

Prima stesura, di Fabrizio Calabrese per l'APAT
Contenimento delle emissioni ambientali da impianti audio

A.P.A.T. - Linea Guida introduttiva:
gli impianti audio professionali

Gli impianti audio professionali hanno conservato, nell'era digitale, gran parte delle tipologie e configurazioni in uso da decenni, ma solo ad un esame superficiale. La necessità di un continuo aggiornamento tecnico è compresa ed accettata da installatori e fonici, e ad essa si aggiunge, per i *tecnici competenti* in acustica ambientale, quella tutta particolare ed innovativa di individuare ed approfondire gli aspetti più significativi in ordine al problema specifico delle emissioni ambientali.

A questo scopo è dedicato questo esame preliminare degli elementi costitutivi gli impianti audio professionali più comuni, visti nella prospettiva di sviluppo odierna e, soprattutto, con attenzione particolare per gli aspetti connessi con le problematiche dell'inquinamento acustico.

Nelle singole Linee Guida potranno quindi essere dispensate queste note d'inquadramento generale, oltre alle indicazioni bibliografiche di approfondimento d'interesse comune.

I riferimenti bibliografici

Tre testi possono essere considerati imprescindibili, per la loro caratteristica di affiancare la teoria di base dei più diversi elementi e sistemi audio all'esame delle applicazioni pratiche: si tratta dei manuali di Beranek¹, Olson² e Davis.³ I primi due sono necessariamente datati nella parte relativa alle applicazioni pratiche, ma il livello di approfondimento ad esse dedicato è di rado condiviso dalle pubblicazioni più recenti. Il terzo ha in pratica guidato l'introduzione delle tecniche di misura più avanzate nell'audio professionale, approfondendone le rivoluzionarie implicazioni progettuali.

Dal 1953 opera l'*Audio Engineering Society* (New York), che pubblica un *Journal* a cadenza mensile ed organizza una serie di Conventions, sia in America che in Europa, in occasione delle quali anche 150/200 oratori presentano contributi di assoluta avanguardia, spesso tali da mutare lo stato delle conoscenze nel campo. L'AES ha anche un'attiva Sezione Italiana.

Il complesso degli articoli comparsi sul *Journal* dell'AES e degli oltre diecimila "Preprint" presentati alle Conventions AES costituisce, insieme al *Journal of Acoustical Society of America*, la massima espressione della conoscenza tecnica e psicoacustica relativa all'audio professionale.

I programmi di simulazione al computer

Rientrano bene nel campo degli strumenti didattici anche i numerosi programmi di simulazione delle caratteristiche e prestazioni di amplificatori, diffusori ed ambienti, ed anzi questo è senz'altro il tipo di utilizzo ad essi più consono.

Mentre infatti i programmi di simulazione dei circuiti elettrici, che datano fin dagli inizi degli anni '70⁴ e sono basati sulle equazioni di stato dei semiconduttori, conducono a risultati validi anche a livello progettuale, i programmi di simulazione acustica, diversamente, soffrono ancora dell'eccessiva esemplificazione del modello matematico della propagazione, sia a livello di caratterizzazione delle sorgenti⁵ che a livello di modellazione del campo riverberato⁶.

¹ Leo L. Beranek – *ACOUSTICS* - 1954/1986 American Institute of Physics Ed.

² Harry F. Olson – *ACOUSTICAL ENGINEERING* – 1957/1991 Professional Audio journals Ed.

³ Don & C. Davis – *SOUND SYSTEM ENGINEERING* – 1987 Howard W. Sams Ed.

⁴ SPICE – UC Berkeley (capostipite di una generazione di programmi simili).

⁵ Un errore tipico, ma universalmente diffuso, consiste nell'ignorare la risposta in fase, in asse e fuori asse, dei trasduttori: gli effetti simulati delle interazioni sono, per conseguenza, completamente erronei. Anche gli effetti dell'interazione tra sorgenti vicine sono semplificati, ignorando l'impedenza di radiazione mutua.

⁶ Ancora un errore fondamentale: nell'applicare l'Equazione di Hopkins Stryker per calcolare il contributo relativo di

L'importanza didattica dei programmi di simulazione è invece elevatissima, per la facilità con cui è possibile esplorare gli effetti (teorici) per esempio del maggiore assorbimento di pareti o rivestimenti, o dell'incremento nella direttività d'emissione di sorgenti simulate.

Per i *tecnici competenti*, che hanno maggiore familiarità con la strumentazione di misura di precisione, non sarà difficile effettuare verifiche sul campo per configurazioni progressivamente più complesse, potendo così individuare ed approfondire i limiti dei programmi di simulazione.

In una posizione intermedia, per affidabilità e precisione, si situano i programmi di simulazione al computer delle risposte in frequenza di altoparlanti, microfoni e diffusori: in quanto sistemi elettromeccanici, essi sono infatti scomponibili in componenti resistive e reattive, che possono poi essere valutate mediante i normali programmi di simulazione dei circuiti⁷. Anche qui le semplificazioni eccessive sono a portata di mano, a volte inevitabili (come nel caso di trasduttori a tromba), ma è tuttavia possibile ottenere risultati di precisione comparabile con quella di un fonometro di Classe-1, se la configurazione di partenza è relativamente meno complessa⁸.

Elettroniche, trasduttori, diffusori.

Per chi si avvicina a mente libera all'audio professionale, l'approccio più semplice è quello di cogliervi le similitudini più immediate con i più familiari impianti audio domestici, che sono composti di elementi base caratterizzati da funzioni ben specifiche. Così è anche per gli impianti professionali, in cui possono essere presenti apparati che svolgono funzioni ancora più specifiche⁹. I più recenti sviluppi dell'audio professionale vedono anche un'evidente tendenza ad integrare alcuni elementi, per esempio gli amplificatori all'interno dei diffusori: le implicazioni progettuali e d'impiego possono essere significative, anche in ordine al contenimento delle emissioni ambientali.

La preamplificazione.

Il segnale audio ai terminali di un microfono, o di una testina di giradischi analogico o di registratore, è di entità minima; spesso raggiunge qualche millesimo di Volt solo nei picchi¹⁰.

Le uscite "di linea" come quelle dei lettori CD, dei sintonizzatori, operano a livelli sostanzialmente superiori, con un ragionevole margine rispetto all'inevitabile rumore di fondo¹¹.

Già a questo livello esiste una netta differenza e separazione tra gli apparati domestici e quelli professionali; la presenza di connessioni bilanciate.

In ambiente domestico e con impianti assai semplici è infatti accettabile trasmettere il segnale su linee sbilanciate, per esempio mediante cavo coassiale: il conduttore centrale veicola il segnale, mentre il conduttore esterno fa contemporaneamente da schermo e da collegamento di terra. Se si operasse nello stesso modo negli impianti professionali, dove gli apparati collegati insieme possono essere decine ed essere dislocati a centinaia di metri di distanza (quindi con terre a potenziale diverso), nei conduttori esterni scorrerebbero correnti spurie assai maggiori di quelle di segnale: una condizione che causa la presenza certa di forti ronzii e la captazione di disturbi di ogni genere.

La soluzione tecnica universalmente impiegata in campo professionale consiste nel trasmettere il segnale in duplice copia, su due conduttori all'interno dello schermo, con le fasi dei due segnali

emissione diretta e campo riverberato, i programmi di simulazione danno tutti come risultato un valore energetico omogeneo, a partire da distanze superiori anche di poco alla distanza critica (alla quale l'intensità del campo riverberato eguaglia l'emissione diretta dalla sorgente). Nella pratica è emersa la necessità di un fattore di correzione, per le sale di altezza limitata (vedi **Linea Guida n.4**).

⁷ L'argomento è trattato a fondo nei manuali di Beranek ed Olson; nella **Linea Guida n.12** vi sono alcuni esempi.

⁸ Le sorgenti più facilmente modellabili sono quelle di dimensioni contenute rispetto alle lunghezze d'onda emesse.

⁹ Sono denominati nel complesso come "processori" (vedi più avanti).

¹⁰ La sensibilità tipica dei microfoni dinamici è di 1-2 millivolt per 94 decibel, che è un livello sonoro decisamente alto.

¹¹ Il massimo livello d'uscita è tipico, in quanto limitato dalla tensione di alimentazione dei circuiti integrati operazionali (+/- 15 Volt): esso è pari a 13-14 Volt di picco, cioè 9-10 Volt RMS. Il livello medio può situarsi anche al di sotto di 100 millivolt, in funzione della dinamica dell'incisione o della trasmissione (vedi Linea Guida preliminare sulla dinamica).

perfettamente opposte. All'arrivo, lo stadio d'ingresso che riceve il segnale non fa altro che ricavare la "differenza" tra le tensioni presenti ai due terminali: se i disturbi saranno captati egualmente sulle due linee (come è normale), allora la "differenza" ottenuta sarà pari a zero, mentre la differenza di due segnali opposti in fase sarà pari ad esattamente il doppio, in tensione, rispetto a quella della singola linea¹². La presenza ubiqua di linee bilanciate consente dunque livelli di tensione di segnale doppi, a parità di tensione di alimentazione dei circuiti.

E' il momento adatto ad aprire una parentesi importante. Quando si parla di livelli operativi e massimi di preamplificatori, ma anche quando si parla delle potenze massime degli amplificatori, si dimentica spesso che **le elettroniche hanno limiti inferiori e superiori della dinamica, assolutamente ben definiti**, prevedibili e, solitamente, anche ben specificati.

Il limite inferiore del segnale trattato da un qualsiasi circuito, anche di potenza, è quello pari al rumore di fondo. Più che l'evoluzione tecnologica dei componenti, è stata la diffusione delle corrette strategie progettuali ad unificare praticamente le prestazioni della massima parte delle elettroniche professionali su un livello di stato dell'arte che si avvicina di molto ai limiti fisici¹³.

Il limite superiore è ancora più semplice da individuare. Tutti i circuiti elettronici sono alimentati da tensioni continue, a volte singole, a volte duali¹⁴, e, naturalmente, non è fisicamente possibile che ai terminali di uscita possa essere erogata una tensione di picco che superi quella di alimentazione¹⁵. Dunque basta sottrarre 1-2 Volt di inevitabili perdite nei circuiti, dal valore delle tensioni di alimentazione, per calcolare il valore preciso della massima tensione di picco indistorta.

Naturalmente ogni stadio di uscita, finali di potenza inclusi, deve essere in grado di erogare anche la corrente corrispondente alla massima tensione sull'impedenza di carico collegata in uscita: con gli altoparlanti questo può creare, a volte, non pochi problemi, che saranno affrontati più avanti.

I componenti elettronici con cui sono realizzati preamplificatori, mixer, lettori CD e la massima parte dei processori analogici, sono assolutamente simili tra loro per tensioni e correnti minime di rumore come pure per tensione di alimentazione: per tutto ciò è facilmente prevedibile che l'ampiezza dell'intervallo dinamico, tra rumore di fondo e livello massimo d'uscita, sia analoga.

Due punti, quindi, meritano un'attenzione particolare da parte del *tecnico competente*: la trasmissione del segnale audio su linee bilanciate e la dinamica ben individuabile delle elettroniche, professionali e non, intesa come rapporto tra la tensione minima di rumore e la massima in uscita.¹⁶

I mixer¹⁷

L'elemento caratterizzante maggiormente gli impianti audio professionali è senz'altro il mixer.

La sua funzione principale è perfettamente analoga a quella di un preamplificatore domestico; ma mentre questo commuta più sorgenti in alternativa tra loro, il mixer consente di averle anche tutte insieme sommate ai terminali di uscita, che possono essere ben più di due.

¹² Non a caso gli ingressi bilanciate sono definiti anche come "differenziali". Tuttavia la loro capacità di discriminare i disturbi ha un limite ben definito, espresso in deciBel come CMRR (Common Mode Rejection Ratio), tipicamente dell'ordine di 50-60 dB per apparati professionali di qualità medio-alta. Solo circuiti di qualità estrema riescono a raggiungere valori di CMRR superiori ad 80-90 deciBel.

