

ANGELO FARINA

Dottore di ricerca in fisica tecnica
Ricercatore presso l'Istituto di Fisica Tecnica - Università di Bologna -
viale Risorgimento, 2 - BOLOGNA

ROBERTO POMPOLI

Professore straordinario in Fisica Tecnica
presso la Facoltà di Ingegneria di PARMA

L'ACUSTICA DEL TEATRO DEL CONVITTO NAZIONALE MARIA LUIGIA DI PARMA

Sommario

Il teatro del Convitto Nazionale Maria Luigia di Parma è stato oggetto di misure sperimentali, che hanno consentito la valutazione dei principali parametri acustici oggettivi. Da questi dati è stata ottenuta una valutazione della qualità acustica della sala, in base alle più recenti teorie psicosoggettive.

Moderne tecniche di trattamento digitale dei segnali e di gestione automatizzata delle misure hanno consentito di ottenere mappe tridimensionali dei vari parametri allo interno della sala.

I risultati ottenuti consentono di comprendere le differenti sensazioni uditive provate nelle varie zone del teatro, e forniscono utili indicazioni sulle possibilità di intervento per migliorarne la qualità acustica.

L'esecuzione di misure di questo tipo in numerosi altri teatri consentirà di stabilire una scala di confronto per la valutazione della qualità acustica delle sale da concerto.

Cenni storici

Il Convitto Nazionale Maria Luigia di Parma è un complesso edificato agli inizi dello '800, tramite una profonda ristrutturazione dell'esistente Palazzo della Arena. Maria Luigia d'Austria affidò la progettazione all'architetto di corte Nicola Bettoli, al quale si deve anche il teatro di cui l'edificio è dotato.

La costruzione del teatro ebbe inizio nel 1821 e si concluse nel 1829. Quattro anni dopo, Maria Luigia decretò la fusione del Collegio dei Nobili e del Collegio Lalatta nel Convitto Nazionale Maria Luigia, che fu installato nella sede ormai ultimata. Il Convitto è rimasto in attività da allora sino ad oggi, fornendo alla cittadinanza la possibilità di ottenere una educazione di qualità elevata dalle scuole elementari a quelle superiori (Liceo Classico e Scientifico). Nei programmi didattici del Convitto hanno sempre avuto parte rilevante le attività sportive e quelle culturali extrascolastiche, rese possibili grazie alle notevoli strutture di cui era stato dotato dalla sua fondatrice (maneggio coperto, sala di scherma, palestra).

Nel quadro delle attività culturali, il teatro ha mantenuto un ruolo di primo piano, ed anche oggi viene intensamente utilizzato per prosa, musica e proiezioni cinematografiche.

La sala è molto interessante dal punto di vista architettonico soprattutto per le decorazioni pittoriche: il soffitto, dipinto da Giovanni Gaibazzi, raffigura le arti maggiori fra putti e ghirlande floreali; le pareti laterali hanno visto

anche il contributo di Macedonio Melloni e Paolo Zucchi, mentre il pregevole sipario è opera di Girolamo Magnani, autore delle ben più famose scenografie del teatro Regio di Parma [1].

Descrizione del teatro

La sala è a pianta rettangolare, con pavimento piano e palcoscenico rialzato di circa 1.50 m rispetto alla platea. Si accede al palcoscenico, oltre che posteriormente, tramite due piccole scale situate ai lati del proscenio.

Attorno alla sala corre una balconata, sostenuta da fregi marmorei, attualmente non utilizzata per il pubblico poiché di modestissima capienza (sporge solo 1 m).

Il fianco sinistro della sala è dotato di ampie finestre, completamente oscurabili tramite opportuni infissi e dotate inoltre di pesanti tende in velluto. Sul fianco destro si aprono invece i portoni di accesso, che danno su un ampio corridoio.

Il soffitto della sala non è molto alto, e presenta una sorta di raccordi spioventi con le pareti laterali, il cui centro di curvatura è tuttavia molto vicino al soffitto stesso.

I sedili sono in legno, con la parte orizzontale basculante, e pure in legno è il pavimento della sala. La capienza è di 250 posti.

Nel complesso si tratta di una architettura semplice e collaudata, come si può vedere dal rilievo grafico riportato in fig. 1 (sul quale sono pure riportati i 42 punti di misura). L'impressione fornita è tuttavia quella di un ambiente molto elaborato, a causa delle decorazioni pittoriche, dei fregi e del sipario, come appare chiaro dalle fotografie riportate in figg. 2 e 3.

Valutazione della qualità acustica delle sale da spettacolo

Nel corso degli ultimi 150 anni si è assistito allo svilupparsi di numerose teorie e scuole di pensiero riguardanti l'architettura e la funzionalità delle sale da spettacolo: la facilità di visione e di ascolto hanno preso via via il sopravvento sui requisiti di ordine estetico e sociale, che avevano in precedenza condizionato pesantemente la progettazione dei teatri.

