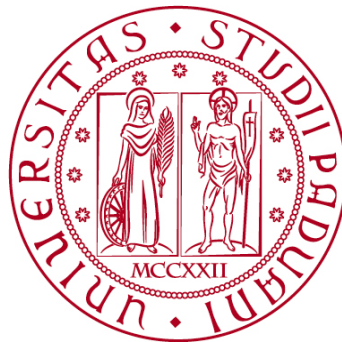


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**“L’INQUINAMENTO ACUSTICO CORRELATO
CON L’ESERCIZIO AEROPORTUALE”**

Relatore: Prof. Ing. Marco Pasetto

Laureando: Andrea Saccardo
Matricola: 1193537

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

*Ai miei familiari, parenti ed amici
che mi hanno accompagnato in questo lungo viaggio.*

INDICE

1. Introduzione	Pag. 6
2. Normativa e regolamentazione del rumore in Italia	Pag. 8
3. Ruoli istituzionali	Pag. 10
4. Approccio equilibrato del rumore aeroportuale (ICAO)	Pag. 17
5. Caratteristiche del rumore aeroportuale	Pag. 21
6. Rumore dell'aeromobile	Pag. 26
7. Stazioni di monitoraggio	Pag. 33
8. Modellazione del rumore aeroportuale	Pag. 35
9. Problemi sull'essere umano causati dal rumore aeroportuale e loro soluzioni	Pag. 39
10. Requisiti acustici passivi	Pag. 42
11. Conclusioni	Pag. 44

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Curva dose-risposta	Pag. 7
Figura 2: Riferimenti normativi per il rumore aeroportuale	Pag. 8
Figura 3: Zonizzazione acustica aeroportuale	Pag. 11
Figura 4: Coefficienti correttivi sulle estensioni delle aree residenziali in funzione della densità abitativa	Pag. 12
Figura 5: Compiti e tempi di presentazione ed esecuzione dei piani di risanamento per gli aeroporti	Pag. 16
Figura 6: Approccio equilibrato del rumore aeroportuale	Pag. 17
Figura 7: Punti di misurazione di riferimento per la certificazione del rumore degli aeromobili	Pag. 17
Figura 8: L'evoluzione degli standard ICAO sul rumore per gli aeromobili	Pag. 18
Figura 9: Livelli di rumore comparativi	Pag. 21
Figura 10: Livelli di pressione sonora	Pag. 22
Figura 11: Livello sonoro medio giorno-notte (DNL)	Pag. 23
Figura 12: Operazioni equivalenti per DNL=65	Pag. 23
Figura 13: Rappresentazione di un'impronta SEL	Pag. 25
Figura 14: Ipersostentatori e freni aerodinamici	Pag. 28
Figura 15: Schema di un turbogetto puro	Pag. 30
Figura 16: Schema di un turbo-fan a basso rapporto di bypass	Pag. 31
Figura 17: Schema di un turbo-fan ad un solo stadio e ad alto rapporto di bypass	Pag. 31
Figura 18: Mappa del profilo del rumore	Pag. 35
Figura 19: Rappresentazione tipica di una rotta di partenza da Heathrow utilizzando tracce medie e disperse	Pag. 36
Figura 20: Rappresentazione tipica degli arrivi a Heathrow utilizzando tracce medie e disperse	Pag. 36
Figura 21: Confronto tra ANCON ed un profilo predefinito di un altro modello di rumore per il Boeing 767	Pag. 36
Figura 22: Trama del terreno	Pag. 37
Figura 23: Grafico della popolazione	Pag. 37
Figura 24: Prestazioni acustiche passive degli edifici	Pag. 43

1. Introduzione

Non si può negare il fatto che l'aviazione sia rumorosa. Il rumore prodotto dagli aerei in fase di decollo e atterraggio rappresenta, infatti, una fonte importante di disturbo per la popolazione che risiede nelle vicinanze degli aeroporti, soprattutto in aree caratterizzate da un buon clima acustico. Nel nostro paese, in particolare, le caratteristiche morfologiche e orografiche legate ad una forte urbanizzazione del territorio sono tali per cui queste infrastrutture siano spesso localizzate in aree limitrofe a centri urbani. Di conseguenza, gli aeroporti presenti nelle aree più densamente popolate hanno un impatto acustico maggiore dato che è più probabile che ne risenta un maggior numero di persone.

Inoltre, la crescita economica e la globalizzazione richiedono un incremento della mobilità di persone e di movimentazione merci in tempi brevi: in tale contesto, il traffico aereo in Italia ha mostrato nel tempo un progressivo e significativo aumento. Quest'ultimo ha però vanificato in parte la percezione dei progressi ottenuti mediante l'adozione di una serie di misure di mitigazione e prevenzione del rumore che, nel complesso, avevano permesso di ridurre negli ultimi anni l'emissione sonora degli aeromobili.

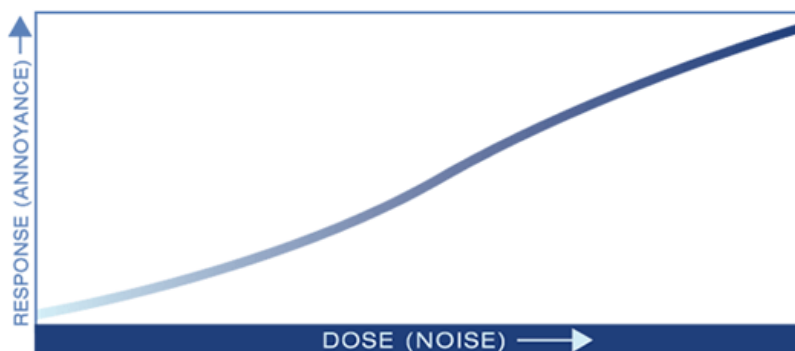
I problemi ambientali connessi alla presenza di un aeroporto non sono mai trascurabili e riguardano: la gestione dei rifiuti, l'inquinamento atmosferico, il traffico veicolare, il trattamento delle acque di servizio e meteoriche, ecc. Di tutti questi problemi, l'impatto acustico costituisce l'elemento di disturbo più evidente e più frequentemente segnalato dalla popolazione, a tal punto che in alcuni aeroporti esso limita persino la crescita del traffico aereo. Questo perché la rumorosità prodotta dagli aeromobili è caratterizzata da un numero relativamente limitato di eventi nell'arco della giornata, che presentano però livelli di rumore particolarmente elevati nelle aree interessate dai sorvoli. Questi eventi mantengono inoltre una loro individualità rispetto alle altre fonti di rumore e tale circostanza ne accresce l'effetto disturbante. Politici e legislatori spesso faticano a definire valori limite che proteggano la popolazione dagli effetti negativi del rumore degli aerei ma che, allo stesso tempo, non limitino gli effetti sociali positivi del traffico aereo.

Per rappresentare l'effetto sulle persone dell'esposizione al rumore degli aerei, i ricercatori negli anni '60 e '70 hanno sviluppato il concetto di "fastidio al rumore", il quale si è rivelato utile per capire come le comunità si sentivano riguardo al rumore dei nuovi aerei dell'era dei jet. Ci sono diversi fattori che influenzano l'entità del fastidio causato da un rumore:

- Quanto è forte il suddetto rumore?
- Quanto è durato?
- Con che frequenza si è verificato?
- Quando si è verificato? Era di notte?
- Si è verificato sullo sfondo di altri rumori o si è verificato in un luogo tranquillo?

È possibile condurre indagini sociali per determinare il livello di fastidio derivante da diverse fonti di rumore, compreso il rumore aereo. I risultati dei sondaggi possono essere utilizzati per comprendere meglio come le persone "rispondono" ai diversi livelli di esposizione al rumore. La relazione può essere rappresentata da quella che viene chiamata "curva dose-risposta". Nel caso dell'esposizione al rumore aereo, la "dose" è la quantità di rumore aereo sperimentato e la "risposta" è il livello di disturbo riportato. Non a caso, all'aumentare della "dose" di rumore, aumenta anche la "risposta" delle persone infastidite.

La derivazione delle “curve dose-risposta” basata su dati di molti studi individuali ha prodotto curve diverse per il rumore aereo, per quello stradale e per quello ferroviario, con un disturbo maggiore per il primo rispetto agli altri due (allo stesso livello di esposizione).



Molti aeroporti ricevono e registrano reclami: essi sembrano essere innescati da eventi insoliti più rumorosi del normale (ad es. l'altitudine insolita dell'aeromobile) oppure da cambiamenti operativi (ad es. nell'uso della pista). Fastidio e reclami/lamentele sono fenomeni diversi: il primo è un'opinione privata, i secondi/e sono azioni palesi. Pochi studi hanno utilizzato i database dei reclami per indagare se essi siano correlati al fastidio a lungo termine: questo perché, piuttosto che monitorare il numero di chiamanti (che può essere distorto da chi chiama ripetutamente), si dovrebbe preferibilmente basarsi sul numero di singoli denunciatori e sul numero di problemi (o incidenti) specifici che causano i suddetti reclami. In generale, se si ha un reclamo riguardo il rumore aereo si dovrebbe indirizzarlo all'aeroporto da cui si pensa l'aereo stesse operando poiché un rumore insolitamente forte può essere spesso il risultato di un volo che non opera come previsto: l'aeroporto potrebbe essere in grado di confermare l'ipotesi e di spiegarne il perché.

Gli aerei militari sono coperti da regole diverse da quelli civili quindi, se si desidera lamentarsi del rumore prodotto da essi, si deve contattare il Ministero della Difesa (MOD). Ciò che conta è, comunque, la causa del fastidio: se essa corrisponde con la presenza del rumore stesso, la riduzione del suo livello può fare ben poco per cambiare la situazione. D'altra parte invece, se il fastidio è legato all'intensità del rumore, ridurlo potrebbe essere d'aiuto.

Infine, alcuni aeroporti si trovano in aree densamente popolate che, anche senza l'aviazione, sarebbero comunque luoghi rumorosi; altri invece si trovano in zone più tranquille (zone rurali o semi-rurali), il che significa che un livello di rumore superiore in esse può avere un impatto maggiore sulla qualità della vita e sul benessere delle persone presenti. A riguardo, la protezione delle aree di tranquillità è riconosciuta come importante per la società nel suo insieme, quindi l'effetto del rumore su un'area tranquilla può influire sulle decisioni di pianificazione relative all'ubicazione e all'espansione dell'aeroporto.

2. Normativa e regolamentazione del rumore in Italia

La normativa che regola il rumore aeroportuale si trova a dover combinare diverse esigenze spesso conflittuali. Infatti, se da una parte vige la necessità di consentire uno sviluppo del traffico aereo sempre maggiore, dall'altra aumenta l'esigenza di tutela della popolazione residente sotto le rotte di decollo e atterraggio degli aerei. Oggi, in Italia, il rumore aeroportuale viene regolamentato da diversi decreti che definiscono le seguenti linee d'azione principali:

- caratterizzazione delle aree circostanti l'aeroporto mediante la definizione di 3 zone (definite come A, B e C) a cui corrispondono specifiche limitazioni nella destinazione d'uso;
- definizione dei limiti di rumore che l'infrastruttura deve rispettare in ciascuna zona;
- applicazione di una specifica metodologia di misura del rumore prodotto dal trasporto aereo;
- definizione, per ciascun aeroporto, delle procedure antirumore che devono essere rispettate dagli aerei in fase di atterraggio/decollo e nelle operazioni a terra;
- obbligo di realizzare e gestire un sistema di monitoraggio del rumore aeroportuale al fine di garantire il rispetto dei limiti;
- limitazione del traffico aereo nel periodo notturno;
- obbligo d'adozione di misure di risanamento nel caso in cui non ci sia il rispetto dei limiti di classificazione degli aeroporti nazionali sulla base dei livelli di rumore prodotti nell'ambiente circostante.

Con l'emanazione della legge quadro sull'inquinamento acustico (L. 26-10-1995, n. 447) è stato avviato un percorso di riassetto e di ricostruzione dell'impalcato normativo in tema di rumore ambientale, dal quale scaturiscono poi anche i decreti applicativi che regolamentano l'inquinamento acustico di natura aeroportuale.

Gli attuali riferimenti normativi riguardanti il rumore di tipo aeroportuale sono di seguito schematizzati:

L. 26-10-1995, n. 447	Legge quadro sull'inquinamento acustico
D.P.C.M. 14-11-1997	Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore
D.M. 31-10-1997	Metodologia di misura del rumore aeroportuale
D.P.R. 11-12-1997, n. 496	Regolamento recante norme per la riduzione dell'inquinamento acustico prodotto dagli aeromobili civili
D.M. 20-05-1999	Criteri per la progettazione dei sistemi di monitoraggio per il controllo dei livelli di inquinamento acustico in prossimità degli aeroporti nonché criteri per la classificazione degli aeroporti in relazione al livello di inquinamento acustico
D.P.R. 09-11-1999, n. 476	Regolamento recante modificazioni al D.P.R. 11 dicembre 1997, n. 496, concernente il divieto di voli notturni
D.M. 03-12-1999	Procedure antirumore e zone di rispetto negli aeroporti

Ulteriori riferimenti normativi sono:

- il D.P.C.M. 1° Marzo 1991 che prescrive i “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell’ambiente esterno” in riferimento alle classi di destinazione d’uso del territorio;
- il D.M. 16 Marzo 1998 che definisce le tecniche di rilevamento, le metodologie e gli obblighi di calibrazione e taratura della strumentazione adottata.

3. Ruoli istituzionali

Il processo di regolamentazione del rumore aeroportuale in Italia prevede la partecipazione di diversi soggetti istituzionali e non, con una chiara suddivisione dei ruoli. In sintesi vi è:

- la Commissione aeroportuale, che definisce le procedure antirumore, la zonizzazione acustica (zone A, B e C) e gli indici Ia, Ib, Ic;
- la Regione, che verifica il raggiungimento degli obiettivi di risanamento ed effettua le valutazioni di sua competenza;
- l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA), che svolge l'attività di controllo in merito al rispetto della regolamentazione vigente e trasmette una relazione periodica al Ministero dell'Ambiente circa l'attività di controllo effettuata e le infrazioni rilevate;
- il direttore della circoscrizione aeroportuale, che contesta e sanziona le violazioni delle procedure antirumore;
- la Società esercente, che gestisce il sistema di monitoraggio e provvede alla sua manutenzione, predispone la mappatura acustica e il piano di contenimento e abbattimento del rumore.

Commissioni aeroportuali

L'ENAC, per ciascun aeroporto aperto al traffico civile, istituisce una Commissione così composta:

- il direttore della circoscrizione aeroportuale, nel ruolo di presidente;
- un rappresentante per ognuno dei seguenti soggetti: Regione, Provincia e Comuni interessati, ARPA, ENAV, Società di gestione aeroportuale.

La Commissione aeroportuale deve rispondere a tre obiettivi fondamentali, che sono:

- a) definizione delle procedure antirumore;
- b) calcolo dell'intorno aeroportuale (zone A, B e C);
- c) calcolo degli indici Ia, Ib, Ic.

a) Le procedure antirumore, definite da ciascuna Commissione aeroportuale, sono adottate dal direttore della circoscrizione aeroportuale e vengono applicate quando l'aeromobile manovra in aria. Esse devono seguire i seguenti criteri generali:

- ottimizzare le proiezioni al suolo delle rotte, a tutela delle popolazioni esposte;
- disegnare le proiezioni al suolo delle rotte antirumore nelle fasi di decollo e di atterraggio;
- disegnare le rotte di partenza e di arrivo, in modo tale da essere percorse fatte salve esigenze di sicurezza delle operazioni di volo;
- recepire integralmente e senza modifiche i profili di atterraggio e decollo come definiti dalla normativa dell'ICAO.