¹³ Sia la tensione che la corrente di rumore di un qualsiasi stadio di amplificazione sono calcolabili con precisione in sede di progetto e simulabili (p.es. con SPICE): è quindi possibile ottimizzare il progetto in funzione anche di questi parametri.

¹⁴ Due tensioni di eguale valore ma opposte rispetto al potenziale di massa: è la configurazione più frequente, poiché semplifica di molto la progettazione dei circuiti.

¹⁵ Esiste un'eccezione: il caso in cui in uscita vi sia un trasformatore elevatore di tensione, ma si tratta di un caso raro. Più spesso i trasformatori in uscita sono utilizzati per abbassare le tensioni (p.es. con le valvole).

¹⁶ Tensioni (e correnti) di rumore si riferiscono, per tradizione, agli ingressi di un preamplificatore o amplificatore: esse devono quindi poi essere moltiplicate per il valore del guadagno, complicando la trattazione. Negli apparati domestici, sbilanciati, il valore del rumore captato dai collegamenti è sempre molte volte superiore a quello intrinseco dello stadio di amplificazione, rendendo assai più difficile (ed aleatoria) la determinazione dell'intervallo dinamico disponibile.

¹⁷ Il riferimento bibliografico più approfondito, in materia, è senz'altro il capitolo 24 (pp.771-908) dell'*HANDBOOK FOR SOUND ENGINEERS* – 1991 Howard W. Sams Ed.

La molteplicità di controlli e di collegamenti dei grandi mixer professionali non corrisponde ad un'eguale complessità operativa. In pratica i 48 ed anche i 64 o più canali sono tipicamente del tutto identici tra loro, come lo sono i canali d'uscita principali ed ausiliari.

Ogni canale d'ingresso ha come primo controllo, per convenzione in alto, il guadagno dello stadio d'ingresso, che si deve adattare al tipo di sorgente, microfónica o di linea, ed al livello del segnale. Seguono i controlli di tono, più o meno sofisticati, e, più in basso, le cosiddette "mandate"¹⁸. A seconda del tipo di mixer (da studio, di sala, da monitor), questi controlli regolano il livello di segnale destinato ad un numero di uscite ausiliarie, cui possono essere collegati i processori per effetti e riverbero, oppure i diffusori monitor posti sul palco. Ad ogni "mandata" corrisponderà un canale di ritorno specifico, oppure, nei mixer monitor, un controllo d'uscita (toni e livello) specifico per la singola linea di monitor.

Gli ultimi controlli, più vicini all'operatore, sono quelli di assegnazione, di bilanciamento stereo e di controllo di livello generale del singolo canale, d'ingresso o d'uscita.

Contrariamente all'opinione comune, il mixer rappresenta il vero collo di bottiglia per la dinamica di ripresa e di riproduzione, sia in studio che dal vivo. Infatti la tensione di rumore prodotta dai numerosissimi canali si va inesorabilmente a sommare sulle uscite¹⁹, mentre la tensione massima resta evidentemente la stessa degli stadi di somma e di uscita, visto che la tensione di alimentazione è comune per tutti i circuiti. In pratica è facilmente verificabile che la tensione di rumore di un mixer analogico s'incrementa in funzione del numero di canali collegati alla barra di missaggio, come pure il fatto che il livello massimo d'uscita resti assolutamente stabile²⁰.

Due aspetti da sottolineare: la grande complessità circuitale dei mixer professionali rende quanto mai improponibile alcun intervento inteso a contenere i livelli d'uscita, tanto più in presenza dei problemi di dinamica e di distorsione (da sovraccarico del nodo di somma) appena descritti. Inoltre i mixer hanno sempre, anche negli esemplari più semplici ed economici, numerose uscite alternative, tutte indipendentemente regolabili e collegabili all'istante.

Quindi nessuna possibilità di contenimento o limitazione (non disinseribile) a questo livello²¹.

I "processori"

Raramente il segnale audio viene inviato direttamente dal mixer agli amplificatori di potenza, in un impianto audio professionale che non sia della categoria minima.

Più spesso sono presenti apparati intermedi di varia configurazione ed utilità, accomunati (tranne i crossover elettronici) dalla possibilità di facile bypass.

I crossover elettronici rappresentano un caso particolare: essi hanno il compito di suddividere lo spettro delle frequenze audio in due o più bande specifiche, per esempio in alti, medi e bassi, che verranno inviate ad amplificatori indipendenti e, da questi, ai trasduttori specializzati nei diffusori²².

La funzione del crossover elettronico è assai critica per le prestazioni, ma anche per la stessa

¹⁸ In inglese "AUX sends".

¹⁹ Il nodo di somma è detto "bus" nel senso di barra che scorre trasversalmente rispetto ai canali del mixer.

²⁰ I mixer digitali operano diversamente: in essi è possibile tenere le tensioni di rumore costanti al variare del numero di stadi collegati, ma il problema della massima tensione all'uscita del convertitore D/A resta intatto. I circuiti digitali sono assai sensibili alle saturazioni anche di minima durata, come verrà discusso in dettaglio nella Linea Guida preliminare.

²¹ Ad ogni *tecnico competente* è capitato di imbattersi in mixer con i controlli asseritamente "bloccati", ma che in pratica non possono in alcun modo rappresentare garanzia di limitazione né del livello né del guadagno del mixer stesso...

²² Anticipando di poco, occorre qui spiegare che i trasduttori delle alte frequenze sono assai fragili, se ad essi si inviano anche le frequenze più basse di quelle minime per cui sono progettati e specificati: anche nei normali diffusori passivi (monoamplificati) sono infatti sempre presenti dei filtri di crossover, in funzione di protezione dei trasduttori delle vie alte. D'altra parte ha comunque poco senso inviare le alte frequenze anche agli altoparlanti dei bassi, che non le riprodurrebbero comunque per via della loro maggiore massa mobile: ancora una volta un filtro di crossover si rivela prezioso, ora per filtrare le alte frequenze prima dei trasduttori dei bassi.

configurazione di un impianto audio professionale. La scelta delle frequenze di “taglio”, delle pendenze dei filtri, dei livelli d'uscita e delle eventuali limitazioni, sono tutte di grande delicatezza e richiedono la più alta conoscenza e consapevolezza professionale nel campo. Proprio per evitare i frequenti ed esiziali errori di configurazione dei crossover elettronici, molti costruttori di diffusori professionali ne hanno realizzati di specifici per ciascun tipo di diffusore prodotto²³ Un'ulteriore evoluzione in questa direzione è consistita nel dislocare crossover elettronici ed amplificatori di potenza direttamente all'interno dei diffusori: questa è la tendenza attualmente più in voga, ma anche la maggiore causa delle più serie difficoltà ai *tecnici competenti* che intendano operare interventi di riconfigurazione di un qualsiasi impianto audio di grande potenza.

La seconda categoria di “processori”, per diffusione, è quella degli equalizzatori, in pratica dei controlli di tono assai sofisticati e con un numero di controlli specifici per bande finemente regolabili (i cosiddetti equalizzatori parametrici) oppure per bande fisse, tipicamente di un terzo d'ottava ciascuna. L'utilità di questi processori è tanto maggiore quanto minore è la linearità di risposta (in frequenza) intrinseca dell'impianto audio. Anche per essi occorre elevata cultura ed esperienza specifica, oltre a disporre di strumentazione di misura avanzata, senza la quale gli errori possono superare ampiamente i benefici²⁴.

Nei cinema si suole denominare “processori” quegli apparati specifici che assommano gli stadi di preamplificazione, decodifica ed equalizzazione, che sono di tipologia specifica ed influenzano profondamente le prestazioni dinamiche e, d'emissione, della sala o dell'arena²⁵.

Anche i “limitatori” fanno parte della numerosa famiglia dei processori²⁶. Il loro scopo d'impiego è duplice ed in entrambi i casi del tutto **antitetico rispetto all'opinione comune dei non addetti**.

Il primo tipo d'impiego consiste nella protezione degli elementi più delicati dell'impianto, vale a dire i trasduttori per le frequenze più alte e più basse (subwoofers). In entrambi i casi i *limitatori* seguono l'uscita del crossover elettronico e precedono gli amplificatori di potenza.

Il secondo tipo d'impiego caratteristico dei *limitatori* è quello di essere inseriti (tramite le “mandate” ed i ritorni dei mixer) nei singoli canali di preamplificazione, specie quelli relativi a voce e percussioni, allo scopo di contenere i picchi ed a vantaggio di rendere praticabile **l'innalzamento del livello sonoro medio** del canale specifico, senza tuttavia che esso saturi.

L'effetto della presenza di questi due tipi di interventi di limitazione è dunque quello di consentire di operare lo stesso impianto audio a livelli d'ascolto assai superiori a quelli altrimenti consentiti, in sicurezza, in assenza di limitatori²⁷.

Per lo specifico settore dei grandi impianti da concerto, questo è un momento di transizione, in cui le elettroniche una volta, completamente analogiche, stanno cedendo gradualmente il campo alle elettroniche digitali, che promettono configurazioni e prestazioni completamente differenti dalle attuali²⁸. La trasmissione dei segnali audio in forma digitale, sia con cavo coassiale che mediante

²³ Tipicamente per i modelli di maggiori prestazioni e costo: questi apparati erano denominati genericamente “processori” ed avevano possibilità ed intervalli di regolazione volutamente ridotti al minimo.

²⁴ Il tipico errore nelle equalizzazioni, riscontrabile per esempio in ogni cinema, è quello di rilevare la curva di risposta in una o poche posizioni in sala, con uno strumento che integra il campo diretto emesso dal diffusore con il campo riverberato. In questo caso si va a correggere assai più l'acustica dell'ambiente che non la risposta dei diffusori. Il problema è che l'orecchio umano attenua selettivamente le prime riflessioni (da 6/7 a 30/40 millisecondi di ritardo) anche di 9-10 dB, per cui la sensazione all'ascolto è totalmente differente da quella risultante sullo schermo dell'analizzatore di spettro. Provare per credere: basta ascoltare la voce di un attore, riprodotta in diversi cinema...

²⁵ Questo argomento sarà approfondito nella **Linea Guida n.15**.

²⁶ E come tali operano con segnali a “livello di linea”, per cui è **in ogni caso** possibile *bypassare* ingressi ed uscite.

²⁷ In molte Valutazioni d'Impatto Acustico la presenza di questi apparati di limitazione viene erroneamente ascritta come misura atta a ridurre il livello delle emissioni, quando è perfettamente logico e vero l'esatto contrario.

²⁸ A livello d'esempio, basti considerare che già oggi sono disponibili -e relativamente diffusi- dei processori digitali che assommano le funzioni di equalizzatori, crossover elettronici, limitatori, con una versatilità dei controlli, una dinamica (intesa come assenza di rumore di fondo) assolutamente superiori a quelle degli omologhi analogici. Questi apparati possono memorizzare e richiamare decine di configurazioni diverse, nel giro di pochi secondi.

fibra ottica, comporterà la pratica eliminazione di ogni disturbo. L'implicazione fondamentale a livello di contenimento delle emissioni sarà, però, quella di relegare al solo ultimo anello della catena le eventuali misure di limitazione configurabili in modo permanente e non manomissibile.

Gli amplificatori

Più d'uno tra coloro che si occupano d'inquinamento acustico da impianti audio ha notato che le proporzioni del fenomeno non sono per nulla le stesse, da diversi anni a questa parte. L'incremento dei livelli d'immissione si spiega solo in parte con le maggiori potenze degli amplificatori: anche la dinamica delle incisioni è mutata, negli ultimi 10 anni, come spiegato nelle **Linee Guida n.1 e n.8**.

