

**La Misura di distorsione dei diffusori acustici  
nelle “effettive condizioni d’uso”: la Distorsione Integrale  
di Mario Bon**

**per SUONO**

questo articolo, già pubblicato, viene rivisto il 4 luglio 2010

### 6.1 Premessa alla parte sesta

Nelle parti precedenti, indagando il fattore di cresta dei segnali musicali, è emerso che:

- il fattore di cresta (CF) delle tracce presenti nei CD audio varia da 3 a oltre 28;
- le tracce dei CD contengono spesso segnali sovramodulati;
- una traccia con alto CF può essere riprodotta limitando la Massima Modulazione Relativa (MMR) al 70-50% senza ripercussioni udibili.

Nel seguito ci proponiamo di misurare la distorsione prodotta da un diffusore acustico in modo che il risultato sia correlabile alle sensazioni ottenute ascoltando musica riprodotta.

La prima cosa da fare è costruire un contesto che preveda questo tipo di misura. Nel farlo si cercherà di mettere in evidenza l'aspetto metodologico e la valutazione degli errori di misura.

### 6.2 Misure e Attributi della Percezione

Partiamo dallo schema di figura 6.1. Qui si vedono tre insiemi: Dispositivi, Misure e Percezione. Sembrerebbe naturale leggere questo schema da sinistra a destra: dato un dispositivo vengono eseguite una serie di misure per poi metterle in relazione con la qualità del suono riprodotto. Invece si deve procedere da destra a sinistra:

- determinare gli attributi della percezione del suono
- individuare le grandezze fisiche che li rappresentano (e progettare le misure per quantificarle)
- associare le misure (più adatte) al dispositivo da esaminare.

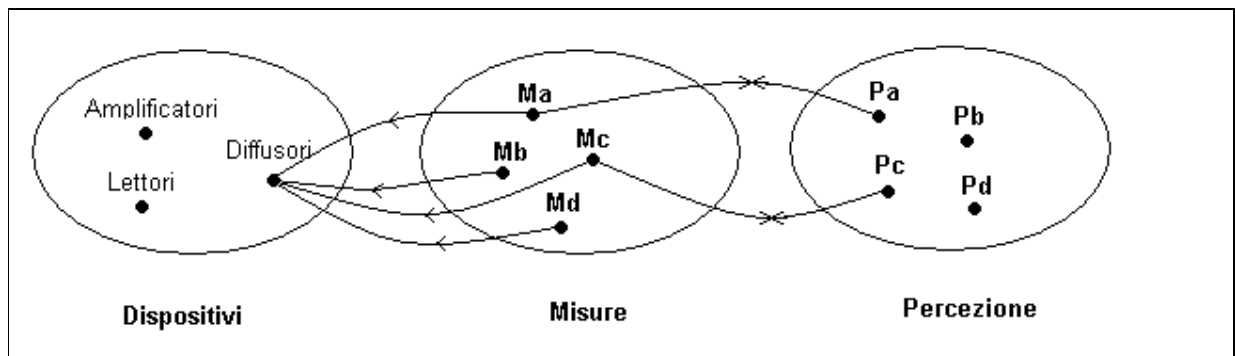


Figura 6.1 Corrispondenza tra Dispositivi, Misure e Percezione come proposta da Amar G. Bose. (Technology Review, Volume 75, numero 7 Giugno 1973 e numero 8 luglio/agosto 1973). Gli attributi della percezione sono sempre gli stessi mentre le misure che si possono eseguire su un amplificatore o su un diffusore acustico sono diverse.

Fortunatamente tutto ciò è già stato fatto, a partire dal 1960, nell'ambito dell'Acustica Architettonica. Attraverso una serie di interviste a musicisti e a spettatori abituali di concerti è stato individuato l'insieme di attributi soggettivi (della percezione) utilizzati dagli intervistati per descrivere il suono esperito in una sala. Quindi sono state individuate le quantità misurabili correlate a questi attributi e definiti i metodi di misura. Tutto ciò ha portato alla formulazione di criteri che consentono di prevedere il “suono” di una sala con evidenti vantaggi per i progettisti anglosassoni (<http://www.concerthalls.unomaha.edu/>). Gli attributi della percezione (tabella 6.2) sono il nostro punto di partenza.

