January of 2012 in Barcelona airport.

To understand and interpret the resolution we will need to know some concepts such as: noise quantification; ICAO's classification for aircraft's noise certification, and the applicable laws that lead airports to take operational restrictions which set action plans to mitigate the noise impact.

We must emphasize the fact that noise laws are becoming more restrictive due to the growing use of aircraft as a transportation medium. As demonstrated in our research, manufacturers and airline companies continue to use technological developments to create quieter fleets in anticipation of increasingly severe regulations.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS DE ACÚSTICA	3
1.1. La importancia de la frecuencia en las ondas acústicas	4
1.1.1. Concepto de Ponderación	5
1.1.2. Concepto de Octavas	6
1.2. Fenómenos que afectan a la propagación de las ondas de ruido ..	6
1.3. Instrumentos de medición: El sonómetro	7
1.4. Índices de ruido.....	9
CAPÍTULO 2. RUIDO EN AERONAVES	13
2.1. Origen del ruido en aeronaves.....	13
2.1.1. Ruido aerodinámico.....	13
2.1.2. Ruido debido al motor (mecánico):.....	14
2.1.3. Ruido de sistemas aviónicas	15
2.2. Clasificación de las aeronaves en función del ruido. Clasificación OACI.	15
2.2.1 Aviones de reacción subsónicos certificados antes de 1977 (CAPITULO II ANEXO 16 de la OACI).....	15
2.2.2 Aviones de reacción subsónicos (entre 1977 y 2006), aviones de más de 5.700kg propulsados por hélice (entre 1985 y 1988), aviones de más de 8.618kg propulsados por hélice (entre 1988 y 2006). (CAPITULO III ANEXO 16 de la OACI).....	16
2.2.3 Aviones de reacción subsónicos (después de 2006) y aviones de más de 8.618kg propulsados por hélice (después 2006) (CAPITULO IV ANEXO 16 de la OACI)	17
2.3. Evoluciones tecnológicas	19
CAPÍTULO 3. RUIDO EN AEROPUERTOS	22

3.1. Marco Legal.....	22
3.2. Mapas estratégicos de Ruido. Delimitación de servidumbres acústicas.	24
3.2.1. Modelización. Software INM.	26
3.3. Planes de Acción. Acciones para mitigar el ruido.....	29
3.3.1. Medidas de reducción del ruido en la fuente	31
3.3.2. Procedimientos operacionales.....	33
3.3.3. Gestión y ordenación del territorio adyacente al aeropuerto	40
4.3.4. Restricciones operativas	43
CAPÍTULO 4. AEROPUERTO DE BARCELONA/EL PRAT.	44
4.1. Descripción del aeropuerto.....	44
4.1.2. Localización.....	44
4.1.2. Capacidad y operaciones.	45
4.2. Delimitación de las servidumbres Acústicas.....	46
4.2.1. Inputs para la modelización del ruido	46
4.2.2. Resultados. Mapas de ruido	52
4.3. Planes de acción Aeropuerto de Barcelona.....	54
4.3.1. Procedimientos operacionales.....	54
4.3.2. Gestión del territorio. Plan de aislamiento acústico.....	55
4.3.3. Restricciones operativas en el Aeropuerto del Prat.....	56
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	66
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS WEB	68
ANEXOS.....	71

INTRODUCCIÓN

<<Por una Resolución de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), publicada en el Boletín Oficial del Estado (BOE), se introducen restricciones operativas a partir del 1 de enero de 2012 en el aeropuerto de El Prat de Barcelona siguiendo el procedimiento "enfoque equilibrado" del Real Decreto 1257/2003, de 3 de octubre>>

Este párrafo se podía leer en un portal digital el pasado 24 de Junio de 2011. Y nos podríamos preguntar cuál es el motivo por el cual se introducen restricciones operativas en dicho aeropuerto. Pues bien, éste no es más que el impacto acústico generado por las aeronaves.

Lo cierto es que en los últimos años, el ruido aeroportuario se ha convertido en uno de los problemas principales de los residentes en las áreas próximas a los aeródromos. Por tanto se plantea un conflicto de intereses de los habitantes que padecen las molestias ocasionadas por los aeropuertos, y aquellas personas o entidades que desean utilizarlos de forma relativamente frecuente.

Para intentar mitigar en la medida de lo posible este problema, durante los últimos años se han desarrollado una serie de procedimientos y técnicas que consiguen reducir dramáticamente el ruido emitido por las aeronaves en los aeropuertos.

Además, los principales fabricantes aeronáuticos han comenzado a desarrollar desde los años 70 nuevas aeronaves con un menor impacto acústico. Las distintas legislaciones tratan de aprovechar esta circunstancia para promover la implantación de aeronaves más silenciosas y prohibir, posteriormente, como ya indica esta resolución, la operación de aquellos aviones que generen altos niveles de ruido.

Por tanto, la motivación de este trabajo es explicar el porqué de que se dictaminen resoluciones como éstas, y explicar cómo se combate el impacto acústico generado en los aeropuertos en nuestro país.

Para ello, introduciremos una serie de conceptos básicos que nos permitirán comprender éste fenómeno tan abstracto como es el ruido para así conseguir cuantificarlo y representarlo para una posterior interpretación. Una vez hecho esto, nos centraremos en la aeronave y el ruido que éstas producen. Explicaremos cómo se clasifican en base a su certificación y cuáles son los niveles máximos permitidos para cada una de ellas.

Seguidamente trasladaremos el problema del ruido allí donde operan las aeronaves, es decir los aeropuertos, y explicaremos a través del marco legal como éste se combate en nuestro país. Por último nos centraremos en el aeropuerto del Prat y explicaremos cuales son los procedimientos y medidas que se llevan a cabo en este aeropuerto.

Y acabaremos haciendo un estudio más a fondo para ver cómo puede afectar una de estas medidas expuesta en la resolución con la que empezábamos esta introducción.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS DE ACÚSTICA

En este punto del trabajo se explicaran aquellos conceptos sobre el ruido y su medición que más adelante tendremos que tener en cuenta para entender ciertos aspectos del trabajo.

El sonido es cualquier variación de la presión en el aire que puede ser detectada por el oído humano. Por definición, el ruido es un sonido no deseado y molesto. Desde el punto de vista acústico el sonido y el ruido constituyen el mismo fenómeno, por lo tanto la diferencia es subjetiva.

El movimiento ondulatorio se inicia, cuando un elemento pone en movimiento a la partícula de aire más cercana, alejándose gradualmente de la fuente. Dependiendo del medio, el sonido se propaga a diferentes velocidades. En el aire, el sonido se propaga a una velocidad de 340 m/s, aproximadamente.

Comparado con la presión estática del aire 10Pa (Pascales), las variaciones de presión sonora audible son muy pequeñas, en un margen que puede ir desde los 20µPa hasta 100Pa.

El umbral auditivo medio de una persona corresponde a 20µPa. Una presión sonora de, aproximadamente, 100Pa es tan alta que causa dolor y por lo tanto es llamado umbral del dolor.

El oído humano responde a los estímulos de forma logarítmica, por lo que es más práctico expresar los parámetros acústicos como una relación logarítmica entre el valor medido respecto a un valor de referencia.

Esta relación logarítmica es llamada decibelio o dB. La escala lineal se convierte en una escala sencilla que va desde 0 dB en el umbral auditivo (20µPa- Presión de referencia), hasta 130 dB, en el umbral del dolor (~ 100 Pa). Para determinar el nivel de ruido físico, el cual no atiende a subjetividad en el ser humano, se aplica esta fórmula:

$$\text{Nivel en dB} = 20 \log_{10} \frac{\text{Presión de sonido medida}}{\text{Presión de referencia}}$$

(1.1)

A continuación, en la *tabla 1.1*. se muestra una imagen en la cual se pueden ver los diferentes niveles de ruido y de presión que se dan en situaciones cotidianas.

Tabla 1.1. Ejemplos típicos de fuentes de sonido, con sus respectivos niveles de presión sonora (dB).

Niveles sonoros de respuesta humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [dB]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático	110	Extremadamente fuerte
Petardos	100	Muy fuerte
Transito urbano	90	Muy molesto
Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso	70	Difícil uso del teléfono
Conversación normal	60	Intrusivo
Oficina tranquila	40	Silencioso
Biblioteca	30	Muy silencioso
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

1.1. La importancia de la frecuencia en las ondas acústicas

Como ya hemos mencionado el ruido se propaga mediante ondas, y como cualquier onda se puede expresar en términos de amplitud, longitud de onda, frecuencia, etc. Pero a efectos de distinguir entre sonido o ruido coge un importante papel la frecuencia a la que se transmiten las ondas.

Por definición, la frecuencia es el número de variaciones de presión por unidad de tiempo, midiéndose en ciclos por segundo o Hercios (Hz). La percepción auditiva normal de una persona se encuentra en el rango de 20 Hz hasta 20kHz, aproximadamente.

La clave es entender que no todas las frecuencias son percibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible en la banda comprendida entre los 500 y 6.000Hz. Por ejemplo es lógico afirmar que un ruido agudo no nos resulta igual de molesto que uno grave de la misma intensidad.

1.1.1. Concepto de Ponderación

Puesto que el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias, resulta lógico que al efectuar una medición de ruido se tenga en cuenta esta particularidad en los equipos de medición

Para ello, se establecen y se han normalizado lo que llamaremos Curvas de Ponderación (*Figura 1.1.*), que son filtros electrónicos que modifican la señal acústica según unas determinadas conexiones para cada una de las bandas de frecuencias.

Estas curvas siguen aproximadamente la misma ley que el oído en cuanto a sensibilidad en función de la frecuencia.

- Curva **A**, se aproxima a la curva de audición de baja sensibilidad.
- Curva **B**, se aproxima a la curva de audición de media sensibilidad.
- Curva **C**, se aproxima a la curva de audición de alta sensibilidad.

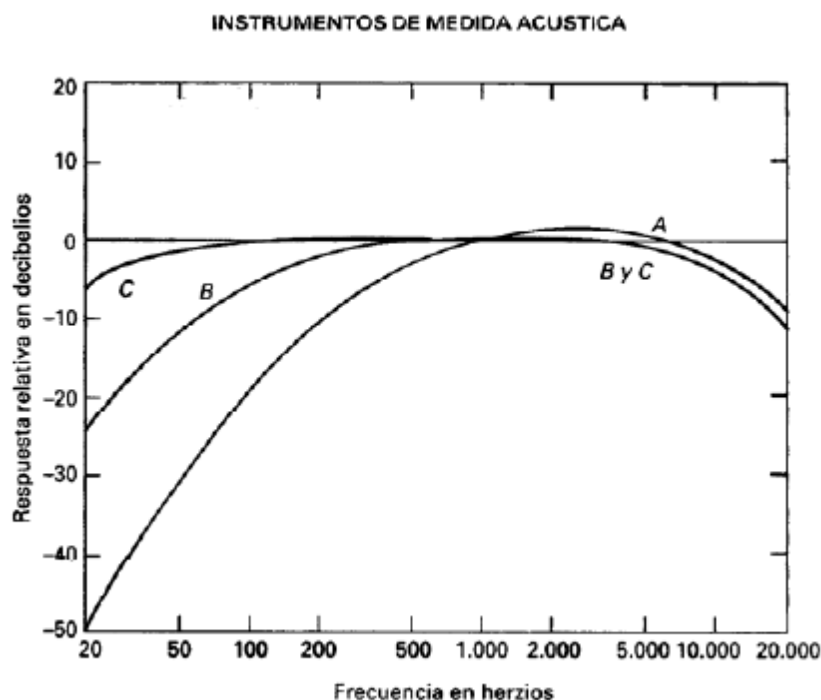


Figura 1.1. Respuesta de Frecuencias a las Distintas Redes de Ponderación.

Cabe destacar que el nivel sonoro más utilizado es con Ponderación A, ya que es la que más protege al hombre contra la agresión del ruido, por lo que cuando el nivel sonoro esté ponderado se suele representar el valor acompañado con **dB(A)** (o **dBa**), obteniéndose así los **Niveles sonoros ponderados**.

1.1.2. Concepto de Octavas

También es importante definir este concepto ya que nos será útil para entender como se hace el estudio frecuencial en las mediciones de ruido obtenidas.

Dada la amplia banda o gama de frecuencias audibles para realizar estudios de ruido, no es posible analizarlas una a una, por lo que ha sido dividida dicha banda (de 20Hz a 20KHz) en 10 bandas más pequeñas denominadas octavas que se denominan y conocen por su frecuencias centrales: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2.000, 4.000, 8.000 Hz. Una octava es una banda de frecuencia donde la más alta frecuencia es dos veces la más baja frecuencia.

Para estudios de mayor precisión, como en los aeropuertos, se definen bandas de menor ancho, denominadas tercios de octava, a $1/3$ de las bandas anteriores.

El análisis de frecuencia de $1/3$ de octava es necesario para investigar una fuente sonora como el caso de un avión, y predecir las características de aislamiento necesarias para las barreras anti-ruido (Aislamiento de viviendas en los alrededores de los aeropuertos), etc.

1.2. Fenómenos que afectan a la propagación de las ondas de ruido

La propagación del ruido puede ser afectada por varias razones, por ejemplo:

- **Tipo de fuente:** En el caso de los aviones corresponde a una fuente móvil. Este tipo de fuente cambia de posición a lo largo del tiempo, lo cual hace que sea más ardua la medida del ruido aeroportuario.
- **Distancia desde la fuente.**
- **Absorción atmosférica**
- **Viento.**
- **Temperatura.**
- **Obstáculos (barreras, edificios, etc.).**
- **Absorción del terreno.**
- **Reflexiones.**
- **Humedad.**
- **Lluvia.**
- **Efecto Doppler:** Este efecto se produce cuando la fuente de ondas y el observador están en movimiento relativo con respecto al medio material en el cual la onda se propaga, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente .

Todos estos factores se deben tener en cuenta en la medición de nuestro ruido aeroportuario, ya que la variación de cualquiera de ellas produce un aumento o atenuación de nuestro ruido. En el capítulo 3 (Ruido en aeropuertos) veremos que estos parámetros son importantes en cuanto a la simulación del ruido aeroportuario y la monitorización del mismo.

1.3. Instrumentos de medición: El sonómetro

El ruido que producen las aeronaves en base a su carácter temporal se puede definir como ruido Intermitente. Cuando pasan los aviones, el nivel de ruido aumenta y disminuye rápidamente. Para medir este tipo de eventos se hace de manera continua durante la duración del mismo, además se debe anotar su duración.

El **sonómetro** es el dispositivo que mide estos niveles de ruido. Por lo tanto, es un instrumento que permite cuantificar el nivel de presión sonora.

Los sonómetros se clasifican en:

Tipo 0: Usado en laboratorios, mucha precisión

Tipo 1: Errores de precisión de ± 1 dB.

Tipo 2: Errores de precisión de ± 2 dB.

Esta clasificación está basada en la norma de la Internacional Electrotechnical Commission IEC 61672.

Un sistema de medición de sonido se compone de un sensor de presión acústica (micrófono), unidad de acondicionamiento, unidad de procesamiento y unidad de presentación.

El micrófono o sensor de presión acústica se encarga de transformar las ondas sonoras en impulsos eléctricos que son ingresados al sistema.

En la unidad de acondicionamiento se realiza la conversión analógico-digital, se hace la conversión a unidades de presión sonora (Pascuales) y se realiza un filtrado de los datos con los ya explicados filtros de ponderación (Curvas de ponderación) para adaptar la salida en niveles de ruido que se adapten a la sensibilidad que tiene el ser humano. Cuando se requiere más precisión, el rango de frecuencia de 20Hz a 20kHz del filtro puede ser dividido en secciones o bandas. Estas bandas tienen usualmente un ancho de banda de una octava o un tercio de octava. (Ver *Figura 1.2.*) (Ver [1]).

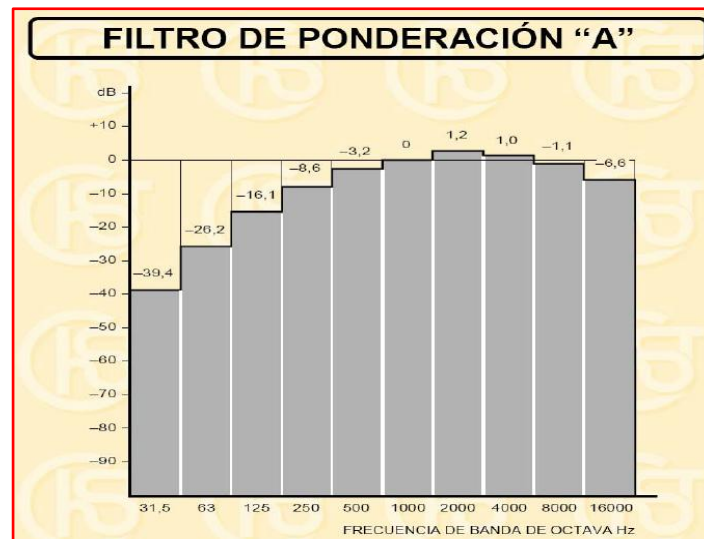


Figura 1.2. Filtro de ponderación A en banda de octava

En los aeropuertos de Catalunya, según la ley 16/2002 de la Generalitat de Catalunya de protección contra la contaminación acústica es común utilizar sonómetros de tipo 1 con filtros de ponderación en banda 1/3 de octava.



Figura 1.3. Sonómetro

Es importante remarcar que los sonómetros disponen de un protector contra el viento para evitar medidas erróneas por viento, y un calibrador.

1.4. Índices de ruido

La cuantificación de una magnitud física es posible de una forma exacta, pero la de una sensación subjetiva no lo es. Fruto de esa falta de acuerdo entre los técnicos a la hora de evaluar la molestia del ruido se elaboran multitud de escalas o índices que adoptan posiciones distintas frente al mismo problema.

Como ya hemos explicado la respuesta del oído humano no es lineal con la frecuencia, y para simular esta respuesta se aplican los filtros de ponderación, siendo el más utilizado el filtro con ponderación A.

A continuación se hace una breve explicación de estos índices usados tanto en aviación como en otros campos:

- **Índice de presión sonora global (L):** es el índice que mide los niveles de ruido físicos. Es una evaluación del ruido instantáneo no ponderado. Es una medida física de una perturbación de un medio, y como tal, es plenamente objetivo. Este índice está explicado al principio de este apartado. Se expresa en dB.
- **Índice de ruido instantáneo ponderado a (L_a):** Se realiza una ponderación "a" en frecuencias de la medida anterior, con el fin de aproximarla a la percepción del oído humano. Las unidades que representan este índice son los dBa.
- **Índice de ruido que evalúa la molestia acumulado para un suceso (L_{amax} , o SEL):**
Se han definido índices de molestia acumulada para un suceso, entiendo como tal, el periodo en el que el ruido pasa por diversos niveles instantáneos (en dBa). Típicamente en aviación un suceso será un despegue, un aterrizaje o una pasada del avión. Actualmente se emplean dos métodos para cuantificar el ruido de un suceso aislado:
 1. Considerar el nivel instantáneo máximo del suceso (L_{amax}).
 2. Considerar la combinación de los niveles de presión acústica de un instante a otro mientras dure el suceso, para obtener una medida de energía acústica total (**SEL**).

Para obtener el SEL (Sound Exposure Level, también denominado LAE), se utiliza una integral simple basada en el nivel de ruido de presión sonora de un ruido que tiene la misma energía en un segundo que la del ruido real durante el intervalo de tiempo T. El SEL es útil para comparar suceso de ruido de diferente duración.

- **Índice de ruido que evalúa la molestia acumulada para diferentes sucesos un periodo de tiempo. ($L_{eq,T}$)**

Dado que el sonido no permanece constante a lo largo del tiempo, para valorar lo que ha ocurrido acústicamente a lo largo de un período de

medida determinado en un punto del espacio, se usan diferentes índices. El más utilizado es el **Índice sonoro equivalente continuo**.

El nivel sonoro continuo equivalente, $L_{eq,T}$, se define como la media energética del nivel de ruido promediado en el intervalo de tiempo de medida. Puede considerarse como el nivel de un sonido, constante en todo el período de medida T , que tuviese la misma energía acústica que el sonido que se está valorando (Ver figura 1.4).

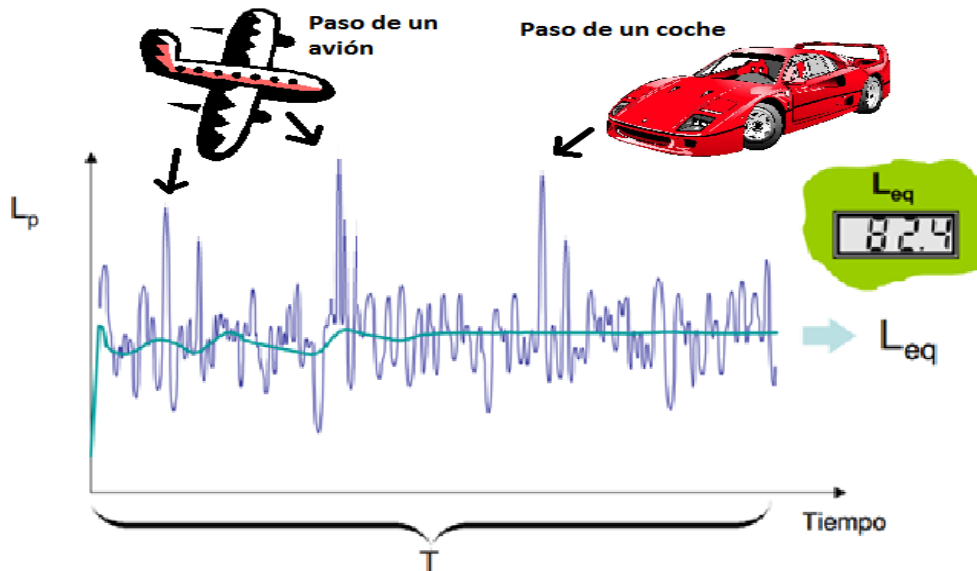


Figura 1.4. L_{eq} medido a través de los diferentes valores instantáneos (L_p) en un periodo T

Este parámetro es básico para cualquier medida de ruido. Su definición se encuentra en la mayoría de las normas de medida de ruido y de la legislación actual sobre protección acústica. Este parámetro no tiene sentido si no va acompañado de una base de tiempo o intervalo de observación.

