



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

C.I.F.R.A.

Centro Interdipartimentale di Formazione e Ricerca
Ambientale

Di.E.M.

Dipartimento di Energetica e Macchine

**VALUTAZIONE DELL'IMPATTO
ACUSTICO AEROPORTUALE:
ASPETTI TECNICI E
MODELLI DI CALCOLO**

RELATORE

Prof. Ing. ONORIO SARO



L'Aeroporto (1)

Il sistema del trasporto aereo fornisce un contributo essenziale alla qualità della vita: favorisce gli scambi culturali, le conoscenze ed è determinante per la globalizzazione economica mondiale. Gli aeroporti inoltre sono un volano per l'economia del territorio e generano indubbi benefici in termini di ricchezza per l'area sulla quale sorgono.

Aspetti positivi:

- Crescita economica :
 - 1000 addetti/milione di passeggeri anno
 - Indotto nella zona limitrofa +3000 addetti/milione di passeggeri anno
- Crescita culturale:
 - Facilitazione degli scambi
 - Mobilità delle persone



L'Aeroporto (2)

Aspetti negativi:

- La crescita sempre più marcata sta portando alla congestione del traffico con ingenti perdite economiche. Aumento dei ritardi per volo e dei consumi (la British Airways ha stimato un sovraconsumo di 50000 tonnellate di carburante all'anno).
- L'inquinamento ambientale, in modo particolare quello acustico, limita fortemente la stessa crescita degli aeroporti. A tal proposito, specialisti del settore stimano che dei 29 principali aeroporti mondiali, 25 hanno già saturato la capacità delle piste e uno studio dell'ICAO ha indicato che il costo, a livello mondiale, per la modernizzazione delle infrastrutture, al fine di risolvere i problemi di capacità aeroportuale, ammonterebbe a 250-350 miliardi di dollari.



Inquinamento acustico

- **Impatto acustico sulla popolazione:**
 - Attività degli aeromobili a terra (prove motori e attività ausiliarie)
 - Attività degli aeromobili in volo (in prossimità del suolo) decolli, atterraggi, sorvoli
- **Effetto cumulato:**
 - Aumento del traffico di aeromobili
 - Aumento delle persone residenti nei territori limitrofi
 - Aumento del traffico a terra
- **Motivazioni:**
 - Collocazione prossima alle città
 - Espansione delle zone residenziali
 - Espansione delle zone aeroportuali