1	Rumore di fondo	Tabella 6.2: Il primo attributo del suono percepito in una sala è rumore di fondo perché, se eccessivo, nasconde qualsiasi altra qualità: invece della musica si sente il soffio del sistema di condizionamento. Ciascuno attributo rappresenta una condizione necessaria: per un buon risultato, tutti gli attributi devono rientrare nel range ottimale (si veda la descrizione dei singoli attributi alla fine del capitolo o nel glossario).
2	Forza	
3	Calore	
4	Chiarezza	
5	Brillanza	
6	Spazialità	
7	Riverberazione	
8	Intimità	

Gli attributi che descrivono la percezione del suono in una sala, valgono sia per le sorgenti naturali (canto, strumenti acustici) che per quelle artificiali (diffusori acustici). Se in una sala sostituiamo la sorgente naturale (il cantante) con un diffusore acustico, la causa della diversa percezione del suono, da parte degli spettatori, va attribuita alla mutata sorgente. Se poi consideriamo la sala “neutra” (perfetta, ideale) allora possiamo associare gli attributi direttamente al suono prodotto dalla sorgente ovvero alla sorgente stessa. Analogamente si può ragionare anche per un amplificatore, un lettore CD, ecc. .

La tabella 6.3 presenta gli attributi della percezione adattati per caratterizzare il suono del diffusore acustico. “Intimità”, “Rumore di Fondo” e “Riverberazione” qui non compaiono in quanto caratteristici dell’ambiente e comunque tutti gli ambienti domestici sono “intimi” e per la riproduzione HiFi devono essere silenziosi e con dei limiti definiti al tempo di riverbero. Considerandi i diffusori passivi il rumore di fondo appare completamente estraneo. Altri attributi, quali fatica da ascolto e interfacciabilità, sono stati aggiunti perché tipici dei diffusori acustici (anche se, a rigore, esistono anche ambienti con acustica affaticante).

Se il diffusore acustico possiede una risposta in frequenza ragionevolmente equilibrata (tale da non provocare di per sé fatica da ascolto) questa dipenderà dalla distorsione. La distorsione presenta due aspetti tra loro indipendenti (separabili, ortogonali) legati alla:

- qualità intrinseca dei componenti (altoparlante, filtro cross-over, ecc.)
- modalità di utilizzo dei componenti (tipo di carico, realizzazione del cabinet, ecc.).

La fatica da ascolto va associata alla distorsione non lineare prodotta dai singoli componente mentre i difetti che derivano dal loro utilizzo (riflessioni interne, risonanze del cabinet, diffrazione ai bordi, ecc.) vanno ad influenzare la Chiarezza. La Chiarezza è legata alla risoluzione nel tempo e nella frequenza che possiamo descrivere come articolazione, velocità o coerenza. Per un diffusore acustico a volte si parla anche di risoluzione spaziale descritta come capacità di riprodurre i vari strumenti distinti tra loro nello spazio. Questa qualità, che deve essere presente nella registrazione ma che il diffusore deve sape riprodurre, rientra nella Spazialità.

La tabella 6.3 è divisa in tre sezioni: campo diretto, campo riflesso e interfacciabilità. I primi quattro attributi sono relativi al campo diretto prodotto dal singolo diffusore (attributi monodimensionali). Il gruppo successivo, campo riflesso, comprende la Brillanza (che dipende dalla dispersione del singolo diffusore) e la Spazialità (che dipende dalla coppia di diffusori): per esempio la differenza di emissione tra il diffusore destro e sinistro determina posizione e stabilità del canale centrale virtuale. Questo secondo gruppo è detto “tridimensionale” perché riguarda la distribuzione del campo sonoro nello spazio. La distinzione in attributi mono e tridimensionali mostra che gli effetti del campo diretto e riflesso sono separabili e ciò suggerisce che il diffusore acustico debba poter alimentare i due campi in modo indipendente (come avviene per i diffusori Opera dotati di CLD e tripletta che alimentano il campo riflesso indipendentemente dagli altoparlanti frontali agendo sulla Brillanza). Gli attributi così definiti non sono tutti rigorosamente indipendenti uno dall’altro: lo diventano considerandoli uno il pre-requisito del successivo. In questo modo, per esempio, la distorsione che “degraderebbe” la Chiarezza viene eliminata dalla restrizione imposta sulla “fatica da ascolto”. Per quanto riguarda la condizione di fase minima questa è difficilmente realizzata (specie nei diffusori a più vie) e, anche quando lo è, ciò avviene lungo direzioni non sempre coincidenti con l’asse principale di radiazione e comunque su zone limitate di spazio. Nessuna sorgente estesa fa eccezione. Se la condizione di fase minima fosse rispettata esisterebbe una relazione biunivoca tra risposta in frequenza e risposta impulsiva (del diffusore) e la Chiarezza confluirebbe nel Calore (la condizione di fase minima richiede, implicitamente, l’assenza di riflessioni interne, risonanze e diffrazione ai bordi: un unico percorso non dispersivo tra ingresso e uscita). L’esperienza mostra che può ottenere una buona riproduzione anche se la condizione di fase minima non è strettamente rispettata. La “distorsione di fase” è ancora tema di discussioni con esiti incerti. Se dovessimo trattare di amplificatori invece che di diffusori dovremmo unire Calore e Chiarezza in un unico attributo: risposta in frequenza a fase minima.