Le potenze di amplificazione si sono effettivamente innalzate, a parità di costi e con ingombri impensabili fino ad appena qualche anno addietro. Un esempio: nei grandi cinema (800 posti) del dopoguerra vi era un solo diffusore, pilotato da un ampli a valvole da 30-40 Watt; nelle sale attuali, di capienza assai minore, è possibile vedere installati ampli per un totale di oltre 20.000 Watt.²⁹

Quel che è accaduto può essere spiegato semplicemente, per tappe. La prima è stata quella del passaggio dalle valvole ai transistor (alla fine degli anni '60). Le potenze crebbero dai 40-75 Watt monofonici ai 150 Watt stereo all'inizio degli anni '70.³⁰ Alla fine degli anni '80, circa, a parità di costi relativi, di ingombri e peso, l'affinamento della tecnologia portò ad amplificatori stereo di potenza media prossima ai 350 Watt per canale.

La seconda rivoluzione avvenne all'inizio degli anni '90, con l'introduzione e la diffusione delle alimentazioni a commutazione (*switching*), che consentirono di ridurre ingombro e peso del trasformatore d'alimentazione³¹. Le potenze raddoppiarono e continuarono a crescere nel tempo.

La terza tappa, quella odierna, consiste nell'adozione generale degli stadi di uscita: prima in classe H, poi in classe D, cioè anch'essi a commutazione. Quello che cambia è il rendimento di conversione, cioè la proporzione tra la quota di energia emessa dall'amplificatore verso i diffusori e quella assorbita dall'alimentatore. Di per sé il vantaggio sembrerebbe minimo, ma un esempio rende meglio l'idea.

Immaginiamo un normale amplificatore a transistor in classe AB, come quelli realizzati dagli anni 1970 al 1990 ed oltre. Su 1000 Watt assorbiti dall'alimentatore, dai 600 ai 700 Watt arrivano agli altoparlanti ed i restanti 300-400 Watt devono essere dissipati dai transistor finali dell'amplificatore, i quali ovviamente saranno montati su alette di congrua superficie, ventilate artificialmente. Lo stesso amplificatore realizzato in classe D, invierebbe agli altoparlanti almeno 950 dei 1000 Watt assorbiti dall'alimentazione. L'incremento è sensibile, ma non importante: quello che cambia è il passaggio da una dissipazione all'interno dell'ampli dell'ordine di 300-400 Watt ad appena 50 Watt. Quindi, a parità di transistor finali e di alette di raffreddamento, si deduce che sarà oggi possibile far assorbire dall'ampli ben 7000 Watt dall'alimentatore, erogandone ben 6650 agli altoparlanti, rispetto ai 600-700 di prima.³²

Gli amplificatori o gli alimentatori a commutazione operano sostanzialmente come i comuni circuiti digitali: sono per un certo tempo totalmente chiusi, per altro tempo totalmente aperti, ed è il tipo di circuito e la proporzione dei tempi di apertura e chiusura a determinare la forma d'onda in uscita. La condizione fondamentale (teorema di Shannon) è che la commutazione si operi ad una frequenza almeno doppia della più rapida variazione analogica da trattare.

Quando un transistor è completamente chiuso non vi scorre alcuna corrente, e la dissipazione al suo

²⁹ Nel 1972 Emerson, Lake e Palmer sonorizzarono lo stadio Flaminio –a Roma- con 6 Kwatt di impianto audio: venti anni dopo Pink Floyd ed U2 operavano nello stesso stadio con impianti da mezzo megawatt ed oltre...

³⁰ A questa datazione corrisponde, all'incirca, la diffusione delle discoteche, nel senso moderno del termine.

³¹ All'epoca degli ampli a valvole, ogni amplificatore aveva almeno un trasformatore di alimentazione ed uno (per canale) di uscita, i cui volumi e pesi erano proporzionali alla potenza, oltre che alla bassa frequenza operativa. Gli ampli a transistor sono privi di trasformatore d'uscita, mentre quello di alimentazione non è più operato alla frequenza di rete (50 Hz), ma a frequenze ultrasoniche (da 100 ad oltre 300 KHz), alle quali non è difficile realizzare alimentatori da migliaia di Watt, con trasformatori del peso di un etto o poco più.

³² Naturalmente anche gli alimentatori di questi amplificatori sono digitali e condividono rendimenti superiori al 90%.

interno è evidentemente nulla. Quando lo stesso transistor è portato in piena conduzione, allora la tensione ai suoi capi sarà comunque minima (p.es. 1 Volt) e per alta che sia la corrente che vi scorre, la dissipazione (prodotto delle due grandezze) sarà comunque limitata³³.

Nessuna sorpresa se gli amplificatori di oggi possono erogare 6-10 Kwatt con un ingombro di 9 cm. di altezza e 15 Kg di peso, allo stesso costo relativo di un amplificatore da 150+150 Watt del 1978. I fabbricanti di trasduttori hanno devoluto sforzi estremi, e di grande successo, per tentare di tener testa a questa *escalation*: singoli trasduttori odierni possono sopportare anche 2000 Watt.

A queste potenze è la non linearità dell'aria nelle trombe e nei condotti a causare ingenti perdite, ed anche il problema della dissipazione dell'energia nei trasduttori assume proporzioni inconsuete.

I diffusori professionali

Tutti gli sviluppi tecnologici in campo elettronico hanno trovato ricadute parallele, nell'audio professionale come in quello domestico, per cui è oggi possibile riscontrare decoder digitali (come quelli per le sale cinematografiche) ed amplificatori in classe D anche per impianti domestici (e car-audio). Per quanto riguarda invece i diffusori, i due settori sono praticamente del tutto distinti. Mentre in casa si diffondono diffusori sempre più compatti (specie per gli Home-Theatre), progettati per livelli d'ascolto minimi, dall'altra parte, nell'audio professionale, anche le realizzazioni più economiche e semplici raggiungono prestazioni di tutto rispetto³⁴.

Questo è senz'altro il capitolo meritevole di maggiore approfondimento, da parte dei *tecnici competenti* che intendano operare nel campo del contenimento delle emissioni da impianti audio.

In questa prospettiva sarà utile citare un numero di riferimenti bibliografici autorevoli, utili per l'approfondimento di alcuni aspetti, la cui trattazione completa in questa sede sarebbe impossibile per motivi di spazio.

L'audio professionale nasce all'inizio degli anni '20, epoca in cui le potenze di amplificazione si misuravano in semplici Watt. Il primo e maggiore sforzo teorico venne quindi devoluto per ottenere il massimo rendimento di conversione dagli altoparlanti dell'epoca, che erano a tromba. Un'affascinante lettura, che racconta di quell'epoca di pionieri, è quella di "Horn Theory and the Phonograph" di P. & G. Wilson³⁵.

Le trombe

I diffusori a tromba consistono, a grandi linee, in un trasduttore³⁶ ed in un condotto ad espansione più o meno rapida, ma rispondente ad una determinata progressione matematica. I parametri determinanti le prestazioni di una tromba sono, oltre a quelli del trasduttore, le superfici di gola e di bocca, il tipo di coefficiente di accrescimento e la lunghezza del condotto.

Riassumendo in breve quella che è la teoria, spiegata in dettaglio nei manuali di Beranek¹ ed Olson², si deve innanzitutto individuare preventivamente la banda di frequenze in cui la tromba dovrà operare. Alle basse frequenze saranno infatti determinanti la lunghezza e la superficie di bocca, mentre alle alte frequenze sarà il tipo di espansione a garantire contemporaneamente elevatissima efficienza ed una direttività di emissione quanto più omogenea possibile.

In pratica una tromba opera una trasformazione d'impedenza, convertendo un'onda di elevata pressione e bassa velocità di volume, alla gola, in un'onda di bassa pressione ed elevata velocità di volume, alla bocca, esattamente come un trasformatore d'uscita di un amplificatore a valvole, converte l'alta tensione (400 Volt) e la bassa corrente (100 mA), a cui operano le valvole, nella

³³ I transistor di potenza più comunemente impiegati in campo audio sopportano facilmente correnti di 10 A ciascuno, possono essere alimentati a tensioni di 180-200 Volt e costano abbastanza poco da poter essere impiegati in decine di unità in un singolo amplificatore. Bastano semplici calcoli per capire che le potenze attuali sono in via di superamento.

³⁴ Il tipico diffusore professionale "economico" ha una scocca in plastica pressofusa, uno o più amplificatori incorporati (da 300/500 W.) ed una potenzialità di oltre 120 dB di Picco Lineare alla distanza di riferimento di 1 m.

³⁵ Percy & G. Wilson – *Horn Theory and the Phonograph* – Journal of Audio Engineering Society, vol.23 n.3, April 1975

³⁶ Detto "driver" quando è deputato all'emissione delle alte frequenze.

bassa tensione (18 V) ed alta corrente (2,2 A) richiesti dagli altoparlanti a bobina mobile. Come per gli amplificatori a valvole, la presenza del trasformatore (cioè della tromba), è indispensabile, per adattare le impedenze ottimali di carico degli altoparlanti e dell'aria, che sono assai diverse.

In assenza della tromba, il trasduttore dinamico non potrebbe che trasferire all'aria una minima quota dell'energia elettrica ricevuta dall'amplificatore: la rimanente quota verrebbe dissipata in calore. Questo avviene sempre nei diffusori domestici, che sono a radiazione diretta, ed è anche un'occorrenza comune in una gran parte dei diffusori professionali, p.es. per i diffusori bass-reflex. Questo è spiegato in dettaglio nel Preprint AES n.3193, intitolato "*Maximum Efficiency of Direct-Radiator Loudspeakers*" di D. B. Keele³⁷.

Per operare la trasformazione, la tromba deve avere un coefficiente d'accrescimento sufficientemente graduale da consentire il passaggio delle più basse frequenze ed una superficie di bocca estesa quanto necessario a consentire l'emissione di queste nell'ambiente, senza che si crei una discontinuità al momento del passaggio dal condotto all'aria circostante. Quando ciò accade, infatti, si crea una riflessione di energia all'indietro, che interferisce, in quanto ritardata dalla propagazione nel condotto, con la successiva emissione del trasduttore, creando picchi e buche nella risposta in frequenza, oltre ad un'intuibile cospicua perdita di rendimento.

Le dimensioni minime della bocca sono facilmente calcolabili, e sono comprese (il diametro) tra un terzo ed un quarto della lunghezza d'onda maggiore da trasmettere. La presenza di pareti vicine o di altri diffusori affiancati permetterà di soddisfare questo requisito con bocche più piccole, ma poi l'impiego del diffusore sarà limitato a quel posizionamento.

La legge matematica d'accrescimento della superficie del condotto è anch'essa responsabile dell'estensione e del tipo di risposta in frequenza alle basse frequenze (vedi Beranek¹ ed Olson² per le formule): le trombe più diffuse sono quelle esponenziali, ma le iperboliche consentono migliori prestazioni in gamma bassa, a parità di superfici di gola e di bocca. Le trombe coniche sono più adatte all'emissione di alte frequenze, alle quali garantiscono una costante direttività di emissione ma al prezzo di dimensioni assai più cospicue di quelle sopra indicate³⁸.

E' rimasta da esaminare la superficie di gola, che è un parametro fondamentale: essa determina un duplice rapporto di trasformazione, da un lato verso la tromba, dall'altro verso la superficie del trasduttore, il cui diaframma mobile è solitamente diverse volte più ampio della superficie di gola, tanto che si parla, in questi casi, di "rapporto di compressione" alla gola. Intuitivamente la seconda trasformazione è assai significativa per ridurre ulteriormente l'escursione del diaframma mobile del trasduttore: in assenza di perdite, infatti, se un trasduttore si muove di un millimetro e la sua superficie è cinque volte quella della gola della tromba, allora l'aria all'imboccatura della tromba verrà spostata di mezzo centimetro, e così via. Come per tutti i sistemi fisici, c'è una condizione di equilibrio tra i vari parametri, alla quale corrisponde un livello di prestazioni ottimali.

