

“Virtù, Vizi pregi e difetti della percezione della musica”  
**La Misura di Distorsione dei diffusori acustici  
nelle “effettive condizioni d’uso”: la Distorsione Integrale**

**di Mario Bon  
rivisto il 5 luglio 2010**

**per SUONO**

fin qui è stato pubblicato nel numero 427 di SUONO : “Corrispondenza tra misure e prestazioni hi-fi” della serie “Virtù, Vizi pregi e difetti della percezione della musica”

Questa è l’ ultima parte non ancora pubblicata.

---

Il diffusore acustico è l’ultimo anello della catena di riproduzione audio ed il segnale che lo alimenta contiene tutta la distorsione prodotta dagli apparecchi che lo precedono (lettore CD, amplificatore) quindi è giusto pretendere che la distorsione prodotta “a monte” del diffusore sia la minima possibile e, maggior ragione, è giusto pretendere che il programma musicale registrato nel CD non sia sovramodulato.

### **6.6 Limiti di udibilità della distorsione**

Definire un metodo di misura della distorsione non basta: si devono anche definire i limiti di udibilità della distorsione misurata con la nuova procedura. Per farlo utilizziamo i giudizi soggettivi espressi nei test di ascolto dei diffusori commerciali: esistono diffusori unanimemente considerati dei riferimenti di qualità sonora per i quali non si segnala alcuna fatica da ascolto: se ne deduce che la distorsione prodotta da questi diffusori è inferiore al limite di udibilità. Tra questi diffusori figurano, per esempio, le QUAD ESL 2905 e le B&W 801D. Formano due classi

- La classe 1 contiene tutti i diffusori che soggettivamente non producono distorsione udibile
- La classe 2 contiene tutti gli altri

A questo punto il limite di udibilità della distorsione corrisponde ad un ipotetico diffusore la cui distorsione è troppo alta per la classe 1 e troppo bassa per la classe 2 (elemento di separazione tra due classi contigue).

Il limite di udibilità della distorsione andrà delineandosi con sempre maggiore precisione nel tempo. Nulla vieta di dividere ulteriormente la classe 2 in sottoclassi in base a criteri, non di udibilità, ma di tollerabilità.

Evidentemente la condizione ideale è la completa assenza di distorsione.

Tecnicamente la condizione necessaria e sufficiente affinché la distorsione armonica sia nulla è che sia nulla la distorsione per intermodulazione (al netto della distorsione Doppler per gli altoparlanti). Dove c’è distorsione armonica c’è sempre intermodulazione. Tanto vale concentrarsi sulla distorsione di intermodulazione.

La misura della distorsione armonica è molto diretta: lo stimolo è una sinusoide e i prodotti di distorsione sono le armoniche dello stimolo (2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> armonica, eccetera). L’entità della distorsione armonica dipende solo dall’ampiezza dello stimolo.

La distorsione per intermodulazione dipende dalla forma dello stimolo: il risultato cambia sia cambiando lo stimolo che la sua ampiezza. Da qui la difficoltà di definire uno stimolo in grado di simulare le effettive condizioni d’uso di un diffusore acustico. Quello che è certo è che l’intermodulazione è più fastidiosa della distorsione armonica.

Dato che è molto più agevole misurare la distorsione armonica, poniamoci questa domanda: nota la distorsione armonica è possibile prevedere il tasso di distorsione di intermodulazione? Meglio ancora: è possibile fissare dei limiti alla distorsione armonica che garantiscano la non udibilità della distorsione di intermodulazione? Ciò permetterebbe di ottenere una previsione certa eseguendo delle misure standardizzate e facilmente ripetibili.

La cosa, in linea teorica, è possibile ma richiede una mole enorme di informazioni e ciò rende, di fatto, questa strada impraticabile. Tuttavia l'esperienza mostra che:

- Se la distorsione armonica è contenuta (< 0.3%)
- se la distorsione delle armoniche superiori al terzo ordine è nulla (< 0.1%)

anche l'intermodulazione è bassa. In queste condizioni il tasso di distorsione è direttamente proporzionale all'ampiezza dello stimolo applicato (dimostrabile analiticamente). Ne segue che in regime di segnali "non troppo grandi", dimezzando l'ampiezza dello stimolo ci si può aspettare che la distorsione si riduca attorno alla metà. Questa regola semi-empirica tornerà utile quando avremo a che fare con il rumore di quantizzazione presente nello stimolo permettendo di trascurarlo.

Per concludere la distorsione è prevedibile matematicamente ma il processo è antieconomico. L'esperienza maturata con le misure di distorsione armonica permette di stimare la distorsione di intermodulazione ma l'utente finale ha bisogno di un risultato certo che stabilisca se il tal diffusore è in grado di sonorizzare il suo ambiente, con il suo genere musicale preferito e con un tasso di distorsione adeguatamente basso. La misura di "Distorsione Integrale" dovrebbe servire proprio a questo.

## 6.7 Nota Storica

Le misure di distorsione con frammenti musicali, bande di rumore o stimoli multitono hanno alle spalle almeno 40 anni di storia. Tra i primi a proporre frammenti musicali come stimoli per la misura della distorsione di intermodulazione troviamo Nikado nel 1968 [c]. Nel 1976 G. C. Bordone Sacerdote e G.G.Bordone descrivono una misura di distorsione che utilizza come stimolo bande di rumore filtrato a terzi di ottava [a]. Sempre nel 1976 Belcher [b] propone una misura dove lo stimolo è ottenuto da sequenze MLS pseudo casuali. Nel 2001 misure con segnali multitono sono state descritte da E. CZERWINSKI e altri [d]. Per ultimo nel 2009 il Prof. Angelo Farina ha descritto un metodo che sfrutta gli sweep esponenziali e sequenza MLS.

[c]	1968	S. Nikado, "On Distortion Measurement of Loudspeakers Using Programme Sound," in Proc. 6th Int. Congr. On Acoustics (Tokyo, Japan, 1968 Aug.), pp.D101 –D104 1968
[a]	1976	G. C. Bordone Sacerdote e G.G.Bordone - "Altoparlanti e normalizzazione" - L'ELETTROTECNICA, Vol LXIII – n. 10 ottobre 1976
[b]	1976	R. Belcher, "Audio Nonlinearity: A Comb-Filter Method for Measuring Distortion," Rep. 2, BBC Research Dept. (1976)
[d]	2001	E. CZERWINSKI, A. VOISHVILLO, S. ALEXANDROV e A. TEREKHOV ( <i>Cerwin Vega Inc</i> ), "Multitone Testing of Sound System Components - Some Results and Conclusions, Part 1 & 2" - novembre 2001
[e]	2009	Angelo Farina, "Silence Sweep: a novel method for measuring electro-acoustical devices" - Audio Engineering Society – 126th AES Convention 2009 May 7–10 Munich, Germany (dove però, per ammissione dello stesso Farina, ci sono dei problemi da risolvere) <a href="http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/247-AES126.pdf">http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/247-AES126.pdf</a>

## 6. 8 La "Distorsione Integrale"

Il problema nelle misure di intermodulazione è che il risultato dipende dalla forma dello stimolo: più questo è esteso ed intenso verso le basse frequenze tanto più alto risulta il tasso di distorsione prodotto. Ciò avviene perché per un altoparlante, a parità di livello, lo spostamento del diaframma aumenta di quattro volte per ogni dimezzamento della frequenza. Ne segue che, con uno stimolo a larga banda spettralmente molto esteso, l'equipaggio mobile supera facilmente i limiti di linearità e l'intermodulazione raggiunge valori molto elevati. Lo scopo però non è portare il diffusore a produrre "tanta" distorsione ma valutare quella prodotta nelle effettive condizioni d'uso.

Un nome idoneo per una procedura che misura contemporaneamente tutte le forme di distorsione è "Distorsione Integrale" (DI) o "Distorsione Integrale Stazionaria" (DIS). Integrare significa "sommare" e la DI somma gli effetti di tutti i tipi di distorsione. Per quanto riguarda il rumore questo è sempre presente (in qualsiasi tipo di misura) e la DI non fa eccezione.

Generalizzando il significato del termine mascheramento, diamo questa definizione: "la DI rileva le componenti spettrali prodotte dalla distorsione non lineare in un segnale stazionario che, mascherando il contenuto dello stimolo originale, causano, nel tempo, la fatica da ascolto".

