

# **Metrologia del rumore da aeromobili, certificazione acustica e impatto sul territorio**

**Angelo Farina**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Università di Parma  
Via delle Scienze - 43100 PARMA  
tel. 0521 905854 - fax 905705  
E-MAIL: farina@pcfarina.eng.unipr.it**

## **0. Introduzione**

Questa memoria copre tre distinti aspetti legati alla valutazione della rumorosità aeronautica: la problematica metrologica legata all'analisi di un evento rumoroso mediante strumentazione tradizionale (analogica) o di nuova generazione (digitale), la normativa tecnica che descrive le tecniche di misura impiegate in sede di certificazione acustica dei singoli aeromobili, e quella che viceversa descrive le tecniche di misura impiegate per la valutazione della rumorosità ambientale nel territorio interessato da attività aeronautiche.

Inevitabilmente la trattazione risulterà semplificata rispetto alle fonti citate, cui si rimanda per approfondimenti. Non mancano comunque esempi di applicazione delle tecniche qui descritte, grazie ai quali è possibile valutare l'effettiva applicabilità delle stesse, e l'approssimazione ottenibile con le semplificazioni legate all'utilizzo delle tecniche di misura meno impegnative.

Sulla base dei risultati ottenuti vengono infine fornite semplici relazioni di calcolo per la conversione reciproca dei principali descrittori fisici impiegati. In appendice viene riportata una procedura per calcolatore, utile per derivare i principali descrittori acustici del rumore aeronautico da un "multispettro" in terzi d'ottava.

## **1. Metrologia del rumore**

Il rumore aeronautico, così come quello ferroviario, è caratterizzato da sporadici **eventi sonori**, durante i quali si avverte distintamente una rumorosità nettamente superiore a quella presente nel restante tempo. La durata di un evento sonoro di sorvolo, intesa come periodo durante il quale è identificabile la presenza del rumore proveniente dal velivolo rispetto al rumore di fondo, può variare da una trentina di secondi per posizioni molto prossime alla linea di volo sino a 2-3 minuti per posizioni molto lontane. Chiaramente ciò dipende anche dal livello del rumore di fondo: quando lo stesso è molto elevato, può divenire difficile discriminare il rumore del sorvolo rispetto al rumore di fondo stesso, e pertanto la durata di identificazione si riduce.

Passando all'analisi strumentale dell'evento, si può osservare innanzi tutto che sono disponibili due diversi approcci metrologici: la prima tecnica di misura prevede invece l'impiego di un filtro di ponderazione in frequenza (è comune a questo proposito l'impiego dei filtri normalizzati "A" e "D"), grazie al quale è possibile memorizzare soltanto una successione temporale di singoli valori di livello sonoro ponderato.

La seconda tecnica è l'analisi Energia-Tempo-Frequenza (ETF), che richiede la disponibilità di un analizzatore di spettro in tempo reale, in grado di memorizzare una successione di spettri (tipicamente in bande di 1/3 d'ottava) a brevi intervalli di tempo. In tale modo si ottiene un "multispettro", che contiene tutte le informazioni sull'evoluzione spettrale e temporale dell'evento sonoro.

Chiaramente è sempre possibile, commettendo un errore abbastanza contenuto, ricalcolare da una analisi ETF il profilo temporale del livello ponderato in frequenza.

Il secondo problema metrologico, derivante dall'analisi di un fenomeno tutt'altro che stazionario, deriva dalla scelta del tempo di integrazione del rilevatore del valore efficace della pressione sonora ("RMS detector"), e dalla conseguente scelta dell'intervallo temporale di campionamento del multispettro o del profilo temporale del livello ponderato in frequenza. Questo secondo problema è del tutto indipendente dal primo: ad esempio, operando con l'analisi ETF si potrà scegliere fra catturare spettri del livello sonoro "istantaneo" con costante di tempo esponenziale FAST, oppure esponenziale SLOW, oppure con integrazione lineare di 1s (short  $L_{eq,1s}$ ) o di 250 ms (short  $L_{eq,250ms}$ ). In ciascuno dei 4 esempi suddetti sarà necessario adottare una opportuna cadenza di campionamento degli spettri: con i livelli esponenziali SLOW (cost. di tempo  $t=1s$ , tempo di integrazione equivalente  $T=2s$ ) sarà necessario catturare almeno uno spettro ogni 1/2 s, mentre con costante di tempo FAST ( $t=0.125s$ ,  $T=0.25s$ ) saranno necessari almeno 16 spettri al secondo. Viceversa, operando con integrazione temporale lineare, si deve catturare uno spettro al termine di ciascun periodo di integrazione, e dunque ogni secondo se misuriamo degli short  $L_{eq,1s}$ , mentre ogni 125 ms se misuriamo degli short  $L_{eq,125ms}$ .

La seguente fig. 1 pone a confronto le "finestre temporali di integrazione" dei 4 esempi precedenti:

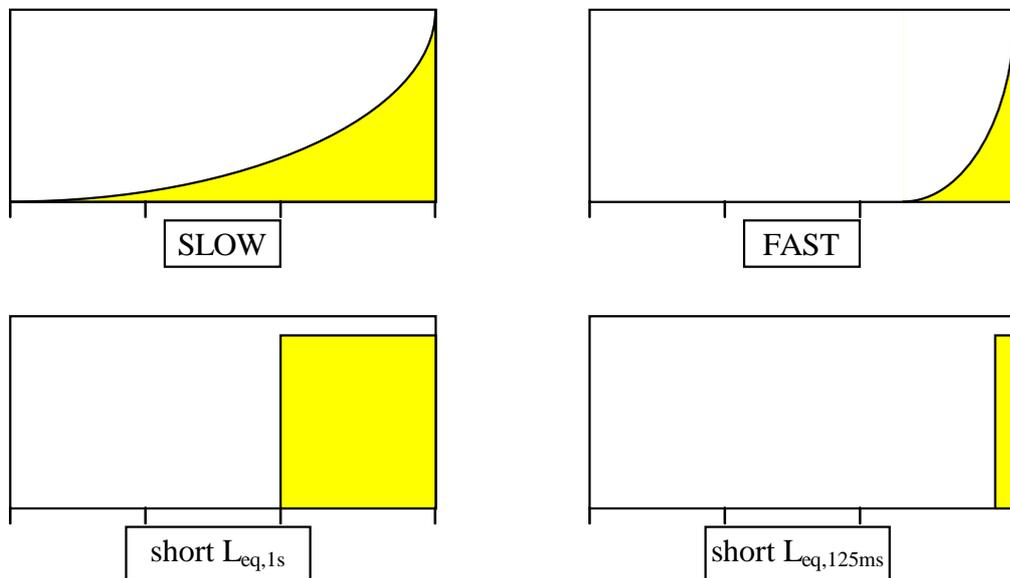


Fig. 1 - finestre temporali esponenziali e lineari

Chiaramente tanto più breve è la costante di tempo (o il tempo di integrazione), e conseguentemente più frequente il campionamento temporale, tanto più l'andamento temporale sarà dettagliato. Viceversa, l'impiego di costanti di tempo maggiori produce profili temporali più lisci e regolari.

## 1.1 Analisi semplificata di un segnale ponderato in frequenza

In quanto segue, si assume di analizzare il profilo temporale di un segnale sonoro cui è stata applicata una ponderazione in frequenza: le due curve normalizzate di comune impiego per operare questa ponderazione in frequenza sono la curva “A” e la curva “D”, che vengono riportate a confronto nella fig. 2.

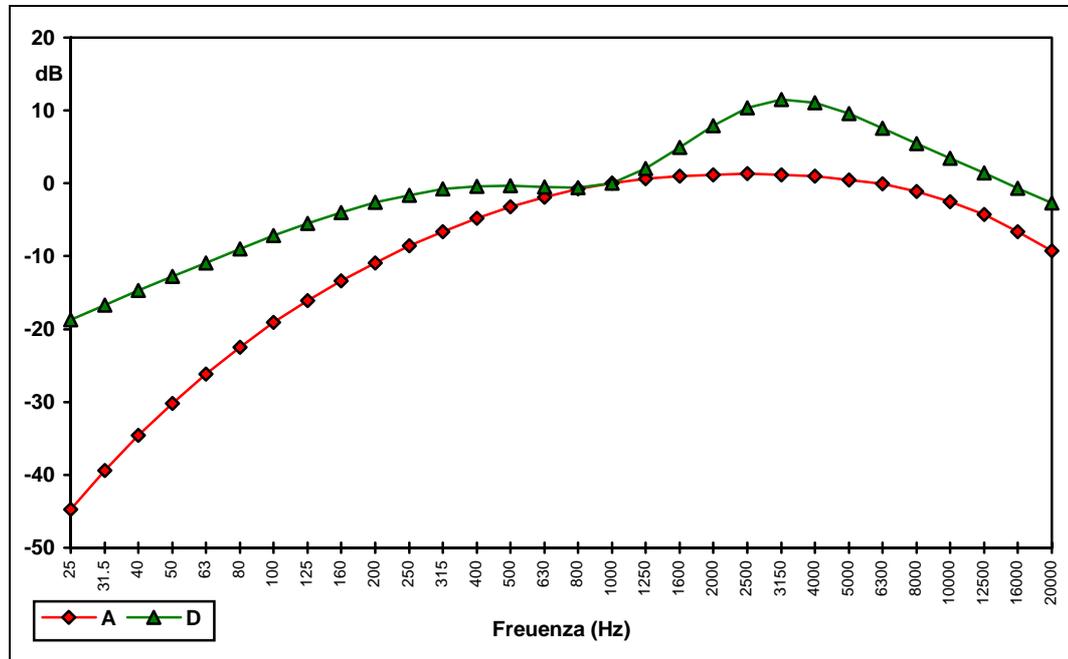


Fig. 2 - Confronto fra le curve di ponderazione “A” e “D”

Si osserva come la curva “D” sia nettamente più alta della curva “A” praticamente a tutte le frequenze: pertanto uno stesso evento sonoro darà luogo, in generale, a valori di livello ponderato “D” più elevati dei corrispondenti valori in dB(A).

Il tipico profilo temporale (ponderato “A” o “D”) di un sorvolo aereo è costituito da una rampa di salita del livello sonoro, seguito da una rampa di discesa. Solitamente non si verifica un “plateau” di durata apprezzabile, come invece si osserva per il rumore ferroviario. Pertanto, il valore massimo del livello sonoro ottenuto al vertice della rampa di salita dipende in misura rilevante dalla costante di tempo impiegata: al crescere di quest’ultima si riduce il valore massimo.

La fig. 3 illustra, per un evento di sorvolo di un DC-9 in atterraggio, rilevato a circa 1000 m dalla testata pista sull’asse della stessa, il profilo temporale ponderato “A” ottenuto con 6 diversi tempi di integrazione: media esponenziale con costanti di tempo SLOW e FAST, e media lineare con short  $L_{eq}$  di 2 s, 1 s, 250 ms e 125 ms.