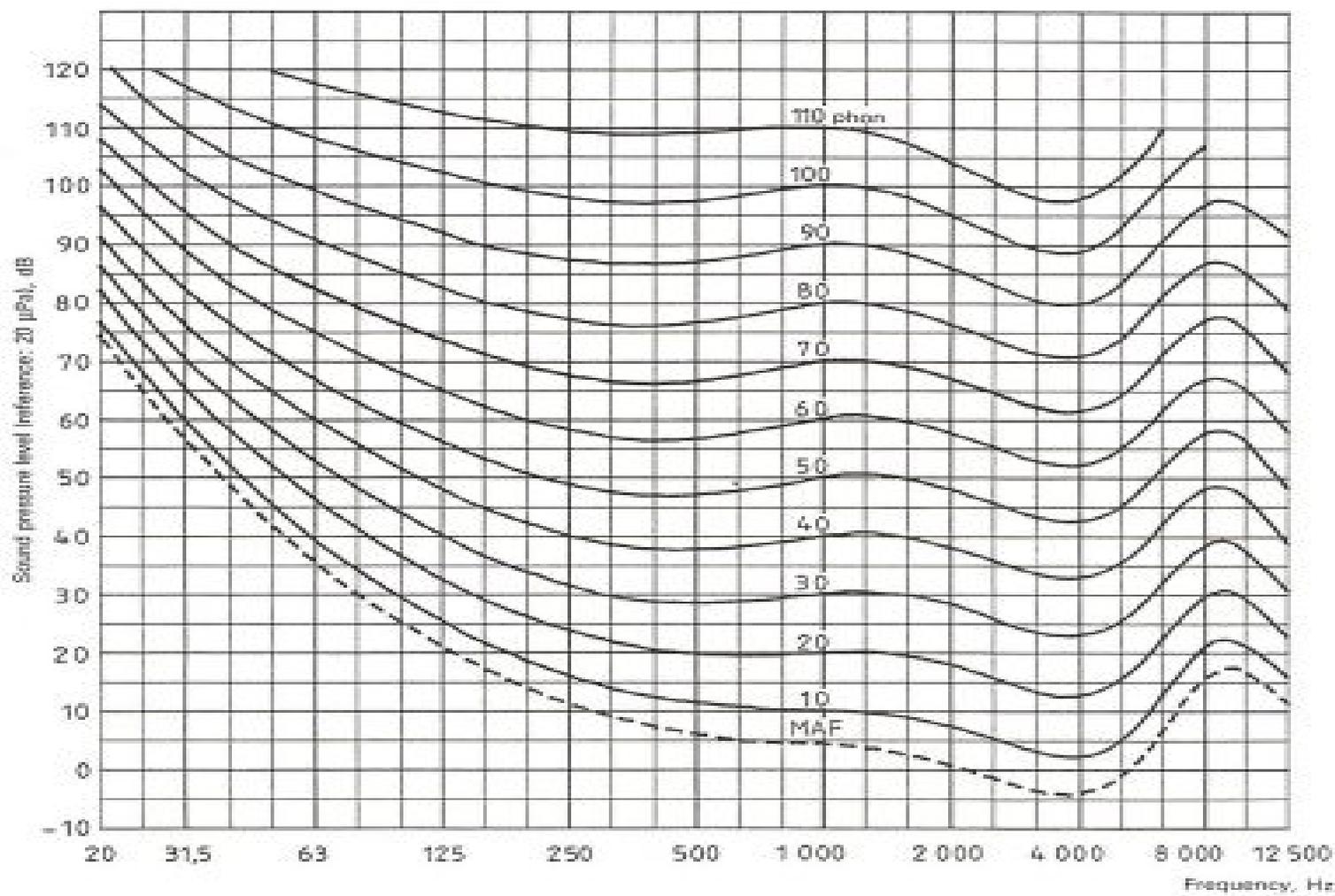
Il fenomeno acustico

- Perturbazione oscillatoria:
 - Variazione periodica della pressione in un mezzo elastico (aria)
 - Attivazione del sistema percettivo umano
 - Suoni udibili e non ($20 < f < 20000$): trasmissione di un messaggio
 - Rumore: suono sgradevole a largo spettro (disturbo)
 - Rumore di potenza elevata ---> danno