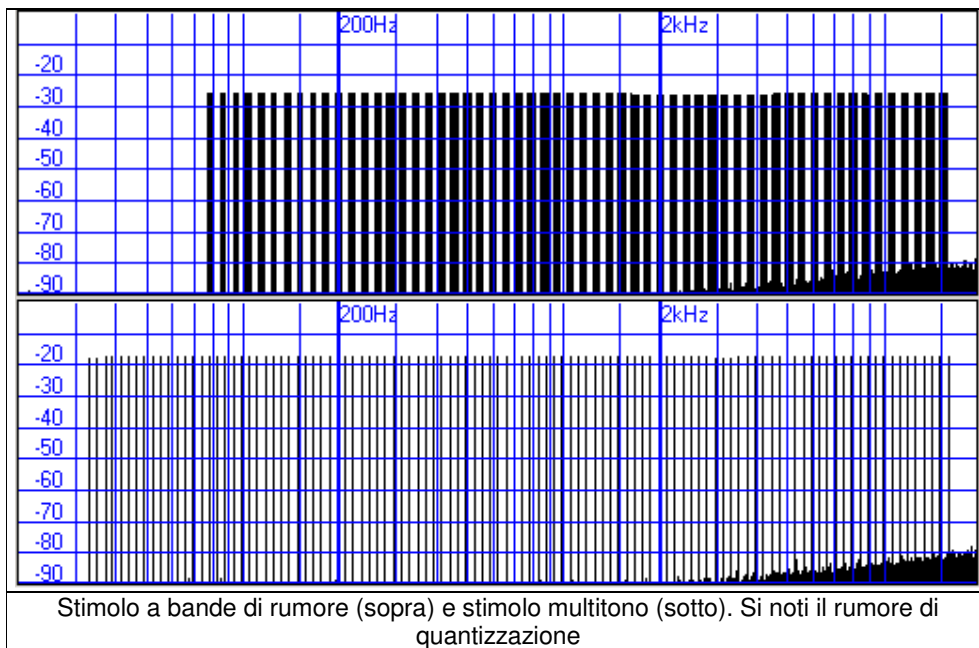
La fatica da ascolto è rappresentata, fisicamente, da un lavoro e richiede, per essere rappresentata numericamente, una integrazione nel tempo (non su un periodo dello stimolo ma su tutta la durata dell'ascolto). Quindi la DI non misura direttamente la fatica da ascolto ma quantifica il fenomeno che la causa estrapolandolo da una misura in regime stazionario.

### 6.9 Definizione dello stimolo: spettro, ampiezza e livello SPL del segnale di test

La misura di DI è una misura stazionaria perché utilizza uno stimolo periodico. Ciò è implicito nella scelta dello strumento di misura (l'analizzatore di spettro FFT) che elabora, con errore prevedibile, solo segnali periodici.

Lo stimolo migliore per riprodurre le effettive condizioni d'uso è la musica stessa. Allora lo stimolo va costruito prendendo un breve frammento musicale e ripetendolo come fosse un segnale periodico. Ma anche utilizzando frammenti musicali i risultati dipenderanno dal singolo frammento scelto: un brano di chitarra classica o un pieno orchestrale daranno sicuramente risultati diversi. L'uso di frammenti musicali come stimoli non è un problema se si deve misurare la distorsione di un amplificatore dove il percorso ingresso-uscita è unico. In questo caso si utilizza una tecnica particolare in grado di "estrarre" la distorsione anche da uno spettro continuo (Random Distortion). Con i diffusori acustici il percorso del segnale dal diffusore al microfono non è unico (basti pensare alla diffrazione ai bordi) e non è possibile utilizzare un frammento musicale così come è.

Per evidenziare la distorsione lo spettro dello stimolo non può essere continuo ma va "tagliato a fette" in modo da rendere visibile la distorsione prodotta dove lo spettro dello stimolo è nullo. Ecco perché gli stimoli sono composti da una serie di sinusoidi distanziate tra loro (segnali multitono) o da bande alternate di rumore.

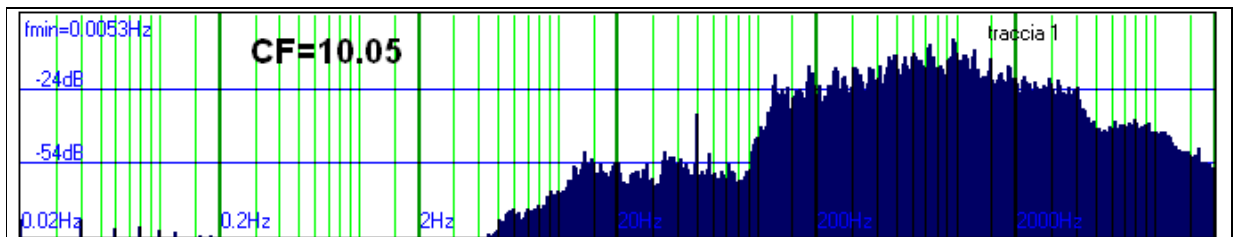


Volendo utilizzare un frammento musicale, per prima cosa, lo si deve sottoporre ad analisi statistica per verificare l'assenza di sovrarmodulazioni, quindi andrà moltiplicato per una finestra di pesatura (nel tempo) e successivamente il suo spettro sarà ridotto ad una serie di bande alternate sottraendo parti di spettro. A questo punto il nostro frammento ha subito trasformazioni sostanziali e c'è da chiedersi se sia ancora preferibile rispetto ad uno stimolo artificiale sintetizzato. La necessità di standardizzazione orienta la scelta verso lo stimolo artificiale. Abbiamo praticamente già descritto come si genera un segnale a bande alternate di rumore: invece che da un frammento musicale si parte da una sequenza MLS pseudocasuale. Le bande avranno larghezza pari a un dodicesimo di ottava centrate sulle note do, re, mi, fa#, sol#, la#: un dodicesimo di ottava si e uno no, una nota si e una no.

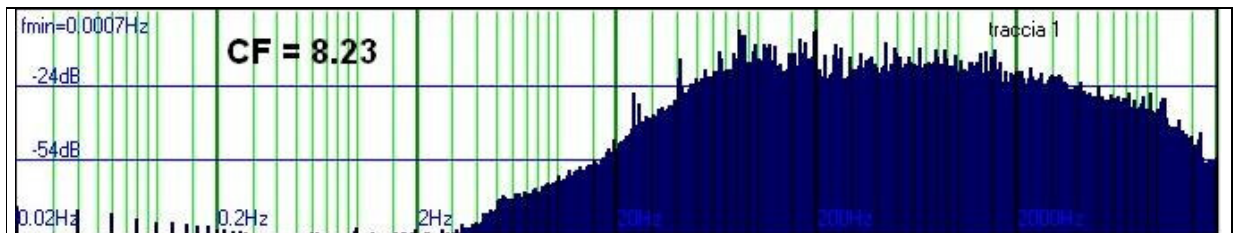
Consideriamo ora il segnale multitono. Lavorando con la musica è naturale sintetizzare stimoli che contengano le stesse frequenze delle note musicali (vds fig. 6.11) e con una densità spettrale tale da mantenere separate le due note successive più gravi che si intendono indagare (per esempio il DO ed il DO# della pedaliera dell'organo). La tabella 6.11 aiuta in questa scelta.

Sovrapponiamo tante sinusoidi quante sono le note musicali (segnale "note musicali") e mescoliamo casualmente le fasi relative per ottenere un fattore di cresta (CF) compreso tra 3 e 5 (corrispondenti alla musica pop di recente produzione).

Per quanto riguarda la banda passante dello stimolo, alimentare un diffusore acustico a partire da 16 Hz significa indagare la riproduzione degli organi a canne più imponenti, partire da 80 Hz significa valutare la riproduzione della chitarra classica o delle voci. Entrambe le misure sono significative: se dobbiamo riprodurre solo musica gregoriana la seconda è più vicina alle effettive condizioni d'uso. Stimoli diversi forniscono informazioni relative a generi musicali diversi, per la musica pop si può scegliere un limite compreso tra 27 e 40 Hz. Per rendere lo stimolo più aderente agli spettri probabili della musica si applica una attenuazione agli estremi della banda audio (per esempio sotto 100 e sopra 4000 Hz). In tal modo si preparano stimoli il cui spettro ricalca gli spettri probabili di vari generi musicali.



Spettro dell'intera prima traccia del CD "Luci Serali" (canale sinistro). Sotto i 100 Hz il contenuto spettrale è almeno 30 dB più basso rispetto alla gamma media e anche oltre i 4 kHz scende di 15 dB. Dato che lo spostamento di un woofer quadruplica per ogni dimezzamento della frequenza, nel riprodurre questa traccia il woofer è soggetto a spostamenti ridotti e l'intermodulazione risultante è minore.



Spettro dell'intera prima traccia del CD "Atom Heart mother" dei Pink Floyd (canale sinistro). Lo spettro è sostenuto a partire da 50 Hz. Anche in questo caso le alte frequenze calano verso l'alto. In questo caso il woofer è più sollecitato ma i 30 Hz sono comunque attenuati rispetto alla gamma media. La pendenza da 3 a 30 Hz è di circa 40-45 dB/decade (passa alto del secondo ordine).