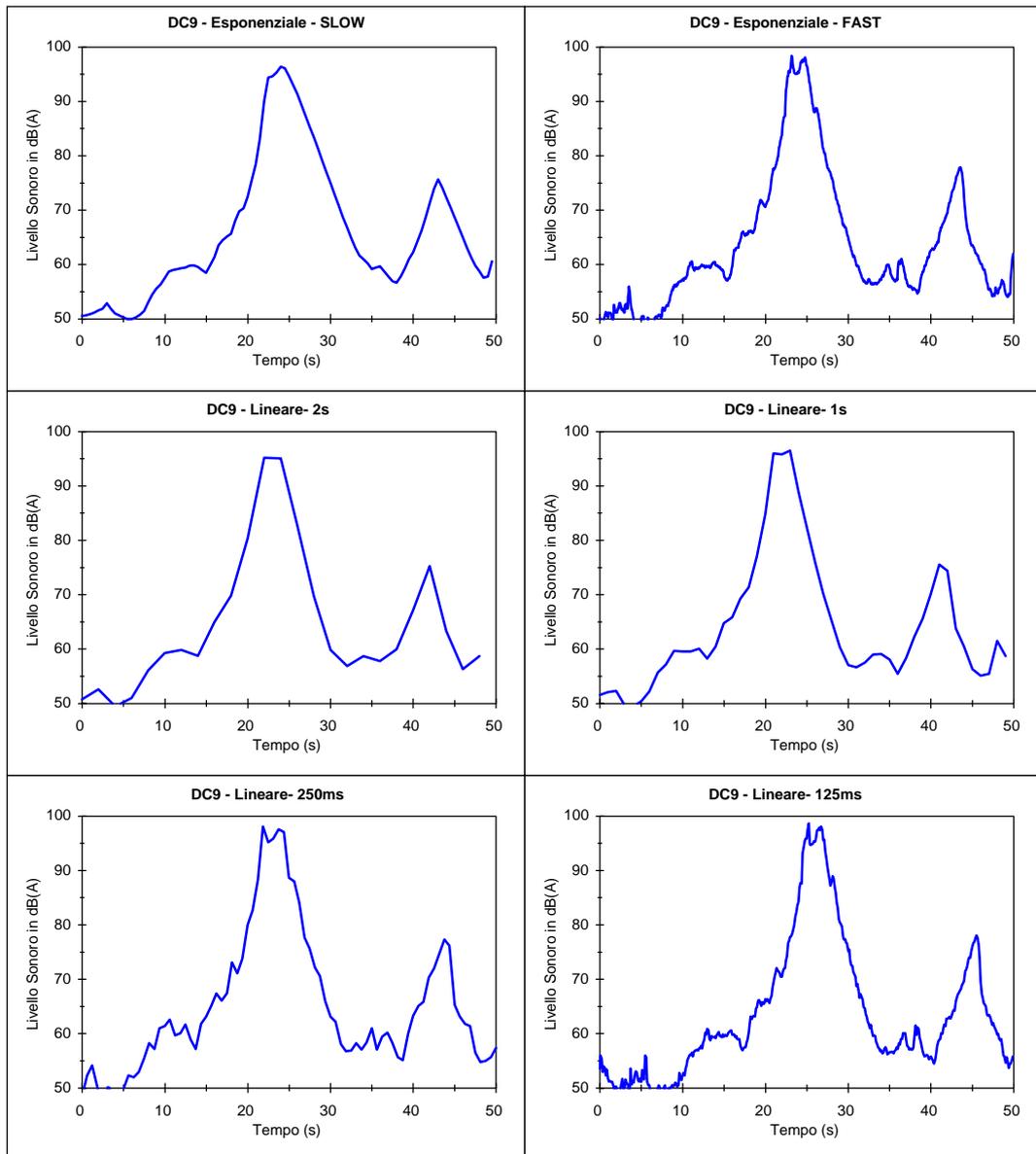


Fig. 3 - profilo temporale di un atterraggio di DC-9 con 6 diversi tempi di integrazione esponenziale e lineare.

Analogamente la fig. 4 riporta le stesse informazioni relativamente ad un evento di decollo di un turboelica Fokker 50, rilevato sempre a 1000 m dalla testata pista, sul suo asse.

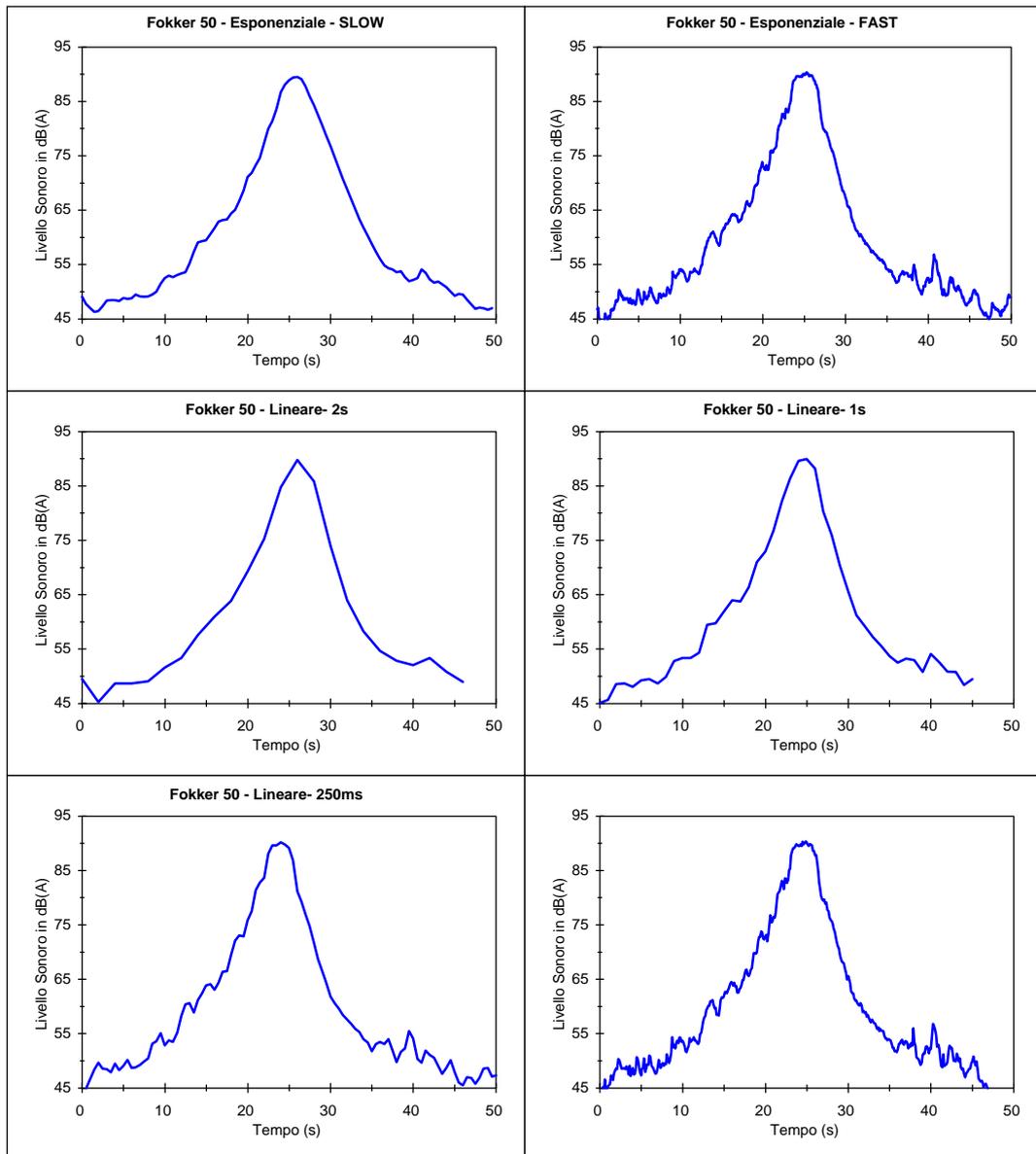


Fig. 4 - Profilo temporale di un decollo di Fokker-50 con 6 diversi tempi di integrazione esponenziale e lineare.

Ovviamente i valori massimi raggiunti sono molto diversi nei 6 casi considerati, pur essendo lo stesso l'evento sonoro. E' interessante porre a confronto tali valori massimi con le grandezze energetiche relative all'intero evento, ed in particolare con i valori di SEL (Single Event Level, indicato anche a volte come  $L_{ax}$ ).

La corretta definizione di SEL è la seguente:

$$SEL = 10 \cdot \lg \left[ \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} \cdot d\tau \right] = L_{eq} + 10 \cdot \lg(\tau_2 - \tau_1)$$

in cui  $p(\tau)$  è il valore efficace "istantaneo" di pressione sonora,  $p_0$  è il valore efficace di riferimento della pressione sonora (pari a  $20 \mu Pa$ ), ed i tempi  $\tau_1$  e  $\tau_2$  (in s) individuano gli istanti di "inizio" e "fine" dell'evento. La corretta definizione di

tali istanti permette di separare il “rumore residuo” dal contributo di rumorosità causato dal sorvolo: comunque, se il livello massimo raggiunto supera il rumore residuo di 20-25 dB(A), come nei due eventi qui considerati, si verifica solitamente che il posizionamento di tali due istanti convenzionali non è molto critico, ed il valore di SEL rimane pressochè invariato.

La comune pratica, e le norme tecniche, suggeriscono di individuare gli istanti  $\tau_1$  e  $\tau_2$  rispettivamente come istante in cui il livello sonoro raggiunge per la prima volta un valore inferiore al massimo di 10 dB, e come istante in cui il livello sonoro si riduce definitivamente ad un valore inferiore al massimo di 10 dB. Nessuna correzione per “togliere” dalla misura l’influenza del rumore residuo deve venire effettuata se il livello massimo supera di almeno 20 dB il rumore residuo stesso, poichè in questo modo tutta la durata dell’evento comprende valori di livello sonoro eccedenti di almeno 10 dB il rumore residuo, che risulta pertanto ininfluenza.