El L_{eq} se calcula a partir del valor cuadrático medio de la presión sonora ponderada A en un período de observación T . Ver fórmula 1.2.:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p^2(t)}{p_0^2} \right) dt \right] \text{ (dBA)} \quad (1.2)$$

Donde:

P_0 = Presión de referencia

P = Presión medida

Para obtener $L_{Aeq,T}$ se realiza una ponderación "A" en frecuencias de la medida anterior para cada valor instantáneo del suceso, con el fin de aproximarla a la percepción del oído humano. Las unidades que representan este índice son los dBa.

El intervalo de medida en consideración es normalmente: el día, la tarde y la noche.

La escala utilizada en España por Aena para elaborar los mapas estratégicos de ruido (apartado 3.2. Mapas de ruido) viene derivada de este índice pero tomando todos los periodos de un año. Se definen a continuación:

L_d es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos día (De 07:00 a 19:00) de un año.

L_e es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos tarde (De 19:00 a 23:00) de un año.

L_n es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos noche (De 23:00 a 07:00) de un año.



Figura 1.5. Índices utilizados por AENA según periodo.

- **Niveles específicos utilizados para medir ruido de aviones:**

En general estos índices se basan en formulas muy complejas cuya explicación sería ardua. Según la OACI el índice que mide el ruido de las aeronaves, y que es de vital importancia para la certificación de las mismas, es el EPNL (Nivel efectivo de ruido percibido) y se expresa en EPNdB o dB(EPN). Este índice intenta representar de una manera más exacta que el La el nivel de ruido que recibe el ser humano.

Otros índices que miden el ruido de aviones son:

- ✓ NEF (predicción de exposición al ruido).
- ✓ NNI (Índice de ruido y numero de operaciones). Desarrollado en Inglaterra.

Para concluir este capítulo podemos decir afirmar que existen una gran cantidad de índices que miden los niveles de ruido aeroportuario, algunos son mas subjetivos, otros siguen formulas más complejas...Pero todos tienen una finalidad y han sido creados con el mismo fin, estudiar el impacto acústico.

CAPÍTULO 2. RUIDO EN AERONAVES

Hemos visto cuáles son las diferentes formas de cuantificar el ruido, sus diferentes índices para medirlo y para qué sirven. En este apartado analizamos cuál es la fuente principal del ruido en los aeropuertos: las aeronaves. Además, utilizando la información presentada previamente, haremos una breve descripción de la normativa OACI para los diferentes aviones, mostrando los límites de ruido en EPNdBs según su clasificación. Finalmente haremos un estudio de diferentes formas de mitigación de ruido que se hacen a nivel estructural en las aeronaves.

2.1. Origen del ruido en aeronaves

El problema del ruido en aeropuertos está producido de forma prácticamente íntegra por las aeronaves que lo utilizan, por tanto, con tal de mitigarlo es necesario saber cuál es su origen.

Una aeronave con un motor de tipo jet o de hélice causa compresión y rarefacción del aire, produciendo movimiento de partículas de aire. Este movimiento se propaga a través del aire como ondas de presión. Si estas ondas son suficientemente fuertes, y están en un rango de frecuencias audible, causan sonido. En función del tipo de avión tendremos diferentes niveles de sonido y a diferentes frecuencias, pero todos se originan de tres fuentes: Ruido aerodinámico, ruido de motor (mecánico), y ruido de sistemas aviónicos.

2.1.1. Ruido aerodinámico

El ruido aerodinámico surge debido a las corrientes de aire alrededor del fuselaje del avión y de las superficies de control. Este tipo de ruido aumenta con la velocidad del avión y también a altitudes bajas debido a la densidad del aire. Las aeronaves jet crean un ruido aerodinámico intenso, mientras que las militares que vuelan a altitudes bajas producen un sonido especialmente alto.

La forma del morro y del parabrisas afecta directamente al sonido producido. En el caso de tratarse de un motor de hélices, gran parte del ruido proviene del flujo de aire alrededor de las palas de éstas. El tipo de ruido aerodinámico suele ser de baja frecuencia, y viene determinado por la velocidad de giro de éste (Ver [23]).

Típicamente se genera cuando un flujo de aire pasa a través de un objeto sobre el avión, como por ejemplo las alas o el tren de aterrizaje. Hay dos tipos de ruidos debidos al fuselaje:

a) Ruido en cuerpos romos: Los vórtices que se generan cuando el flujo atraviesa un cuerpo romo originan zonas de baja presión, que se manifiestan

como ondas de presión (que, como hemos visto anteriormente, pueden originar ondas de sonido).

b) Ruido de aristas: Cuando un flujo turbulento pasa por el límite de un objeto (o una superficie de control), las fluctuaciones asociadas a la presión son escuchadas mientras el sonido se propaga por la arista de dicho objeto).

2.1.2. Ruido debido al motor (mecánico):

Gran parte del ruido en una aeronave de hélices proviene tanto del motor como de las superficies aerodinámicas. El ruido en los helicópteros es inducido aerodinámicamente debido a los rotores principales y de cola, y mecánicamente inducido desde la caja de cambios principal y diversas cadenas de transmisión.

Respecto a las aeronaves de tipo jet, gran parte del ruido es debido al despegue y el ascenso. Sin embargo, debido a los avances en tecnología de reducción de sonido, en los aterrizajes suele tener más impacto el ruido debido al fuselaje.

Hay tres clases de tipos de ruido relacionados con el motor de reacción según su origen en el mismo:

- Generado en la entrada del aire al motor.
- La vibración procedente del funcionamiento del propio motor y sus sistemas.
- El producido por la salida de gases del motor producido por el alto grado de turbulencia originado en la corriente de aire que sale a gran velocidad en una atmósfera en calma.

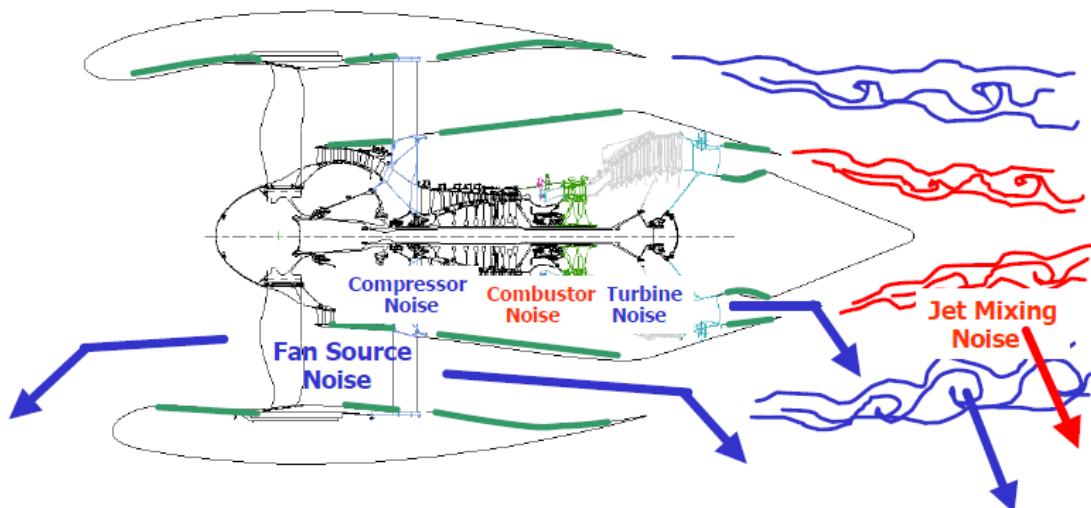


Figura 2.1. Esquema de ruido en un motor de turbina (Ver [24]).

Los niveles de ruido varían con el empuje del motor y son proporcionales a la cantidad de trabajo realizado por el aire que pasa a través de él. Un motor con un gasto de aire relativamente pequeño pero con gran velocidad de escape de los gases producirá un nivel de ruido alto al contrario que un motor con gran gasto de aire pero menor velocidad de escape generará un nivel de ruido menor que el anterior.

2.1.3. Ruido de sistemas aviónicas

La presurización de la cabina y los sistemas de acondicionamiento son habitualmente fuentes importantes de ruido en las cabinas de aviones tanto civiles como militares. Sin embargo, una de las fuentes más importantes de ruido en los aviones comerciales (aparte de los motores y el fuselaje) es el *Auxiliary Power Unit* (APU). El APU es un generador de abordo utilizado para encender los motores principales, habitualmente con aire comprimido, y proporcionar energía eléctrica mientras el avión está en tierra (Ver [25]).

2.2. Clasificación de las aeronaves en función del ruido. Clasificación OACI.

Hasta ahora hemos visto cuál es el origen del ruido en las aeronaves. Debido a los altos niveles, algunos incluso superando el umbral del dolor, la OACI estableció unos límites en función del año y del tipo de avión. Es importante remarcar que estos límites son para los fabricantes y no se aplican para medir impacto acústico a nivel de aeropuerto ya que, como veremos más adelante, para aeródromos utilizamos otros métodos para evaluar el impacto acústico.

En el anexo 16 de la OACI encontramos la siguiente clasificación de aeronaves en función del ruido:

2.2.1 Aviones de reacción subsónicos certificados antes de 1977 (CAPITULO II ANEXO 16 de la OACI)

Los ensayos para la medición del ruido se llevan a cabo en 3 puntos:

a) Punto de medición de ruido lateral: Punto en una paralela al eje de pista, a 650m del eje de pista o de su prolongación, en el que el nivel de ruido de despegue sea máximo.

b) Punto de medición del ruido de sobrevuelo: Punto en la prolongación del eje de pista a una distancia de 6.5km del comienzo del recorrido de despegue.

c) Punto de medición del ruido de aproximación: Punto sobre el terreno en la prolongación del eje de pista a 120m en sentido vertical por debajo de la trayectoria de descenso de 3°, que intercepta la pista a 300m más allá del

umbral. En terreno horizontal, la posición de este punto dista 2.000m del umbral.

- Niveles máximos de ruido:

Para medición de ruido lateral y de aproximación: 108 EPNdB para aeronaves que tengan una masa máxima certificada de despegue igual o superior a 272.000kg, y dicho valor decrecerá linealmente hasta obtener 102 EPNdB, que corresponde a 34.000kg. A partir de este valor se mantendrá constante.

Para medir el ruido de sobrevuelo: 108 EPNdB para aviones cuya masa máxima certificada de despegue sea de 272.000kg, y dicho valor decrecerá hasta 93EPNdB, que se corresponden a una masa de 34.000kg. A partir de este valor se mantendrá constante.

2.2.2. Aviones de reacción subsónicos (entre 1977 y 2006), aviones de más de 5.700kg propulsados por hélice (entre 1985 y 1988), aviones de más de 8.618kg propulsados por hélice (entre 1988 y 2006). (CAPITULO III ANEXO 16 de la OACI)

Para este conjunto de aviones, la medición del ruido se lleva a cabo en los siguientes puntos:

a) Punto de referencia de medición del ruido lateral a plena potencia: Distinguiamos dos casos:

- Para aviones de reacción: Punto en una paralela al eje de pista, a 450m del eje de pista, en el que el nivel de ruido de despegue sea máximo.

- Para aviones propulsados por hélice: Punto en la prolongación del eje de pista, a 650m verticalmente bajo la trayectoria de ascenso lineal a plena potencia de despegue.

b) Punto de referencia de medición de ruido de sobrevuelo: Punto en la prolongación del eje de pista a una distancia de 6.5km del comienzo del recorrido de despegue.

c) Punto de referencia de medición del ruido de aproximación: Punto sobre el terreno en la prolongación del eje de pista a 2.000m del umbral. En terreno horizontal, este punto se encuentra a 120m por debajo de la trayectoria de descenso de 3º que intercepta la pista a 300m más allá del umbral.

- Niveles máximos de ruido:

Para medición del punto de referencia lateral a plena potencia: 103 EPNdB para aviones cuya masa máxima de despegue sea igual o superior a 400.000Kg. Este valor decrece hasta 94 EPNdB para aviones de 35.000kg.

Respecto al punto de referencia de medición de ruido en sobrevuelo, el ruido máximo autorizado es, para aeronaves de 385.000kg, 101 para 2 motores, 104 para 3 motores, y 106 para 4 motores o más valor que decrecerá linealmente con el logaritmo de la masa a razón de 4 EPNdB por cada disminución de la masa a la mitad, hasta 89 EPNdB, después de lo cual el límite se mantendrá constante.

Para el punto de referencia en aproximaciones, se establecen 105 EPNdB para aviones con masa máxima de despegue de 280.000kg, y este valor decrece linealmente hasta situarse en 98 EPNdB para aviones de 35.000kg.

Tabla 1.1. Tabla resumen de los niveles máximos permitidos según MTOW (Capítulo III)

	Peso (Toneladas)	Nivel (EPNdB)
Ruido lateral	0-35	94
	35-400	$80,87 + 8,51 * \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 400	103
Ruido de aproximación	0-35	98
	35-280	$86,03 + 7,75 * \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 280	105
Ruido de sobrevuelo (1-2 motores)	0-48,1	89
	48,1-385	$66,65 + 13,29 * \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 385	101
(3 motores)	0-28,6	89
	28,6-385	$69,65 + 13,29 * \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 385	104
(4 motores)	0-20,2	89
	20,2-385	$71,65 + 13,29 * \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 385	106

2.2.3 Aviones de reacción subsónicos (después de 2006) y aviones de más de 8.618kg propulsados por hélice (después 2006) (CAPITULO IV ANEXO 16 de la OACI)

Los puntos de medición de ruido para estas aeronaves son los mismos que los del apartado anterior (Apartado 2.2.2.), así como los niveles máximos de ruido.

La diferencia recae en que:

- La suma de las diferencias de los tres puntos de medición entre los niveles máximos de ruido y los niveles máximos de ruido permitido no será inferior a 10 EPNdB
- La suma de las diferencias en dos puntos de medición cualquiera entre los niveles máximos de ruido y los niveles máximos de ruido permitido correspondientes no será inferior a 2 EPNdB.

Esto hace que la normativa sea más severa para aeronaves de capítulo IV.

En la imagen siguiente *figura 2.2.* observamos un esquema que muestra los puntos de referencia para medición de ruido que hemos descrito anteriormente, así como distancias típicas.

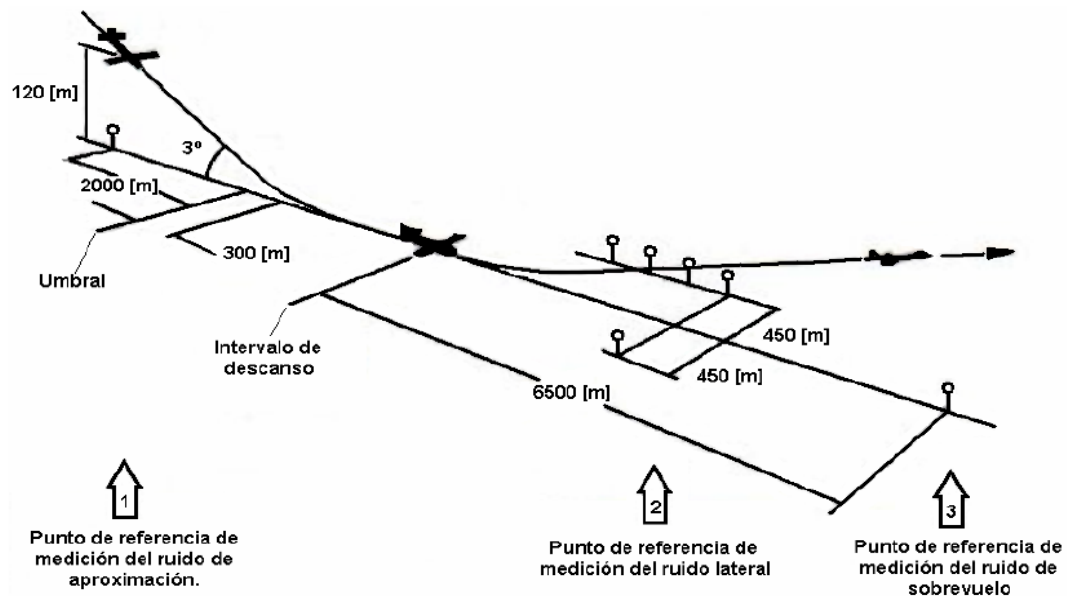


Figura 2.2. Esquema de representación de normativa OACI.

2.3. Evoluciones tecnológicas

Desde hace 30 años se ha investigado muchísimo el sector para desarrollar aeronaves más eficientes en cuanto a niveles de ruido. Gran parte de esta investigación se ha basado en hacer motores con mayor BPR (By-Pass-Ratio)¹, reducir de la velocidad de los gases de escape, así como del *fan* frontal, e incrementar las dimensiones.

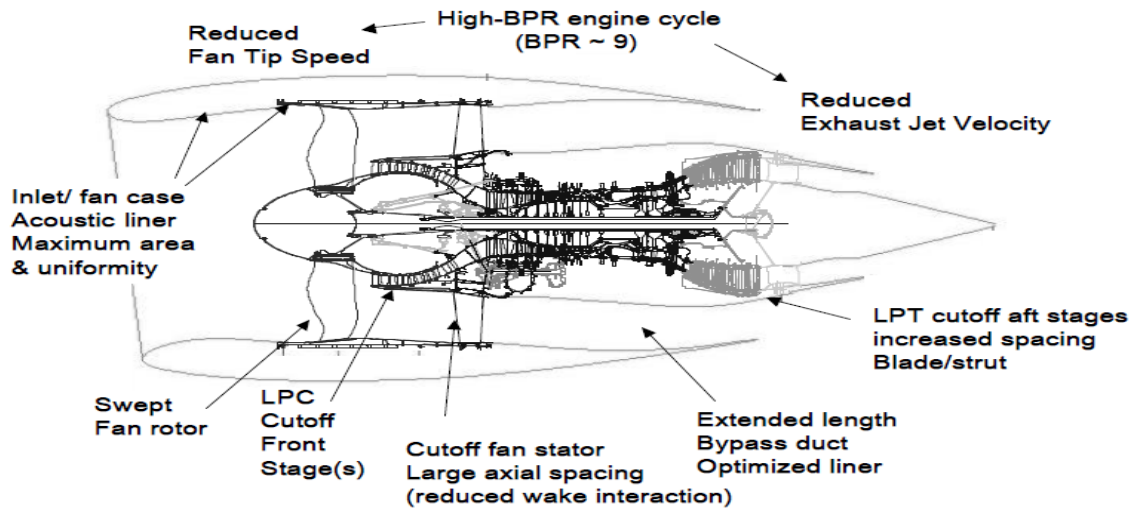


Figura 2.3. Cambios que han permitido generar menos ruido (Ver [24]).

Lo que se pretende con los sistemas supresores de ruido es reducir la velocidad de salida haciéndola la menor posible con el compromiso de no perder empuje (factor vital en la actuación del motor), este efecto se consigue induciendo aire desde el exterior, con lo que se obtiene una gran masa de aire a una menor velocidad.

Partiendo de que la variación del nivel de intensidad sonora es función del cuadrado del diámetro de salida de la tobera también se pueden obtener reducciones considerables variando la configuración de la sección de salida equiparando las áreas irregulares con áreas circulares equivalentes. El efecto negativo en la actuación del motor de los amortiguadores de ruido en la tobera es una reducción del empuje y un aumento del consumo específico de combustible para un mismo empuje.

1 .Definimos el Bypass ratio como la relación entre el flujo de aire que pasa por la tobera de entrada y el flujo de aire que entra a la cámara de combustión.

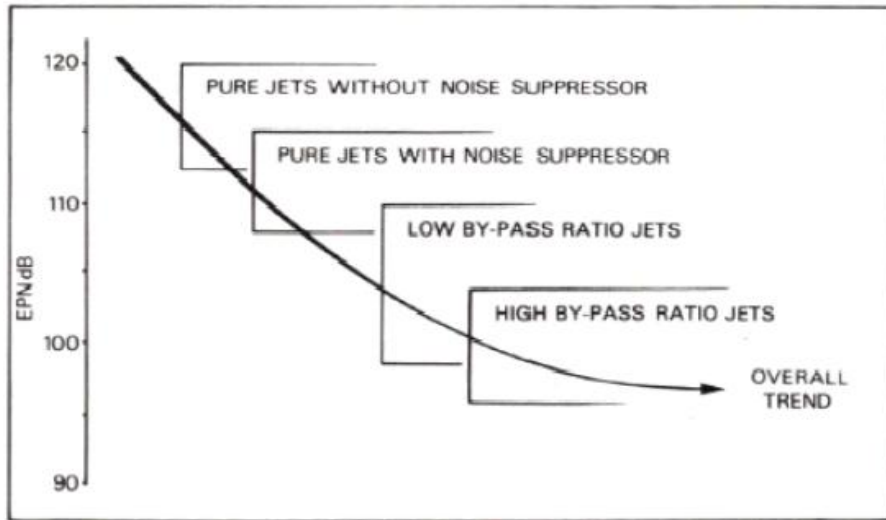


Figura 2.4. Comparación del nivel de ruido producido por diversos tipos de motor.

En la *figura anterior 2.4.* se observa cómo afectan los sistemas supresores de sonido en los aviones *jet*, y cómo las aeronaves con un *BPR* más alto producen menos sonido. Por tanto, uno de los retos a los que se enfrentan los fabricantes actualmente es a incrementar el *By-Pass-Ratio*.