La scelta della minima frequenza di analisi è condizionata anche dallo strumento disponibile. Se per esempio si utilizza jDFT2.5 la densità spettrale non potrà essere superiore a 2.69 Hz circa (stimolo composto da 16384 campioni a 44100 Hz).

A questo punto non resta che scegliere se utilizzare lo stimolo "note musicali" o a bande di rumore. La cosa è abbastanza indifferente perché la quantità di intermodulazione generata dipende più dall'estensione dello stimolo verso le basse frequenze che dalla densità spettrale (figura 615a). Il segnale multitono "note musicali" presenta un rumore di quantizzazione più basso.

Per rispettare le effettive condizioni d'uso durante la misura di DI si deve anche riprodurre l'SPL presente nel punto di ascolto di un tipico soggiorno domestico ovvero 85 dB SPL (per due diffusori in funzione) o circa 82 per un singolo diffusore. Con un fattore di cresta pari a 28 e 85 dB SPL si sfiorano 115 dB di picco, con CF =5 la pressione di picco sarà di 99 dB (per il solo suono diretto).

Considerando tutti i fattori del caso, tre misure a 84, 90 e 96 dB SPL (riferiti a un metro) sembrano sufficientemente rappresentative: 84 dB per i programmi con CF più alto e, all'altro estremo, 96 dB per i programmi con CF più basso. La misura a 90 dB è probabilmente la giusta via di mezzo.

Strumento	Prima nota più grave	Seconda nota	Differenza	# minimo di campioni FFT
Organo (pedaliera completa)	DO 16.35 Hz	DO# 17.32 Hz	0.97 Hz	131072
Pianoforte	LA 27.5 Hz	LA# 29.14 Hz	1.64 Hz	65536
Organo (tastiera)	DO 32.70 Hz	DO# 34.64 Hz	1.94 Hz	32768
Chitarra Basso	MI 41.20 Hz	FA 43.65 Hz	2.45 Hz	32768
Chitarra e voce baritono	MI 82.40 Hz	FA 87.30 Hz	4.9 Hz	16384

Tabella 6.11: le prime due note di alcuni strumenti musicali ed il numero minimo di campioni della FFT necessario per risolverle. Con 65536 campioni si risolvono tutte le note della tastiera del pianoforte. Con 131072 campioni si risolve anche la pedaliera dell'organo. Con 16384 si parte dalla chitarra e dalla voce di basso. La viola ed il violoncello hanno la prima fondamentale ancora più in alto ragion per cui la musica da camera risulta il genere musicale meno impegnativo.

Strumento	Massimo numero di campioni per finestra (periodo)	Massima Densità spettrale in HZ
TrueRTA	4096	10.77
Scheda Clío 2	4096	10.77
jDFT2.5 <a href="http://www.e.kth.se/~johk/jdft/">www.e.kth.se/~johk/jdft/</a>	Da 1024 a 16384	Max 2.69
Audio Precision	Fino a 131072	0.336
FFTScope <a href="http://www.mariobon.com">www.mariobon.com</a>	Fino a 2.147.483.648 (13 ore e mezza)	< 0.000000001 Hz

Tabella 6.12: Densità spettrale degli analizzatori FFT disponibili.

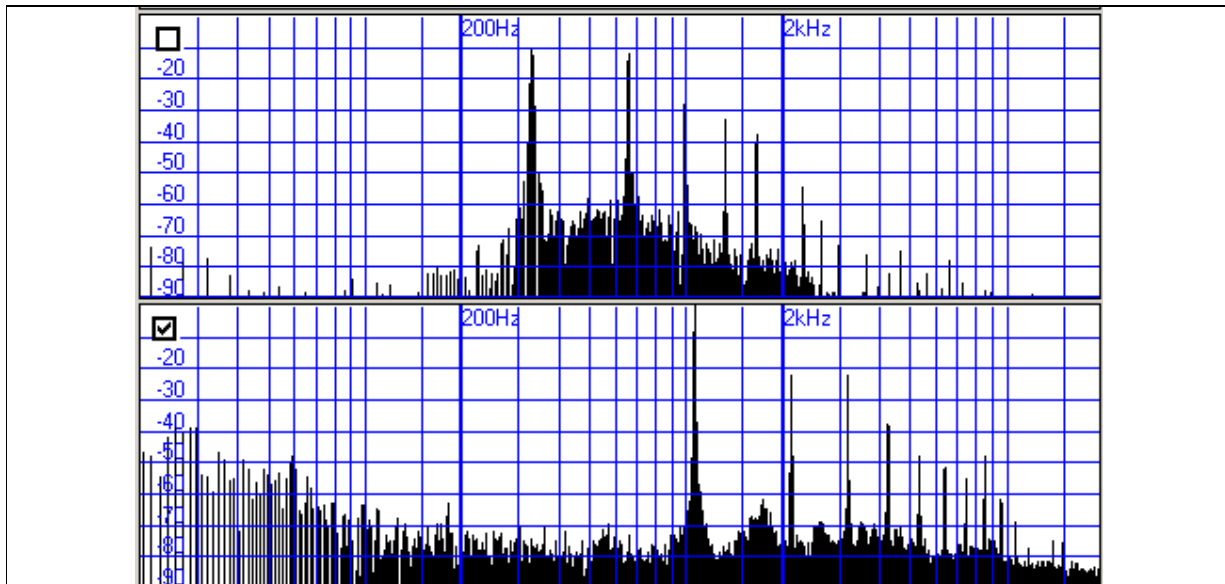


Figura 6.11: lo spettro di due note prodotte da un corno e da un sax soprano in camera anecoica. La struttura armonica è evidente. Il resto sono soffio e rumori meccanici. Ciò giustifica la scelta dello stimolo multitono centrato sulle note musicali.

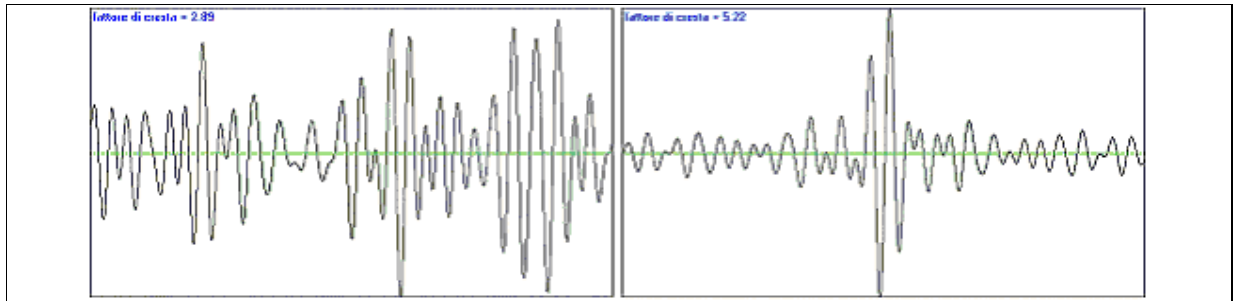


Figura 6.13: Due segnali con lo stesso spettro ma valore RMS e fattore di cresta diversi (2.89 e 5.22).

Fattore di cresta del segnale	Tensione RMS sul carico in Volt	Potenza RMS dissipata su 8 ohm in Watt	Tensione di picco sul carico in Volt	Potenza RMS richiesta per l'amplificatore
1.414	2.83	1	4	1 Watt
2	2.83	1	5.656	2 Watt
2.83	2.83	1	8	4 Watt
4	2.83	1	11.31	8 Watt
5.656	2.83	1	16	16 Watt
8	2.83	1	22.62	32 Watt
11.3	2.83	1	32	64 Watt
16	2.83	1	45.25	128 Watt
22.6	2.83	1	64	256 Watt
32	2.83	1	90.5	512 Watt

Tabella 6.14: tensione di picco sul carico a parità di tensione RMS in funzione del fattore di cresta dello stimolo. Per eseguire la misura di DI basta un amplificatore da una cinquantina di Watt RMS su 8 ohm.