La normativa stabilisce inoltre che, per ogni aeroporto, vengano definite le aree idonee alle prove motori al fine di ridurre la generazione di rumore verso le zone abitate (tempi di prova motore contenuti, orientamento del velivolo, schermi fonoassorbenti e/o fonoisolanti).

b) Il D.M. 31-10-1997 individua, in corrispondenza di ciascun aeroporto aperto al traffico civile, tre aree di rispetto (zona A, zona B e zona C) all'interno delle quali vengono identificati sia dei limiti acustici (definiti in termini di valori dell'indice L_{VA}) sia dei vincoli urbanistici.

Area di rispetto	Limite indice LVA	Vincoli urbanistici
Zona A	Non può superare il valore di 65 dB(A)	Nessun vincolo
Zona B	Non può superare il valore di 75 dB(A)	Esclusivamente attività agricole e allevamenti di bestiame, attività industriali e assimilate, attività commerciali, attività di ufficio, terziario e assimilate, previa adozione di adeguate misure di isolamento acustico. <u>Non possono essere realizzati fabbricati a uso residenziale</u>
Zona C	Può superare il valore di 75 dB(A)	Esclusivamente le attività funzionalmente connesse con l'uso e i servizi delle infrastrutture aeroportuali
Al di fuori delle zone A, B e C	Non può superare il valore di 60 dB(A). Il rumore immesso sul territorio dai sorvoli aerei deve concorrere, insieme alle altre sorgenti acustiche, al rispetto dei limiti della zonizzazione acustica comunale, dettati dal D.P.C.M. 14-11-1997	Nessun vincolo

La zonizzazione acustica aeroportuale, analogamente a quella comunale, rappresenta un atto tecnico-politico di governo del territorio visto che, oltre a definire limiti acustici per la specifica sorgente di rumore, introduce anche specifici vincoli di utilizzo. La definizione delle zone di rispetto aeroportuale rappresenta una fase delicata del processo regolatore, dal momento che nella zona C sono possibili soltanto attività strettamente connesse con l'uso dell'infrastruttura stessa, nella zona B sono autorizzate solo attività di tipo produttivo, commerciale, agricolo e uffici adeguatamente insonorizzati e solo nella zona A non è prevista alcuna limitazione legata all'uso del territorio. Inoltre, successivamente all'adozione della zonizzazione acustica, gli strumenti urbanistici comunali e quindi anche la classificazione del territorio devono possibilmente adeguarsi ad essa.

Il D.M. 3-12-1999 prevede che le zone di rispetto negli aeroporti debbano essere stabilite mediante la predisposizione preliminare di un' "impronta acustica" rappresentativa dei livelli di L_{VA} generati dall'aeroporto sul territorio circostante. L'area di impatto acustico di origine aeronautica viene quindi solitamente rappresentata tramite "curve di isolivello", cioè curve ideali congiungenti punti del territorio corrispondenti a eguali valori dell'indice descrittore acustico (L_{VA}), elaborate con l'ausilio di modelli matematici che prendono in considerazione la tipologia e la quantità di velivoli che operano presso l'aerostadio e le relative rotte di ingresso e di uscita. Tali informazioni vengono elaborate sulla base dei dati forniti dall'ENAC, dall'ENAV e dalla Società di gestione aeroportuale.

L'impronta acustica così ottenuta viene sottoposta a misure di verifica, così da poter effettuare eventuali azioni correttive qualora le elaborazioni modellistiche non siano congruenti con i reali livelli di rumore registrati.

Le norme non forniscono, però, indicazioni chiare e univoche sulla modalità di determinazione di dette zone, a partire dall'impronta acustica. La modalità viene spesso individuata dai partecipanti della Commissione aeroportuale, in virtù delle specifiche problematiche di rumore generate dall'aeroporto e dall'assetto territoriale in cui esso si inserisce.

In alcuni casi, l'interpretazione "semplificata" della norma ha portato a determinare i confini delle zone A, B e C utilizzando direttamente l'impronta acustica, in cui le curve di isolivello acustico di indice L_{VA} venivano identificate esattamente con i confini delle suddette zone.

Tale interpretazione risulta, innanzitutto, in contrasto con quanto affermato dal D.M. 31-10-1997 e dal successivo D.M. 3-12-1999. Inoltre, l'applicazione di questo criterio "semplificato" può generare problemi di diverso tipo: con riferimento all'assetto urbanistico, tale interpretazione, non analizzando il territorio compreso nell'impronta

acustica, può comportare una significativa presenza di edifici residenziali in zona B, in contraddizione con la definizione data dal D.M. 31-10-1997 per la quale nella suddetta zona non devono essere presenti edifici abitativi, visto che il limite acustico è pari a 75 dBA e quindi superiore a tutte le raccomandazioni sanitarie secondo cui non è consigliabile un livello superiore a 65 dBA negli ambienti di vita. Inoltre, la scelta di far coincidere le zone di rispetto alle curve di isolivello acustico può comportare la necessità di rivedere e modificare la zonizzazione acustica ogni qualvolta vengano modificate le procedure antirumore o l'operatività dello scalo.

La normativa vigente prevede, invece, che le Commissioni definiscano nell'intorno aeroportuale i confini delle aree di rispetto tenendo conto del piano regolatore aeroportuale, degli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica vigenti e delle procedure antirumore adottate ed approvando la zonizzazione con votazione unanime da parte di tutti i partecipanti alla Commissione stessa. Solo tramite una sovrapposizione delle informazioni provenienti dall'impronta acustica con le informazioni provenienti dagli strumenti urbanistici è infatti possibile eseguire una corretta zonizzazione acustica, che adatti il diritto di tutela della salute della popolazione residente con i piani di sviluppo aeroportuale.

Con l'adozione di tale criterio "pianificatorio", la zonizzazione acustica che ne deriva andrà a comprendere per la zona C un territorio in cui siano previste soltanto le attività strettamente connesse con l'uso dell'infrastruttura (con un limite superiore a 75 dBA), per la zona B un territorio che riguardi per la massima parte attività di tipo produttivo, commerciale, agricolo e uffici (con un limite pari a 75 dBA), mentre per la zona A una porzione di territorio in cui siano localizzati gli edifici residenziali presenti nell'intorno aeroportuale e dove non viene prevista alcuna limitazione legata all'uso del territorio (con un limite di 65 dBA). Si otterrà quindi una zonizzazione acustica sostanzialmente differente dall'impronta acustica generata dall'aeroporto, ma compatibile con gli usi del territorio vigenti e con gli sviluppi dell'operatività aeroportuale previsti.

Successivamente, attraverso il confronto tra l'impronta acustica reale dell'aeroporto e le zone di rispetto redatte mediante l'applicazione del criterio "pianificatorio" o "urbanistico", sarà possibile definire la "mappa di conflitto", dalla quale emergeranno le criticità acustiche vigenti e scaturiranno poi gli eventuali piani di risanamento da porre in essere.

c) La classificazione su base nazionale degli aeroporti in relazione all'inquinamento acustico ad essi associato viene eseguita mediante il calcolo degli indici Ia, Ib, Ic. Ai fini del calcolo di tali indici, la Commissione aeroportuale deve elaborare i seguenti parametri:

- estensione dell'intorno aeroportuale (misurata in ettari);
- estensione delle zone A, B e C (misurata in ettari);
- estensione delle aree residenziali (Ar, Br, Cr) ricadenti in ciascuna delle tre zone;
- densità abitativa territoriale (numero di abitanti/ettaro).

I parametri Ar, Br e Cr devono essere corretti (Arc, Brc e Crc) in funzione della densità abitativa mediante i coefficienti moltiplicativi riportati nella tabella seguente:

Area residenziale	Densità abitativa (abitanti/ha)	Coefficiente correttivo
estensiva	10-150	k = 1.1
semiestensiva	150-250	k = 1.2
intensiva	> 250	k = 1.3

I tre indici numerici che caratterizzano l'aeroporto dal punto di vista dell'inquinamento acustico generato vengono dunque calcolati sulla base dell'estensione delle zone A, B, C e delle aree residenziali Arc, Brc e Crc (ottenute dalle aree residenziali Ar, Br e Cr a seguito dell'applicazione dei coefficienti correttivi) nel seguente modo:

$$I_a = \text{Arc} \times A$$

$$I_b = \text{Brc} \times B$$

$$I_c = \text{Crc} \times C$$

Tali indici vengono presi come riferimento anche per le azioni di risanamento acustico, le quali devono essere rivolte principalmente alla riduzione del valore degli indici I_b e I_c .

Compiti della Regione

La Regione è l'organo istituzionale con funzione di indirizzo ai fini della corretta gestione del territorio, anche sotto il profilo della tutela ambientale (incluso l'inquinamento acustico). In particolare, la Regione disciplina con propria legge le modalità per la presentazione della documentazione di impatto acustico per le aree dove sono effettuati gli atterraggi e i decolli, prevedendo l'obbligo per i Comuni di dare comunicazione delle loro valutazioni all'ENAC. La Regione trasmette inoltre ai Ministri dell'Ambiente e dei trasporti una relazione mensile sul monitoraggio del rumore aeroportuale.

Con riferimento ai piani di risanamento acustico da parte dei gestori dell'infrastruttura aeroportuale, la Regione riceve dal gestore le mappature acustiche e i piani d'azione elaborati (verificando se soddisfano i requisiti richiesti), la stima delle aree critiche e il piano di contenimento e abbattimento del rumore. In base a proprie valutazioni di importanza può stabilire (d'intesa con i Comuni interessati) un ordine di priorità degli interventi da eseguire, che prescinde dall'indice di priorità individuato dal gestore dell'infrastruttura e può fissare inoltre termini diversi dai 5 anni (generalmente previsti per gli aeroporti) quale tempistica da rispettare per il raggiungimento degli obiettivi di risanamento. Essa ha, infine, un ruolo di vigilanza rispetto al raggiungimento degli obiettivi di risanamento stimati.

Dal 2001 è stata istituita l'Imposta Regionale sulle Emissioni Sonore degli Aeromobili (IRESA), destinata a fondi per i sistemi di monitoraggio e disinquinamento acustico e indennizzo delle popolazioni residenti nelle zone dell'intorno aeroportuale.

L'imposta IRESA è stabilita sulla base dell'emissione sonora dell'aeromobile civile ed è dovuta ad ogni Regione o Provincia autonoma per ogni decollo e atterraggio dell'aeromobile negli aeroporti civili. Il soggetto obbligato al pagamento dell'imposta è l'esercente dell'aeromobile, mentre sono esclusi i voli di Stato, quelli sanitari e quelli d'emergenza. Le misure dell'imposta possono essere variate con legge delle Regioni o delle Province autonome interessate:

- fino al 15% nel caso in cui il decollo o l'atterraggio dell'aeromobile avvenga nelle fasce orarie di maggiore utilizzazione, individuate dal Ministro dei trasporti e della navigazione con un proprio decreto;
- in misura non superiore all'indice Istat dei prezzi al consumo per la collettività nazionale;
- fino ad un massimo del 10% in relazione alla densità abitativa dell'intorno aeroportuale, differenziandole su base territoriale.

La ripartizione dell'imposta viene effettuata da ciascuna Regione e Provincia autonoma sulla base dei programmi di risanamento e disinquinamento acustico presentati dai Comuni dell'intorno aeroportuale ed elaborati sui dati rilevati dai sistemi di monitoraggio acustico realizzati. Nel caso in cui le zone sottoposte ad inquinamento acustico siano situate in

Regioni limitrofe a quella in cui risiede l'aeroporto stesso, si attua la compensazione tra le diverse Regioni interessate in merito alle risorse derivanti dall'applicazione dell'imposta. Vengono applicate delle sanzioni amministrative per l'omessa presentazione della comunicazione, per la dichiarazione infedele e per l'omesso versamento del tributo.

Ruolo dell'ARPA

L'Agenzia Regionale di Protezione Ambientale (ARPA) rappresenta l'organo tecnico delle Regioni e degli enti locali (Province e Comuni) nell'azione di pianificazione e di controllo ambientale, la quale offre anche un supporto ad altre istituzioni pubbliche, ai gestori delle infrastrutture di trasporto, ecc.

In tema di rumore aeroportuale, essa:

- partecipa ai lavori delle Commissioni aeroportuali, ricoprendo un importante ruolo di supporto tecnico;
- verifica l'efficienza dei sistemi di monitoraggio gestiti dalla Società di gestione aeroportuale;
- trasmette al Ministero dell'Ambiente, con cadenza almeno semestrale, una relazione tecnica circa l'attività di controllo effettuata, le tipologie e le entità delle infrazioni rilevate (desunte dall'elaborazione dei dati contenuti negli archivi del sistema di monitoraggio);
- svolge un'azione di informazione del pubblico riguardo i dati ambientali dell'aeroporto.

In particolare, riguardo la verifica dell'efficienza dei sistemi di monitoraggio, il ruolo assegnato all'ARPA non è solo quello di verificare il rispetto dei limiti imposti dalla normativa, ma è anche quello di informare periodicamente il legislatore (Ministero dell'Ambiente) riguardo l'efficienza ed eventualmente gli elementi di criticità riscontrati nel sistema di monitoraggio.

Innanzitutto, deve essere prevista una verifica dei requisiti del sistema rispetto alle disposizioni di legge, da effettuarsi allo start-up e ogni qualvolta si renda necessaria una modifica strutturale della rete. Periodicamente, inoltre, si dovrà procedere ad una verifica della gestione del sistema, cioè dello stato della manutenzione (sia delle singole stazioni che del centro di elaborazione dati, nonché del processo elaborativo dei dati). Quest'ultima verifica è quella che richiede il maggior impegno tecnico da parte dell'ARPA, poiché prevede l'analisi dei seguenti elementi:

- modalità di identificazione degli eventi sonori;
- sensibilità delle stazioni di monitoraggio ai movimenti aerei;
- identificazione delle tre settimane di massimo traffico;
- eventi correlati rispetto al numero di movimenti;
- continuità delle rilevazioni;
- verifica dei dati di L_{VA} forniti.

L'esercente dello scalo deve garantire l'accesso pubblico alle informazioni sul rumore generato e, per poter svolgere correttamente questa funzione, è necessario che i dati messi a disposizione dal gestore siano validati. In tal senso il ruolo di verifica dell'ARPA diviene un'attività di supporto alla gestione del sistema, consentendo di disporre di dati affidabili che possano essere utilizzati sia ai fini degli adempimenti normativi a carico del gestore sia per l'informazione del pubblico.

Ruolo del direttore della circoscrizione

Il direttore dell'aeroporto presiede la Commissione aeroportuale e pertanto:

- coordina i lavori della Commissione ai fini della definizione delle procedure antirumore, della zonizzazione acustica aeroportuale e del calcolo degli indici Ia, Ib e Ic;
- adotta le procedure antirumore, dopo averle definite nell'ambito dei lavori della Commissione aeroportuale stessa;
- contesta all'esercente dell'aeromobile la violazione delle procedure antirumore, provvedendo alla riscossione delle sanzioni amministrative previste.