La percezione del suono

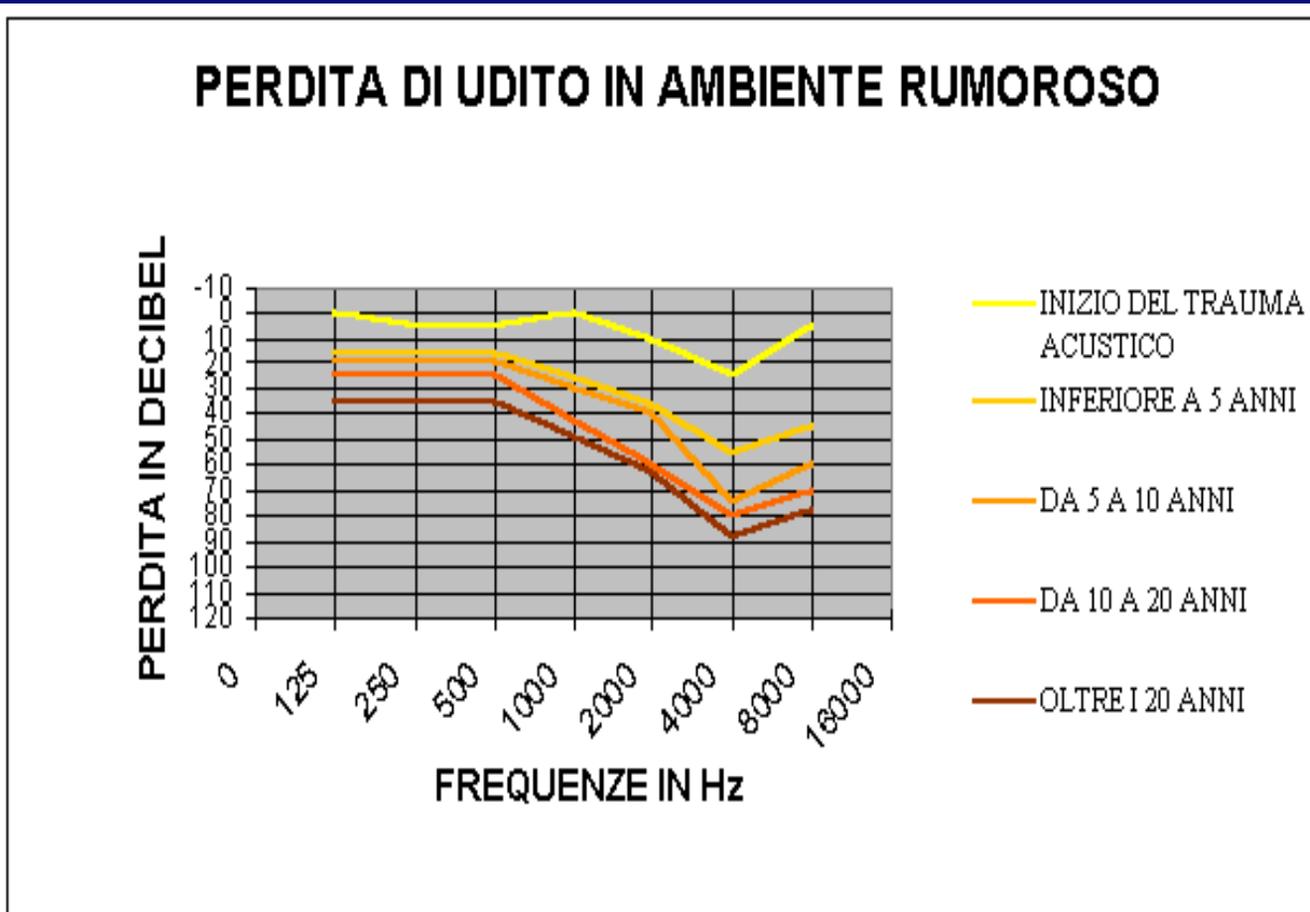
Percezione soggettiva e standardizzata





I danni da rumore

- Esposizioni brevi a livelli elevati
 - Disturbi temporanei
- Esposizioni prolungate a livelli medio alti
 - Danni permanenti all'udito



La statunitense Environmental Protection Agency (EPA) ha identificato un livello limite, in termini di livello equivalente continuo calcolato nell'arco dell'anno, di $L_{eq} = 70$ dBA che si ritiene possa considerarsi sufficiente per salvaguardare da perdite di udito il 96% della popolazione.



Le sorgenti di rumore aeroportuale

Il rumore generato dagli aerei nelle fasi di decollo, atterraggio, rullaggio e sorvolo grava inevitabilmente sui territori circostanti gli aeroporti inducendo disturbo alle popolazioni residenti. Il frastuono che si verifica al passaggio di aerei a bassa quota e in generale nelle operazioni aeroportuali, è dovuto principalmente all'emissione sonora di motori a propulsione. Si accompagnano tuttavia un'ampia serie di fenomeni - che verranno esaminati in seguito - di interazione fra flussi d'aria e corpo dell'aereo che determinano importanti emissioni.