### 6.10 Come viene generato lo stimolo

Gli stimoli vengono generati da un programma scritto ad hoc che produce sequenze pseudocasuali o multitono con spettro predefinito e distribuzione dell'ampiezza casuale. E' possibile ottenere fattori di cresta a partire da circa 3 in su. Lo stimolo è composto da un numero di campioni pari ad una potenza di 2 e l'ampiezza è normalizzata a 32767. Il tutto viene salvato in un file in formato WAVE conforme allo standard CD Audio. Lo stimolo presenta il miglior rapporto segnale/rumore\_di\_quantizzazione (sfrutta tutta la modulazione) spettro noto e la distribuzione dell'ampiezza è simile a quella di del rumore casuale (il fatto che sia gaussiana o meno è poco importante). Per estrarre frammenti di segnale musicale da utilizzare come stimoli si usa il programma Ex\_wav che accetta in ingresso un qualsiasi file .wav (in formato CDA) e genera automaticamente due stimoli a bande alternate con spettro complementare (senza sovrapposizioni) normalizzati in ampiezza. Non è escluso che una serie di stimoli possa essere resa disponibile per il download nel sito [www.mariobon.com](http://www.mariobon.com).

### 6.11 Cosa ci si può aspettare

La misura di DI stimola il diffusore con un segnale simile alla musica per ottenere risultati rappresentativi delle effettive condizioni d'uso. Simile non significa uguale. Non resta che eseguire misure su molti diffusori ricercando la miglior correlazione tra risultato della misura e fatica da ascolto.

Comunque, se un diffusore suona "bene" prima di essere sottoposto a test, continua a suonare allo stesso modo anche dopo essere stato misurato: se, rispetto ad un ascolto critico, il tasso di distorsione misurato risulta inaspettatamente alto (o basso) significa che la misura non rappresenta le effettive condizioni d'uso.

**In altre parole sono i risultati delle misure che devono essere parametrati sul giudizio d'ascolto e non il contrario.**

Per esempio prendiamo un minidiffusore a due vie in bass reflex con un woofer da 5" accordato a 50 Hz. Applichiamo uno stimolo multitono esteso da 16 a 20kHz e sicuramente misureremo, in bassa frequenza,

tassi di distorsione dal 20 al 50% se non più. Tuttavia il diffusore riproduce perfettamente la musica da camera. La causa dell'elevato tasso di distorsione misurato dipende dal contenuto energetico dello stimolo che non è paragonabile alla musica da camera e costringe il woofer ad un lavoro che, con la musica, non deve fare. La conclusione del test di questo ipotetico minidiffusore dovrebbe essere: fantastico con la musica da camera ma inadeguato per riprodurre la pedaliera dell'organo (corredato dai grafici di distorsione rilevata con stimoli che partono da 16 e da 64 Hz a testimoniare due situazioni in cui la distorsione presenta tassi completamente diversi).

In generale i sistemi che potenzialmente presentano i tassi di DI più bassi sono quelli a tre o più vie dotati di filtri cross-over ad elevata pendenza (in particolare i passa-alto). I sistemi meno favoriti sono invece quelli a una e due vie dotati di filtri a bassa pendenza. Ricordiamo, per inciso, che esiste una corrente di pensiero a sostegno della superiorità dei diffusori equipaggiati con filtri del primo ordine degnamente rappresentata da Dynaudio.

Un sistema a 3 vie intermodula meno di uno a 2 vie perché l'escursione del woofer non condiziona la riproduzione del midrange (che non condiziona quella del tweeter). Verre da dire: più vie ci sono, e meglio è... ma l'incremento del numero delle vie (o degli altoparlanti) comporta l'aumento delle dimensioni della sorgente e questo, oltre un certo limite, diventa un problema.

La misura di DI non ha carattere ultimativo: l'assenza di fatica da ascolto è solo uno dei primi pre-requisiti e non è sufficiente per ottenere una ottima riproduzione (tabella 6.3). In particolare l'effetto del mascheramento causato dalle riflessioni interne al mobile, dalla diffrazione ai bordi e dalle risonanze del cabinet, pur coinvolgendo marginalmente la distorsione, limitano la Chiarezza e la Spazialità.

### 6.12 Esempio di misura di DI

La misura di DI richiede un analizzatore di spettro (anche a singolo canale) e consiste nel valutare la differenza in decibel tra lo spettro dello stimolo e lo spettro dell'uscita (figura 6.15). Il set di misura, oltre a microfono e amplificatore, prevede un PC, una buona scheda audio full duplex ed un paio di programmi (generazione e analisi dei segnali). Il risultato dipende dalla qualità della scheda audio e del microfono utilizzati ma non è difficile scendere sotto allo 0.5% anche con un normale PC.

Veniamo al primo esempio. Scegliamo come strumento di analisi il programma jDFT2.5. Lo stimolo è un rumore pseudo casuale a bande di un dodicesimo di ottava con periodo di 8192 campioni a 44100 Hz. Lo spettro dello stimolo si estende da 73 a 16000 Hz. Il microfono è posto nel campo vicino di un altoparlante a larga banda (figura 6.15). Il secondo esempio (con l'analizzatore FFTScope) confronta la DI prodotta con due stimoli diversi:

- rumore a bande alternate da un dodicesimo di ottava (da 73 a 16000 Hz).
- stimolo multitono "note musicali" da 32 a 16000 Hz.

In questo secondo esempio gli stimoli contano 65536 campioni a 44100 Hz (durata di 1.48 secondi circa) e i valori RMS dei due stimoli differiscono per meno del 2%. Questo esempio mostra quanto il risultato sia condizionato dalla presenza, nello stimolo, di basse frequenze (figura 6.15a).

Si tenga presente che lo scopo della misura non è produrre "tanta" DI ma rappresentare la distorsione nelle effettive condizioni d'uso. Lo stimolo va scelto in base a questo unico criterio e in questo caso, uno stimolo esteso fino a 16 Hz è nettamente esagerato.

Veniamo brevemente al rumore ambientale: supponiamo che il diffusore produca 90 dB SPL a un metro. Per ottenere 60 dB di rapporto S/N il rumore ambientale deve essere inferiore a 30 dB (valore difficile da registrare in ambienti normali). Se ciò non è, non resta che avvicinare il microfono al diffusore (dimezzando la distanza il rapporto S/N migliora di 6 dB). Se alzassimo il volume otterremmo un rapporto S/N migliore ma porteremmo il diffusore oltre i limiti che rappresentano le effettive condizioni d'uso. Le misure a mezzo metro di distanza vanno bene solo per diffusori a due vie di piccole dimensioni e, di norma, converrà eseguire le misure nel campo vicino di ciascun altoparlante (a meno di non disporre di ambienti particolarmente silenti). La cosa è facilitata con i diffusori predisposti per la multi-amplificazione.

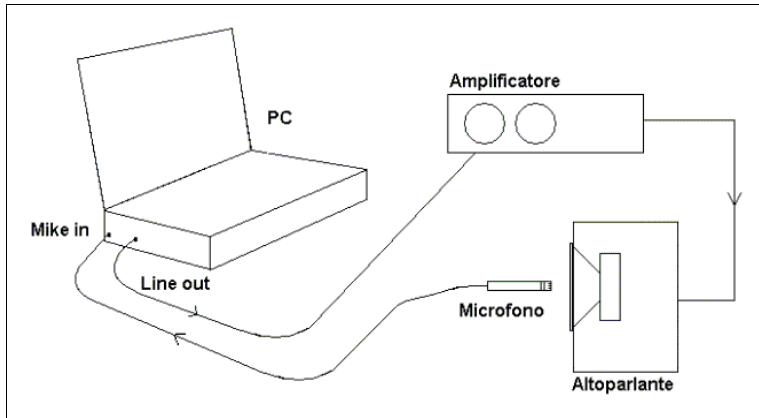
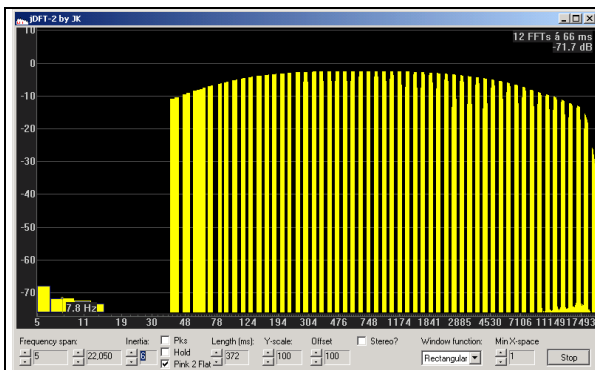
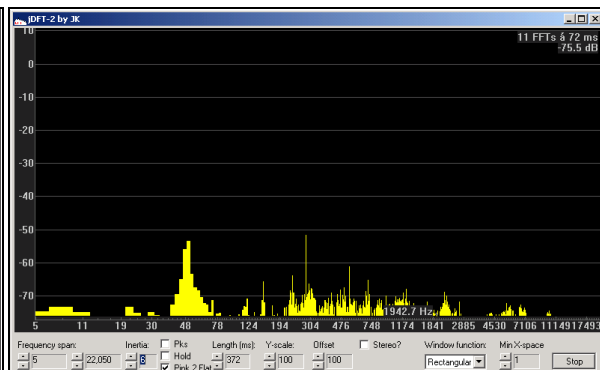