Il primo grande passo verso la comprensione dei fenomeni acustici all'interno delle sale da spettacolo fu compiuto da Sir Wallace Clement Sabine, che alla fine del secolo scorso definì un parametro fisico di importanza notevole: il Tempo di Riverberazione. Da allora ad oggi l'importanza di questo parametro è stata progressi-

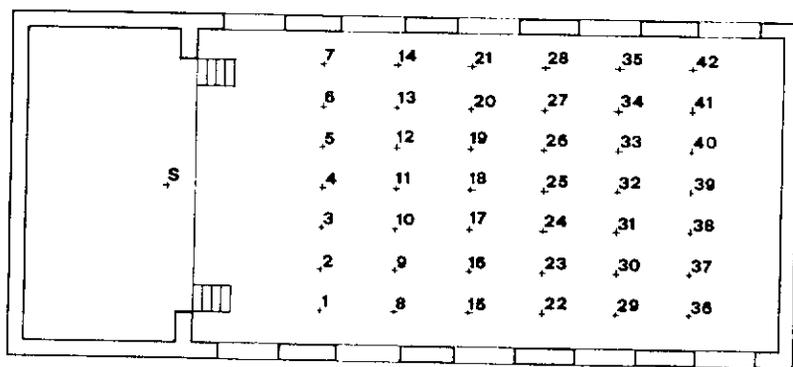
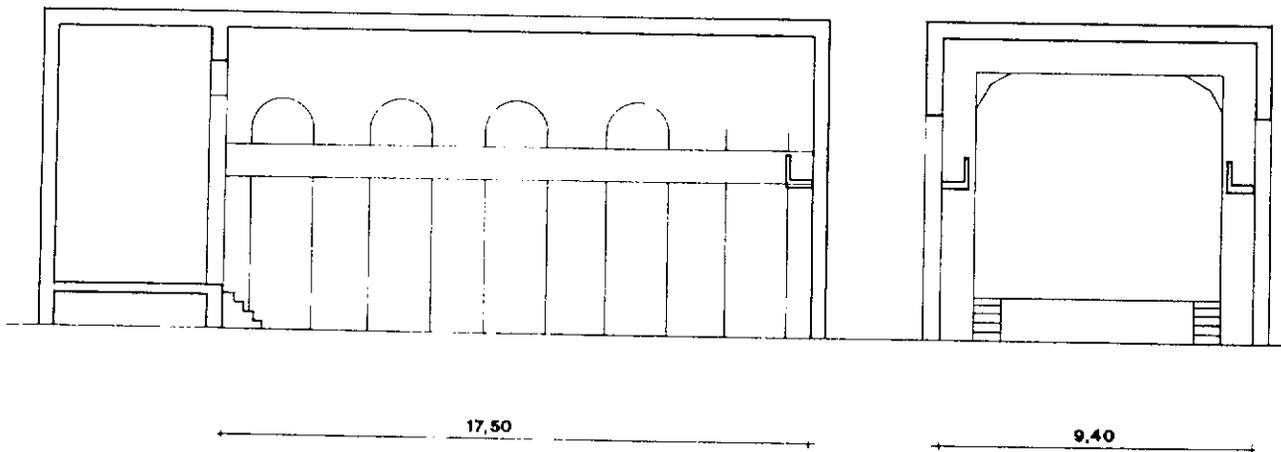


FIG. 1
Rilievo Grafico.

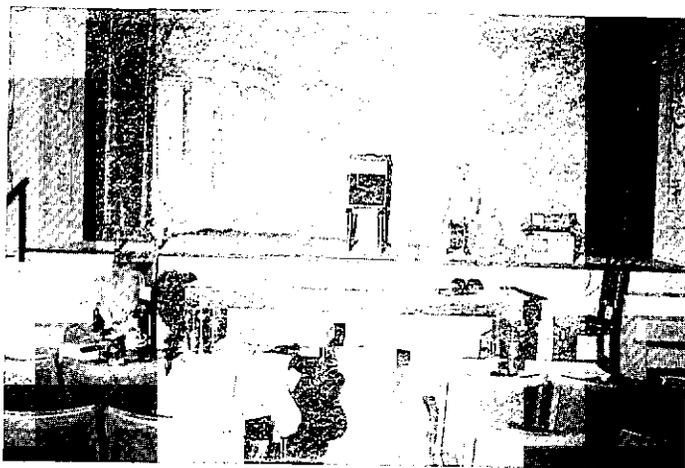


FIG. 2

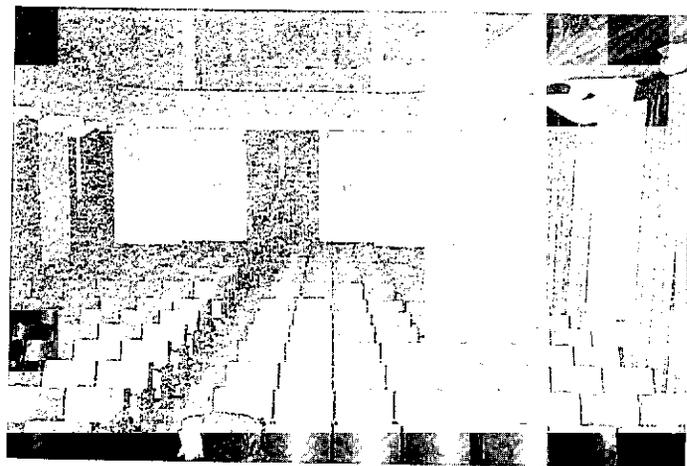


FIG. 3

vamente ridimensionata, ma rimane il fatto che un corretto tempo di riverberazione costituisce uno dei requisiti essenziali per una buona acustica.