Il progetto di un diffusore a tromba prevede appunto l'individuazione di questa condizione. Per ogni trasduttore esiste una superficie di gola alla quale corrisponde il massimo rendimento; una gola più ristretta consentirà escursioni minori ed un certo incremento della risposta alle alte frequenze, ma sarà assolutamente necessario ridurre al minimo il cuscinetto d'aria interposto tra il diaframma mobile e la gola della tromba, pena il crearsi di un filtro passa-basso efficacissimo a tagliare proprio le alte frequenze. Una gola troppo ampia penalizzerà escursione e rendimento, ma accorcerà assai la tromba e, soprattutto, ridurrà la distorsione da non linearità dell'aria (vedi Beranek¹ ed Olson², ai capitoli relativi). Agli alti livelli di pressione l'aria mostra infatti un coefficiente d'espansione diverso da quello di compressione, per cui la forma dell'onda emessa è asimmetrica, con un notevole (e calcolabile) incremento della distorsione, di II armonica. Le trombe il cui condotto si espande con elevata gradualità sono anch'esse esposte a questo tipo di distorsione, motivo per cui le trombe esponenziali sono state sempre preferite alle iperboliche (che hanno un tratto iniziale pressoché cilindrico, ad espansione minima).

³⁷ D.B. Keele – *Maximum Efficiency of Direct-Radiator Loudspeakers* – Preprint n.3193; 91^a Convention AES, 1991.

³⁸ Alle alte frequenze -con onde lunghe centimetri- non è un problema realizzare bocche estese più lunghezze d'onda.

Naturalmente, da queste linee di progetto possono scaturire trombe di proporzioni assai differenti, in funzione delle frequenze che sono chiamate ad emettere e del tipo di trasduttore che le pilota.

Per le trombe che emettono frequenze basse si impiegano solitamente i normali altoparlanti a cono, di diametri compresi tra i 18''(46 cm.) ed i 15''(38 cm.) per frequenze inferiori a 250 Hz. Per le frequenze medio-basse (250-1200 Hz) i diametri dei trasduttori impiegati sono compresi tra i 12''(30 cm.) ed i 6,5''(17 cm.). Per le frequenze superiori a 500-800 Hz. si impiegano altoparlanti specificamente progettati, che al loro interno racchiudono anche il primo segmento di tromba ed hanno, di regola, un elevato rapporto tra la superficie della membrana (in Titanio, Mylar o Alluminio) e quella della gola, ed infatti sono denominati “*drivers a compressione*”. I rendimenti di conversione di questi ultimi componenti possono superare il 25 per cento; in pratica livelli anche superiori a 110 deciBel per 1 Watt ad un metro (grazie alla direttività di emissione delle trombe).

I diffusori a tromba per le basse frequenze sono decisamente ingombranti e piuttosto costosi da realizzare, con la necessaria rigidità, ma hanno anche rendimenti dell'ordine di 104-106 dB/1W/1m fino a frequenze dell'ordine di 40-50 Hz., poco sopra le quali possono emettere livelli di picco di oltre 140 dB (Lin.) ad un metro, senza problemi di escursione (vedi **Linea Guida n.12**).

In una rassegna sui livelli sonori rilevati in discoteche inglesi negli anni 1970/79, Ken Dibble³⁹ riporta valori in dB”A” (Slow o Leq.) oscillanti intorno a 100 deciBel, ma anche fino a 113 dB”A”. Questo era reso possibile, nonostante le ridottissime potenze degli ampli dell'epoca, rispetto agli attuali, proprio dal rendimento dei tipici diffusori a tromba, allora di impiego pressoché universale.

I diffusori *bass-reflex*

L'alternativa in ambito professionale (ma anche domestico) agli enormi ma efficienti diffusori a tromba è da sempre quella dei diffusori *bass-reflex*, così denominati per il fatto di utilizzare anche l'emissione della faccia posteriore dell'altoparlante.

Se si collega ad un amplificatore un qualsiasi altoparlante a cono, ma privo di diffusore, quello che avviene è che l'onda di pressione emessa dalla faccia anteriore del diaframma mobile viene in massima parte cancellata dall'onda, d'ampiezza eguale e fase opposta, emessa dalla faccia posteriore: questo avviene a tutte le frequenze le cui lunghezze d'onda sono maggiori delle dimensioni del cono, e che, quindi, sono emesse in tutte le direzioni da entrambe le facce dello stesso (Olson²). La presenza di un pannello o di una scatola aperta (come nel caso degli amplificatori per chitarra elettrica), opera in minima parte da schermo tra le due emissioni, ma in pratica modifica di poco solo la frequenza al di sotto della quale interviene la cancellazione.

Una prima soluzione è stata quella di racchiudere l'emissione posteriore in una cassa chiusa, ripiena o meno d'assorbente. L'equivalente elettroacustico di un volume d'aria chiuso è però quello di un condensatore che si va a porre, in questo caso, in serie all'analogo creato dall'elasticità delle sospensioni del cono. La frequenza di risonanza, determinata dall'insieme di queste due componenti capacitive e dalla componente induttiva dovuta alle masse (solidali) del diaframma e della bobina mobile, si eleva, e si forma un filtro passa-alto con una pendenza di 12 dB per ottava al di sotto della risonanza. Volumi troppo ridotti comportano la perdita dello smorzamento della risonanza, cui si può sopperire con un magnete di dimensioni e peso assai maggiori. La risonanza sarà peraltro situata ad una frequenza troppo elevata, a meno di non appesantire l'equipaggio mobile del cono, il che compromette il rendimento.

Per tutti questi motivi, i diffusori a cassa chiusa, detti “a *sospensione pneumatica*”, sono tipici del solo impiego domestico ove i bassi rendimenti sono accettabili, se ottenuti in cambio di un minore ingombro e di una risposta più estesa verso il basso.

Compare qui per la prima volta un'evidenza d'importanza fondamentale per chi si occupi d'elettroacustica. Esiste una precisa relazione matematica che lega le tre grandezze fisiche fondamentali, cioè il **volume del diffusore**, la sua estensione della **risposta alle basse frequenze** ed il suo **rendimento di conversione**. Un diffusore di piccole dimensioni potrà essere efficiente ma

³⁹ Ken Dibble – *Hearing Loss & Music* – Preprint n.3869; 96^a Convention dell'Audio Engineering Society, 1994

non riprodurrà le basse frequenze, oppure potrà avere un rendimento minimo ma una risposta assai più estesa in basso. Questo vale per tutti i tipi di diffusori, trombe incluse, ma con un equilibrio dei parametri che è diverso a seconda della tipologia del diffusore.

I diffusori *bass-reflex* presentano un sostanziale vantaggio rispetto agli analoghi a cassa chiusa: a parità di volume e rendimento, possono emettere frequenze assai più basse, ma sempre entro i confini stabiliti da una relazione matematica⁴⁰. Il substrato fisico di come questo avvenga è interessante: un diffusore *bass-reflex* differisce da una cassa chiusa soltanto per la presenza di un condotto comunicante con l'esterno, di sezione arbitraria, tipicamente pari ad una frazione della superficie del trasduttore. L'aria contenuta in questo condotto ha una massa determinata⁴¹, ed essa crea, in quanto componente induttiva, una seconda risonanza, interagendo con la componente elastica (capacitiva) del volume d'aria del diffusore.

La presenza di questa seconda risonanza ha come primo effetto quello di annullare l'incremento di risonanza causato dal volume posteriore chiuso. Un altoparlante che risuoni a 40 Hz in aria libera potrà risuonare a 50-60 Hz in una cassa chiusa, ma risuonerà ancora a 40 Hz se la cassa sarà accordata mediante un condotto (detto "reflex").

Una variante di questo tipo di diffusori, nota come "*reflex passivo*", impiega, al posto del condotto, un secondo altoparlante privo della bobina mobile e del magnete, ma con diaframma mobile e sospensioni, vale a dire una massa, che fa risuonare il volume della cassa alla frequenza prescelta.

Le prime formulazioni teoriche di questo tipo di diffusori datano alla metà degli anni '30, ma la teoria più dettagliata compare dapprima sul manuale di Beranek¹, poi in occasione di un intervento di James Novak alla Convention AES del 1958 (New York): in entrambi i casi sono trattazioni di lettura ed applicazione tutt'altro che facili, al punto che gran parte dei progettisti di diffusori *bass-reflex* dell'epoca reitellarono i medesimi errori (aiutati dai parametri tipici degli altoparlanti allora reperibili) e fecero meritare una pessima fama a questo tipo di diffusori (⁴⁴).

Occorrerà aspettare fino al 1961 per avere la più bella e comprensibile enunciazione teorica per questo tipo di diffusori, dovuta a Neville Thiele, e che è stata ripubblicata nel 1971 sulle pagine del *Journal of Audio Engineering Society*⁴², seguita dalle analisi estremamente particolareggiate di Richard Small, sempre sulle pagine del *Journal of AES*, in una serie di articoli del 1972 e 1973. La vera e propria svolta culturale operata da queste pubblicazioni è stata quella di assimilare il progetto di un diffusore *bass-reflex* all'*allineamento* di un filtro passa-alto del IV ordine, la cui teoria era all'epoca ben più nota e familiare agli ingegneri elettronici.

Se infatti si assimila il diffusore ad un filtro, allora le componenti induttive e capacitive possono essere *allineate* secondo rapporti che conducono alla risposta ottimale per estensione e linearità. Queste componenti saranno: la massa del cono, l'elasticità delle sospensioni, il volume del diffusore, la massa d'aria contenuta nel condotto: tutte riportate ai terminali della bobina mobile, immersa in un campo magnetico di entità anch'esso noto. Di questo *allineamento* farà quindi parte anche il controllo operato dall'amplificatore, i cui terminali possono rappresentare quasi un corto circuito per le correnti create dall'altoparlante nelle sovra oscillazioni⁴³.

La lettura delle due parti della pubblicazione di A.N. Thiele⁴² è tra le più interessanti, anche per la chiarezza con cui sono mostrate le interazioni complesse, tra il rendimento di un diffusore *bass-reflex*, il suo volume e l'estensione della sua risposta alle basse frequenze. Thiele e Small hanno rivoluzionato il mondo dell'audio professionale (e domestico) anche in un altro modo: nelle loro pubblicazioni sono utilizzati di continuo un numero di "*parametri*" degli altoparlanti, che da allora tutti i fabbricanti rileveranno e pubblicheranno nei loro cataloghi, consentendo ai progettisti ed agli

⁴⁰ A. Gaidarov – *A problem of efficiency of loudspeakers* – 21^a Convention dell'Audio Engineering Society, 2002.

⁴¹ A questa massa va aggiunta quella, solidale, di due emisfere d'aria situate alle due imboccature del condotto, ed indicativamente pari –per diametro- a poco più di una volta e mezza il diametro del condotto.

⁴² A.N. Thiele – *Loudspeakers in Vented Boxes, part. 1/2* – Journal of AES, Vol.19, n.5/6, May/June 1971

⁴³ Infatti tra le specifiche degli amplificatori compare anche il cosiddetto "fattore di smorzamento".

utilizzatori di valutare assai più precisamente il tipo di utilizzo più consono per ogni altoparlante⁴⁴.

Gli anni '70 sono pienamente meritevoli di segnare una tappa importante nella storia dell'audio, non tanto per l'originalità delle soluzioni proposte e studiate, quanto per la convergenza di una molteplicità di esperienze critiche in ordine alla risoluzione di problematiche sino ad allora fortemente penalizzanti. In questo contesto due contributi hanno costituito il perno di due svolte.

Il primo punto fermo lo ha segnato Roy Allison⁴⁵, spiegando con grande lucidità gli effetti dell'interazione tra diffusori e pareti adiacenti, quale causa di una profonda compromissione della linearità di risposta energetica del diffusore nel determinato ambiente. Prima di lui era diffusa l'ipotesi (erronea) di una sostanziale casualità del fenomeno, per cui ad un'interazione positiva in una determinata direzione doveva corrisponderne una negativa in altra direzione, con una tendenza generale alla cancellazione reciproca degli effetti. Non è così: una volta verificatasi la cancellazione di una banda di frequenze, per interazione di fase negativa con una riflessione dalla parete più vicina, non vi è evidentemente modo di reintrodurre energia a quella frequenza, perlomeno utilizzando lo stesso diffusore. Da questo punto in poi, nella storia dell'audio professionale **e non**, vi sarà chi terrà conto di questo aspetto fondamentale⁴⁶ ed altri che lo dimenticheranno, sia nell'audio domestico che negli impianti per discoteca, con serie conseguenze.