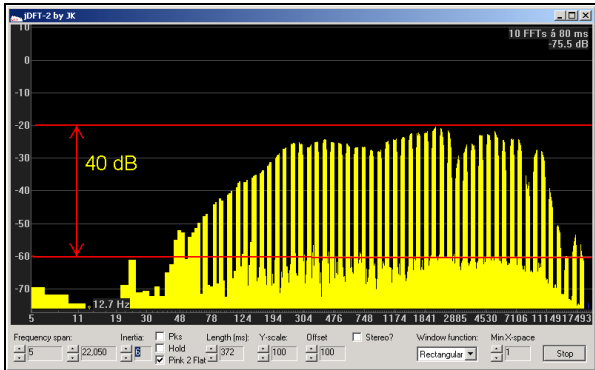
Figura 6.14: set up della misura di DI. Il generatore di segnale (uscita line out della scheda audio del PC) è collegato all'amplificatore. Il microfono viene collegato all'ingresso dedicato presente nella scheda audio. L'applicazione mixer di Windows permette di regolare il volume. Per migliorare la flessibilità della misura sarebbe utile un voltmetro a vero valore efficace (true RMS) per controllare la tensione applicata ai morsetti del diffusore. I risultati saranno analoghi a quanto mostrato nella figura 6.15.



Stimolo: bande di rumore + filtri



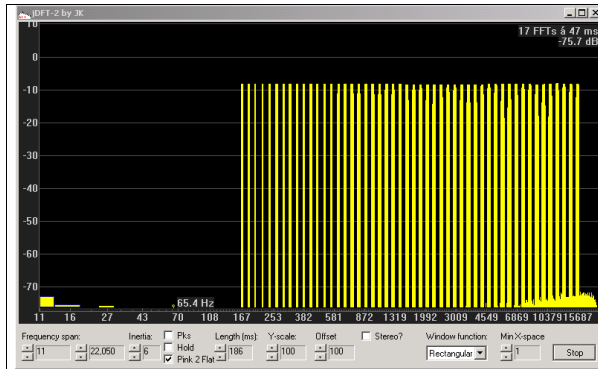
Rumore di fondo: notare i 50 Hz



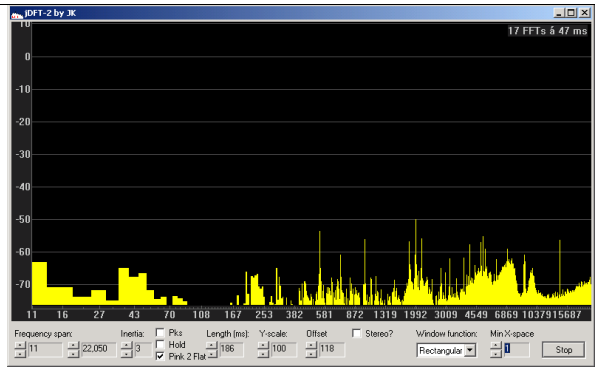
segnale prelevato con il microfono nel campo vicino dell'altoparlante (segnale + rumore + distorsione).

Figura 6.15 (prima parte): Esempio di misura di DI eseguita su un altoparlante utilizzando come stimolo un segnale formato da bande alternate di rumore di un dodicesimo di ottava utilizzando la scheda audio interna del PC. Si noti la componente di rumore a 50 Hz. Lo stimolo è attenuato agli estremi della banda audio. A parte il picco di rumore ambientale a 50 Hz la distorsione è ben individuabile.

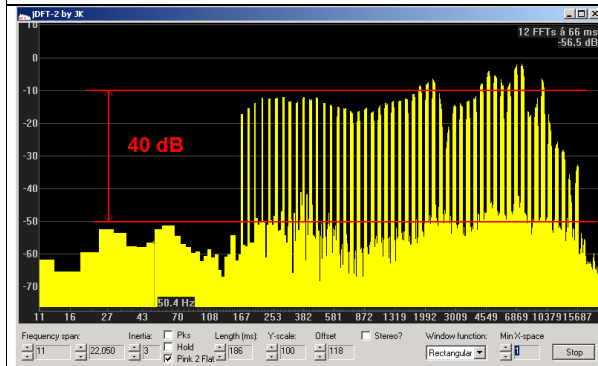




Stimolo: bande di rumore



Rumore di fondo



segnale prelevato con il microfono nel campo vicino dell'altoparlante (segnale + rumore + distorsione).

Figura 6.15 (seconda parte): Esempio di misura di DI eseguita su un altoparlante utilizzando come stimolo un segnale formato da bande alternate di rumore di un dodicesimo di ottava eseguita con la scheda M-Audio Transit. Il rumore ambientale è aumentato. In questo caso lo spettro dello stimolo non è attenuato agli estremi il che provoca maggiore produzione di distorsione per differenza di frequenza ben superiore al rumore ambientale.

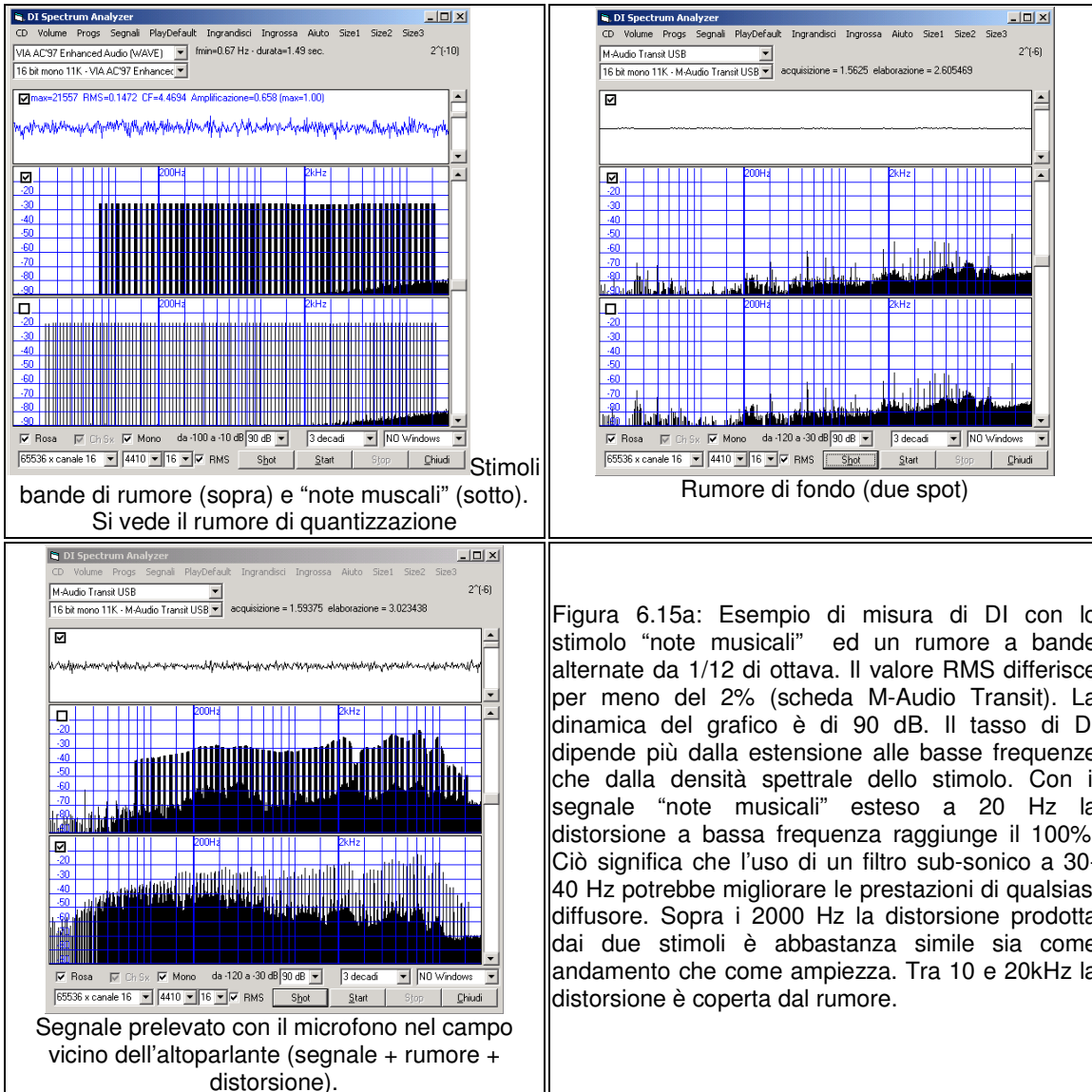


Figura 6.15a: Esempio di misura di DI con lo stimolo “note musicali” ed un rumore a bande alternate da 1/12 di ottava. Il valore RMS differisce per meno del 2% (scheda M-Audio Transit). La dinamica del grafico è di 90 dB. Il tasso di DI dipende più dalla estensione alle basse frequenze che dalla densità spettrale dello stimolo. Con il segnale “note musicali” esteso a 20 Hz la distorsione a bassa frequenza raggiunge il 100%. Ciò significa che l’uso di un filtro sub-sonico a 30-40 Hz potrebbe migliorare le prestazioni di qualsiasi diffusore. Sopra i 2000 Hz la distorsione prodotta dai due stimoli è abbastanza simile sia come andamento che come ampiezza. Tra 10 e 20kHz la distorsione è coperta dal rumore.