También podemos apreciar en la siguiente *figura 2.5.* cómo afecta a la emisión de sonido una ligera modificación en la parte posterior del motor:

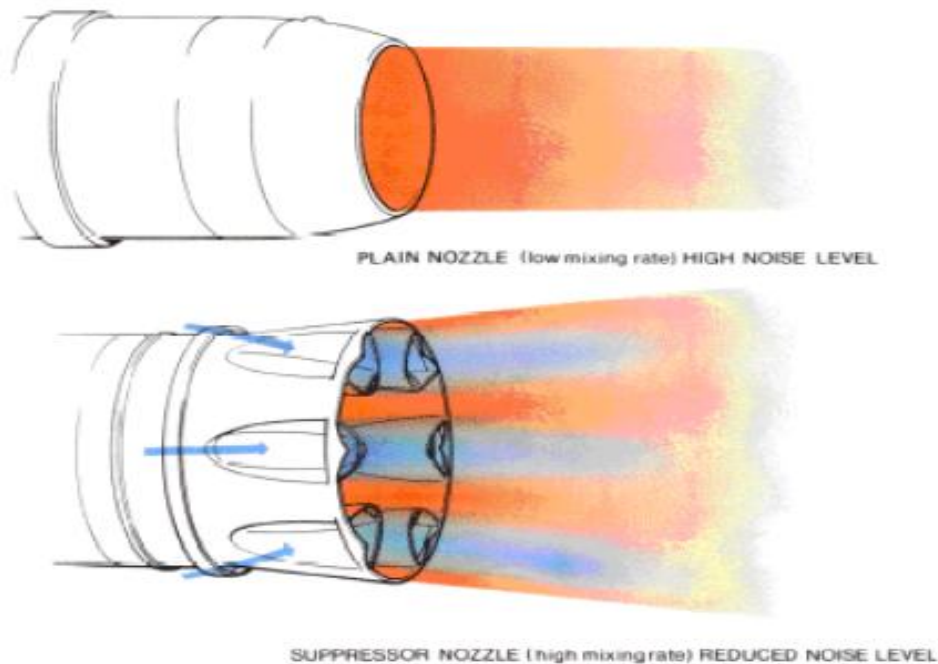


Figura 2.5. Cambios aplicados a la tobera de salida.

En la siguiente *figura 2.6.* podemos observar la evolución de las motorizaciones de las aeronaves de los con el paso de los años gracias a las evoluciones tecnológicas.

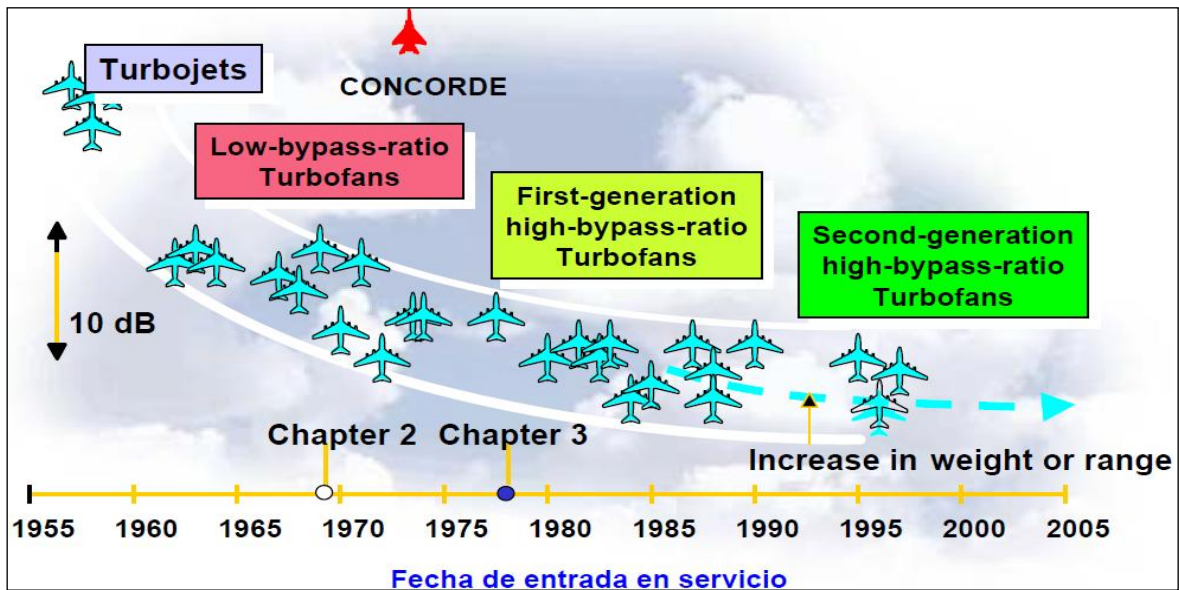


Figura 2.6. Cambios aplicados a la tobera de salida.

Actualmente la NASA se ha asociado con diferentes empresas para intentar hacer aeronaves más silenciosas. Están trabajando principalmente con los bordes de salida del motor, y con diferentes formas de diseñar los trenes de aterrizaje. En 2005 empezaron a realizar pruebas con un Boeing 777 especialmente equipado, con dos modificaciones en el motor proporcionadas por la empresa *Chevron*, y una cobertura para el tren principal. Los resultados concluyeron que con estas modificaciones iniciales se reducía hasta 4dB el ruido emitido.

Además, este estudio ha servido para concluir que, durante el aterrizaje, el sonido debido a la fricción de los neumáticos es tan elevado como el del propio motor. Como consecuencia de esto, el fabricante de neumáticos para aeronaves *Goodrich Corp.* ha introducido una carcasa para sus trenes de aterrizaje, que reducen el ruido en 3 dB. Actualmente esta modificación sólo ha sido utilizada por Nippon Airways (Ver [26]).

En un futuro se prevé que las mejoras no sólo vengan de mejoras en los motores, sino también de procedimientos operacionales (sobre todo las aproximaciones), para contrarrestar el ruido que se estima en unos años, que será muy superior al actual si estas medidas no se tuviesen en consideración.

CAPÍTULO 3. RUIDO EN AEROPUERTOS

Desde que aparecieron los aviones de reacción, el ruido ha pasado a ser el problema medioambiental más importante relacionado con la aviación civil. El grado de ruido en las proximidades del aeropuerto se ve afectado por dos tendencias opuestas. La primera es la sustitución de aeronaves ruidosas con otras más silenciosas, y la segunda es el número creciente de vuelos, cosa que disminuye el ruido en algunos aeropuertos y lo aumenta en otros.

En este capítulo 3 empezaremos hablando del marco legal al que se ven expuestos los aeropuertos españoles y que afecta directamente a la operatividad de la flota de aviones de las diversas compañías aéreas y acabaremos hablando sobre qué métodos ejecutan los aeropuertos para cumplir con la normativa y así mitigar los efectos de la contaminación acústica, como podrían ser las restricciones operativas.

3.1. Marco Legal

Antes de empezar con este apartado nos gustaría hacer inciso diciendo que la tendencia de la normativa va en dirección a disminuir el ruido aeronáutico al máximo y por lo tanto la normativa se hace más severa con el paso de los años. Vemos un claro ejemplo de esto con la eliminación de las aeronaves más ruidosas de capítulo II en el año 2002. Esto es debido al crecimiento del tráfico aéreo que obliga a utilizar las evoluciones tecnológicas para mejorar el impacto acústico en las zonas próximas al aeropuerto.

El esquema sobre el marco legal en cuanto a normativas de ruido en nuestro país es el siguiente:



Figura 3.1. Marco Legal Español (Ver [4]).

La Unión Europea tomó conciencia, a partir del Libro Verde de la Comisión Europea sobre “*Política Futura de Lucha Contra el Ruido*”, de la necesidad de aclarar y homogeneizar el entorno normativo del ruido, reconociendo que con anterioridad “*la escasa prioridad dada al ruido se debe en parte al hecho de que el ruido es fundamentalmente un problema local, que adopta formas muy variadas en diferentes partes de la Comunidad en cuanto a la aceptación del problema*”.

En línea con este principio, los trabajos de la Unión Europea han conducido a la adopción de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental (la “*Directiva sobre Ruido Ambiental*”). La trasposición de esta Directiva a la Ley 37/2003 del ruido, ofrece una oportunidad idónea para dotar de mayor estructura y orden al panorama normativo español sobre el ruido.

La Directiva sobre Ruido Ambiental se fija las siguientes finalidades:

- a) *Determinar la exposición al ruido ambiental, mediante la elaboración de **mapas de ruidos** según métodos de evaluación comunes a los Estados miembros.*
- b) *Poner a disposición de la población la información sobre el ruido ambiental y sus efectos.*
- c) *Adoptar **planes de acción** por los Estados miembros tomando como base los resultados de los mapas de ruidos, con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental siempre que sea necesario y, en particular, cuando los niveles de exposición puedan tener efectos nocivos en la salud humana, y a mantener la calidad del entorno acústico cuando ésta sea satisfactoria.*

Además, el real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre del ruido, en lo referente a “zonificación acústica, objetivos de calidad acústica y emisiones acústicas”, establece lo siguiente como se puede observar en la *tabla 3.1.*:

Tabla 3.1. Objetivos de calidad acústica

Objetivos de calidad acústica aplicables a áreas urbanizadas existentes			
Tipo de área acústica	Ld	Le	Ln
Zonas con predominio del suelo con uso residencial	65 dB	65 dB	55 dB

Nuevas infraestructuras. Valores límites de inmisión				
Tipo de área acústica	Ld	Le	Ln	L _{amax}
Zonas con predominio del suelo con uso residencial	60 dB	60 dB	50 dB	85 dB

Delimitación de Servidumbres acústicas			
Comprenderá el territorio incluido en el entorno de la infraestructura delimitado por el valor límite definido para zonas con predominio del uso del suelo residencial	Ld	Le	Ln

Como vemos los valores que más limitan están en la barrera de 60/50 DB. Según los índices de ruido Ld, Le y Ln (Apartado 2.4 Índices de Ruido) estos son los valores que se tomarán como estudio para determinar las medidas oportunas por el aeropuerto y se tendrán que cumplir. Esto se explica mejor en el siguiente apartado al explicar el concepto de “servidumbres acústicas”.

En las finalidades de la directiva i en la *figura 3.1*. hemos visto la aparición de dos conceptos: “plan de acción” y “mapas de ruido”. A continuación procederemos a explicar qué son y qué función tienen en el proceso de disminuir el impacto acústico.

3.2. Mapas estratégicos de Ruido. Delimitación de servidumbres acústicas.

Un mapa de ruido es la representación cartográfica de los niveles de presión sonora (ruido) existentes en una zona concreta y en un período determinado. En los mapas de ruido se ven representadas las diferentes líneas isófonas sobre el territorio analizado, como podemos observar en la siguiente figura. Los colores marcan la cantidad de nivel de ruido, siendo los colores más próximos al aeropuerto los que indican más exposición al ruido. Esto lo podemos observar en la siguiente *figura 3.2*.

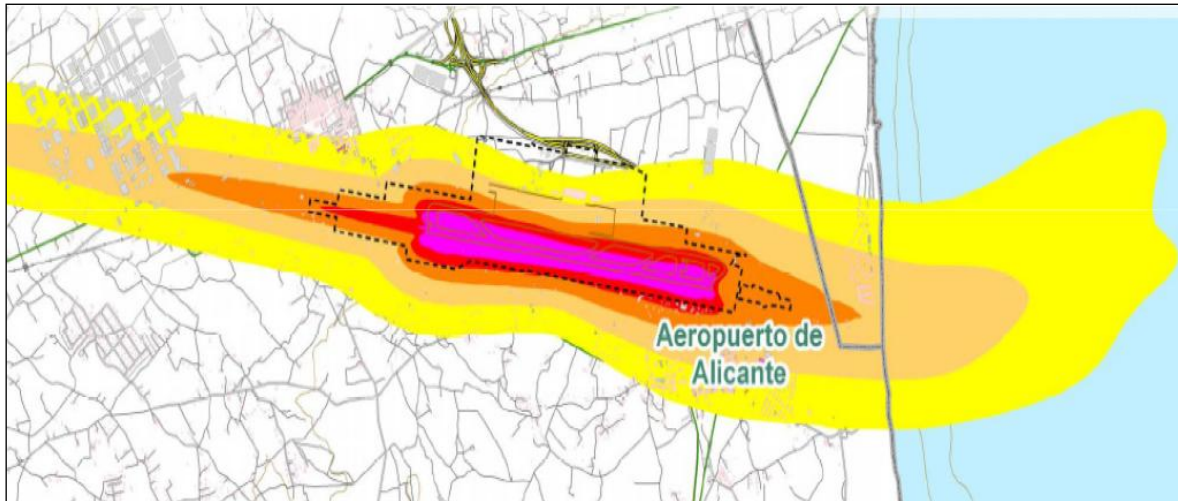


Figura 3.2. Mapa estratégico de ruido del Aeropuerto de Alicante.

Objetivo de los Mapas de Ruido.

La finalidad del mapa de ruido es determinar la exposición de la población al ruido ambiental, para así adoptar los planes de acción necesarios para prevenir y reducir el ruido ambiental y, en particular, cuando los niveles de exposición puedan tener efectos nocivos en la salud humana.

Esta exposición al ruido se puede mostrar delimitando las **Servidumbres Acústicas** gracias a los Mapas de Ruido. La Ley del Ruido define las zonas de servidumbre acústica como sectores del territorio en los que las inmisiones podrán superar los objetivos de calidad acústica aplicables a las correspondientes áreas acústicas y donde se podrán establecer restricciones para determinados usos del suelo, actividades, instalaciones o edificaciones, con la finalidad de, al menos, cumplir los valores límites de inmisión establecidos para aquéllos (Ver *Tabla 3.1. Objetivos de calidad acústica*).

Las servidumbres acústicas están destinadas a conseguir la compatibilidad del funcionamiento o desarrollo de las infraestructuras de transporte, con los usos del suelo, actividades, instalaciones o edificaciones implantadas, o que puedan implantarse, en la zona de afección por el ruido originado en dichas infraestructuras.

Éstas requieren de especial atención y son las que nos van a marcar más en cuanto como proceder más adelante, en el Apartado 4.3.2. Procedimientos operacionales.

¿Cómo se elaboran los mapas de ruido?

Sólo se pueden elaborar de dos maneras, estas son:

- 1. Modelización.** Que consiste en la simulación a través de un software informático del ruido en el entorno de los aeropuertos. A través de parámetros de entrada referentes a las operaciones que se realizan en el aeropuerto (Tipos de aeronaves i número de operaciones...), y datos específicos del aeropuerto (configuración de pistas, temperatura...). La salida del programa es un mapa de ruido el cual nos mostrará las zonas afectadas por el ruido. Estos mapas de ruido son los que se presentarán en los planes de acción incluidos dentro del plan director, como veremos más adelante.
- 2. Monitorización:** Que consiste en la medición real a través de terminales de medición de ruido (sonómetros) situados en los alrededores de los aeropuertos. Estas medidas se usan para confirmar o no que se cumplen los niveles de ruido que se pronosticaban mediante la simulación.

La mapas de ruido a través de la simulación son los que más se usan para tomar acciones de mitigación de ruido, por eso a continuación nos disponemos a explicar la realización de estos a través del software INM. Cabe destacar que la monitorización se utiliza más que nada como método para comprobar que las operaciones de las aeronaves cumplen los límites fijados por la ley, esto lo podemos observar en el apartado 4.3.2. *Procedimientos operacionales*.

3.2.1. Modelización. Software INM.

A continuación pasaremos a describir los fundamentos técnicos aplicados para la elaboración de los mapas de ruidos que elabora AENA dentro de los planes de acción para mitigar el ruido en los aeropuertos.

Integrated Noise Model

Los mapas de ruido contenidos en los planes directores se han elaborado con el programa INM (*Integrated Noise Model*) de la FAA. Actualmente en España se usa la versión 7.0 de dicho programa.

El INM se trata de una herramienta de alto desarrollo técnico que evalúa el impacto acústico producido por el ruido de las aeronaves en el aeropuerto y sus alrededores. Permite entre otras cosas, la valoración de los cambios en el impacto acústico resultado de la incorporación de una nueva pista, la prolongación de una ya existente o los cambios de configuración de pistas... También permite valorar el impacto producido por la variación de la demanda

del tráfico y de la mezcla de la flota, así como el resultante de las diferentes alternativas de perfiles de vuelo o modificaciones a otros procedimientos operacionales.

El modelo también permite calcular cuál es el nivel de ruido en un lugar específico. En este sentido proporciona información detallada para el analista que puede determinar qué eventos contribuyen de manera más significativa al ruido de dicha localización.

La precisión de sus resultados está avalada por sus años de uso, mejorando en cada nueva versión. Se trata en definitiva de un programa que tiene en cuenta todos los factores que afectan directamente al ruido percibido en el aeropuerto, los cuales se introducen a modo de *input* en el INM. Estos factores son:

- Altitud, temperatura, geometría de las pistas.
- Trayectorias de despegue, en el plano horizontal, así como el grado de utilización de cada una de ellas.
- Trayectorias de aterrizaje, en el plano horizontal, así como el grado de utilización de cada una de ellas.
- Tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto, número de operaciones y periodo del día de cada una de las trayectorias de despegue y aterrizaje.
- Tipo de métrica a obtener, es decir, el índice en el que serán dibujadas las líneas isófonas.
- La precisión del cálculo
- Perfiles de aproximación y despegue de las aeronaves.
- Características acústicas de las aeronaves.

Así mismo también es posible introducir una modelización del terreno a partir de cartografía ya existente.

La representación de las líneas isófonas en los mapas de ruido conforman el resultado gráfico fundamental que nosotros queremos obtener, gracias al proceso de cálculo.

Una vez seleccionamos el índice que queremos utilizar para representar (En nuestro caso L_d , L_e i L_n), obtendremos los niveles de ruido asociados a ese índice en los diferentes puntos x/y (Obtenemos más puntos cuanto más precisión) de la vista en planta del aeropuerto. El programa aplica un proceso de interpolación que permite dibujar los contornos para los valores seleccionados.

En resumen, podemos entender el INM como un programa de simulación que genera mapas de ruido a través de parámetros de entrada. Entonces es fácil entender que cada avión genera un ruido diferente y según la frecuencia de operación de este el mapa de ruido saldrá de una manera u otra. Por lo tanto hay que saber cuánto ruido hace un avión en las trayectorias trazadas durante las operaciones de aterrizaje/despegue.

Estos datos los proporciona el fabricante de cada aeronave y se calculan a través de mediciones reales específicas en condiciones muy concretas y en

puntos muy concretos del terreno (ver Figura 3.3). Después de obtener estas medidas de diferentes sonómetros, se extrapolan a todo el entorno aeroportuario permitiéndonos saber qué ruido se percibe de un avión en un punto (x,y) del aeropuerto mientras éste está en un punto determinado de su trayectoria de salida/llegada.

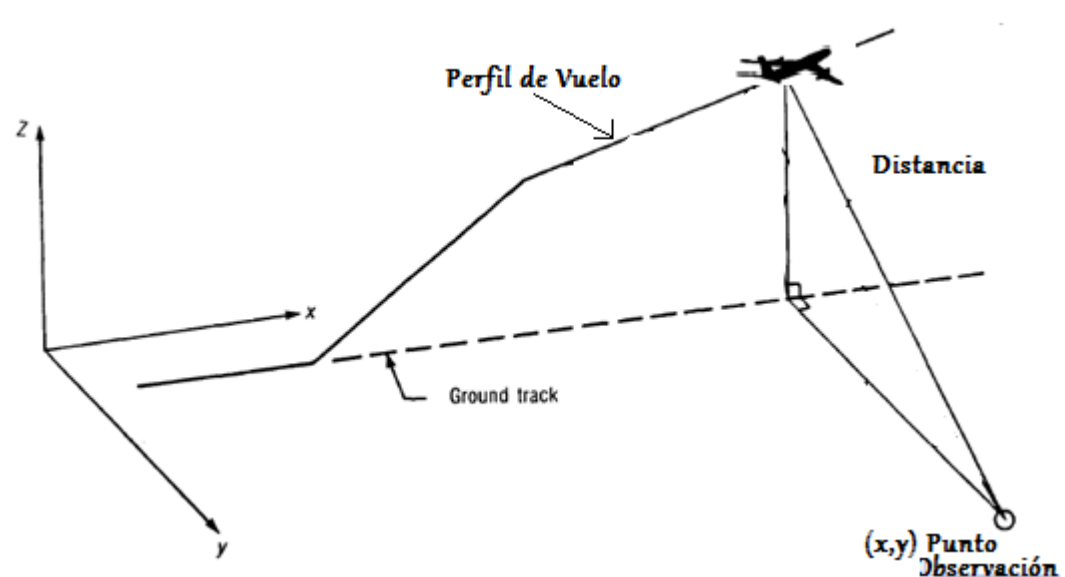


Figura 3.3. Esquema de medición de ruido en aeropuertos.

Dicho modelo permite cumplir con las normas y recomendaciones establecidas en el **documento nº 29 de la ECAC.CEAC** (Conferencia Europea de Aviación Civil) que es la adaptación de la **Circular 205 de la OACI** a la norma europea.

3.3. Planes de Acción. Acciones para mitigar el ruido.

Son los planes estratégicos dirigidos a solucionar las cuestiones relativas al ruido y sus efectos en el territorio.

El primer objetivo es la determinación, como ámbito de actuación, del territorio circundante al aeropuerto delimitado por la isófona correspondiente a los valores de inmisión acústica, 50/60 dB (delimitación servidumbre acústica), que establece el Real Decreto 1367/2007, territorio en el que, en el horizonte del año 2020, se deberán haber alcanzado los objetivos de calidad acústica en los términos previstos en la disposición adicional tercera del citado RD. Esta isófona la podemos encontrar a través de la simulación de mapas de ruido anteriormente descritos.

Según el horizonte temporal se distinguen los siguientes objetivos:

1. En el horizonte del corto plazo (2 años): Completar los estudios necesarios para identificar y aprobar las medidas de prevención del <<enfoque equilibrado>>, con un mejor balance entre beneficios y costes.
2. En el horizonte del medio plazo (5 años): Puesta en marcha las medidas preventivas seleccionadas.
3. En el horizonte del 2020: Completar la ejecución de las medidas seleccionadas, alcanzándose los objetivos de calidad en todo el ámbito de actuación.

Cada aeropuerto debe disponer de dicho documento ya que en él se muestra, entre otras cosas, el impacto acústico de la actividad aeroportuaria y los mapas de ruido que nos indica que zonas están más afectadas por el ruido (zonas de servidumbre acústica).

¿Dónde los podemos encontrar?

Estos planes de acción se encuentran dentro del Plan director de cada aeropuerto. Podemos resumir como plan director aquella planificación que pretende abarcar el crecimiento previsto del aeropuerto a efectos de atender a la demanda de transporte aéreo, y la coordinación con otras administraciones implicadas, de manera que se desarrolle de forma compatible con el entorno social, económico, territorial y medio ambiental. El plan director se realiza cada 5 años y la tramitación de éste viene regulada por la ley 9/2006 y la directiva europea 2001/49/CE, la cual dice que el organismo encargado de hacerlos es AENA.

Contenido de los planes de Acción:

El contenido mínimo que tiene que tener un plan de acción lo encontramos en el Real Decreto 1513/2005, Anexo V.