Ogni attributo di tabella 6.3 rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente per ottenere un buon suono. In pratica tutti gli attributi devono risultare contemporaneamente “buoni”: se il Calore è carente o la Forza insufficiente non ha senso andare avanti.

L'ordine di presentazione degli attributi in tabella 6.3 non è casuale: il Calore appare al primo posto. Qui serve una spiegazione: prendiamo un diffusore con la risposta in frequenza fortemente sbilanciata verso le frequenze alte. Il suono di cotale diffusore risulta “affaticante” anche se la distorsione non lineare è minima: la fatica da ascolto dipende dal Calore.

Ne segue che il Calore deve essere tale da non produrre, di per sé, fatica da ascolto. In sostanza la risposta in frequenza deve essere ragionevolmente regolare. L'assenza di fatica da ascolto diventa così il secondo pre-requisito il che consente di valutare il Calore a livelli SPL moderati (per piccoli segnali) contando poi sulla Forza per descrivere le qualità dinamiche e di sonorizzazione. Per quanto riguarda l'interfacciabilità questa ha tre aspetti: uno a monte (verso l'amplificatore) uno a valle (verso l'ambiente d'ascolto) e un terzo “orizzontale” verso l'utilizzatore. Conviene, in questo caso, considerare i cavi di collegamento come parte dell'amplificatore (infatti ne modificano il fattore di smorzamento).

Per quanto riguarda l'interfacciabilità a monte il diffusore non deve causare il degrado delle prestazioni dell'amplificatore (come accade se i minimi di impedenza elettrica scendono verso valori troppo bassi). L'amplificatore è un dispositivo limitato in potenza: è il diffusore acustico (il carico) che non lo deve mettere in crisi. E' poi del tutto evidente che un diffusore che debba essere posto in un punto esatto di una sala appositamente progettata per accoglierlo non ha interesse commerciale. Lo stesso vale se, per essere pilotato, il diffusore esige un amplificatore di prezzo sproporzionato o se l'utilizzatore non riesce ad adoperarlo (o a ripararlo quando necessario). Impedenza elettrica e sensibilità (del diffusore) possono essere trascurate attribuendo all'amplificatore l'onere di sopperire a tutte le carenze. Questo però incide sul rapporto qualità/prezzo del diffusore (che esige un amplificatore più costoso). I parametri di interfacciabilità producono un impatto diretto sul rapporto qualità/prezzo e uno indiretto sulla qualità sonora che si materializza abbinando il diffusore ad un amplificatore e/o ad un ambiente che non gli competono. Il rapporto qualità/prezzo dovrebbe considerare anche il costo dell'amplificatore e dei cavi più adatti alla bisogna.

Gli aspetti estetici non funzionali estranei alla qualità sonora non rientrano in questa trattazione e vanno valutati a parte. Purtroppo il prezzo di un diffusore è quello che è e non si può scindere la parte funzionale da quella estetica. Questo non impedisce però di attribuire un “punteggio” alla qualità sonora indipendente dalla realizzazione estetica.

