

GLI ERRORI NELLA MISURA
DEL RUMORE AMBIENTALE

G.Amadasi

S.C.S Controlli e Sistemi

CONCETTI GENERALI DI MISURA E TECNOLOGIE IMPIEGATE DAI VARI SISTEMI DI MISURA E ANALISI

TRASDUTTORI ACUSTICI

Per trasduttore si intende quel dispositivo che è in grado di convertire l'energia da una forma (ad esempio meccanica o elettrica) in un'altra. I trasduttori che si incontrano frequentemente nello studio della fisica acustica sono l'altoparlante che trasforma l'energia elettrica in acustica e il microfono che effettua la trasformazione inversa. Quest'ultimo è il primo dispositivo che si incontra nella catena di misura del suono.

Il microfono in generale è costituito da una parte meccanica (membrana), che viene posta in movimento dalle variazioni di pressione caratteristiche di una perturbazione acustica (suono-rumore) e da un sistema che trasforma tale movimento in variazioni di una determinata grandezza elettrica.

Elementi caratteristici del microfono sono la sensibilità definita come rapporto tra la tensione di uscita e la pressione acustica del campo sonoro; la risposta in frequenza: cioè il modo di variare della sensibilità in funzione della frequenza dell'onda sonora; la direzionalità cioè il modo di variare della sensibilità con la direzione di arrivo del suono.

Esistono vari tipi di microfoni ciascuno dei quali sfrutta principi diversi di funzionamento: microfoni a variazione di resistenza, elettrodinamici, a cristallo e infine quelli di tipo a condensatore detti anche a variazione di capacità che risultano i più affidabili e quindi i più idonei per misure precise.

Il microfono a condensatore è costituito fondamentalmente da una membrana metallica sottilissima e da una placca posteriore rigida: essi insieme costituiscono un vero e proprio condensatore il cui dielettrico è l'aria.

È noto che se ai capi di un condensatore di capacità C applichiamo una tensione di polarizzazione V , sugli elettrodi viene a costituirsi una quantità di carica Q data da:

$$Q = C \times V$$

Inoltre la capacità di un condensatore a facce piane parallele è determinata dalla seguente formula:

$$C = E \frac{S}{d}$$

dove E : costante dielettrica del mezzo

d: distanza fra gli elettrodi

S: superficie degli elettrodi

Sulla base delle relazioni sopra riportate è possibile capire il funzionamento del microfono a condensatore e quindi come avviene la trasformazione di una pressione acustica in tensione elettrica. Applicando agli elettrodi una tensione di polarizzazione costante e sottoponendo il microfono ad un campo acustico, le variazioni di pressione sonora agenti sulla membrana causeranno una variazione della distanza d fra la medesima (che oscillerà) e l'elettrodo posteriore, e una conseguente variazione di capacità che a sua volta comporterà una variazione elettrica. In pratica da una variazione di pressione $p(t)$ si ottiene una variazione di tensione $V(t)$ più facilmente misurabile.

Esistono in commercio anche alcuni microfoni che per funzionare non hanno bisogno della tensione di polarizzazione, i cosiddetti microfoni prepolarizzati i quali hanno subito in laboratorio un processo tramite il quale gli elettrodi vengono caricati stabilmente con una ben definita quantità di carica. Essi sono anche chiamati microfoni a elettrete e sono caratterizzati da un diaframma di polimero, la cui superficie è rivestita da una pellicola di metallo.

La membrana è sensibilissima anche alle più piccole variazioni di pressione a tal punto che riuscirebbe a sentire persino quelle dovute alla pressione atmosferica, ma per evitare che un simile fenomeno possa provocare degli errori di misura, viene praticato un foro dietro l'armatura posteriore, detto di equalizzazione, che rende la pressione statica interna alla capsula uguale a quella esterna.

Riuscire a scegliere un microfono adatto per tutti i tipi di misura è praticamente impossibile in quanto avere una buona sensibilità va a scapito di una buona risposta in frequenza e viceversa. Esistono dunque dei microfoni che rappresentano un buon compromesso fra i vari fattori.

Sensibilità di un microfono

In generale per sensibilità di un certo dispositivo capace di reagire ad una data azione, si intende quel valore minimo dell'azione che riesce a produrre la minima reazione apprezzabile. Nel caso in esame il dispositivo è il microfono, l'azione è la pressione sonora in Pascal e la reazione è una tensione elettrica in volts (o in millivolts). Quanto più grande è la sensibilità tanto più piccolo è il valore minimo di pressione che lo strumento misuratore riesce a percepire sottoforma di tensione elettrica.

La caratteristica di sensibilità in pratica determina il minimo livello di pressione sonora misurabile quindi, per valori di pressione pari alla soglia minima, il segnale elettrico generato si rende indistinguibile dal rumore elettrico preesistente generando così una evidente ambiguità sulla misura.

Dire che un microfono ha una sensibilità di 50 mV/Pa significa che una pressione $p(t)$ di 1 Pa (94 dB rif. 2×10^{-5}) in ingresso al dispositivo produce in uscita una corrispondente tensione elettrica $V(t)$ di 50 mV.

Risposta in frequenza

Supponiamo di avere in ingresso al microfono una pressione acustica la cui frequenza può essere variata con continuità in tutta la gamma da 1 Hz fino a 20.000 Hz, mantenendo però costante il livello di pressione.

Eseguendo la prova è possibile riscontrare alle varie frequenze una certa variabilità della proporzione (definita dalla sensibilità) fra il segnale elettrico che si ottiene in uscita dal microfono e il corrispondente segnale sonoro in ingresso.

Alla luce di quanto descritto è possibile definire la risposta in frequenza di un microfono come la gamma di frequenza in cui la conversione del segnale acustico in segnale elettrico avviene senza che i rapporti di ampiezza pressione/tensione vengano alterati.

L'estensione del su citato intervallo di frequenza, detto anche BANDA PASSANTE, è caratterizzata da una frequenza inferiore ed una superiore, in corrispondenza delle quali il livello della sensibilità si abbassa di 3 dB.

Sia la sensibilità, sia la risposta in frequenza sono strettamente legate alle dimensioni del microfono. In pratica si riscontra che la sensibilità decresce al diminuire del diametro, mentre la gamma utile in frequenza aumenta. È chiaro quindi che l'uso di un microfono che abbia una banda passante molto ampia, paga il prezzo in termini di sensibilità e viceversa.

Per quanto riguarda la risposta in ampiezza, è importante sottolineare che per ogni tipo di microfono esiste un livello di pressione massimo misurabile. Il fatto che esista un limite superiore di ampiezza è dovuto alla membrana del microfono che supera i limiti di elasticità con conseguente introduzione di distorsione.

Esiste un limite superiore della risposta in frequenza dovuta all'interferenza provocata dal corpo del microfono nel campo acustico.

Il limite inferiore in frequenza dipende dal foro di equalizzazione (precedentemente descritto) il quale impedisce che all'interno del microfono ci sia una pressione statica diversa da quella esterna.

Direzionalità

Un altro fattore che caratterizza la qualità di un microfono è l'omnidirezionalità un microfono ideale, posto in un determinato punto di un campo acustico, deve rilevare, senza alcuna attenuazione rispetto alla propria sensibilità le variazioni di pressione, qualsiasi sia la direzione di propagazione del suono.

È possibile in genere notare una diminuzione dell'omnidirezionalità all'aumentare della frequenza a causa dell'interferenza del corpo microfonico con il campo acustico (simile effetto diventa ancora più evidente con lo strumento completo).

In un campo riverberante la pressione sonora rilevata in un punto, sarà la somma energetica delle onde sonore provenienti da diverse direzioni. In questo caso sarà necessario avere un microfono che abbia delle buone caratteristiche di omnidirezionalità

Un misuratore di livello che non rispetti tali qualità, effettuerà la somma energetica con un errore proporzionale al suo discostarsi dalle condizioni di omnidirezionalità

In alternativa, compatibilmente col limite inferiore di ampiezza da misurare, si può scegliere un microfono più piccolo che per il suo ingombro produce una minore interferenza nel campo sonoro.

I microfoni sono divisi in due-tre classi principali:

Microfono per campo libero

Microfoni per campo libero che teoricamente sono utilizzabili nelle misure del rumore proveniente da una sorgente la cui direzione sia ben identificabile, e per i quali il microfono va orientato con la superficie della membrana perpendicolare alla retta di propagazione del suono, in pratica si deve puntare il microfono verso la sorgente

Questo microfono è compensato per il disturbo provocato al campo acustico da se stesso, la misura sarà valida solo se il campo acustico ha una direzione di propagazione predominante perpendicolare alla membrana

Microfono a pressione

un microfono a pressione ha una risposta in frequenza uniforme al campo acustico così com'è, incluso il disturbo da esso provocato, è adatto per accoppiatori, audiometri, ecc.

I microfoni a pressione sono utilizzabili in tutti i casi in cui la direzione di provenienza del rumore disturbante non sia facilmente identificabile, l'orientamento del microfono in questo caso non è determinante.

Microfono ad incidenza casuale (random)

ha una risposta in frequenza uniforme per onde sonore provenienti da tutte le direzioni simultaneamente, è dunque adatto per misure in campi diffusi.

Le misure di rumore ambientale in Europa sono soggette alle normative IEC che prevedono "esclusivamente" i microfoni da campo libero, in quanto viene imposto di orientare sempre lo strumento verso la direzione di provenienza del rumore che si intende misurare e disposti in modo tale (distanti dal corpo fonometrico) da far

rientrare le loro caratteristiche di omnidirezionalità nei limiti prescritti dalle normative IEC stesse.

L'influenza delle condizioni climatiche ambientali

Il microfono a condensatore è un trasduttore particolarmente preciso e le sue caratteristiche non vengono influenzate dalle variazioni dell'umidità e della temperatura entro limiti molto ampi. La membrana può alle volte essere rivestita di quarzo per garantire la massima protezione in ambienti umidi e corrosivi.

Per prolungate misure in esterno è necessario usare i tipi di microfoni provvisti di foro di compensazione della pressione statica e dotarli di deumidificatori, del dispositivo parapioggia e dell'indispensabile schermo controvento.

FONOMETRO

Lo strumento che misura il livello sonoro, comunemente chiamato fonometro, è uno strumento abbastanza sofisticato il cui schema generale di funzionamento analogico (nella versione più semplice) può essere visto con il seguente schema a blocchi. Si può notare che all'inizio della catena è presente un trasduttore, che permette la trasformazione delle variazioni di pressione dovute all'onda acustica in corrispondenti grandezze elettriche.

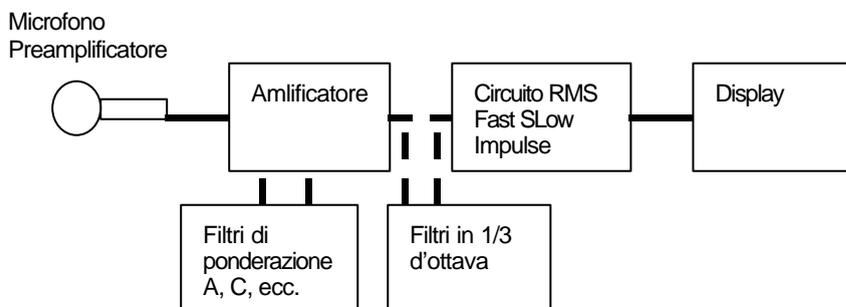


Figura 1

Lo strumento risulta così essere un particolare voltmetro elettronico in quanto quello che esso in verità misura non è una pressione acustica bensì una tensione elettrica.

Il segnale acustico dopo essere stato trasformato dal microfono in un equivalente segnale elettrico entra in un primo blocco (preamplificatore) che è normalmente solidale con il microfono. Il preamplificatore trasforma l'alta impedenza del microfono in bassa impedenza, permettendo così l'uso di cavi lunghi fra il microfono e lo strumento misuratore, molto spesso posti in zone diverse.

Il segnale elettrico passa dal preamplificatore al vero e proprio sistema di misura che comprende particolari circuiti di ponderazione secondo le curve "A", "B", e "C" che modificano la sensibilità dello strumento alle varie frequenze e, per il caso soprattutto della curva A, la rende uguale con buona approssimazione, a quella dell'orecchio umano.

E' anche obbligatorio un blocco che riveli la presenza di una situazione di sovraccarico in ingresso e che tenga anche sotto controllo la dinamica del segnale in arrivo, avvertendo tramite una indicazione sul display la presenza di eventuali sovraccarichi. In tal caso l'operatore potrà aggiustare il fondo scala agendo con appositi commutatori su un attenuatore d'ingresso, il quale permette di regolare l'escursione del segnale amplificandolo o attenuandolo a secondo dei casi.

Qualche fonometro è previsto per l'inserimento di filtri esterni (sequenziali) che consentono di eseguire l'analisi in frequenza in banda d'ottava e terzi di ottava, necessaria per l'individuazione delle varie componenti tonali del segnale.