Fu subito chiaro che diverse esigenze derivano dallo ascolto della musica (con i suoi vari generi) e del parlato: in generale, ad esempio, quest'ultimo richiede valori del tempo di riverberazione più corti della prima. Sono pertanto state sviluppate differenti teorie per descrivere l'idoneità di un ambiente alla prosa ed alla musica.

Per quanto riguarda il parlato, sono state individuate diverse metodologie che consentono di prevedere accuratamente il grado di intellegibilità della parola, mediante calcoli e/o misurazioni dirette.

Per la qualità acustica in campo musicale la situazione non è purtroppo così semplice, poiché un certo empirismo diffuso fra gli studiosi, probabilmente mediato dal contatto con le terminologie e le convinzioni dei musicisti,

ha impedito sinora la realizzazione di una procedura di valutazione standardizzata ed accettata. Va tuttavia ricordato il tentativo fatto da Leo Beranek [2], che ha proposto scale di valutazione a punti (da 0 a 100) basate sulla determinazione di numerosi parametri fisici relativi al campo sonoro, dei quali quello dotato di maggior peso è il Tempo di Ritardo Iniziale (ritardo in ms fra l'arrivo del suono diretto e della prima onda riflessa). Altri parametri proposti da Beranek riguardano l'equilibrio tonale dei tempi di riverberazione, il mescolamento fra le parti dell'orchestra, l'effetto spaziale del campo sonoro ed ovviamente il valore medio del tempo di riverberazione. Dalla intuizione avuta da Beranek riguardo l'importanza delle prime riflessioni nacquero molti studi, che hanno portato a chiarire la loro influenza sull'ascoltatore: si è così constatato che contribuiscono in modo rilevante alla qualità dell'ascolto le riflessioni che giungono **lateral-**

mente sullo spettatore [3], e con un ritardo non superiore a 50-80 ms.

Recentemente è stata proposta da Ando [4] una nuova metodologia per la valutazione della qualità acustica nelle sale da concerto, basata sulla determinazione (teorica o sperimentale) di 4 parametri fisici: livello di ascolto, tempo di riverberazione, tempo di ritardo iniziale e **coerenza mutua inter-aurale**. Quest'ultimo è un parametro inversamente proporzionale al grado di diffusione laterale del suono.

Ando ha proposto una procedura di valutazione nella quale a ciascuno di questi parametri si assegna un differente peso, in dipendenza del tipo di musica considerato e dello scostamento del parametro stesso dal suo valore ottimale: sommando i 4 valori pesati si ottiene un numero (Indice di Preferenza), che ha per valore massimo zero (condizioni ottimali), e non è limitato inferiormente. È stato proposto l'utilizzo della scala di valutazione come strumento di progettazione di una sala, per massimizzare l'indice di preferenza [4].

Rilievi sperimentali

Il Teatro del Convitto nazionale Maria Luigia è stato utilizzato per la determinazione sperimentale dell'Indice di Preferenza definito da Ando, nell'ambito di un programma di ricerca che si propone di classificare un elevato numero di teatri italiani [5]. Dal confronto fra i dati ottenuti in tutti i teatri, sarà possibile la costruzione di una scala di valutazione, con la quale associare ad ogni valore dell'Indice di Preferenza un descrittore univoco di qualità, così come fu fatto da Beranek dopo aver classificato 54 famose sale di tutto il mondo.

I rilievi sono stati svolti in 42 punti di ascolto situati in platea, come indicato nella pianta di fig. 1. Tutti i parametri fisici misurati, ed i relativi indici di valutazione della qualità acustica, sono stati mappati sia in forma numerica che grafica, con la tecnica degli istogrammi tridimensionali.

La misura dei parametri fisici è stata realizzata tramite strumentazione digitale di recentissima costruzione, corredata di programmi di gestione realizzati allo scopo. In fig. 4 è visibile uno schema del sistema di acquisizione, che può essere così riassunto:

— Sorgente sonora B & K tipo 4234, alimentata con rumore rosa e posizionata al centro della zona abitualmente occupata dai musicisti.

— Microfono di riferimento, per il rilevamento in tempo reale del livello di potenza sonora della sorgente, posizionato in stretta vicinanza del cono dello altoparlante.

— Testa artificiale con microfoni binaurali, per la registrazione dei segnali sonori nelle due orecchie, con mantenimento dell'informazione relativa alla spazialità del suono.

— Analizzatore di spettro FFT Ono Sokki CF 920, per la acquisizione dei segnali e l'estrazione dagli stessi delle «Risposte all'Impulso».

— Microcomputer Commodore 64, per la gestione dello analizzatore e l'interfaccia con l'operatore umano.

— Unità di controllo a distanza, per far partire una nuova acquisizione dopo il posizionamento della testa artificiale.

I dati ottenuti sono sostanzialmente di tre tipi: spettri sonori, risposte all'impulso e tempi di riverberazione.