Gli attuali test prodotti da SUONO (tabella 6.2a) si basano su un set di attributi selezionati in base al metodo olistico. La teoria dell'Olistismo (si veda anche Gestalt psychology della Scuola di Berlino) sottolinea il fatto che, quando si parla di percezione, il tutto non corrisponde alla semplice somma delle parti che lo compongono. Nella riproduzione stereofonica, per esempio, destro + sinistro = destro + centro + sinistro (come dire che  $1+1=3$ ). Gli attributi individuati da SUONO, possano trovare una corrispondenza con gli attributi della percezione anche se mancano riferimenti alla fatica da ascolto ed alla interfacciabilità.

Gli attributi del suonogramma sono giustamente ridondanti e non si deve parlare di ortogonalità. Per esempio “messa a fuoco e corposità” potrebbe ricadere in parte nella Chiarezza ed in parte nel Calore. Ma è così importante che gli attributi siano ortogonali? Dipende da quello che si vuole ottenere. Un insieme di attributi che debba essere posto in relazione con i risultati di test di laboratorio non può essere ridondante ad un attributo deve poter corrispondere una o più misure ma non il contrario. Per esempio la distorsione può essere misurata con diverse tecniche ma tutte devono poter essere riferite alla fatica da ascolto.

Quanto detto fin qui non esaurisce l'argomento ma delinea un modello dove da una parte troviamo gli attributi del suono e dall'altra le misure adatte a quantificarli. Un adeguato Calore e la mancanza di fatica da ascolto sono i pre-requisiti per ottenere, da un diffusore acustico, un suono di buona qualità. Se un diffusore acustico, all'ascolto, fa venire il mal di testa è inutile disquisire oltre: la musica deve essere un piacere (se fa venire il mal di testa ....).

	<b>Attributo</b>	<b>Suonogramma</b>
1	Calore	02 messa a fuoco e corposità 10 frequenze medie e voci 11 frequenze alte 12 frequenze medio alte 13 frequenze basse 14 timbrica
2	Fatica da ascolto	
3	Chiarezza	06 escursioni microdinamiche 08 risposta ai transienti 09 velocità 15 coerenza
4	Forza	01 capacità dinamica 07 escursioni macrodinamiche
5	Brillanza	16 contenuto di armoniche
6	Spazialità	03 ricostruzione scenica altezza 04 ricostruzione scenica larghezza 05 ricostruzione scenica profondità
7	interfacciabilità	

Tabella 6.2a : i 16 attributi utilizzati da Suono per costruire il “suonogramma” e una possibile corrispondenza con gli attributi della percezione (per un diffusore acustico).

<b>Campo diretto (monodimensionale)</b>			
	Attributo	Descrizione	Misura
1	Calore	bilanciamento tonale, estensione della risposta, timbrica	risposta in frequenza – massima e minima frequenza riprodotta per piccoli segnali
2	Fatica da ascolto	Senso di affaticamento che si manifesta durante l'ascolto	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	dispersione, differenza tra i canali dx e sx – posizione del centro acustico virtuale con la frequenza, variazione della distanza critica con la frequenza
<b>Interfacciabilità</b>			
7	ampli-diffusore	sensibilità, efficienza Qualità/Prezzo	SPL @ 2.83Volt 1 metro SPL ponderato (SPL @ 1 Watt RMS)
8	ampli-diffusore	Impedenza elettrica Qualità/Prezzo	Impedenza Elettrica Z (norme DIN) minimo valore della parte reale di Z
9	diffusore-ambiente	sensibilità rispetto alla posizione nell'ambiente Qualità/Prezzo	Risposta in ambiente con rumore a terzi di ottava
10	diffusore-uomo	Qualità/Prezzo	Livello delle finiture , Valutazione della realizzazione del cabinet - ergonomia
<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>			

### 6.3 L'origine della distorsione

La distorsione non lineare di un dispositivo nasce dalla sua caratteristica di trasferimento la quale, idealmente, dovrebbe essere una retta. La figura 6.5 mostra la caratteristica di trasferimento di un woofer (spostamento in funzione della forza applicata): non solo non è rettilinea ma evidenzia l'isteresi delle sospensioni ("Fisica Teorica 1: Meccanica" di Landau e Lifshits .– pag 133 e successive).