Disponendo della storia temporale del livello sonoro campionato, è agevole il calcolo del SEL in base alla sua definizione, ovviamente sostituendo una sommatoria al posto dell’integrale, e tenendo conto del passo temporale di campionamento  $\Delta\tau$ :

$$SEL = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{i=N_1}^{N_2} \left( 10^{\frac{L(i)}{10}} \cdot \Delta\tau \right) \right]$$

Purtroppo però la norma ISO 3891 (1978) “Acoustics - Procedure for describing aircraft noise heard on the ground” [1] suggerisce di calcolare il SEL in modo approssimato, a partire soltanto dal valore di  $L_{max}$  e della durata “convenzionale” del sorvolo, costituita come già spiegato dall’intervallo temporale compreso fra gli istanti  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , secondo la relazione:

$$SEL = L_{max} + 10 \cdot \lg \left[ \frac{\tau_2 - \tau_1}{2} \right]$$

Va osservato che, al variare della costante di tempo (o del tempo di integrazione lineare) variano sia il valore di  $L_{max}$ , come chiaramente visibile dalle fig. 3 e 4, sia la posizione degli istanti  $\tau_1$  e  $\tau_2$ . e dunque la durata convenzionale dell’evento sonoro. Tali variazioni si compensano almeno in parte; comunque, onde valutare l’errore connesso all’impiego della relazione approssimata rispetto alla definizione, la seguente tabella riporta i dati ottenibili dai 2 profili temporali scelti come esempi, ciascuno con i 6 diversi tempi di integrazione:

Atterraggio di DC-9

T. Integr.	$L_{A,max}$	$\tau_2 - \tau_1$ (s)	$SEL_{app}$	$SEL_{def.,\tau_2-\tau_1}$	$SEL_{def,total}$
SLOW	97.0	5	101.0	101.8	101.9
FAST	99.3	3.19	101.3	101.6	101.9
LIN,2s	95.9	8	101.9	101.8	101.9
LIN,1s	96.9	5	100.9	101.8	101.9
LIN,250ms	99.0	3.25	101.1	101.7	101.9
LIN,125ms	99.6	3.0	101.4	101.5	101.9

### Decollo di Fokker-50

T. Integr.	$L_{A,max}$	$\tau_2 - \tau_1$ (s)	$SEL_{app}$	$SEL_{def.,\tau_2-\tau_1}$	$SEL_{def,total}$
SLOW	89.8	7	95.2	95.4	95.6
FAST	90.6	5.31	94.8	95.4	95.6
LIN,2s	89.9	6	94.7	95.4	95.6
LIN,1s	90.2	6	95.0	95.4	95.6
LIN,250ms	90.3	5.5	94.7	95.4	95.7
LIN,125ms	90.6	5.25	94.8	95.4	95.7

Si può osservare come, in generale, il metodo approssimato di stima del SEL porti ad una sottostima dello stesso, mediamente di 0.6-0.8 dB. Viceversa, la determinazione dello stesso in base alla definizione porta in tutti i casi a valori estremamente vicini fra loro, e ben poco diversi dal SEL ottenibile integrando l'intera durata dell'evento sonoro percipibile, come è usuale fare impiegando un semplice fonometro integratore privo della possibilità di campionare il profilo temporale dell'evento sonoro.

In pratica dunque la scelta della modalità di integrazione influenza in modo rilevante solo la determinazione del livello sonoro massimo (e conseguente la definizione della durata "convenzionale" dell'evento), mentre il valore di SEL è per sua natura indipendente dal tempo di integrazione, e può venire ottenuto egualmente bene da strumenti diversi operanti con metodologie molto dissimili. Al giorno d'oggi non ha più senso ricorrere al metodo approssimato di determinazione del SEL: anche se non richiede la disponibilità di uno strumento integratore, esso richiede viceversa quella di un registratore scrivente onde determinare con esattezza la durata convenzionale dell'evento, e pertanto risulta di gran lunga più scomodo e più oneroso rispetto al semplice impiego di un fonometro integratore, possibilmente dotato anche di ritenzione del valore massimo. Solo ai fini della definizione del valore massimo risulta conveniente rendere univoca la scelta di un particolare tempo di integrazione (ad es. il tradizionale SLOW), mentre ai fini della determinazione del SEL essa è di per se ininfluente.

### 1.2 Analisi dettagliata di un multispettro

La misura del rumore aeronautico con tecnica multi-spettro è stata sviluppata ormai da quasi 30 anni, onde consentire la valutazione sperimentale del Perceived (Tone Corrected) Noise Level  $L_{TPN}$  e del suo valore di singolo evento, Effective Perceived Noise Level,  $L_{EPN}$ . La procedura di elaborazione consiste anzitutto nel calcolo di un singolo valore di  $L_{TPN}(\tau)$  a partire da ciascuno spettro campionato, secondo la procedura illustrata nella citata norma ISO 3891 e descitta nell'appendice "A", che prevede l'impiego di spettri in bande di terzo di ottava, con costante di tempo SLOW, campionati ogni 0.5 s.

Si costruisce in tal modo un profilo temporale di valori "istantanei" di  $L_{TPN}$ , da cui si estrae sia il valore massimo, sia soprattutto il livello di singolo evento,  $L_{EPN}$ . Quest'ultimo è definito in modo molto simile al SEL, ma ne differisce perchè il tempo di normalizzazione è pari a 10 s anzichè 1s come per il SEL:

$$L_{EPN} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{10} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} 10^{\frac{L_{TPN}(\tau)}{10}} \cdot d\tau \right]$$

La fig. 5 illustra in maniera semplificata la procedura di calcolo di  $L_{EPN}$ .

Sempre secondo la norma ISO citata, è possibile arrivare ad una ragionevole stima di  $L_{EPN}$  di un evento di sorvolo mediante l'impiego di misure semplificate con ponderazione in frequenza "D" (quali quelle descritte al precedente paragrafo), semplicemente togliendo 3 dB al valore di  $SEL_D$ .

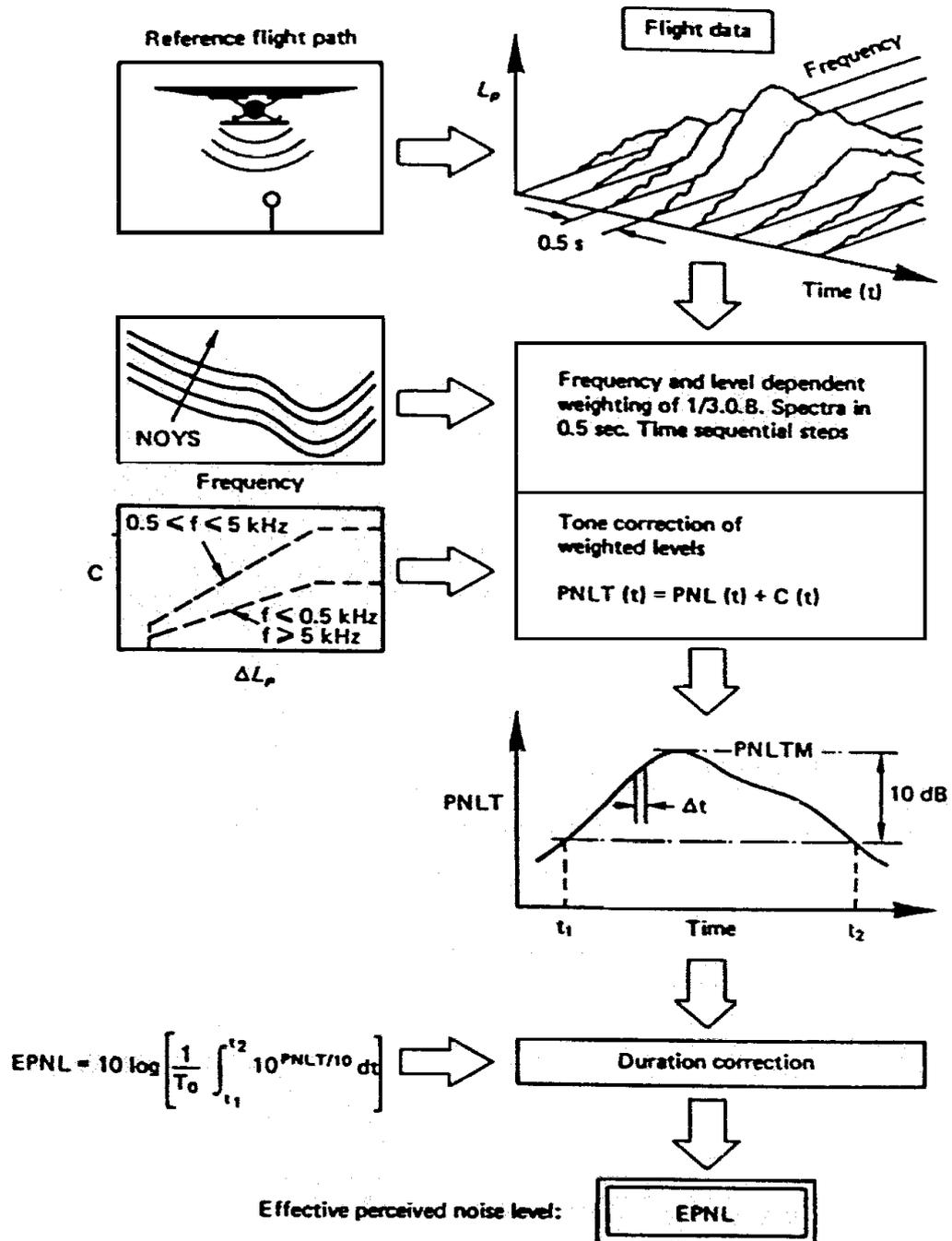


Fig. 5 - Schema semplificato del calcolo di  $L_{EPN}$  a partire da un multispettro

Onde valutare le differenze fra l'analisi multi-spettro secondo lo schema previsto dalla definizione di  $L_{EPN}$  e quella semplificata basata sulle curve "A" e "D", per i due eventi di sorvolo già utilizzati è stato operato un campionamento multispettro secondo le prescrizioni della norma ISO 3891. La figura 6 riporta i multispettri dell'atterraggio del DC-9 e del decollo del Fokker 50, sotto forma di diagrammi "Waterfall".

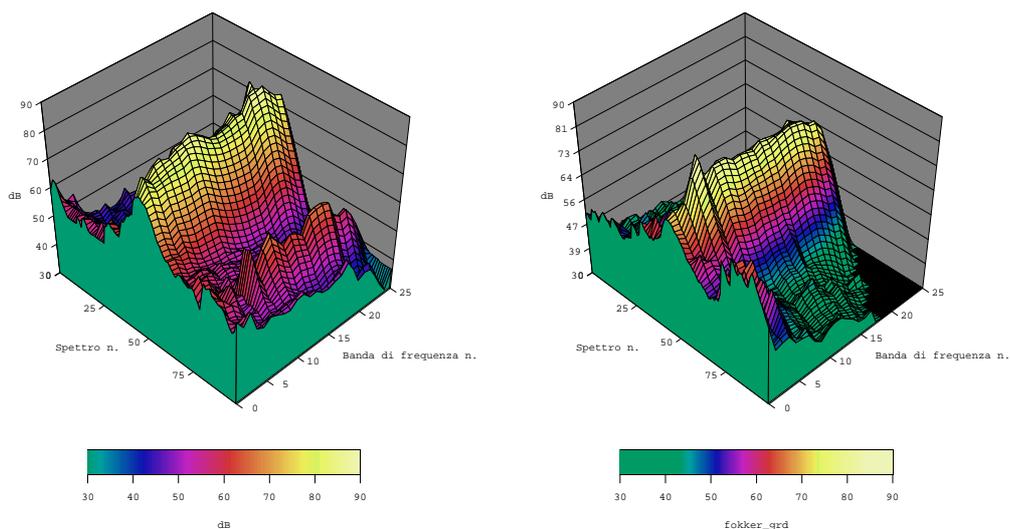


Fig. 6 - Multispettri in bande di 1/3 d'ottava, con costante di tempo SLOW, campionati ogni 0.5s.