Una di queste interessa il campo del contenimento delle emissioni: nella gran parte delle discoteche al chiuso i diffusori sono infatti appesi assai vicini alle pareti, a volte anche al soffitto ed agli angoli, cioè nelle condizioni bene descritte da Allison⁴⁵. In questi casi sono presenti forti riflessioni in gamma bassa (sia in presenza che in assenza di pubblico), ritardate abbastanza da creare forti cancellazioni in determinate, ma essenziali, bande di frequenze. Per farvi fronte, si interviene con gli equalizzatori, ma se aumenta l'emissione diretta dal diffusore aumenta anche, e nella stessa misura, la riflessione che crea la cancellazione per interazione di fase. E' dunque solo l'incremento del riverbero a colmare la lacuna, ma a quali penalità ?

E' stata innanzitutto sprecata una notevole quota della potenza di ampli e diffusori, semplicemente per creare un gorgo di emissione-cancellazione.

Equalizzando, si è finito per moltiplicare il livello d'emissione di una gamma di frequenze basse abbastanza da eccitare agevolmente le risonanze delle pareti di muratura, inviandole a diffusori per giunta collocati a pochi centimetri dalle stesse pareti.

Il tutto senza che agli ascoltatori (il pubblico in pista) pervenga granché in più.

In due parole: **abbiamo creato la migliore condizione per incrementare al massimo la trasmissione d'energia acustica verso le abitazioni eventualmente adiacenti un locale al chiuso, a parità di livello d'ascolto in pista**⁴⁷.

Il secondo punto fermo nella storia dell'audio professionale lo ha scolpito un intervento di D. B. Keele alla 54^a Convention dell'AES⁴⁸. Che vi fosse una naturale tendenza a preferire i diffusori *bass-reflex* alle trombe, a parità di prestazioni, era già allora comprensibile, e motivato dalla complessità costruttiva delle trombe stesse. Keele suggerì di confrontare un diffusore a tromba convenzionale (con uno o due trasduttori), con un diffusore *reflex* caratterizzato da un'ampia superficie radiante, quella cioè di quattro cono da 38 cm. di diametro, pari quindi a quella della

⁴⁴ L'impiego dei "parametri di Thiele e Small" ha permesso, per esempio, di individuare ed evitare quello che era l'errore tipico dei primi progettisti di diffusori *bass-reflex*, cioè quello di adottare volumi troppo ampi per i diffusori e frequenze di "accordo" troppo alte per il condotto *reflex*: ne derivava una tipologia di diffusori caratterizzata da un forte picco di risposta a frequenze molto basse, seguito da una banda di frequenze in cui il rendimento era inferiore e poi, a frequenze assai più alte, dal normale rendimento del cono. All'ascolto, questo tipo di diffusori sembrava emettere soltanto una frequenza bassa, da cui la pessima fama.

⁴⁵ Roy F. Allison – *The Influence of Room Boundaries on Loudspeakers Power Output* – JAES Vol.22, n.5, June 1974.

⁴⁶ Per esempio negli Studi di registrazione si affermeranno i diffusori monitor "nearfield", collocati lontano dalle pareti e vicino all'ascoltatore. Negli stessi Studi i grandi monitor verranno incassati in apposite nicchie nelle pareti.

⁴⁷ Questa potrebbe sembrare un'occorrenza sporadica: probabilmente essa è invece la vera e propria regola, nel campo.

⁴⁸ D.B. Keele – *An efficiency constant comparison between low-frequency horn and direct-radiators* – Preprint n.1127; 54^a Convention dell'Audio Engineering Society, 4-7 May 1976.

tipica bocca di una tromba per bassi dell'epoca. Era sottintesa, nel confronto, la differenza tra avvitare quattro altoparlanti su una cassa con 5-6 fori e, invece, realizzare una tromba esponenziale, in legno, incurvata e, soprattutto, rigida quanto necessario.

Quella pubblicazione ha costituito in concreto una pietra tombale sull'impiego professionale di diffusori a tromba per l'emissione di basse frequenze. Poco varranno, da allora, i numerosi studi che esamineranno il problema della non-linearità dinamica dei poco efficienti diffusori *reflex*, operati a potenze così elevate da causare un riscaldamento delle bobine mobili degli altoparlanti fino a temperature alle quali la stessa resistenza in continua dei conduttori raddoppia di valore (e con essa le perdite per dissipazione, a parità di corrente)⁴⁹.

Pochi hanno notato che quel particolare confronto avveniva tra un diffusore *reflex* con quattro coni efficientissimi⁵⁰ ed una tromba dal progetto tutt'altro che ottimale, specie per la scelta della superficie di gola. Nella realtà di quegli anni, ma ancor più oggi, i woofers⁵¹ destinati ai diffusori *reflex* avevano parametri ben differenti, soprattutto masse mobili almeno doppie, ma anche 3-4 volte superiori. Un diffusore a tromba ben progettato avrebbe consentito di impiegare coni di minore diametro, rigidissimi, con rendimenti compresi tra il 25 ed oltre il 40 %, e con superfici di bocca tutt'altro che ampie, nella considerazione che, comunque, ne sarebbero state impiegate almeno 4-6 unità affiancate. Le implicazioni a livello d'inquinamento acustico sono cospicue.

Un esempio spiega: nel dimensionare un grande impianto, da concerto, o quello di una grande discoteca, è possibile seguire due percorsi che convergono nel risultato. Si possono adottare diffusori efficientissimi, a tromba, con potenze di amplificazione più ridotte, oppure diffusori meno efficienti (p.es. *bass-reflex*), con amplificatori in proporzione più potenti. Ad inizio serata, cioè con i trasduttori a temperatura ambiente, i livelli di Picco Lineare dei due impianti saranno esattamente identici. A fine serata, con le bobine mobili dei trasduttori meno efficienti che avranno raggiunto e superato 200-250° C, il rendimento di conversione dell'impianto *bass-reflex* si sarà dimezzato. Quale sarà il livello operativo massimo certificato dal *tecnico competente* ?

Le nuove configurazioni

I diffusori *bass-reflex*, benché prevalenti sul mercato, non rappresentano affatto l'unica alternativa ai diffusori a tromba. Esistono nuove configurazioni di grande interesse.

Una di esse è quella dei diffusori a condotto risonante, proposta dapprima per realizzazioni domestiche di minima efficienza ma con grande estensione della risposta alle basse frequenze⁵².

Limitando al minimo la quantità di assorbente nei condotti, o abolendolo del tutto, è possibile ottenere diffusori poco meno efficienti di una tromba, ma caratterizzati da risposte in frequenza quanto mai ristrette (nella zona lineare) e decisamente tormentate (alle altre frequenze). Si tratta di oggetti d'impiego evidentemente specialistico, con un alto numero di “*caveat*” ma altrettante premesse per interessantissimi risultati, specie nella riduzione del peso di grandi impianti sospesi.

Una configurazione d'enorme successo commerciale è invece quella dei sistemi detti (in Italia) “*a carico simmetrico*”, e meglio definibili come “*band-pass*” per via della loro risposta limitata sia verso le basse che verso le alte frequenze, ma molto efficiente in un ristretto intervallo⁵³.

Questo tipo di diffusori è assai facile a descriversi, assai meno da progettare. In pratica si tratta di diffusori con due o più cavità, in cui i trasduttori sono collocati in un setto che divide due di esse e nei quali l'emissione di energia acustica verso l'esterno avviene soltanto attraverso condotti risonanti, accordati con il volume delle cavità. Si può trattare di sistemi semplici, detti di “IV ordine” in cui la cavità posteriore all'altoparlante è chiusa, mentre l'anteriore comunica all'esterno

⁴⁹ R.H. Small – *Loudspeakers large-signal limitations* – Preprint n.2102; Convention AES Australia 25/27 Sept. 1984.

⁵⁰ Gli EVM-15L erano i woofer con l'equipaggio mobile più leggero esistente, per quel diametro e quella potenza.

⁵¹ Si denominano “woofers” gli altoparlanti a cono progettati per operare alle basse frequenze.

⁵² Le denominazioni commerciali sono tra le più varie: “transmission lines”, “damped pipes”, “quarter wave”, ecc.

⁵³ E. Geddes – *Introduction to Band-Pass Loudspeaker Systems* – Journal of Audio Eng. Soc., Vol.37, n.5, May 1989.

mediante un condotto risonante⁵⁴; oppure potranno comunicare con l'esterno entrambe le cavità (sistemi di VI ordine). Potranno ancora essere presenti cavità intermedie, anch'esse variamente accordate e comunicanti mediante condotti risonanti.

La fantasia dei progettisti è ben supportata dalle possibilità di simulare al computer, con grande precisione, anche configurazioni tutt'altro che semplici⁵⁵.

I sistemi "band-pass" sono ancora poco diffusi, nonostante la loro teoria di progetto sia ben nota. Questi sistemi hanno dimostrato di consentire in prospettiva, rendimenti assai elevati anche a frequenze relativamente basse, con ingombri accettabili. Essi tendono ad interagire tra loro in modo particolare⁵⁶ e sono fortemente soggetti ai problemi di nonlinearità dell'aria agli elevati livelli di pressione sonora.

I trasduttori

Le più disparate configurazioni di diffusori adempiono tutte, in realtà, alla semplice funzione di adattare, nel modo più efficiente, i parametri elettromeccanici dei trasduttori che vi sono installati ai parametri specifici di propagazione nell'aria per la gamma delle frequenze da riprodurre. Questo modo di descriverne forma e funzione evidenzia, in pratica, implicazioni assai interessanti.

Si è accennato alle trombe ed alla loro funzione di trasformatori di impedenza acustica. Ebbene esistono trasduttori la cui naturale impedenza "meccanica" è assai più vicina a quella dell'aria, per cui non necessitano affatto di alcuna trasformazione per poter erogare il massimo di energia sul carico costituito appunto dall'aria. Si tratta dei diffusori elettrostatici, i cui diaframmi sono leggerissimi al punto di competere col peso di quella massa d'aria solidale che è inevitabilmente posta in movimento insieme.

I trasduttori **elettrostatici** operano in modo radicalmente differente rispetto ai tradizionali altoparlanti magnetodinamici. In essi le forze operanti sono quelle di attrazione e repulsione elettrostatica che si creano nel caso di diaframmi polarizzati a tensioni decisamente alte (800-3000 Volt) e situati tra armature (simmetriche o no), cui è applicata la tensione di segnale, elevata quasi sempre mediante un trasformatore. Il rendimento di questi trasduttori potrebbe essere eccellente, se solo si potesse operare con polarizzazioni veramente elevate: questo purtroppo è impedito dalla tendenza al crearsi di scariche, tanto più da temere per il caso d'impieghi non domestici. Ma il problema maggiore che questo tipo di trasduttori presenta è quello di costituire, dal punto di vista dall'amplificatore, un carico praticamente capacitivo puro, un carico cioè la cui impedenza diminuisce progressivamente e linearmente all'aumentare della frequenza. Questo è senz'altro il peggior tipo di carico per qualsiasi tipo di amplificatore, perché richiede un'elevatissima tensione di alimentazione per poter erogare potenza alle basse frequenze, insieme ad un'elevata capacità di emettere correnti in uscita alle più alte frequenze, esattamente l'opposto di quanto tipicamente possibile con i comuni semiconduttori. Queste ed altre difficoltà, tra cui una sostanziale fragilità, hanno relegato i trasduttori elettrostatici al solo impiego domestico, ove le loro ampie superfici si fanno assai apprezzare per il rapporto assai più favorevole con l'acustica dell'ambiente.