Ruolo dell'ENAV

L'ENAV deve fornire i dati delle traiettorie seguite dagli aeromobili civili nel corso delle movimentazioni aeree (tracciati radar) ai soggetti incaricati di determinare le curve isolivello e le procedure antirumore e a quelli preposti alla gestione del sistema di monitoraggio. Essa ha inoltre il compito di redigere il volume AIP Italia, dove sono riportate le rotte di ingresso e di uscita degli aeromobili dagli aeroporti e dove vengono pubblicate le procedure antirumore (definite dalle singole Commissioni aeroportuali) che devono essere applicate dagli aerei nel corso delle operazioni di atterraggio e di decollo.

Ruolo dell'ENAC

L'ENAC deve istituire, per ogni aeroporto aperto al traffico civile, la Commissione presieduta dal direttore della circoscrizione aeroportuale. Esso esegue inoltre verifiche, con cadenza almeno biennale, sugli aeromobili in esercizio per accertarne la rispondenza alla certificazione acustica. In particolare, la documentazione di certificazione acustica degli aeromobili in esercizio deve essere messa a disposizione, oltre che all'ENAC, anche all'ARPA per eventuali controlli. L'ENAC, d'intesa con le Regioni, può autorizzare (assicurando comunque l'agibilità dell'aeroporto per voli di Stato, sanitari e d'emergenza) i voli notturni dalle ore 23:00 alle ore 6:00 se effettuati con aeromobili che soddisfino i requisiti acustici adeguati.

Compiti delle Società e degli Enti gestori

I principali compiti delle Società di gestione sono:

- gestione e manutenzione del sistema di monitoraggio;
- definizione ed elaborazione dei piani di contenimento e abbattimento del rumore;
- elaborazione delle mappature acustiche degli aeroporti principali.

I sistemi di monitoraggio devono:

- monitorare le singole operazioni di decollo e di atterraggio al fine di rispettare le procedure antirumore definite dalle Commissioni aeroportuali;
- registrare in continuo i dati di ogni singolo evento ed effettuare il calcolo dell' L_{VA} ;
- essere predisposti a recepire e gestire le eventuali lamentele da parte dei cittadini.

Le società di gestione aeroportuale hanno l'obbligo di:

- individuare le aree in cui si rileva un superamento dei limiti previsti;
- determinare il contributo dell'infrastruttura al superamento dei suddetti limiti;
- presentare ai Comuni, alla Regione o all'autorità da essa indicata il piano di contenimento e abbattimento del rumore.

I compiti e i tempi di presentazione ed esecuzione dei piani per gli aeroporti sono di seguito sintetizzati:

Compiti del gestore	Tempi	Conseguenti adempimenti del gestore
Individuazione delle aree critiche con superamento dei limiti	Entro 18 mesi dalla zonizzazione acustica aeroportuale	Trasmettere le informazioni ai Comuni interessati e alla Regione o all'autorità da essa indicata
Redazione piano di risanamento	Entro i successivi 18 mesi	Trasmettere il piano di risanamento ai Comuni interessati e alla Regione o all'autorità da essa indicata, con le priorità d'intervento
Tempo per l'attuazione del piano di risanamento	Entro 5 anni	Conseguire il risanamento dalla data di espressione della Regione o dell'autorità da essa indicata

Entro 6 mesi dalla data di ultimazione di ogni intervento previsto nel piano di risanamento, la Società o l'Ente gestore, nelle aree oggetto dello stesso piano, provvede ad eseguire rilevamenti per accertare il conseguimento degli obiettivi del risanamento e trasmette i dati al Comune e alla Regione o all'autorità da essa indicata.

Le Società e gli Enti gestori delle infrastrutture aeroportuali devono elaborare e trasmettere alla Regione i dati relativi alla mappatura acustica degli aeroporti principali in cui si svolgono più di 50.000 movimenti all'anno. Nel caso di infrastrutture di interesse nazionale i dati devono essere trasmessi anche al Ministero dell'Ambiente.

Essi dovranno contenere, come requisito minimo:

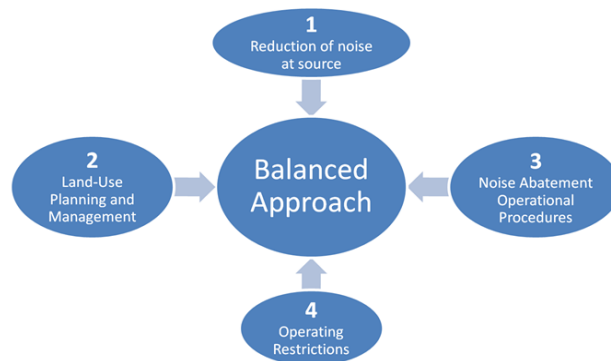
- la descrizione spaziale delle curve isolivello relative agli indicatori L_{den} e L_{night} in classi di 5 dBA per i livelli 55, 60, 65, 70, 75 e 50, 55, 60, 65, 70 rispettivamente, calcolati ad una quota dal terreno di 4 m, considerando solo il suono incidente sulla facciata esposta;
- la quantificazione della popolazione esposta al rumore prodotto dall'infrastruttura, con arrotondamento al centinaio, nelle classi sopra riportate;
- la quantificazione delle superfici e delle abitazioni esposte al rumore prodotto dall'infrastruttura, nelle classi sopra riportate;
- la quantificazione dei ricettori sensibili (scuole, ospedali, case di cura) esposti al rumore prodotto dall'infrastruttura, nelle classi sopra riportate;
- i programmi di contenimento del rumore attuati in passato e le misure antirumore in atto;
- la delimitazione delle aree dove è superato il valore limite, espresso dal valore L_{VA} all'interno dell'intorno aeroportuale e dal descrittore L_{eq} diurno e notturno all'esterno dell'intorno aeroportuale;
- una sintesi del piano d'azione previsto (per aeroporti con numero di movimenti superiori a 50.000 all'anno), trasmesso alla Regione e, nel caso di infrastrutture di interesse nazionale, anche al Ministero dell'Ambiente.

Compiti dell'Unione Europea e dell'ICAO

Per quanto riguarda l'UE, il suo ruolo principale in materia di rumore consiste nell'applicare le regole dell'ICAO attraverso l'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) e nel decidere se determinati tipi di aeromobili possono operare in Europa sulla base dei loro livelli di rumore certificati. A riguardo, le direttive europee introdotte nel 1992 e nel 2002 hanno vietato l'operatività di alcuni tipi di aeromobili considerati più rumorosi. L'UE ha anche sviluppato norme che armonizzano la misurazione del rumore aereo in tutta Europa. A livello internazionale, l'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) è l'organismo responsabile della definizione dei limiti di certificazione del rumore e delle procedure di prova che tutti i nuovi progetti di aeromobili devono rispettare.

4. Approccio equilibrato del rumore aeroportuale (ICAO)

Siccome il rumore degli aerei è la causa più significativa delle reazioni avverse da parte della comunità legate al funzionamento e all'espansione degli aeroporti, limitare o ridurre il numero di persone colpite da un rumore significativo degli aerei è una delle principali priorità ed uno dei principali obiettivi ambientali dell'ICAO. A riguardo, la sua politica generale è "l'approccio bilanciato alla gestione del rumore degli aeromobili". Esso consiste nell'individuare il problema del rumore in uno specifico aeroporto e nell'analizzare le varie misure disponibili per ridurlo, che possono essere raggruppate in quattro elementi principali descritti nella figura seguente:



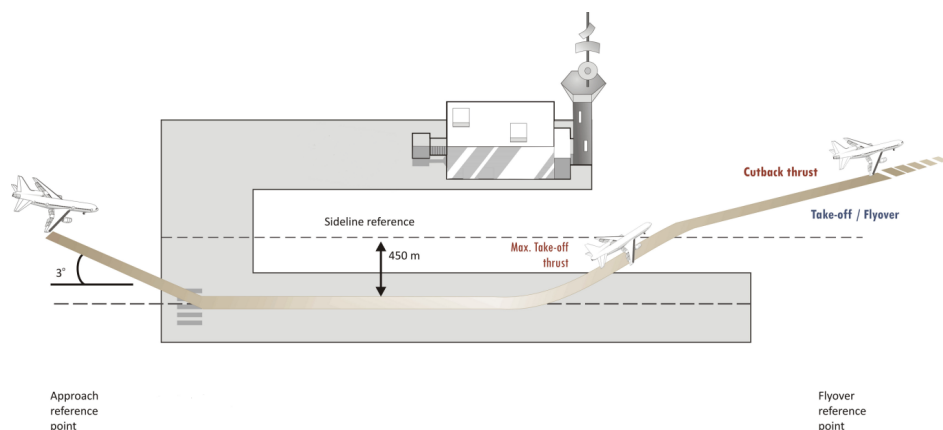
1- Riduzione del rumore alla fonte

Un importante pilastro dell'approccio equilibrato alla gestione del rumore aereo è la "riduzione del rumore alla fonte". Esso è stato considerato sin dagli anni '70 mediante la fissazione di limiti del rumore per gli aeromobili. Lo scopo principale della certificazione del rumore è quello di garantire che la più recente tecnologia di riduzione del rumore sia incorporata nella progettazione degli aeromobili garantendo che le diminuzioni del rumore offerte dalla tecnologia si riflettano intorno agli aeroporti.

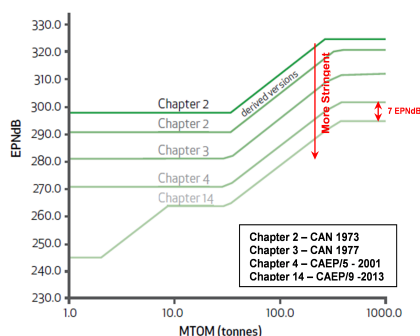
Norme sul rumore per gli aerei a reazione e grandi eliche

Sono stati sviluppati progetti di standard internazionali e pratiche raccomandate per il rumore degli aeromobili, divenuti applicabili nel 1972. Questi standard definiscono tre punti di misurazione di riferimento per la certificazione del rumore, che sono illustrati nella figura sottostante; essi stabiliscono inoltre che i limiti di rumore sono funzione diretta della massa massima al decollo (MTOM), al fine di riconoscere che gli aerei più pesanti (aventi una maggior capacità di trasporto) producono più rumore rispetto a quelli più leggeri.

Questa è la norma sul rumore del capitolo 2 contenuta nell'allegato 16, volume I dell'ICAO.



Dopo l'introduzione del capitolo 2, sono entrati in servizio motori a reazione con rapporto di bypass molto più elevato. Questa nuova tecnologia non solo ha migliorato l'efficienza del carburante, ma ha anche portato ad una riduzione della rumorosità del motore. Ciò ha consentito di rendere più rigorosa la norma sul rumore dell'ICAO nel 1977: questa è la norma sul rumore del capitolo 3 contenuta nell'allegato 16, volume I. Negli anni successivi, ulteriori tecnologie sono state incorporate nei progetti di motori e cellule che hanno portato a miglioramenti nelle prestazioni acustiche degli aeromobili: ciò ha comportato un ulteriore aumento rigoroso dello standard acustico contenuto nell'allegato 16, volume I, capitolo 4. Nel febbraio 2013 c'è stata inoltre una modifica all'allegato 16, volume I, che prevede un aumento del rigore di 7 EPNdB (cumulativo) rispetto agli attuali livelli del capitolo 4. Nel 2014 questa raccomandazione è stata adottata dal Consiglio dell'ICAO come nuovo standard acustico allegato 16, volume I, capitolo 14 per gli aeroplani a reazione e ad elica. Questo nuovo standard più rigoroso è mostrato nella figura sottostante (insieme ai precedenti standard di rumore ICAO) e sarà lo standard cardine per il rumore dei jet subsonici e degli aerei a propulsione per i prossimi anni. Si applica ai nuovi tipi di aeromobili presentati per la certificazione a partire dal 31 dicembre 2017 ed a partire dal 31 dicembre 2020 per quelli di massa inferiore a 55 tonnellate.



Norme sul rumore per gli aerei a elica leggera

Le norme sul rumore per velivoli a elica leggera sono state incluse per la prima volta nell'allegato 16 nel 1974. Attualmente, esse sono contenute nell'allegato 16, volume I, capitolo 10, che sono limitate ai velivoli ad elica che non superano la massa massima certificata al decollo di 8618 kg.

La presente norma si basa su un unico punto di misurazione del rumore di riferimento al decollo, che si trova ad una distanza di 2500 m dall'inizio del rullaggio. Come nel caso dei velivoli più grandi, le norme fissano anche limiti di rumore in funzione diretta della Massima Massa al Decollo (MTOM).

Norme sul rumore per gli elicotteri

Le norme sul rumore per gli elicotteri sono state incluse per la prima volta nell'allegato 16 nel 1981. Attualmente, esse sono contenute nei capitoli 8 e 11 dell'allegato 16, volume I. Il capitolo 8 è applicabile a tutti i tipi di elicotteri, considerando che il capitolo 11 prevede una procedura di certificazione semplificata facoltativa per elicotteri leggeri con una massa massima al decollo certificata pari o inferiore a 3175 kg.

Norme sul rumore per i supersonici

Attualmente, l'allegato 16 volume I include solo gli standard di rumore per velivoli supersonici per i quali la domanda di certificato di tipo è stata presentata prima del 1° gennaio 1975.

Questi sono forniti nel capitolo 12 dell'Allegato 16, volume I. L'ICAO sta lavorando per sviluppare nuovi standard di rumore per i supersonici.

2- Pianificazione e gestione del territorio

La pianificazione e la gestione del territorio sono un mezzo efficace per garantire che le attività nelle vicinanze degli aeroporti siano compatibili con l'aviazione. Il loro obiettivo principale è ridurre al minimo la popolazione colpita dal rumore degli aerei introducendo la zonizzazione dell'uso del suolo attorno agli aeroporti.

Le principali politiche dell'ICAO, attraverso misure preventive, esortano gli Stati (dove esiste ancora l'opportunità di ridurre al minimo il problema del rumore degli aerei) a:

- individuare nuovi aeroporti in luoghi appropriati (ad esempio lontano dalle aree sensibili al rumore);
- adottare le misure appropriate affinché si tenga pienamente conto della pianificazione territoriale nella fase iniziale di qualsiasi nuovo aeroporto o nello sviluppo di uno già esistente;
- definire le zone intorno agli aeroporti associate a diversi livelli di rumore tenendo conto dei livelli e della crescita della popolazione, nonché delle previsioni di crescita del traffico e stabilire criteri per l'uso appropriato di tale suolo, tenendo conto degli orientamenti dell'ICAO;
- emanare leggi, stabilire linee guida o altri mezzi appropriati per raggiungere il rispetto di tali criteri per l'uso del suolo;
- garantire che le informazioni sulle operazioni degli aeromobili e sui loro effetti ambientali siano di facile lettura e disponibili per le comunità vicine agli aeroporti.