Liberiamo subito il campo da un luogo comune: dato che la distorsione armonica del terzo ordine produce una componente di frequenza tripla, la distorsione prodotta da un tono a 7000 Hz sembrerebbe dover essere influente perché produce armoniche che cadono oltre il limite di udibilità. Non è vero: se eccitiamo un tweeter con due sinusoidi a 12000 e 15000 Hz questo produrrà, per intermodulazione, una componente a 3000 Hz proprio dove l'orecchio è più sensibile. Quando è presente distorsione armonica è presente anche la distorsione per intermodulazione (Landau). Diciamo piuttosto che, con quei programmi musicali con un limitato contributo energetico in alta frequenza, la distorsione prodotta dal tweeter (poco sollecitato) è meno evidente. Ciò suggerisce che la distorsione prodotta dal woofer (dal medio) e dal tweeter siano separabili tranne che nelle zone di sovrapposizione (cross-over) dove si sommano. Questo va tenuto presente nelle misure in campo vicino.

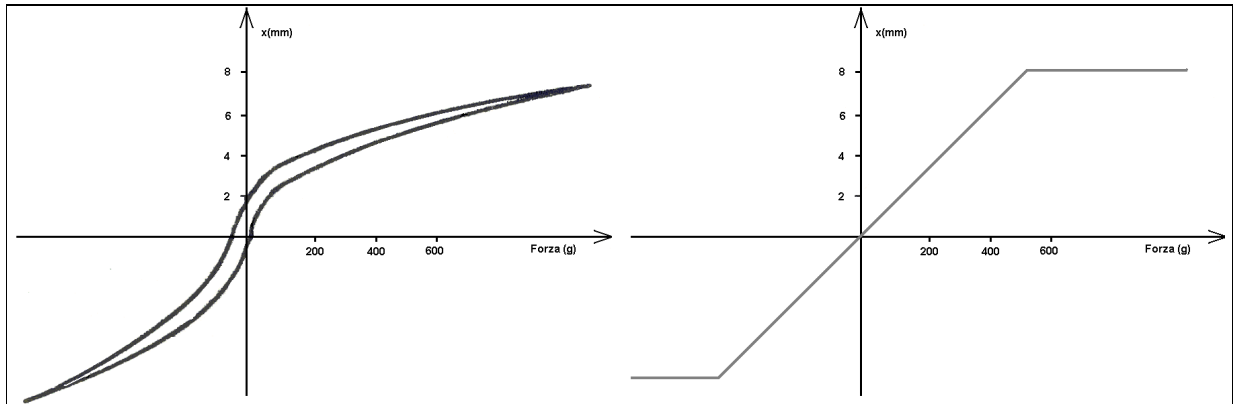


figura 6.5: a sinistra: caratteristica reale di un woofer, è ben visibile l'isteresi (documentazione Philips - Elcoma). A destra caratteristica statica dell'ipotetico dispositivo utilizzato nelle figure 6.0a e 6.0b. In questo caso la caratteristica è lineare e non c'è isteresi: l'unica causa di distorsione è determinata dal superamento della massima escursione.