- Le sorgenti sono gli aeromobili:
 - Motori
 - Corpo dell'aereo

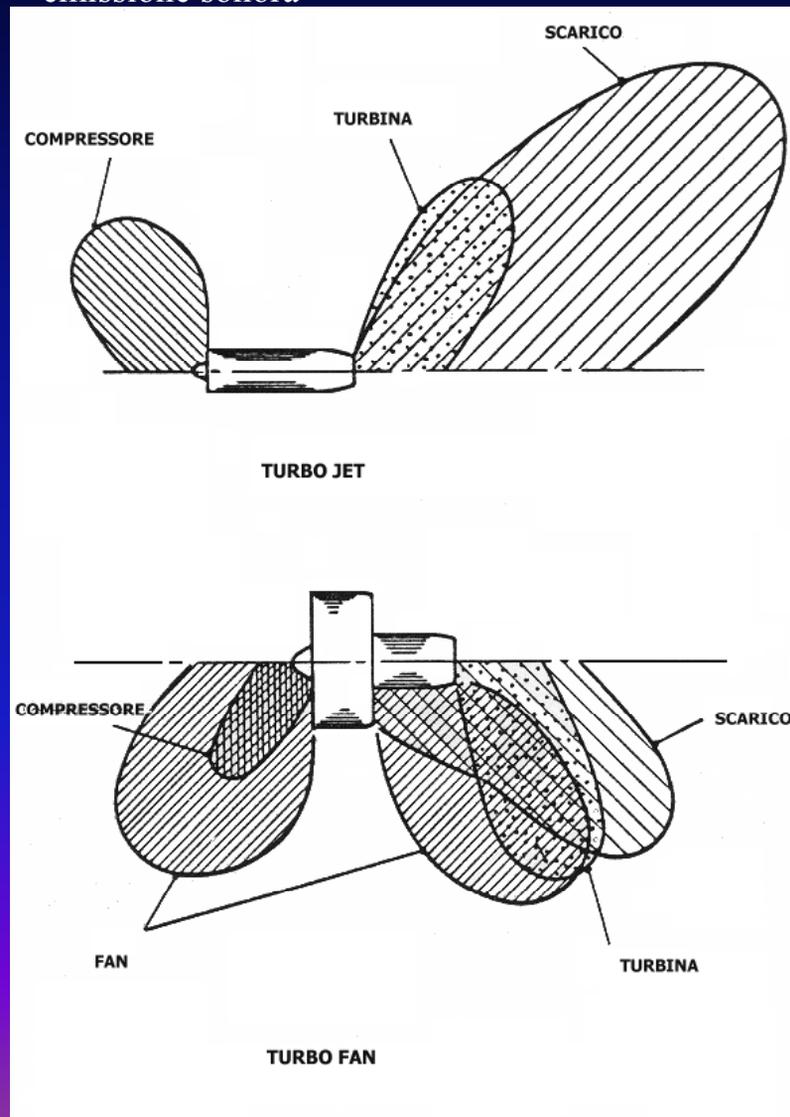


Classificazione dei motori

- Jet (reazione):
 - Turbogetto puro
 - Turbofan:
 - Ad alto rapporto di diluizione
 - A basso rapporto di diluizione
 - Elica:
 - Turboelica
 - A pistoncini (in disuso eccetto che per piccoli velivoli)

la componente più significativa del rumore è dovuta alla miscelazione turbolenta del getto con il fluido ambiente e si estende a valle dell'ugello per circa 15 volte il diametro dello stesso e dà luogo ad uno spettro a larga banda. Per di più se il gas non ha avuto una corretta espansione si verificano delle onde d'urto che invece danno luogo ad un insieme di toni discreti e una ulteriore emissione a larga banda.

Rappresentazione qualitativa dei livelli di emissione sonora





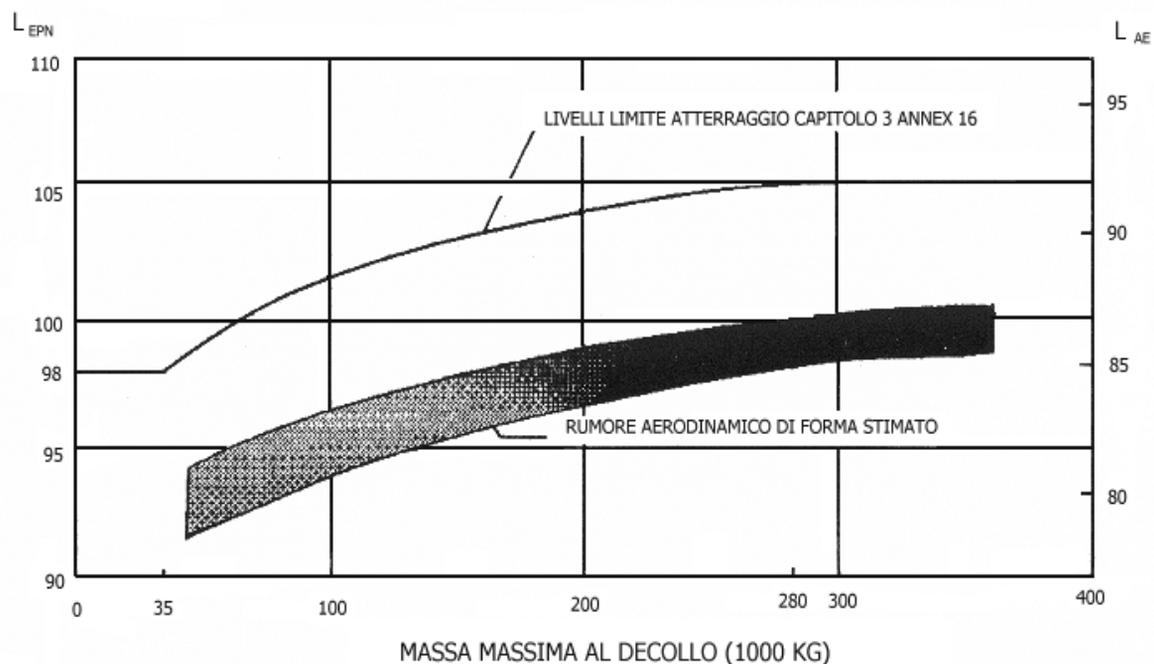
Rumore aerodinamico di forma

Diventa significativo durante l'avvicinamento alla pista per l'atterraggio, anche perché i motori di propulsione operano in tale fase ad una potenza ridotta pari a circa il 25-30% della massima disponibile; il rumore aerodinamico può così eguagliare il rumore prodotto da una delle sorgenti individuali di un motore di propulsione.

+15 dB

Causa il dispiegamento temporaneo delle apparecchiature di incremento della portanza, indispensabili nella operazione di atterraggio per la ridotta velocità dell'aeromobile e dalla fuoriuscita dai loro alloggiamenti dei carrelli di atterraggio, e nella fase finale anche dallo spiegamento dei freni aerodinamici.