Le linee guida dell'ICAO su questo argomento sono contenute nell'allegato 16, volume I, parte IV e nel Doc. 9184 dell'ICAO: Manuale di pianificazione aeroportuale, parte 2 - "Uso del suolo e controllo ambientale". Il manuale fornisce indicazioni sull'utilizzo dei vari strumenti per la minimizzazione, il controllo e la prevenzione dell'impatto del rumore aereo in prossimità degli aeroporti e descrive le pratiche adottate per la pianificazione e la gestione del territorio da alcuni Stati. Inoltre, al fine di promuovere un metodo uniforme di valutazione del rumore intorno agli aeroporti, l'ICAO raccomanda l'uso della metodologia contenuta nel Doc. 9911 dell'ICAO - "Metodo consigliato per il calcolo delle curve di livello del rumore intorno agli aeroporti".

Nell'approccio equilibrato sono incluse anche le tasse sul rumore come possibile strumento di gestione di quest'ultimo. I costi sostenuti possono infatti, a discrezione degli Stati, essere attribuiti agli aeroporti e recuperati presso gli utenti. Nel caso in cui vengano riscosse tasse relative al rumore, esse devono riguardare solo gli aeroporti che presentano problemi di rumore e dovrebbero essere concepite per recuperare non più dei costi applicati alla loro riduzione o prevenzione; inoltre dovrebbero essere non discriminatorie tra gli utenti e non essere stabilite a livelli tali da risultare proibitive per l'esercizio di determinati aeromobili. Consigli pratici sulla determinazione della base di costo per le tasse relative al rumore e alla loro riscossione sono fornite nel Doc. 9562 dell'ICAO - "Manuale di economia dell'aeroporto".

3- Procedure operative per l'abbattimento del rumore

Anche il modo in cui gli aeromobili vengono utilizzati nelle operazioni quotidiane può presentare impatti in termini di rumore che raggiunge il suolo. L'ICAO assiste nello sviluppo e nella standardizzazione di procedure operative a bassa rumorosità che siano

sicure ed economiche. Le possibilità includono piste e rotte preferenziali per il rumore e procedure di abbattimento del rumore per il decollo e l'atterraggio. L'adeguatezza di una qualsiasi di queste misure dipende dalla struttura fisica dell'aeroporto e dei suoi dintorni, ma in tutti i casi la procedura deve dare priorità a considerazioni di sicurezza.

4- Restrizioni operative

Le preoccupazioni relative al rumore hanno indotto alcuni Stati a prendere in considerazione la possibilità di vietare l'esercizio di determinati aeromobili rumorosi negli aeroporti più sensibili al rumore. Negli anni '80, l'attenzione si è concentrata sugli aerei con certificazione non rumorosa (NNC); negli anni '90 è passata agli aerei del capitolo 2; oggi si è spostata sui velivoli del capitolo 3. Nel caso di quest'ultimi, l'Assemblea dell'ICAO nel 2001 ha esortato gli Stati a non introdurre nessuna restrizione operativa su di essi prima di aver valutato appieno le misure disponibili per affrontare il problema del rumore nell'aeroporto interessato secondo l'approccio equilibrato. Oltre all'eliminazione graduale sopra descritta, altre possibili restrizioni operative possono essere: coprifuoco, restrizioni notturne, restrizioni relative alla natura del volo, ecc.

C'è da notare, comunque, che restrizioni operative di questo tipo possono avere implicazioni economiche significative per le compagnie aeree interessate, sia per quelle con sede negli Stati che agiscono, sia per quelle con sede negli Stati che operano da/verso gli aeroporti interessati.

5. Caratteristiche del rumore aeroportuale

Scala di misura

Il suono è energia trasferita attraverso l'aria che il nostro udito rileva come piccoli cambiamenti di pressione di quest'ultima. Più energia viene impiegata per produrre un suono, più forte esso sarà.

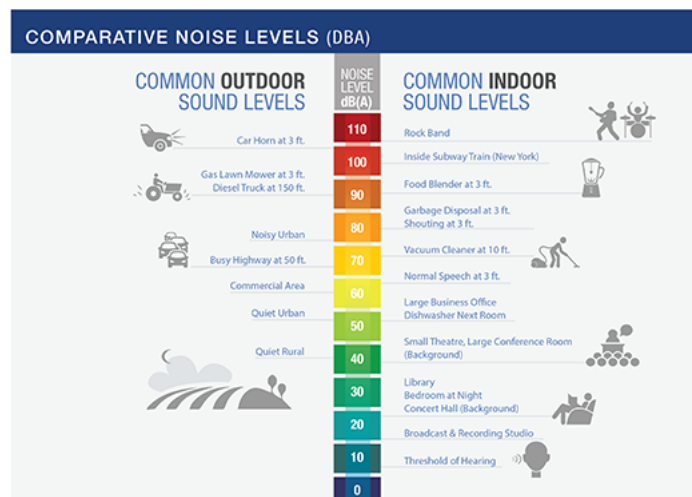
Il rumore è, in genere, un suono "indesiderato". Alcuni suoni (come il fischio di un treno lontano) possono essere piacevoli per alcuni, mentre altri (come il cane che abbaia nel cuore della notte) sono universalmente considerati più fastidiosi. C'è da notare, però, che anche i suoni piacevoli possono diventare per noi rumore quando diventano più forti. Il rumore, quindi, ha sia una componente oggettiva (fisica) sia una componente soggettiva che tiene conto della percezione individuale (o reazione) di una persona.

L'orecchio umano può gestire un'enorme gamma di livelli sonori. Il decibel (dB) è l'unità di misura utilizzata per misurare l'intensità di un suono, incapsulando la sua energia con riferimento alla soglia dell'udito ed utilizzando una scala logaritmica.

La misurazione del rumore deve, però, anche tener conto della risposta variabile dell'orecchio umano alle diverse frequenze del suono, con la maggior parte della sensibilità che si verifica nell'intervallo 2-4 kHz: abbiamo infatti più difficoltà a sentire le basse frequenze (es. il rombo di un tuono) e sentiamo più forte quelle alte (es. il pianto di un bambino).

Pertanto l'unità di decibel utilizzata per esprimere la risposta umana al volume o al fastidio include una ponderazione che varia sia con l'intensità che con la frequenza. La misura più comune è il "livello sonoro ponderato A" o "scala pesata A", nota come dBA.

Questa scala approssima quindi più da vicino il volume relativo dei suoni nell'aria, così come viene percepito dall'orecchio delle persone e fornisce un modo più utile per valutare l'effetto dell'esposizione al rumore degli esseri umani, concentrandosi su quelle parti dello spettro di frequenza dove sentiamo di più.



Conoscere la scala del rumore è un elemento utile per catturare il suo impatto. Però è anche importante considerare come misuriamo quest'ultimo relativamente ad un singolo evento: infatti per le fonti di rumore in movimento come gli aerei, i livelli di rumore possono cambiare nel tempo; ad esempio, il livello sonoro di un aereo aumenta man mano che esso si avvicina e diminuisce quando esso si allontana/vola via. Può essere quindi utile misurare il "livello sonoro massimo", abbreviato come L_{max} , di un particolare "evento" di rumore. Ma

L_{max} non tiene conto, però, della durata di un evento sonoro: il livello sonoro massimo di una pistola che spara un proiettile è alto ma molto breve, mentre un treno merci può avere lo stesso livello sonoro massimo ma il suono ha una durata molto più lunga. Per tener conto delle differenze di durata e di volume dei diversi suoni, vengono utilizzate diverse metriche per confrontare sia singoli eventi di rumore, sia eventi che si verificano in un lungo periodo di tempo.

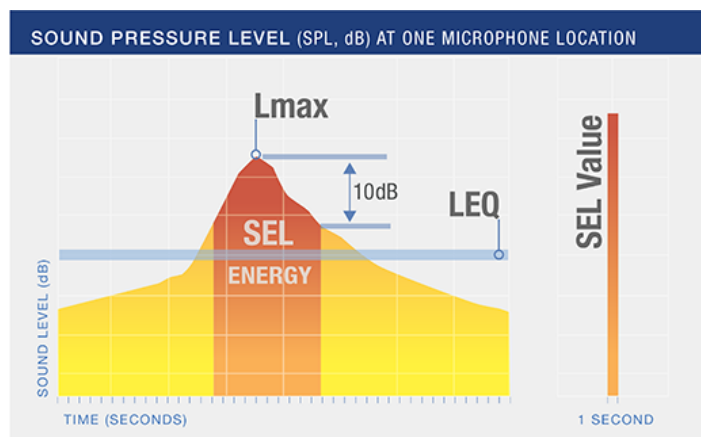
Metriche del rumore

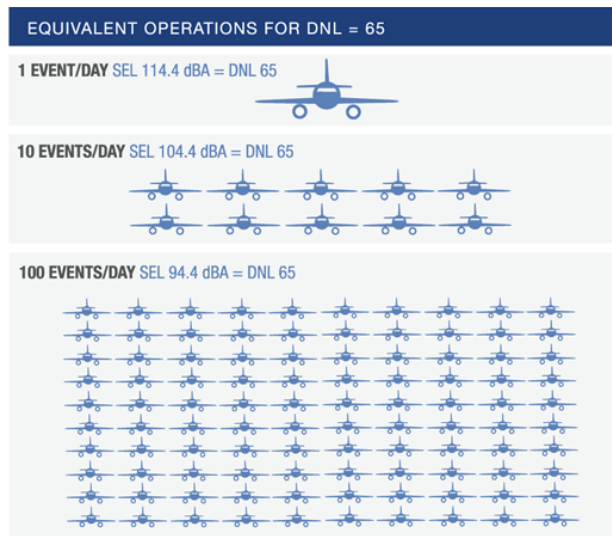
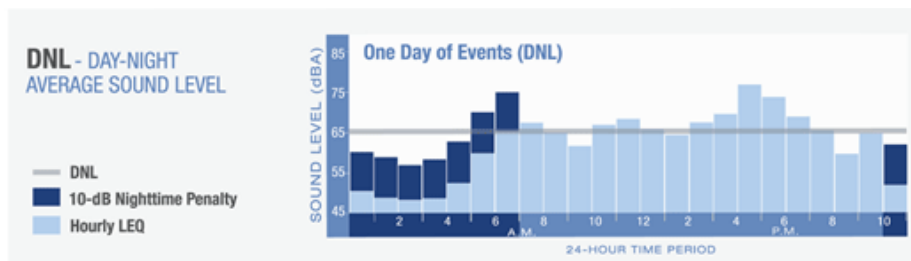
La metrica del “livello di esposizione sonora” (SEL) rappresenta tutta l’energia acustica (ovvero la pressione sonora) di un singolo evento di rumore come se quell’evento si fosse verificato entro un periodo di tempo pari ad un secondo, “comprimendo” di conseguenza tutta l’energia del rumore. SEL cattura quindi sia il livello che la durata di un evento sonoro in un’unica quantità numerica. Ciò fornisce un modo uniforme per effettuare confronti tra eventi di rumore di durate diverse.

La metrica del “livello sonoro equivalente” (L_{eq}) misura l’energia acustica media in un periodo di tempo per tener conto dell’effetto cumulativo di più eventi di rumore. Esso potrebbe quindi, ad esempio, fornire una misura del suono aggregato in un luogo che ha sorvoli di aeromobili durante il giorno. L_{eq} è definito anche come il livello di suono continuo in un dato periodo di tempo che fornirebbe la stessa quantità di energia dell’effettiva esposizione al suono variabile. Talvolta viene specificata la sua durata (ad es. $L_{eq,24h}$ se la media è su un’intera giornata oppure $L_{eq,16h}$ se la media è su 16 ore, ecc).

Infine, la metrica del “livello sonoro medio giorno-notte” (DNL) viene utilizzata per riflettere l’esposizione cumulativa al suono di una persona in un periodo di 24 ore, espressa come livello di rumore per il giorno medio dell’anno sulla base delle operazioni annuali dell’aeromobile. Un intero anno di voli viene quindi esaminato utilizzando sofisticati programmi di modellazione del rumore aereo dove il peso, la traiettoria di volo e molte altre caratteristiche di ogni aeromobile vengono inseriti nel programma. Poiché DNL tiene conto sia della quantità di rumore di ciascuna operazione del velivolo, sia del numero totale di operazioni che si registrano durante il giorno, un numero ridotto di operazioni relativamente rumorose può comportare lo stesso valore di un numero elevato di operazioni relativamente silenziose. DNL è una variante di L_{eq} che, per tener conto della maggiore sensibilità all’esposizione al rumore durante alcune parti della giornata, include una ponderazione di 10 dBA (equivalente a ciascun evento notturno misurato come se si fossero verificati dieci eventi diurni) per gli eventi di rumore che si verificano di notte (23:00-06:00) ed una ponderazione di 5 dBA per gli eventi durante i periodi serali (19:00-23:00).

Queste metriche sono tutte basate su livelli di rumore ponderati A (dBA).





L_{VA} (Livello di Valutazione del rumore Aeroportuale)

In Italia, il descrittore acustico individuato dal legislatore per la determinazione del livello di rumore aeroportuale è il cosiddetto L_{VA} (Livello di Valutazione del rumore Aeroportuale), per il calcolo del quale è necessario eseguire rilevazioni acustiche per almeno un anno. Quindi, la sua determinazione richiede una complessa e lunga procedura di calcolo tale per cui, purtroppo, diventa spesso non immediato eseguire la verifica del rispetto dei limiti imposti agli aeroporti derivanti dalle regolamentazioni vigenti. Inoltre, l'indicatore L_{VA} perde di significato man mano che ci si allontana dall'aeroporto e può assumere anche valore nullo laddove il livello di rumore di fondo mascheri gli eventi aeronautici. È doveroso sottolineare, infine, che si somma un importante inconveniente visto che, essendo l'indice L_{VA} un parametro mediato nel lungo periodo e relativo alla sommatoria di tutti gli eventi di origine aeronautica, non risulta idoneo per la determinazione delle violazioni delle procedure antirumore dei singoli velivoli, prevista dal D.P.R. 496/1997.

Il D.M. 31-10-1997, "Metodologia di misura del rumore aeroportuale", definisce i criteri di misura del rumore emesso dagli aeromobili nelle attività aeroportuali, fissa l'indice di riferimento (L_{VA}) ed individua le aree di rispetto intorno agli aeroporti. Definisce inoltre i periodi di riferimento diurno e notturno (compresi rispettivamente tra le 06:00 e le 23:00 e tra le 23:00 e le 06:00).

Il Livello di Valutazione del rumore Aeroportuale (L_{VA}) è definito dalla seguente espressione, dove N è il numero di giorni del periodo di osservazione del fenomeno e L_{VAj} è il valore giornaliero del livello di valutazione del rumore aeroportuale:

$$L_{VA} = 10 * \text{Log} \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{\frac{L_{VAj}}{10}} \right] \text{ dB}(A)$$

Il decreto stabilisce che il numero di giorni N del periodo di osservazione del fenomeno deve essere pari a 21, che corrispondono a tre settimane nel corso dell'anno, ciascuna delle quali scelta nell'ambito dei seguenti tre periodi: tra il 1° ottobre e il 31 gennaio; tra il 1° febbraio e il 31 maggio; tra il 1° giugno e il 30 settembre.

In particolare, la settimana di osservazione selezionata all'interno di ogni periodo deve essere quella a maggior numero di movimenti e durante ciascuna di esse la misura del rumore deve essere effettuata di continuo nel tempo.