Sugli spettri sonori, compresi fra 0 e 2 kHz, va detto unicamente che è possibile estrarre il valore complessivo

420

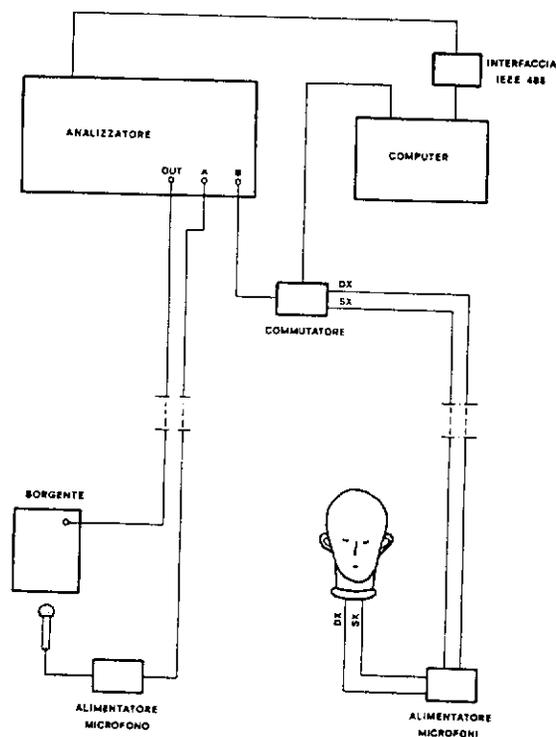


FIG. 4
Schema del sistema di acquisizione.

pesato «A», che è poi il parametro fisico utilizzato per la determinazione del livello d'ascolto.

Le risposte all'impulso, relative alle due orecchie, vengono ottenute senza far ricorso ad una sollecitazione sonora impulsiva, grazie alla tecnica della trasformata di Fourier inversa operata dall'analizzatore [6]. Usualmente si rappresenta il quadrato della risposta all'impulso, denominato ecogramma, e visibile nelle fig. 5, 6 e 7. Esse si riferiscono a tre diversi punti di misura nella sala, denominati rispettivamente 3, 24 e 31 sulla pianta di figura 1. Il primo forte picco rappresenta l'arrivo del campo sonoro diretto, mentre i successivi, via via più deboli, rappresentano le riflessioni sulle pareti laterali e sul soffitto. Dal confronto fra l'ecogramma delle due orecchie si può determinare il lato di provenienza delle riflessioni, ed una semplice costruzione geometrica consente di comprendere l'esatta traiettoria seguita dai raggi riflessi. Ad esempio, in fig. 8 viene rappresentata la costruzione della prima riflessione laterale relativa al punto n° 3, che consente di prevedere esattamente il relativo tempo di ritardo. Dall'esame degli ecogrammi, e dal calcolo geometrico (operato automaticamente dal microcomputer), è stato determinato per ogni punto il tempo di ritardo iniziale, che costituisce uno dei quattro parametri fisici della procedura di valutazione.

Dalle risposte all'impulso delle due orecchie viene poi calcolata la coerenza mutua inter-aurale, tramite una operazione matematica di cross-correlazione implementata sull'analizzatore FFT.

I tempi di riverberazione vengono misurati secondo la maniera classica, spegnendo la sorgente sonora (il microcomputer provvede a ciò) e misurando il tempo necessario affinché il livello sonoro decada di 60 dB. In effetti il calcolo si arresta dopo solo 15 dB di decadimento, e viene poi estrapolato il valore del tempo di riverbe-

razione su 60 dB. I tempi di riverberazione sono stati misurati in terzi d'ottava, anche se è possibile effettuare la misura in ottave. Per la procedura di valutazione della qualità acustica interessa solo il valore del tempo di riverberazione complessivo pesato «A».

In fig. 9 sono riportati i tempi di riverberazione misurati, che sono risultati praticamente gli stessi in tutti i punti della sala. I valori sono abbastanza elevati, poiché le misure sono state eseguite a sala vuota (senza l'assorbimento del pubblico).

Discussione dei risultati sperimentali

I dati oggettivi ottenuti dalle misure si prestano ad alcune considerazioni.

In fig. 10 è visibile la mappa del livello sonoro nella sala, riferito ad una sorgente dotata di un livello di potenza di 100 dB, situata alla sinistra del disegno. Si nota una buona uniformità dei valori, con una crescita molto graduale all'avvicinarsi della sorgente. Il livello si mantiene sempre più alto al centro della sala, e non tende a livellarsi ad una certa distanza, segno che il campo sonoro diretto mantiene il sopravvento sul campo riverberante.

In fig. 11 è riportata la mappa del tempo di ritardo iniziale (ITDG nella terminologia anglosassone), che è più alto nella parte posteriore della sala e lungo l'asse longitudinale della stessa, pur rimanendo sempre entro valori molto contenuti, date le piccole dimensioni dello ambiente.

In fig. 12 è rappresentata la mappa di un altro parametro fisico, denominato «ampiezza equivalente delle riflessioni»: esso rappresenta il rapporto fra l'energia ricevuta dopo 5 ms dall'arrivo dell'onda diretta e quella ricevuta