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO ACUSTICO AEROPORTUALE:
ASPETTI TECNICI E MODELLI DI CALCOLO



RUMORE AERODINAMICO DI FORMA STIMATO E LIMITI DI CERTIFICAZIONE
CAPITOLO 3 DELL'ANNEX 16



Rumore funzione dell'attività

Livello sonoro funzione dell'attività e del carico (spinta richiesta) e andamento variabile nel tempo

- Decollo
- Atterraggio
- Sorvolo (soprattutto in prossimità del suolo)
- Rullaggio
- Prova motori
- Attività ausiliarie
(Auxiliary Power Unit)

Sorvolo di un
DC9 in decollo

Andamento qualitativo nel tempo
del livello sonoro rilevato al suolo
per un DC9 in decollo



Possibilità di mitigazione

Evoluzione della tecnologia dei motori d'aereo:

- 1. **Palette retrattili.** ostacoli nella scia del getto per ottenere una miscelazione più rapida del jet con l'ambiente. Tali meccanismi fuoriescono dal cono dell'ugello in particolari condizioni di volo, come il decollo e l'atterraggio, creando una miglior omogeneizzazione dei gas con l'aria circostante, mentre rientrano perfettamente nelle linea dell'ugello stesso nella fase di crociera. riduzione del rumore di 3-4 dB.
- 2. **Accoppiamento.** Della struttura funzionale del turbofan con la geometria variabile dell'ugello al sistema albero. La riduzione complessiva di rumore è dell'ordine dei 4 dB.
- 3. **Silenziatori.** I più usati sono i materiali porosi o i materiali perforati. I materiali perforati sono da preferirsi per ragioni meccaniche e strutturali a quelli di tipo fibroso, che hanno una maggiore non linearità di risposta. Si tratta poi di materiali facilmente danneggiabili dal calore, dalla polvere, dai carburanti e che contengono parti altamente infiammabili.



Possibilità di mitigazione(2)

- Limitazione al traffico di aerei obsoleti --- > certificazione
Accordi internazionali (International Civil Aviation Organisation ICAO)
 - Inquinamento acustico
 - Inquinamento da emissioni gassose
- Modifica delle procedure di volo (no manovre di avvicinamento):
 - Altezza del velivolo
 - Condizioni di spinta
 - Configurazione delle parti estendibili
 - Velocità
 - Direzione del decollo, quota e senso della virata
 - Rotte da seguire funzione della posizione dei centri abitati
 - Modifiche degli orari dei voli
- Incentivi per il raggiungimento degli obiettivi
 - Limiti di legge sull'inquinamento acustico
 - Tassazione delle emissioni sonore



Normativa sugli aeromobili

- Certificazione degli aeromobili (mediante misure delle emissioni sonore in procedure standardizzate definite da documenti tecnici)
 - FAR 36 (1969 Federal Aviation Association FAA)
 - Annex 16 (1971 International Civil Aviation Organisation ICAO)
- tre categorie:
 - Aerei che non soddisfano i requisiti iniziali di contenimento del rumore stabiliti dall'Annex 16 o dal FAR 36
 - Aerei che soddisfano i requisiti iniziali di contenimento del rumore stabiliti dall'annesso e dal Far derivati da modelli già in produzione (aerei indicati come Chapter 2 dall'Annex 16 e Stage 2 dal FAR 36)
 - Aerei che soddisfano i requisiti di più accentuato contenimento del rumore stabiliti dall'Annesso e dal FAR 36 per tutti i modelli di nuovo tipo (aerei indicati come Chapter 3 dall'Annex 16 e Stage 3 dal FAR 36)
- Dopo tali documenti i nuovi aerei prodotti per poter circolare negli USA dovevano soddisfare i requisiti della III categoria



Effetti sul mercato degli aeromobili

Numero di aeromobili commerciali utilizzati nell'Unione Europea per tipo di certificazione acustica

Fase	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Cap 1	1						2	2	2
Cap 2	690	632	55	457	397	358	299	260	224
Cap 3	1093	1336	1515	1613	1723	1883	2022	2195	2448
Super sonici	14	14	14	14	14	13	13	13	13
Totale	1798	1982	2080	2084	2134	2254	2336	2470	2687

Negli USA fuoriuscita anticipata della classe Capitolo 2 --> silenziamento, ricertificazione per continuare a volare dopo il 2002, data che è stata prefissata negli accordi ICAO, come termine ultimo per la loro messa al bando. Rapporti credibili indicano che se in un aeroporto i velivoli silenziati sono il 12% del totale l'incremento della rumorosità può arrivare al 50%.

Per questo la regolamentazione europea non riconosce il passaggio dei velivoli silenziati dal Capitolo 2 al 3.