Il segnale entra poi in un blocco rettificatore che provvede a trasformare in corrente continua il segnale elettrico in corrente alternata; più precisamente il segnale viene opportunamente elaborato in modo tale da avere in uscita dal blocco il suo valore efficace (RMS). In questo blocco rettificatore (blocco RMS) sono normalmente presenti le costanti di tempo (tempi di integrazione o di rettificazione) meglio note come: FAST (veloce), SLOW (lento), IMPULSE (impulso) e PEAK (picco). In pratica con esse si sceglie la velocità di risposta dello strumento alle variazioni del segnale.

Nella maggior parte dei casi, la misura del suono riguarda segnali fluttuanti, cioè segnali che variano continuamente in ampiezza e quindi una misura RMS corretta dovrebbe tenere in conto tali variazioni. E' per questa ragione che sono stati standardizzati vari tempi di risposta dello strumento conosciuti come FAST e SLOW dei quali la costante FAST corrispondente a 125 ms (1/8 di secondo), fornisce una risposta dello strumento con reazione molto rapida e consente di seguire e misurare i livelli di rumore che non oscillano troppo velocemente. La costante SLOW (1 secondo) fornisce invece una risposta più lenta, smorza così le fluttuazioni dell'ago dello strumento (o del display digitale) consentendo una più facile lettura che altrimenti risulterebbe di difficile interpretazione.

Nei moderni fonometri, il problema della misura di rumori oscillanti viene in parte risolto utilizzando un display digitale; in tal caso il valore delle misure viene aggiornato ogni secondo riportando il valore efficace (RMS) massimo che lo strumento ha misurato nel secondo precedente.

Nel caso in cui si debbano misurare rumori molto rapidi (impulsivi) bisogna utilizzare un misuratore di livello sonoro che possieda la costante di tempo IMPULSE. Essa è caratterizzata da una risposta rapida a livelli crescenti (35 msec.) e molto lenta a livelli decrescenti (decresce di 3 dB al secondo); per suoni impulsivi si ottiene come una lettura migliore del livello rispetto a quella offerta da un misuratore di livello sonoro ordinario che usa costanti FAST e SLOW.

Un'altra costante di tempo, richiesta da alcune normative per la valutazione del rischio conseguente alla esposizione a rumore, è quella relativa alla misura dei valori di picco. In tal caso lo strumento non esegue come per le tre costanti (F, S ed I) precedenti il valore efficace, ma valuta le ampiezze della cresta dell'onda acustica e per far ciò deve poter rispondere anche alle più veloci fluttuazioni del segnale: è quindi necessario avere una risposta velocissima (Peak \leq 100 microsec). Un importante parametro da tenere sempre presente nella scelta di un fonometro è il FATTORE DI CRESTA: esso viene definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace (Peak/RMS).

FONOMETRO INTEGRATORE

L'espressione del Leq , che altro non è se non una media lineare su di un intervallo di tempo finito:

$$Leq(t) = 10 \log \frac{1}{t} \int_0^t \frac{p^2(t)}{p_0^2(t)} dt$$

non è stata direttamente implementabile negli strumenti portatili fino all'inizio degli anni 80, salvo che per pochissimi strumenti caratterizzati da una dinamica molto limitata e piccoli tempi di misura possibili, a causa essenzialmente di un problema di memorizzazione dei campioni numerici prima dell'elaborazione.

I primi esemplari di fonometri integratori in effetti utilizzavano il Leq esclusivamente sul concetto di media: se il segnale fluttuava in Fast o Slow, allora era meglio utilizzare il Leq .

Per implementare il calcolo del Leq è necessario trasformare la funzione continua in funzione discreta, con un opportuno campionamento del segnale analogico originale, garantendo la gamma dinamica e la risposta in frequenza; due aspetti non facilmente risolvibili se non in tempi molto recenti. Una soluzione ibrida (analogico-digitale) venne trovata campionando opportunamente il segnale in uscita dal rivelatore RMS

$$Leq(N \Delta t) = 10 \log \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{p_i^2(\Delta t)}{p_0^2(\Delta t)}$$

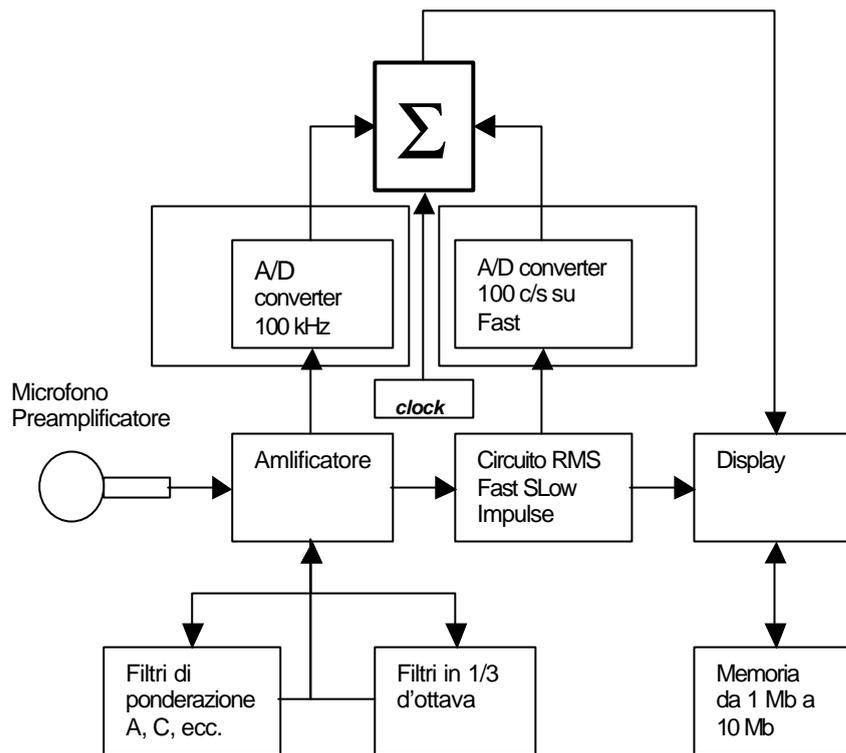


Figura 2

Nel diagramma a blocchi di un fonometro integratore si nota che il campionamento del segnale può essere fatto a valle dell'amplificatore di ingresso o (*in modo ibrido*) a valle del convertitore RMS; nel secondo caso si ottiene una sufficiente precisione del calcolo del Leq "solo ed esclusivamente" campionando almeno 100 volte/sec il valore Fast.

La questione è comunque legata alla memorizzazione dei campioni dai quali ottenere la storia temporale ed in particolare alla base tempi che si vuole scegliere. La memorizzazione di una storia temporale a 48, 51 o 100 kHz equivale ad una registrazione audio e questo non è possibile ottenerlo in un sistema tradizionale, è invece necessario un Personal Computer con disco rigido. In uno strumento tradizionale è invece possibile memorizzare una storia temporale di Fast, Slow o Leq brevi scegliendo un compromesso tra base tempi e memoria a bordo disponibile, dopo aver lasciato spazio per programmi personalizzati, intestazioni dei files ecc.

Uno strumento tradizionale e di costo contenuto, non riesce a memorizzare più di 8 campioni / secondo, ma in ogni caso deve essere chiaro se i campioni memorizzati sono valori Fast o di Leq breve, e se i campioni Fast sono i massimi del sottoperiodo (125 ms ad esempio) o il valore preso alla fine del sottoperiodo, o altro; la successiva elaborazione di campioni Fast è infatti estremamente rischiosa se non si tiene ben presente l'utilizzo che se ne vuole fare.

E' forse scontato ripetere che la coincidenza tra 8 campioni/sec ed il Fast (125 ms) è assolutamente priva di ogni riferimento scientifico: il tempo di 125 ms standardizzato per la costante Fast è il tempo di risposta del circuito RMS e non il tempo necessario per avere un valore Fast. Il campione di Fast potrebbe infatti essere preso anche con un intervallo di tempo piccolo a piacere, e decisamente inferiore a 125 ms. Sono i campioni Fast ad avere intrinsecamente il tempo di risposta di 125 ms, indipendentemente dalla velocità di campionamento della storia temporale.

ANALIZZATORI IN TEMPO REALE

Gli analizzatori in tempo reale sono analizzatori in frequenza per le misure in acustica, elettroacustica e di vibrazioni, tipicamente per l'analisi FFT o per l'analisi in bande di 1/1, 1/3, 1/12, 1/24, 1/n d'ottava.

Una caratteristica fondamentale della struttura dei dati nei moderni analizzatori è il concetto di multispettro, cioè un insieme di spettri, che può essere trattato ed elaborato come una singola unità, alla quale possono essere applicati i concetti di media, dei tempo di decadimento per la misura del tempo di riverbero e nell'analisi del rumore proveniente da macchine alternative o rotative, nelle quali si vogliono effettuare misure ad intervalli regolari nel ciclo di lavoro delle macchine stesse.

La maggior parte dei risultati normalmente richiesti in acustica sono oggi disponibili da un moderno analizzatore in tempo reale. Funzioni tipiche coprono una gamma di applicazioni, nel campo acustico, quali la determinazione della potenza sonora, del tempo di riverbero, dell'isolamento e dell'assorbimento acustico, così come una vasta gamma di operazioni aritmetiche sugli spettri.

L'introduzione delle tecniche DSP (Digital Signal Processing) per l'analisi di suoni e vibrazioni ha notevolmente incrementato le possibilità del tecnico di diagnosticare problemi di rumorosità o di definire misurazioni e gli analizzatori di spettro sono oggi un luogo comune sia in laboratorio sia come apparecchi portatili da usare direttamente in campo.

Due tipologie classiche di analizzatori digitali predominano: analizzatori FFT (Fast Fourier Transform) e analizzatori a filtri Digitali. Storicamente questo ha sempre significato l'impiego di 2 apparecchiature distinte a seconda dell'applicazione, ma man mano che gli analizzatori di spettro divenivano più potenti, è diventato comune trovare in vendita un analizzatore FFT mascherato da analizzatore a filtri digitali in 1/3 d'ottava, operante in apparenza come Real Time.

Si vuole qui sottolineare le principali differenze tra le due tipologie di apparecchi e come sia possibile commettere errori di misura significativi in funzione del tipo di fenomeno acustico o vibrazionale da analizzare e dell'applicazione.

I punti principali sono:

- 1) Analisi in real Time
- 2) Sintesi di spettri in 1/n d'ottava dalla FFT
- 3) Analisi Off-Line

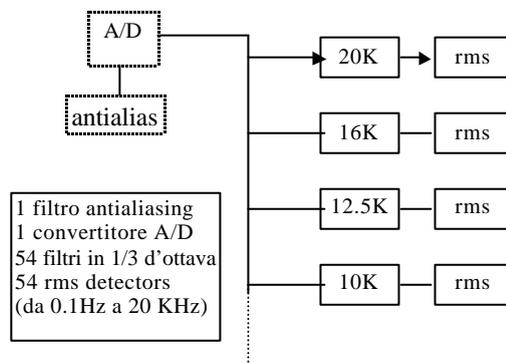
Per quanto possibile saranno anche illustrate graficamente le differenze su analisi reali, tra apparecchiature disponibili sul mercato, per la teoria di base dei segnali si dovrà comunque fare riferimento alla letteratura specifica.

COSA SONO I FILTRI DIGITALI

La tecnica dei filtri digitali simula l'utilizzo di un banco di filtri analogici paralleli per l'analisi in frequenza dei segnali ed è generalmente realizzata per effettuare analisi in bande normalizzate da 1/1 o 1/3 d'ottava; ogni filtro è sintonizzato su una frequenza diversa ed ogni uscita dallo stesso viene mediata ottenendone il valore rms o la media lineare (Leq). La figura 1 riporta un diagramma a blocchi semplificato del sistema.

In pratica questa impostazione non è particolarmente efficiente ma serve per illustrare il principio. Se si assume che il processore del segnale è sufficientemente veloce, l'analizzatore a filtri digitali opera sempre in tempo reale; in altre parole, per ogni campione che entra nel banco di filtri vi è un campione che passa al circuito di media e sullo schermo si ha il risultato relativo.

ANALISI CON FILTRI DIGITALI



I filtri sono generalmente conformi agli standard internazionali (IEC 1260) relativamente alle loro caratteristiche di passa-banda, centro frequenza ed i risultati sono di conseguenza rappresentati graficamente su di un asse X logaritmico delle frequenze - vedere Fig. 3. Da notare che il valore rappresentato da ogni banda è il valore realmente misurato all'uscita di ogni filtro ed è affetto soltanto dagli errori di ripple di bassa-banda comunque ammessi dalle normative.