Diaframmi assai estesi caratterizzano anche i trasduttori **isodinamici**, ove la forza motrice è il tradizionale prodotto dell'interazione tra il campo creato da una corrente che scorre in un conduttore e quello di un numero di magneti permanenti, ma in questo caso il conduttore non è avvolto su una bobina, ma disteso sul diaframma mobile, in forma di spire piatte e di grande estensione. I magneti, piccoli ma numerosi, sono disposti su un telaio a minima distanza. Di questo tipo di trasduttori ne esistono di grandi dimensioni, per impiego domestico, oppure di più compatti, questa volta di impiego anche professionale, per la riproduzione delle sole alte frequenze⁵⁷.

Sia per i trasduttori elettrostatici che per gli isodinamici è avvertibile una sostanziale divergenza tra

⁵⁴ A. Dobrucki – *The Influence of Losses on the Frequency Response of the Band-Pass loudspeaker Systems* – 21^a Convention dell'Audio Engineering Society, 1-3 June 2002, St. Petersburg, Russia.

⁵⁵ Vedi l'esempio nella **Linea Guida n.12**.

⁵⁶ Vedi alla **Linea Guida n.12**.

⁵⁷ Sono denominati anche "ribbon loudspeakers".

l'asserita presenza di un numero di aspetti tecnici e progettuali favorevoli ed una diffusione di converso non più che episodica sul vasto mercato dell'audio, specie in ambito professionale. In realtà, molte delle reali problematiche di impiego di questi trasduttori sono spesso sottaciute. Entrambi, per esempio, postulano, tra i maggiori vantaggi, quello di un pilotaggio uniforme anche per ampie superfici radianti: in pratica, ad una forza teoricamente costante, non fa affatto seguito un'altrettanto omogenea impedenza meccanica ed acustica sul diaframma mobile, il che azzera di nuovo la situazione a favore dei trasduttori convenzionali⁵⁸.

Per "trasduttori convenzionali" intenderemo gli altoparlanti a cono, impiegati per riprodurre frequenze basse e medie, ed i "drivers a compressione", che invece riproducono le alte frequenze. Una tecnologia sviluppata ed affinata in decine di anni, ha condotto ad una grande omogeneità tra le realizzazioni commerciali disponibili.

Per la gamma delle frequenze più basse, il trasduttore tipico è un cono di diametro compreso tra 18" e 15" (cioè tra 46 e 38 cm.), con una bobina mobile di 100 mm. di diametro ed una massa mobile compresa tra i 70 ed i 200 grammi. I magneti sono quelli di maggiore potenza disponibile, fino a 22 cm. di diametro se del tipo in ferrite (tradizionale), oppure assai più piccoli ma non meno potenti se realizzati con i materiali più moderni, come il Neodimio-Ferro-Boro. In diffusori *reflex*, questi altoparlanti richiedono volumi compresi tra 70-80 e 300 litri, accordati a frequenze tipicamente comprese tra 35 e 55/60 Hz. Con i sistemi *band-pass* sono possibili ingombri più contenuti, a parità di prestazioni alle più basse frequenze, ma i sistemi *band-pass* non sono adatti all'impiego in gamma medio-bassa. Ad oggi, le potenze sopportate da questo tipo di trasduttori superano agevolmente il migliaio di Watt.

Nel caso di diffusori progettati per l'impiego come monitor da palco o per piccole discoteche al chiuso, è frequente l'impiego di coni di diametro minore, p.es. da 12" e 10" (cioè 30 e 25 cm.) di diametro, con bobine mobili da 76 a 51 mm. di diametro e potenze sopportate comprese tra i 300 ed i 700 Watt. Questi woofers possono operare in volumi ridotti, anche poche decine di litri.

Quando si confrontano le prestazioni di woofers di diverso diametro, posti in diffusori *reflex* o *band-pass*, non bisogna sottovalutare che, a parità di potenza acustica emessa, il cono di minore diametro dovrà compiere escursioni assai più ampie, spesso incompatibili con un comportamento lineare delle sospensioni: in proposito sono fondamentali le trattazioni di A.N. Thiele⁴² e D.B. Keele⁴⁸. Diverso il caso dei sistemi a tromba: qui non vi è alcuna differenza tra l'impiego di un grande cono da 18" in una tromba più corta ed un cono da 10" in una tromba ben progettata, cioè più lunga e con una superficie di gola ridotta⁵⁹.

Per la gamma delle frequenze medie è di regola, in ambito professionale, impiegare trasduttori di diametro sostanzialmente minore, con sospensioni più rigide e coni in materiale più leggero; essi sono denominati *midrange* ed hanno diametri compresi tra i 12" ed i 6,5" (da 30 a 16 cm.). Le bobine mobili, tipicamente avvolte con filo d'alluminio e non di rame, hanno diametri e pesi minori, per cui le potenze sopportate vanno dai 130 ai 350 Watt. Questo è raramente un problema, perchè alle frequenze medie è agevole ottenere rendimenti superiori a 99-100 dB/1W/1m. anche per coni a radiazione diretta; impiegando trombe anche di dimensioni assai contenute è normale ottenere rendimenti anche dieci volte superiori.

I *drivers a compressione* sono componenti specialistici, adatti solo per emettere le alte frequenze. Una volta erano presenti sul mercato con due tipi di imboccatura, da 2" e da 1" (5 e 2,5 cm.), di cui la prima diffusa nei grandi impianti e nei cinema, la seconda negli impianti per discoteca. Oggi la situazione è diversa: uno studio sulle modalità atte a ridurre la distorsione creata dalla non linearità dell'aria agli altissimi livelli di pressione sonora che si verificano nelle gole delle trombe, ha infatti

⁵⁸ I diffusori isodinamici presentano anche il problema della tenuta termica degli adesivi che fissano i conduttori ai diaframmi mobili: un problema assai serio, nella prospettiva di un impiego professionale.

⁵⁹ Anzi, poiché una maggiore lunghezza del condotto sposta più in basso la frequenza alla quale la tromba inizia ad operare, è anche probabile che la versione dello stesso diffusore con il cono di minore diametro, se ben progettata, dimostri prestazioni anche decisamente superiori...

condotto i più grandi costruttori di questo tipo di trasduttori a preferire una nuova geometria, per i trasduttori di maggiore potenza: l'imboccatura della tromba è passata da 2" a 1" e ½ ed il condotto interno al driver è stato ridotto al massimo in profondità, come tutto il trasduttore⁶⁰. I *drivers* da 1" restano il cavallo di battaglia per l'impiego in discoteca: anche per questi il livello di prestazioni è oggi assai diverso e migliore rispetto al passato, sia per la minore distorsione che, soprattutto, per l'estensione della risposta sino ai limiti dell'udibilità.

Anche per i *drivers*, i nuovi materiali magnetici (Neodimio-Ferro-Boro) sostituiscono le tradizionali ferriti, diminuendo gli ingombri e la distorsione.

Le trombe commercialmente disponibili sono solo quelle per le alte frequenze: sono reperibili per angoli di copertura standard, p.es. 90° × 40° e 60° × 40°, per frequenze superiori a 500 Hz per i *drivers* da 1,5" e per frequenze superiori a 1600-2000 Hz per i *drivers* da 1".

Le trombe per frequenze inferiori sono solitamente parte del progetto di un diffusore specifico, cioè non sono commercialmente disponibili come elementi singoli, salvo rare eccezioni.

La direttività di emissione

Questo è il capitolo più importante, per quanti si occupano di contenimento delle emissioni: per questo verrà proposto con un diverso approccio, comune a quello di gran parte delle **Linee Guida**.

Per ogni aspetto dell'elettroacustica, come per ogni disciplina tecnica, esiste una teoria di base formulata spesso con grande sofisticazione matematica, ma con corrispondente difficoltà, sia di accesso che di successivo impiego sul campo. E' pur vero che per le nuove capacità di calcolo oggi a portata di mano rendono questo problema apparentemente secondario, ma il caso già preso in esame dei programmi di simulazione al computer dell'acustica ambientale deve essere d'esempio circa la possibilità di incorrere in esemplificazioni eccessive, quando le assunzioni teoriche non sono verificate, una dopo l'altra, nella loro immediata applicazione pratica, e quindi nei loro limiti.

Il campo specifico dello studio e della previsione della direttività di emissione delle sorgenti elettroacustiche impiegate nell'audio professionale è proprio tra quelli più esposti al rischio delle eccessive esemplificazioni, cioè alla modellazione condotta applicando formule corrette ma ad un tipo di configurazione di diffusore per cui sono violate una o più condizioni limite di validità.

Un approccio diverso, che sarà quello che seguiremo, può essere quello di avanzare in sequenza attraverso le regole fisiche di base che sottendono la direttività dei trasduttori e dei diffusori, suggerendo, ad ogni tappa, la possibilità di verifica sperimentale diretta, soprattutto per poter verificare l'esistenza ed il peso delle condizioni-limite di validità di ogni assunto o formula.

Quest'approccio risulta particolarmente interessante nel caso dei *tecnici competenti* che siano interessati ad approfondire le problematiche specifiche del contenimento delle emissioni: essi possono facilmente avvalersi della strumentazione di misura normalmente familiare alla loro categoria professionale, proprio per gli scopi di verifica di ogni nuova acquisizione in materia.

Una prima regola.

La prima osservazione che si trae sin dalla lettura sommaria dei capitoli relativi alla direttività dei manuali più noti (Beranek¹ ed Olson², per esempio), oppure semplicemente scorrendo un catalogo di trombe (per alte frequenze) è che **la forma di un diffusore può condizionarne la direttività di emissione, ma solo a frequenze superiori a quelle la cui lunghezza d'onda è paragonabile con le dimensioni fisiche del diffusore stesso.**

Per esempio il pannello frontale di una normale cassa chiusa o reflex opera un normale restringimento dell'angolo d'emissione anche dell'altoparlante più diffusivo, da sferico ad emisferico, ma solo a frequenze la cui lunghezza d'onda sia inferiore alla dimensione minore del

⁶⁰ Questa nuova generazione di *drivers a compressione* ha mediamente un decimo della distorsione tipica degli esemplari della generazione precedente: naturalmente questi risultati si ottengono impiegando trombe appositamente disegnate per questi trasduttori, anch'esse di lunghezza contenuta all'indispensabile.

pannello⁶¹. La verifica è delle più semplici: basta prendere un piccolo diffusore domestico e rilevarne la risposta in aria libera, lontano da pareti; quindi lo si va a porre al centro di un pannello di dimensioni sostanzialmente superiori a quelle del frontale del diffusore (che proprio per questo abbiamo scelto piccolo, in partenza) e si rileva la nuova curva di risposta. Avendo avuto l'accortezza di porre il microfono di misura abbastanza vicino da non risentire delle prime riflessioni da oggetti o pareti vicine, si noterà il dislivello di tre deciBel nella risposta alla gamma di frequenze in cui le dimensioni del nuovo e più grande pannello intervengono a rendere emisferica l'emissione.

Naturalmente non vi sarà alcun incremento alle frequenze più basse, le cui lunghezze d'onda saranno comunque superiori alle dimensioni anche del nuovo pannello, e nemmeno vi sarà alcun incremento al di sopra di una certa frequenza, quella alla quale già il pannello frontale originario del nostro diffusore di prova risultava sufficiente.

Compresa bene questa regola, è utile trasporla immediatamente a livello della pratica corrente nel campo dei diffusori professionali. In sintesi, qualsiasi diffusore è perfettamente omnidirezionale a frequenze inferiori a quella la cui lunghezza d'onda è pari alla dimensione minima del pannello frontale⁶² e diffonde emisfericamente per frequenze di poco superiori, fino a che non intervengano ulteriori meccanismi di contenimento dell'angolo d'irradiazione.

Scorrendo con attenzione le specifiche pubblicate dalle maggiori case costruttrici di diffusori professionali, non sarà difficile reperire i grafici che mostrano l'andamento dell'angolo di copertura del singolo modello di diffusore in funzione della frequenza, sia sul piano orizzontale che verticale: ebbene, al di sotto di 250-300 Hz. questi grafici sono di regola una coppia di linee orizzontali, coincidenti sul valore di 360 gradi. L'uniformità di questo dato si accompagna bene all'omogeneità delle dimensioni dei pannelli frontali dei diffusori di categoria simile.