Effetti della ricertificazione

Caratteristiche a confronto per aeromobili di nuova generazione e silenziati

Aereo	Maximum Takeoff Weight (tons)	Livello di Rumore al decollo (EPNdB)
B727-200	86.4	96.3
A321-131	85	86.1
Acoustical Exchange Ratio	10.5	
B737-200	57.7	91.1
MD90-30	61.2	77.5
Acoustical Exchange Ratio	23	

In base ad una stima del Vice Segretario del Commercio USA le perdite per il settore aeronautico statunitense sarebbero di 2 miliardi di dollari.

Negli USA gli aerei a margine del Capitolo 3 sono:

- 550 B727-200
- 330 DC9
- 50 DC8

e costituiscono il 25% della flotta, producendo il 60% del totale del rumore.



La situazione legislativa europea

Situazione disuniforme:

- Alcuni aeroporti con limitazioni sulle tipologie dei voli
- Diversi aeroporti con tasse sulle emissioni
- Numerosi aeroporti della Comunità, applicano disposizioni in materia di misura del rumore, di sorveglianza acustica e di pianificazione territoriale
- Indici diversi da stato a stato



La Normativa Italiana (1)

- Legge 26/10/1995, 477 legge quadro sull'inquinamento acustico.
- definizioni di emissioni sonore, valori di attenzione, di qualità, al personale tecnico competente..
- Competenze dello Stato, delle regioni, dei comuni,
- Sanzioni amministrative
- l'obbligo alla predisposizione di piani di contenimento del rumore.
- Decreto 31 ottobre 1997, Metodologia di misura del rumore aeroportuale



La Normativa Italiana (2)

Decreto 31 ottobre 1997, Metodologia di misura del rumore aeroportuale

- Disciplina su:
 - Criteri di misura
 - Procedure per la riduzione del rumore
 - Classificazione degli aeroporti in relazione al livello di inquinamento acustico
 - Criteri di individuazione delle zone nei pressi aeroportuali
 - Procedure per l'esecuzione delle misure.
 - Definisce l'indice di valutazione del rumore aeroportuale (L_{VA})
 - Giornaliero e del periodo di osservazione

Adeguamento, non rigoroso, alle direttive e alle consuetudini adottate a livello internazionale (suddivisione oraria diversa)

$$L_{VAj} = 10 \log \left[\frac{1}{24} 10^{L_{VAAd}/10} + \frac{7}{24} 10^{L_{VAAn}/10} \right]$$

$$L_{VA} = 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_{VAj}/10} \right] \quad n = 7 + 7 + 7$$



La Normativa Italiana (3)

Dettagli sul livello di valutazione del rumore aeroportuale giornaliero (L_{VAj})

$$L_{VA} = 10 \text{Log} \left[\frac{17}{24} 10^{L_{VAd}/10} + \frac{7}{24} 10^{L_{VAn}/10} \right]$$

Adeguamento, non rigoroso, alle direttive e alle consuetudini adottate a livello internazionale (suddivisione oraria diversa)

$$L_{VAd} = 10 \text{Log} \left[\frac{1}{T_d} \sum_{j=1}^{N_d} 10^{SEL/10} \right]; \quad T_d = 61200$$

$$L_{VAn} = 10 \text{Log} \left[\frac{1}{T_n} \sum_{j=1}^{N_n} 10^{SEL/10} \right]; \quad T_n = 25200$$

$$SEL_i = 10 \text{Log} \left[\frac{1}{T_o} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta p_{A,i}^2(t)}{p_0^2} dt \right] = \left(L_{Aeq,T_i} + 10 \text{Log} \frac{T_i}{T_o} \right)$$



La Normativa Italiana (4)

- Due commissioni per
 - Criteri di misura
 - Procedure antirumore per ogni attività aeroportuale,
 - zonizzazione,
 - classificazione degli aeroporti
 - caratteristiche dei sistemi di monitoraggio.
- Zonizzazione (aeroportuale)
 - Zona A, $L_{VA} < 65$ dB(A),
 - Zona B, $L_{VA} < 75$ dB(A), solo attività agricole, allevamenti di bestiame, attività industriali e assimilate, attività commerciali, d'ufficio, terziario e assimilate, previa adozione di adeguate misure di isolamento acustico
 - Zona C, $L_{VA} > 75$ dB(A), attività funzionalmente connesse con l'uso ed i servizi delle infrastrutture aeroportuali
 - Al di fuori delle zone A,B e C l'indice $L_{VA} < 60$ dB(A).