Contenido:

1. Descripción general del aeropuerto, autoridad responsable y contexto jurídico aplicable.
2. Valores límite vigentes en el territorio expresados en Ld, Le, Ln i Lamax correspondientes al ruido de los aeropuertos.
3. Resumen de los resultados de la cartografía.
4. Evaluación del número estimado de personas expuestas al ruido, problemas y situaciones a mejorar.
5. Relación de alegaciones u observaciones recibidas en el periodo de información pública.
6. Medidas que ya se aplican para reducir el ruido.
7. Actuaciones previstas para los próximos 5 años, incluidas medidas para proteger las zonas tranquilas.
8. Estrategia a largo plazo.
9. Disposiciones previstas para evaluar la aplicación y los resultados de los "Planes de Acción".
10. Estimación de la reducción del número de personas que sufren molestias o alteraciones del sueño.

Áreas Claves de Actuación del plan de Acción.

Durante la 33ª Asamblea General de la OACI, quedó patente la necesidad de una política homogénea para abordar el problema del ruido en el entorno de los aeropuertos.

Consciente de ello, se adoptó un compromiso internacional, que establecía una política común de lucha contra el ruido, introduciendo el concepto de <<enfoque equilibrado>>.

Un «enfoque equilibrado» es el enfoque con arreglo al cual se examinan las posibles medidas disponibles para hacer frente al problema del ruido en un aeropuerto.

Este "enfoque" establece las siguientes áreas de actuación, áreas que se tendrán que tener en cuenta para la elaboración de los planes de acción:

1. Reducción de los niveles sonoros en la fuente.
2. Medidas enfocadas a la ordenación y gestión del suelo.
3. Procedimientos operativos de reducción de ruido.
4. Restricciones de las operaciones de las aeronaves.

3.3.1. Medidas de reducción del ruido en la fuente

El sector del transporte aéreo ha realizado en los últimos 30 años un esfuerzo muy importante en la concienciación de la industria aeronáutica para establecer como objetivo estratégico la reducción de los niveles de emisión en fuente. Estas evoluciones de reducción de ruido en la fuente se pueden ver en el Apartado 2.3 Evoluciones tecnológicas. Para asegurar esta reducción, así como su eficacia, OACI definió una serie de límites de certificación acústica basados en las consideraciones incluidas en diferentes capítulos del Anexo 16, Volumen I, 2ª parte, del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago) (Apartado 2.2 Clasificación de las aeronaves en función del ruido).

La OACI consideró la adopción de las primeras restricciones operativas hace 15 años. La sesión extraordinaria de la Asamblea de 1990 estableció una intención de retirada de las aeronaves capítulo 2 de certificación referida a las aeronaves jet subsónicas.

A los estados que sufrían problemas acústicos, se les permitió la implantación de restricciones a la operación de aquellos aviones que no verificaban los requerimientos impuestos por el capítulo 3 de certificación (Anexo 16, Volumen I, 2ª parte, de la Convención sobre Aviación Civil Internacional). Sin embargo, se les instó a aplicar las medidas únicamente a aquellas aeronaves que llevaran en servicio más de 25 años, para posteriormente implementar una retirada paulatina durante un periodo de 7 años, comprendido entre el 1 de abril de 1995 y el 1 de abril de 2002. Por esta razón, desde el 1 de abril de 2002 existe la prohibición a la operación de las aeronaves subsónicas civiles que no tengan el certificado de ruido conforme a las normas capítulo 3 en los aeropuertos comunitarios (en cumplimiento de la Directiva 92/14/CEE). En 2001, la problemática fue planteada de nuevo mediante la definición de un nuevo estándar de ruido denominado capítulo 4, más exigente que los anteriores en base a las recomendaciones realizadas en el quinto encuentro de CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection).

En la actualidad, existe la obligación de verificar los criterios de este capítulo para todas aquellas aeronaves certificadas, o re-certificadas sobre su catalogación de capítulo 3, a partir de 1 de enero de 2006. De forma paralela al establecimiento de restricciones basadas en la certificación acústica, la tendencia de la industria aeronáutica muestra una mejora muy considerable por encima de los criterios fijados por el anexo 16. Incluso, algunos estudios señalan una reducción adicional del 50% del ruido durante las operaciones de despegue y aterrizaje futuras, lo que conllevaría una disminución de 10 dB para el año 2020, como consecuencia de la optimización de los motores instalados.

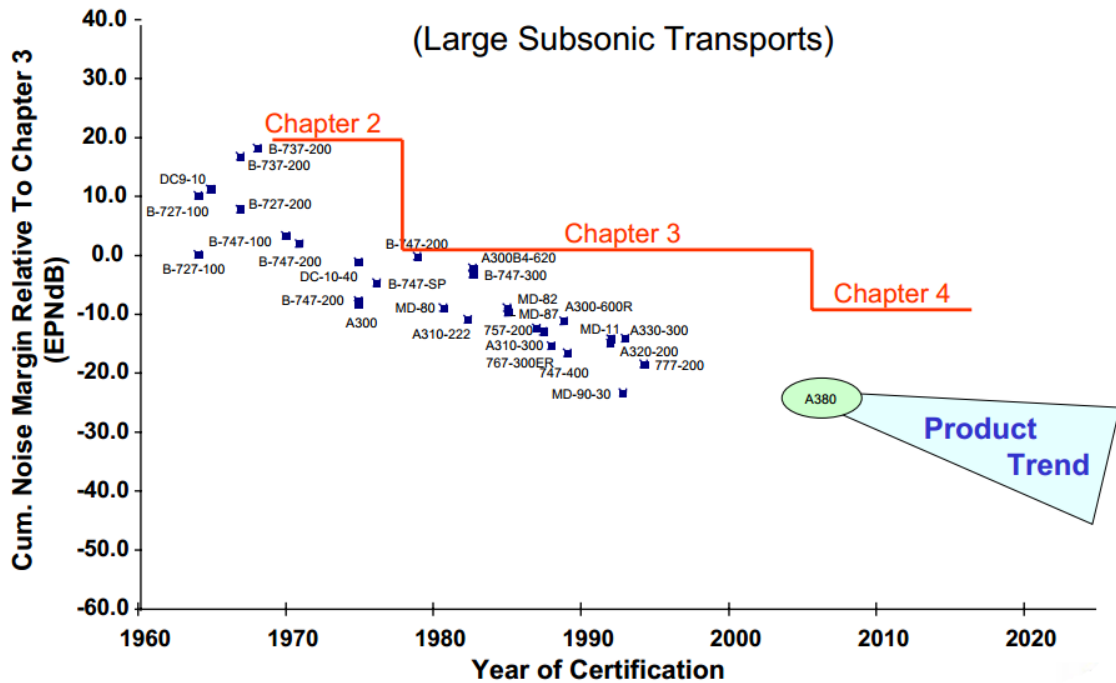


Figura 3.4. Tendencia en la fabricación y certificación de aeronaves.
Fuente: Sanjay Hingorani (P&W)

Debido a exigencias de eficiencia energética y amortización de sus flotas, las compañías aéreas están desarrollando unos programas de renovación natural de sus aeronaves que llevan asociados unos menores valores de emisión desde el punto de vista acústico.

A continuación, se representa una comparativa de la evolución experimentada en los niveles de emisión para las diferentes generaciones de aeronaves.

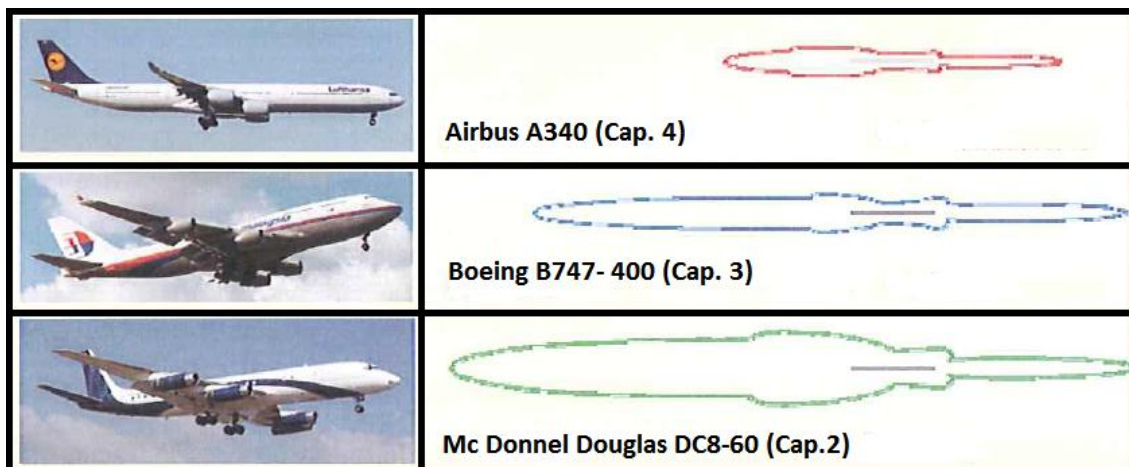


Figura 3.5. Comparación de huellas sonoras de aeronaves Capítulo 2, 3 y 4

3.3.2. Procedimientos operacionales

A la hora de evaluar y definir el tamaño y las curvas de nivel de ruido alrededor de un aeropuerto se deben tener en cuenta tanto los procedimientos operacionales en vuelo como los de base terrestre. Así pues, a la hora de reducir el número de personas afectadas por el ruido también se aplicarán medidas a tales operaciones.

Es importante que los procedimientos operacionales de atenuación del ruido aprobados mantengan las medidas de seguridad operacional, siempre de máxima prioridad, de los vuelos considerándose todos los factores que pudieran afectar a una operación. Entre estos factores se incluyen las condiciones meteorológicas vigentes y pronosticadas, las condiciones de las pistas y las ayudas para la navegación disponibles. A pesar de todo, no deberían introducirse estos procesos operacionales de atenuación a no ser que exista o se prevea un problema de ruido.

A continuación explicaremos diferentes procedimientos operacionales para atenuación de ruido que se utilizan actualmente.

Básicamente consisten en el uso de pistas preferenciales en relación con el ruido para dirigir trayectorias iniciales y finales lejos de las zonas sensibles; también el uso de rutas preferenciales, para evitar zonas a la salida y llegada, llegando a incluir virajes y optimizar la distribución del ruido en tierra a la hora del despegue o aterrizaje.

Vamos a poner ejemplos de estos procedimientos operacionales de atenuación del ruido.

3.3.2.1. Utilización de pistas

Se utilizan pistas preferenciales en relación con el ruido, ya que proporcionan sentidos preferidos para el despegue o el aterrizaje, según las operaciones. Se seleccionan con el fin de que las aeronaves puedan evitar zonas sensibles al ruido. En todo caso la seguridad operacional siempre prevalece en la selección de pistas, las cuales deben estar equipadas con ayudas convenientes a la navegación. Con esto se reduce la longitud de la curva de ruido en la primera dirección pero se prolonga en la segunda, con posiblemente una disminución de personas afectadas.

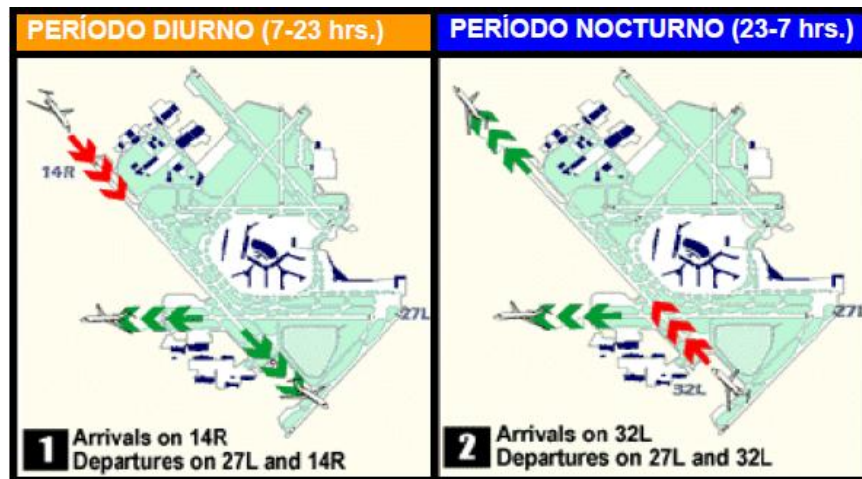


Figura 3.6. Configuración pistas según periodo del día (Aeropuerto de Barcelona)

Otra manera de lograr una reducción del ruido es desplazando umbrales, es decir, el desplazamiento del inicio del despegue y el umbral de aterrizaje para así sobrevolar zonas afectadas a más altitud.

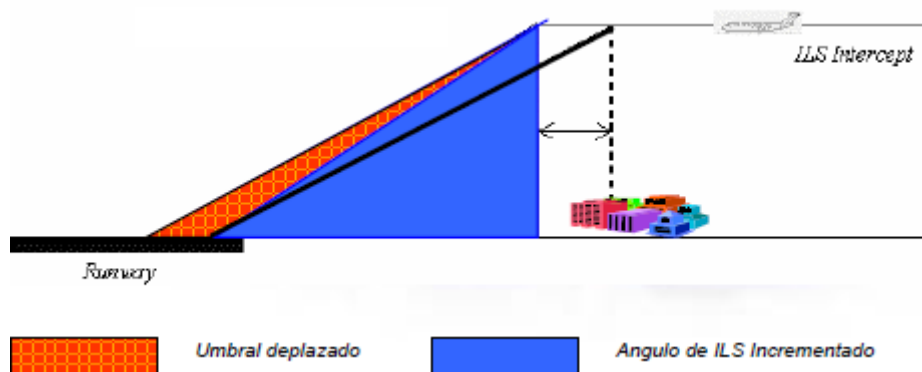


Figura 3.7. Desplazamiento de umbral

3.3.2.2. Uso de rutas de salida y aproximación del vuelo

Se usan rutas preferenciales en relación con el ruido, de ruido mínimo. Se establecen para asegurar que las aeronaves que salen y llegan se apartan de zonas sensibles al ruido durante el sobrevuelo de la vecindad del aeropuerto, teniendo en cuenta las limitaciones del terreno.

Se han de respetar los procedimientos SID/STAR. Todas las aeronaves deberían realizar operaciones hacia y desde los aeropuertos utilizando salida normalizada por instrumentos (SID) y si procede llegada normalizada por instrumentos (STAR). Respecto al ruido, permite el desarrollo y la aplicación de derrotas de vuelo para la atenuación de éste.

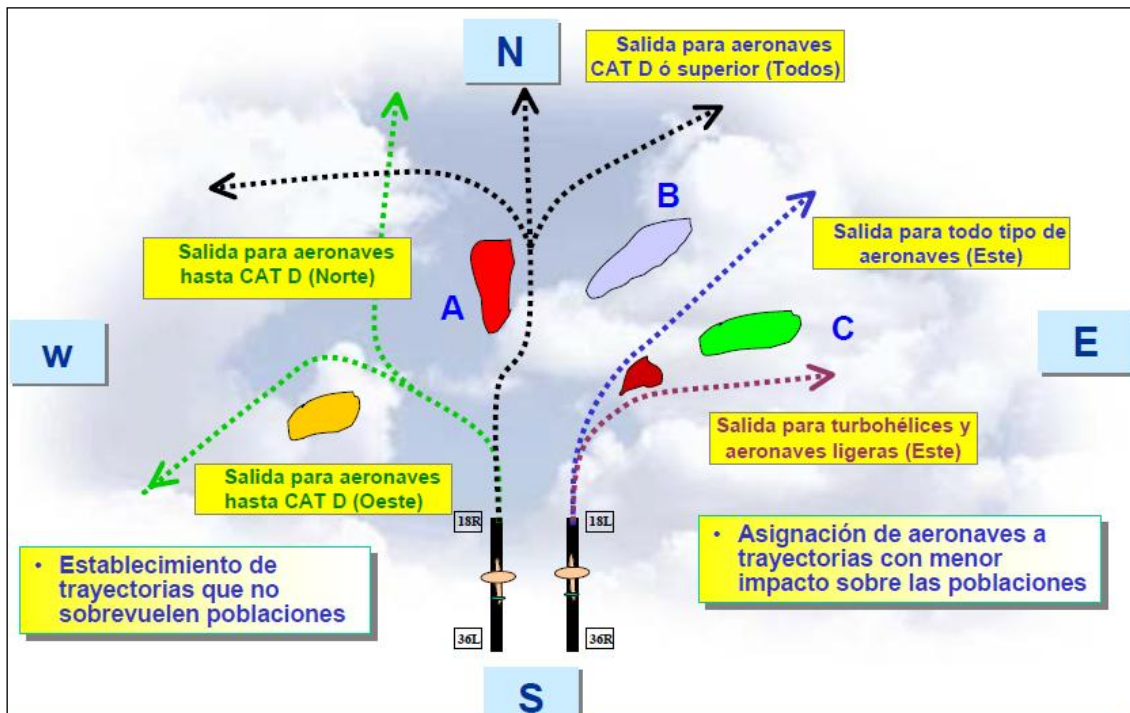


Figura 3.8. Uso de rutas de salida para minimizar impacto acústico

Podemos utilizar derrotas de vuelo dispersas, es decir, dispersarse por distintas derrotas en zonas de bastante extensión, disminuyendo la longitud y aumentando la anchura de las zonas de exposición al ruido. A su vez podemos utilizar procedimientos automatizados de llegada y de salida para lograr lo contrario.

3.3.2.3. Uso de procedimientos de aproximación

Los perfiles de descenso pueden reducir la exposición al ruido de una aeronave que se mantiene a una altura superior a las altitudes y ángulos normales de aproximación y que intercepta la pendiente de descenso de aproximación del sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS) a una altitud superior.

Otro procedimiento sería la técnica de potencia reducida y de resistencia al avance reducida, es decir demorar lo máximo el repliegue de flaps y el despliegue del tren de aterrizaje en combinación con las instrucciones del ATC.

Por último tenemos la *Aproximación en descenso continuo (CDA)*. Se trata de un tipo de aproximación que realiza su descenso de forma continuada, sin los escalones habituales para reducir el nivel de vuelo. La reducción de altitud, entonces, se realiza linealmente.

Típicamente el CDA empieza a 70 millas náuticas de la pista, a una altitud de 11.000 ft, y consta de un ángulo de descenso de 3°. El avión utiliza menos empuje y necesita menos tiempo a bajas altitudes cerca del aeropuerto para aterrizar. Eso permite que el avión se encuentre a altitudes más elevadas en la mayor parte de su trayectoria de descenso, cosa que reduce significativamente el ruido percibido en tierra.

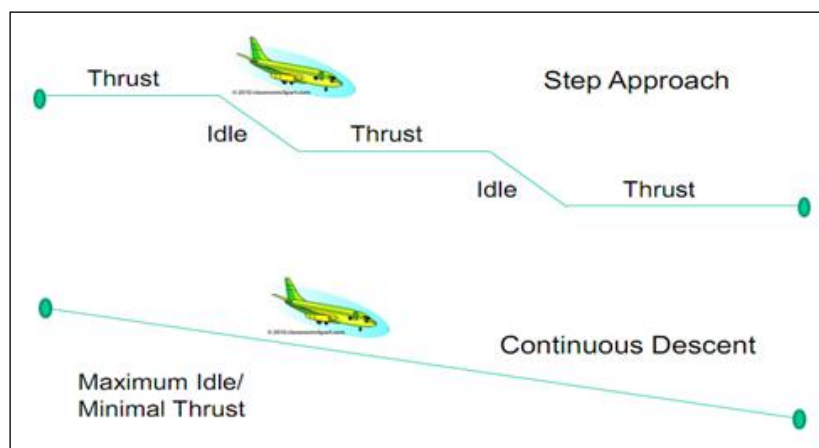


Figura 3.9. Diferencia entre aproximación escalonada y descenso continuo

Estudios demuestran que utilizar el CDA en aproximaciones reduce hasta un 30% el ruido.

3.3.2.4. *Uso de procedimientos operacionales de base terrestre*

Hay diversas medidas operacionales que se utilizan en tierra para reducir la perturbación del ruido. Éstas pueden incluir la limitación del recorrido en tierra con el motor funcionando.

También pueden introducirse medidas operacionales para reducir el ruido en la cercanía de las aeronaves estacionadas y reducir al mínimo las operaciones

siempre que se disponga de fuentes de alternativa como equipo auxiliar de tierra (GSE), así como también reducir el tiempo y distancia de rodaje.

También otra medida sería adaptar los periodos de pruebas de motores para que tengan menos impacto acústico para la comunidad, es decir: prueba de motores en horario diurno, en lugares más adecuados, en menor tiempo pero a más potencia...

3.3.2.5. *Sistemas de monitoreado de ruido*

Para introducir este tema diremos que la monitorización es la otra manera de medir cual es el impacto acústico en los aeropuertos. Lo bueno de utilizar el monitoreo es que se obtienen medidas reales y permite saber de manera más fiel lo que está pasando en el entorno aeroportuario. Lo malo es que este sistema es muy costoso y sólo se implementa en aeropuertos de gran tamaño. Por lo tanto podemos decir que la simulación aunque no es del todo real ya nos sirve y cada vez es más fiel con la realidad.

El monitoreo de ruido en aeropuertos se puede realizar por medio de un sistema de monitoreo fijo, el cual es comúnmente utilizado en los grandes aeropuertos del mundo y permite la correlación del evento de ruido, con información proveniente del radar, los planes de vuelo (proporcionados por el SACTA- Sistema Automático de control del tránsito aéreo- en el caso de España) e información de las bases de datos del aeropuerto.

La primera instalación en España de un sistema de este tipo se realiza en Madrid Barajas en 1993 y posteriormente en los aeropuertos de Palma de Mallorca i Barcelona.

Estos sistemas de monitorización de ruido tienen como finalidad comprobar el cumplimiento de los procedimientos operativos que se realizan en el aeropuerto y conseguir un mejor conocimiento del ruido y de las trayectorias de las aeronaves con el objetivo de minimizar las molestias causadas por el ruido. Sus funciones básicas son las siguientes:

- Reconstrucción de la trayectoria de vuelo y correlación con la información del plan de vuelo. (compañía, numero de vuelo, tipo de aeronave, origen/destino)
- Registro de los niveles sonoros en diferentes localizaciones.
- Seguimiento del cumplimiento de los procedimientos establecidos.
- Gestión y correlación de las quejas recibidas.
- Análisis estadístico de las operaciones y los niveles de ruido.
- Comprobación que cumple con los niveles de ruido establecidos en el plan director.