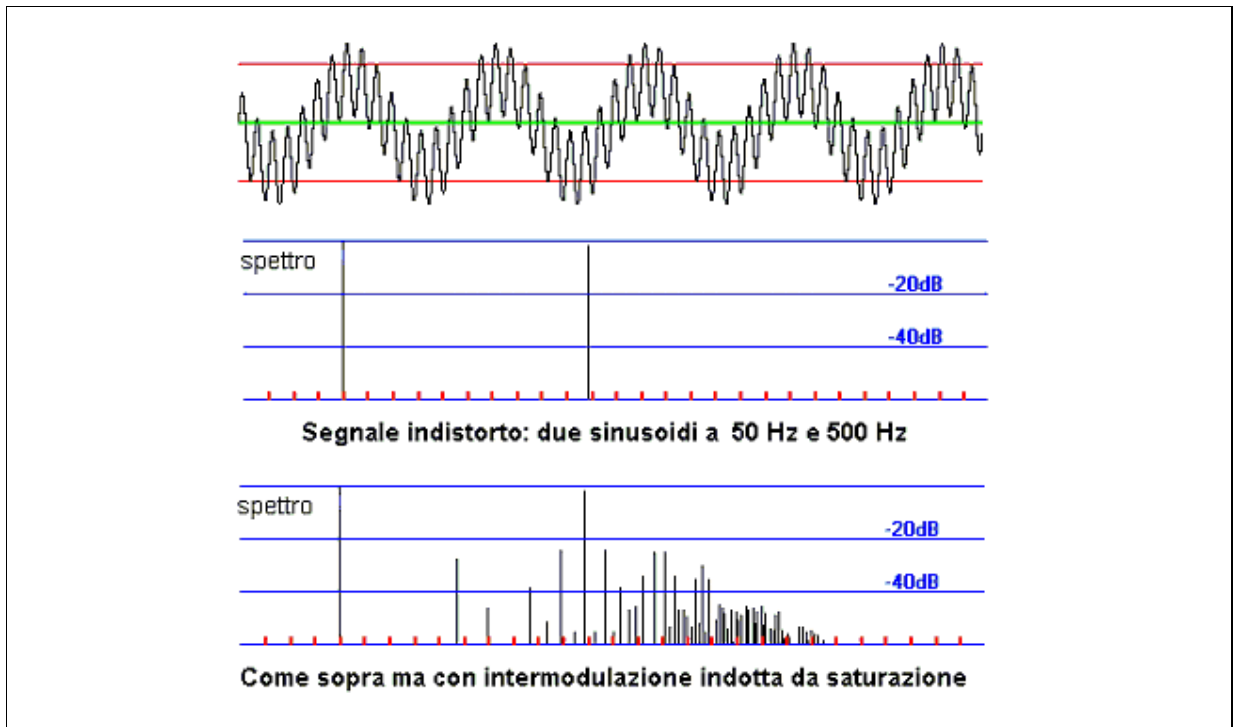


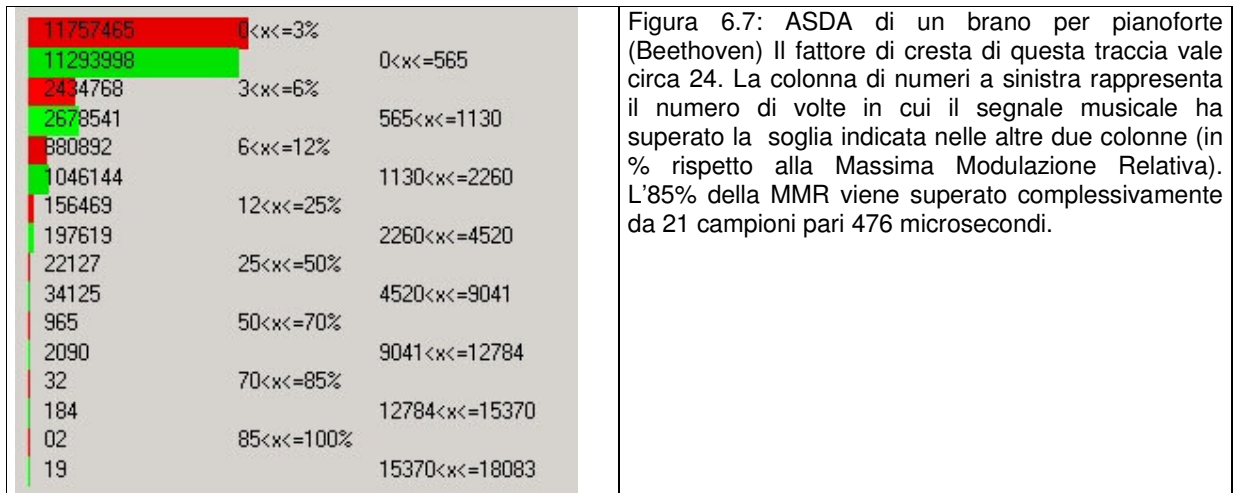
Figura 6.6: simulazione della intermodulazione da saturazione (a rigore il clipping di un amplificatore ideale). Nel caso di un woofer la distorsione non è così netta per l'inerzia dell'apparato mobile. In questo caso la frequenza più bassa è riprodotta correttamente. Se la componente a 500 Hz fosse assente la distorsione sarebbe nulla. La caratteristica statica del dispositivo qui rappresentato è riportata in figura 6.0a (a destra).