Il valore giornaliero del livello di valutazione del rumore aeroportuale (L_{VAj}) si determina mediante la relazione sotto indicata, dove L_{VAd} e L_{VAN} rappresentano, rispettivamente, il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo diurno (06:00-23:00) ed in quello notturno (23:00-06:00). Per il calcolo dell' L_{VAj} devono essere considerate, quindi, tutte le operazioni a terra e di sorvolo che si manifestano nell'arco dell'intera giornata, comprese tra le 00:00 e le 24:00:

$$L_{VAj} = 10 * \left[\frac{17}{24} 10^{\frac{L_{VAd}}{10}} + \frac{7}{24} 10^{\frac{L_{VAN}}{10}} \right] dB (A)$$

Il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo diurno (L_{VAd}) è determinato dalla seguente relazione, in cui T_d è la durata in secondi del periodo diurno (61200 sec), N_d è il numero totale di movimenti degli aeromobili nel suddetto periodo, SEL_i è il livello dell'i-esimo evento sonoro associato al singolo movimento:

$$L_{VAd} = 10 * \text{Log} \left[\frac{1}{T_d} \sum_{j=1}^{N_d} 10^{\frac{SEL_i}{10}} \right] dB(A)$$

Il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo notturno (L_{VAN}) è determinato dalla seguente relazione, in cui T_N è la durata in secondi del periodo notturno (25200 sec), N_N è il numero totale di movimenti degli aeromobili nel suddetto periodo, SEL_i è il livello dell'i-esimo evento sonoro associato al singolo movimento:

$$L_{VAN} = 10 * \left[10 * \text{Log} \left(\frac{1}{T_N} \sum_{i=1}^{N_N} 10^{\frac{SEL_i}{10}} \right) + 10 \right] dB(A)$$

Il livello sonoro dell'i-esimo evento associato al singolo movimento di un aeromobile (SEL_i) è pari alla seguente relazione:

$$SEL_i = 10 * \left[\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_{Ai(t)}^2}{P_0^2} dt \right] = \left(L_{AeqTi} + 10 * \text{Log} \frac{T_i}{T_0} \right) dB (A)$$

in cui:

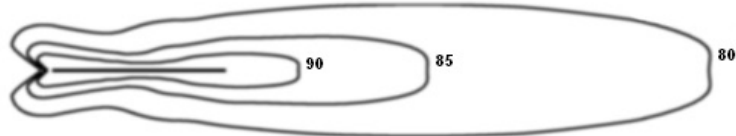
- T_0 è il tempo di riferimento, pari a 1 s;
- t_1 e t_2 rappresentano gli istanti iniziale e finale della misura, cioè la durata dell'evento $T_i = (t_2 - t_1)$ in cui il livello L_A risulta superiore alla soglia $L_{AFmax} - 10$ dBA;
- $P_{Ai}(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata A dell'evento i-esimo;
- P_0 rappresenta la pressione sonora di riferimento, pari a 20 μ Pa;
- L_{AeqTi} è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A dell'i-esimo evento sonoro;

- L_{AFmax} è il livello massimo della pressione sonora ponderata A, con la costante di tempo “Fast”, collegato all’evento.

Tipi di rumore

Essi possono essere suddivisi in:

- rumore continuo, che viene misurato dal “livello sonoro equivalente” (L_{eq});
- rumore forte occasionale, che viene misurato dal “livello di esposizione sonora” (SEL). A riguardo, si possono costruire le cosiddette “impronte SEL”, dove ognuna di esse mostra l’area geografica in cui un particolare SEL è raggiunto da un singolo evento di rumore (ad es. un aereo in decollo). Di seguito è riportato un esempio di impronta SEL:



- rumore dell’elicottero: esso è molto più complesso da misurare e valutare rispetto al rumore degli aerei. Infatti gli elicotteri non devono seguire rotte predefinite, possono volare/planare su un’area specifica (aumentando l’impatto del rumore in quella posizione) e creare una distribuzione asimmetrica del rumore a causa delle variazioni di velocità delle pale del rotore.

6. Rumore dell'aeromobile

Generalità

Il livello di rumore degli aerei può variare enormemente a seconda di diversi fattori:

- 1) Quale aeromodello e che tipo di motori vengono utilizzati per il volo?
- 2) Quanto sono alti gli aerei dal suolo?
- 3) Qual'è la traiettoria di volo? Gli aerei sono direttamente "sopra la testa" o sono spostati lateralmente dal ricevitore (in qualsiasi direzione)?
- 4) Gli aerei sono in arrivo o in partenza?

Il rumore percepito a terra dipende anche dagli orari dei voli ed, in particolare, dalle condizioni meteorologiche, poiché il suono si attenua/si dissipa in modo diverso a seconda di esse (velocità e direzione del vento, temperatura, ecc).

Tra le diverse fasi della movimentazione aerea che producono rumore nell'intorno di un aeroporto, le più importanti sono quelle di atterraggio e di decollo poiché incidono in particolare sull'area circostante l'aerostazione.

L'operazione più rumorosa è rappresentata dal *decollo*, durante il quale viene impiegata la massima potenza dei propulsori. In questa fase viene mantenuta normalmente una traiettoria in asse con la pista, fino a quando l'aeromobile, raggiunta una determinata quota, può iniziare la manovra di allineamento all'aerovia assegnata.

L'*atterraggio*, generalmente caratterizzato da una minore rumorosità rispetto al decollo, avviene anch'esso con una traiettoria in asse con la pista. Gli aeromobili in atterraggio, a partire da un punto prestabilito, possono percorrere rotte ben collimate se assistiti dall'ILS (Instrumental Landing System), provocando una concentrazione di eventi sonori in una fascia stretta e allungata lungo il sentiero di avvicinamento. Ciò può avere sia vantaggi che svantaggi: da una parte potrebbe portare ad una diminuzione del numero di persone sorvolate rispetto ad un approccio più disperso, dall'altra tende però a concentrare molti più voli sulle comunità che vivono direttamente al di sotto della traiettoria di volo.

Per quanto riguarda, invece, la *fase di frenata* dell'aeromobile sulla pista, essa comporta una manovra di "reverse" che consiste nell'uso del propulsore per contribuire all'arresto. Tale operazione viene effettuata in modo più o meno intenso (a seconda della lunghezza della pista e del peso dell'aeromobile) e il rumore causato incide esclusivamente sulle zone limitrofe all'area di atterraggio.

Analogo effetto, sebbene di minore intensità, viene prodotto dai movimenti degli aerei sui corridoi di parcheggio e nelle operazioni di prova motori condotte dopo gli interventi di manutenzione in un'area ben definita dello scalo.

L'aereo produce una tipologia di emissione sonora molto diversa dalle altre sorgenti acustiche, a causa del fatto che il rumore generato da un aeromobile è dovuto ad un grandissimo numero di fonti, aventi ciascuna ampiezza e frequenza distribuite casualmente: ad esempio, le superfici aerodinamiche (correlate alle turbolenze e all'attrito viscoso) e i motori di un aereo a reazione sono emettitori estesi di onde acustiche.

Si può immaginare ogni punto della superficie dell'aereo come una sorgente puntuale di onde sferiche, dotata di un'intensità proporzionale alla "rumorosità" del piccolo elemento di superficie a cui è associata la sorgente puntuale idealizzata. Il rumore che un osservatore esterno percepisce è l'involuppo delle onde generate dal complesso di sorgenti puntuali in cui è stata idealmente suddivisa la superficie dell'aereo, cioè una somma in cui si tiene conto anche dello sfasamento tra le onde acustiche che arrivano all'orecchio

dell'osservatore percorrendo distanze diverse o che sono partite dalle varie sorgenti con fasi differenti. La difficoltà nella schematizzazione aumenta dal momento che ogni aeromobile è caratterizzato da una fisionomia acustica propria che dipende da diversi fattori (tipo di velivolo, tipo di motorizzazione, ecc). Una volta conosciute le caratteristiche acustiche delle varie sorgenti e le traiettorie percorse da queste, è possibile stabilire il campo acustico relativo ad un singolo evento/operazione. In tal modo, il rumore generato da un evento aeronautico diventa idealmente schematizzabile e si può considerare il velivolo come un'unica sorgente di rumore puntiforme che si muove lungo una determinata traiettoria.

Sorgenti principali di rumore nei motori a reazione

Il problema del rumore di origine aeronautica ha iniziato a diventare evidente da quando hanno fatto la loro comparsa i *motori a reazione*. Il propulsore ne rappresenta la fonte principale, pur non costituendo l'unica sorgente di rumore: infatti vi è pure il rumore aerodinamico, definito anche "rumore della struttura dell'aereo", che viene prodotto dal flusso dell'aria sulla fusoliera, dalle sue cavità, dalle superfici di controllo, dai carrelli d'atterraggio, ecc. Quest'ultimo rappresenta un contributo significativo all'interno dell'aereo stesso, mentre può diventare di entità trascurabile (rispetto al rumore dei motori) sul territorio localizzato in prossimità dell'aeroporto.

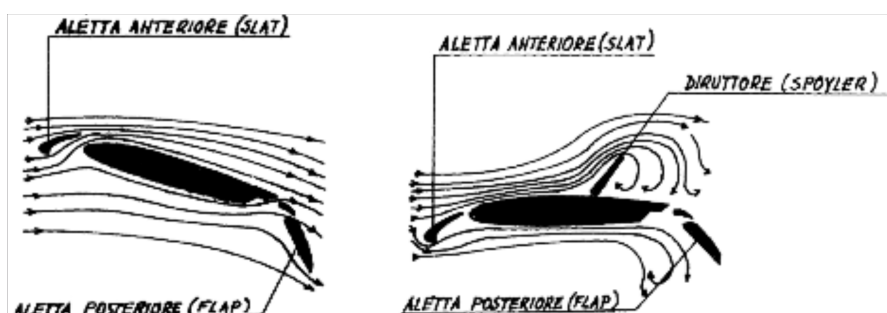
Il rumore aeronautico dovuto al sistema di propulsione può essere suddiviso in tre diverse tipologie, a seconda della sua produzione: quello generato dall'aria che entra nel motore, quello prodotto dalle vibrazioni della struttura del motore e quello dovuto all'alta velocità dei gas di scarico, chiamato anche "rumore aerodinamico del getto".

Nel caso di aerei con motore di tipo "turbo-jet", il rumore deriva in misura preponderante dall'ultima delle tre fonti; per quanto riguarda invece il motore di tipo "turbo-fan", il disturbo arrecato si riferisce essenzialmente alla struttura del motore, in particolare all'elica con compressore ed alla rotazione della turbina.

Il rumore presenta componenti predominanti alle alte frequenze nella fase di avvicinamento (dovute all'aria che entra nel motore) e componenti predominanti alle basse frequenze nella fase di allontanamento (dovute allo scappamento dei gas di scarico), dalle quali dipende anche la sua lunga persistenza nel tempo. Un "turbo-jet" che si muove verso l'osservatore produce inizialmente un rumore provocato dal compressore, mentre sulla verticale risulta decisiva l'incidenza del rumore dei gas di scarico. Analogamente, per un "turbo-fan" in fase di arrivo e sopra la verticale è predominante il rumore del fan, finché si inizia a sentire il rumore del getto dei gas di scarico che genera, però, un'emissione sonora più contenuta rispetto ad un "turbo-jet".

Il flusso dell'aria nelle varie superfici esterne di un aeromobile in volo dà luogo al cosiddetto "rumore aerodinamico di forma" che, in termini di impatto acustico sul territorio circostante, ha cominciato ad assumere importanza dagli inizi degli anni '70 con l'entrata in servizio dei motori "turbo-fan" caratterizzati da un'emissione di rumore molto più contenuta. Il rumore aerodinamico di forma, detto anche "rumore delle sorgenti non propulsive", è dunque quello generato da sorgenti diverse dal sistema di propulsione e da altri accessori meccanici. Esso proviene dal flusso dell'aria sulle superfici della fusoliera, delle ali, del timone, sulle superfici dei sistemi di ipersostentamento, dei carrelli di atterraggio e delle cavità per il loro alloggiamento. Il rumore aerodinamico di forma diventa significativo durante l'avvicinamento alla pista per l'atterraggio, poiché in tale fase i motori di propulsione operano ad una potenza ridotta pari a circa il 25-30% della massima disponibile; in tali condizioni operative il rumore aerodinamico può al massimo eguagliare il rumore prodotto da una delle molte sorgenti individuali di un motore di propulsione.

Le cause maggiori del rumore di forma sono comunque costituite dal temporaneo dispiegamento delle apparecchiature di incremento della portanza (indispensabili nell'operazione di atterraggio a causa della ridotta velocità dell'aeromobile) e dalla fuoriuscita dai loro alloggiamenti dei carrelli di atterraggio. Gli ipersostentatori agiscono mediante la modifica del profilo alare e sono costituiti da alette orientabili disposte sia anteriormente al bordo di attacco dell'ala (slats), sia posteriormente al bordo di uscita (flaps). Quest'ultimi agiscono anche come freni aerodinamici, ma quelli veri e propri, detti anche diruttori (spoilers), sono invece costituiti da piani che vengono fatti emergere dalla superficie alare superiore e che rompono il flusso regolare dell'aria con la formazione, a valle degli stessi, di vortici frenanti. Senza il dispiegamento delle suddette strutture mobili, cioè nella condizione di forma "pulita", il livello di rumore causato dalla turbolenza indotta dal solo flusso dell'aria su ali, fusoliera, motori e timone di direzione risulta circa 15 dBA più basso.



Storia sulle tipologie di aeromobili con motori a reazione / a getto

I velivoli in esercizio sono classificati acusticamente in base ai requisiti di certificazione adottati dall'ICAO definiti nell'annesso 16 - Environmental Protection, volume I:

- capitolo 1: appartiene a questa categoria la prima generazione di motori degli anni '50 e '60 ("turbogetto"), estremamente rumorosi e ritirati a partire dal 1990;
- capitolo 2: il motore di questa tipologia di aeromobili ("turbo-fan") è reso meno rumoroso e più efficiente rispetto al "turbogetto" grazie ad una tecnologia di costruzione più avanzata;
- capitolo 3: i moderni motori meno rumorosi e meno inquinanti grazie ad un maggior utilizzo di materiale fonoassorbente e all'impiego di più turbine;
- capitolo 4: appartengono a questa categoria i motori più recenti in grado di rispettare il più restrittivo standard ICAO, entrato in vigore nel giugno 2001 per gli aerei prodotti a partire dal 2006.

Descrizione del motore a getto

Il motore a getto è un motore che trasforma l'energia chimica del combustibile in energia cinetica dei combustibili per sfruttare il principio di azione e reazione. Esso è costituito essenzialmente da una presa d'aria esterna, da cui l'aria viene convogliata in un compressore assiale a più stadi che la comprime. Una parte di essa entra nella camera di combustione combinandosi con il combustibile, la rimanente parte sfiora esternamente la camera di combustione, raffreddandola. I gas di combustione così miscelati entrano quindi nella turbina ed espandendosi (parzialmente) producono il lavoro necessario ad azionare il compressore con il quale la turbina è collegata coassialmente. All'uscita dalla turbina, nell'ugello di scarico, i gas completano la loro espansione uscendo a velocità elevata e costituendo appunto il "getto". Alla forza che fa uscire i gas dall'ugello corrisponde una

reazione uguale e contraria che spinge il motore in senso opposto a quello dei gas. Essa è detta “spinta S” ed è data dalla relazione seguente:

$S = m \cdot (U - V)$ dove:

m = flusso massico dei gas [kg/s];

U = velocità di uscita dei gas dall’ugello di scarico;

V = velocità del velivolo;

$(U - V)$ = velocità relativa dei gas rispetto all’ambiente esterno.