A partir de los datos proporcionados, además de seguir el cumplimiento de la normativa sobre ruido posibilitando la imposición de sanciones administrativas a las aeronaves infractoras, se puede conocer mejor la influencia real del ruido aeroportuario sobre el entorno, la eficiencia de las medidas, en especial en lo relacionado con el diseño de maniobras, que se prevean que puedan atenuar el impacto negativo sobre el medio ambiente.

El sistema de monitoreo de ruido fijo en los aeropuertos consta de al menos de 5 terminales de medición de ruidos (TMR) que se ubican en lugares estratégicos de la periferia del aeropuerto, en áreas de potencial afección sonora por los movimientos de aproximación y despegue de aeronaves. Los TMR constan de:

- Un Sonómetro: Consta del micrófono con unidad de acondicionamiento para mediciones de ruido (*Ver capítulo 1*)
- Una unidad de almacenamiento para tener un respaldo local de la información procesada.
- Un módem para transmitir los datos a la central. En unidades modernas se puede realizar esta comunicación por otros medios como puede ser: ISDN, DSL, POTS, GSM o WiFi.
- Algunos TMR pueden disponer de terminales que disponen de estaciones meteorológicas que suministran registros de temperatura, humedad, presión atmosférica, dirección e intensidad del viento y precipitaciones.

Hay que decir que se pueden incorporar equipos de medición portátil para mediciones puntuales en las localizaciones que se considere necesario.

Para lograr la correlación de los datos se necesita además un radar, un FDPS (Flight Plan Processing System), y un GPS. Toda esta correlación de datos se lleva a cabo en una central donde se reciben y se procesan todos los datos requeridos. Una vez obtenidos los datos finales de ruido son enviados a la oficina del aeropuerto encargada del ruido. Ésta es la encargada de derivar esta información a las distintas oficinas o incluso a las aerolíneas para sancionarlas por exceder niveles de ruido. Todo este proceso se puede ver en la *Figura 3.10*.

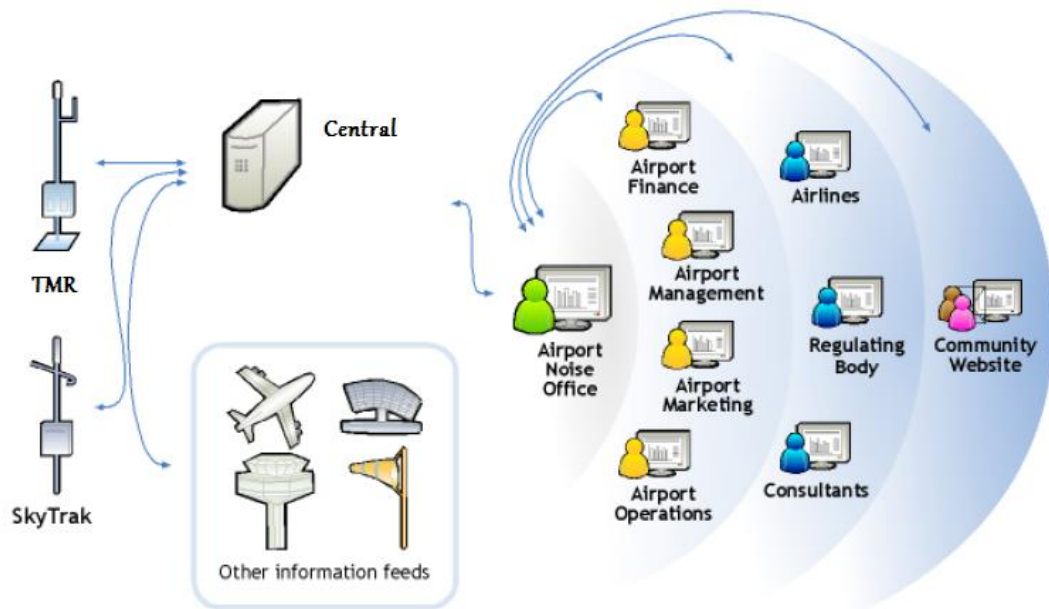


Figura 3.10. Medición del ruido en aeropuertos

Algunos de los indicadores proporcionados por estos equipos son: Lmax, Lae, Lden, EPNL, Leq... (*Apartado 1.4*)

3.3.3. Gestión y ordenación del territorio adyacente al aeropuerto

En la siguiente figura podemos ver cómo afecta la normativa de ruido a las zonas adyacentes al aeropuerto. Normativa en mano y usando los mapas de ruido ya explicados en el Apartado 3.2. podemos delimitar las servidumbres acústicas que generan problemas de ruido.

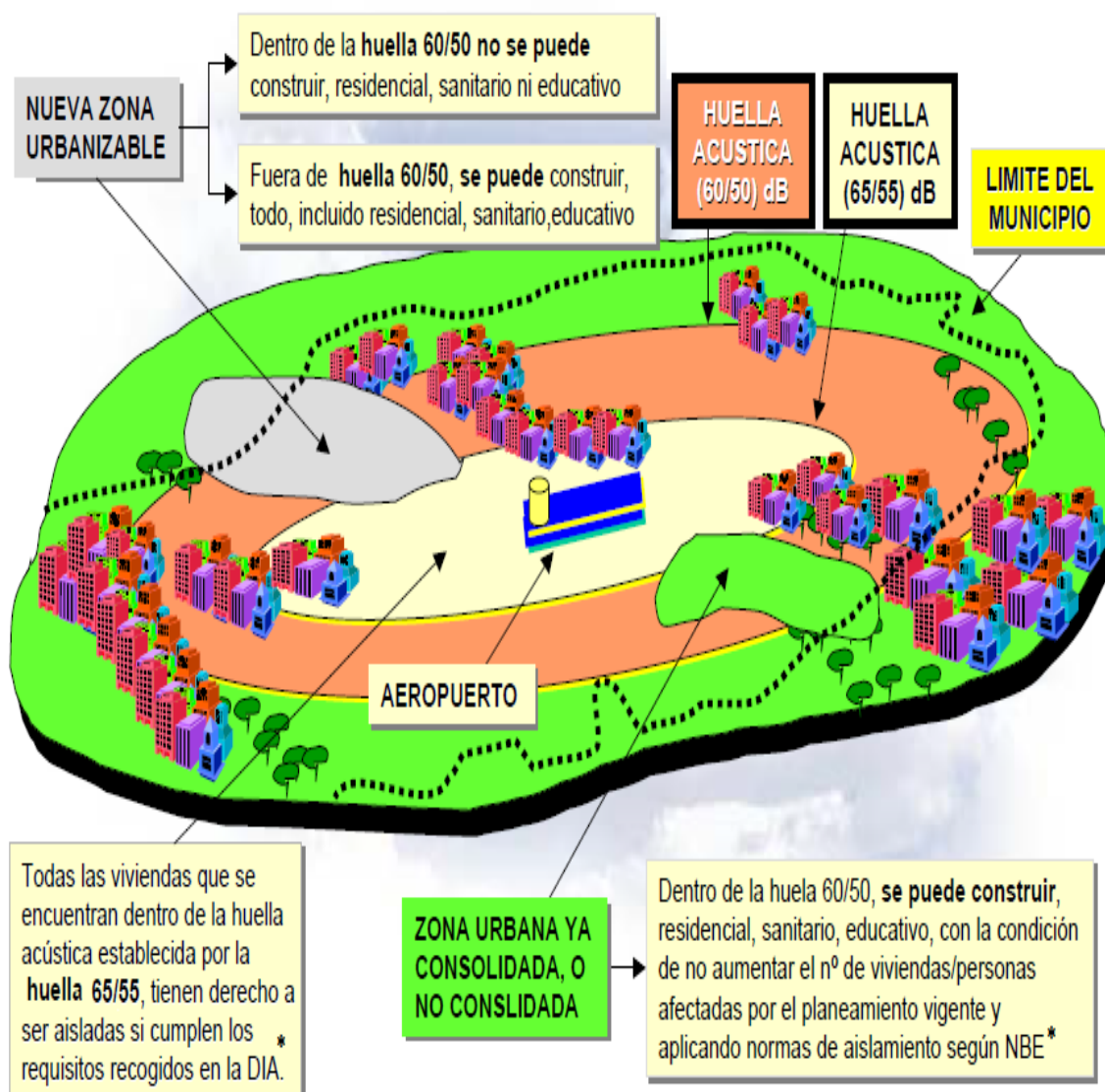


Figura 3.11. Gestión y ordenación del territorio adyacente al aeropuerto

NBE: Normas básicas de edificación. Las normas NBE eran un conjunto de códigos de obligado cumplimiento, hoy derogados, que regulaban la construcción de edificios e infraestructuras

DIA: Declaración de Impacto ambiental. Es un documento oficial en el cual se recoge el resultado de una evaluación de impacto ambiental y de sus alegaciones. Es un documento obligatorio para la construcción de infraestructuras en una gran cantidad de países

Para intentar minimizar al máximo el impacto acústico de la OACI se exponen algunas de las técnicas que garantizan un enfoque equilibrado por el ruido emitido por las aeronaves en las cercanías del aeropuerto. Estas son las siguientes (Ver [5]):

Códigos para construcción de edificios Las técnicas y normas de materiales de construcción estructural mínimas determinan frecuentemente si los cambios en las normas actuales o nuevas pueden aumentar los niveles de reducción del ruido en el interior de edificios de residencia o comerciales en zonas afectadas por el ruido. Los códigos de construcción son esencialmente medios legales de exigir un aislamiento adecuado del ruido que haya de incorporarse a un nuevo edificio. Aunque puede haber dificultades para incorporar los requisitos de aislamiento acústico en los códigos de construcción de edificios nuevos, éstos son relativamente menores si se comparan con los problemas de aislamiento acústico de los edificios ya existentes.

Programas de aislamiento del ruido. El aislamiento del ruido puede hacer que disminuyan los niveles de ruido en el interior de edificios residenciales que no puedan razonablemente retirarse de zonas de exposición al ruido. El aislamiento del ruido es particularmente eficaz en edificios comerciales, incluidas oficinas y hoteles. Sin embargo, es mucho más conveniente controlar los requisitos de aislamiento de tales edificios desde el principio, viendo si es necesario construirlos en dichas zonas, ya que las dificultades de las nuevas edificaciones son menores comparadas con los edificios ya construidos como hemos visto en el punto anterior.

Adquisición de terrenos y cambio de lugar. Esta estrategia implica la adquisición de terrenos mediante su compra por parte del explotador del aeropuerto (o la autoridad de planificación en caso de nuevos sectores de desarrollo) y el traslado de residencias y negocios que no son compatibles con los niveles de ruido generados en el aeropuerto. La adquisición de los terrenos y el traslado garantizan en forma absoluta la compatibilidad de la utilización de los terrenos a largo plazo en el aeropuerto. El terreno adquirido puede dejarse libre de obstáculos, mantenerse como zona intermedia, venderse con derechos de uso de la propiedad para controlar el desarrollo futuro o ser objeto de un nuevo desarrollo con utilización compatible de los terrenos.

De todas maneras esta medida no es una solución del todo práctica, ya que resulta costosa y es socialmente desestabilizador comprar todos los terrenos afectados por el ruido, aunque se ha empleado extensamente en los Estados Unidos como solución de última instancia.

Asistencia a transacciones. La asistencia en las transacciones implica cierto nivel de asistencia financiera y técnica para los propietarios de viviendas que tratan de vender una propiedad afectada por el ruido y puede suponer el pago de honorarios a la agencia de bienes raíces. En último caso, el aeropuerto adquiere de hecho la propiedad de los terrenos que han estado en el mercado por un tiempo prolongado y seguidamente los vuelve a vender. Para que sean compatibles con los niveles de ruido, las propiedades se aíslan del ruido antes

de su reventa y habitualmente vuelven a venderse junto con un derecho de usos de la propiedad.

Divulgación de bienes raíces. Cuando la reglamentación y las cuestiones ambientales afectan al proyecto de construcción, pueden darse avisos de divulgación de información sobre bienes raíces. Para que sean eficaces estos avisos necesitan describir el ruido de las aeronaves en una forma que sea comprensible para los posibles residentes.

Esto da una toma de conciencia de la relación entre aeropuerto y comunidad y puede obligar a dar un aviso a los compradores acerca de las perturbaciones debidas al ruido de las aeronaves.

Es decir, la divulgación puede disuadir a compradores más sensibles al ruido, para que en el futuro éstos no lleguen a quejarse por razones de ruido, evitando conflictos desde un inicio.

Barreras de ruido. Estas constituyen barreras sobre el terreno tales como terraplenes, vegetación u otras barreras, habitualmente construidas por el hombre, que están situadas entre las fuentes de ruido al nivel del suelo en el aeropuerto y muy cerca de los receptores sensibles al ruido.

No mitigan el ruido en vuelo. Las barreras de ruido deben ser precisamente construidas y colocadas para que constituyan un alivio significativo. Han sido particularmente beneficiosos los trabajos de jardinería en los terraplenes, para hacerlos atractivos a la vista. Una colocación adecuada de los edificios del aeropuerto puede también actuar como pantalla de ruido para las comunidades adyacentes respecto a varias actividades en el aeropuerto.

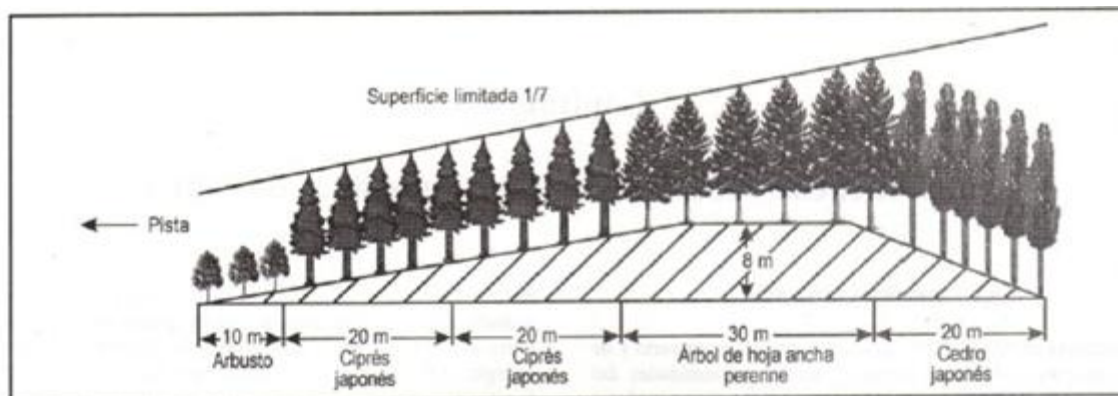


Figura 3.12. Ejemplo de barrera de vegetación.

3.3.4. Restricciones operativas

La Directiva 2002/30, de 26 de marzo, transpuesta al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 1257/2003, de 3 de octubre, por el que se regulan los procedimientos para la introducción de restricciones operativas relacionadas con el ruido en aeropuertos, define una restricción operativa como “una acción relacionada con el ruido que limita o reduce la accesibilidad de una aeronave a un aeropuerto”.

OACI recomienda que antes de aprobar la implementación de restricciones operativas se realice una evaluación global de las restantes medidas posibles, es decir, las descritas en los apartados anteriores relativas a procedimientos operacionales.

Tal y como se ha planteado en el *Apartado 3.3.1. Medidas de reducción de ruido en la fuente* la legislación nacional obliga a prohibir totalmente cualquier operación de aeronaves con certificación correspondiente al capítulo II Anexo 16, Vol.1, 2ª parte de la OACI a partir de 2002.

AENA ha realizado estudios requeridos por el Real Decreto 1257/2003 siguiendo el concepto de <<enfoque equilibrado>> para dar un paso más en la restricción de aeronaves ruidosas. En este caso se trata de Anexos a este RD que afectan de momento al aeropuerto de Madrid i Barcelona y hablan sobre la restricción progresiva de aeronaves de capítulo 3, las llamadas marginalmente conformes.

Todo este tema será explicado y analizado al detalle en el 4.3.3. Restricciones operativas en el Aeropuerto del Prat, donde trataremos la << Resolución de 31 de mayo de 2011, de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, por la que se introducen restricciones operativas en el aeropuerto de El Prat de Barcelona siguiendo el procedimiento «enfoque equilibrado» del Real Decreto 1257/2003, de 3 de octubre>>.

CAPÍTULO 4. AEROPUERTO DE BARCELONA/EL PRAT.

Llegados a este punto del trabajo se intentarán utilizar todos los conocimientos ya mostrados en los puntos anteriores con la intención de dar una visión de la problemática del ruido en el aeropuerto del Prat y zonas adyacentes y como el aeropuerto pone remedio a mitigar el impacto acústico a través de los planes de acción.

Empezaremos con una breve descripción del aeropuerto, seguidamente hablaremos sobre los datos del aeropuerto que necesitamos saber para encontrar las zonas de servidumbre acústica a través de los mapas de ruido provenientes de la modelización del software INM.

Una vez tengamos delimitadas las servidumbres acústicas, cuáles son los planes de acción que propone el aeropuerto para minimizar la problemática del ruido.

Y por última analizaremos al detalle una de las medidas propuestas en el plan de acción que se basa en la restricción operativa de aquellas aeronaves marginalmente conformes.

4.1. Descripción del aeropuerto

4.1.2. Localización

El aeropuerto de Barcelona/ El Prat se encuentra al suroeste de la ciudad de Barcelona, rodeado por las poblaciones del Prat del Llobregat, Sant Boi de Llobregat, Viladecans y Gavà. Es de vital importancia mencionar, que las más afectadas por la contaminación acústica, son la ya mencionada Gavà y Castelldefels, como veremos más adelante.



Figura 4.1. Situación geográfica del mapa de El Prat de Llobregat

4.1.2. Capacidad y operaciones.

Todos nosotros conocemos en mayor o menor medida este aeropuerto, y sabemos de su importancia en cuanto a nivel de operaciones. A continuación se exponen algunas cifras que nos ayudan a hacernos una idea más concreta del tráfico que se mueve en éste.

Las mejoras del Plan Barcelona (reforma llevada a cabo en el Aeropuerto de El Prat promovida por AENA, que se aprobó en 1999 y cuyas obras se iniciaron en 2003) han incrementado sensiblemente la capacidad operativa del aeropuerto. Éste está preparado para absorber hasta **55 millones de pasajeros** y ha incrementado su capacidad de operaciones en un 50%, hasta un total de **90 movimientos/hora**.

Desde la celebración de los Juegos Olímpicos, el aeropuerto barcelonés ha aumentado más del 200% el tráfico de pasajeros, pues ha pasado de 10 millones de pasajeros en el año 1992 a más de 34 millones en la actualidad. En el año 2011 se realizaron 303.054 operaciones de aeronaves. Con esto el Prat se impone como el segundo mayor aeropuerto de toda España en cuanto a pasajeros y operaciones anuales y el noveno de Europa.

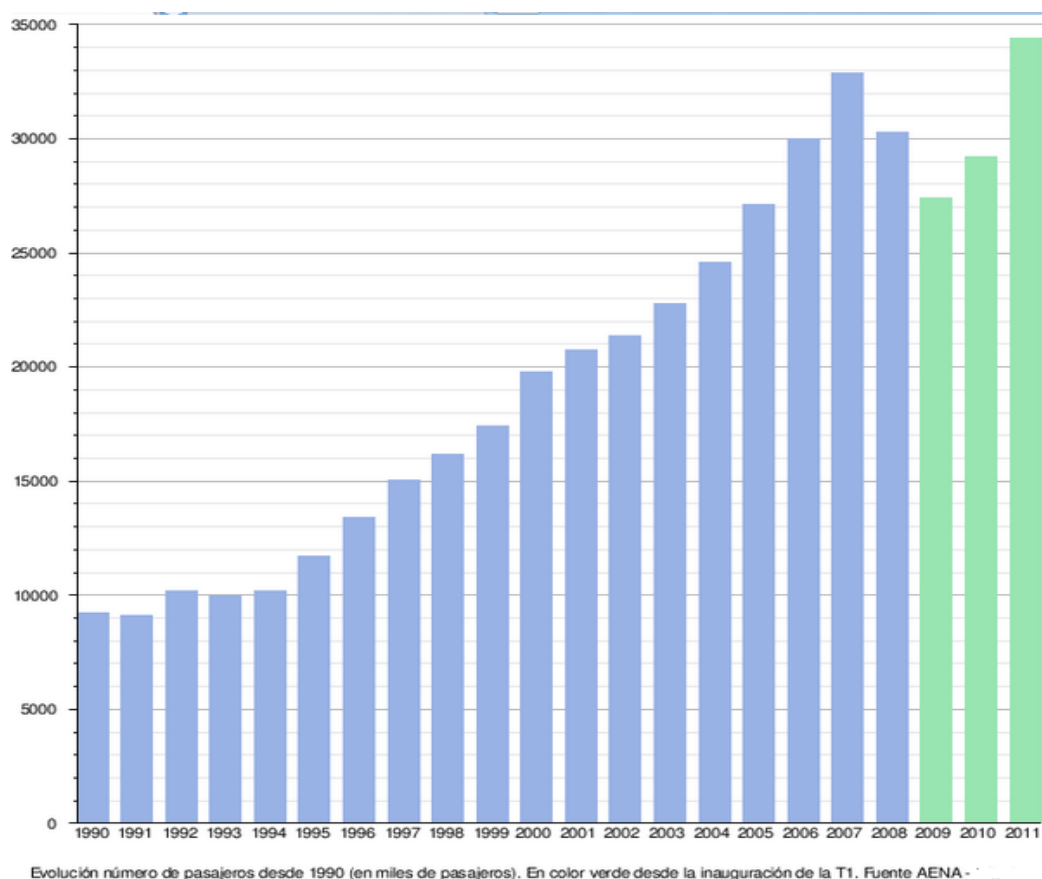


Figura 4.2. Evolución de pasajeros.

4.2. Delimitación de las servidumbres Acústicas

Hemos visto que la elaboración de los mapas de ruido lleva a cabo mediante un sofisticado software, el INM, que cumple los procedimientos de cálculo del Documento nº 29 de la ECAC, al cual debemos facilitarle un seguido de inputs.

Una vez hecho podremos obtener la isófona equivalente de cada uno de los índices de ruido: Ld (60 dB), Le (60DB), Ln (50 DB) (Apartado 3.1.)