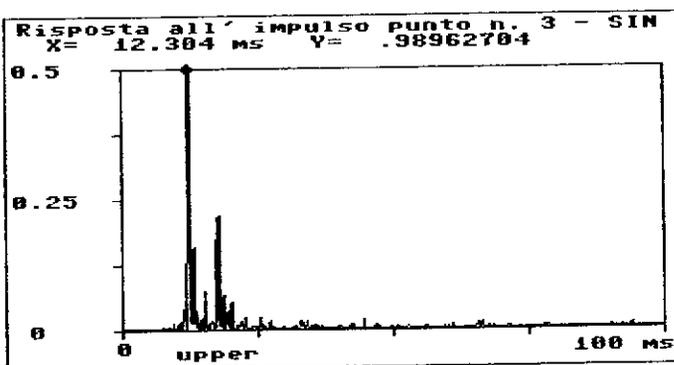
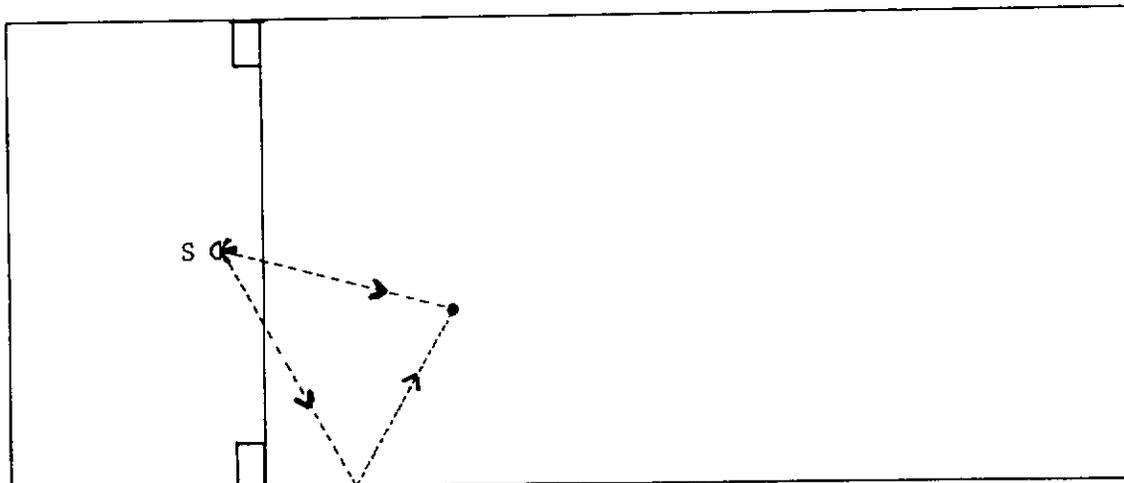
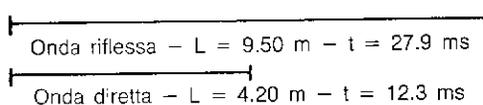


FIG. 5
Risposta all'impulso quadrata del punto n° 24 - Orecchio Sinistro.

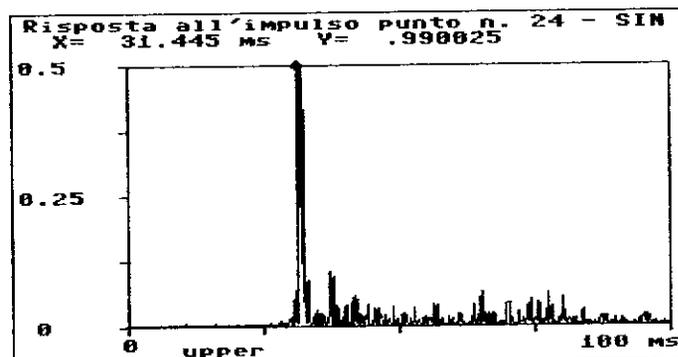


FIG. 6
Risposta all'impulso quadrata del punto n° 31 - Orecchio Sinistro.

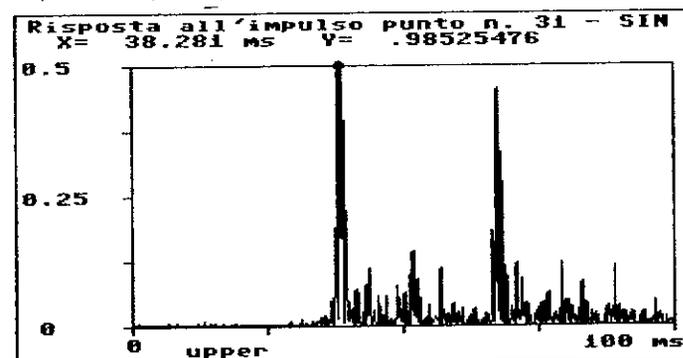


FIG. 7
Costruzione grafica delle riflessioni.

FIG. 8
Risposta all'impulso quadrata del punto n° 3 - Orecchio Sinistro.

Tempi di Riverberazione (in 1/3 ottava)

Teatro del Convitto Nazle Maria Luigia

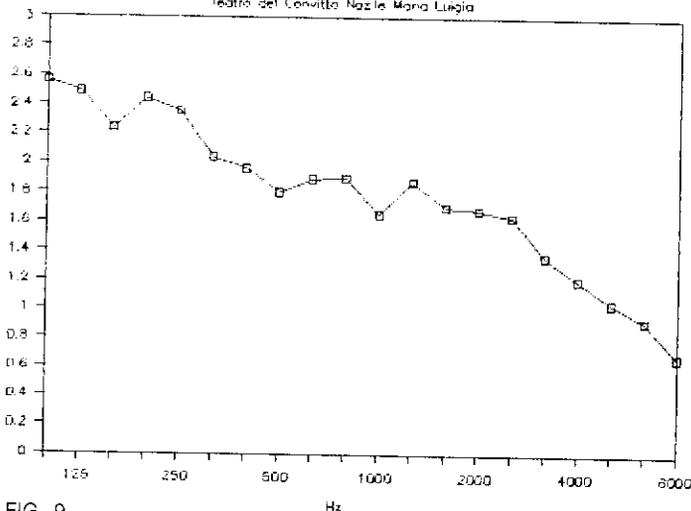


FIG. 9
Tempi di Riverberazione in terzi d'ottava.