Molto spesso vengono rappresentati anche i valori "globali" (A, L, ecc.) insieme ai valori di ogni banda ed è molto importante sapere a cosa questi valori globali sono relativi, cioè quale insieme di dati viene utilizzato per produrre questi dati. Alcuni

analizzatori hanno incorporato un filtro specifico a banda larga (Lineare o ponderato A) in parallelo ai filtri in banda da 1/3 d'ottava, altri invece “molto semplicemente sommano le bande in frequenza” per calcolare i valori globali. Ed è qui che si inizia ad avere un primo errore possibile e che non deve mai essere trascurato, soprattutto quando è presente notevole energia nelle basse frequenze, per esempio sotto i 20 Hz.

La misura corretta dell'uscita dei filtri è soggetta alle stesse problematiche di misura di un normale fonometro, il risultato dipende dalla costante di tempo del circuito di media rms (F, S, I, ecc.) o dal periodo di media lineare di integrazione del Leq.

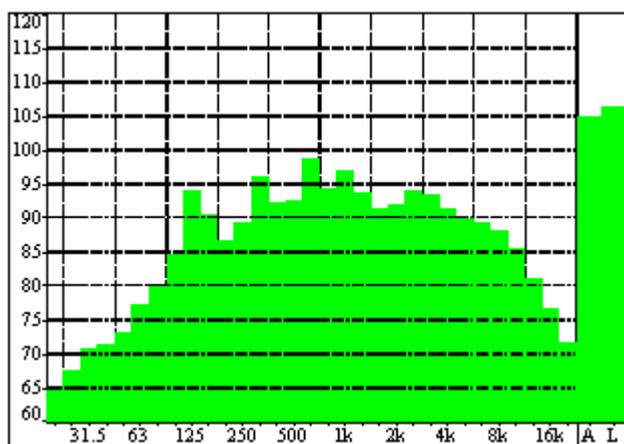


Figura 3

Ciò è molto importante nell'analisi di segnali non stazionari tipici del sorvolo aereo, del passaggio di veicoli, ecc. Ed è per questo motivo che tali misurazioni sono oggetto di normative specifiche, le quali descrivono l'impiego di tecniche di analisi in tempo reale con filtri digitali ed una particolare costante di tempo.

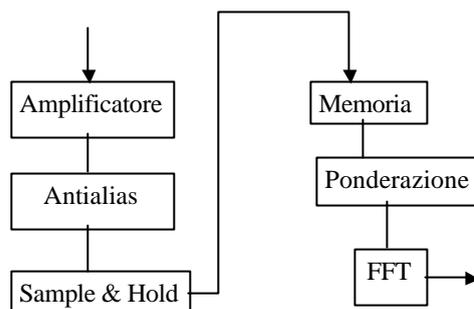
Siccome la larghezza di banda dei filtri è abbastanza larga per il 1/3 d'ottava (23%) è facile ottenere una buona precisione statistica dei risultati nel caso di segnali casuali (random) banda larga o quasi-random.

Le caratteristiche dei filtri e dei circuiti di media sono entrambe standardizzate dalle normative IEC ed è quindi possibile effettuare comparazioni tra misure effettuate con apparecchiature differenti e da parte di qualunque persona o laboratorio, fatto fondamentale per parlare di precisione delle misure ambientali, della potenza acustica di un macchinario, della presenza o meno di toni puri, ecc.

L'unico difetto di una tecnica di analisi in frequenza a filtri digitali è la scarsa risoluzione in frequenza dei filtri a 1/3 d'ottava; risolvere infatti la presenza e la natura di un “tono puro reale” richiede una risoluzione decisamente migliore - salvo quanto previsto da standard nazionali.

ANALISI FFT

L'analisi FFT è completamente diversa ed è una tecnica di analisi in frequenza che prevede la cattura di un blocco di dati numerici e la trasformazione dal dominio del tempo a quello della frequenza, per trovare le componenti in frequenza contenute nel segnale (rumore) da analizzare. Pertanto, anche se il segnale può essere considerato continuo, il processo di trasformazione per blocchi lo tratta come un transitorio, un



problema che viene di solito attenuato utilizzando funzioni finestra nel tempo e analisi in sovrapposizione (overlapping) di blocchi di dati nel tempo, a patto di dover analizzare segnali di lunga durata.

Esiste sempre una relazione fissa tra la dimensione del blocco di dati nel buffer temporale e la risoluzione dello spettro risultante, sia in termini di numero di campioni che di valori in frequenza.

Per esempio: se il buffer nel tempo di acquisizione è di 4096 campioni, si avrà una trasformazione in 4096 linee di frequenza delle quali metà positive e metà negative, si avranno perciò solo 2048 linee corrispondenti ad altrettante frequenze delle quali solo una parte (tipicamente 1600) saranno però valide a causa della necessità di utilizzo di un filtro antialiasing che garantisca comunque una dinamica di almeno 80 dB.

In pratica si possono effettuare calcoli relativamente semplici per un sistema (Symphonie) che ha un banda fino a 20 KHz. Il criterio di Nyquist stabilisce che il campionamento debba essere almeno 2,56 volte la frequenza massima di analisi e pertanto tale frequenza è fissata a 51.2 KHz, di conseguenza il buffer nel tempo risultante sarà di $4096 / 51.200 \text{ sec} = 80 \text{ ms}$; questo dato diventa importante quando definiremo cosa si intende per tempo reale.

Lo spettro risultante sarà rappresentato su di un asse x delle frequenze lineare nel quale ogni linea FFT sarà rappresentata singolarmente; alcuni analizzatori rappresentano spettri continui invece che a righe, ma questa è soltanto una scelta grafica. Vedere un esempio di rappresentazione FFT nella Fig.4.

Lo spettro rappresentato è relativo allo stesso fenomeno rappresentato in Fig.2, per illustrare la differenza tra i risultati.

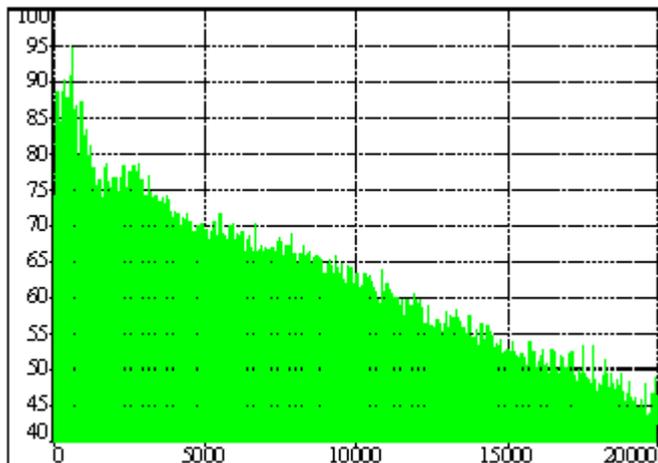


Figura 4

Questa analisi è stata effettuata con una trasformazione su 8192 punti nel tempo ottenendo una risoluzione in frequenza di 6 Hz sull'intero intervallo tra 0 e 20 KHz.

Da notare che i livelli nella Fig. 4 sono generalmente più bassi di quelli in Fig.2 a causa del fatto che l'energia complessiva è suddivisa in un numero di "filtri" molto più grande per la FFT rispetto ai 1/3 d'ottava, da cui si deduce che per l'analisi FFT è di fondamentale importanza riportare nel rapporto di misura tutti i parametri di misura come: la banda di analisi, la finestra temporale e le unità di ampiezza.

Pur essendo al di fuori degli scopi di questa semplice trattazione si raccomanda di consultare la letteratura specifica in merito alle limitazioni dell'analisi FFT quali:

- L'effetto palizzata (Picket Fence Effect)
- La perdita (Leakage) di energia a causa dell'applicazione di una finestra temporale
- L'errore di BIAS di risoluzione

In generale un singolo spettro FFT ha una precisione statistica molto scarsa (in altre parole difficilmente ripetibile) che nel caso di una finestra temporale Hanning è di 1,5, quindi è assolutamente necessario un processo di media in potenza di vari spettri successivi per ottenere un miglioramento del prodotto $B \times T$ (Larghezza di Banda x Tempo di misura), e questo comporta delle implicazioni in termini di vero Tempo Reale.

L'analisi FFT è comunque lo strumento di analisi sicuramente più diffuso ed efficiente per l'analisi dei segnali di rumore o vibrazioni al fine di stabilire relazioni di causa-

effetto ed effettuare interventi correttivi: Di fatto presenta un'eccellente risoluzione in frequenza, facilità di riconoscimento di toni puri, ordini armonici, calcolo di funzioni di trasferimento, analisi dinamica di strutture, ecc.

QUALE METODO?

Visto che il campo dell'acustica e delle vibrazioni è multidisciplinare e contempla un numero enorme di applicazioni, sarebbe auspicabile di avere a disposizione un sistema di analisi versatile adatto sia per misure standardizzate (tipicamente 1/3 d'ottava) sia per applicazioni diagnostiche con la FFT.

Diversi costruttori di apparecchiature di analisi propongono analizzatori di spettro FFT che hanno come opzione l'analisi in 1/3 d'ottava, ottenuta per sintesi dagli spettri FFT. Questi analizzatori sono spesso chiamati "Real Time" ma soltanto per il fatto che si ha uno spettro "in movimento" sul display durante l'analisi.

Per arrivare a trovare qual è il compromesso migliore dobbiamo però definire cosa si intende per analisi in tempo reale, vedere come questa sia realmente tale per gli analizzatori FFT e identificare i limiti della conversione in spettri da 1/3 d'ottava dei dati FFT, il processo chiamato di "sintesi".

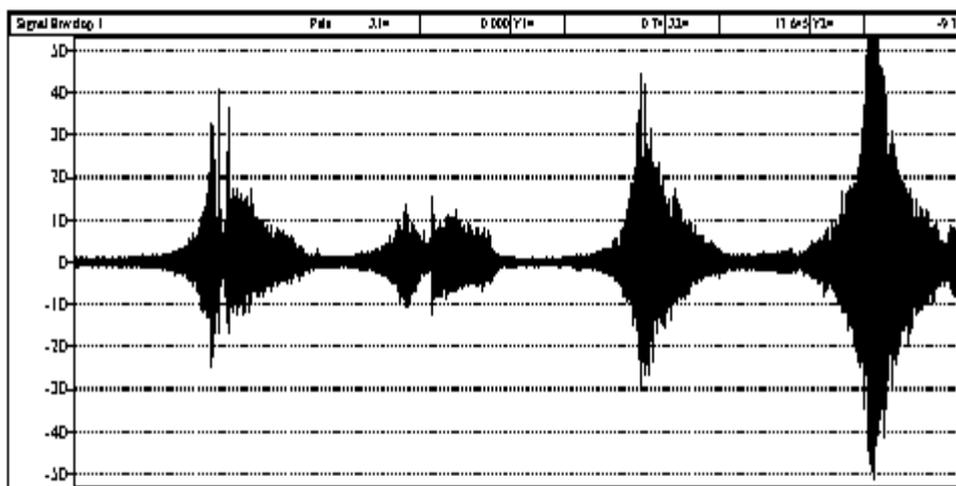


Figura 5

Per affrontare il problema prendiamo un segnale relativo al rumore di pass-by di una macchina da corsa in un circuito automobilistico, rappresentato in Fig.5 come pressione acustica; i livelli sono particolarmente elevati e ci permettono di verificare la gamma dinamica di misura, il segnale è evidentemente non-stazionario con componenti impulsive e tonali che variano con il tempo. Il tempo totale del segnale considerato è di 12 sec.

ANALISI IN TEMPO REALE

L'analisi in tempo reale può essere definita come l'analisi che considera tutto il segnale in maniera equa, per tutto il tempo e senza perdita di informazioni, i puristi aggiungono che l'analisi deve essere fatta "al tempo" della misura, vedremo comunque che questo requisito non è completamente in contrasto con i criteri di analisi reale.

FILTRI DIGITALI

Per sua natura un filtro digitale è un processo normalmente in tempo reale, visto che ogni campione in ingresso genera un campione in uscita da un filtro determinato. In casi speciali i costruttori di apparecchiature specificano dei limiti di tempo reale corrispondenti al valore massimo impostabile di fondo scala in frequenza per il quale l'apparecchiatura può effettuare il calcolo per ogni campione. Questa è la ragione per cui diversi analizzatori di spettro a filtri digitali in Tempo Reale funzionano fino a 20 Khz per 1 canale di analisi e fino a 10 Khz per 2 canali di analisi; il circuito interno di misura è infatti multiplexato tra 2 serie di dati temporali.

ANALISI FFT IN TEMPO REALE

Anche se un analizzatore FFT è un apparecchiatura che lavora su "blocchi" di dati per definizione, è spesso possibile avere le caratteristiche in tempo reale in funzione della banda di analisi e della velocità del processore.