Una differente rappresentazione degli stessi dati è costituita dal sonogramma: la fig. 7 riporta il sonogramma derivante dall'analisi in 1/3 d'ottava del primo evento (atterraggio del DC-9), a confronto con il sonogramma ottenuto da una analizzatore FFT. Analogamente la fig. 8 riporta i due sonogrammi per l'evento di decollo del Fokker 50.

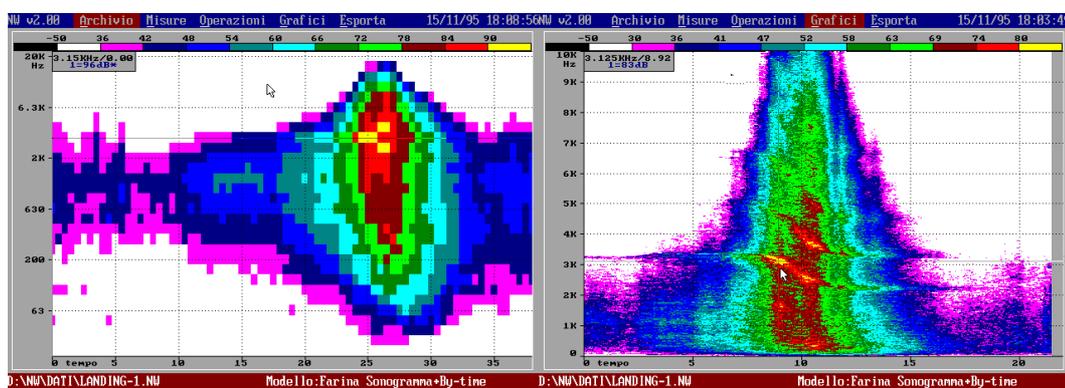


Fig. 7 - Confronto fra sonogramma in terzi d'ottava (con ponderazione "A" e scala delle frequenze logaritmica) e sonogramma FFT (ponderazione lineare e scala delle frequenze pure lineare) - atterraggio di un DC-9.

E' chiaro come dall'analisi FFT sia possibile evidenziare in maggior dettaglio alcune componenti tonali del rumore, che manifestano chiaramente l'effetto Doppler (variazione della frequenza del tono puro). Tuttavia dall'analisi FFT risulta decisamente più laborioso il calcolo di LTPN, e pertanto solitamente si preferisce impiegare semplicemente l'analisi in terzi d'ottava.

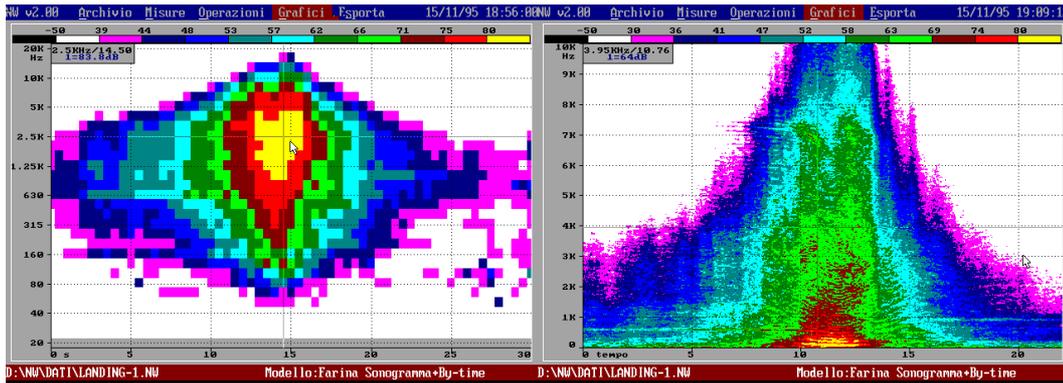


Fig. 8 - Confronto fra sonogramma in terzi d'ottava (con ponderazione "A" e scala delle frequenze logaritmica) e sonogramma FFT (ponderazione lineare e scala delle frequenze pure lineare) - decollo di un Fokker 50.

Nel caso in esame, i calcoli necessari alla valutazione del profilo di  $L_{TPN}$  sono stati eseguiti con un apposito programma su PC; in tal modo è stato possibile porre a confronto direttamente i profili temporali ponderati "A" e "D" con quello di  $L_{TPN}$ . La fig. 9 riporta tale confronto per l'atterraggio del DC-9, mentre la fig. 10 è relativa al decollo del Fokker-50.

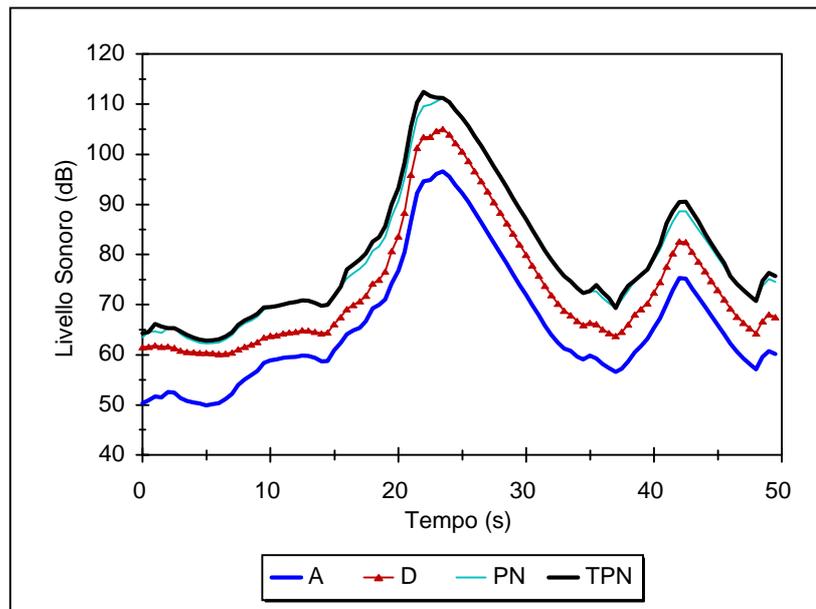


Fig. 9 - Profili temporali del livello sonoro ponderato "A" e "D", a confronto con quelli del Perceived Noise Level (PN) e del Tone-corrected Perceived Noise Level (TPN) - Atterraggio di un DC-9

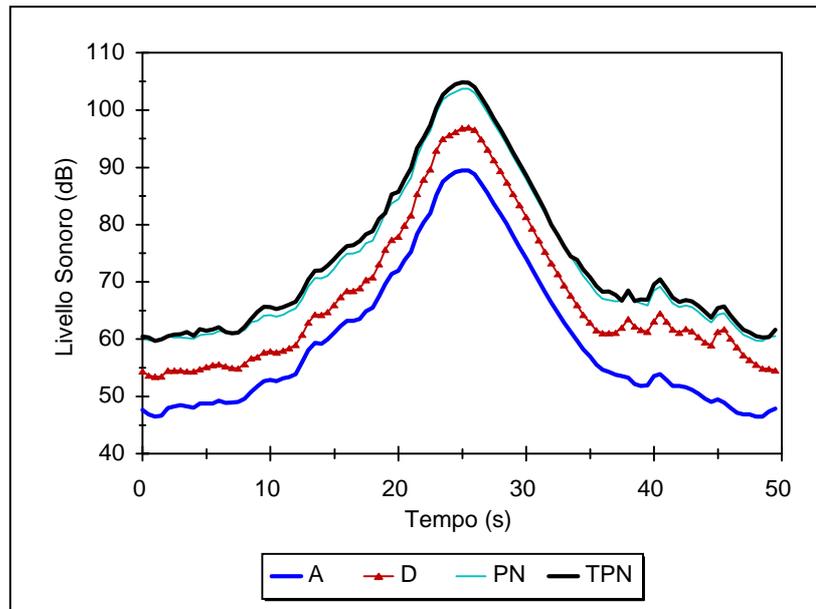


Fig. 10 - Profili temporali del livello sonoro ponderato “A” e “D”, a confronto con quelli del Perceived Noise Level (PN) e del Tone-corrected Perceived Noise Level (TPN) - Decollo di un Fokker-50

Si osserva che rispetto alla curva del LTPN, quella del dB(A) corre mediamente 13.9 dB più in basso, mentre quella del dB(D) è più in basso di solo 7 dB; queste differenze sono pressochè invariate per entrambi i sorvoli, e corrispondono bene con i valori riportati in bibliografia.

Dall’elaborazione dei profili sono quindi stati ottenuti i valori di singolo evento  $SEL_A$ ,  $SEL_D$  e  $L_{EPN}$ , che vengono riportati nella seguente tabella:

Aereo	$SEL_A$	$SEL_D$	$L_{EPN}$
DC-9	101.4	109.9	107.3
Fokker 50	95.4	102.8	100.6

Si conclude dunque che i valori di  $L_{EPN}$  possono venire stimati con buona precisione dal  $SEL_D$ , aggiungendo i 7 dB che separano i valori di  $L_{TPN}$  da quelli in dB(D), e togliendo poi i 10 dB causati dalla normalizzazione su un tempo di 10s anzichè 1s. Una stima solo leggermente meno precisa si ottiene dal  $SEL_A$ , cui è necessario mediamente aggiungere 14 dB onde compensare la differenza fra i due profili temporali, ma cui come prima occorre poi togliere 10 dB per tenere conto del tempo di riferimento di 10 s. A rigore queste stime semplificate non tengono conto della correzione tonale, ma poichè la stessa è quasi sempre modesta, come mostrato dalle figg. 8 e 9, esse portano ad una sottostima di  $L_{EPN}$  di 1-2 dB al massimo.

Attualmente non esistono strumenti portatili in grado di eseguire automaticamente, in tempo reale la complessa procedura matematica che consente di passare dal multispettro al profilo di  $L_{TPN}$ , e da questo al valore di singolo evento  $L_{EPN}$ . Sono però disponibili tre diverse tecniche di misura, basate su strumentazione di comune reperibilità:

- Fonometro (o microfono) collegato ad un registratore DAT, e successiva analisi in laboratorio della registrazione mediante analizzatore di spettro e PC.