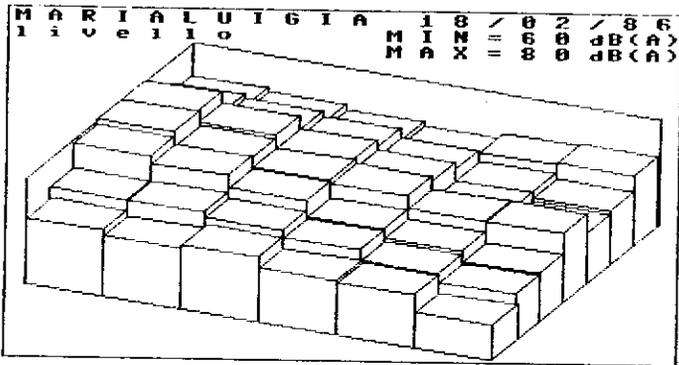


FIG. 10
Mappa del Livello Sonoro.

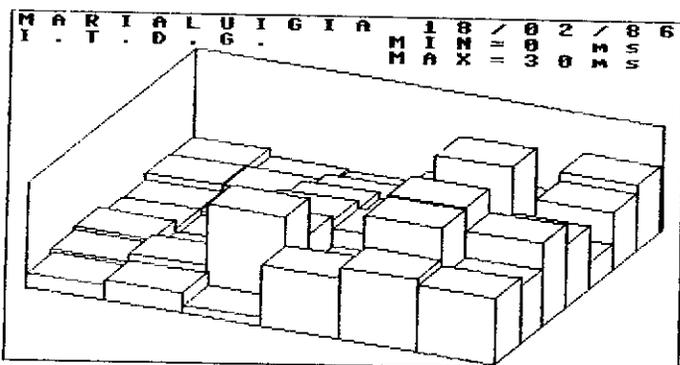


FIG. 11
Mappa del Tempo di Ritardo Iniziale.

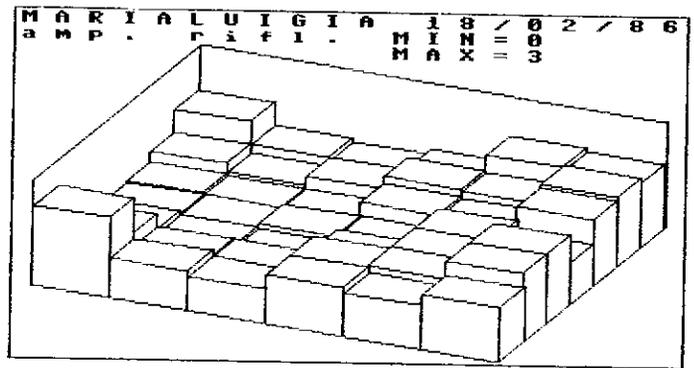


FIG. 12
Mappa della Ampiezza equivalente delle Riflessioni.

tra 0 e 5 ms. Pertanto l'ampiezza equivalente delle riflessioni descrive l'importanza relativa del campo riverberante rispetto al campo diretto. Ovviamente essa assume valori minimi in stretta prossimità della sorgente, mentre diviene superiore ad 1 nella parte posteriore della sala ed in vicinanza delle pareti laterali. Questo parametro fisico non compare direttamente fra i 4 utilizzati per la valutazione di qualità, ma dal suo valore dipende il fattore di peso assegnato al tempo di riverberazione ed al tempo di ritardo iniziale.

In fig. 13 si può infine vedere la mappa della coerenza inter-aurale (IACC), che assume valori prossimi all'unità sull'asse longitudinale della sala, ove il campo sonoro è dotato di notevole simmetria. Viceversa, in prossimità delle pareti laterali si hanno valori della IACC molto più bassi, cui corrisponde un campo sonoro ricco di riflessioni laterali asimmetriche, e tale pertanto da generare una gradevole sensazione di avvolgimento spaziale sull'ascoltatore. Va detto che i punti di misura situati sull'asse della sala non corrispondono a reali posizioni di ascolto, poiché sono situati lungo il corridoio centrale che divide longitudinalmente le file di sedili.

Valutazione della qualità acustica

Il calcolo dell'indice di preferenza viene effettuato in ciascun punto di misura, sommando i 4 indici di preferenza parziali ottenuti dai 4 parametri fisici misurati. Ciascun parametro fisico viene rapportato al suo valore ottimale, che in generale dipende sia dal brano musicale cui si fa riferimento, sia dalla potenza sonora con cui viene irradiato. Ad esempio, il valore ottimale del tempo di ritardo iniziale è direttamente proporzionale alla **durata effettiva della funzione di autocorrelazione** del brano musicale, grandezza che rappresenta il grado di ripetitività della musica stessa. Ciascun diverso brano musicale è caratterizzato da un diverso valore della durata effettiva della funzione di autocorrelazione, e richiederebbe pertanto un diverso tempo di ritardo iniziale e un diverso tempo di riverberazione.