Come abbiamo detto in precedenza un blocco di dati temporali acquisito viene passato al processore che calcola la trasformata, generalmente il DSP può lavorare su di un blocco di dati mentre il blocco successivo viene passato, ma deve assolutamente finire il calcolo e passare i risultati al display prima di iniziare un nuovo calcolo; si ha dunque la necessità di un bilanciamento tra velocità di calcolo e frequenza di campionamento.

Se riprendiamo l'esempio utilizzato in precedenza in cui avevamo un buffer temporale della durata di 80 ms per 4096 campioni, ed una frequenza di 20 Khz, il calcolo FFT in questo caso deve durare meno di 80 ms per evitare la perdita di informazioni. Le cose si complicano se il blocco temporale si riduce ulteriormente ad esempio a 1024 campioni, corrispondenti a 20 ms, fortunatamente la stragrande maggioranza degli analizzatori in commercio è ottimizzata per il calcolo su blocchi da 1024 o 2048 campioni.

Una gestione della memoria può migliorare la situazione, soprattutto se si utilizza un numero maggiore di buffer temporali ma questo comporta un aumento di costo degli analizzatori.

Utilizzando 2 buffer temporali il tempo di registrazione dipende generalmente dalla frequenza di campionamento, maggiore è l'intervallo in frequenza necessario e più breve è il buffer; comunque il tempo di analisi FFT è fisso essendo una funzione del processore e dell'algoritmo utilizzato.

Quindi, selezionando un valore di frequenza di analisi superiore sempre maggiore, l'analizzatore può ad un certo punto non poter più soddisfare il criterio del tempo reale. L'intervallo in frequenza al quale inizia il problema viene riferito come la "frequenza di

tempo reale” e per molti strumenti disponibili in commercio questa si trova tra 1 KHz e 20 KHz.

Fino a quando la frequenza di tempo reale non viene superata, ci si dovrebbe dunque trovare a lavorare in tempo reale, ma bisogna però ritornare alla definizione data precedentemente in cui per tempo reale si doveva poter considerare tutto il segnale temporale in maniera equa, per tutto il tempo e senza perdita di informazioni ed è proprio sul concetto di equità che si deve riflettere. Con un analizzatore FFT, analizzando segnali stazionari, viene normalmente utilizzata una finestra temporale di ponderazione al fine di evitare i fenomeni di troncamento, definiti come Leakage. Nella maggioranza dei casi si utilizza la finestra di Hanning che ha la forma di un coseno quadro e viene applicata su ogni blocco di dati, con il risultato di dare maggiore enfasi ai dati che si trovano al centro del buffer e riducendo a zero quelli che si trovano all’inizio ed alla fine. Vedere in proposito la Fig. 6 .

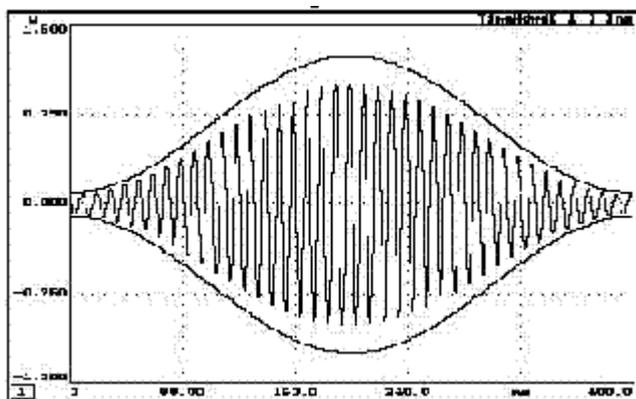


Figura 6

Se applicassimo molto semplicemente il criterio di “non perdere dati”, questi comunque andrebbero persi o non utilizzati in maniera equa, la sola soluzione consiste allora nel concetto di sovrapposizione di diversi buffer temporali e si può dimostrare che per ottenere una ponderazione a Potenza Costante per tutti i dati è necessaria una sovrapposizione (overlapping) almeno del 66% utilizzando una finestra di Hanning.

Questo fatto comporta che il tempo di calcolo del processore tratti solo 1/3 circa dei dati “nuovi” e di conseguenza la “vera” frequenza di tempo reale si riduce ad 1/3 di quella specificata prima.

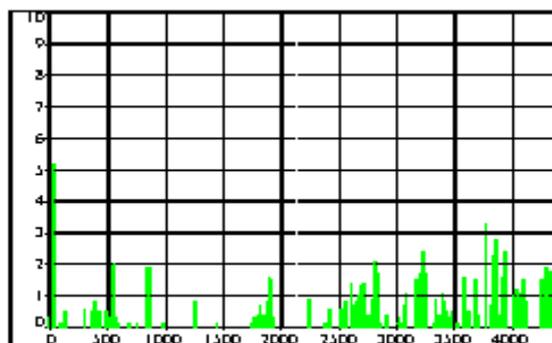


Figura 7

Il processo di overlap può anche essere utilizzato per aumentare la precisione statistica di analisi ma oltre un certo valore (75%) il vantaggio è veramente trascurabile, invece si può sfruttare l'aumento di sovrapposizione per ottenere un certo "smoothing" dei dati nell'analisi dei fenomeni non stazionari o per i diagrammi waterfall.

Gli errori derivanti da un insufficiente valore di overlapping possono essere piuttosto elevati, si prenda ad esempio la Fig. 7 nella quale sono rappresentate le differenze tra spettri a 250 linee (per semplicità) e fondo scala a 5kHz tra due analisi FFT effettuate con overlap di 0% e del 66%. Questo problema non è in ogni modo associabile solo all'analisi di fenomeni non-stazionari, anche per fenomeni continui come l'analisi di un motore a combustione interna si può incontrare il problema. Si immagini ad esempio di voler fare l'analisi di un motore a scoppio in cui la frequenza di scoppio coincida con la lunghezza del blocco temporale (buffer) di acquisizione: ci si potrebbe trovare sia nella condizione in cui gli impulsi di scoppio si trovino al centro della finestra o alle estremità, e come conseguenza la finestra Hanning può enfatizzarli o azzerarli causando errori molto importanti.

Sfortunatamente non esiste una standardizzazione che permetta di definire le frequenza di tempo reale degli analizzatori FFT e di conseguenza c'è molta confusione tra gli utenti. I costruttori di strumenti cercano poi di presentare i loro prodotti nel modo migliore e come conseguenza spesso viene "venduta" come frequenza di tempo reale quella in assenza di overlapping o di altri processi che potrebbero rallentarlo, come quelli di media.

SINTESI IN 1/N D'OTTAVA

Parecchi strumenti presentano i risultati in 1/1 o 1/3 d'ottava come risultato di un processo FFT, processo comunemente definito come "sintesi" e che comporta parecchi problemi.

Ci sono 2 problemi principali: i risultati di un'analisi FFT e di una in 1/n d'ottava richiedono due assi di frequenza di presentazione diversi, i filtri in 1/n d'ottava devono rispettare delle normative in merito al centro frequenza ed alla forma dei filtri.

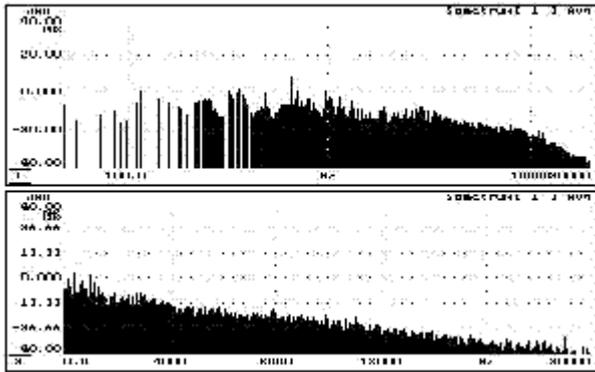


Figura 8

Osservando la Fig. 8 si può vedere il modo diverso di “vedere” uno spettro FFT dello stesso segnale con assi di frequenza logaritmici o lineari; l’asse lineare viene comunemente utilizzato per gli spettri FFT, la trasformazione dell’asse in logaritmico porta al risultato di spostare tutte le linee di frequenza verso le frequenze più elevate.

Comparando ora lo spettro FFT su asse logaritmico con il corrispondente in 1/3 d’ottava sulla Fig. 9, si può capire immediatamente la natura del problema insito nel processo di sintesi.

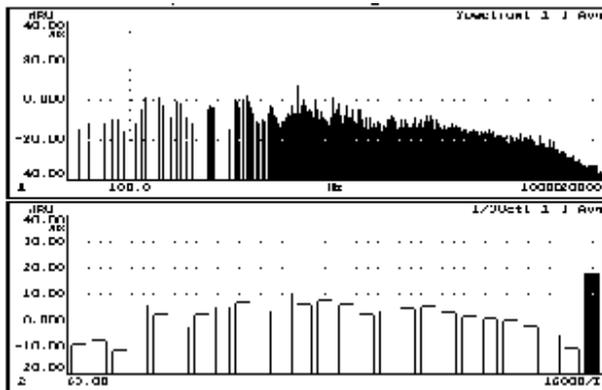


Figura 9

Sulla Fig. 9 è riportato uno spettro in 1/3 d’ottava ricavato da uno spettro FFT a 3200 linee, utilizzando una pseudo maschera posta sullo spettro FFT i cui contorni corrispondono a quelli dei filtri in 1/3 d’ottava e rappresentando poi l’energia totale di ogni filtro con una barra dello spettro in 1/3 d’ottava.

Sorgono allora due domande: la forma dei filtri in 1/3 d’ottava corrisponde alle normative? - Ci sono sufficienti linee FFT nella maschera per ritenere valido il risultato?

Nella zona delle basse frequenze ci sono insufficienti linee FFT da cui sintetizzare i corrispondenti filtri in 1/3 d’ottava, queste devono essere almeno 3,5 per ogni filtro in 1/3 d’ottava altrimenti non risulta possibile la procedura. Anche la forma del filtro

dipende dal numero di linee a disposizione, dalla finestra temporale utilizzata (la quantità di Leakage) e dalla relazione di fase tra linee adiacenti. I costruttori di analizzatori pubblicano molto raramente la forma dei filtri o si limitano a definirla genericamente come conforme alle normative.

Per meglio illustrare la differenza di risultato a cui si può andare incontro si è analizzato lo stesso segnale con un analizzatore a filtri digitali e con un processo di sintesi, come illustrato in Fig. 10.

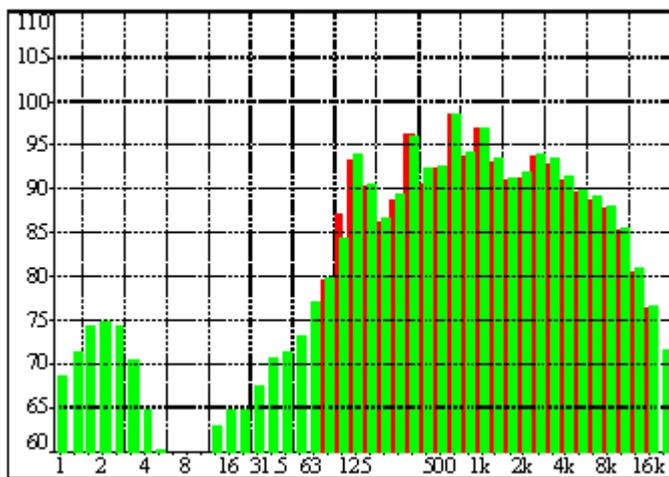


Figura 10

L'accordo tra i risultati è abbastanza buono alle frequenze elevate, dove ci sono linee in sovrabbondanza per la sintesi, mentre nella regione delle basse frequenze o in presenza di componenti tonali, si hanno differenze importanti che “purtroppo” dipendono dallo specifico processo di sintesi utilizzato e che non sempre viene specificato dai costruttori di analizzatori.

Il calcolo di sintesi è stato troncato sotto la frequenza di 80 Hz causa mancanza di dati FFT ottenuti da un buffer di 8192 campioni mentre in questo caso sarebbero stati necessari almeno 32.000 campioni temporali, lo spettro in 1/3 d'ottava presenta invece risultati a partire da 1 Hz. Se a questo punto si deve parlare di tempo reale, diventa molto delicato valutare la precisione dei risultati di sintesi.

Una soluzione molto adottata per migliorare i risultati in 1/n d'ottava da sintesi FFT consiste nell'analisi multi-passo nella quale viene calcolato un primo spettro FFT, quindi si effettua un'operazione di filtro passa-basso per ridurre ad 1/10 la frequenza di fondo scala (es.: da 20 Khz a 2 Khz) e si ricalcola poi un nuovo spettro FFT, lo spettro in 1/3 d'ottava risulta allora dall'unione degli spettri FFT. Questo processo in 2 o 3 passi è chiaramente antitetico al concetto di Tempo Reale ed è quindi normalmente effettuato in post-processo sui dati registrati.