- Analizzatore portatile in tempo reale con memoria, e successiva analisi dopo scaricamento dei dati su PC con apposito software.
- Postazione (semi)permanente con analisi in tempo reale dello spettro, e sua trasmissione in tempo reale o in differita ad un sistema di elaborazione remoto via cavo o via radio.

Tutte le elaborazioni presentate nel presente lavoro sono tratte da registrazioni DAT e successiva rielaborazione in laboratorio: questa tecnica in effetti è l'unica che consente la rielaborazione dello stesso evento sonoro con metodologie diverse, che è pertanto stato possibile confrontare. Va tuttavia segnalato che, per effettuare monitoraggi in continua in prossimità di un aeroporto, l'impiego delle altre due tecniche è più pratico e richiede minor intervento da parte dell'operatore: la terza tecnica, in particolare, richiede soltanto l'effettuazione di verifiche periodiche di funzionamento del sistema, che diviene in pratica del tutto automatico.

Riguardo la registrazione DAT con fonometro, va osservato che è possibile effettuare la registrazione con la ponderazione "A" inserita. Ciò ha il vantaggio di estendere il campo dinamico della catena strumentale, evitando il sovraccarico alle frequenze più basse causato dal rumore del vento sul microfono. Ovviamente la ponderazione "A" deve venire rimossa matematicamente dagli spettri, prima di operare il calcolo di  $L_{TPN}$  secondo lo schema riportato in appendice.

In alternativa, è possibile estendere il campo dinamico del registratore operando la registrazione simultaneamente sui due canali dello strumento, avendo cura di inserire un attenuatore di 20 o 30 dB su uno dei due canali: in tal modo è possibile usare l'altro per monitorare con accuratezza il rumore residuo prima e dopo il sorvolo, mentre il canale attenuato non andrà in sovraccarico durante il sorvolo anche se vengono raggiunti livelli molto elevati. Se la restituzione della registrazione viene poi effettuata in laboratorio tramite un analizzatore di spettro bicanale opportunamente predisposto, questa tecnica di "doppia registrazione" non comporta alcun aggravio dei tempi di elaborazione.

## **2. Omologazione dei velivoli sulla base dell'Annesso 16 - ICAO**

L'annesso 16 alla Convenzione dell'Aviazione Civile Internazionale (ICAO) [2] comprende gli Standard Internazionali e la Pratiche Raccomandate (leggasi valori limite) relativi alla Protezione Ambientale. In particolare, il Volume I riguarda il rumore degli aeromobili.

E' prevista la certificazione acustica di ogni aeromobile, quale estensione delle prove richieste per il rilascio del Certificato di Idoneità alla Navigazione Aerea. Tuttavia le prove richieste, ed i limiti di accettabilità dei valori riscontrati, dipendono dal tipo di aeromobile e dalla data in cui il Certificato di Idoneità alla Navigazione Aerea è stato rilasciato la prima volta.

La prima grossa distinzione fra diversi tipi di aeromobili riguarda il tipo di propulsione e la massa al decollo: per aeromobili con propulsione a getto, o turbofan, nonché per quelli ad elica con massa superiore a 5700 kg si applica la procedura di prova più rigorosa, basata sulla misura dell'  $L_{EPN}$  in 3 diverse posizioni, durante manovre sia di atterraggio che di decollo. Tale procedura verrà dettagliatamente descritta nel seguito. Viceversa, per aerei con propulsione ad elica e massa al decollo inferiore a 5700 kg viene impiegata una procedura semplificata, basata su un solo punto di rilevamento, in cui viene determinato il livello massimo in dB(A).

I limiti di rumorosità cui occorre sottostare dipendono poi sia dalla data di prima omologazione del velivolo, sia dalla massa al decollo e da dettagli relativi al tipo di propulsione.

Sono poi previste ulteriori categorie di velivoli, quali gli aerei supersonici e gli elicotteri, che non vengono qui presi in considerazione. E' infine prevista la determinazione delle emissioni sonore prodotte dall'apparecchio fermo sulla pista, con dispositivi di potenza ausiliari (APU) in funzione.

### **2.1 Procedura per la certificazione di aeroplani subsonici a getto o ad elica di massa superiore a 5700 kg.**

La fig. 11 riporta lo schema di massima dei rilievi acustici necessari in fase di certificazione di questo tipo di aeromobili, che comprende la gran parte di velivoli adibiti al trasporto civile di persone e cose:

Sono definite tre postazioni di rilievo: il punto di "flyover" è situato a 6500m dal punto di rilascio freni, sotto la linea di volo. Non viene specificata in alcun modo la quota ed il rateo di salita dell'apparecchio sopra il punto di misura, ma è necessario che vengano seguite le procedure di sicurezza per il decollo come specificate sul manuale dell'apparecchio. In tal modo si costringe il costruttore a specificare una procedura standard tale da minimizzare l'emissione sonora sul punto di "flyover", anche se questo ovviamente non garantisce la minimizzazione dell'emissione lungo tutto il tratto sorvolato in fase di decollo.

Il secondo punto di rilievo è definito in relazione alla procedura di atterraggio, e si trova sul prolungamento della pista, nella posizione in cui l'apparecchio ha una quota di 120m: poichè la discesa verso la pista è effettuata ad un'angolo fisso di  $3^\circ$ , il punto di "approach" è solitamente situato ad una distanza di 2000m dalla testata, ipotizzando che il punto di intersezione fra la linea inclinata di discesa e la pista stessa sia situato 300 m oltre la testata. In questo caso la posizione del velivolo rispetto al punto di rilievo, e la sua traiettoria, sono ben specificate: resta come unica variabile la spinta applicata dai motori, che tuttavia non può venire volontariamente ridotta in corrispondenza del sorvolo della postazione di misura,

ma deve venire viceversa mantenuta costante, ad un valore compatibile con le istruzioni di sicurezza dell'apparecchio.

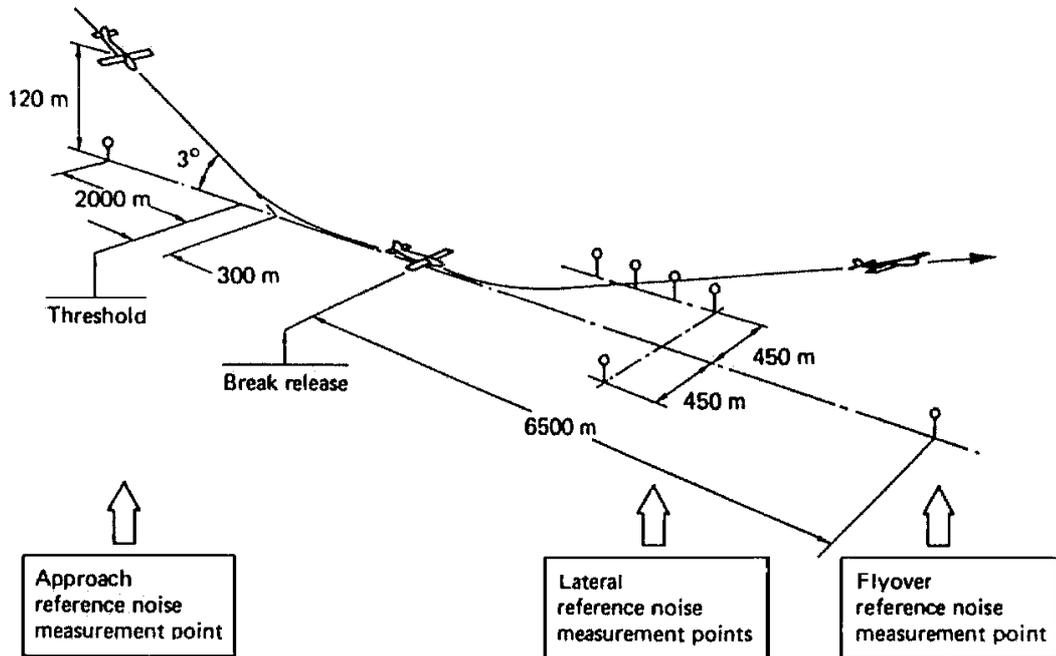


Fig. 11 Punti di rilievo acustico per la certificazione di aeromobili subsonici con massa al decollo maggiore di 5700 kg.

Di più difficoltosa determinazione è la posizione del terzo punto di rilievo ("Lateral"), definito come il punto, situato lungo una linea che corre parallela all'asse della pista, ad una distanza di 450m, in cui viene rilevata la massima rumorosità durante il decollo dell'apparecchio. Pertanto è necessario installare svariate postazioni microfoniche, onde determinare sperimentalmente la posizione di massima rumorosità.

In ciascun punto di rilievo è necessario ottenere 6 rilevamenti validi, cioè privi di contaminazione da rumori estranei, e con condizioni metereologiche comprese nel campo di accettabilità specificato. E' interessante notare come le norme ICAO prevedano l'impiego di microfoni a pressione, orientati in modo tale che la traiettoria del velivolo giaccia tangente al diaframma del microfono (lo stesso dunque non "punta" verso il velivolo, ma è orientato a 90° rispetto allo stesso): ad esempio, nelle posizioni di "flyover" e "approach" il microfono è montato ad asse orizzontale, orientato perpendicolarmente all'asse della pista.

Il segnale proveniente dal microfono è processato come illustrato nel paragrafo precedente, in modo da fornire il valore di  $L_{EPN}$ . Al valore misurato vengono apportate correzioni per tenere conto delle condizioni atmosferiche e della effettiva massa del velivolo, onde riportare tutto all'ipotesi di temperatura 25°C, umidità relativa del 70% e massa uguale al valore nominale come da certificato di idoneità alla navigazione aerea.

Il valore medio dei 6 rilievi validi deve risultare inferiore, in ciascun punto, al valore massimo ammissibile per la classe dell'apparecchio in esame: è tuttavia consentito un "conguaglio" fra i livelli nelle 3 posizioni, a patto che:

- In nessun punto il valore limite sia superato di oltre 3 dB

- La somma dei superamenti sia inferiore a 4 dB
- Il superamento in un punto sia compensato da riduzioni pari o superiori negli altri punti.

## **2.2 Valori limite di $L_{EPN}$ per aeromobili subsonici a getto o ad elica di massa superiore a 5700 kg.**

I valori limite dipendono anzitutto dalla data di richiesta del Certificato di Idoneità alla Navigazione Aerea: se esso è stato richiesto in data antecedente al 6 ottobre 1977 vengono consentiti livelli di rumorosità più alti, ed in particolare:

- Punto di rilievo “lateral” e “approach”:  $L_{EPN} \leq 108$  dB per massa al decollo  $\geq 272000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 102 dB a 34000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
- Punto di rilievo “flyover”:  $L_{EPN} \leq 108$  dB per massa al decollo  $\geq 272000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 5dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 93 dB a 34000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante

Se però da aerei di questo tipo vengono derivate nuove versioni, per le quali è stata avviata la procedura di rilascio di una nuova certificazione dopo il 26 Novembre 1981, si applicano limiti più restrittivi:

- Punto di rilievo “lateral”:  $L_{EPN} \leq 106$  dB per massa al decollo  $\geq 400000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2.56 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 97 dB a 35000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
- Punto di rilievo “approach”:  $L_{EPN} \leq 108$  dB per massa al decollo  $\geq 280000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2.33 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 101 dB a 35000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
- Punto di rilievo “flyover”:  $L_{EPN} \leq L_{MAX}$  dB per massa al decollo  $\geq 325000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 4 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 93 dB, al disotto dei quali il limite rimane costante; il valore di  $L_{MAX}$  dipende dal numero di motori del velivolo: 104 dB per 1 o 2 motori, 107 dB per 3 motori e 108 dB per 4 o più motori. Si precisa che, nel caso il limite derivante da questa relazione risultasse più elevato di quello specificato per l'apparecchio originale, continua sempre a valere il più restrittivo dei due.