Da quanto sopra, emerge che tutto il lavoro prodotto dalla turbina viene assorbito dal compressore, con un bilancio energetico chiuso su se stesso; pertanto il moto viene impresso al velivolo dal getto dei gas di scarico. Il lavoro utile ottenuto è quindi uguale all’energia posseduta dal fluido all’uscita dall’ugello diminuita dell’energia cinetica all’entrata, detratte ovviamente le varie perdite termodinamiche e meccaniche. Il lavoro propulsivo è invece dato dal prodotto della spinta per la velocità del velivolo. Il *rendimento propulsivo*, rapporto fra lavoro propulsivo e lavoro utile, risulta quindi dato dalla relazione seguente:

$$\eta_p = L_{\text{propulsivo}} / L_{\text{utile}} = 2 / (1 + U/V)$$

Esso risulta tanto maggiore quanto più la velocità del flusso massico si avvicina alla velocità del velivolo. Dato che la velocità di volo V dei velivoli commerciali è molto inferiore alla velocità U di uscita dei gas del getto, il rendimento propulsivo η_p (per la configurazione di motore sopra descritta) rimane molto basso.

Per aumentarlo è necessario diminuire U , ma per ottenere ciò senza diminuire la spinta S è necessario aumentare m , in modo da compensare la diminuzione della differenza $(U - V)$ a parità di velocità del velivolo. Questo ha suggerito l’evoluzione dei motori a reazione portando alla definizione dei motori a doppio flusso (vedere successivamente).

Le sorgenti principali di rumore nel motore a getto sono due:

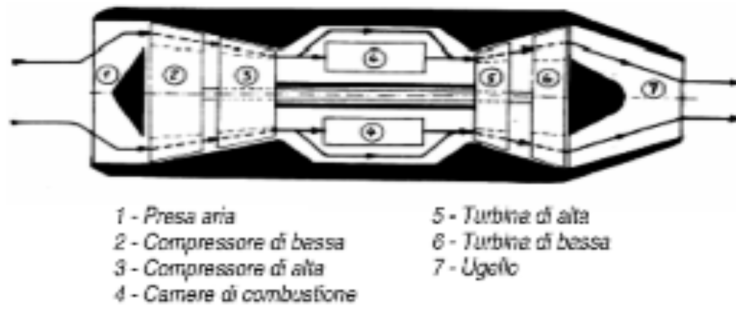
- il getto dei gas che fuoriesce dal sistema;
- le palette dei compressori, delle turbine e dei fan che si muovono in moto rotatorio entro il flusso dei gas.

Nel getto si formano due zone: una detta della “corrente potenziale” di flusso non turbolento, l’altra della “corrente sviluppata” o “di mixing” che circonda la prima. In quest’ultima si verifica la miscelazione turbolenta del getto con il fluido ambiente; essa si estende a valle dell’ugello per circa 15 volte il diametro dello stesso e rappresenta la componente maggiore del rumore del getto.

Nel moto rotatorio delle palette dei vari rotori (compressori, turbine e fan) si verificano delle interazioni delle palette con il flusso di gas turbolento che le attraversa e con le scie delle alette, dando luogo ad un ulteriore tipo di sorgente sonora. La componente più importante di questa sorgente è generata dalla distribuzione fluttuante della pressione sulla superficie delle palette, dovuta principalmente all’instabilità degli effetti aerodinamici, ma anche alla rotazione stessa delle palette che si traduce in una loro pulsazione rispetto ad un osservatore fisso.

1) Il turbogetto puro

Alla fine degli anni ‘50 il primo tipo di motore a reazione introdotto sui grandi velivoli da trasporto commerciale fu il “turbogetto puro”. Lo schema funzionale di quest’ultimo era quello rappresentato nella figura seguente:



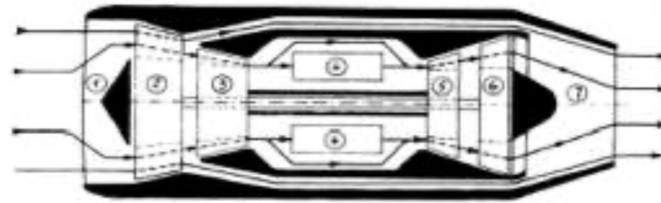
Compressore e turbina erano generalmente suddivisi in due parti (alta e bassa pressione): il compressore di bassa era accoppiato con la turbina di bassa, mentre il compressore di alta con la turbina di alta. In questo motore, tutto il volume d'aria aspirato prendeva parte al ciclo termodinamico e la spinta veniva fornita unicamente dal getto. Il rumore del getto era però quello predominante, diffondendosi posteriormente entro un angolo di 30°-40° rispetto all'asse. Le sorgenti di rumore della palettatura erano invece costituite dalle turbine di alta e bassa pressione e dal compressore di bassa pressione. Vi era infine il rumore meccanico e fluidodinamico generato internamente al motore che emergeva dalla cassa dello stesso e si diffondeva principalmente nelle direzioni a 90° rispetto all'asse; quest'ultima emissione sonora era almeno 20 dBA inferiore rispetto alle altre precedentemente descritte, per cui poteva essere trascurata.

Via via che la spinta del motore veniva aumentata, i livelli di rumore del compressore e della turbina aumentavano. Il rumore del getto, che era trascurabile alle spinte ridotte, alle spinte prossime al massimo diveniva predominante rispetto agli altri (a partire dal 50% della spinta massima). Il rumore del compressore, invece, era di gran lunga superato dal rumore del getto alla spinta massima e leggermente superato dal rumore della turbina alle spinte ridotte. Quest'ultimo diventava pertanto significativo alla frazione di spinta usata per l'atterraggio (35-50%).

Sono state studiate varie soluzioni per ridurre il rumore del getto in questo tipo di motore, attraverso l'applicazione di dispositivi insonorizzanti. Una di esse era rappresentata dall'applicazione di una prolunga a lobi sull'ugello di efflusso e di strati fonoassorbenti al condotto d'aspirazione: l'attenuazione ottenibile con tali dispositivi variava da 2-3 dBA alle spinte ridotte fino a 10 dBA alle spinte massime. Esse comportavano sempre, però, una penalizzazione delle prestazioni del motore.

2) *Il turbo-fan a basso rapporto di bypass*

Una drastica riduzione della rumorosità del getto si ebbe con i motori della seconda generazione dotati di "doppio flusso". In questi motori, l'aria aspirata era in peso molto maggiore rispetto ad un motore a flusso singolo; questa massa d'aria veniva accelerata soltanto da una ventola ("fan") che si trovava a monte del compressore, e si divideva in due flussi: una parte entrava nel compressore e, dopo la combustione, in turbina ed usciva dall'ugello; l'altra parte non entrava né nel compressore né nella turbina, ma si riuniva alla prima parte quando questa usciva dall'ugello, abbassando la velocità di efflusso e contribuendo alla generazione della spinta. Il rapporto tra il quantitativo d'aria che non partecipava al ciclo termodinamico e quello che vi partecipava veniva detto "rapporto di bypass" o "rapporto di diluizione". Il motore "a doppio flusso" o "turbo-fan" poteva realizzare, pertanto, la stessa spinta di un turbogetto puro ma con un maggiore flusso massico ed una minore velocità del getto, incrementando il rendimento propulsivo e quindi l'efficienza del motore con un conseguente contenimento dei consumi. Lo schema di tale motore era il seguente:



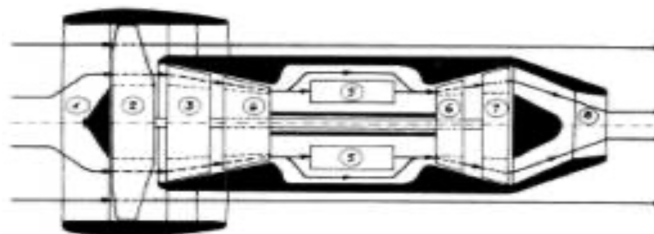
- | | |
|--------------------------------|----------------------|
| 1 - Presa aria | 5 - Turbine di bassa |
| 2 - Fan e compressore di bassa | 6 - Turbine di alta |
| 3 - Compressore di alta | 7 - Ugello |
| 4 - Camera di combustione | |

Aumentando però il rapporto di bypass, si continuava con la tendenza alla riduzione del rumore del getto ma allo stesso tempo si manifestava una predisposizione all'incremento del rumore del fan. Ciò era dovuto al fatto che il maggior flusso massico veniva ottenuto aumentando la velocità delle palette del fan. Il rumore generato dalla palettatura del fan si propagava, attraverso l'aria che fluiva nel sistema, sia verso la parte anteriore che verso la parte posteriore del motore. Quindi l'aumento del rapporto di diluizione oltre valori intorno a 1, non portava ad alcun vantaggio nel contenimento del rumore.

A fronte di una richiesta di motori con una spinta sempre maggiore (e quindi di più elevati rapporti di bypass), questa conclusione risultò a suo tempo molto limitativa e priva di soluzioni, se non ricorrendo ad una concezione del motore totalmente nuova.

3) Il turbo-fan ad alto rapporto di bypass

L'incremento del rumore del fan all'aumentare del rapporto di bypass si verificava con motori che avevano fan multistadio e alette fisse all'ingresso, a causa del corrispondente incremento della velocità relativa del flusso nelle palettature del fan stesso. Aumentando però il rapporto di bypass (a cominciare da un rapporto di oltre 3.5), le prestazioni volute potevano essere realizzate con un solo stadio. Il ridotto incremento di pressione ottenibile con un solo stadio poteva infatti essere compensato, a partire dal suddetto valore del rapporto di bypass, con un maggior flusso massico. Riducendosi quindi ad un solo stadio e togliendo le alette fisse di ingresso si poteva ottenere una notevolissima riduzione del rumore emesso dal fan. Agli inizi degli anni '70 si pervenne perciò alla definizione di un nuovo tipo di motore: il "turbo-fan" ad alto rapporto di bypass con fan a singolo stadio di grande diametro (fino a 2.40 m), senza alette fisse all'ingresso e con alette fisse di uscita più distanti dalle palette rotanti, in modo da diminuire anche l'interazione con la scia di quest'ultime. Lo schema di tale motore era il seguente:



- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 - Presa aria | 5 - Camera di combustione |
| 2 - Fan | 6 - Turbina di bassa |
| 3 - Compressore di bassa | 7 - Turbina di alta |
| 4 - Compressore di alta | 8 - Ugello |

Questo motore, che rappresenta la terza generazione dei motori a reazione, era capace di erogare grandi spinte unitarie (fino a 250 kN), aveva consumi più ridotti a seguito della

minore velocità del flusso massico e del maggiore rendimento propulsivo ed era caratterizzato da un'emissione sonora di gran lunga più contenuta rispetto ai motori delle precedenti generazioni.

Cenni su un futuro prossimo

Tutte le principali fonti di rumore riguardano il rumore in prossimità degli aeroporti. In futuro, tuttavia, potrebbe essere necessario tener conto di un nuovo tipo di fonte di rumore che verrà udito mentre l'aereo è in volo. I produttori di aeromobili stanno infatti lavorando alla progettazione di velivoli civili supersonici che produrranno un rumore transitorio chiamato "boom sonico". Esso viene trascinato insieme all'aereo in modo analogo in cui una barca su un lago tira la sua scia attraverso l'acqua. E proprio come la scia della barca colpisce l'intera costa mentre attraversa il lago, il "boom sonico" di un aereo supersonico colpisce la superficie terrestre per l'intero viaggio. Poiché si prevede che gli aerei supersonici civili voleranno ad altitudini superiori a 15 km, il rumore del "boom sonico" potrebbe essere udito all'interno di un corridoio a terra avente una larghezza forse di 100 km. Fortunatamente, questo rumore avrà molto probabilmente un livello di gran lunga più basso rispetto ai tradizionali velivoli, in virtù dei miglioramenti tecnologici.

Negli ultimi anni ci sono stati progressi sostanziali da parte dell'industria, del mondo accademico, dei laboratori governativi che sviluppano tecnologia aeronautica supersonica e delle autorità di regolamentazione che certificherebbero tali veicoli. Non è ancora chiaro, comunque, quando si diffonderanno questi nuovi velivoli supersonici, forse tra 20-30 anni.

7. Stazioni di monitoraggio

Il D.M. 20-05-1999 “Criteri per la progettazione dei sistemi di monitoraggio per il controllo dei livelli di inquinamento acustico in prossimità degli aeroporti nonché criteri per la classificazione degli aeroporti in relazione al livello di inquinamento acustico” definisce nel dettaglio le caratteristiche tecniche che deve possedere il sistema di monitoraggio del rumore aeroportuale, con particolare riferimento alla composizione del sistema stesso, alle caratteristiche e all’ubicazione delle stazioni di misura e alle informazioni necessarie al fine di caratterizzare acusticamente ogni singolo evento.

Ubicazione delle stazioni di monitoraggio

Esse devono essere situate nell’intorno aeroportuale, in corrispondenza della posizione più vicina alle proiezioni al suolo delle rotte di avvicinamento e allontanamento dei velivoli. La scelta del luogo deve essere preceduta da un’analisi del livello di rumore di origine aeronautica (L_{max}) e del livello residuo: la differenza fra di essi, nei 10 minuti di massimo rumore, deve essere >20 dBA. La scelta del posizionamento delle stazioni di monitoraggio è influenzata anche dal fatto che la valutazione del rumore dovuto agli aeromobili richiede che ciascun evento acustico di origine aeronautica venga riconosciuto e discriminato rispetto alle altre fonti di rumore: quindi, la scelta dovrebbe risultare il miglior compromesso tra l’esigenza di stimare al meglio il rumore aereo e le finalità alle quali è deputata la centralina stessa, ossia la misura dei livelli di rumore presso gli insediamenti abitativi sensibili e il controllo del rispetto delle procedure antirumore imposte agli aeromobili. Al fine di caratterizzare in maniera completa il singolo evento prodotto dall’attività aerea, alcune stazioni di monitoraggio possono essere posizionate secondo le normative internazionali dell’ICAO.

Struttura del sistema di monitoraggio

I sistemi di monitoraggio devono essere costituiti da:

- stazioni periferiche di rilevamento dei livelli sonori prodotti, idonee a monitorare l’intorno aeroportuale. Esse sono posizionate in punti strategici nelle vicinanze dell’aeroporto, spesso per valutare l’impatto acustico su quartieri selezionati o luoghi specifici particolarmente sensibili al rumore (come ospedali o scuole);
- stazioni microclimatiche, idonee a correlare gli eventi sonori con i dati meteo-climatici;
- apparecchiature di comunicazione;
- memoria del computer e centro di elaborazione dati che, utilizzando opportuni software, siano in grado di raccogliere ed elaborare i dati rilevati da ogni stazione al fine di ricavare i parametri necessari per i calcoli da svolgere. Essi dovranno, in particolare, eseguire in maniera automatica la correlazione tra i parametri di rumore (SEL_i) e i dati aeronautici del velivolo che li ha provocati, contenuti nei tracciati radar forniti dall’ENAV o dai sistemi informatici del gestore aeroportuale.