Con estas 3 isófonas haremos la isófona equivalente final para delimitar las servidumbres acústicas. Esta isófona la obtendremos de superponer las tres y coger la envolvente que más límite.

4.2.1. Inputs para la modelización del ruido

4.2.1.1 Configuración física del aeropuerto

En este campo de dadas se indica el número de pistas del que dispone el campo de vuelo del Prat junto con sus coordenadas geográficas y sus características físicas. Esto es lo primero que se requiere antes de empezar a estudiar el número de operaciones o las trayectorias, dado que será el punto de partida o de origen de las aeronaves.

Tabla 4.1. Configuración de pistas en el aeropuerto de Barcelona.

Pista	Longitud (m)	Anchura (m)	Ilustración
02-20	2.540	45	
07R-25L	2.660	60	
07L-25R	3.352	60	

Tabla 4.2. Coordenadas de los umbrales de pista. Aeropuerto de Barcelona.

Umbral	Coord. Geográficas ¹		Coord. UTM ²	
	Latitud	Longitud	X (m)	Y (m)
02	41° 17' 15,93" N	02° 05' 05,41"E	423.470	4.571.307
20	41° 18' 33,83" N	02° 05' 40,95"E	424.322	4.573.701
07L	41° 17' 41,44" N	02° 04' 19,02"E	422.400	4.572.105
25R	41° 18' 20,61" N	02° 06' 13,43"E	425.073	4.573.285
07R	41° 16' 56,32" N	02° 04' 27,66"E	422.586	4.570.712
25L	41° 17' 31,99" N	02° 06' 11,81"E	425.020	4.571.786

4.2.1.2. Régimen de utilización de pistas.

En primer lugar se analiza cuáles son las configuraciones preferentes y los porcentajes de uso de cabecera, tanto de la situación actual como de la situación prevista.

Tabla 4.3. Configuración de pistas preferentes. Aeropuerto de Barcelona.

Configuración	Llegadas	Salidas
Periodo diurno (7-23h)		
Configuración oeste – pistas paralelas	Pista 25R	Pista 25R ⁽¹⁾ /25L
Configuración este – pistas paralelas	Pista 07L	Pista 07L ⁽²⁾ /07R
Periodo nocturno (23-7h)		
Configuración oeste – pista única	Pista 25L ⁽³⁾	Pista 25L ⁽³⁾
Configuración este – pistas cruzadas	Pista 02 ⁽⁴⁾	Pista 07R ⁽³⁾

(1) El uso de la pista 25R queda restringido a aquellas aeronaves que puedan justificar que necesitan mayor longitud de pista que la disponible para la 25L, siendo obligatorio la realización de un procedimiento de salida en modo convencional.

(2) El uso de la pista 07L para despegues queda restringido a aquellas aeronaves que puedan justificar que necesitan mayor longitud de pista que la disponible para la 07R, siendo obligatorio la realización de un procedimiento de salida en modo convencional.

(3) El uso de la pista 25R para aterrizar o despegar y el de la pista 07L para despegar en horario nocturno, para las aeronaves que lo precisen, está descrito en el apartado de procedimientos de atenuación de ruidos.

(4) En el caso de no poder usar la pista 02 para llegadas, se utilizará la configuración oeste, y sólo en última instancia, se usará la configuración este con llegadas por la pista 07L.

Tabla 4.4. Configuración de cabeceras (año 2009). Aeropuerto de Barcelona.

Configuración	Cabecera	Aterrizajes	Despegues
Este	02	8,75%	-
	07L	16,82%	0,34%
	07R	-	23,96%
Oeste	25L	3,53%	75,21%
	25R	70,90%	0,49%

Tabla 4.5. Configuración de cabeceras (escenarios futuros). Aeropuerto de Barcelona

Configuración	Cabecera	Aterrizajes	Despegues
Este	02	6,25%	-
	07L	17,49%	0,24%
	07R	-	24,00%
Oeste	25L	2,09%	75,33%
	25R	74,17%	0,44%

Finalmente, teniendo en cuenta todos los cálculos anteriores, se llega a los valores que se introducirán finalmente en el INM.

Tabla 4.6. Distribución de operaciones por cabecera contemplada en la simulación. Aeropuerto de Barcelona

Configuración	Operación	Cabecera	Escenario actual (%)	Escenarios futuros (%)
Este	Aterrizaje	02	4,40	3,21
Este	Aterrizaje	07L	8,53	9,04
Este	Despegue	07L	0,18	0,13
Este	Despegue	07R	12,20	12,93
Oeste	Aterrizaje	25L	1,64	0,92
Oeste	Despegue	25L	37,31	37,77
Oeste	Aterrizaje	25R	35,50	35,79
Oeste	Despegue	25R	0,24	0,21

Con estos datos se podrá aproximar el tiempo que determinadas zonas están expuestas al ruido aeronáutico.

4.2.1.3 Trayectorias iniciales de salida y finales de aproximación/ Dispersión respecto a la ruta nominal

Llegados a este punto, toca alejarse un poco del aeropuerto.

¿Cuáles son las trayectorias que siguen las aeronaves durante la aproximación y el aterrizaje?

Sabemos que las aeronaves no vuelan a sus anchas, estas siguen unas trayectorias preestablecidas (SID & STAR), pero estas no se siguen al 100%. Este apartado estudia en primer lugar las rutas nominales y posteriormente, mediante un complejo cálculo probabilístico, la dispersión de estas. Con estos cálculos podemos estimar aquellos lugares por donde pasarán los focos de ruido (aeronaves), facilitando así la simulación.

A continuación se muestra un ejemplo de lo mencionado donde se pueden ver las rutas nominales (líneas estrechas) y los volúmenes de tráfico que se desvían por las mismas (franjas amarillas y naranjas).

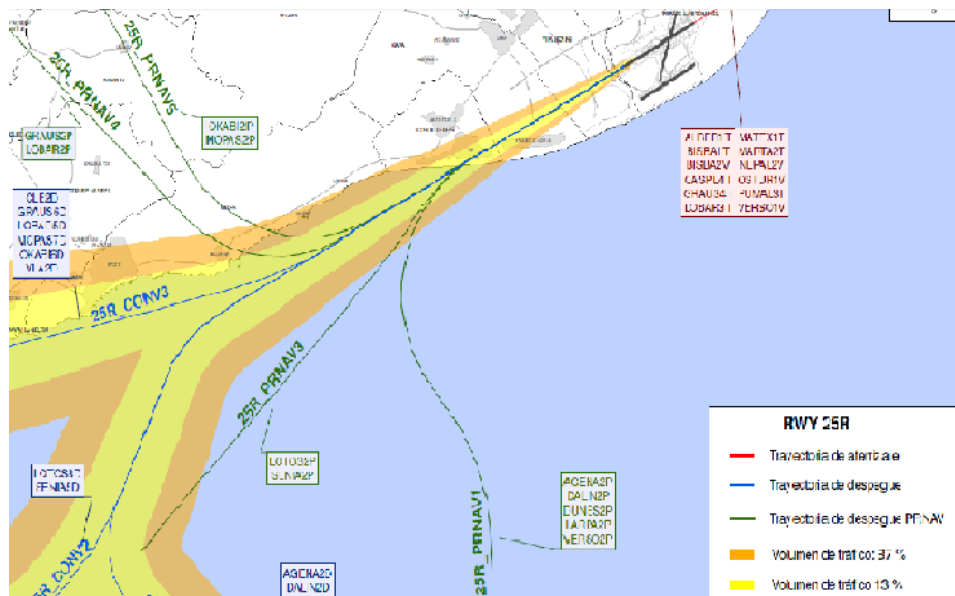


Figura 4.3. Volúmenes de tráficos desviados y nominales. Aeropuerto de Barcelona

4.2.1.4. Número de operaciones y composición de la flota.

Ahora se introducen el número de operaciones y el modelo de aeronave junto con su porcentaje anual de operatividad. De esta manera definiremos cuantos focos de ruido (aeronaves) tenemos de media y cuáles son las características de cada uno de estos (estas quedan definidas en el momento que se introduce el código INM en el software de simulación).

Tabla 4.6. Operaciones totales simuladas. Aeropuerto de Barcelona.

Operaciones simuladas (día medio)				
Escenario	Totales	Día	Tarde	Noche
Actual	762,37	524,11	180,63	57,63
Intermedio	1.082	743,84	256,36	81,80
Máxima capacidad	1.420	940,00	300,00	180,00

Observamos que aparece escenario actual, intermedio y de máxima capacidad. El primero hace referencia al año de estudio (en cuanto a capacidad), máxima capacidad al futuro del aeropuerto e intermedio como su nombre indica a una capacidad intermedia entre los anteriores.

Tabla 4.7. Composición de la flota. Aeropuerto de Barcelona.

Tipo de aeronaves	Código INM	%
AERO L-39/139 ALBATROSS	LEAR35	0,0025
AEROSPATIALE ATR-42-200/300/320	DHC8	0,0724
AEROSPATIALE ATR-72	HS748A	0,1868
AIRBUS A-300B/C 100/200	A300B4-203	0,0436
AIRBUS A-300B/C/F 4-600	A300B4-203	0,1548
AIRBUS A-310	A310-304	0,2459
AIRBUS A-318	A319-131	0,1793
AIRBUS A-319	A319-131	10,8189
AIRBUS A-320	A320-211	36,2627
AIRBUS A-321	A321-232	5,5335
AIRBUS A-330-200	A330-301	0,0778

En esta segunda tabla observamos algunos de los modelos que operan en Barcelona junto con los códigos mencionados. Podemos ver que el A-320-211 es uno de los modelos que opera con mayor frecuencia.

4.2.1. 5. Variables climatológicas.

Una de las últimas variables en tener en cuenta es la temperatura y la presión atmosférica, a la que se quiere considerar en la simulación, dado que en función de esta el ruido se propaga de una manera o de otra.

A continuación se muestran las medias en tres periodos del día:

Periodo día (7:00-19:00 horas): 17,24 °C, se corresponde con el valor medio de las temperaturas horarias durante este intervalo horario a lo largo de un periodo de 10 años.

Periodo tarde (19:00-23:00 horas): 16,80 °C, se corresponde con el valor medio de las temperaturas horarias durante este intervalo horario a lo largo de un periodo de 10 años.

Periodo noche (23:00-7:00 horas): 14,62 °C, se corresponde con el valor medio de las temperaturas horarias durante este intervalo horario a lo largo de un periodo de 10 años.

Asimismo, con el mismo criterio se ha establecido un valor de presión atmosférica para cada uno de los tres periodos horarios considerados:

- ✓ Periodo día: 762,49 mmHg.
- ✓ Periodo tarde: 762,35 mmHg.
- ✓ Periodo noche: 762,62 mmHg.

Figura 4.4. Variables climatológicas. Aeropuerto de Barcelona

5.2.1. 6. Modelización del terreno.

Por último, introducimos el modelo digital del terreno del aeropuerto y de los alrededores, dado que el programa INM considera los posibles efectos barrera entre emisor y receptor.



Figura 4.5. Terreno del aeropuerto y alrededores. Aeropuerto de Barcelona

4.2.2. Resultados. Mapas de ruido

Una vez introducidas todas las variables, se obtienen los mapas de ruido del Aeropuerto y se delimitan las servidumbres acústicas encontrando la isófona equivalente más limitante obtenida de superponer las 3 isófonas de delimitación de servidumbre acústica (Ld, Le, Ln).

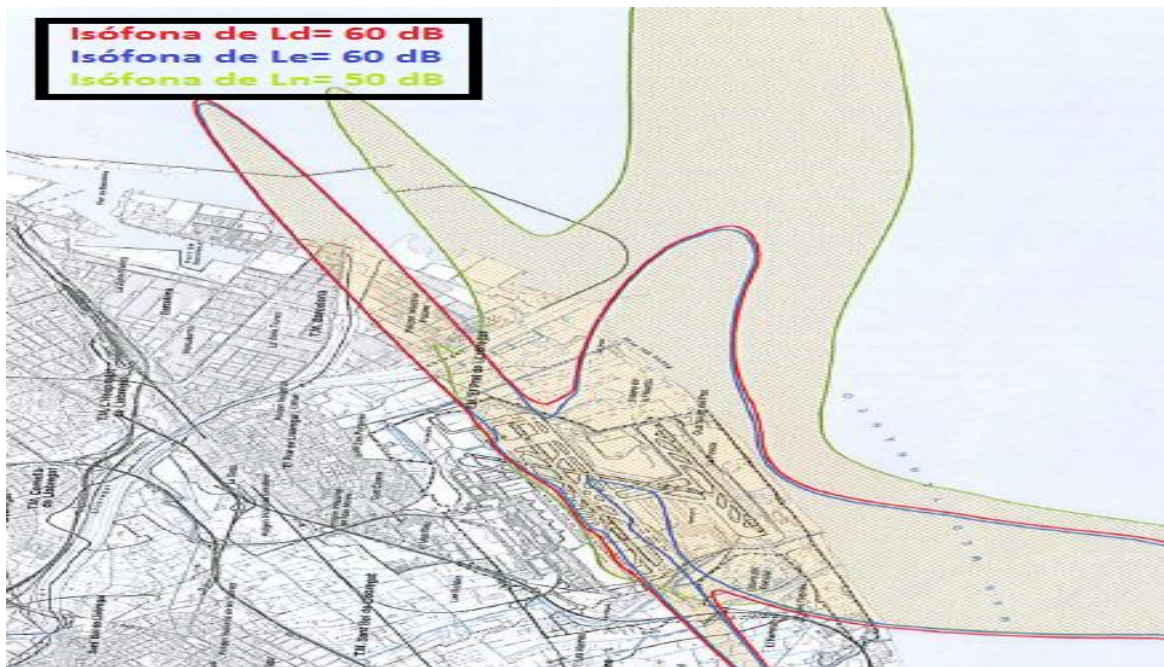


Figura 4.6. Delimitación servidumbre acústica. Aeropuerto de Barcelona

Observamos, en el segundo mapa y con la ayuda de la leyenda, como en función de la calificación del terreno respecto las huellas acústicas, este se clasifica de una manera u otra.

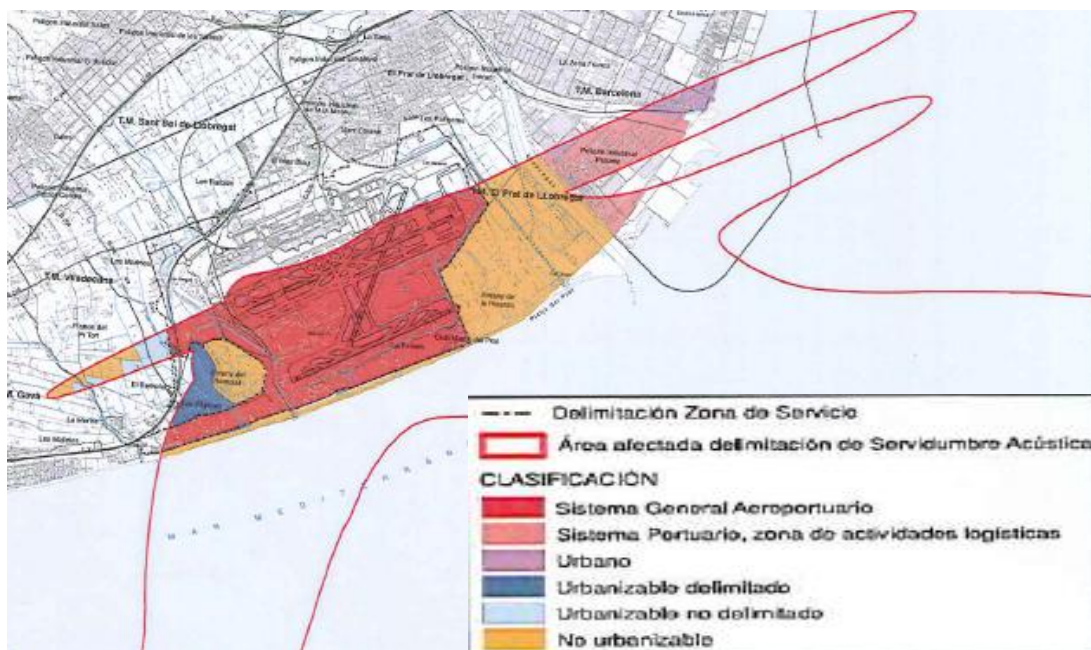


Figura 4.7. Calificación del terreno. Aeropuerto de Barcelona

4.3 Planes de acción Aeropuerto de Barcelona

Una vez ya hemos hecho la delimitación de las servidumbres acústicas a través de la modelización del ruido en mapas de ruido con el INM. Procederemos a explicar algunos de las medidas contenidas en los planes de Acción del aeropuerto del Prat para mitigar el impacto acústico. Hay que recordar que según el procedimiento de <<enfoque equilibrado>> había 4 áreas de actuación. Ahora procederemos a explicar 3 de ellas: Los procedimientos operacionales, la gestión y ordenación del territorio y las restricciones operativas aplicadas en el Aeropuerto del Prat.

4.3.1. Procedimientos operacionales.

4.3.1.1. *Desplazamiento de Umbral*

A fecha 31-08-2006 se desplazó el umbral a la cabecera 07L (430 m) con motivo de los preparativos para el cambio previsto de rol de pistas (efectuado el 26-10-2006). Esta modificación se recoge en la publicación AIP-Barcelona página AD 2-LEBL IAC/3 de WEF 26-OCT-06 (AIRAC AMDT 11/06).

Esta medida permite acercar el ruido al aeropuerto e incrementar la distancia entre la fuente de ruido (aeronave) y los potenciales receptores situados bajo la senda de planeo en los aterrizajes provenientes del sector suroeste del aeropuerto (Castelldefels, Gavà) al aumentar la altura de paso de aeronaves respecto a un umbral no desplazado. La pendiente mínima de descenso publicada disminuyó del 5,68% al 5,30% desde las 8 NM a las 5 NM de distancia al umbral. En la actualidad el ángulo de descenso publicado en AIP es del 5,24% (3º) desde 11,02 DME BCN hasta el umbral de pista. En las cartas IAC/3 del AIP-Barcelona de fechas previa y posterior al cambio pueden consultarse las alturas mínimas publicadas, a diferentes distancias respecto al aeropuerto.

4.3.1.2. *Pistas preferentes*

El aeropuerto de Barcelona dispone de una configuración preferente de pistas segregadas definida con el propósito de minimizar la afección acústica sobre el entorno.

Tabla 4.8. Configuración de pistas. Aeropuerto de Barcelona

Configuración	Llegadas	Salidas
Periodo diurno (7-23h)		
Configuración oeste –pistas paralelas	Pista 25R	Pista 25R ⁽¹⁾ /25L
Configuración este – pistas paralelas	Pista 07L	Pista 07L ⁽²⁾ /07R
Periodo nocturno (23-7h)		
Configuración oeste	Pista 25L	Pista 25L
Configuración este	Pista 02 ⁽³⁾	Pista 07R

A continuación se explican las preferencias con las que se deben usar las diferentes configuraciones mostradas en la figura superior:

⁽¹⁾ *El uso de la pista 25R queda restringido a aquellas aeronaves que puedan justificar que necesitan mayor longitud de pista que la disponible para la 25L, siendo obligatorio la realización de un procedimiento de salida en modo convencional.*

⁽²⁾ *El uso de la pista 07L para despegues queda restringido a aquellas aeronaves que puedan justificar que necesitan mayor longitud de pista que la disponible para la 07R o cuyo empenaje vertical supere los 16,46 m, siendo obligatorio la realización de un procedimiento de salida en modo convencional.*

⁽³⁾ *En el caso de no poder usar la pista 02 para llegadas, se utilizará la configuración oeste, y sólo en última instancia, se usará la configuración este con llegadas por la pista 07L.*

En condiciones favorables atendiendo al estado de la pista, techo de nubes, visibilidad, componente de viento en cola o cruzado y ausencia de gradientes de viento notificado o pronosticado o tormentas en la aproximación o en la salida, se dará preferencia a la configuración oeste frente a la este durante el periodo diurno (7-23h) y viceversa durante el periodo nocturno (23-7h).

4.3.2. Gestión del territorio. Plan de aislamiento acústico.

Dado que este procedimiento se ha explicado en el apartado de aeropuertos (medidas de mitigación de ruido) exponemos únicamente una gráfica con el número de edificaciones beneficiadas por este en los alrededores del aeropuerto de Barcelona.

Tabla 4.9. Viviendas favorecidas por el plan de aislamiento acústico. Aeropuerto de Barcelona

Plan de Aislamiento Acústico	Nº viviendas
Censo de viviendas con derecho a solicitud de aislamiento acústico	57
Solicitudes de aislamiento acústico, en huella, recibidas en la Oficina de Gestión del PAA	41
Viviendas en las que se ha aprobado la realización de medidas acústicas	38
Proyectos de aislamiento acústico solicitados	37
Proyectos presentados en la Oficina de Gestión del PAA	36
Total viviendas con financiación aprobada	40

4.3.3. Restricciones operativas en el Aeropuerto del Prat

El 31 de Mayo de 2011 la Agencia Estatal de seguridad Aérea introdujo en un Anexo del Real Decreto 1257/2011, de 3 de octubre, el cual sigue el procedimiento de enfoque equilibrado, la restricción de Aeronaves Marginalmente conformes a partir del 1 de enero de 2012 en el aeropuerto del Prat.

Este Anexo explica cómo se irá restringiendo progresivamente hasta 2017 la totalidad de este tipo de aeronaves.

Por definición, las aeronaves marginalmente conformes son aviones de reacción subsónicos civiles que cumplen los valores límite de certificación del volumen 1, segunda parte, capítulo 3, anexo 16, del Convenio sobre Aviación Civil Internacional por un margen acumulado no superior a 5 EPNdB (nivel efectivo de ruido percibido en decibelios), donde el margen acumulado es la cifra expresada en EPNdB obtenida sumando los diferentes márgenes (es decir, las diferencias entre el nivel certificado de ruido y el nivel de ruido máximo permitido) en cada uno de los tres puntos de medición del ruido de referencia, tal y como se definen en el volumen 1, segunda parte, capítulo 3, anexo 16, del Convenio sobre Aviación Civil Internacional.

Las aeronaves marginalmente conformes serian aquellas que cumplen la normativa de certificación del capítulo III pero estarían muy cerca de estos valores máximos permitidos.

En el anexo encontramos aquellas aeronaves que operan en el aeropuerto del Prat que son susceptibles a ser marginalmente conformes en alguna de sus versiones o configuraciones.