Per quanto riguarda infine gli aeroplani di omologazione più recente, per cui la procedura di certificazione del prototipo è stata avviata dopo il 6 ottobre 1977, valgono limiti ancora più restrittivi, ed in particolare:

- Punto di rilievo “lateral”:  $L_{EPN} \leq 103$  dB per massa al decollo  $\geq 400000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2.56 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 94 dB a 35000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
- Punto di rilievo “approach”:  $L_{EPN} \leq 105$  dB per massa al decollo  $\geq 280000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2.33 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 98 dB a 35000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
- Punto di rilievo “flyover”:  $L_{EPN} \leq L_{MAX}$  dB per massa al decollo  $\geq 385000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 4 dB per

ogni dimezzamento di massa, fino a 89 dB, al disotto dei quali il limite rimane costante; il valore di  $L_{MAX}$  dipende dal numero di motori del velivolo: 101 dB per 1 o 2 motori, 104 dB per 3 motori e 106 dB per 4 o più motori.

I limiti di cui sopra si riferiscono ad aeroplani a getto o turbofan. Per gli aeroplani ad elica di massa superiore ai 5700 kg, si applicano ancora gli stessi limiti, con le seguenti specificazioni:

1. i limiti più elevati sono applicabili ad aerei ad elica per cui la procedura di certificazione è iniziata prima del 6 ottobre 1977, e che hanno ottenuto il certificato entro il 26 novembre 1981.
2. I limiti più bassi sono applicabili agli aerei ad elica per i quali è stata avviata la procedura di certificazione dopo il 1 gennaio 1985.
3. Per gli aerei ad elica la cui procedura di certificazione è stata avviata nella “finestra” compresa fra il 6 ottobre 1977 ed il 1 gennaio 1985 valgono limiti specifici, ed in particolare:
  - Punto di rilievo “lateral”:  $L_{EPN} \leq 103$  dB per massa al decollo  $\geq 385000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 96 dB a 34000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
  - Punto di rilievo “approach”:  $L_{EPN} \leq 105$  dB per massa al decollo  $\geq 385000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 2 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 98 dB a 35000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante
  - Punto di rilievo “flyover”:  $L_{EPN} \leq 106$  dB per massa al decollo  $\geq 359000$  kg, con riduzione lineare con il logaritmo della massa di 5 dB per ogni dimezzamento di massa, fino a 89 dB a 34000 kg, al disotto dei quali il limite rimane costante.

Va infine notato che i limiti suddetti non sono applicabili a:

- aeroplani STOL (lunghezza di rullaggio inferiore a 610m), cui si applicano procedure e limiti specifici.
- aeroplani con propulsione turbofan con rapporto di diluizione pari o superiore a 2, dotati di certificato di idoneità rilasciato prima del 1 marzo 1972.
- aeroplani con propulsione turbogetto puro o turbofan con rapporto di diluizione inferiore a 2, per cui la procedura di certificazione è iniziata prima del 1° gennaio 1969 e che abbiano ricevuto il certificato di idoneità prima del 1° gennaio 1976.

### **2.3 Procedura per la certificazione di aeroplani ad elica di massa inferiore a 5700 kg e relativi limiti.**

Nel caso di piccoli velivoli ad elica è richiesta una procedura di rilievo molto più semplificata, basata su un unico punto di rilievo situato al di sotto di una traiettoria orizzontale di volo, alla quota nominale di 300m, come indicato dalla fig. 12. Il motore dell'aereo deve operare al regime di rotazione massimo nominale, se ciò è compatibile con la velocità massima dell'apparecchio. Se viceversa ciò non è possibile, l'aereo deve essere portato sopra il punto di rilievo, alla quota di 300m, con una manovra in salita di pendenza tale da consentire il funzionamento del motore al regime massimo senza che venga superata la velocità massima di volo.

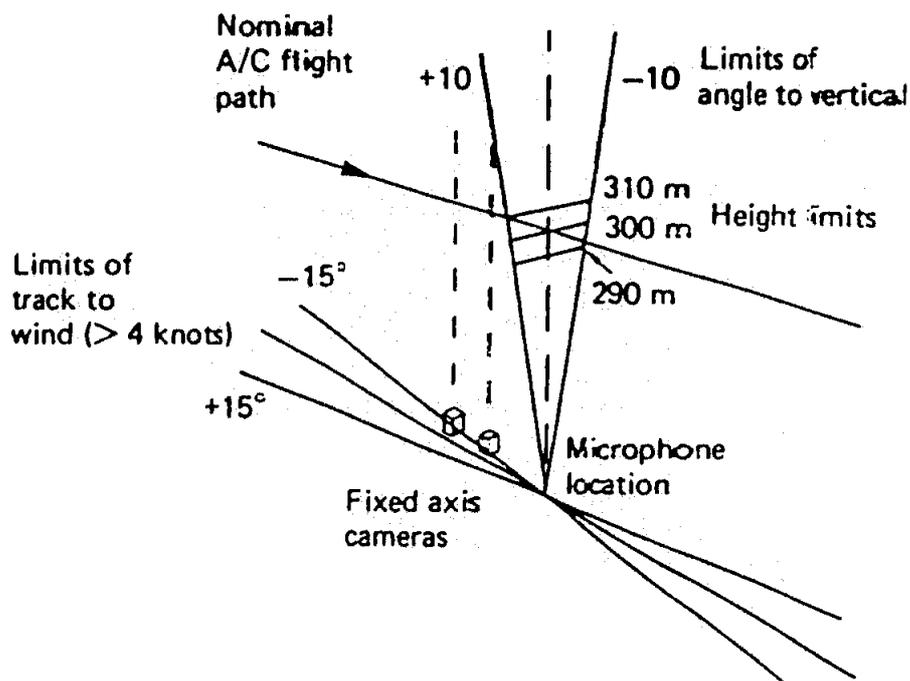


Fig. 11 - posizione di rilievo e tolleranze per la certificazione di aeroplani ad elica con peso inferiore a 5700 kg.

Anche in questo caso debbono venire misurati 6 valori validi di  $L_{A,max}$ , ma in questo caso sono necessarie procedure relativamente complesse di correzione del valore misurato onde ottenere il valore di LAM, che deve sottostare i limiti previsti per questo tipo di apparecchi. In particolare, come illustrato dalla fig. 12, viene anzitutto applicata una correzione per tenere conto dell'effettiva quota di sorvolo, qualora la stessa non fosse esattamente pari a 300m. Inoltre nel caso la velocità delle pale dell'elica, espressa dal relativo numero di Mach, sia risultata diversa da quella nominale corrispondente al regime di rotazione massimo, è necessario apportare una ulteriore correzione in base a dati approvati.

Occorre infine applicare una correzione ("Performance correction") basata sulla capacità di rapida ascensione dell'apparecchio, che dipende sia dalla lunghezza del decollo  $D_{15}$  (distanza dal punto rilascio freni in cui l'apparecchio raggiunge la quota di 15m), sia dal rateo di salita espresso dal rapporto fra la componente verticale della velocità e ed il suo modulo.

Per quanto riguarda infine i limiti di rumorosità per gli aerei ad elica di massa inferiore a 5700 kg, essi sono i seguenti:

Limite costante di 68 dB(A) fino ad una massa di 600 kg, indi variazione del limite lineare con la massa (non con il suo logaritmo) fino a 80 dB(A) a 1500 kg, dopodichè il limite rimane costante fino alla massa limite di 5700 kg.

Anche per gli aerei ad elica esistono date di partenza per l'entrata in vigore dei limiti: essi sono infatti applicabili solo per i velivoli la cui procedura di certificazione sia iniziata dopo il 1° gennaio 1975, o che comunque abbiano ottenuto il Certificato di Idoneità alla Navigazione Aerea dopo il 1° gennaio 1980.