Se si colloca un qualsiasi diffusore al centro (o quasi) di un pannello (o di una parete) di sostanziale superficie, l'incremento di rendimento che si registra è causato, in gran parte, proprio dal restringimento dell'angolo di irradiazione da 360° a 180°. Un ulteriore contributo che incrementa il rendimento, in questi casi, è fornito anche dall'aumento dell'impedenza di radiazione operato dalla presenza del pannello. Esso è tanto più cospicuo quanto meno efficiente era in partenza il trasduttore, cioè quanto più piccolo è il suo diaframma mobile in rapporto alle lunghezze d'onda emesse⁶³. In pratica questo tipo di incremento di direttività di emissione si verifica assai di rado per l'impiego di appositi pannelli⁶⁴: più spesso sono le pareti di uno Studio o di una discoteca a restringere l'angolo di irradiazione di un diffusore (posizionato a filo parete o a ridosso della stessa) alle basse frequenze, incrementandone il rendimento⁶⁵.

Negli impianti che operano all'esterno si preferisce affiancare più diffusori identici, i cui meccanismi di interazione sono tuttavia assai più complessi e problematici: l'argomento è trattato ampiamente nella **Linea Guida n.12**. In sintesi si può qui affermare che l'ipotesi iniziale della identità tra le emissioni delle diverse sorgenti è tutt'altro che verificata, nella realtà fisica.

Fattori complessi, quali la diversa impedenza di radiazione vista dagli altoparlanti centrali, rispetto a quelli situati ai bordi del gruppo, oppure la presenza di aree inattive sui pannelli frontali, oppure gli effetti della diffrazione dai bordi, contribuiscono tutti ad allontanare di molto il comportamento di un *array* di decine di altoparlanti da quello previsto in teoria, come pure da quello simulato al computer. Esiste poi una naturale dispersione dei parametri dei trasduttori, per esempio l'elasticità

⁶¹ vedi Roy Allison, citato alla nota n.45.

⁶² Esistono rarissime eccezioni, motivate dall'interazione con altre sorgenti simili ma con diversa fase di emissione: l'argomento verrà approfondito di seguito.

⁶³ Esiste infatti un limite fisico, discusso in dettaglio da D.B. Keele, vedi alla nota n.37.

⁶⁴ Detti "baffle", una volta tuttavia impiegati assai spesso nei cinema, con ottimi risultati e minimi costi.

⁶⁵ Ma occorre fare anche attenzione alla frequente occorrenza di cancellazioni per interferenza di fase, quando esiste una distanza tra il trasduttore e la parete (per esempio lo spessore del diffusore). Vedi R.Allison alla nota 45.

delle sospensioni è influenzata dalla temperatura e dall'invecchiamento. Ma due woofers con la stessa massa mobile e due diversi valori d'elasticità delle sospensioni risuoneranno a frequenze diverse: intorno a queste frequenze, la loro risposta in fase sarà differente di decine di gradi e la loro interazione potrà creare lobi di irradiazione rivolti in direzioni imprevedibili.

Una verifica vale più di ogni ulteriore commento: se si osserva all'oscilloscopio la fase **della corrente** che scorre in due diversi diffusori, dello stesso modello ma non nuovissimi, alle frequenze più basse emesse (cioè vicino alla risonanza), si noteranno facilmente differenze di fase macroscopiche. Ebbene la forza impressa all'equipaggio mobile di un trasduttore è **direttamente proporzionale alla corrente** che scorre nella bobina mobile, **non alla tensione** applicata ai capi...

Un concetto da ricordare

Secondo la teoria acustica si può incrementare il rendimento, in asse, di una sorgente sonora, restringendone l'angolo di irradiazione in due modi, in teoria, equivalenti: si può confinare l'emissione entro un angolo solido minore, mediante l'impiego di pannelli **di dimensioni superiori a quelle della lunghezza d'onda massima da emettere**, oppure si possono affiancare più sorgenti, sino a formare una superficie di emissione di dimensioni egualmente cospicue.

Ebbene la prima delle due soluzioni è applicabile con successo, anche nel caso si voglia restringere l'angolo d'irradiazione ben al di sotto di 180°: una verifica confermerà questo, facilmente⁶⁶.

La seconda soluzione è invece di esito assai incerto, nella misura in cui le normali tolleranze costruttive ed operative dei trasduttori sono talmente ampie da pregiudicare quasi certamente il risultato. Anche in questo caso una verifica fugherà ogni dubbio.

La direttività delle trombe

Una tromba di dimensioni superiori a quelle delle lunghezze d'onda emesse è il caso più comune di contenimento geometrico dell'angolo di irradiazione: non è un caso che il tipo di espansione preferito per le trombe che emettono le alte frequenze sia quello conico, cioè quello che è caratterizzato da una geometria che "contiene" l'irradiazione entro un angolo costante e determinato.

Agli albori dell'audio professionale era più comune l'impiego di trombe esponenziali o iperboliche, i cui profili si espandono in progressione assai più accentuata in prossimità della bocca della tromba, che non nel tratto iniziale. La conseguenza pratica era quella di ritrovarsi con una dispersione fortemente disomogenea, al variare della frequenza. Una tromba esponenziale (o iperbolica) deve avere una superficie di bocca abbastanza ampia da trasferire senza discontinuità all'aria anche le più basse frequenze che il coefficiente di accrescimento scelto lascia passare: questo avviene quando l'impedenza di radiazione alla bocca della tromba è vicina a quella di propagazione nell'aria. In caso contrario, come sempre accade quando l'energia acustica viene trasmessa tra due "mezzi" di assai diversa impedenza specifica, si creerà una forte riflessione, che tornerà indietro nella tromba, interagendo con la successiva emissione⁶⁷.

La superficie di bocca minima in grado di contenere l'energia dell'onda riflessa è, tipicamente, dello stesso ordine di dimensioni cui corrisponde un minimo di efficacia anche nel contenimento dell'angolo di irradiazione⁶⁸. Alle più basse frequenze emesse la nostra tromba sarà quindi poco meno che omnidirezionale. Una tromba efficiente avrà, *tipicamente*, un elevato "fattore di compressione" alla gola, cioè, in pratica, una gola di ridotta superficie. Questo, unito alla necessità di un accrescimento graduale, che rispetti la funzione esponenziale o iperbolica prescelta ed il taglio di frequenza inferiore già adottato, condurrà ad un condotto piuttosto lungo e soprattutto con un tratto iniziale di accrescimento assai lento, quasi cilindrico.

⁶⁶ Esiste anche qui una condizione-limite ben nota, per cui le dimensioni dei pannelli dovranno crescere in funzione del progressivo restringimento dell'angolo di irradiazione: la formula verrà riportata più avanti.

⁶⁷ L'interazione è resa problematica soprattutto dal notevole ritardo nel percorso.

⁶⁸ E' assai raro reperire trombe esponenziali o iperboliche in cui si sia scelta una superficie di bocca sostanzialmente maggiore di questo minimo appena indicato: la penalità sarebbe un semplice incremento dell'ingombro (e nel costo), senza contropartite favorevoli nelle prestazioni.

Alle frequenze più alte questo tratto iniziale avrà dimensioni sostanzialmente superiori a quelle delle lunghezze d'onda emesse: dunque esso sarà efficace nel "restringere" l'angolo di irradiazione, appunto delle alte frequenze, ad un cono ristrettissimo. Quindi la nostra tromba esponenziale partirà da un'irradiazione pressoché omnidirezionale, alle basse frequenze, per arrivare, a frequenze più alte, ad appena pochi gradi di copertura: una pessima prestazione, se lo scopo è quello di sonorizzare un pubblico disposto su un angolo più vasto.

La risoluzione di questo tipo di problemi ci appare oggi quasi banale⁶⁹, ma per il periodo che va dagli anni '30 alla metà degli anni '70 le soluzioni proposte sono state tutt'altro che semplici.

La prima soluzione proposta è stata quella di impiegare una "*lente acustica*", per trasformare il fronte sonoro quasi piano, emesso alle più alte frequenze, in un'onda sferica della necessaria curvatura: la teoria è stata confermata dalle buone prestazioni di molte realizzazioni.

Una seconda soluzione è stata quella di espandere il condotto della tromba su un solo piano (p.es. quello verticale), tenendo le pareti laterali diritte ed angolate come necessario: ne nacque una stirpe di trombe dette "radiali", che per molti restano ad oggi il massimo, in termini qualitativi.

Una terza soluzione, assai sofisticata, è stata quella di suddividere una tromba esponenziale in un numero di condotti affiancati a grappolo, da cui il nome di "trombe multicellulari", tutti convergenti in un'unica gola. Una soluzione costosa e non priva di difetti, ma alla quale si guarda ancor oggi con grande rispetto.

Le trombe a direttività costante

Una delle maggiori "rivoluzioni" avvenute nel campo dell'audio professionale data al 1975, quando D.B. Keele rende improvvisamente obsolete le trombe esponenziali, radiali, multicellulari e con lente acustica, introducendo l'impiego di sezioni coniche terminali, specificamente destinate a governare la dispersione nella gamma delle alte frequenze. D'impatto ancora maggiore saranno le trombe "*Manta-Ray*" di C. Henricksen e M. Ureda⁷⁰, in cui tutti i segmenti sono ad espansione conica. Ecco improvvisamente possibile, una soluzione (semplice) al problema di ottenere una dispersione costante delle alte frequenze entro angoli orizzontali e verticali ben determinati.

L'osservazione di partenza, di D.B. Keele, è che ogni tromba perde il controllo della direttività quando la lunghezza d'onda emessa eccede un valore facilmente calcolabile, che è funzione contemporaneamente della dimensione della bocca della tromba e del suo angolo di apertura (se conica). A parità di lunghezza d'onda emessa, sarà necessaria una tromba più grande se l'angolo entro cui contenere l'irradiazione dovrà essere più ristretto. Di per sé nulla di inatteso, specialmente se si conosce la teoria degli analoghi elettromagnetici, cioè delle antenne.

L'elemento innovativo delle trombe "*Manta-Ray*" è quello di introdurre l'impiego di elementi conici in sequenza, ove i segmenti iniziali della tromba si espandono su un piano soltanto, mantenendo sull'altro piano una dimensione inferiore a quella della minore lunghezza d'onda da emettere. Al punto in cui il primo segmento si raccorda con il secondo, che si espanderà sul piano ortogonale, si creerà una nuova "gola", diffrattiva, in pratica l'apice dell'angolo di copertura scelto per il secondo piano. Una soluzione geniale quanto pericolosa, in quanto una brusca discontinuità nel bel mezzo dell'espansione di una tromba è esattamente il modo migliore per creare una riflessione di energia all'indietro, con tutte le prevedibili implicazioni sulla linearità di risposta e sul rendimento. Correttamente progettate, le trombe "*Manta-Ray*" e le loro discendenti, denominate genericamente "*trombe a direttività costante*", rappresentano tuttavia una soluzione d'avanguardia al problema del controllo della direttività di emissione, con alcuni limiti ed alcuni *caveat*.

Le *trombe a direttività costante* sono basate, fondamentalmente, su un tipo di espansione conica, sebbene segmentata: a parità di frequenza di taglio inferiore esse sono sempre sostanzialmente più ingombranti delle loro omologhe esponenziali o iperboliche. Così erano senz'altro le prime

⁶⁹ Occorre impiegare trombe coniche, eventualmente con segmenti a diverso angolo, come verrà approfondito di seguito.

⁷⁰ C.A. Henricksen e M. Ureda – *The Manta-Ray Horns* - Journal of Audio Engineering Society, Vol.26, n.9, Sept. 78.

realizzazioni comparse sul mercato e che, per lungo tempo rimasero d'impiego piuttosto settoriale e specialistico⁷¹. Negli anni '80/'90 ne sono state proposte versioni assai più compatte, al punto di poter essere impiegate nei monitor da palco e nei diffusori destinati alle piccole discoteche ed ai pub: ma le leggi fisiche nel frattempo non sono mutate, e queste nuove trombe hanno lasciato indietro molte delle caratteristiche iniziali, al punto di essere definibili "*a direttività costante*" solo con molta benevolenza ed immaginazione. Il loro maggior problema è nella dispersione troppo ampia, che è conseguenza diretta della riduzione delle dimensioni della bocca.