### 6.13 Errori nella analisi della distorsione di intermodulazione: le misure di DI sono accurate?

Consideriamo la classica misura di distorsione per intermodulazione eseguita applicando, ad un ipotetico dispositivo, uno stimolo composto da due sinusoidi  $f_1$  ed  $f_2$  di frequenza diversa. Dobbiamo dimostrare che le frequenze che vengono prodotte per intermodulazione sono compatibili con l’analisi FFT.

Nel seguito M, N, K e J rappresentano numeri interi da 0 a infinito e la x rappresenta l’operazione di prodotto. La minima frequenza di analisi è  $f_{min}$  e il suo periodo è pari all’intervallo di acquisizione. Le frequenze  $f_i$  delle righe spettrali prodotte per intermodulazione sono date da:

$$f_i = |(N \times f_1) \pm (M \times f_2)| \quad \text{se } f_1 \text{ e } f_2 \text{ sono multiple della stessa frequenza } f_{min} \text{ risulta essere:}$$

$$f_1 = K \times f_{min}$$

$$f_2 = J \times f_{min} \quad \text{sostituendo nella prima espressione si ottiene:}$$

$$f_i = |(N \times K \times f_{min}) \pm (M \times J \times f_{min})| = f_{min} \times |(N \times K \pm M \times J)|$$

Essendo N, K, M e J interi, le  $f_i$  sono ancora multipli interi di  $f_{min}$  e appartengono al set di base dell’analizzatore. Questo vale per qualsiasi coppia di frequenze presenti nello stimolo. Le  $f_i$  che cadono oltre la frequenza di Nyquist vengono eliminate dai filtri anti alias presenti all’ingresso dell’analizzatore di spettro. Quindi le misure di distorsione di intermodulazione eseguite con analizzatore FFT, se lo stimolo è

rappresentato dal set di base dell'analizzatore FFT, forniscono risultati accurati e NON si devono usare finestre di pesatura. La misura è accurata ma incompleta sulle frequenze più alte (eliminate dal filtro anti alias). La condizione da rispettare per ottenere una misura accurata riguarda lo stimolo che deve essere periodico ed il suo periodo deve essere un sottomultiplo esatto della finestra di acquisizione. Questo è il motivo per cui tutte le misure (in regime forzato) vanno fatte utilizzando stimoli artificiali periodici (anche pseudo casuali) sincronizzati con la base tempi dell'analizzatore di spettro. Così facendo l'errore massimo associato alla misura è quello caratteristico dello strumento usato (più il contributo del rumore di fondo, ecc.) ed è prevedibile.

Anche nelle condizioni migliori, la misura di DI rimane soggetta a limitazioni dovute:

- al rumore dell'apparato trasmittente (scheda audio)
- al rumore ambientale (specie a bassa frequenza)
- al rumore dell'apparato ricevente (dal microfono in avanti)
- al fatto che il rumore di quantizzazione è parte dello stimolo.
- alla distorsione dell'apparato ricevente
- alla distorsione dell'apparato trasmittente

Si tratta comunque di errori quantificabili. Di questi i principali sono il rumore ambientale e il rumore di fondo della scheda audio (in trasmissione e ricezione). Se la scheda audio è troppo rumorosa va sostituita senza esitare.

Il rumore di quantizzazione di un segnale periodico non può essere ridotto eseguendo delle medie. La distorsione prodotta dal rumore di quantizzazione non è separabile dalla distorsione prodotta dallo stimolo (è parte dello stimolo stesso). Per ridurre il rumore di quantizzazione si deve aumentare il numero di bit di conversione da 16 a 24 o più. Con uno stimolo a bande alternate da un dodicesimo di ottava (pseudo periodo di 65536 campioni e pesatura rosa) il rapporto segnale/rumore\_di\_quantizzazione è maggiore di 90 dB fino a circa 2000 Hz e si riduce attorno a 74 dB a 20000 Hz (figura 6.16c). Il contributo del rumore di quantizzazione alla DI è molto basso, tuttavia, per sicurezza, conviene fissare la minima distorsione misurabile allo 0.032% (-70 dB) fino a 2000 Hz e allo 0.2% oltre tale frequenza (-54dB) mantenendo un margine di 20 dB rispetto al rumore di quantizzazione che si traduce in un errore massimo del 10% (significa in sostanza che 0.1% potrebbe essere 0.09 o 0.11% fino a 2000 Hz mentre 0.2% potrebbe essere 0.18 o 0.22 a 20000 Hz). Più la distorsione è elevata, più l'errore diminuisce. Possiamo quindi mantenere il  $\pm 10\%$  come errore massimo (per il segnale di figura 6.16b). In figura 6.16c sono proposti gli spettri di tre stimoli diversi con diverso rumore di quantizzazione: con lo stimolo "note musicali" l'errore diminuisce di 5 volte (dal 10% al 2%). Questo è un buon argomento a favore di questo stimolo.

Veniamo al rumore ambientale. Se il rumore ambientale rimane almeno 20 dB sotto allo spettro della DI introduce un ulteriore errore del 10%. Ergo per misurare l'1% di distorsione (-40 dB) il rumore ambientale deve risultare 60 dB sotto allo spettro dello stimolo. Per ultimo dobbiamo notare che la misura di DI, con bande di rumore, non può evidenziare le componenti di distorsione armonica di ordine pari. Nello stimolo "note musicali" le singole componenti spettrali sono scelte in modo da essere "prime tra loro" e con questo "trucco" si rendono visibili tutti gli ordini di distorsione armonica. Lo spostamento in frequenza è inferiore alla soglia di percezione della frequenza.

### **Conclusioni:**

La misura di DI è simile ad una "normale" misura di distorsione dove si confrontano lo spettro dell'uscita e dell'ingresso. La DI è una misura diretta ed accurata. Ciò che caratterizza la misura è la scelta dello stimolo (spettro e fattore di cresta) pensato per simulare le effettive condizioni d'uso. La misura di DI è anche la più semplice tra quelle proposte in questi ultimi anni.

Dal punto di vista metodologico, per ottenere la corrispondenza tra i risultati delle misure e le qualità sonore delle apparecchiature audio si deve partire dagli attributi della percezione e ricreare le condizioni delle effettive condizioni d'uso. In particolare, per quanto riguarda il rapporto tra fatica da ascolto e distorsione, le effettive condizioni d'uso possono essere simulate con stimoli multitono o a bande di rumore opportunamente sintetizzati. In questo contesto i risultati forniti dallo studio statistico del fattore di cresta del segnale musicale sono rilevanti. La corrispondenza tra attributi soggettivi della percezione e quantità misurabili (rappresentata dalla tabella 6.3) potrà essere migliorata ma ben rappresenta il metodo da seguire.

Un aspetto fondamentale, mai abbastanza rimarcato, è che qualsiasi misura deve, per essere tale, essere accompagnata dalla valutazione dell'errore di misura. Per la misura di DI l'errore di misura è prevedibile e quantificabile.