ANALISI IN POST-PROCESSO

Molti dei problemi presentati fino ad ora possono essere risolti con un'analisi in post-processo effettuata su dati opportunamente registrati su registratore DAT o, meglio ancora, sul disco rigido (se disponibile) del sistema. Se il concetto di tempo reale deve principalmente intendersi come “nessuna perdita di informazione” ebbene anche l'analisi in post-processo può essere considerata in Tempo Reale tranne pochi casi come quando si deve gestire un sistema in “anello chiuso” per il quale sia necessario pilotare un sistema sulla base delle risultanze di un'analisi.

La registrazione su disco rigido ha il vantaggio indiscutibile di poter disporre “in linea” dei dati già corretti e calibrati, e quindi una maggiore facilità di analisi, di post trattamento: filtraggio, editing, ecc.

STORIA TEMPORALE EVOLUTIVA DEL LEQ SU PERIODI BREVI E LUNGI: LA SCELTA OGGETTIVA DEL PERIODO

I fattori oggettivi quali: durata, caratteristiche di fluttuazione, impulsività, ecc. e quelli soggettivi: momento psicologico, fisiologia, sociologia, tipo di attività, ecc. determinano "l'acustica" di una situazione, ed è la necessità di tenere in conto al meglio possibile il numero massimo di questi parametri che ha suscitato un numero considerevole di studi dedicati per la maggior parte all'elaborazione di nuovi indici, unità o criteri di giudizio sul rumore, con lo scopo di caratterizzare delle situazioni acustiche specifiche possibilmente con uno ed un solo valore. Parecchi altri studi hanno invece poi ampiamente dimostrato che un solo indice non può descrivere completamente una situazione acustica e tanto meno la sensazione che un essere umano avverte, inoltre è spesso impossibile determinare la potenzialità di disturbo di una situazione ai fini di normative internazionali con un solo valore.

Per soddisfare allora la necessità di valutare correttamente ed in modo ripetibile l'ambiente acustico è oggi entrato nella prassi comune il metodo di acquisizione dell'evoluzione temporale del rumore a base dello Short-Leq con base tempi di 1 min, 10 sec, e anche di pochi millisecondi.

Lo Short-Leq ha una forma espressiva formalmente identica ad un Leq:

$$Leq(t_1, t_2) = 10 \log \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2(t)} dt$$

dove il tempo di media lineare ($t_2 - t_1$) è dell'ordine dei secondi o frazione di essi e contiene i concetti di un modo di espressione dei dati basato sulla memorizzazione numerica e la rappresentazione di Leq contigui di durata elementare, rappresentando di per se un metodo di analisi che permette di estrarre il maggior numero di informazioni possibili.

Acquisizione dei dati

È estremamente importante il fatto di poter memorizzare e rappresentare l'evoluzione temporale del rumore sull'insieme del periodo d'analisi al fine di osservare la storia del rumore ed evitare errori di interpretazione e questo solleva due problemi fondamentali:

la natura della registrazione ed il tipo di tracciato.

La discretizzazione e la rappresentazione di un segnale in forma di valori Leq brevi comporta un compromesso a livello della perdita di informazione, compreso tra il Leq classico di 15 min, ½ ora o più, con il quale si perde ogni forma di informazione sull'evoluzione temporale del rumore, e la registrazione di un segnale analogico che

conserva la totalità dell'informazione ma non fornisce una valutazione standardizzata e comporta una quantità enorme di informazioni, particolarmente pesante in fase di analisi.

Conservazione dei dati

L'approccio corrente consiste nell'utilizzo di Fonometri a memoria o Analizzatori Statistici che, previo una fase preliminare di scelta dei parametri, forniscono uno o più valori classici di Leq, Picco, ecc. - la storia temporale dello Short Leq e la distribuzione statistica dei valori di Short Leq o RMS (tipicamente Fast).

Questo approccio presenta tre difetti fondamentali:

- si ha la perdita dell'evoluzione temporale del rumore,
- i risultati forniti necessitano di un notevole impegno in fase di analisi,
- ogni punto di misura necessita di un analizzatore statistico completo.

Il sistema sviluppato al laboratorio L.N.E. è partito da un software di analisi dei dati facile e completo al fine di analizzare ogni tipo di situazione acustica quale che sia la scala temporale e la natura delle sorgenti, e fornire una descrizione precisa della situazione, basato su di una serie di programmi di trattamento dei file di dati di Leq elementari.

Possono essere individuate tre fasi distinte dell'operazione di trattamento dei dati.

Fase cieca: senza alcun intervento da parte dell'operatore

Permette di ottenere in qualche secondo degli elementi direttamente inseribili in un rapporto ufficiale quali:

- un tracciato immediato dell'evoluzione temporale di qualsiasi Leq con un tempo uguale o superiore a quello dello Short-Leq di misura,
- un tracciato immediato di qualsiasi distribuzione statistica o cumulativa,
- una stampa immediata dei risultati numerici in forma di tabella.

Si può considerare che la quantità di dati sistematicamente forniti è sovrabbondante, ma si deve comunque tener conto che:

- il metodo può essere destinato al ruolo di " linguaggio comune" per tutte le analisi ambientali, qualsiasi sia l'emissione delle sorgenti, utilizzabile e comparabile da parte di diversi laboratori,

- la disponibilità di ampia memoria da parte di strumenti portatili e di PC particolarmente compatti e potenti, permette di ottenere molto facilmente tutti i dettagli necessari.
- l'apparente costo maggiore dei risultati è assolutamente irrisorio se solo si pensa al fatto di poter lavorare con un linguaggio comune con altri tecnici e di poter disporre di tutti i dati necessari per un trattamento "intelligente" degli stessi.

Fase intelligente: intervento dell'operatore

L'insieme delle scelte e degli orientamenti potrà fornire una descrizione più precisa e completa della situazione acustica ambientale:

- scelta dei sottoperiodi di analisi più significativi,
- adattamento della durata del Leq alla situazione considerata e quindi maggiore confidenza della misura corrispondente,
- possibilità di ottenere un'immagine numerica e grafica che contiene informazioni sufficienti per procedere alla descrizione oggettiva di qualsiasi sorgenti in un ambiente qualsiasi,
- valutazione precisa dell'impatto oggettivo di una sorgente in rispetto all'ambiente.

Fase specifica: classificazione delle sorgenti

Il trattamento "informatico" dei dati permette di sviluppare dei metodi di riconoscimento automatico delle sorgenti con quantizzazione energetica delle stesse.

Per mettere in relazione l'impatto acustico di una sorgente in un ambiente con il concetto di scala temporale di analisi, possono essere ricercate diverse forme descrittive in funzione della forma temporale dell'emissione di specifiche sorgenti di rumore:

- una sorgente che produce un livello elevato per soli 10 min, una volta al giorno, necessiterà di una descrizione molto dettagliata su un periodo di tempo relativamente breve (per esempio 2 ore), ma in funzione delle possibili conseguenze dei risultati (normalmente di natura economica) le misure dovranno essere ripetute parecchie volte,
- diversamente altre sorgenti, quali un insediamento industriale, che emettono rumori variabili nel corso della giornata necessitano di un periodo di misura molto più lungo (per esempio 24 ore su scala di 24 ore o di una settimana).

Di conseguenza, ciascun caso dovrà essere trattato individualmente in funzione del grado di precisione necessario, nell'attuale legislazione nazionale il contributo di una sorgente sulla rumorosità dell'ambiente è definito dall'incremento del Leq su di un periodo di osservazione durante il quale la sorgente è chiaramente identificabile, ma in senso più generale si può affermare che tale contributo è rappresentato dall'incremento generalizzato del Leq su di un certo periodo T di osservazione determinabile in funzione delle caratteristiche della sorgente.

Per insediamenti industriali si trova che spesso questi rumori non sono stabili e ben definibili sulle 24 ore, pertanto la valutazione del contributo di una sorgente dipende quasi sempre dalla scelta del periodo di osservazione (di riferimento) T.

In nessun caso una descrizione deve essere considerata migliore di un'altra, ma l'adattamento della scala temporale è funzione della descrizione che si vuole ottenere del problema, al fine di comparare tra loro diverse situazioni differenti, si rende allora necessario classificare 4 scale temporali:

<i>scala temporale</i>	<i>periodo di riferim.</i>	<i>periodo di base</i>	<i>durata Short-Leq</i>
<i>piccolo periodo</i>	da 1 a 2 ore	da 5 a 10 min	da <1 a 10 sec
<i>medio periodo</i>	da 8 a 24 ore	da 1 a 2 ore	da 10 sec a 1 min
<i>lungo periodo</i>	da 2 a 7 giorni	da 8 a 24 ore	da 1 a 10 min
<i>molto lungo</i>	da 1 a 12 mesi	da 2 a 7 giorni	da 10 min a 2 ore

Errata interpretazione dei risultati globali

La maggior parte delle descrizioni acustiche di una situazione ambientale comportano la valutazione del contributo di certe sorgenti di rumore specifiche: traffico, aerei, complessi industriali, ecc.

Un problema difficile di questa valutazione è quello di poter essere sicuri che il risultato finale espresso in termini di Leq, o di incremento di Leq, sia effettivamente rappresentativo della sorgente presa in esame.

E spesso accaduto che dei risultati globali sono spesso non significativi e non possono essere interpretati se non viene prodotta contestualmente una descrizione più dettagliata: traccia dell'evoluzione temporale o media di valori successivi di Short-Leq, da 1, 10 sec, 1 min, ecc.

ILLUSTRAZIONE DEL METODO

In tutti i casi i dati di partenza sono costituiti da una lista di valori successivi di Leq elementari memorizzati.

Caso di analisi sul piccolo periodo

Un quartiere residenziale è sottoposto sia al rumore di un cantiere sia a quello di traffico stradale locale, quindi scarso e del tutto casuale.

In un primo tempo possiamo considerare il cantiere come sorgente del rumore da discriminare nell'ambiente in esame.

Misurazioni:

Posizione: all'esterno del quartiere

Durata totale della misura: dalle 18:47 alle 19:07

attività intensa del cantiere: dalle 18:54 alle 18:58 e dalle 19:00 alle 19:06

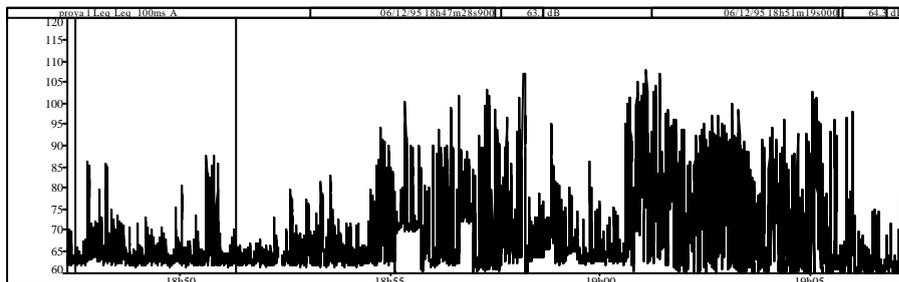
macchinari di cantiere: pale meccaniche, scavatrici, martelli pneumatici

Fase di analisi alla cieca:

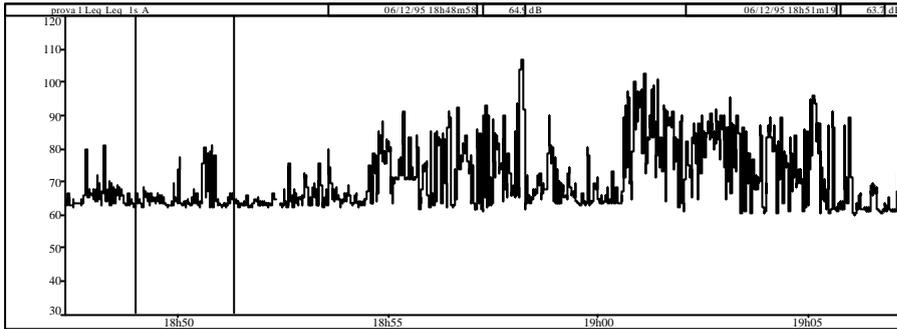
A) Storia temporale:

tracciati dell'evoluzione temporale del rumore, essi mostrano nell'ordine: l'evoluzione di un Leq,T da 100 msec, lo stesso con un Leq da 1 s e con un Leq da 1 min.