La Normativa Italiana (5)

- Decreto 11/12/1996 n.496
 - Violazioni e sanzioni amministrative (ENAC)
 - Ispezioni e relazioni periodiche al Ministero (ARPA)
 - I gestori degli aeroporti devono presentare agli Enti locali i piani di abbattimento e contenimento del rumore
- Decreto 20/05/1999
 - Criteri per la progettazione dei sistemi di monitoraggio per il controllo di livello dell'inquinamento in prossimità degli aeroporti
 - Criteri per la classificazione degli aeroporti in relazione al livello di inquinamento acustico
- Decreto 3 dicembre 1999
 - Procedure antirumore e zone di rispetto negli aeroporti



La Normativa Italiana (6)

Decreti fiscali

- **D.P.R. 26/08/93 n.434** aumenti percentuale dell'importo dei diritti di approdo e partenza degli aeromobili in base alla classe.
 - 40% al Ministero dei trasporti per disinquinamento acustico
 - 25% al Ministero dell'ambiente per i servizi di controllo
- **Collegato fiscale (Finanziaria 2000)** tributo regionale correlato all'inquinamento acustico aeroportuale: autofinanziamento per lo sviluppo dei sistemi di monitoraggio acustico e disinquinamento acustico o eventualmente mancando i progetti relativi, di una formula di indennizzo del danno ambientale alle popolazioni residenti.



I modelli di simulazione (1)

Necessità dei modelli di simulazione

- Per la classificazione in assenza di strumentazione
- Per la pianificazione degli interventi
 - Nella gestione dell'aeroporto (Ente aeroportuale)
 - Nella gestione del territorio limitrofo (Ente locale)



I modelli di simulazione (2)

I più conosciuti sono:

- Society of Automotive Engineers SAE-AIR 1845, “Procedure for the calculation of noise in the vicinity of airports” 1981; 1986
- European Civil Aviation Conference ECAC-CEAC Doc 29, “Report on standard method of computing noise contours around civil airports” (quasi coincidente col precedente) 1982; 1997



Integrated Noise Model, INM

Implementa il metodo proposto dal SAE AIR 1845

- Calcola i valori al suolo per 15 parametri acustici tra cui:
 - SEL (Sound Exposure Level $T_0=1s$)= L_{AE}
 - EPNL(Effective Perceived Noise Level)
 - Time-above (rumore sopra la soglia fissata)
- Parte dalle caratteristiche dell'aeromobile
- Database: raccolta storica di misurazioni di
 - SEL (Sound Exposure Level $T_0=1s$)= L_{AE}
 - EPNL(Effective Perceived Noise Level) in funzione del NPD (Noise Power Distance Data)= $L_{AE}(P, d)$

Velivoli dell'Aviazione Civile e Militare



Noise Power Distance Data

- Per ogni velivolo: Set di curve dei livelli sonori, in relazione alla distanza dal punto di osservazione
- Corrected Net Thrust (correzione per la pressione)
- La formula usata per i turbojet è:

$$\frac{F_n}{\delta_{am}} = (E + FV_C + G_a h_D + G_b h_D^2 + HT)$$

- Calcolo del SEL (4 correzioni per differenze rispetto al riferimento):

$$SEL = L_{AE} = L_{AE}(P, d) + \Delta v - \Delta(\beta; l) + \Delta L + \Delta \phi$$

- $v \neq 160$ nodi
- $\Delta(\beta, l)$ attenuazione laterale
- ΔL direttività della sorgente
- $\Delta \phi$ per curve nella rotta



Dati necessari

- Condizioni climatiche medie
- Caratteristiche dell'aeroporto:
 - Altitudine, latitudine, longitudine
 - Configurazione delle piste
 - Cartografia
- Operatività
 - Tipo di operazioni: decolli, atterraggi, ecc.
 - Profili di volo per punti o per step (6)
 - Modello di aereo
 - Numero di voli
 - Orario dei voli e pista impiegata
- Cause di attenuazione e rinforzo
 - Assorbimento atmosferico
 - Assorbimento del suolo



Esempio di simulazione

- Scelta:
 - Vicinanza
 - Piccolo hub: stessa complessità minor onere computazionale
- Movimentazione tipica giornaliera: per somiglianza con realtà locali
- DNL, Day Night Level



Cartografia

Elaborazione della cartografia numerica:

- I dati della cartografia sono stati trattati
 - per la riproduzione dell'urbanistica nei pressi dell'aeroporto
 - per definire l'orografia.
- Standard diversi.