L'indice di preferenza può pertanto venire calcolato solo in relazione ad un fissato valore della durata effettiva della funzione di autocorrelazione e ad un fissato valore della potenza sonora della sorgente.

La valutazione della qualità acustica è stata effettuata con riferimento a due diversi brani musicali, e ad un unico livello di potenza sonora della sorgente, sebbene i dati acquisiti consentano il calcolo dello indice di preferenza relativo a qualsiasi brano ed a sorgenti sonore di potenza diversa da quella utilizzata.

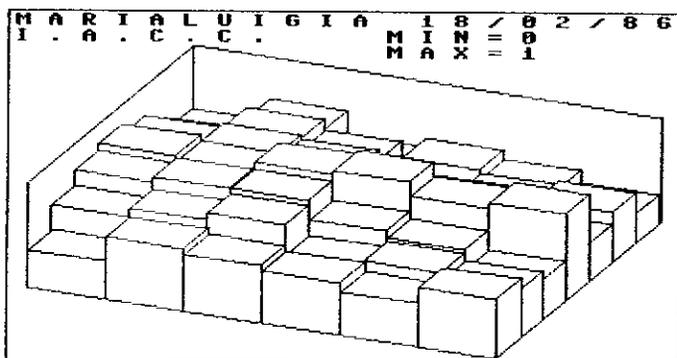


FIG. 13
Mappa della Coerenza Inter-Aurale.

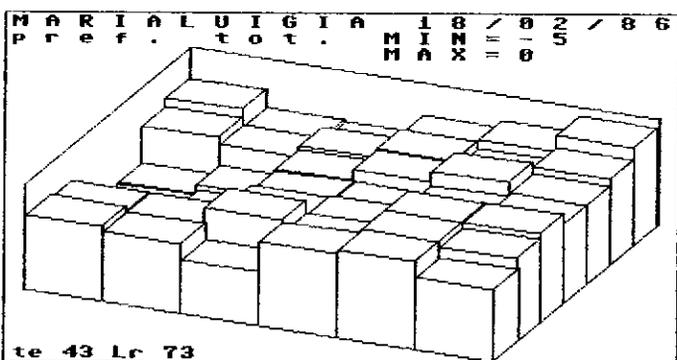


FIG. 14
Mappa dell'Indice di Preferenza - musica veloce.

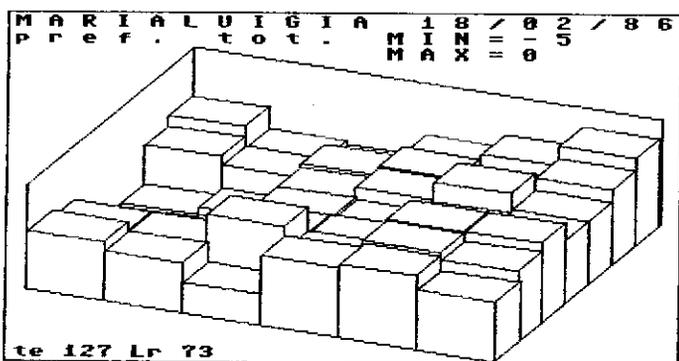


FIG. 15
Mappa dell'Indice di Preferenza - musica lenta.

Maria L.	pr. liv.	pr. IACC	pr. ITDG	pr. t.r.	pr. tot.
te=43	-0.2683	-0.63204	-0.78642	-0.15238	-1.8378
% sul t.	14.60 %	34.30 %	42.80 %	8.29 %	
te=127	-0.2683	-0.63024	-1.5345	-0.21071	-2.6438
% sul t.	10.14 %	23.83 %	58.04 %	7.97 %	

FIG. 16
Influenza percentuale dei parametri fisici sull'Indice di Preferenza.

I due brani musicali ipotizzati, rappresentativi di due situazioni piuttosto diverse sono:

— IV movimento (Allegro con Brio) della Sinfonietta, opera n° 48 di Malcolm Arnold, che è un brano molto veloce ed allegro.

— Royal Pavane di Gibbons, che è viceversa un brano molto lento e ripetitivo.

Di ciascun brano è stata in precedenza determinata la durata effettiva della funzione di autocorrelazione, che vale 43 ms per il primo brano, e 127 ms per il secondo (a titolo di confronto, è utile sapere che essa vale circa 12 ms per il parlato).

Per quanto riguarda il livello di potenza sonora, esso è stato fissato al valore che consentiva di avere le migliori condizioni di ascolto nella sala. Nel corso delle rappresentazioni è ovviamente possibile regolare la potenza sonora al valore ottimale solo facendo uso dello impianto di amplificazione, mentre nel caso di esecuzioni musicali solitamente ciò non è possibile, e pertanto sarà da attendersi un lieve calo dell'indice di preferenza rispetto al valore ottenuto (l'influenza del livello di ascolto non è comunque mai eccessiva).

Nelle figg. 14 e 15 sono riportate le mappe dell'indice di preferenza, relative ai due ipotetici brani musicali. I valori sono più alti per il primo brano che per il secondo, come era da attendersi in base anche alle finalità di utilizzo del teatro. L'indice di preferenza mostra, in entrambi i casi, i valori minimi in prossimità del palcoscenico, e lungo l'asse di mezzera longitudinale della sala, mentre ci si avvicina molto alle condizioni ottimali nelle zone laterali e posteriori.