Ogni stazione di monitoraggio dovrà quindi rendere disponibili le seguenti informazioni:

- ubicazione della postazione di rilevamento;
- data e ora dell’evento;
- durata dell’evento;
- SEL dell’evento;
- L_{max} dell’evento.

La Civil Aviation Authority (CAA) dispone, ad esempio, di fonometri e analizzatori di livello sonoro per registrare i livelli sonori in diversi punti durante il decollo di un aereo. Le informazioni raccolte da questa apparecchiatura sono correlate ai dettagli dell'aeromobile e alla sua traiettoria di volo utilizzando un sistema di mantenimento della traccia del rumore detto "Noise and Track Keeping" (NTK). Ciò consente l'analisi per: tipo di aeromobile, posizione, altitudine, pista e persino condizioni meteorologiche.

8. Modellazione del rumore aeroportuale

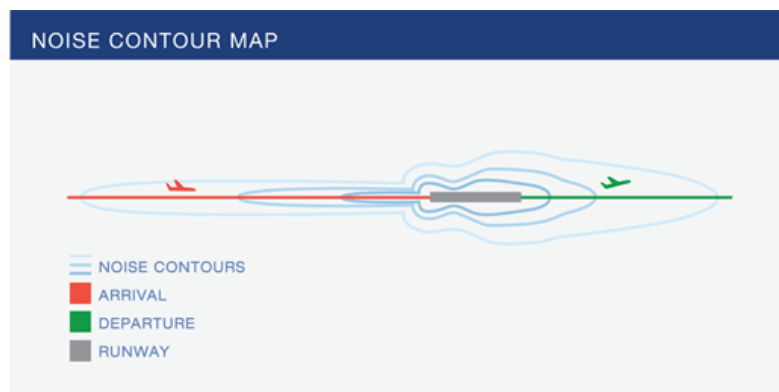
Mappe acustiche / Contorni del rumore

Uno degli strumenti utilizzati dagli aeroporti e dalle autorità di regolamentazione sono le mappe di livello sonoro, spesso chiamate semplicemente “mappe acustiche”.

Esse consentono di identificare quante persone vivono in aree in cui c'è un notevole disturbo da rumore: infatti, utilizzando una combinazione di misurazioni del livello sonoro ed un appropriato software di mappatura del suono, un aeroporto può stabilire i livelli di rumore e determinare, ad esempio, i luoghi in cui è necessaria la sua mitigazione.

Consentono inoltre ai pianificatori di considerare il rumore quando lavorano all'interno delle aree colpite, sebbene debbano comunque bilanciare anche fattori economici, ambientali e sociali quando prendono delle decisioni.

Osservando una mappa dell'aeroporto, si trovano delle linee che collegano punti dello stesso valore di decibel (dBA). La forma delle curve di livello del rumore dipende da molti fattori come, ad esempio, il fatto che più aerei in arrivo o in partenza stiano sorvolando una determinata area. I livelli sonori più elevati si verificano comunque, in genere, lungo le piste di decollo e atterraggio degli aeromobili e immediatamente vicino ad esse.



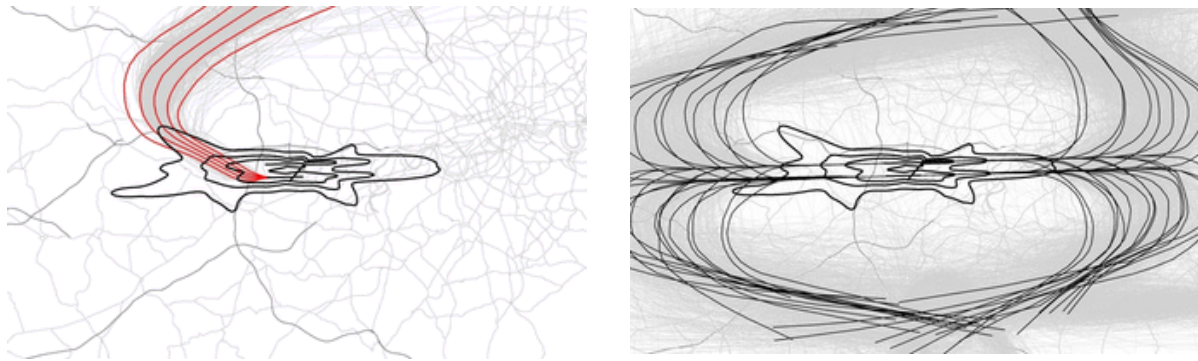
Modellazione ANCON

Il dipartimento di ricerca e consulenza ambientale (ERCD) presso la CAA ha sviluppato il modello di profilo del rumore degli aerei civili del Regno Unito ANCON. Esso calcola i profili dai dati di movimento, rotta, generazione del rumore e propagazione del suono degli aerei. Viene utilizzato per generare i contorni annuali dell'esposizione al rumore per gli aeroporti di Heathrow, Gatwick e Stansted.

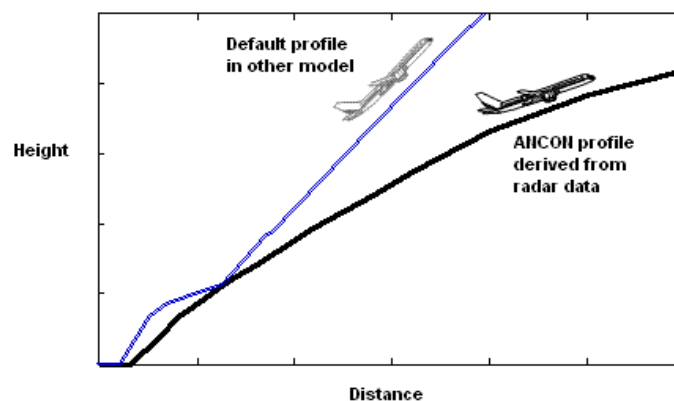
Analisi delle tracce e dei profili di volo dai dati radar

Vengono utilizzati ampi strumenti di analisi radar interni per generare tracce di volo medie (e le relative dispersioni laterali per ciascuna rotta) e profili di volo medi (di altezza, di velocità e di spinta) per diversi tipi di aeromobili. Dove possibile, si analizzano i dati radar aeroportuali locali per garantire il massimo grado di accuratezza della modellazione.

I diagrammi seguenti mostrano una rappresentazione tipica di una rotta di partenza/arrivo utilizzando tracce medie e disperse:



È importante determinare i profili di volo per le tipologie “dominanti” di aerei in un aeroporto utilizzando i dati radar locali, poiché essi possono differire in modo significativo dai profili “predefiniti” forniti in alcuni modelli di rumore. A riguardo, il diagramma seguente mostra la differenza tra il profilo dell’altezza di partenza media per il Boeing 767 misurato negli aeroporti di Londra e un profilo “predefinito” contenuto in un altro modello di rumore:



Verifica del database del rumore

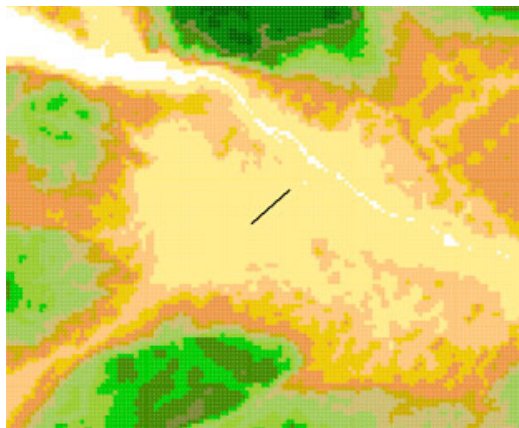
Il database del rumore di ANCON viene controllato e aggiornato su base annuale effettuando moltissime misurazioni negli aeroporti di Heathrow, Gatwick e Stansted. In particolare, la banca dati sul rumore contiene dati per specifiche combinazioni cellula/motore sotto forma di curve “rumore-potenza-distanza” (NPD), tale così da diventare applicabile a qualsiasi aeroporto.

Modellazione del terreno

L’ERCDC è in grado di includere gli effetti del terreno nel processo di modellazione del rumore. I dati del terreno vengono infatti utilizzati per apportare correzioni alla distanza tra la sorgente di rumore e la posizione del ricevitore a terra.

Questo perché il terreno può avere spesso un effetto significativo sulla forma e sulla dimensione dei contorni, specialmente se un aeroporto si trova in prossimità di colline o valli.

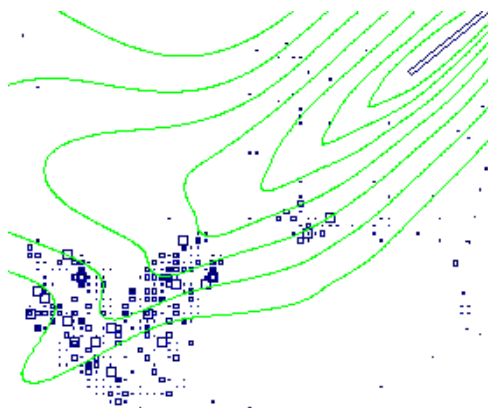
Il diagramma seguente illustra il terreno che circonda la pista di un aeroporto, codificato per colore in base all’altezza del suolo (le aree rialzate sono mostrate in verde):



Database della popolazione

È possibile stimare la popolazione e il numero di famiglie racchiuse in ciascun livello di contorno utilizzando il database della popolazione, che si basa sull'ultimo censimento del Regno Unito che viene aggiornato annualmente alla luce dei nuovi dati.

In particolare, i dati sulla popolazione e sulle famiglie fanno riferimento ai singoli codici postali (mostrati come punti quadrati nel diagramma sottostante):



Database degli edifici sensibili al rumore

Utilizzando il database “punti di interesse”, si è anche in grado di determinare il numero di edifici sensibili al rumore (come, ad esempio, scuole e ospedali) all'interno di una particolare curva di rumore.

Integrated Noise Model (INM)

L'INM era un modello computerizzato sviluppato sulla base di un algoritmo che utilizzava i dati “rumore-potenza-distanza” (NPD) e che valutava l'impatto del rumore degli aerei nelle vicinanze degli aeroporti. L'INM poteva emettere curve di livello del rumore per un'area in posizioni preselezionate e l'uscita del rumore poteva essere basata sull'esposizione, sul livello massimo o sul tempo.

Per cosa era stato progettato l'INM?

Negli Stati Uniti, l'INM era il modello preferito per la pianificazione della compatibilità acustica, per le valutazioni ambientali e per le dichiarazioni di impatto ambientale.

L'INM aveva anche molti usi analitici, come ad esempio:

- valutazione dell'attuale impatto acustico degli aerei attorno ad un determinato aeroporto;
- valutazione dei cambiamenti nell'impatto acustico derivanti da nuove piste o loro diverse possibili configurazioni;
- valutazione dei cambiamenti nell'impatto acustico derivanti dalla nuova domanda di traffico;
- valutazione dell'impatto acustico delle nuove procedure operative;
- valutazione dell'impatto acustico delle operazioni degli aerei all'interno e attorno ai parchi nazionali.

L'Integrated Noise Model (INM) è stato sostituito dall'Aviation Environmental Design Tool (AEDT) a partire dal maggio 2015.

Aviation Environmental Design Tool (AEDT)

Utilizzando i dati relativi al calcolo del rumore aeroportuale, i programmi di modellazione del rumore come l'Aviation Environmental Design Tool (AEDT) della Federal Aviation Administration (FAA) possono determinare l'esposizione cumulativa al rumore per un periodo medio di 24 ore nel corso dell'anno in qualsiasi luogo di una comunità aeroportuale. L'AEDT è un software che modella le prestazioni dei velivoli nello spazio e nel tempo per stimare il consumo di carburante, le emissioni, il rumore e le conseguenze sulla qualità dell'aria. Esso facilita le attività di revisione ambientale richieste dal National Environmental Policy Act (NEPA), consolidando la modellazione di questi impatti ambientali in un unico strumento. Il NEPA richiede infatti alle agenzie federali di considerare l'impatto delle azioni proposte sull'ambiente e di preparare una dichiarazione di impatto ambientale (EIS) qualora un'azione federale proposta abbia un impatto significativo sull'ambiente. L'AEDT è progettato per modellare studi individuali che vanno dal singolo volo in un aeroporto a scenari di livello regionale, nazionale e globale.

9. Problemi sull'essere umano causati dal rumore aeroportuale e loro soluzioni

Il rumore degli aerei è un problema di salute pubblica: infatti esso può avere un impatto sulla memoria e sull'apprendimento dei bambini, disturbare il sonno e causare gravi problemi di salute a lungo termine, comprese le malattie cardiovascolari (CVD). Inoltre può avere anche impatti sulla salute mentale, legati all'aumento di ansia e stress.

Disturbi sulla memoria e sull'apprendimento dei bambini

Recenti revisioni del modo in cui il rumore degli aerei influisce sull'apprendimento dei bambini hanno concluso che l'esposizione al rumore degli aerei a scuola o a casa è associata a bambini che hanno minori capacità di lettura e memoria, essenzialmente perché ne interrompe la concentrazione. C'è anche una crescente base di prove che suggerisce che essi a scuola abbiano prestazioni inferiori rispetto a quelli che non ne sono esposti.

Degli studi hanno dimostrato che gli interventi atti a ridurre l'esposizione al rumore degli aerei a scuola migliorano i risultati di apprendimento dei bambini: ad esempio, l'effetto del rumore degli aerei è scomparso una volta installato l'isolamento acustico nella scuola.

Questo perché gli effetti sulle prestazioni cognitive possono essere reversibili se il rumore cessa ed inoltre occorrono un paio d'anni prima che si sviluppino menomazioni.

Il rumore degli aerei, come detto, può influenzare direttamente lo sviluppo di abilità cognitive (lettura e memoria), ma ci possono essere anche degli effetti che vengono spiegati da: difficoltà di comunicazione, frustrazione dell'allievo e dell'insegnante, morale ed attenzione ridotti.

Le linee guida comunitarie sul rumore dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) suggeriscono che il "livello di esposizione sonora" (SEL) nelle aule scolastiche non dovrebbe superare i 35 dBA L_{eq} durante le sessioni di insegnamento. Esse indicano inoltre che nei parchi giochi all'aperto della scuola non si dovrebbero superare i 55 dBA L_{eq} durante il periodo di ricreazione. Anche l'American National Standards Institute (ANSI) suggerisce che il rumore di fondo interno per le aule non occupate dovrebbe essere 35 dBA L_{eq} . Va notato, però, che per le linee guida ANSI il limite vale per le aule non occupate, mentre per le linee guida dell'OMS per quelle occupate.

Disturbi sul sonno delle persone

Il sonno è un imperativo biologico ed un processo molto attivo che serve a diverse funzioni vitali. Un sonno indisturbato di durata sufficiente è essenziale per la vigilanza e le prestazioni diurne, per la qualità della vita e per la salute. Il sonno disturbato o ridotto è invece associato ad esiti negativi per la salute (come l'obesità, il diabete e l'ipertensione).