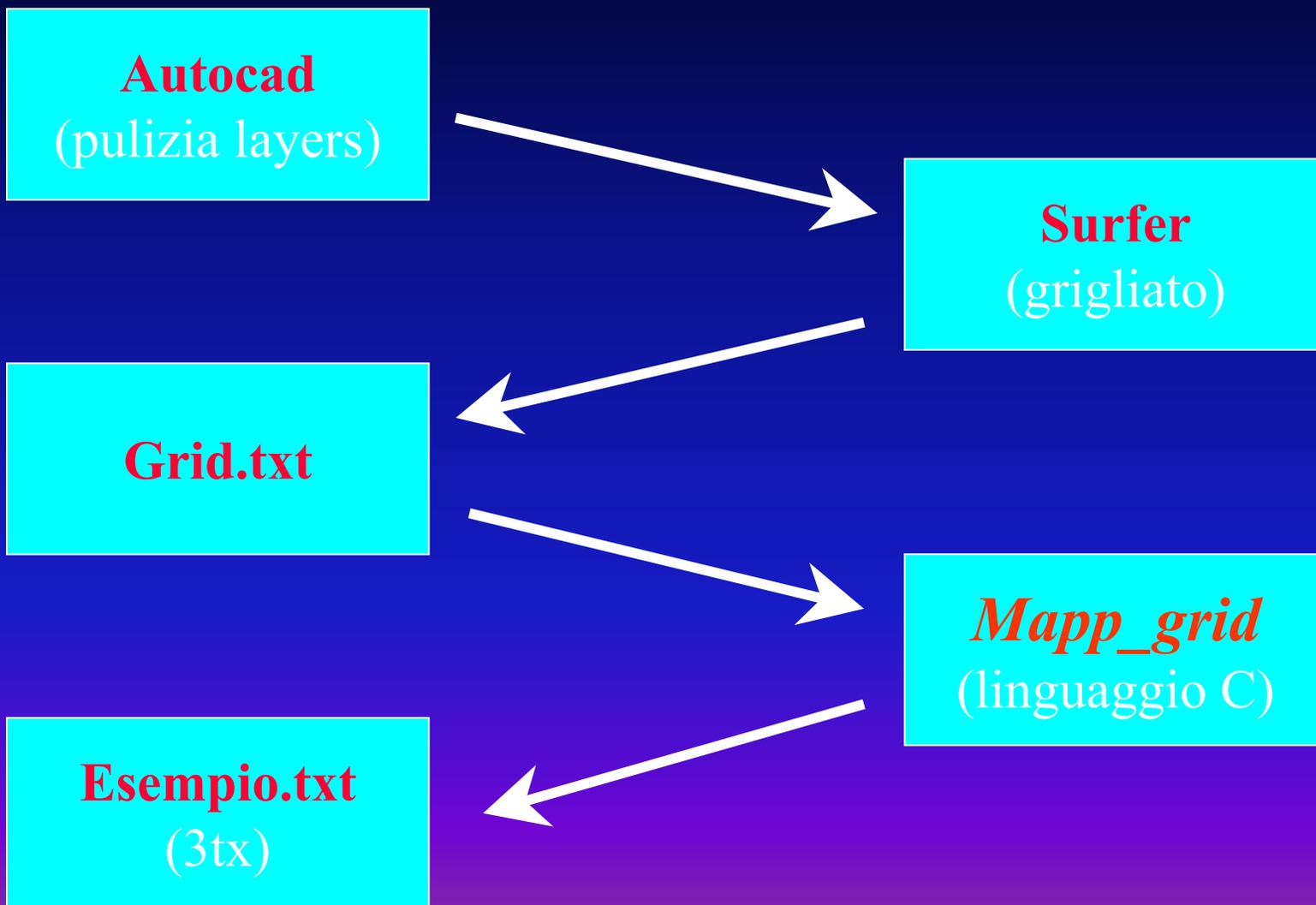


Costruzione dei Terrain Files

- Mappatura di 1 grado di latitudine per 1 grado di longitudine.
- Griglia di 1201 per 1201 punti distanti fra loro 3 secondi d'arco.



Costruzione dei Terrain Files





Costruzione delle rotte

- Da Carte aeroportuali Jeppesen, definizione delle rotte per le singole operazioni:
 - Decollo
 - Atterraggio
 - Touch & go
 - Sorvolo
- Tracce sul piano orizzontale, disperse, e profili di volo



Scenari analizzati

- Giornate a maggior traffico, Busy Day, per ogni configurazione di decollo prevista
 - Condizioni attuali
 - Condizioni di traffico previste fra 5 anni a compimento del piano industriale

Risultati grafici e tabellari per l'ampiezza delle impronte di rumore



Analisi di singoli eventi al variare dei parametri caratteristici

- Valutazione della sensibilità del modello al variare dei parametri:
 - Posizione di flap
 - Condizioni meteorologiche (t , p , φ)
 - Direzione del vento
 - Tipologie di velivolo
 - Grado di dispersione della traccia



Osservazioni sul modello

- Dipendenza da aggiornamento del database
- Disgiunzione fra traccia sul piano orizzontale e profilo altimetrico di volo
- È ignorato l'angolo di bank



Conclusioni

Modello e codice di simulazione

- Studio approfondito strumento indispensabile:
 - Stima iniziale dell'impatto ambientale
 - Ridurre impatto ambientale
 - Evitare ricadute economiche negative