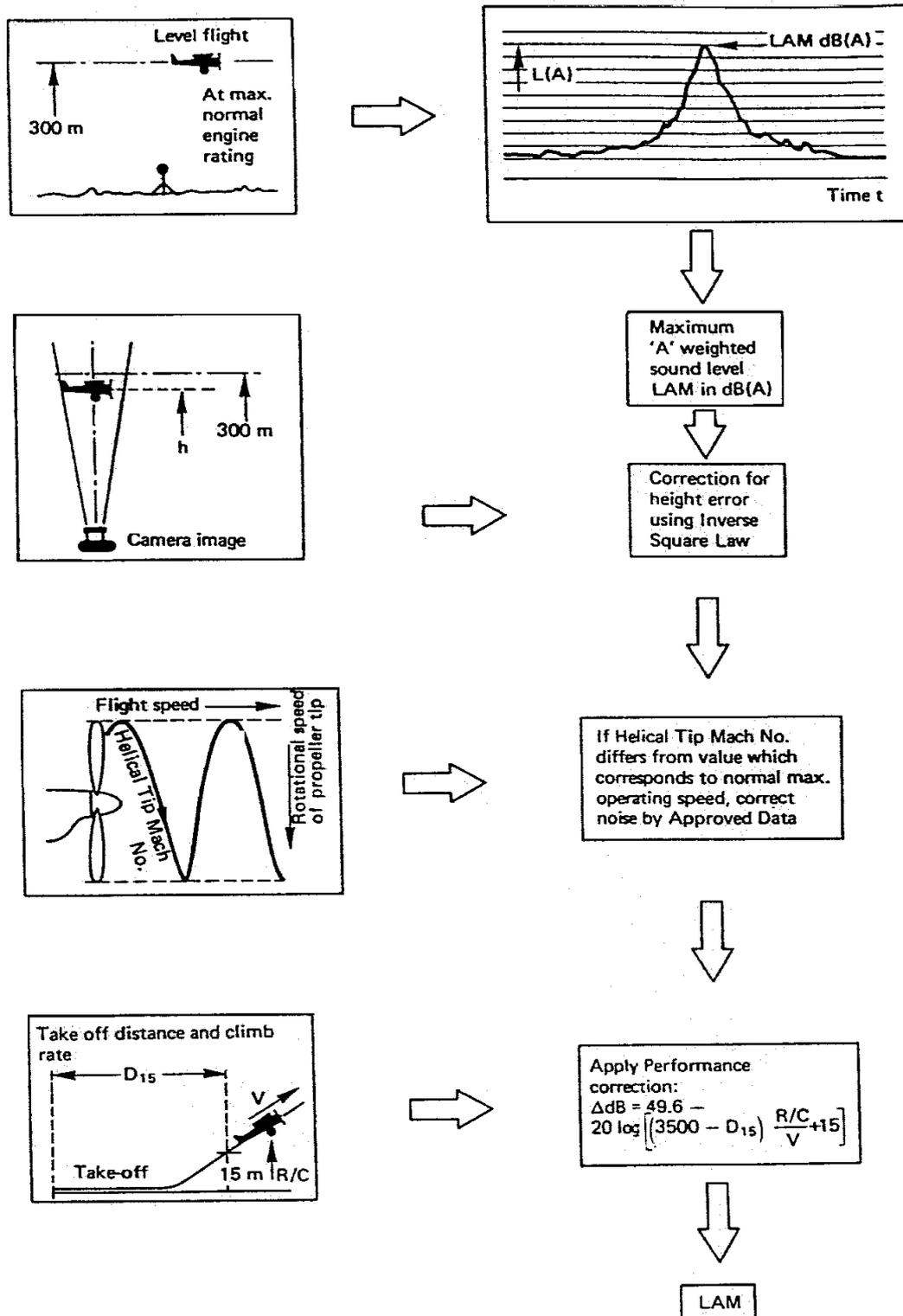


Fig. 12 - Diagramma di flusso per la certificazione acustica degli aerei ad elica con massa inferiore a 5700 kg.

### 3. Dai valori di singolo evento ad una stima dell'impatto delle operazioni di sorvolo sul territorio

Nel presente paragrafo non si vuole certo analizzare il complesso problema della modellizzazione acustica del rumore emesso dai velivoli. Si tratta semplicemente di presentare e discutere i diversi descrittori matematici di impatto acustico aeronautico, come previsti da varie normative internazionali e nazionali, e porli a confronto con la situazione legislativa italiana, recentemente modificata dall'entrata in vigore della Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico.

La base di tutte le grandezze atte a descrivere l'impatto di numerose operazioni di volo aventi luogo nell'arco delle 24 ore è la definizione di un descrittore numerico che tenga conto sia del numero, che dell'intensità dei singoli eventi rumorosi, applicando sovente una "penalizzazione" per gli eventi situati nel periodo serale o notturno. La seguente tabella, tratta da [4], riporta in maniera succinta i principali descrittori in vigore in vari paesi :

Paese	Espressione
Nome	Note
Gran Bretagna	$NNI = 15 \cdot \lg \left( \sum_{i=1}^{N_{06:18}} 10^{\left( \frac{L_{TPN,max,i}}{15} \right)} \right) - 80$
Noise and Number Index - NNI	Calcolato usando il traffico medio del periodo metà giugno - metà ottobre, considerando solo le ore dalle 06 alle 18.
Germania	$Q = 13.3 \cdot \lg \left[ \sum_i \frac{t_i}{T} \cdot 10^{\left( \frac{L_i}{13.3} \right)} \right]$
Storindex - Q	Gli eventi notturni (dalle 22 alle 6) vanno penalizzati di 5 dB - Si sommano tutti gli eventi dei 6 mesi più trafficati dell'anno - $t_i$ è la durata convenzionale dell'evento, $L_i$ è il livello massimo Slow di ciascun evento - T è la durata in s dell'intero periodo di integrazione (6 mesi)
Francia	$I = 10 \cdot \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{\left( \frac{L_{TPN,max,i}}{10} \right)} + \sum_{j=1}^p 10^{\left( \frac{L_{TPN,max,j}+10}{10} \right)} \right) - 32$
Indice Psophique - I	n è il numero degli eventi diurni (06-22), p è il numero di eventi notturni, che vengono penalizzati di 10 dB
Olanda	$B = 20 \cdot \lg \left( \sum_i W_i \cdot 10^{\left( \frac{L_{A,max,i}}{15} \right)} \right) - 157$
Noise Exposure - B	I fattori di peso $W_i$ sono i seguenti: 10 dalle 23 alle 6, 8 dalle 6 alle 7, 4 dalle 7 alle 8, 1 dalle 8 alle 18, 2 dalle 18 alle 19, 3 dalle 19 alle 20, 4 dalle 20 alle 21, 6 dalle 21 alle 22, 8 dalle 22 alle 23.
ISO 3891	$L_{PNeq} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{10s}{T} \cdot \sum_k 10^{\left( \frac{L_{EPN,k}}{10} \right)} \right]$
Equivalent Perceived Noise Level - $L_{PNeq}$	Questo valore corrisponde all' ECPNL definito nell'Annesso 16 ICAO, e può venire calcolato separatamente per il giorno e la notte

USA	$NEF = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{i=1}^{n_D} 10^{\left(\frac{L_{EPN,i}}{10}\right)} + 16.67 \cdot \sum_{i=1}^{n_N} 10^{\left(\frac{L_{EPN,i}}{10}\right)} \right] - 88$
Noise Exposure Forecast - NEF	$n_D$ è il numero di eventi diurni (07-22), $n_N$ è il numero di eventi notturni.
USA	$L_{DN} = 10 \cdot \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_D} 10^{\left(\frac{SEL_{A,i}}{10}\right)} + \sum_{i=1}^{n_N} 10^{\left(\frac{SEL_{A,i}+10}{10}\right)}}{24 \cdot 3600} \right)$
Day-Night Level - $L_{DN}$	$n_D$ è il numero di eventi diurni (07-22), $n_N$ è il numero di eventi notturni.
Danimarca	$L_{DEN} = 10 \cdot \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_D} 10^{\left(\frac{SEL_{A,i}}{10}\right)} + \sum_{i=1}^{n_E} 10^{\left(\frac{SEL_{A,i}+5}{10}\right)} + \sum_{i=1}^{n_N} 10^{\left(\frac{SEL_{A,i}+10}{10}\right)}}{24 \cdot 3600} \right)$
Day-Evening-Night Level - $L_{DEN}$	$n_D$ è il numero di eventi diurni (07-19), $n_E$ è il numero di eventi serali (19-22), $n_N$ è il numero di eventi notturni.
Italia	$WECPNL = 10 \cdot \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_D} 10^{\left(\frac{L_{EPN,i}}{10}\right)} + \sum_{i=1}^{n_E} 10^{\left(\frac{L_{EPN,i}+5}{10}\right)} + \sum_{i=1}^{n_N} 10^{\left(\frac{L_{EPN,i}+10}{10}\right)}}{24 \cdot 3600/10} \right) + S$
Weighted equivalent continuous perceived noise level - WECPNL	$n_D$ è il numero di eventi diurni (07-19), $n_E$ è il numero di eventi serali (19-22), $n_N$ è il numero di eventi notturni. Il termine S rappresenta il fattore di correzione stagionale, pari a +5 dB nei mesi caldi (più di 100 ore con temperatura maggiore di 25.6 °C), - 5 dB nei mesi freddi (meno di 100 ore con temperatura maggiore di 20°C), 0 dB negli altri mesi. Questo parametro è definito anche nell'Annesso 16 ICAO-
EEC and ISO 3891	$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T} \cdot \sum_k 10^{\left(\frac{SEL_{A,k}}{10}\right)} \right]$
Equivalent Level - $L_{Aeq}$	Questo valore può venire calcolato separatamente per il giorno la notte

Come si vede, alcuni di questi descrittori sono definiti a partire dai valori massimi anzichè dai valori di singolo evento. Inoltre in certi casi non è rispettata l'equivalenza energetica (due eventi di 100 dB non hanno lo stesso effetto di un evento di 103 dB), e pertanto il risultato non può essere considerato un "Livello Equivalente".

Nell'analisi che segue verranno considerati soltanto i descrittori che rispettano l'equivalenza energetica, definiti a partire da valori di singolo evento: essi sono  $L_{PNeq}$ ,  $L_{DN}$ , WECPNL e  $L_{Aeq}$ ; di essi 2 si basano su rilievi di  $L_{EPN}$  ( $L_{PNeq}$  e WECPNL), mentre gli altri 2 ( $L_{DN}$  e  $L_{Aeq}$ ) si basano su valori del SEL in ponderazione A. Inoltre, 2 di questi descrittori prevedono un calcolo separato per il giorno e per la notte ( $L_{PNeq}$  e  $L_{Aeq}$ ), mentre gli altri 2 ( $L_{DN}$  e WECPNL) combinano

assieme gli eventi di tutte le 24 ore, applicando opportune penalizzazioni agli eventi avvenuti nei periodi più disturbanti.

Ovviamente non esiste un procedimento matematico esatto che fornisce il legame analitico fra questi 4 descrittori. Tuttavia è noto su base sperimentale che in media il valore di  $L_{PNeq}$  è più elevato del corrispondente valore di  $L_{Aeq}$  di circa 14 dB (per la precisione di 13 dB per gli eventi di decollo e di 15 dB per gli eventi di atterraggio), ed analogamente in media esiste la stessa differenza fra valori di WECPNL e di  $L_{DN}$  (con qualche approssimazione in più legata ai diversi periodi di suddivisione del giorno e della notte).

La attuale legislazione italiana vede da un lato l'esistenza di Circolari del Ministero dei Trasporti - Direzione Generale dell'Aviazione Civile [3], che sanciscono l'impiego dell'EWCPNL come descrittore del rumore in prossimità degli aeroporti civili, ai fini della regolamentazione d'uso del territorio circostante. Dall'altro lato la recentissima Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico, pur non recando disposizioni specifiche relative al rumore aeronautico, ricomprende tale fonte di emissione sonora fra quelle normate dalla legge, superando così l'esplicita esclusione contenuta nel DPCM 1 marzo 1991. In attesa della specifica Circolare Attuativa prevista dalla Legge Quadro, non resta che osservare come la stessa preveda in generale l'impiego della curva di ponderazione "A" e del Livello Equivalente riferito ai periodi diurno e notturno quali descrittori della rumorosità ambientale nel territorio, con limiti massimi differenziati per i due periodi diurno (06-22) e notturno.

#### **4. Conclusioni**

In base all'analisi sviluppata, pare congruo assumere il  $SEL_A$  come descrittore acustico primario di ciascun evento di sorvolo: esso è facilmente misurabile con strumentazione di basso costo, è deducibile con buona approssimazione dai dati di certificazione acustica degli aeromobili, e a partire dai valori di  $SEL_A$  possono venire facilmente calcolati i valori di  $L_{eq}$  del periodo diurno e notturno, nonché (ove richiesto) il valore di  $L_{DN}$ . Inoltre anche la stima di descrittori di impatto acustico basati su valori di  $L_{EPN}$ , quali EWCPNL, può essere effettuata con ragionevole approssimazione in base ai dati di  $SEL_A$ .