<b>Campo diretto (monodimensionale)</b>			
	Attributo	Descrizione	Misura
1	Calore	bilanciamento tonale, estensione della risposta, timbrica	risposta in frequenza in asse – massima e minima frequenza riprodotta per piccoli segnali
2	Fatica da ascolto	Senso di affaticamento che si manifesta nell'ascolto prolungato	distorsione non lineare dei componenti nelle effettive condizioni d'uso
3	Chiarezza	risoluzione nel tempo e nella frequenza (Risoluzione, Articolazione, Presenza, micro-dettaglio, velocità, coerenza)	risposta ai transienti – fase minima riflessioni e risonanze interne del cabinet diffrazione ai bordi waterfall
4	Forza	Livello, Dinamica (macro-dettaglio)	massimo livello SPL, spostamento volumetrico
<b>Campo riflesso (tridimensionale)</b>			
5	Brillanza	percezione delle note più alte limpide e cristalline	campo riverberato da 2 a 4kHz dispersione – risposta in ambiente
6	Spazialità	ricostruzione dello spazio sonoro nelle tre dimensioni (orizzontale, verticale e profondità)	dispersione, differenza tra i canali dx e sx – posizione del centro acustico virtuale con la frequenza, variazione della distanza critica con la frequenza, estensione della zona isotipica
<b>Interfacciabilità</b>			
7	ampli-diffusore	sensibilità, efficienza	SPL @ 2.83Volt 1 metro SPL ponderato (SPL @ 1 Watt RMS)
8	ampli-diffusore	Impedenza elettrica	Impedenza Elettrica Z (norme DIN) minimo valore della parte reale di Z
9	diffusore-ambiente	sensibilità rispetto alla posizione nell'ambiente	Risposta in ambiente con rumore a terzi di ottava
10	diffusore-uomo	Qualità/Prezzo	Livello delle finiture , Valutazione della realizzazione del cabinet – ergonomia, garanzia, imballo, manuali, ecc.
<p>Tabella 6.3: Corrispondenza tra attributi soggettivi della percezione e quantità misurabili per un diffusore acustico. Questi attributi diventano tra loro ortogonali se considerati nell'ordine proposto ciascuno come pre-requisito del successivo. Gli attributi relativi alla interfacciabilità sono effettivamente ortogonali.</p>			

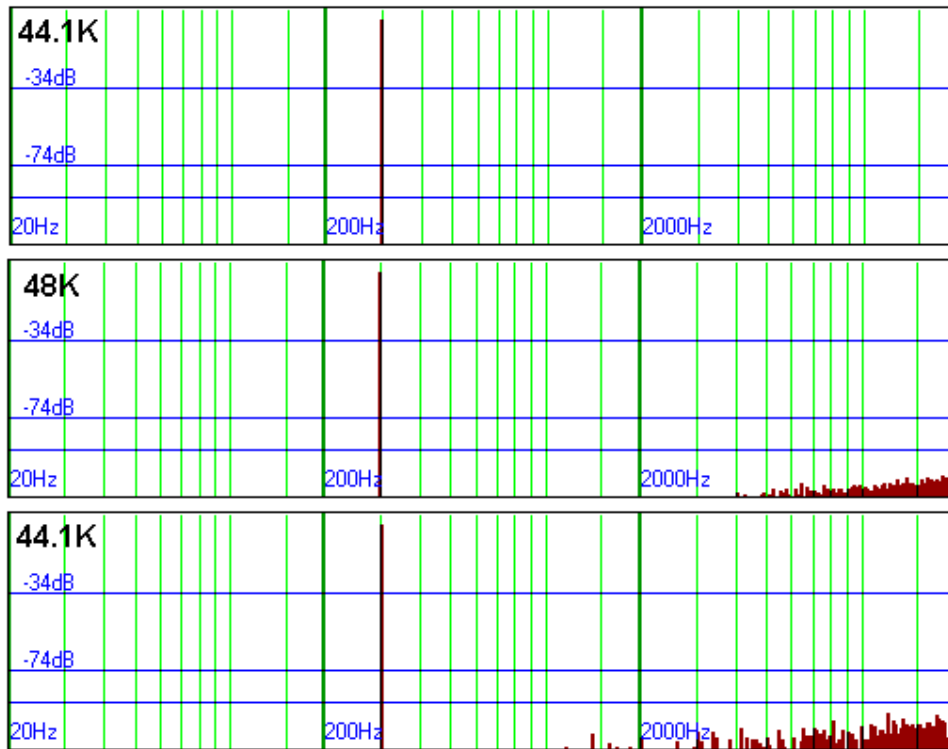


Figura 6.16a: Effetto della quantizzazione e del sovracampionamento. Lo stimolo, generato artificialmente, presenta uno spettro privo di rumore perché i valori dei campioni sono espressi in vergola mobile (grafico in alto). Salvando il segnale in formato wav i valori dei campioni vengono arrotondati ad interi e ciò produce il rumore di quantizzazione. Nel caso di una singola sinusoide il rumore di quantizzazione è modesto (grafico in basso). Aumentando la frequenza di campionamento da 44.1 a 48kHz si ottiene un miglioramento (al centro) che però si riduce con segnali spettralmente più complicati. Aumentare il campionamento da 44.2 a 48 kHz non comporta vantaggi sostanziali: il rumore di quantizzazione rimane inferiore a 90 dB.

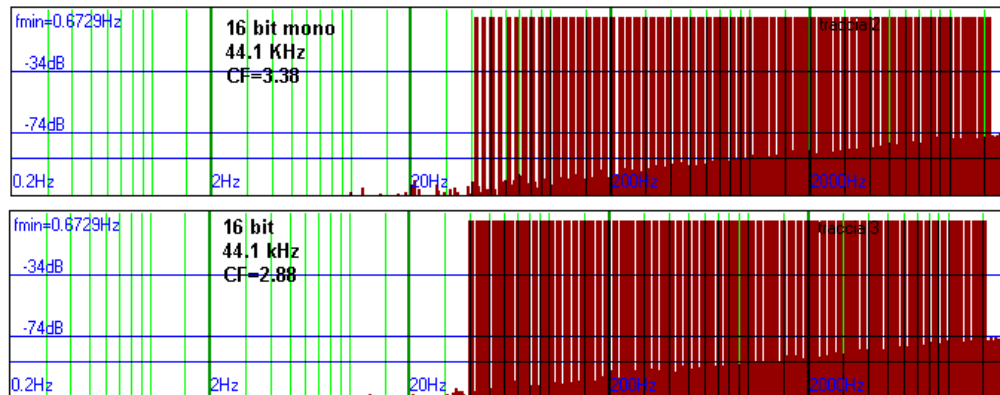


Figura 6.16b: Spettri di due segnali complementari (in formato wav) a bande alternate di un dodicesimo di ottava (da 40 a 16000 Hz) per la misura di DI. Si noti il diverso fattore di cresta (3.38 e 2.88). Il segnale "intero" presentava un CF maggiore di 4. I rapporto segnale/rumore\_di\_quantizzazione cresce verso le alte frequenze dove raggiunge -74 dB. La dinamica del grafico è di 120 dB e la rappresentazione è proporzionale all'energia (lo spettro del rumore rosa appare piatto). Nota: la bassa risoluzione grafica impedisce di distinguere chiaramente la separazione tra le bande.

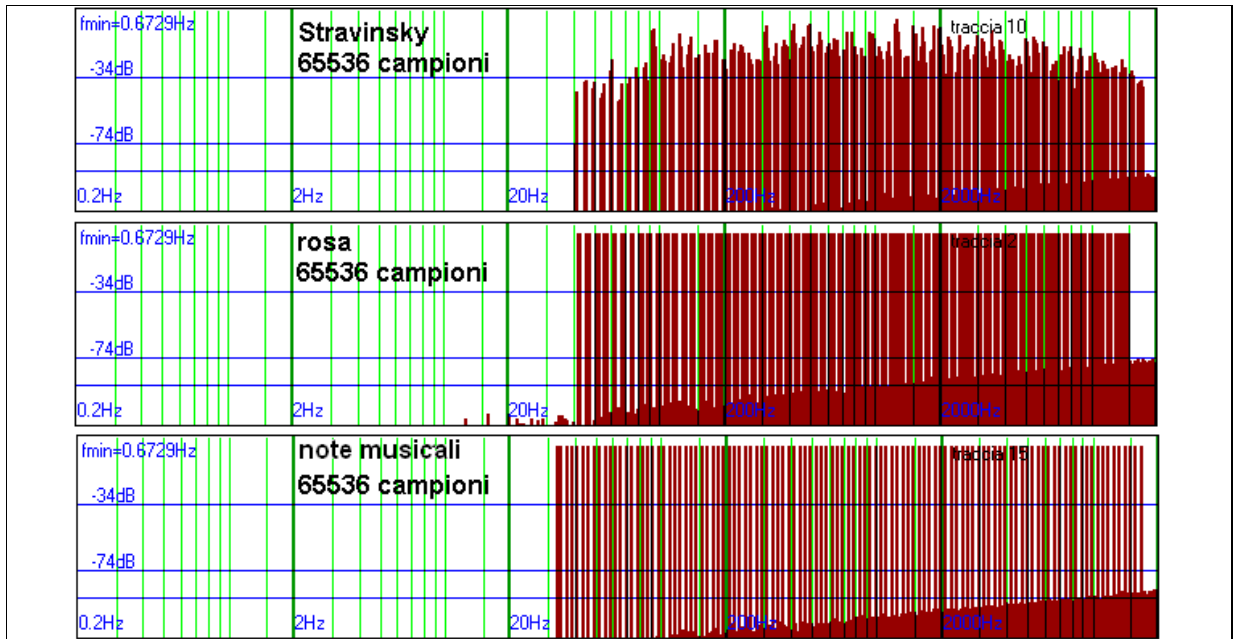


Figura 6.16c: confronto degli spettri di tre stimoli: in alto un segmento musicale tratto dalla “Firebird Suite” di Stravinsky (limitato da 40 a 19000 Hz), al centro un rumore rosa (32-16000) ed in basso lo stimolo “note musicali” (32-17000). I primi due sono filtrati a bande alternate larghe un dodicesimo di ottava. Il miglior rapporto segnale/rumore di quantizzazione (in questo caso) si ottiene con il frammento musicale seguito dalle “note musicali”. La dinamica del grafico è di 120 dB. Lo stimolo “note musicali” produce meno rumore di quantizzazione rispetto al rumore filtrato a bande alternate.