Per questi motivi, il disturbo del sonno indotto dal rumore è considerato l'effetto non uditivo più deleterio. Gli esseri umani percepiscono, valutano e reagiscono ai suoni ambientali mentre dormono. Allo stesso SEL, è più probabile che eventi di rumore significativi o potenzialmente dannosi causino risvegli del sonno, rispetto ad eventi meno significativi.

Poiché il rumore degli aerei è un rumore intermittente, i suoi effetti sul sonno sono determinati principalmente dal numero e dalle proprietà acustiche (ad es. SEL massimo) dei singoli eventi di rumore. Degli studi hanno scoperto che $SEL > 90$ dBA porta generalmente a disturbi del sonno. Tuttavia, se il rumore disturberà o meno il sonno dipende anche dai moderatori situazionali (ad es. profondità del sonno) e individuali (ad es. sensibilità al rumore). Infatti la sensibilità all'esposizione al rumore notturno varia considerevolmente da

individuo a individuo: in particolare gli anziani, i bambini e i malati sono considerati più a rischio di disturbi del sonno indotti dal rumore. I risvegli ripetuti causati dal rumore compromettono la qualità del sonno attraverso cambiamenti nella sua struttura tra cui l'insorgenza ritardata e i risvegli precoci, il sonno meno profondo e il maggior tempo trascorso svegli e nelle fasi di sonno superficiale. Gli effetti a breve termine dei disturbi del sonno indotti dal rumore includono: disturbi sull'umore del giorno successivo, aumento soggettivo e oggettivo della sonnolenza diurna e prestazioni cognitive compromesse. Si ipotizza inoltre che, se le persone sono esposte a livelli di rumore rilevanti per mesi e/o anni, i disturbi del sonno indotti dal rumore contribuiscano all'aumento del rischio di malattie cardiovascolari (CVD), che comprendono tutte le malattie del cuore e della circolazione (comprese le malattie coronariche, l'infarto e l'ictus).

Le "funzioni esposizione-risposta" che mettono in relazione un indicatore di rumore (ad es. SEL massimo) ad un risultato del sonno (ad es. probabilità di risveglio) sono tipicamente "a forma di S" e mostrano effetti monotonamente crescenti; esse possono essere utilizzate per le valutazioni dell'impatto sulla salute e per informare il processo decisionale politico. I soggetti esposti al rumore in genere si abituano, quindi le "funzioni esposizione-risposta" derivate da soggetti che sono stati esposti al rumore per molti anni sono molto più superficiali di quelle derivate in contesti di laboratorio non familiari. Poiché le "funzioni esposizione-risposta" sono in genere prive di un aumento improvviso chiaramente distinguibile dei disturbi del sonno ad un dato livello di rumore, la definizione dei valori limite non è semplice e rimane una decisione politica che soppesa le conseguenze negative del rumore degli aerei sul sonno con i benefici sociali del traffico aereo.

Mitigare gli effetti del rumore degli aerei sul sonno è un approccio a tre livelli:

- la riduzione del rumore alla fonte ha la massima priorità: tuttavia, poiché ci vorrà molto tempo prima che nuovi aeromobili con emissioni acustiche ridotte subentrino nel mercato (e quindi non si risolverà il problema nel prossimo futuro), sono necessarie ulteriori misure più immediate;
- le procedure di decollo e atterraggio per la riduzione del rumore possono essere implementate più facilmente durante le ore notturne a basso traffico, mentre la pianificazione territoriale può essere utilizzata per ridurre il numero di soggetti esposti in modo rilevante;
- l'isolamento acustico passivo (inclusa la ventilazione) rappresenta una misura di mitigazione che può essere efficace nel ridurre i disturbi del sonno dato che i soggetti trascorrono quasi sempre le notti in ambienti chiusi.

In alcuni aeroporti, infine, è stato imposto per regolamento il coprifuoco notturno: esso può essere molto efficace, ma è anche una misura drastica che, secondo l'approccio bilanciato dell'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO), dovrebbe essere attuato solo come ultima risorsa, allineando il periodo di coprifuoco con i modelli di sonno della popolazione (che variano a livello internazionale).

Altri impatti del rumore aeroportuale sulla salute umana

Esistono diversi modi in cui il rumore può influire sulla salute, compresa una risposta fisiologica attraverso il sistema nervoso autonomo che porta ad aumenti della pressione sanguigna, della frequenza cardiaca e dello stress potenzialmente causato dal fastidio. Diversi studi hanno rilevato: aumenti nelle misurazioni della pressione sanguigna durante il periodo di sonno notturno in relazione ai movimenti degli aerei; "associazioni dose-risposta" tra il rumore degli aerei di notte e la pressione sanguigna del mattino successivo su adulti sani e su quelli con CVD esistenti; associazioni tra il rumore degli aerei e le malattie

cardiache e l'ictus (le persone che vivono sotto la traiettoria di volo sono il 10-20% a maggior rischio rispetto a quelle che non vivono sotto la traiettoria di volo). Delle meta-analisi (combinando prove di diversi studi poiché si ritiene che forniscano una risposta più forte rispetto agli studi singoli) hanno trovato inoltre associazioni tra l'esposizione al rumore aereo e l'ipertensione negli adulti.

A riguardo, lo studio Hypertension and Exposure to Noise near Airports (HYENA) ha rilevato che un aumento di 10 dBA del rumore aereo diurno o notturno era associato ad un aumento del 28% dell'uso di farmaci per l'ansia. Uno studio secondario dello studio HYENA ha rilevato che il cortisolo salivare (un ormone dello stress che è più elevato nelle persone con depressione) era del 34% più alto per le donne esposte al rumore degli aerei sopra 60 dBA $L_{eq,24h}$ rispetto a quelle esposte a meno di 50 dBA $L_{eq,24h}$. Inoltre, il West London Schools Study ha riscontrato tassi più elevati di iperattività nei bambini che frequentano scuole esposte ad un rumore aereo >63 dBA $L_{eq,16h}$ rispetto a quelli nelle scuole esposte a livelli inferiori a 57 dBA $L_{eq,16h}$.

Uno degli effetti del rumore più difficile da valutare è lo stress. È noto che il rumore può causare una varietà di riflessi e risposte biologiche chiamate "reazioni da stress". Tuttavia, non è chiaro fino a che punto questi possano portare a malattie clinicamente riconoscibili dopo un periodo di esposizione al rumore. Alcuni studi hanno comunque scoperto che i bambini esposti cronicamente al rumore sperimentano livelli elevati di stress ed effetti sulla loro salute mentale.

L'orecchio umano può essere esposto a livelli elevati di rumore (superiori a circa 120 dBA) per un breve periodo, senza che l'udito venga danneggiato in modo permanente. Tuttavia, la regolare esposizione a livelli sonori superiori a circa 80 dBA, prolungata per lunghi periodi di tempo, può causare danni permanenti all'udito o addirittura la sua perdita. È comunque abbastanza improbabile che il livello di rumore degli aerei riscontrato in luoghi oltre i confini dell'aeroporto causi danni molto gravi all'udito.

Quest'ultimo è, in particolare, un impatto che può essere misurato oggettivamente, a differenza di molti altri che sono altamente soggettivi e quindi difficilmente misurabili. Ad esempio, la risposta soggettiva al rumore più diffusa è il fastidio, che può essere definito come una sensazione di risentimento, dispiacere, disagio, insoddisfazione o offesa che si verifica quando il rumore interferisce con pensieri, sentimenti o attività quotidiane. Esso è quindi una misura cumulativa della reazione generale avversa delle persone al rumore.

10. Requisiti acustici passivi

Al fine di garantire il comfort abitativo, il D.P.C.M. 5° Dicembre 1997 - “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici” stabilisce i limiti prestazionali della struttura edilizia e degli impianti in essa collocati, individuando le condizioni al contorno entro le quali sono rispettati i limiti riferiti alla propagazione del rumore per via aerea; essi sono valutati sia attraverso il calcolo del potere fonoisolante tra gli ambienti e dell’isolamento acustico di facciata, sia come rumore strutturale (ad esempio del tipo calpestio).

I requisiti acustici passivi sono applicati a prescindere dall’esposizione al rumore dell’ambiente abitativo, in modo tale che gli edifici siano idonei anche ad eventuali cambiamenti futuri/posteriori del clima acustico. Si eseguono quindi interventi sulle strutture edili per renderle compatibili con i livelli di esposizione sonora.

I requisiti acustici passivi da calcolare con procedimenti stabiliti dalle Norme Tecniche (che sono di solito molto bassi per scuole, ospedali, alberghi e uffici) sono i seguenti:

- T = tempo di riverberazione, cioè il tempo necessario affinché un impulso sonoro generato nell’ambiente divenga impercettibile;
- R_w = potere fonoisolante apparente, dedotto da certificazione o da calcolo (relativo alla parete di separazione tra due ambienti);
- $D_{2m,nT,w}$ = isolamento acustico standardizzato di facciata (dell’intera facciata di uno stabile);
- $L_{n,w}$ = isolamento al calpestio (della parete di separazione quando essa è un pavimento);
- L_{ASMax} , L_{Aeq} = isolamento dal rumore prodotto dagli impianti tecnologici a servizio discontinuo (ascensori, bagni, scarichi idraulici, ecc) ed a servizio continuo (riscaldamento, condizionatori, ecc).

Metodologia di calcolo per il $D_{2m,nT,w}$

L’isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione a 2 m di distanza ($D_{2m,nT}$) caratterizza la capacità di una facciata di abbattere i rumori aerei provenienti dall’esterno. Il pedice “2m” indica che l’isolamento acustico di facciata D_{2m} è la differenza tra il valore medio del livello di pressione sonora a 2 m dal piano della facciata e il valore medio del livello di pressione sonora nell’ambiente ricevente; “nT” indica invece che il valore deve essere normalizzato sulla base del tempo di riverberazione dell’ambiente ricevente. Poiché $D_{2m,nT}$ varia con la frequenza, per ottenere un unico indice di valutazione ($D_{2m,nT,w}$) si utilizza una procedura normalizzata. A riguardo, la norma UNI EN 12354-3 definisce un modello di calcolo per valutare l’isolamento acustico di facciata di un edificio basandosi sul potere fonoisolante dei diversi elementi che la costituiscono, considerando sia la trasmissione diretta sia quella laterale del rumore.

In particolare, il calcolo di $D_{2m,nT,w}$ può essere effettuato utilizzando le seguenti equazioni, tratte dalla norma precedentemente citata:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \text{ Log } \frac{v}{6T_0S}$$

$$R'_w = -10 \text{ Log } \left[\sum \frac{S_i}{S} 10^{-\frac{R_{w,i}}{10}} + \sum \frac{A_0}{S} 10^{-\frac{D_{n,e,w,i}}{10}} \right] - K$$

dove:

- R'_w = indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, espresso tramite l'equazione soprastante;
- $R_{w,i}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante del componente i-esimo di superficie S_i che costituisce la facciata;
- S = superficie totale della facciata, considerata dall'interno dell'ambiente [m^2];
- A_0 = area di assorbimento equivalente di riferimento, pari a $10 m^2$ per le abitazioni;
- $D_{n,e,wi}$ = indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente del piccolo elemento i-esimo con area minore di $1 m^2$ (come, ad esempio, bocchette di ventilazione, ingressi d'aria, cassonetti delle tapparelle, condotti elettrici);
- K = correzione per il contributo globale della trasmissione laterale, che risulta pari a 0 dBA per elementi di facciata non connessi e pari a 2 dBA per elementi di facciata pesanti con giunti rigidi;
- ΔL_{fs} = differenza di livello di pressione sonora in facciata che dipende dalla forma di quest'ultima, dall'assorbimento acustico caratteristico delle superfici aggettanti (balconi), dalla direzione del campo sonoro esterno. Assume valore nullo nel caso di facciate piane (=assenza di balconi e/o sporgenze/rientranze);
- V = volume dell'ambiente interno [m^3];
- T_0 = tempo di riverberazione di riferimento, pari a 0.5 s.

La seguente tabella riassume i valori massimi/minimi che i parametri sopra descritti devono rispettare secondo la normativa, per le diverse categorie di edifici:

	Parametri				
	R'_w (*)	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
	\geq	\geq	\leq	\leq	\leq
Ospedali, Cliniche (cat. D)	55	45	58	35	25
Abitazioni, Alberghi (cat. A, C)	50	40	63	35	35
Scuole (cat. E)	50	48	58	35	25
Uffici, palestre, negozi (cat. B, F, G)	50	42	55	35	35

11. Conclusioni

Esistono prove sostanziali che l'esposizione al rumore degli aerei è associata ad indicatori di fastidio; a riguardo, sono state derivate "relazioni esposizione-risposta" per stimare la percentuale di persone altamente infastidite a livello di comunità. Prove recenti di un aumento della risposta al fastidio ad un dato livello di esposizione indicano però la necessità di aggiornare le "curve esposizione-risposta" ricavate anni fa, nonché di verificare le circostanze che portano ad una maggiore risposta della comunità. Ciò potrebbe informare/aiutare il processo decisionale politico sulla gestione dell'esposizione al rumore degli aerei e sulle eventuali misure di mitigazione del rumore.

Esistono poi prove sufficienti che dimostrano l'effetto negativo dell'esposizione al rumore degli aerei sulle abilità cognitive dei bambini, ma stanno comunque emergendo prove a sostegno dell'isolamento acustico nelle scuole esposte a livelli elevati di rumore. Potrebbe inoltre essere utile derivare relazioni per una serie di ulteriori metriche di esposizione al rumore come, ad esempio, il numero di eventi di rumore.

Siccome il rumore degli aerei può inoltre disturbare il sonno e comprometterne il recupero, in futuro saranno necessarie ricerche per:

- a) derivare "relazioni esposizione-risposta" affidabili tra l'esposizione al rumore degli aerei e i disturbi del sonno;
- b) esplorare il legame tra i disturbi del sonno indotti dal rumore e le conseguenze sulla salute a lungo termine;
- c) indagare sulle popolazioni più vulnerabili;
- d) dimostrare l'efficacia delle strategie di mitigazione del rumore.

A differenza della maggior parte delle altre forme di inquinamento, quello acustico non dipende però solo dagli aspetti fisici del suono stesso, ma anche e soprattutto dalla reazione umana ad esso dato che diversi fattori personali e situazionali influenzano in modo importante il fastidio degli individui. Il problema principale è quindi l'effetto sulla salute e sulla qualità della vita delle persone: ciò rende la misurazione dell'inquinamento acustico un processo relativamente complesso.

Sitografia Utilizzata

- <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/noise.aspx>
- <https://www.nats.aero/environment/noise-and-emissions/measuring-noise/>
- <https://www.aef.org.uk/what-we-do/noise/#actionstotacklenoise>
- <https://www.faa.gov/noise/>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5437751/>
- <https://www.caa.co.uk/Consumers/Environment/Noise/Noise/>
- https://www.arpalazio.it/documents/20124/0/rumore_aeroportuale.pdf/45ce25fc-17c9-018e-ffbc-bb59354c10cd?t=1587480681261
- <https://www.euroacustici.org/Rumore-aeroportuale-e-valutazione-requisiti-acustici-passivi.pdf>