#### 6.4 Distorsione e fattore di cresta dello stimolo

Le effettive condizioni d'uso di un diffusore acustico si descrivono partendo dal programma musicale riprodotto. Il fattore di cresta dei segnali contenuti nei CD audio assume valori che vanno da 3 a oltre 28 ma una certa qualità, nelle registrazioni, si riscontra a partire da 5-6 in su (figura 6.9). Per contro è abitudine misurare la distorsione con stimoli a basso valore di cresta (da 1.4 a poco più di 3) ed a livelli SPL elevati. Chi scrive è convinto che le differenze tra un diffusore e l'altro vadano ricercate nella riproduzione dei livelli SPL più bassi. Questa affermazione è giustificata dalla ASDA di figura 6.7: qui il segnale soggiorna per

undici quindicesimi della sua storia sotto al 3% della Massima Modulazione Relativa e ne supera il 25% per meno di due secondi (complessivamente tra canale destro e sinistro): se ci sono differenze tra due dispositivi esse appariranno là dove il segnale passa la maggior parte del tempo. I brevi picchi del segnale musicale (attorno al milli secondo) anche se non vengono riprodotti fedelmente, producono una distorsione “di forma” di brevissima durata tollerata, entro certi limiti, dal sistema uditivo.

La tabella 6.8 mostra quanto diminuisce la potenza RMS utilizzata dal diffusore acustico all’aumentare del fattore di cresta del segnale musicale. Questa tabella si riferisce ad un amplificatore da 512 Watt RMS ma la potenza RMS, dissipata sul carico, scende a poco più di un Watt quando il fattore di cresta raggiunge 28. La tensione di picco sul carico rimane invece costante: nelle effettive condizione d’uso, il diffusore acustico dissipa potenze limitate a qualche Watt RMS.



Fattore di Cresta	Watt RMS dissipati su un carico da 8 ohm (circa)	Tensione di picco sul carico in Volt
1.414 (sinusoide)	512	90.5
2	256	90.5
2.828	128	90.5
4	64	90.5
5.656	32	90.5
8	16	90.5
11.312	8	90.5
16	4	90.5
22.62	2	90.5
28.28	1.28	90.5
32	1	90.5

Tabella 6.8: potenza dissipata sul carico dall’amplificatore in funzione del fattore di cresta del segnale.

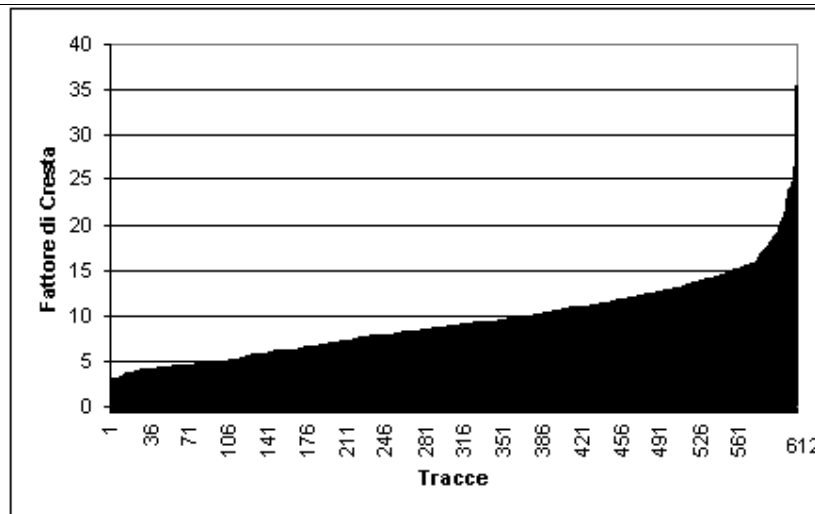


Figura 6.9 : Fattore di cresta rilevato per 612 tracce estratte da CD audio. Circa 450 tracce su 612 presentano fattore di cresta maggiore di 6, un centinaio di tracce supera il valore 15, una cinquantina supera il 20. Ai fini della riproduzione interessano i valori massimi che caratterizzano le registrazioni migliori.