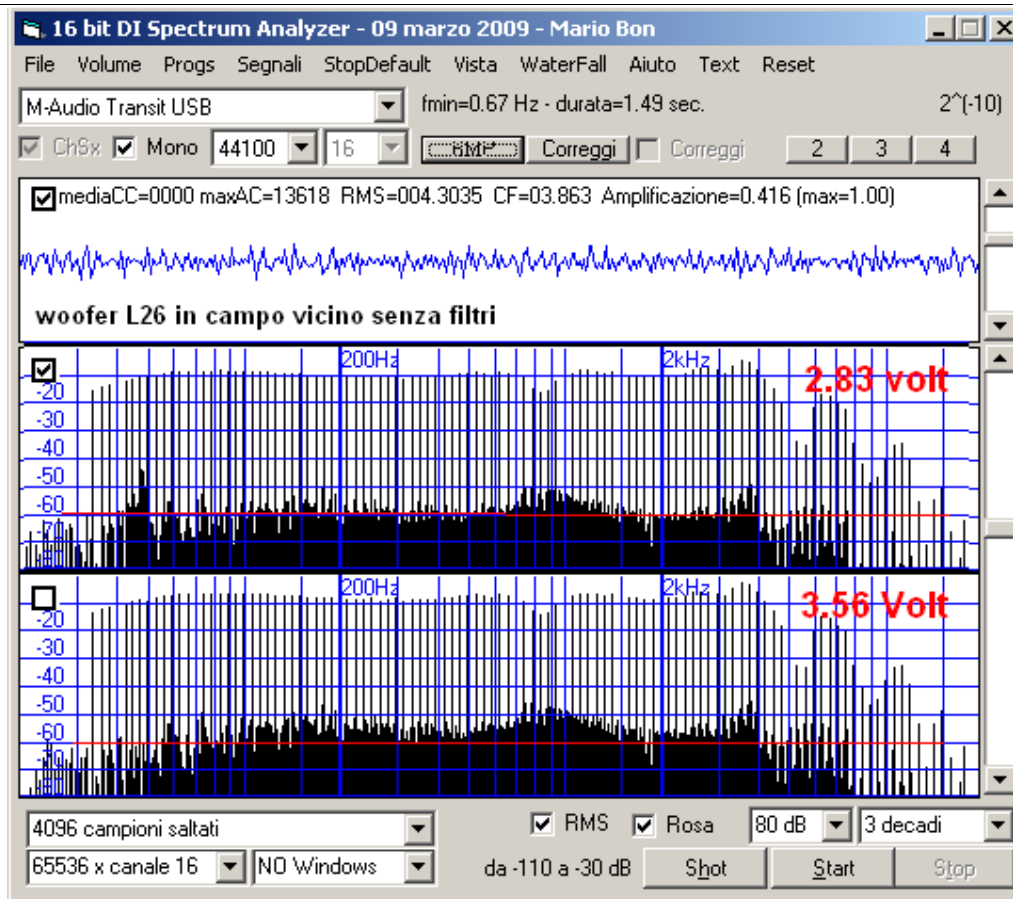


Figura 6.16d: Distorsione prodotta da un woofer da 10 pollici in campo vicino

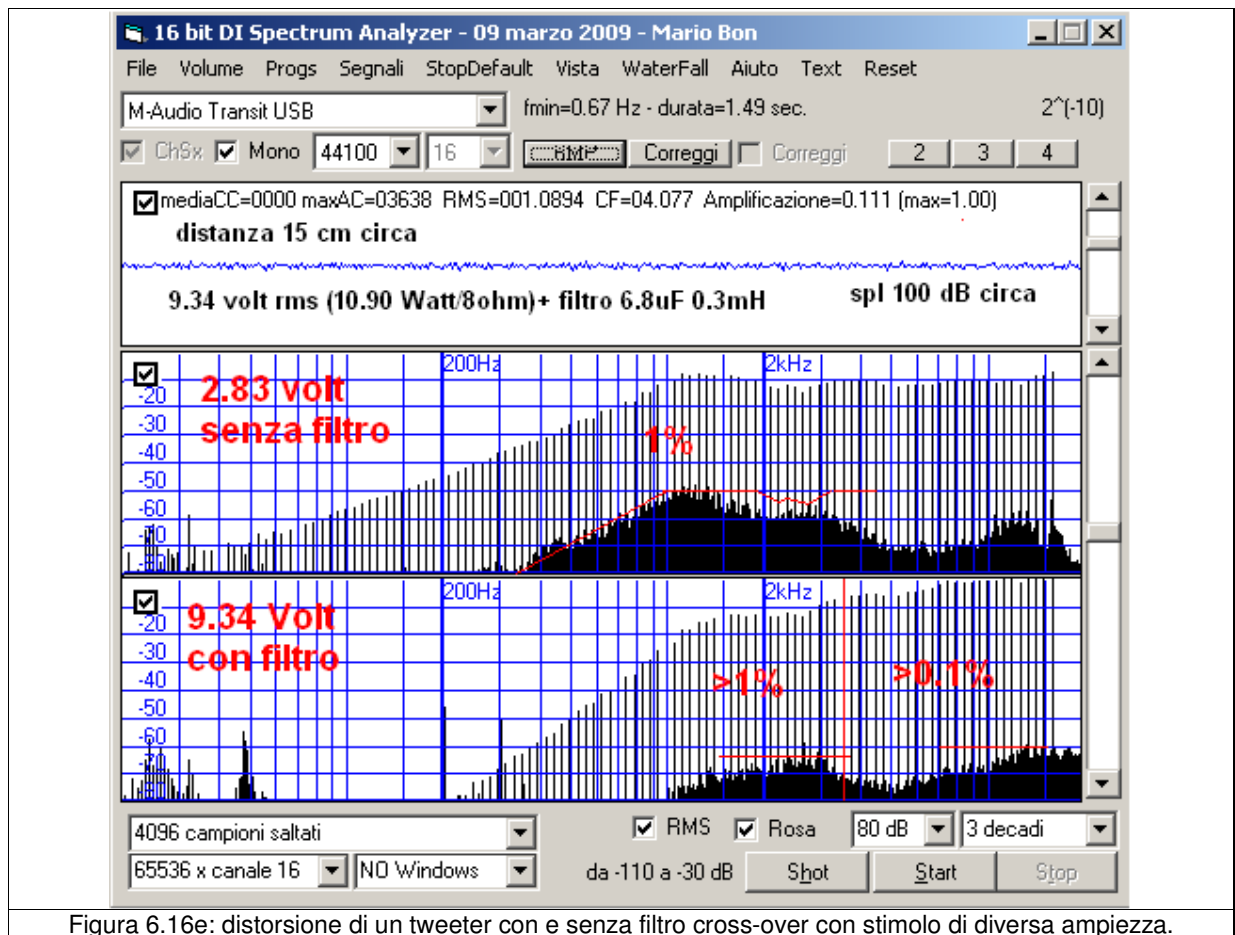


Figura 6.16e: distorsione di un tweeter con e senza filtro cross-over con stimolo di diversa ampiezza.

fine parte sesta

### Bibliografia

- Pierre Simon de Laplace, "Théorie Analytique des Probabilités". - 1812  
 Landau, Lifshits, "Fisica Teorica 1: Meccanica" – Editori Riuniti – Prima edizione, gennaio 1976  
 L. Beranek, "Concert Halls and opera Houses" – Springer -seconda edizione  
 Villi, Minnelli, Pascolini, "dispense di Metodi Matematici per la Fisica" – Ist. Galileo Galilei – Facoltà di Fisica dell'Università di Padova.

In questa bibliografia sono citati 1 testo storico, due testi universitari ed un unico testo di acustica. Le conoscenze utili non sono necessariamente contenute negli articoli specialistici ma ben più "a monte". Il testo del Landau è particolarmente importante perché contiene cose che sono state presentate come "nuove scoperte" in molti articoli specializzati. È un testo russo disponibile in italiano.