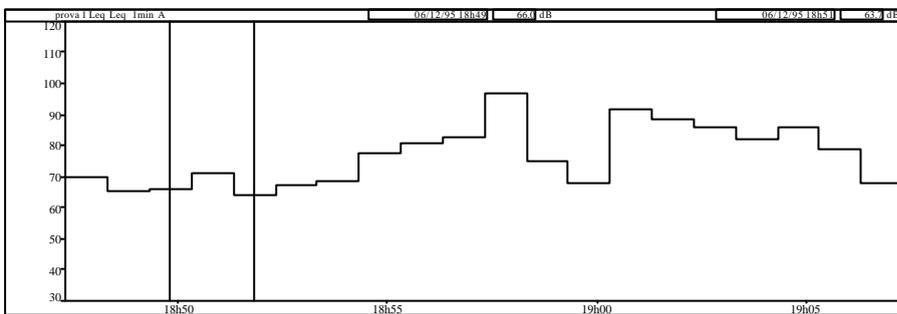
Tracciato con Leq da 100ms:



Tracciato con Leq da 1s:



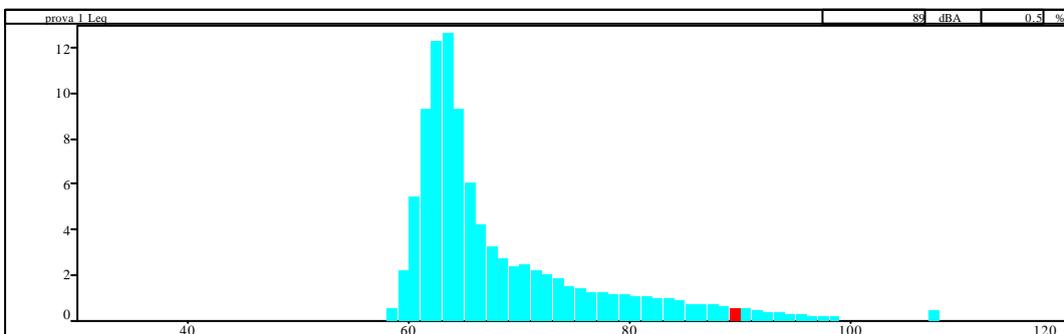
Tracciato con Leq da 1min:



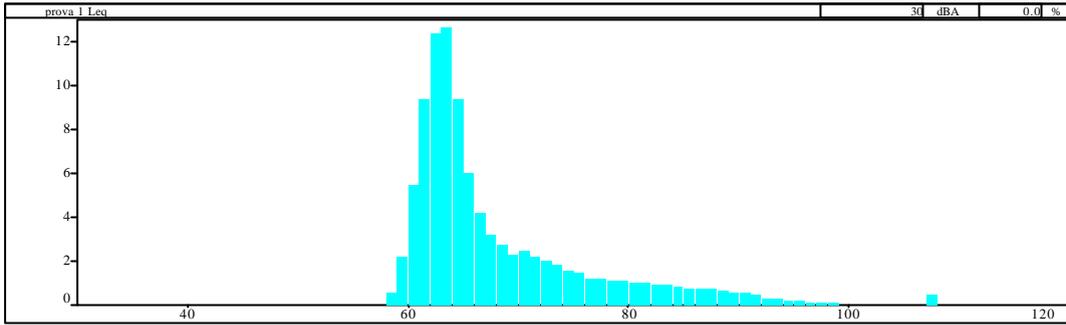
B) Analisi statistica distributiva:

tracciato degli istogrammi non cumulativo di uno Short-Leq sulla durata totale di misura.

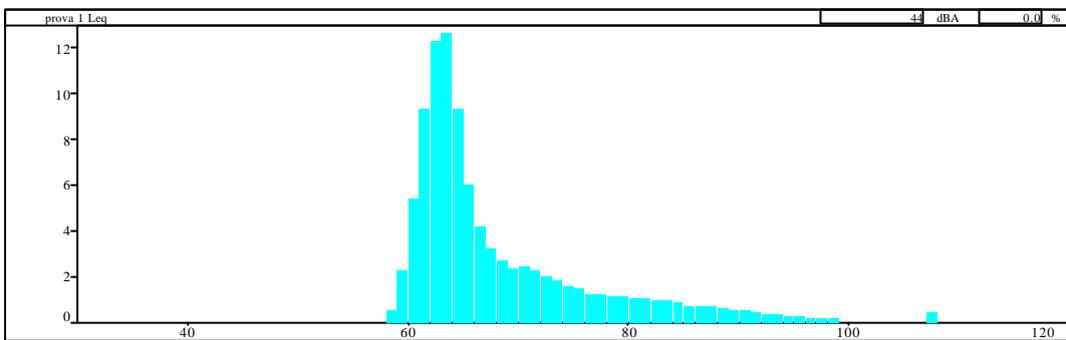
Tracciato con Leq da 100ms:



Tracciato con Leq da 1s:



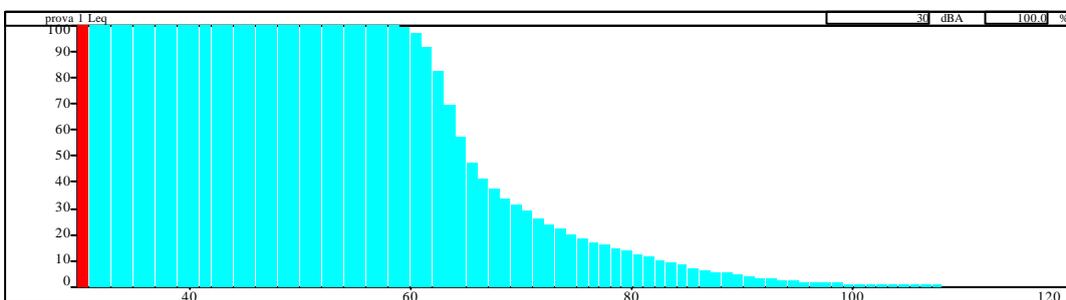
Tracciato con Leq da 1min:



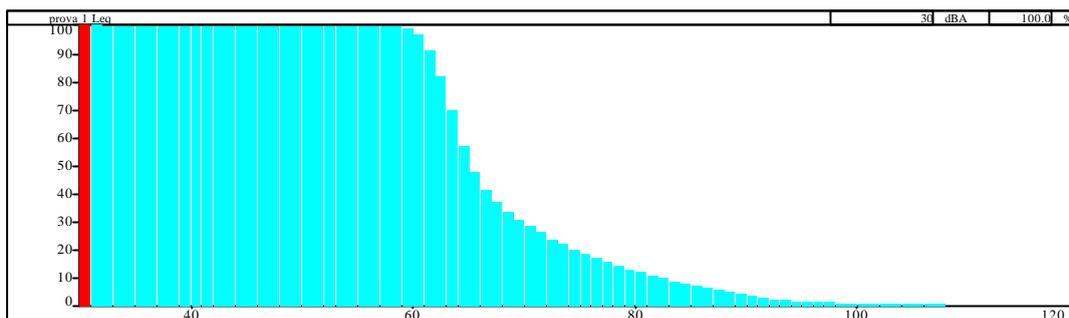
B) Analisi statistica cumulativa:

tracciato degli istogrammi cumulativi di uno Short-Leq sulla durata totale di misura.

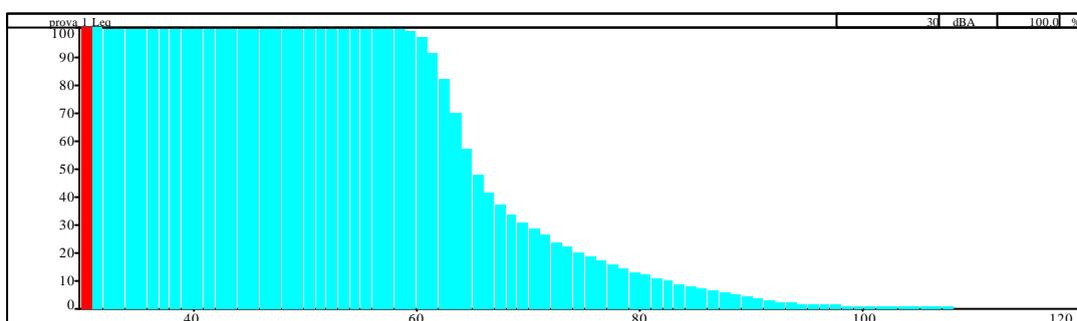
Tracciato con Leq da 100ms:



Tracciato con Leq da 1s:



Tracciato con Leq da 1min:



c) Tabella dei risultati numerici

Il principio del tabulato è quello di fornire un'immagine numerica della situazione a volte analitica e sintetica. Esso deve contenere sufficienti dettagli in modo che qualsiasi possa essere la tipologia della situazione, almeno una parte della tabella sia adeguata per fornire una descrizione attendibile della situazione in questione.

Il tabulato si basa sulla seguente tecnica:

- limitare il periodo di riferimento su sottoperiodi in numero da 6 a 24,
- descrivere ogni sottoperiodo $T(i)$ utilizzando il corrispondente $Leq,T(i)$, ma anche la deviazione standard della serie di Leq (10 sec).

Si può anche aggiungere qualche elemento della distribuzione statistica cumulata, per esempio: $L(1)$, $L(10)$, $L(50)$, $L(95)$.

È importante notare che la media degli 8 L(10) o L(95) da 5 min, non è uguale agli L(10) o L(95) da 40 min.

Fase di analisi intelligente

Scelta di periodi significativi

Osservando il tracciato dell'evoluzione temporale, l'operatore potrà scegliere un periodo che egli consideri come tipico del rumore discriminato o del rumore residuo. Meglio di ogni indice statistico, l'analisi visuale dell'evoluzione temporale permette di determinare se un periodo è rappresentativo o meno della situazione generale, se il segnale è stazionario o no, ecc.

Scelta di un Leq elementare diverso

Per un rumore costituito da avvenimenti intermittenti ripetitivi: aerei, treni, auto, ecc., lo Short-Leq pur essere utilizzato come un estimatore dell'energia corrispondente al tipo di fenomeno, a condizione che la durata elementare del Leq sia adattata alla durata tipica di ogni avvenimento.

L'operatore può facilmente effettuare questo tipo di analisi impostando il software per calcolare il tracciato dell'evoluzione temporale e delle distribuzioni statistiche del Leq più lungo in funzione della situazione in esame.

TEORIA DEGLI ERRORI

Anche le leggi dell'acustica, come di tutte le altre branche della fisica, sono state derivate da osservazioni sperimentali di due tipologie di base:

- esperimenti per determinare il valore numerico di una quantità fisica
- verifica di una teoria con i dati sperimentali

per avere dei risultati significativi è sempre necessario analizzare i dati sperimentali con la “conoscenza” dell'errore sperimentale insito in essi, è quindi molto importante capire le possibili fonti di errore e quantificare gli stessi. E' fondamentale che qualsiasi dato misurato sperimentalmente venga presentato con il margine di errore associato in una forma del tipo:

$$\text{dato} = \text{valore misurato} \pm \text{errore}$$

Definiamo allora le seguenti quantità

il **valore vero** A_0 è una quantità esatta

il **valore sperimentale** A è il risultato di una misura effettuata per determinare A_0 ma che di solito differisce da esso in quanto i metodi e gli strumenti non sono mai perfetti

l'errore sperimentale D è la differenza tra A_0 e A , $D = A - A_0$, ma siccome noi non conosciamo A_0 non possiamo “normalmente” conoscere nemmeno l'errore D .

La teoria degli errori, o meglio l'analisi degli errori, è quindi l'insieme delle procedure che l'osservatore deve mettere in atto per stimare l'errore basandosi sulle osservazioni sperimentali.

LA REGISTRAZIONE DEI DATI

Prima di registrare un dato si deve decidere con quale precisione si vuole annotarlo. Un esempio banale lo si può fare con una misura di lunghezza: se abbiamo un metro la cui scala è in mm (risoluzione di 1mm) e rileviamo un valore compreso tra 103 e 104 mm lo dovremmo annotare considerando che 103 mm è un valore accurato mentre dopo la virgola potrebbe essere 0.4 oppure 0.6 mm. L'annotazione corretta da fare è allora (103.5 \pm 0.1) mm, cioè registriamo una cifra significativa dopo la virgola. Se avessimo registrato 103 mm avremmo registrato un valore con un errore “sicuramente” molto grande, mentre un valore di 103.55 mm non avrebbe senso.

Un altro caso è quello che prevede di determinare il valore di una grandezza in modo indiretto dalla misura di altre. Se vogliamo conoscere il valore ohmico di una resistenza,

misuriamo la tensione e la corrente ($R=V/I$). misurando la tensione con 3 cifre significative e la corrente con 4 cifre, il valore in ohm della resistenza potrà essere registrato con 3 cifre: $V = 10.5V$, $I=1.522^\circ$, $R=6.70ohm$.

TIPI DI ERRORE

A prescindere dagli errori dell'operatore dovuti a lettura, annotazioni o scorretto uso degli strumenti, l'analisi degli errori ha a che fare normalmente con errori sistematici e errori casuali.

Gli **errori sistematici** possono derivare da:

Errori di calibrazione dello strumento. Un errore di calibrazione D_a provocherà uno scostamento fisso di D_a di tutte le letture. Uno strumento di misura con scala 0-100 che ha però un intervallo effettivo di misura 0-99, provocherà un errore sistematico di lettura pari a $+ 100/99$.

Errori sperimentali. Quando le condizioni di misura non sono quelle definite dalla teoria della misura stessa o le condizioni di impiego della strumentazione non sono quelle definite dal costruttore.