### 6.5 Quanta distorsione? Limiti di udibilità

Terreno minato. Per quanto riguarda la distorsione si devono distinguere due limiti: il limite di udibilità e il limite di tollerabilità entrambi soggettivi. Se un diffusore produce un tasso di distorsione inferiore al limite di udibilità è come se la distorsione fosse nulla: un tale diffusore, se non soffre di altri difetti, può essere ascoltato all'infinito senza provocare fatica da ascolto.

Per il limite di tollerabilità il discorso è più delicato: un diffusore può apparire buono nei primi dieci minuti di ascolto ma indurre affaticamento dopo un'ora. Una distorsione tollerabile è comunque una distorsione udibile e costringe il cervello ad un lavoro supplementare per percepire il "messaggio sonoro" in modo corretto.

Ciò rende l'ascolto più o meno affaticante.

E' complicato "imporre" che un test di ascolto duri delle ore ... per questo servono le misure. Una forma di distorsione tollerata è quella che interviene a "stondare" i picchi del segnale musicale alterandone la forma per brevi istanti (nell'ordine del millisecondo). I test di ascolto, con tracce ad elevato fattore di cresta troncate al 50 ed al 70% della Massima Modulazione Relativa dicono che questa breve distorsione di forma è tollerata. La distorsione di forma può dipendere da tre cause:

- sovramodulazioni presenti nella registrazione
- clipping dell'amplificatore
- superamento dei limiti di escursione degli altoparlanti

Dato che realizzare un sistema di altoparlanti con una distorsione dell'1 o dello 0.1% impone costi diversi, è fondamentale conoscere i limiti di udibilità e di tollerabilità della distorsione come pure definire delle misure che consentano di addivenire ad un risultato oggettivo in breve tempo (minuti non ore). I limiti di udibilità della distorsione sono stati indagati da molti ricercatori con diverse metodologie ed alterne fortune.

Bryan e Parbrook sostengono che le componenti di distorsione superiore al terzo ordine diventano udibili quando raggiungono lo 0.05% (-66 dB). C'è comunque chi indica lo 0.02% per ogni ordine di armonica.

La norma DIN raccomanda di misurare la distorsione armonica di un diffusore acustico quando questo produce 96 dB SPL ad un metro e fissa due limiti: il 3% (fino a 1000 Hz) e l'1% (da 2000 Hz in su). La rivista statunitense Stereophile produce ampi test strumentali che non comprendono le misure di distorsione (pur disponendo degli strumenti per farlo).

Ricapitolando si passa da chi afferma che la distorsione è udibile anche se è 6 dB sotto un suono considerato estinto (vds tempo di riverbero T60), a chi non esegue alcuna misura di distorsione anche se potrebbe.

Rimaniamo un momento sui test di Stereophile perché questa rivista produce test molto ricchi di grafici tra cui la rilevazione delle vibrazioni dei cabinet. Tutti i test si trovano in rete e sono gratuitamente consultabili (<http://www.stereophile.com/floorloudspeakers/>). John Atkinson, che esegue le misure, invece di misurare la



distorsione, preferisce regolare il volume al livello più adatto (a volte basta abbassare un poco il volume ... altre volte è meglio spegnere tutto). Questo presuppone che:

- la distorsione sia comunque contenuta
- la distorsione aumenti con il livello SPL riprodotto
- il test duri abbastanza a lungo per produrre, se è il caso, la fatica di ascolto

Il giudizio finale dipende dalla qualità della registrazione e dalle condizioni al contorno (lettore, amplificatore, rumore ambientale, durata del test....) con il rischio di confondere l'udibilità della distorsione con la tollerabilità della fatica da ascolto (in particolare se il test di ascolto è breve). E' comunque una posizione rispettabile sulla quale si ritrova anche la rivista Suono (che però ha previsto di commentare esplicitamente il livello e la dinamica riproducibile). Nessuno però specifica la durata dei test di ascolto che è una informazione fondamentale perché la fatica di ascolto "aumenta con il tempo". Se un ottimo diffusore dimostra immediatamente le proprie qualità un diffusore di classe media potrebbe richiedere un test di ascolto molto più lungo: un test di ascolto breve non può che sottostimare la fatica da ascolto.

(fine della VI parte pubblicata da SUONO : "Corrispondenza tra misure e prestazioni hi-fi" della serie "Virtù, Vizi pregi e difetti della percezione della musica")