Sebbene per ora il valore assoluto assunto dallo indice di preferenza non consenta di stabilire una classificazione assoluta di qualità della sala, già ora la valutazione eseguita è in grado di fornire utili indicazioni sulle zone di migliore ascolto, e sui parametri sui quali eventualmente intervenire per migliorare le condizioni acustiche nelle altre zone.

I dati ottenuti costituiscono inoltre un preciso punto di riferimento, per la valutazione degli effetti di eventuali modifiche o ristrutturazioni del teatro: dopo di esse, la ripetizione delle misure consentirebbe di sancire con precisione il miglioramento o il peggioramento della qualità acustica.

Per quanto riguarda l'influenza percentuale dei vari parametri fisici sulla qualità acustica, è interessante osservare la tabella di dati riportata in fig. 16: in essa sono riportati i valori medi degli indici di preferenza relativi ai 4 singoli parametri fisici, la cui somma costituisce l'indice di preferenza totale. Per ciascun valore dell'indice di preferenza è riportata pure la incidenza percentuale sul valore totale.

Da questi dati, si nota che per entrambi i brani musicali il livello di ascolto ha scarsa influenza, ed ancor minore influenza ha il tempo di riverberazione (meno del 9%).

Viceversa, la coerenza inter-aurale incide notevolmente di più sul risultato, in particolare per il primo brano musicale, corrispondente in effetti ai generi musicali più frequentemente eseguiti nel teatro. Questo risultato può essere spiegato osservando che entrambe le pareti laterali sono poco riflettenti, per la presenza di porte e di tendaggi, mentre il soffitto e la parete di fondo sono molto riflettenti: di conseguenza, le riflessioni «simmetriche» sono forti, mentre quelle laterali sono deboli.

Il tempo di ritardo iniziale è infine il parametro più influente sul risultato, come correttamente anche Beranek aveva intuito. Esso risulta ovunque molto breve, in seguito alle ridotte dimensioni della sala, e ciò fa sì che la

sala sia più adatta al parlato che all'ascolto della musica: ovviamente la musica moderna, o comunque i ritmi veloci, sono più adatti alla esecuzione in questa sala.

Conclusioni

I risultati ottenuti hanno mostrato la funzionalità e la rapidità della nuova tecnica di misurazione, fornendo notevoli quantità di dati oggettivi, e consentendo la creazione di mappature di facile comprensione visuale. Sui dati oggettivi è stata basata una procedura di valutazione della qualità acustica, che ha mostrato la maggior idoneità della sala all'esecuzione di prosa e di musica «veloce». Sono anche state individuate le zone ove si hanno migliori condizioni d'ascolto, mentre per le altre zone è stata chiarita l'importanza relativa dei vari parametri fisici sulla diminuzione di qualità.

In particolare si nota una certa mancanza di diffusione laterale del suono, che potrebbe essere corretta rimuovendo gli ostacoli attualmente presenti sulle pareti laterali (tende in velluto, cornici delle porte), ovvero riducendo l'intensità delle riflessioni provenienti dal soffitto (ipotesi in netto contrasto con l'esigenza di salvaguardare le pregiate decorazioni pittoriche ivi presenti).

Il basso valore del tempo di ritardo della prima riflessione rende il suono molto «secco», cosa che favorisce ovviamente la massima comprensione del messaggio verbale, ma rende meno gradevole l'ascolto della musica. Nessun intervento è possibile per correggere questa caratteristica della sala.

Il tempo di riverberazione, misurato a sala vuota, risulta solo leggermente troppo lungo, e la presenza del pubblico è sicuramente in grado di farlo rientrare nella fascia dei valori ottimali, tenuto anche conto che i sedili non sono imbottiti, e pertanto c'è da attendersi un notevole incremento dell'assorbimento quando i sedili stessi sono occupati.

I rilievi eseguiti nel Teatro del Convitto Nazionale Maria Luigia di Parma costituiscono il primo esempio di studio sperimentale basato sulle teorie più recenti; ciò costituisce un deciso avanzamento rispetto alla pratica tuttora attuale, basata sulla teoria di Sabine e sulla misura del solo tempo di riverberazione.

Il rilievo, eseguito con la stessa tecnica, delle caratteristiche acustiche oggettive di numerosi altri teatri consentirà in futuro di stabilire una classificazione di qualità acustica delle sale destinate all'ascolto della musica, così come è stata creata, con successo, per la intellegibilità del parlato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Allodi I. - «I teatri di Parma dal Farnese al Regio» - Nuove Edizioni, Milano (1969).
- [2] Beranek L.L. - «Music Acoustic and Architecture» - John Wiley, New York (1962).
- [3] Barron M., Marshall A.H. - «Spatial Impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure» - Journal of Sound and Vibration, n° 77 pag. 211 (1981).
- [4] Ando Y. - «Concert Hall Acoustics» - Springer-Verlag, Berlino (1985).
- [5] Farina A. - «La caratterizzazione acustica delle sale da spettacolo, con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica» - Tesi di Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica - Università di Bologna (1987).
- [6] Berkhout A.J., de Vries D., Boone M.M. - «A new method to acquire impulse responses in concert halls» - Journal of Acoustic Society of America, n° 68 pag. 179 (1980).