Tabla 4.10. Aviones Susceptibles de ser marginalmente conformes en el Aeropuerto del Prat

Airbus A- 300B/C100/200
Antonov An-124
Antonov-72/74 100/200
B-707
B-727
B-737-200/300
B-747-200-300
B-767-200/300
British Aerospace BAe-125-700/800
DC-8-50/60
DC-9
DC-10
Gulfstream Aerospace G-1159AGIII
Ilhusin-62
Ilhusin-86
Ilhusin II-76/78/82
Ilhusin-96
Tupolev-134
Tupolev-154
Yakovlev Yak-42/142

A continuación haremos un estudio que nos permitirá saber cuál ha sido y será la tendencia del aeropuerto del Prat en cuanto a la utilización de aeronaves según sus niveles certificados de ruido. Y nos permitirá entender un poquito más esta resolución con la cual empezábamos el trabajo. Por último nos este estudio nos permitirá sacar nuestras propias conclusiones y hacernos una idea de que pasaría si la normativa se hiciera más dura en este aspecto.

4.3.3.1. Estudio de ruido de la flota de aeronaves del Aeropuerto del Prat (1999-2012).

Introducción

El hecho de que existan restricciones operativas que obligan a los aeropuertos a minimizar sus niveles de ruido, y de que los fabricantes, conscientes de ello, produzcan aeronaves cada vez menos ruidosas, hace que cada año veamos cómo las operadoras van mejorando su flota a fin de adaptarse.

Así pues, con el fin de estudiar la evolución de dicha flota y sus niveles de ruido, realizaremos un análisis de los últimos años en el Aeropuerto del Prat, con el objetivo de comparar dichas estadísticas con las restricciones que han ido imponiendo los diferentes organismos a lo largo de los años. ¿Veremos un descenso considerable en el 2002 a causa de la prohibición de aeronaves del capítulo 2? ¿Cuál es la tendencia de los niveles de ruido certificados de las aeronaves en el aeropuerto de Barcelona? ¿Se aumenta o se disminuye el margen acumulado de la flota con el paso de los años? ¿Qué pasaría si aumentara el margen acumulado permitido de 5EPNdB? ¿Qué repercusiones tendría para el aeropuerto del Prat?

Podremos responder a estas preguntas y más al finalizar el estudio.

Realización del estudio

A fin de realizar un estudio sobre la evolución de los niveles de ruido de la flota del Aeropuerto de El Prat, y dado que el estudio es a nivel externo, los datos para su desarrollo los tomaremos directamente desde la página web de Aena.

Estos datos serán los referidos al número de operaciones que realiza cada aeronave en el aeropuerto, teniendo en cuenta tanto los despegues como los aterrizajes. Dado que en las estadísticas de Aena sólo podemos obtener dicha información desde el año 1999 hasta 2012, nuestro estudio abarcará el mismo periodo.

Debido a que, tomando estrictamente los datos de absolutamente todas las aeronaves del Aeropuerto del Prat, obtenemos un total de más de 250 modelos de aeronaves, hemos reducido la lista con las aeronaves que representan **el 95% del tráfico en cada año**. De esta manera, nuestro estudio se realizará con un total de 100 aeronaves, incluidas además las susceptibles de ser marginalmente conformes según la resolución del 31 de mayo de 2011 de la AESA en virtud al Real Decreto 1257/2003.

Para realizar el estudio sólo necesitamos saber cuáles son los márgenes que presentan las aeronaves en cada uno de los tres de medición de ruido. Es decir, cuál es la diferencia entre el nivel máximo de ruido en cada punto de medición y el máximo permitido por el capítulo 3 del anexo 16 de la OACI, ambos explicados anteriormente en el punto 3.2. *Clasificación de las aeronaves en función del ruido*.

Así pues, necesitamos los niveles de ruido lateral, de sobrevuelo y de aproximación, tanto los máximos, como los máximos permitidos. Como ya explicamos, el nivel máximo permitido de cada punto varía en función de la masa máxima de despegue (MTOW) y el número de motores de la aeronave.

Para conseguirlos hemos accedido a los datos oficiales que nos proporciona tanto la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) como la Federal Aviation Administration (FAA), en los cuales se facilitan **los niveles máximos de ruido en los tres puntos de medición (EPNdBs)** y la **masa máxima de despegue (MTOW)** de todas las aeronaves existentes, diferenciándolas unas a otras incluso con matriculación.

Dado que los datos que nos proporciona Aena sólo distinguen modelos de aeronaves (y no cuál ha sido exactamente la que ha realizado la operación), **hemos calculado el promedio tanto de la MTOW, como de los tres niveles máximos de ruido**, de todas las aeronaves existentes en los datos de la EASA y la FAA. De esta manera obtenemos una nueva MTOW y unos nuevos niveles máximos de ruido, que serán con los que realizaremos el estudio.

Al poseer los datos de la Masa máxima de despegue, y saber si las aeronaves poseen dos, tres o cuatro motores, hemos podido calcular el nivel máximo de ruido permitido, tal y como se detalla en el Capítulo 3 del Anexo 16 de la OACI.

Por tanto, el método que utilizaremos para calcular el nivel máximo de ruido permitido será el siguiente:

Tabla 4.11. Tabla resumen de los niveles máximos permitidos según MTOW (Capítulo III)

	Peso (Toneladas)	Nivel (EPNdB)
Ruido lateral	0-35	94
	35-400	$80,87 + 8,51 \cdot \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 400	103
Ruido de aproximación	0-35	98
	35-280	$86,03 + 7,75 \cdot \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 280	105
Ruido de sobrevuelo (1-2 motores)	0-48,1	89
	48,1-385	$66,65 + 13,29 \cdot \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 385	101
(3 motores)	0-28,6	89
	28,6-385	$69,65 + 13,29 \cdot \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 385	104
(4 motores)	0-20,2	89
	20,2-385	$71,65 + 13,29 \cdot \text{Log}(\text{MTOW})$
	Más de 385	106

De esta manera, al poseer tanto el máximo nivel de ruido generado y el nivel máximo permitido de cada aeronave en los tres puntos de medición, podemos calcular los márgenes en cada uno de éstos.

Así pues, por ejemplo, los márgenes en los tres puntos de medición para el Boeing B767/300 de pasajeros y el Ilyushin 86 los podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 4.12. Ejemplo de datos calculados para obtener el margen acumulado

	MTW	Med. Lateral			Med. Sobrevuelo			Med. Aproximación			Margen Acumulado
	(Tn)	Máx.	Máx. Perm.	Margen	Máx.	Máx. Perm.	Margen	Máx.	Máx. Perm.	Margen	
BOEING B767/300	169	96,0	99,8	3,76	89,61	96,2	6,64	98,7	103,29	4,60	15,00
ILYUSHIN 86	213	97,8	100,6	2,88	101,1	102,5	1,48	106,0	104,07	1,93	2,42

Como podemos apreciar, en la tabla aparece el dato Margen acumulado. Ya hablamos sobre el margen acumulado anteriormente, el cual no es más que la suma de los márgenes en los tres puntos de medición de ruido.

Como podemos observar i según la definición de aeronaves marginalmente conformes vemos como el ILYUSHIN 86 es uno de ellas, ya que su margen acumulado está entre 0 i 5 EPndB, más concretamente 2,42 EPndB.

Será con el valor del margen acumulado con el que trabajaremos para estudiar la evolución del ruido, ya que dicho margen nos indica cuán ruidosas eran las aeronaves que operaban año a año en el aeropuerto de Barcelona desde 1999. Para hacerlo definiremos 6 rangos de márgenes acumulados, que serán los siguientes:

- $EPndB > 20$
- $20 < EPndB \leq 15$
- $15 < EPndB \leq 10$
- $10 < EPndB \leq 5$
- $5 < EPndB \leq 0$ (*Marginalmente conformes*)
- $EPndB < 0$

De esta manera, si estudiamos el porcentaje de número de operaciones según los niveles de ruido de las aeronaves que las realizan año a año obtenemos que en los años 1999 y 2012 la distribución del margen acumulado es la siguiente (Ver Anexo I para contemplar los gráficos de los años restantes):

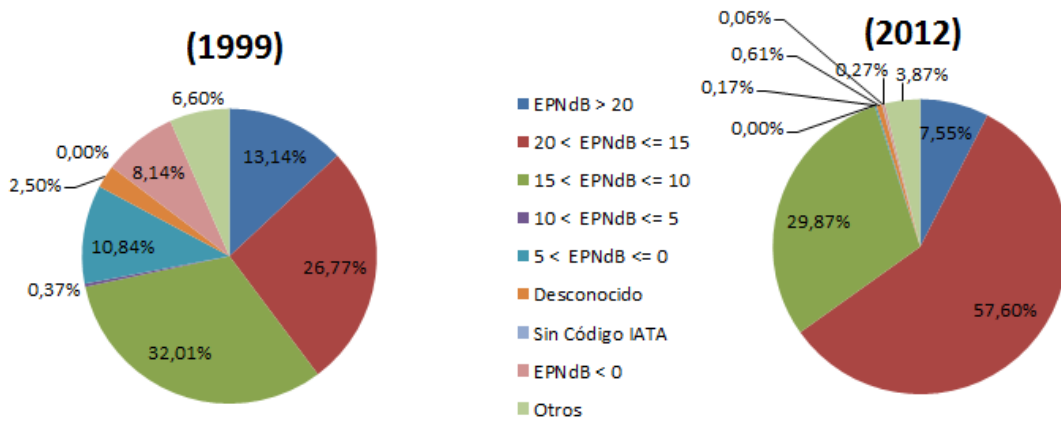


Figura 4.8. Porcentaje de los diferentes rangos de márgenes acumulados (1999,2012). Aeropuerto de Barcelona.

Resultados

Dado que poseemos los datos de los 6 rangos que hemos definido con anterioridad desde 1999 a 2012, podemos estudiar la evolución de cada uno de ellos, de manera que podamos ver si con el paso de los años han ido aumentando o descendiendo su número de operaciones. Esto nos servirá para hacernos una idea de cuál es la tendencia futura en cada uno de los 6 rangos, debiendo recordar que las que consideramos marginalmente conformes son las que están situadas en el rango de 0 a 5 EPNdB de margen acumulado, y que la propiedad más importante que caracterizan a las aeronaves del Capítulo 4 es su margen acumulado mayor a 10 EPNdB.

Así pues, la evolución del porcentaje que representa cada rango a lo largo de los años es la siguiente:

- EPNdB < 0

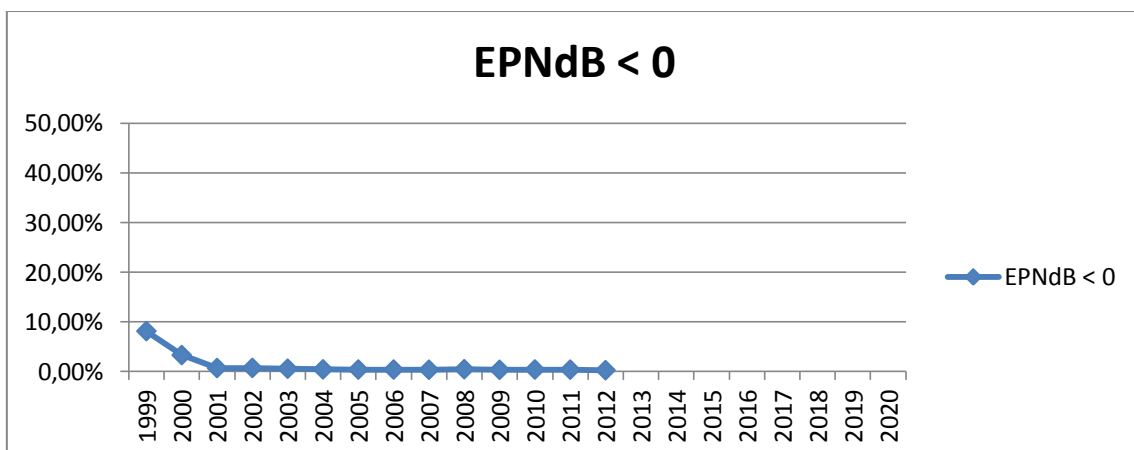


Figura 4.9. Evolución del porcentaje de la flota de Aeronaves cuyo margen acumulado es EPNdB < 0

En el estudio podemos observar cómo el número de operaciones comienza cayendo en picado, para finalmente situarse a unos niveles prácticamente nulos en 2002, y continuar así hasta la actualidad. Esta circunstancia tiene una fácil explicación, y es que, como explicamos ya en el punto 4 del trabajo, desde 1995 los operadores tenían la obligación de ir reduciendo progresivamente las operaciones con aeronaves del Capítulo 2 del Anexo 16 (las cuales son todas aquellas que pertenecen a este rango de margen acumulado), de manera que se produjese una reducción total en 2002. Aun así, hemos encontrado operaciones puntuales de dichas aeronaves en los años posteriores.

Ejemplos de aeronaves del estudio que forman parte de este rango son el Antonov AN-124 Ruslan, el McDonnell Douglas DC-8 o el Tupolev 134.

- $0 < \text{EPNdB} \leq 5$:

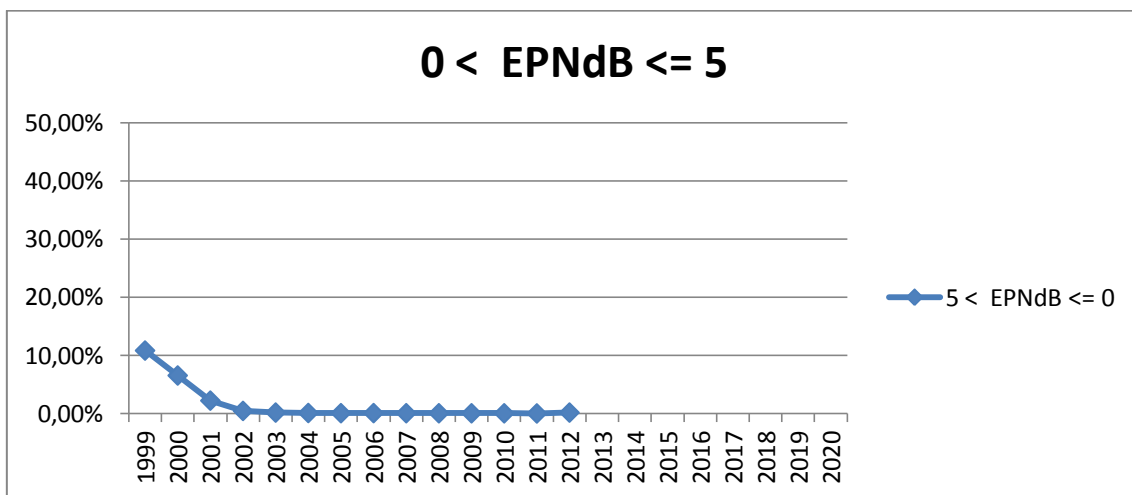


Figura 4.10. Evolución anual del porcentaje de la flota de Aeronaves cuyo margen acumulado está entre $0 < \text{EPNdB} \leq 5$ (Marginalmente conformes)

En el caso del rango que representa un margen acumulado de 0 a 5 EPNdB, margen que incluye a las aeronaves que consideramos marginalmente conformes, encontramos una evolución muy similar a la anterior. Y es que también se produce una reducción significativa del número de operaciones, para situarse cerca del 0% en 2002. Dato curioso, ya que, si bien es cierto que existe la resolución del 31 de mayo de 2011 de la AESA mencionada anteriormente para eliminar progresivamente las aeronaves marginalmente conformes, ésta no entra en acción hasta 2012, llegándose a una futura eliminación total en 2017.

Ejemplos de aeronaves del estudio que forman parte de este rango son el Antonov AN-72/74 o el Ilyushin 86.

- $5 < \text{EPNdB} \leq 10$

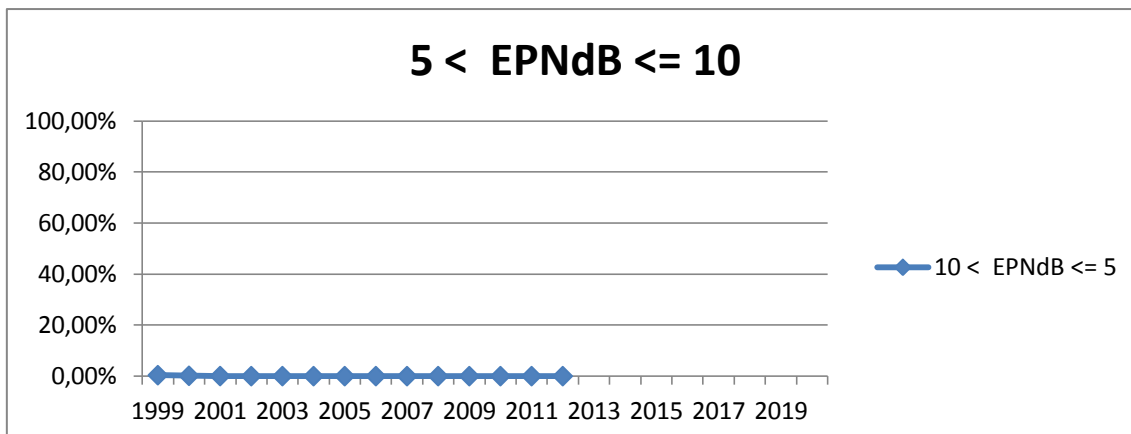


Figura 4.11. Evolución anual del porcentaje de la flota de Aeronaves cuyo margen acumulado está entre $5 < \text{EPNdB} \leq 10$

El siguiente rango es el que va desde los 5 a los 10 EPNdB de margen acumulado. Es otro rango crítico, ya que, éste representa a las aeronaves que, sin ser marginalmente conformes, no cumplen con total seguridad los máximos niveles de ruido permitidos por el Capítulo 4 de la OACI, los cuales fijan un margen acumulado mínimo de 10. De todas maneras, aún no existe, ni se prevé, ninguna ley que pueda afectar a dicho rango. A pesar de esto, nos hemos encontrado con la casualidad e infortunio de que las aeronaves que representan dicho rango apenas realizan operaciones en el Aeropuerto de El Prat.

- $10 < \text{EPNdB} \leq 15$, $15 < \text{EPNdB} \leq 20$ y $\text{EPNdB} > 20$

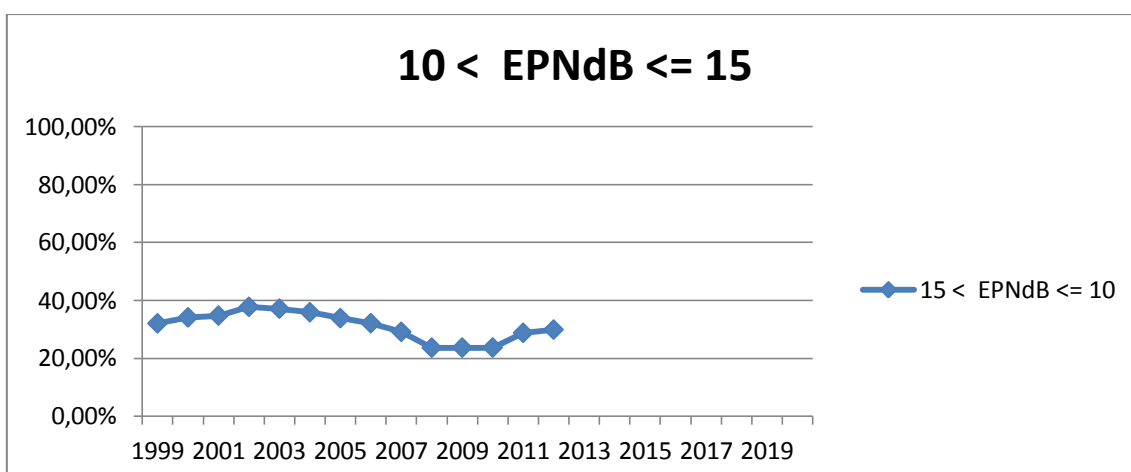


Figura 4.12. Evolución anual del porcentaje de la flota de Aeronaves cuyo margen acumulado está entre $5 < \text{EPNdB} \leq 10$

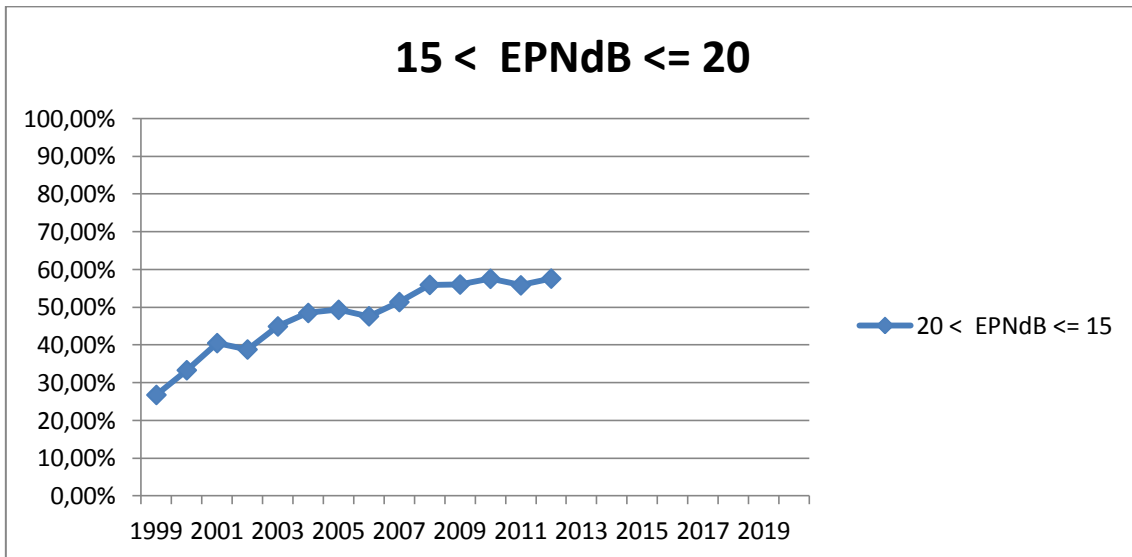


Figura 4.13. Evolución anual del porcentaje de la flota de Aeronaves cuyo margen acumulado está entre 10 < EPNdB <= 15

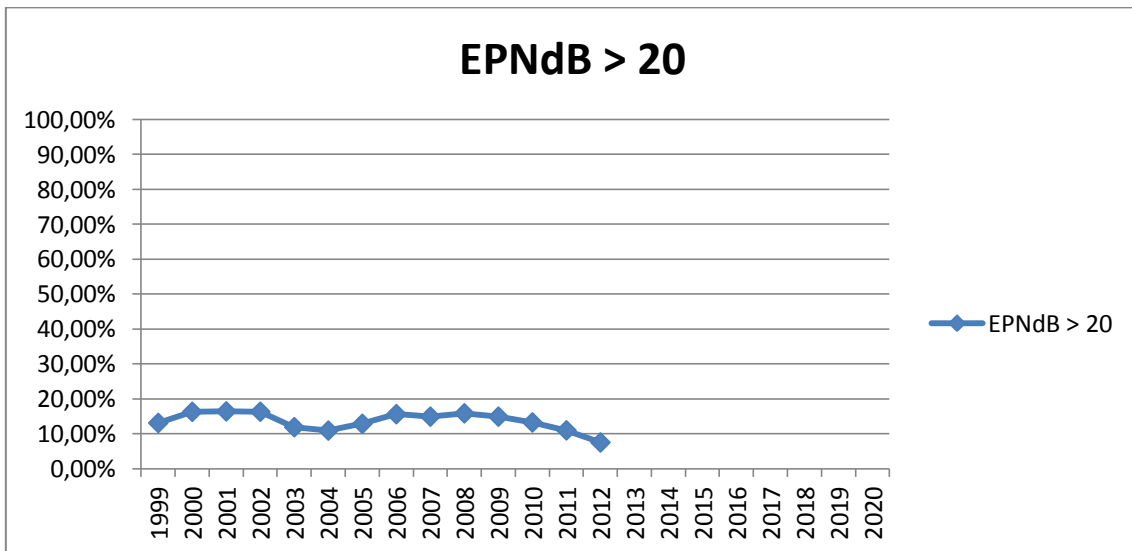


Figura 4.14. Evolución anual del porcentaje de la flota de Aeronaves cuyo margen acumulado es EPNdB>20

En las tres figuras anteriores, podemos observar la evolución en los años de los tres rangos correspondientes. Los tres no poseen una característica especial para un obligado aumento o descenso en el número de operaciones,

aun así, es bueno realizar el estudio ya que así podemos analizar cuál puede llegar a ser la tendencia de cada rango.