Gli **errori casuali** derivano invece dai limiti di precisione degli strumenti o da metodi di misura imperfetti, oppure dalle caratteristiche di casualità insite nel fenomeno che si sta osservando. Errori casuali dovuti a fluttuazioni di misura obbediscono spesso ad una distribuzione di tipo Gaussiano, ed è in questo caso che prendono il nome di errori statistici e possono essere ridotti ripetendo più volte le misurazioni.

ANALISI DEI DATI

L'analisi dei dati prevede la determinazione del valore medio misurato e della deviazione standard.

Il valore medio è definito come:

$$\bar{x} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \equiv (\bar{x})$$

e la sua varianza risulta:

$$\text{var}(x) \equiv \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

la deviazione standard di un campione misurato è definita come:

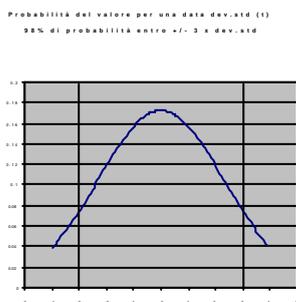
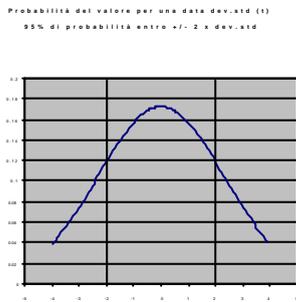
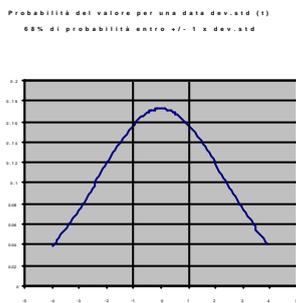
$$s = \sqrt{\text{var}(x)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

e rappresenta la distribuzione dei valori rilevati in un gruppo di misurazioni, dunque una buona stima dell'errore statistico insito nella misura stessa.

Il vero significato della deviazione standard è intuibile dall'osservazione delle curve a lato, dove si vede che la dev.std. è correlata alla probabilità $p(t)$ di trovare un singolo campione in un intervallo tra $(\mu - t\sigma$ e $\mu + t\sigma)$ con la probabilità del 68%, 95% o 98% per $t = 1, 2$ o 3 rispettivamente.

Quindi per la stima di μ , dati il numero dei campioni N (tipicamente > 20) ed il valore medio di x , con una stima del 95%, si scrive:

$$m = \bar{x} \pm \frac{2s}{\sqrt{N}}$$



COMBINAZIONE DI ERRORI

Può capitare alle volte che il risultato finale di un esperimento sia la combinazione di diverse misure, ed è necessario stabilire allora quale è l'errore nel risultato finale.

Caso lineare

Supponiamo che il risultato finale a è relativo alle misure b e c :

$$a = b - c$$

per trovare l'errore in a si deve allora differenziare:

$$\Delta a = (\Delta b) + (-\Delta c)$$

mentre nel caso in cui fossimo interessati all'errore massimo possibile, sarebbe sufficiente aggiungere le ampiezze di Δb e Δc per avere il massimo Δa .

E' invece molto più significativo considerare le deviazioni dalla radice del valore quadratico medio rms (root mean square):

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_a^2 &= \langle (a - \bar{a})^2 \rangle \\ &= \langle [(b - c) - (\bar{b} - \bar{c})]^2 \rangle \\ &= \langle (b - \bar{b})^2 \rangle + \langle (c - \bar{c})^2 \rangle - 2\langle (b - \bar{b})(c - \bar{c}) \rangle \\ &\equiv \mathbf{s}_b^2 + \mathbf{s}_c^2 - 2\text{cov}(b, c) \end{aligned}$$

L'ultimo termine implica la funzione di covarianza di b e c , che indica quanto gli errori sono o meno correlati tra loro. Essa può essere positiva o negativa, mentre vale "0" nel caso in cui gli errori sono completamente non correlati. Quindi, se gli errori in b e c non sono correlati (e solo in questo caso) si potranno sommare i contributi in quadratura di Δb e Δc :

$$\mathbf{s}_a^2 = \mathbf{s}_b^2 + \mathbf{s}_c^2$$

Infatti, nel caso in cui $a = b + b$, per cui le variabili b e b sono, evidentemente, correlate e l'errore σ_b è quello relativo alla misura di b , l'errore σ_a vale $2\sigma_b$.

Caso non lineare

In questo caso è necessario differenziare, mettere insieme i termini di ogni variabile indipendente e addizzionarli in quadratura. Per $y(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ si scrive :

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2$$

quindi, se per esempio: $a = b^r c^s$, in cui r ed s sono costanti note e gli errori in b e c sono non correlati,

$$\left(\frac{s_a}{a} \right)^2 = r^2 \left(\frac{s_b}{b} \right)^2 + s^2 \left(\frac{s_c}{c} \right)^2$$

che rappresenta la combinazione degli errori frazionari in b e c per fornire l'errore frazionario in a . Nel caso sia presente una certa correlazione tra b e c , il valore a diventa:

$$\left(\frac{s_a}{a} \right)^2 = r^2 \left(\frac{s_b}{b} \right)^2 + s^2 \left(\frac{s_c}{c} \right)^2 + 2rs \frac{\text{cov}(b,c)}{bc}$$

Se per esempio consideriamo:

$$a = \frac{b}{c} = \frac{(100 \pm 10)}{(1 \pm 0.2)} \text{ assumendo indipendenti gli errori in } b \text{ e } c, \text{ avremo:}$$

$$\left(\frac{s_a}{a} \right)^2 = \left(\frac{10}{100} \right)^2 + \left(\frac{0.2}{1} \right)^2 = 0.01 + 0.04 = 0.05$$

$$s_a = a \times \sqrt{0.05} = 100 \times 0.22 = 22$$

Quindi la nostra misura dovrà essere scritta come:

$$a = 100 \pm 22 \text{ oppure } a = 100(1 \pm 22\%)$$

Dunque, nel caso di 2 variabili semplici, i risultati delle misure potranno essere rappresentati come:

$$y = x_1 + x_2 \rightarrow y = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2) \pm \sqrt{s_{x_1}^2 + s_{x_2}^2}$$

$$y = x_1 - x_2 \rightarrow y = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm \sqrt{s_{x_1}^2 + s_{x_2}^2}$$

$$y = x_1 \times x_2 \rightarrow y = (\bar{x}_1 \times \bar{x}_2) \left[1 \pm \sqrt{\left(\frac{s_{x_1}^2}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{s_{x_2}^2}{x_2}\right)^2} \right]$$

$$y = \frac{x_1}{x_2} \rightarrow y = \left(\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2}\right) \left[1 \pm \sqrt{\left(\frac{s_{x_1}^2}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{s_{x_2}^2}{x_2}\right)^2} \right]$$

Combinazione di diverse determinazioni sperimentali

Quando diverse misure forniscono una serie di risultati a_i , la migliore stima di a e la sua incertezza saranno dati da:

$$a = \frac{\sum_i \left(\frac{a_i}{s_i^2}\right)}{\sum_i \left(\frac{1}{s_i^2}\right)}, \quad \frac{1}{s^2} = \sum_i \frac{1}{s_i^2}$$

il valore $\frac{1}{s^2}$ fornisce la precisione della determinazione sperimentale.

Il metodo dei minimi quadrati

Questo metodo è usato molto spesso nell'analisi dei dati per determinare i parametri sperimentali da un insieme di dati misurati.

Considerando il caso "semplice" in cui le funzioni tra le variabili siano lineari e del tipo:

$$y = a + bx$$

in cui a e b sono i parametri da determinare (origine e pendenza di una retta) a partire da un insieme di coordinate sperimentali x_i e y_i con i che va da 1 a N , scriviamo:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_i y_i$$

$$L_{xx} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2$$

$$L_{yy} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$$

$$L_{xy} = \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

allora, i valori medi misurati dei parametri a e b, saranno:

$$\bar{b} = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}$$

$$\bar{a} = \bar{y} - \bar{b} \bar{x}$$

mentre gli errori associati potranno essere calcolati come:

$$s_a^2 = \frac{\sum_i x_i^2}{N \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} s_y^2$$

$$s_b^2 = \frac{N}{N \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} s_y^2$$

L'incertezza della misura diventa:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_i [y_i - (\bar{a} + \bar{b} \times x_i)]^2}{(N - 2)}}$$

LE SORGENTI DI ERRORE NELLE MISURE DI RUMORE AMBIENTALE

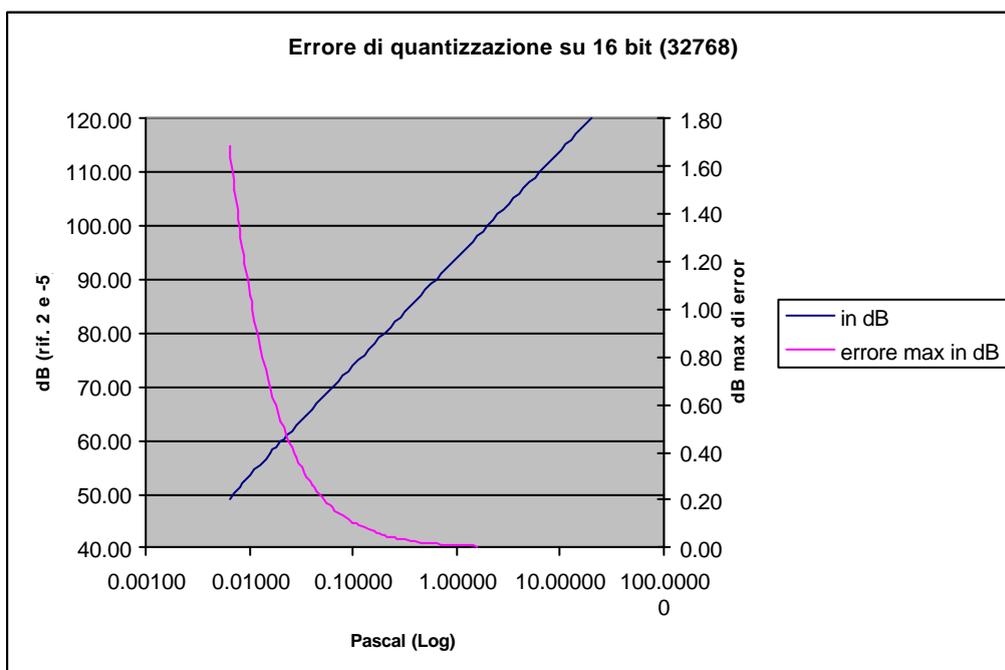
DINAMICA DELLO STRUMENTO ED ERRORE DI QUANTIZZAZIONE

La conversione da analogico a digitale degli strumenti viene fatta su valori discreti espressi in bit e nel caso di uno strumento a 16 bit (di conversione A/D) essi corrispondono a 32768 livelli discreti.

I livelli discreti in cui può essere suddiviso un segnale analogico determinano la “dinamica” dello strumento la quale può essere spostata in tutto il campo di misura che è normalmente più esteso e limitato dalla dinamica del microfono di misura e dall’elettronica dello strumento stesso.

Si può allora tracciare la curva di errore dovuto alla discretizzazione del valore analogico su 16 bit (ad esempio), equivalenti ad una dinamica nominale di circa 80 dB, senza però tenere in considerazione il resto della circuitazione elettronica dello strumento. Questa dinamica è quella rappresentata nella figura successiva nell’intervallo tra 40 dB e 120 dB.

Secondo le normative, l’errore massimo ammesso per uno strumento di classe 1 è +/- 0.7 dB, che si manifesta in effetti ai valori più bassi della scala, come si può rilevare dalla figura seguente.



LA MISURA RMS E L'ERRORE NEI FILTRI IN 1/3 D'OTTAVA

Il valore rms di un segnale è definito come:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

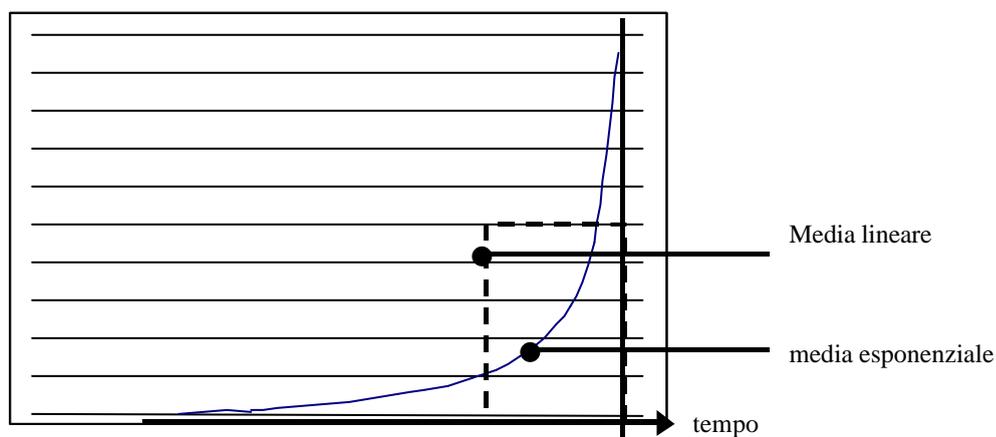
dove T è il tempo di integrazione usato dallo strumento (circuitto rms) per fare il valore rms (valore efficace) del segnale. La misura rms sarà corrispondente al vero valore rms solo se il tempo di misura T è infinito, quindi nella pratica avremo sempre un certo errore di “stima” del valore rms che potrà essere ridotto impostando un tempo molto lungo.