In base a quanto illustrato nel par. 1, il  $SEL_A$  è un parametro molto "robusto", in quanto viene misurato in modo pressochè invariante con strumentazioni e metodologie di rilievo molto diverse, indipendentemente dalla costante di tempo impostata e dalla più o meno accurata definizione degli istanti di inizio e fine dell'evento.

Sebbene alcune normative nazionali prevedano invece come descrittore acustico primario il Livello Massimo Istantaneo (ponderato "A" o in  $L_{TPN}$ ), si osserva che tale scelta rende più difficoltoso il calcolo accurato dei descrittori energetici (Livelli Equivalenti), rende estremamente critica sia la scelta della costante di tempo dello strumento, sia la definizione dell'esatta durata convenzionale dell'evento, e porta infine a criteri di valutazione del rumore aeronautico completamente difforni di quelli già in vigore per la valutazione del rumore prodotto da altre sorgenti (strade, ferrovie, fabbriche, etc.).

## 5. Appendice - Procedura per il calcolo di un profilo di $L_{TPN}$ a partire da un multispettro in terzi d'ottava

Viene qui illustrata una procedura per calcolatore, realizzata in linguaggio Quick-Basic, che opera il calcolo dei valori istantanei di  $L_{PN}$  e  $L_{TPN}$  a partire dai singoli spettri contenuti in un multispettro. Il listato del programma è commentato in modo da consentire la comprensione del funzionamento.

Comunque la successione delle fasi di calcolo è la stessa illustrata dalla fig. 5, ed in particolare abbiamo:

- Inizializzazione dei dati per la tabella dei PN-dB
- Lettura del multispettro
- Conversione di ciascun livello di ciascuno spettro in PN dB
- Calcolo di  $L_{PN}$  complessivo per ciascuno spettro
- Calcolo della correzione tonale e quindi di  $L_{TPN}$
- Salvataggio dei profili temporali di  $L_{PN}$  e  $L_{TPN}$  in un file.

Con poche modifiche relative alla formattazione del file ASCII di input, il seguente programma può essere adattato al funzionamento con i files prodotti dai più conosciuti analizzatori di spettro.

```
' Programma per il calcolo di LTPN a partire da un multispettro
' © Angelo Farina -1995
' Dimensionamento matrici
DIM L(25,200), Lpn(24), PNL(200), PNLT(200), freq(24), Slope(25)
DIM M1(24), L01(24), M2(24), L02(24), Disc(24), L2(25) , Smed(25)

' Inizializzazione vettori per il calcolo di Lpn
Gosub Inizializza

' Visualizza intestazione e richiesta nome file
CLS
PRINT " Programma per il calcolo di LTPN a partire da un
multispettro "
PRINT "                *** © A.Farina - 1995 ***"
PRINT
INPUT "Nome del file ASCII contenente il multispettro: "; Infile$

' Lettura del multispettro dal file ASCII
OPEN Infile$ FOR INPUT AS #1
FOR i=1 TO 24:
    INPUT #1, freq(i)
    PRINT i, freq(i)
NEXT
Tempo=0
DO WHILE NOT EOF(1)
    Tempo= Tempo +1
    FOR i=1 TO 24: INPUT #1, L(i, Tempo): NEXT
LOOP
CLOSE1

FOR k=1 TO Tempo
' STEP1 - converto i valori di livello di ciascuno spettro in PN dB
    Lpnmax=0
    FOR i=1 TO 24
        GOSUB ComputeLpn
        'Memorizzo il valore massimo di Lpn dello spettro, che
serve poi
        IF Lpn(i) > Lpnmax THEN Lpnmax= Lpn(i)
    NEXT
' STEP2 - combino le varie frequenze
    N = Lpnmax *.85
```

```

FOR i=1 TO 24
    N = N + .15 * Lpn(i)
NEXT

' STEP3 - calcolo il livello totale in PN dB
PNL(k) = 40 + 10 * LOG(N) / LOG(2)

' Ora calcolo la correzione tonale Cmax
GOSUB TonalCorrect

' INFINE CALCOLO il PNL corretto Tonale
PNLT(k)= PNL(k) + Cmax
PRINT k, PNL(k), PNLT(k)
NEXT k

' Salvo il profilo temporale di Lpn e di Ltpn in un nuovo file
' il cui nome è uguale a quello di input, ma con estensione .PRN
dot= INSTR(Infile$, ".")
outfil$= LEFT$(Infile$, dot) + ".PRN"
OPEN outfil$ FOR OUTPUT AS #1
FOR k=1 TO Tempo
    WRITE #1, PNL(k), PNLT(k)
NEXT
CLOSE#1
END

'Subroutines

Inizializza:
' Inizializzazione vettori per il calcolo di Lpn
M1(1)=.04348: L01(1)=64: M2(1)=.0301: L02(1)=52: Disc(1)=92
M1(2)=.04057: L01(2)=60: M2(2)=.0301: L02(2)=51: Disc(2)=86
M1(3)=.03683: L01(3)=56: M2(3)=.0301: L02(3)=49: Disc(3)=86
M1(4)=.03683: L01(4)=53: M2(4)=.0301: L02(4)=47: Disc(4)=80
M1(5)=.03543: L01(5)=51: M2(5)=.0301: L02(5)=46: Disc(5)=80
M1(6)=.03333: L01(6)=48: M2(6)=.0301: L02(6)=45: Disc(6)=76
M1(7)=.03333: L01(7)=46: M2(7)=.0301: L02(7)=43: Disc(7)=74
M1(8)=.03205: L01(8)=44: M2(8)=.0301: L02(8)=42: Disc(8)=75
M1(9)=.03068: L01(9)=42: M2(9)=.0301: L02(9)=41: Disc(9)=95

M1(10)=0: L01(10)=0: M2(10)=.0301: L02(10)=40: Disc(10)=40
M1(11)=0: L01(11)=0: M2(11)=.0301: L02(11)=40: Disc(11)=40
M1(12)=0: L01(12)=0: M2(12)=.0301: L02(12)=40: Disc(12)=40
M1(13)=0: L01(13)=0: M2(13)=.0301: L02(13)=40: Disc(13)=40
M1(14)=0: L01(14)=0: M2(14)=.0301: L02(14)=40: Disc(14)=40
M1(15)=0: L01(15)=0: M2(15)=.0301: L02(15)=38: Disc(15)=38
M1(16)=0: L01(16)=0: M2(16)=.02996: L02(16)=34: Disc(16)=34
M1(17)=0: L01(17)=0: M2(17)=.02996: L02(17)=32: Disc(17)=32
M1(18)=0: L01(18)=0: M2(18)=.02996: L02(18)=30: Disc(18)=30
M1(19)=0: L01(19)=0: M2(19)=.02996: L02(19)=29: Disc(19)=29
M1(20)=0: L01(20)=0: M2(20)=.02996: L02(20)=29: Disc(20)=29
M1(21)=0: L01(21)=0: M2(21)=.02996: L02(21)=30: Disc(21)=30
M1(22)=0: L01(22)=0: M2(22)=.02996: L02(22)=31: Disc(22)=31

M1(23)=.04229: L01(23)=37: M2(23)=.02996: L02(23)=34: Disc(23)=48
M1(24)=.04229: L01(24)=41: M2(24)=.02996: L02(24)=37: Disc(24)=51
RETURN

ComputeLpn:
' Calcolo il valore di Lpn
IF L(i, k) < Disc(i) THEN
    Lpn(i)=10 ^ (M1(i) * (L(i, k) - L01(i)))
ELSE
    Lpn(i)=10 ^ (M2(i) * (L(i, k) - L02(i)))
END IF
RETURN

```

```

TonalCorrect:
' STEP4 - Correzione tonale - calcolo slopes
  FOR i=4 TO 24
    Slope(i)= L(i, k) - L(i -1, k)
  NEXT

  'Preparo il vettore L2
  FOR i=1 TO 24: L2(i)=L(i, k): NEXT

  ' STEP5 - sostituisco ai livelli che producono Slopes
  ' elevate il valore medio delle bande adiacenti
  FOR i=5 TO 23
    IF ABS(Slope(i) - Slope(i -1)) > 5 THEN
      IF (Slope(i) > 0) AND (Slope(i) > Slope(i -1)) THEN
        L2(i)=.5 * (L(i -1, k) + L(i +1, k))
      END IF
      IF (Slope(i) <= 0) AND (Slope(i -1) > 0) THEN
        L2(i -1)=.5 * (L(i -2, k) + L(i, k))
      END IF
    END IF
  NEXT
  IF ABS(Slope(24) - Slope(23)) > 5 THEN
    IF (Slope(24) >0) AND (Slope(24) > Slope(23)) THEN
      L2(24)= L(23, k) + Slope(23)
    END IF
    IF (Slope(24) <=0) AND (Slope(23) >0) THEN
      L2(23)=.5 * (L(22, k) + L(24, k))
    END IF
  END IF

  ' STEP6 ricalcolo le nuove pendenze
  FOR i=4 TO 24
    Slope(i)= L2(i) - L2(i -1)
  NEXT
  Slope(3)= Slope(4)
  Slope(25)= Slope(24)

  'STEP7 - Calcolo la pendenza media Smed
  FOR i=3 TO 23
    Smed(i)= (Slope(i) + Slope(i +1) + Slope(i +2)) /3
  NEXT

  'STEP8 - ricalcolo i livelli sonori stimati
  L2(3)= L(3, k)
  FOR i=4 TO 24
    L2(i)= L2(i -1) + Smed(i -1)
  NEXT

  ' STEP9 - Ora calcolo i valori di F ed i corrispondenti C
  Cmax=0
  FOR i=1 TO 24
    F= L(i, k) - L2(i)
    IF f >3 THEN
      C= F /6: IF F >20 THEN C=3 +1 /3
      IF i >10 AND i <22 THEN
        C= F /3: IF F >20 THEN C=6 +2 /3
      END IF
      IF C > Cmax THEN Cmax= C
    END IF
  NEXT
RETURN

```

## **6. Bibliografia**

- [1] Norma ISO 3891 - 1978 - "Acoustics - Procedure for describing aircraft noise heard on the ground"
- [2] Convention of International Civil Aviation - Annex 16 - "Environmental Protection" - Volume I - ed. 1981 - ICAO, 1000 Sherbrooke Street West, Suite 400, Montreal (Quebec) - Canada
- [3] Circolare Direzione Generale Aviazione Civile del 9/6/1973 n. 45/3030/N.337 e Circolare Direzione Generale Aviazione Civile del 3/7/1978.
- [4] Transportation Noise Reference Handbook, Chapter 19 - "Measurement and Prediction of Aircraft Noise", Mc-Graw-Hill