Dalla fine degli anni '80 si va affermando alla ribalta un nuovo tipo di trombe, con profilo oblato o prolato sferoidale, ma che nel tratto terminale, esterno, sono praticamente coniche.

I difetti maggiori di queste nuove generazioni di diffusori sono tre: il primo è senz'altro il forte degrado delle prestazioni al diminuire delle dimensioni⁷².

Il secondo problema è nell'impiego, ma è ancora connesso con l'ingombro: per spiegarlo occorre premettere che il caso in cui tutto il pubblico sia sonorizzato mediante una sola tromba (per canale) è l'eccezione e non la regola. In tutti gli altri casi sono possibili due alternative:

▶ Si possono utilizzare più trasduttori e più trombe, con angoli di irradiazione così ristretti da poter sonorizzare con ciascuna un settore differente di pubblico; va comunque prevista un'inevitabile sovrapposizione tra le aree di copertura.

▶ Si possono affiancare più trombe ad ampia dispersione, ciascuna in grado di sonorizzare l'intera area occupata dal pubblico, avendo però l'accortezza di suddividere lo spettro delle alte frequenze in più bande, in numero corrispondente a quello delle trombe.

Esiste, naturalmente, la possibilità di combinare queste due soluzioni, impiegando trombe a dispersione ampia, ma non tale da coprire interamente l'area del pubblico, con più bande.

In tutti i casi esisteranno delle sovrapposizioni, sia nelle aree di copertura, sia alle frequenze d'incrocio tra una via e l'altra: nell'epoca in cui non si disponeva degli attuali filtri digitali ad alta pendenza, la soluzione corretta era solo la prima (impiegata per l'impianto dei Pink Floyd, per il primo tour di "The Wall"). Ma se le trombe sono ingombranti, rispetto alle lunghezze d'onda emesse, allora la distanza minima tra loro sarà inevitabilmente superiore a quella ottimale.

Il secondo problema consiste appunto negli effetti d'interazione di fase nelle aree (o per le bande) di sovrapposizione, con picchi e cancellazioni, a volte anche lobi di irradiazione spuri.

Il terzo è un problema che ha meritato sino ad oggi ben poco spazio sulla stampa tecnica, ma è evidentemente sofferto, al punto che si è evoluta la configurazione dei sistemi "*Line Array*"⁷³. Tutte le trombe "*a direttività costante*" emettono entro angoli di dispersione orizzontali e verticali, l'energia immessa nelle loro gole dai *drivers a compressione*. Ebbene, per quanto la moderna tecnologia dei materiali abbia consentito di realizzare, le bobine mobili e i diaframmi dei drivers (questi ultimi in Titanio, Berillio, Mylar), restano ancora troppo pesanti per poter emettere efficientemente le più alte frequenze udibili, che sono tuttavia i soli a riprodurre. Quindi la risposta in frequenza "naturale" di questi drivers è sempre calante sulle alte frequenze, tipicamente al di sopra di 3/4000 Hz., con un'attenuazione di anche 20 dB a 15-18 KHz.

Le trombe a direttività costante trasferiscono fedelmente questo andamento della risposta all'ambiente ed al pubblico, ragion per cui si ricorre, regolarmente, a pesanti ed inevitabili interventi di equalizzazione. Ma equalizzare una risposta a questo livello della catena audio equivale ad utilizzare una potenza elettrica assai maggiore solo per far fronte all'inefficienza dei trasduttori. Questo tipo di equalizzazione produce inevitabili ricadute all'ascolto. A basso livello, la risposta può anche essere lineare, ma è sufficiente un minimo di saturazione nell'amplificatore per

⁷¹ Sono le trombe più impiegate negli impianti audio dei cinema.

⁷² Una tromba conica deve essere assai più lunga ed ampia di una tromba esponenziale, per presentare al trasduttore la stessa impedenza di carico. Una tromba conica di dimensioni insufficienti comporterà minore efficienza e maggiori escursioni, per cui maggiore distorsione. Questi aspetti è difficile individuarli, alle misure convenzionali.

⁷³ vedi, in dettaglio, alla **Linea Guida n.12**.

riportare all'ascolto la risposta naturale del driver. Proprio la presenza di una forte equalizzazione è, peraltro, la condizione che meglio provoca l'insorgere della saturazione degli amplificatori.

Quindi abbiamo ottenuto un sistema che, in sovraccarico, suona più povero di alte frequenze che non quando opera in regime lineare, il che è esattamente l'opposto di come si comportano praticamente tutti gli strumenti musicali⁷⁴, voce inclusa. Nulla di strano che questo tipo di saturazione sia percepito come innaturale ed assai artificioso.

Per la cronaca, le vecchie trombe radiali (e molte delle multicellulari) erano immuni da questo problema, in quanto il restringimento del loro angolo di irradiazione al crescere della frequenza compensava quasi perfettamente la perdita di rendimento dei *drivers a compressione* alle alte frequenze e quindi non era necessaria alcuna equalizzazione; la saturazione dell'insieme ampli-diffusore comportava il normale incremento di armoniche elevate, tipico (quanto imitativo, in dosi ragionevoli) del comportamento degli strumenti musicali. Il restringimento dell'angolo di irradiazione verticale è un difetto assai benigno, specie se si considera che la maggior parte delle collocazioni tipiche del pubblico comporta necessità di angoli verticali di copertura assai ristretti⁷⁵.

Ma come si comportano le trombe *a direttività costante* rispetto alle esigenze di contenimento delle emissioni da impianti audio ?

Direttività di emissione verso il pubblico e verso l'abitato

Uno degli equivoci più diffusi e resistenti, nel mondo dell'audio professionale, è quello per cui si dimentica troppo spesso che l'angolo di copertura indicato nelle specifiche dei diffusori è in realtà **l'angolo minimo di copertura**, solitamente riferito alle frequenze più alte riprodotte dal diffusore. E' dato per assolutamente scontato il fatto che il diffusore diffonda le frequenze inferiori su angoli sicuramente più estesi, poiché il contrario sarebbe indice di grave errore di progetto del diffusore⁷⁶.

Negli impieghi in cui è necessario contenere i livelli di emissione al di fuori dell'area occupata dal pubblico, questo attuale tipo di specifiche tecniche è del tutto privo di significato, anzi fuorviante.

Una verifica pratica è senz'altro il modo migliore per eliminare una volta per tutte il malinteso. Preso un qualsiasi diffusore e posto in terra all'aperto, lontano da pareti riflettenti oltre il suolo, se ne potrà rilevare la risposta in frequenza a vari angoli, per esempio in orizzontale, fuori asse.

Inevitabilmente si scoprirà che il diffusore irradia bene anche parecchio oltre l'angolo di copertura per cui è specificato, escluse soltanto le altissime frequenze (che, però, hanno comunque minima importanza per quanto concerne l'inquinamento acustico). Non solo, ma la riduzione del livello di emissione all'aumentare dell'angolo fuori asse sarà molto graduale e gli angoli di copertura orizzontale e verticale saranno abbastanza ampi da intercettare, oltre al pubblico (assorbente), anche un numero di pareti, edifici e quant'altro di riflettente che possa indirizzarle di nuovo in qualsiasi direzione. L'argomento verrà necessariamente approfondito nelle successive Linee Guida.

Di seguito verranno riepilogati, più che enunciati teorici, alcune importanti deduzioni logiche.

E' stato già esaminato il caso della perdita di controllo dell'emissione da parte delle trombe *a direttività costante*: ebbene la costante che lega le dimensioni del lato della bocca con l'angolo d'irradiazione (su quel piano) e con la frequenza minima a cui conservare il controllo, ha un valore orientativo di circa 25.000 (venticinquemila). La frequenza in corrispondenza della quale si perde il controllo della direttività è quindi pari a questa costante, divisa per il prodotto di angolo d'irradiazione (in gradi) e dimensione della bocca (in metri).

⁷⁴ Vedi D.A. Luce – *Dynamic Spectrum Changes of Orchestral Instruments* – Journal of AES, Vol.23, n.7, Sept. 1975.

⁷⁵ Il che spiega il successo dei sistemi "Line Array", vedi alla **Linea Guida n.12**.

⁷⁶ Abbiamo già accertato che la pratica totalità dei diffusori è omnidirezionale alle basse frequenze: se alle frequenze medie l'angolo di irradiazione si restringe e poi alle alte si espande nuovamente, allora ad un ascoltatore posto fuori asse perverranno solo le frequenze basse ed alte e –molto meno- le medie. Anche il riverbero dell'ambiente sarà povero di medie frequenze e ricco di alte. Entrambe queste occorrenze sono assolutamente sgradevoli all'ascolto, per cui si pone grande attenzione, nel progetto di ogni diffusore, professionale e non, affinché se anche la direttività di emissione aumenta, inevitabilmente, alle alte frequenze, questo avvenga almeno **con un andamento regolare, monotono**.

Una tromba con un angolo di apertura di 60° ed una bocca ampia 60 cm. perderà il controllo della dispersione a frequenze di poco inferiori a 700 Hz, qualora sia in grado di riprodurle⁷⁷.

Quando le si impiega in condizioni critiche di riduzione delle emissioni spurie, le trombe a direttività costante mostrano un pregio ed un difetto, entrambi poco evidenti e considerati.

► Il pregio risiede nel restringimento dell'angolo di irradiazione all'estremo inferiore della gamma di frequenze in cui è conservato il controllo della dispersione: si tratta di un fenomeno fisico causato dal raggio di curvatura del fronte d'onda alla bocca della tromba. Chi scrive ha impiegato più d'una volta questa peculiarità per ricavare un contributo aggiuntivo in termini di direttività di emissione, di efficacia documentata da numerosi rilevamenti ed utile specialmente quando occorre limitare al massimo l'intensità energetica del campo riverberato in un grande ambiente al coperto⁷⁸. L'argomento è approfondito nella **Linea Guida n.3**.

► Il difetto è quello, spesso ignorato, dell'elevata tendenza da parte di queste trombe ad emettere lobi spuri di irradiazione per via della diffrazione dai bordi, molto spesso taglienti.

Un accenno sulla “interferenza” della psicoacustica.

Il quadro complessivo sinora delineato potrebbe condurre a ritenere che il progetto e la realizzazione di un impianto audio professionale siano condotti seguendo il binario di una logica tecnica consolidata, di una conoscenza diffusa ed ampiamente pubblicata: questo non è vero, perlomeno in molti casi.

Il comportamento profondo dell'orecchio umano, dei suoi meccanismi di analisi ed interpretazione, è da millenni causa prima dell'affinamento di tanti strumenti musicali, al punto che non deve affatto sorprendere l'evenienza che una certa parte della cultura in psicoacustica, maturata proprio in ambito musicale, finisca per trovare spazio anche in un ambito di applicazioni che si vuole tecnologico al massimo grado.

Un approfondimento specifico, sull'argomento, è previsto quale ulteriore premessa tecnica generale alle Linee Guida sul contenimento delle emissioni da impianti audio. In tale sede verranno affrontate le complesse problematiche di limitazione e compressione dei segnali audio, a qualsiasi livello, dai microfoni ai trasduttori ed ai diffusori. FINE

⁷⁷ Molti diffusori professionali, da concerto, impiegano trombe per la gamma medio bassa anche più piccole, per le quali tuttavia specificano angoli di copertura di 20-30 gradi ed una risposta estesa fino a 180-250 Hz.: a meno di errori (frequenti), la copertura specificata è riferibile soltanto alla frequenza massima cui opererà la tromba, estesa a volte sino ed oltre i 3000 Hz. Al di sotto di questa frequenza la dispersione aumenterà gradualmente, sino quasi all'omnidirezionalità, al limite inferiore della risposta.

⁷⁸ Seminari della Sezione Italiana dell'*Audio Engineering Society* presso il SIB di Rimini, marzo 1994.