Así pues podemos observar cómo el número de operaciones en el rango de 10-15 EPNdB no tiende a variar demasiado, estando siempre alrededor del 30% de las operaciones totales, seguramente incluso en los próximos años. Aun así, apreciamos un ligero aumento próximo al año 2002, debido seguramente a la retirada de las operaciones de la flota del Capítulo 2. Como también un descenso algo mayor entre los años 2003 y 2010, seguramente debido al incremento progresivo de las operaciones de aeronaves del rango 15-20 EPNdB. Cabe destacar que en este rango se encuentran la mayoría de versiones del Boeing B737, incluida la 800, que es la que opera Ryanair, operadora que desde 2011 ha incrementado considerablemente sus operaciones en el Aeropuerto de El Prat.

El rango de 15-20 EPNdB de margen acumulado es el que contiene el mayor número de operaciones del Aeropuerto de El Prat, con un continuo aumento de ellas a lo largo de los años. Tal y como podemos apreciar en la gráfica, dicho aumento va desde el 27% en 1999 a los 57% que supuso en 2012, un aumento del 30% de las operaciones totales en poca más de diez años, nada más y nada menos.

Esto se explica fácilmente debido a que dentro de este rango encontramos al Airbus A320, la aeronave que más operaciones realiza en el Aeropuerto de El Prat. De hecho en 2012 realizó 115.278 operaciones, casi un 30% ella sola.

En la última clasificación que hemos realizado, encontramos las aeronaves que poseen un margen acumulado mayor a los 20 EPNdB. Hemos observado que la mayoría de aeronaves que se incluyen son jets pequeños, de manera que posee variaciones de continuo aumento y descenso, aunque situándose siempre alrededor del 15% de las operaciones totales, de manera que no las podemos obviar.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Este trabajo nos ha permitido tener una visión clara de la importancia de la contaminación acústica a día de hoy, más concretamente en lo que al entorno aeronáutico respecta. Y es que es por esta importancia que en los aeropuertos se aplican numerosas medidas para intentar continuamente reducir o mitigar el ruido debido a la cada vez más limitante legislación.

Se puede observar que con el paso de los años las evoluciones en este tema tanto tecnológicas como operacionales han sido muchas permitiendo compatibilizar la vida ciudadana con la vida económica que favorece un aeropuerto en la ciudad.

El estudio práctico de nuestro trabajo nos ha permitido investigar la evolución de la flota del Aeropuerto del Prat en cuanto a niveles de ruido. Y como hemos podido comprobar en los datos de las operaciones, de la flota que las realiza y sus márgenes de ruido a lo largo de los años, el Aeropuerto de El Prat viene siguiendo una cuidada política de mitigación de ruido en lo que respecta a la flota de aeronaves, dado que sus márgenes acumulados de la gran mayoría se sitúan sobre los 10. Esto lo podremos comprobar en la siguiente gráfica, donde representamos el margen acumulado (EPNdB) medio año a año:

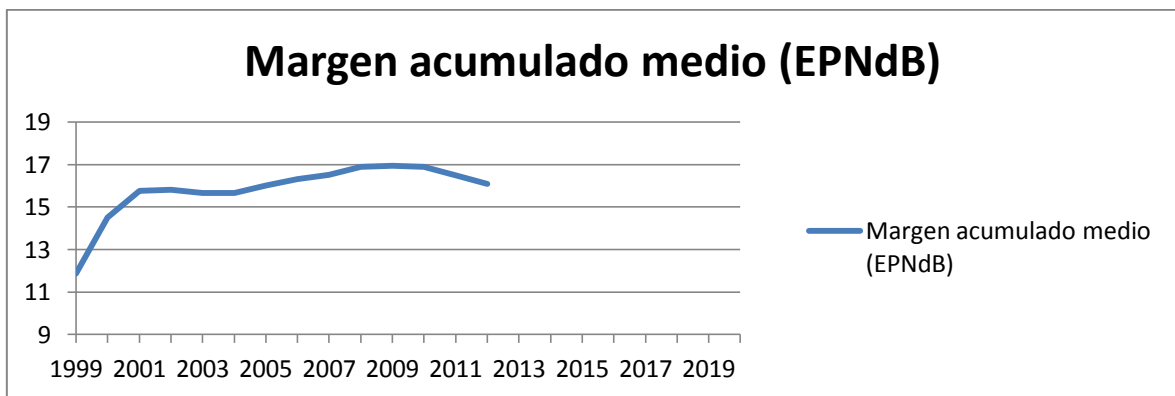


Figura 5.1. Evolución del margen acumulado medio (1999-2012). Aeropuerto de Barcelona.

¿Qué implica esto? Al iniciar el estudio nos realizamos la pregunta crucial y la que más interesa tanto a operadoras como al mismo Aeropuerto, y era, ¿Qué pasaría si se decidiera aumentar el margen acumulado permitido de 5 EPNdB?

Bien, pues podemos concluir que en el caso que se aumentase el margen acumulado permitido, la flota que opera en el Aeropuerto del Prat no se vería repercutida en absoluto, tanto si se aumentase en 7 EPNdB como en los 10

EPNdB que caracteriza a las aeronaves del Capítulo 4. De hecho, si analizamos cuál es la tendencia de dicho margen, observamos que sus niveles la gran mayoría de años han tendido a crecer, y es que en los últimos años siempre se ha mantenido por encima de los 15 EPNdB.

¿A qué se debe esto? A que son las propias compañías las que se adelantan y se adaptan a los cambios legislativos cada vez más severos, renovando su flota. Precisamente si nos remontamos a la última gran restricción, en la cual se prohibían las aeronaves del Capítulo 2 a partir del 2002, observamos cómo ya años antes los niveles de margen acumulado aumentaban considerablemente.

Así bien, gracias a dicho estudio, hemos podido llegar a la conclusión que el Aeropuerto de El Prat siempre va un paso por delante de estas restricciones y limitaciones, operando con una flota que goza en estos momentos de margen suficiente como para hacer frente a medio, o incluso a largo plazo, a cambios legislativos que impusieran restricciones a aeronaves con márgenes superiores a los permitidos actualmente.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS WEB

Bibliografía:

[1] Instituto Politécnico Nacional - *Sistema de monitoreo de ruidos ambientales producido por aviones en el AICM* - Tesis de Arturo Rojo Ruiz.

[2] OACI Anexo 16, Vol I: Protección del medio ambiente. Ruido de las aeronaves.

[3] OACI Doc. 9184: *Manual de Planificación de Aeropuertos, Parte 2.*

[4] AENA/JT-ITRA. *Planificación sostenible de las infraestructuras de transporte. Actuaciones para la sostenibilidad de las infraestructuras aeroportuarias.* Madrid: Ministerio de fomento

[5] OACI Doc. 9829: *Orientación sobre el Enfoque equilibrado para la gestión del ruido de las aeronaves.*

[6] PÉREZ ALTOZANO, J.J. (2004) *Marco administrativo de las afecciones acústicas.* Madrid: Ministerio de Fomento.

[7] HORONJEF, Robert - McKELVEY, Francis X. (1994, 4thEd). *Planning & Design of Airports.*

[8] *Método recomendado para calcular las curvas de nivel de ruido en la vecindad de los aeropuertos.* Montreal: Organización de aviación civil internacional (OACI).

[9] *Doc 29. Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports.* Neuilly-sur-Seine Cédex: European Civil aviation conference.

[10] Ley del Ruido 37/2003

[11] Real Decreto 1422/1992, de 27 de noviembre, sobre limitación del uso de aviones de reacción subsónicos civiles.

[12] Real Decreto 1257/2003, de 3 de octubre, por el que se regulan los procedimientos para la introducción de restricciones operativas relacionadas con el ruido en aeropuertos.

[13] Anexo al Real Decreto 1257/2003. Resolución de 31 de mayo de 2011, de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, por la que se introducen restricciones operativas en el aeropuerto de El Prat de Barcelona siguiendo el procedimiento «enfoque equilibrado» del Real Decreto 1257/2003, de 3 de octubre.

[14] Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

[15] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

[16] Directiva 92/14/CEE de 2 de marzo de 1992 relativa a la limitación del uso de aviones objeto del Anexo 16 del Convenio relativo a la aviación civil internacional, volumen 1, segunda parte, capítulo 2, segunda edición (1988).

[17] Directiva 2002/30/CE de 26 de marzo de 2002 sobre el establecimiento de normas y procedimientos para la introducción de restricciones operativas relacionadas con el ruido en los aeropuertos comunitarios.

[18] Directiva 2002/49/CE de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

[19] EDUARDO MILANÉS DE LA LOMA, Planes de Acción en las infraestructuras aeroportuarias, AENA, Madrid, 2008.

[20] ALBERTO BLANCH ROMERO, CRISTINA GÓMEZ FLECHOSO, ANA I. LUENGO RIVERO, Sostenibilidad en la aviación en España. Informe 2010, SENASA, Madrid 2010.

[21] AENA, Delimitación de Servidumbres acústicas. Memoria técnica. Aeropuerto de Barcelona, Barcelona, 2010.

[22] AENA, Delimitación de Servidumbres acústicas. Plan de Acción. Aeropuerto de Barcelona, Barcelona, 2010.

Referencias web:

[23] Acoustic Considerations: The Vortex
(<http://mysite.du.edu/~jcalvert/tech/fluids/vortex.htm>)

[24] WESLEY K LORD. Aircraft Noise Reduction Technology.
<http://www.techtransfer.berkeley.edu/aviation04downloads/Lord.pdf>

[25] Wikipedia. Aircraft Noise. http://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_noise

[26] NASA and Industry Team Tests Aircraft Noise-Reducing Technologies
http://www.nasa.gov/home/hqnews/2005/aug/HQ_05213_Noise_reduction.html

[27] Aena Aeropuertos. Mapas Estratégicos de Ruido. http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite/sostenibilidad/es/MedioAmbient_FP/1180510561079/1237547980753/Barcelona-El-Prat.html

[28] Sistema de Información sobre Contaminación Acústica. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de España. <http://sicaweb.cedex.es/planes-de-accion.php>

[29] Aena Aeropuertos. Estadísticas. <http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite/estadisticas/es/>

[30] EASA. Type Certificate Data Sheets for Noise. <http://easa.europa.eu/certification/type-certificates/noise.php>

[31] Federal Aviation Administration. Aircraft Noise Levels. http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/noise_emissions/aircraft_noise_levels/



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ANEXOS

ANEXO 1. *Masas máximas de despegue, márgenes en los tres puntos de medición y margen acumulado calculados y utilizados en el estudio.*

	MTOW	Márgenes			
	(KG)	Lateral	Sobrevuelo	Aproximación	M.Acumulado
Total					
AEROSPATIALE ATR-42-500	18533,33	13,32	12,50	5,52	31,33
CANADAIR REGIONAL JET 200	23003,91	11,66	11,12	5,86	28,64
CANADAIR REGIONAL JET 100/200	23003,91	11,66	11,12	5,86	28,64
BOMBARDIER CHALLENGER 300	17542,50	6,40	13,60	8,40	28,40
SAAB 2000	22899,5	7,10	10,15	10,10	27,35
CESSNA CITATION	7890,61	5,91	11,52	8,07	25,50
SAAB SF 340A/340B	12917,77	8,45	11,61	4,82	24,89
EMBRAER RJ135, LEGANCY 600/650	21187,5	8,69	9,59	6,15	24,43
FAIRCHILD 328JET	15431,2	4,20	12,70	6,40	23,30
EMBRAER EMB-120 BRASILIA	11745,00	10,30	7,25	5,50	23,05
EMBRAER RJ145	20808,70	8,60	9,00	5,40	23,00
BAE JETSTREAM 31/32	10772,81879	10,13	2,65	10,18	22,95
AIRBUS A340-300	263092,44	5,62	9,46	7,71	22,78
AEROSPATIALE ATR-72	21752,11	9,57	7,28	5,08	21,93
BRITISH AEROSPACE ATP	23179,33	11,55	8,77	0,90	21,22
DE HAVILLAND DHC-8 DASH 8-300	17295,47707	8,24	8,66	4,14	21,04
BOEING 767-300 FREIGHTER	167375,58	3,08	11,86	5,64	20,57
LEARJET	8629,36	6,95	7,63	5,73	20,31
BOEING 767-400 PASSENGERS	170097,01	2,28	12,37	5,57	20,22
BOEING B777-300	266862,84	3,88	11,22	5,08	20,18
BOEING 717	51556,68	4,92	8,21	6,77	19,90
BOEING B737/600 PASSENGERS	60467,7	5,24	10,32	4,24	19,81

CANADAIR REGIONAL JET	33603,63	6,44	7,30	5,39	19,13
FOKKER F50	20626,67	8,96	8,13	1,28	18,37
AIRBUS A319	68826,29	4,21	7,57	6,57	18,36
AVRO RJ-85 AVROLINER	40864,13	5,90	10,98	1,34	18,22
BRITISH AEROSPACE 146-200 PASS	40948,20	7,27	8,08	2,80	18,15
AIRBUS A330-300	219425,00	2,51	9,60	5,87	17,99
BOEING B767/200 PASSENGERS	155137,59	4,12	9,49	4,18	17,79
BOEING 767-200 FREIGHTER	155137,59	4,12	9,49	4,18	17,79
AIRBUS A330-200	225303,75	2,45	9,57	5,60	17,61
BOEING B757/200 PASSENGERS	107238,08	4,35	7,83	5,27	17,45
EMBRAER 190	49660,09	2,99	7,55	6,60	17,14
AVRO RJ-100 AVROLINER	44354,5	6,70	8,73	1,33	16,75
CANADAIR REGIONAL JET 700	33605,60	4,53	6,53	5,40	16,47
BOEING B757 FREIGHTER	115892,90	4,69	5,99	5,67	16,34
AIRBUS A320 PASSENGER	73070,00	4,03	6,82	5,07	15,92
BOEING B767 FREIGHTER	158574,79	3,99	8,41	3,33	15,74
BOEING B767 PASSENGERS	158574,79	3,99	8,41	3,33	15,74
FOKKER 100	43386,50	4,25	5,86	5,61	15,72
AIRBUS A300-600 PASSENGERS	163927,8	2,72	10,22	2,67	15,60
BOEING 737-700 PASSENGERS	66478,20	3,05	7,65	4,35	15,04
BOEING 737-700 (WINGLETS) PASS	66478,20	3,05	7,65	4,35	15,04
CANADAIR REGIONAL JET 900	37286,18	4,94	4,47	5,62	15,03
BOEING B767/300 PASSENGERS	168786,58	3,76	6,64	4,60	15,00
BOEING 767-300 PASSENGERS WING	168786,58	3,76	6,64	4,60	15,00
BOEING 737-800 (WINGLETS) PASS	75155,28	3,66	7,02	4,07	14,75
BOEING B737/500 PASSENGERS	55780,72	6,17	6,11	1,68	13,97
EMBRAER ERJ-195, LEGANCY 1000	50508,8	3,16	4,18	6,55	13,88

DASSAULT (B.M) FALCON 50/900	19570,3	2,78	6,87	4,07	13,72
BOEING B747 PASSENGERS	369823,83	3,80	7,91	1,96	13,67
BOEING 737/800 PASSENGERS	75155,28	3,03	6,18	4,37	13,58
EMBRAER 170	37062,1	2,10	8,00	3,43	13,54
BOEING 737/900 PASSENGERS	74808,9	3,18	5,78	4,33	13,29
BOEING B737-300 PASSENGERS	60574,72	5,64	5,84	1,44	12,92
BOEING B737-300 FREIGHTER	60574,72	5,64	5,84	1,44	12,92
BOEING 737-300 WINGLETS	60574,72	5,64	5,84	1,44	12,92
BOEING B747 FREIGHTER	384864,39	4,10	7,25	1,40	12,75
MCDONNELL DOUGLAS DC10/15 PASS	206384,53	4,97	6,61	0,87	12,45
MCDONNELL DOUGLAS MD88	64930,46	1,29	3,74	7,08	12,11
BOEING B737/400 PASSENGERS	62384,57	5,15	4,51	1,94	11,59
MCDONNELL DOUGLAS MD83	65392,82	0,72	3,78	6,90	11,40
MCDONNELL DOUGLAS MD82	64526,83	0,67	3,70	6,96	11,33
AIRBUS A321	84627,48	1,27	5,47	4,37	11,11
MCDONNELL DOUGLAS MD87	64098,69	0,45	3,66	6,83	10,94
MCDONNELL DOUGLAS DC10-30/40 P	263084,00	3,47	3,21	-1,21	5,46
BOEING B747/300 PASSENGERS	377842,00	3,43	2,36	-0,84	4,96
BOEING B747/300 MIXED CONFG.	377842,00	3,43	2,36	-0,84	4,96
BOEING B737-200 PASSENGERS	52975,00	-0,72	2,96	1,98	4,22
BOEING B737-200 FREIGHTER	52975,00	-0,72	2,96	1,98	4,22
CONVAIR 580/600/640 FREIGHTER	26380,93224	2,90	1,60	-0,30	4,20
BOEING B737/200-ADV.PASANG	52315,4	-0,82	2,59	2,41	4,18
BOEING 747-300 / 747-200 FREIG	356482,37	2,99	1,55	-1,28	3,26
ILYUSHIN 96-300 PASSENGER	234994,87	3,45	-0,49	0,21	3,16
ANTONOV AN-72/74	34799,61	3,50	-0,30	-0,30	2,90

ILYUSHIN 86	212503,49	2,88	1,48	-1,93	2,42
BOEING B747/200 PASSENGERS	356083,76	2,47	0,40	-1,52	1,35
BOEING B747/200 MIXED CONFG.	356083,76	2,47	0,40	-1,52	1,35
BOEING B727/200 ADV.PASANG	85876,47	-1,74	0,03	3,05	1,34
BOEING B727 FREIGHTER	85876,5	-1,74	0,03	3,05	1,34
DESCONOCIDO		0,00	0,00	0,00	0,00
SIN CODIGO IATA		0,00	0,00	0,00	0,00
BOEING 727-200 FREIGHTER	83779,76	-1,47	-0,33	1,35	-0,45
BOEING B727/200 PASSENGERS	83779,76	-1,47	-0,33	1,35	-0,45
ILYUSHIN 62	166501,66	3,27	-4,36	-0,09	-1,17
ANTONOV AN-124 RUSLAN	391994,53	1,39	-1,95	-1,40	-1,96
GULFSTREAM AEROSP.G-1159 II/II	29982,38	-5,35	1,44	0,79	-3,13
MCDONELL DUGLAS DC8-50/61/62/6	144307,28	-1,73	-1,68	-3,32	-6,73
MCDONNELL DOUGLAS DC8 FREIGHTE	144307,28	-1,73	-1,68	-3,32	-6,73
MCDONNELL DOUGLAS DC-8 PASSENG	144307,28	-1,73	-1,68	-3,32	-6,73
BOEING B707 PASSENGERS	127187,30	-0,91	-3,55	-2,93	-7,39
BOEING B707 FREIGHTER	127187,30	-0,91	-3,55	-2,93	-7,39
MCDONNELL DOUGLAS DC9-30 PASSE	48802,0	-3,80	-4,23	0,27	-7,75
MCDONNELLDOUGLAS DC9-40 PASSEN	51709,53	-4,55	-3,88	-0,09	-8,51
TUPOLEV 154	96991,7	-0,02	-5,05	-4,57	-9,64
BOEING B727/100 PASSENGERS	74237,95	-3,01	-2,46	-4,24	-9,71
MCDONNELL DOUGLAS DC9-10 PASSE	41140,83	-6,49	-0,30	-3,21	-10,00
MCDONNELL DOUGLAS DC9 FREIGHTE	41140,83	-6,49	-0,30	-3,21	-10,00

ILYUSHIN 76	180001,33	-2,64	-3,58	-5,39	-11,61
TUPOLEV 134	47141,86	-7,09	-3,21	-2,53	-12,83
MCDONNELL DOUGLAS DC9-50 PASSE	53523,90	-1,52	-10,18	-2,40	-14,10

ANEXO 2. Niveles de margen acumulado entre 1999-2012