Per fare una media esponenziale in effetti si rende necessario tenere in conto le oscillazioni del segnale e “attendere” che il circuito (il suo tempo di risposta) le smussi ad un valore costante, il tempo è definibile in funzione della costante di tempo del circuito di integrazione (RC) come:

$$T_a = 2RC$$

che si può dimostrare come possa essere applicata sia a segnali deterministici sia a segnali casuali, ma comunque con caratteristiche di stazionarietà, non è cioè applicabile per i fenomeni transitori che devono essere trattati con un approccio metrologico completamente diverso.

Il valore rms può essere ottenuto sia con una media esponenziale che con una (più intuitiva) media lineare. La differenza tra i 2 metodi è concettualmente spiegata dalla figura seguente.



Utilizzando dei circuiti filtro per le bande da 1/n d'ottava avremo una seconda sorgente di errore dovuta alla larghezza di banda dei filtri. Ciò che succede è descrivibile in

sintesi con il fatto che quando un segnale viene applicato ad un circuito “filtro”, si deve attendere un certo tempo prima che questi risponda (ritardo del sistema) e il tempo T necessario per avere un corretto valore di ampiezza dipende dall’inverso della larghezza di banda B ($T=1/B$); relazione valida in prima approssimazione per i filtri normalmente utilizzati nella misura di segnali acustici. Questo secondo errore è definibile attraverso la relazione che lega larghezza di banda B e il tempo di integrazione T, fornendo la deviazione standard della misura rms:

$$e = \frac{1}{2\sqrt{BT}}$$

che espressa in dB diventa:

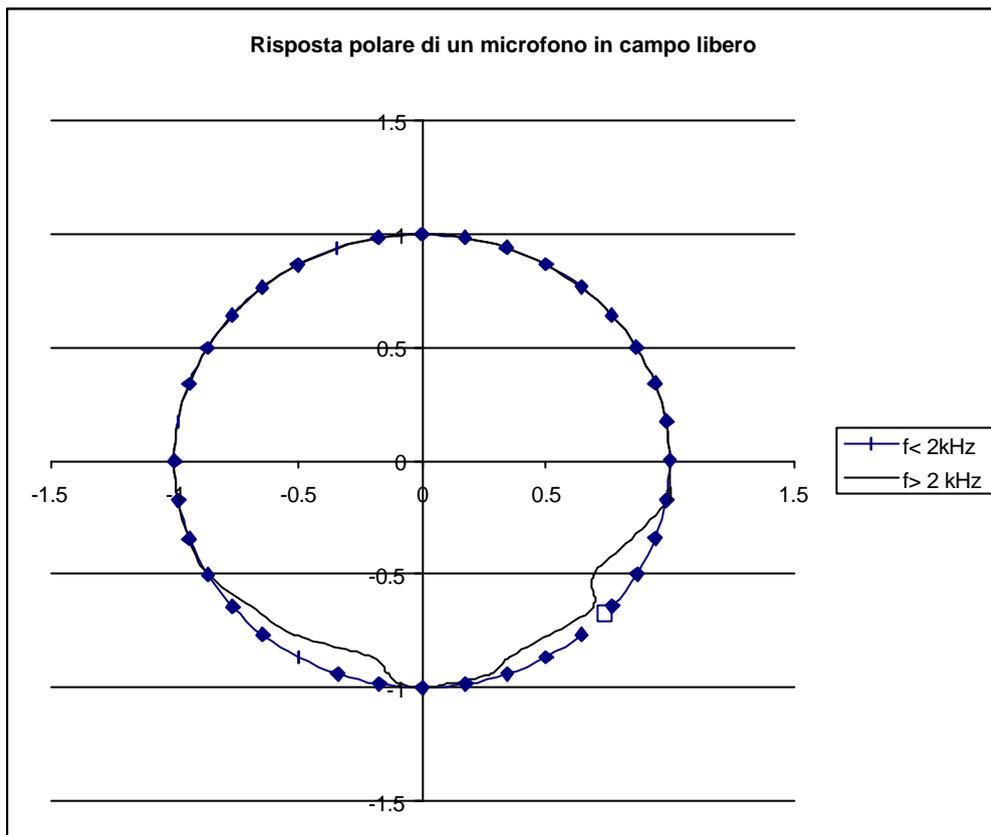
$$e = \frac{4.34}{\sqrt{BT}} \text{ dB}$$

Per minimizzare questo errore è necessario allungare il tempo di integrazione (tempo di media) man mano che i filtri restringono la banda, dunque man mano che si misura verso le basse frequenze. Questo principio si applica indifferentemente a filtri di tipo analogico e sequenziali, sia ai moderni analizzatori di spettro in tempo reale, si tratta in effetti di un problema legato all’analisi dei segnali in senso generale.

SCELTA DEL MICROFONO: CAMPO LIBERO O INCIDENZA CASUALE

Le caratteristiche e l’orientazione del microfono per le misure del rumore ambientale sono affatto trascurabili per la precisione (ripetibilità) delle misure stesse.. Le differenze di risposta dei microfoni a campo libero e ad incidenza casuale si manifestano tipicamente alle alte frequenze (> 2 kHz) in funzione dell’orientamento del microfono. Un microfono a campo libero ha una risposta in frequenza definita per incidenza perpendicolare alla membrana, mentre uno ad incidenza casuale è definito per tale situazione. Quindi, utilizzando un microfono a campo libero “non orientato” verso la direzione di provenienza del fenomeno acustico che si vuole misurare, si commette un errore di ampiezza la cui entità è funzione del contenuto in frequenza della sorgente stessa.

Fino ad una frequenza compresa tra 2 e 5 kHz (il valore esatto dipende da ogni diverso tipo di microfono) non ci sono praticamente differenze, oltre tale valore la risposta di un microfono a campo libero non-orientato correttamente, non è costante su di un diagramma polare e non è nota se non per uno specifico microfono.



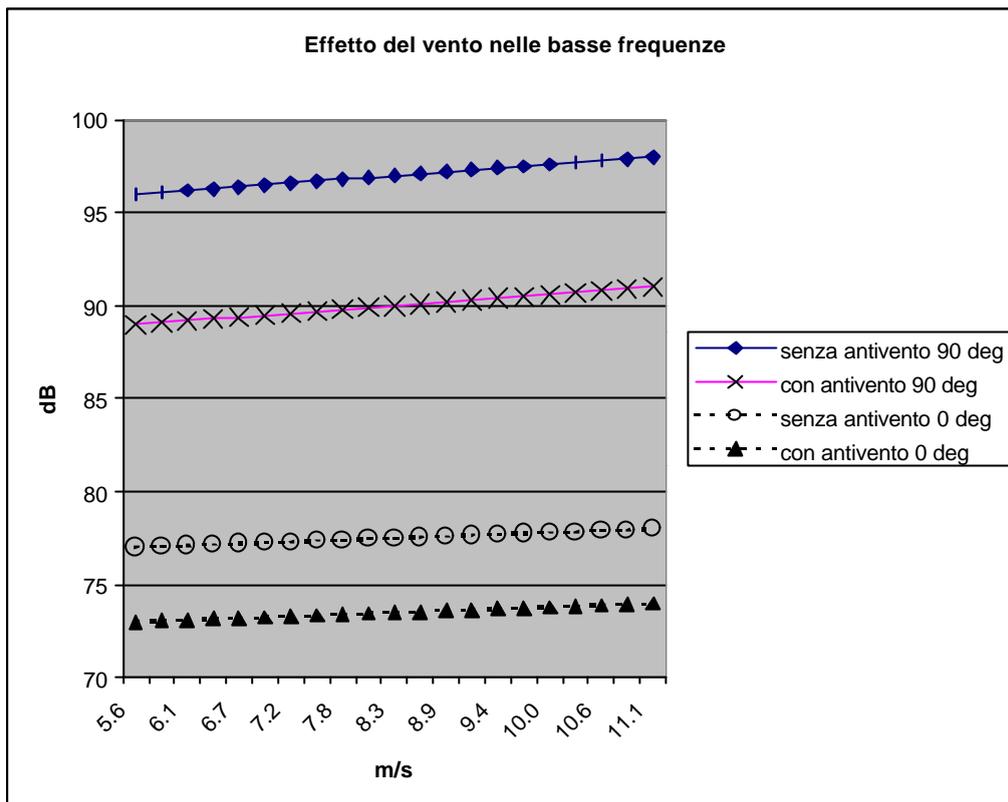
INFLUENZA DELLA VELOCITÀ DEL VENTO

Un flusso d'aria è in grado di generare fenomeni di turbolenza attorno al microfono che rappresentano una sorgente sonora la cui energia si somma a quella del fenomeno acustico in osservazione. L'errore in questo caso si manifesta nelle basse frequenze, quindi il valore in dBA è meno influenzato, tuttavia l'entità di questo disturbo può essere particolarmente elevata.

L'utilizzo di schermi controvento permette di ridurre questo problema fino ad una velocità massima di circa 10 m/s. oltre la quale ogni tipo di misura è assolutamente da evitare.

L'entità dell'errore in dB che si può commettere senza l'utilizzo di un opportuno schermo antivento, varia in funzione della frequenza e della velocità del flusso d'aria, ed è anche dipendente dall'orientazione del microfono rispetto al flusso d'aria: a 90 o a 0 deg rispetto al piano della membrana.

Le differenze per una situazione tipica sono riportate nel grafico.



INFLUENZA DELLE CONDIZIONI CLIMATICHE

L'influenza delle condizioni climatiche riguarda essenzialmente la pressione e la temperatura, escludendo di principio la presenza di precipitazioni atmosferiche, che di fatto rendono impossibile qualsiasi misurazione corretta (cioè ripetibile).

Mentre le variazioni di pressione atmosferica influiscono essenzialmente sui valori di riferimento dei calibratori acustici, le variazioni di temperatura influenzano sia i calibratori sia gli strumenti di misura, in particolare il microfono.

Si deve infatti ricordare che le normative internazionali di omologazione degli strumenti per le misure acustiche, prevedono di effettuare tutte le prove di verifica di precisione anche in funzione delle condizioni ambientali: temperatura, pressione, umidità, vibrazioni, campi elettromagnetici, ecc.

In particolare esiste la possibilità per fonometri e calibratori di essere verificati per l'appartenenza alla classe di precisione specifica (classe 1) in condizioni di laboratorio "esclusivamente" (20 gradi C) ed in questo caso essi potranno essere utilizzati "esclusivamente" in tali condizioni.

Esercitazioni

SIMULAZIONE REALE DI SITUAZIONI DI MISURA MEDIANTE RIPRODUZIONE DI CAMPIONI DI RUMOROSITÀ AMBIENTALE REGISTRATE CON TECNICHE DI REALTÀ VIRTUALE AUDIO E MISURA CON L'UTILIZZO DI FONOMETRI DI BASE, SISTEMI DI MONITORAGGIO, ANALISI PARALLELA DEL LIVELLO, DELLO SPETTRO E DELLA REGISTRAZIONE AUDIO.

NORMALIZZAZIONE DEL LEQ SUL TEMPO PER IL CONFRONTO DI SITUAZIONI DIVERSE

ANALISI STATISTICA SUI LEQ O SUI VALORI RMS E DETERMINAZIONE DEL CLIMA DI RUMORE

L'UTILIZZO DELL'ANALISI DI SPETTRO E LA STATISTICA PER BANDE DA 1/3 D'OTTAVA

MISURA DEL RUMORE IN VARIE SITUAZIONI:

spazi aperti e zone ad alta urbanizzazione

rumore da traffico stradale, ferroviario, aeroportuale

CARATTERIZZAZIONE DEL RUMORE EMESSO DALLA PRESENZA DI ATTIVITÀ INDUSTRIALI CHE EMETTONO RUMORE PER ATTIVITÀ PROPRIE O INDOTTE

RUMORE INDOTTO DA ATTIVITÀ DI INTRATTENIMENTO

CONFRONTO TRA I RISULTATI CHE SI OTTENGONO CON DIVERSI METODI DI ANALISI PER UNA STESSA SITUAZIONE E NECESSITÀ DI TROVARE UNA NORMALIZZAZIONE PER IL CONFRONTO

