

**NUOVA METODOLOGIA PER LA
DETERMINAZIONE DI UN INDICE GLOBALE
DELLA QUALITA' ACUSTICA DELLE SALE**

Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale
Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica
26° Ciclo

Candidato Laura Peruzzi

Relatore Prof. Ing. Massimo Coppi

A/A 2012/2013

INDICE

Introduzione	1
Capitolo 1 – La storia del teatro	4
1.1. Il teatro greco e romano	4
1.2. Il teatro nell'età medievale	14
1.3. Il teatro dal rinascimento all'età moderna	14
1.4. Il teatro nell'800	20
1.5. Il teatro nel '900	24
Capitolo 2 – L'acustica negli ambienti chiusi	29
2.1. Richiami di acustica architettonica	29
2.1.1. <i>Le onde sonore</i>	29
2.1.2. <i>I suoni complessi</i>	33
2.1.3. <i>Grandezze acustiche</i>	36
2.1.4. <i>Riflessione, diffrazione ed interferenza</i>	40
2.2. Il campo acustico all'interno di spazi chiusi	43
2.3. Il tempo di riverberazione	48

Capitolo 3 – Architettura e acustica	54
3.1. L'ascolto del suono nelle sale musicali	54
3.2. Interpretazione uditiva delle riflessioni acustiche	56
3.3. Dimensioni, volume e forma	58
3.4. Effetto delle riflessioni immediate	60
3.5. Le problematiche dei Teatri dell'Opera	66
3.5.1. <i>Influenza della pianta</i>	68
3.5.2. <i>Influenza della copertura</i>	69
3.5.3. <i>Il palco e la fossa orchestrale</i>	70
 Capitolo 4 – I parametri acustici oggettivi	 73
4.1. Il tempo di riverberazione	73
4.2. Spettro acustico e risposta in frequenza	78
4.3. Descrittori energetici	80
4.4. Descrittori spaziali	82
4.5. Cenni sulla valutazione dell'intellegibilità	89
4.6. Stabilità ed affidabilità dei descrittori oggettivi	90
 Capitolo 5 – Tecniche di correlazione psicoacustica	 92
5.1. Psicoacustica: stato dell'arte	92
5.2. La teoria di Beranek	95

5.3. Tecniche numeriche di correlazione: l'analisi dei fattori	98
5.4. Applicazioni delle tecniche di analisi multivariata	103
5.5. Il questionario di Barron	106
5.6. Teoria di Ando	109
5.7. La fuzzy logic	116
Capitolo 6 – Un nuovo indice di qualità acustica	124
6.1. La teoria del bonum	124
6.1.1. <i>Approccio globale al problema del benessere</i>	124
6.1.2. <i>Il vettore benessere</i>	127
6.2. Applicazione del bonum all'acustica delle sale	134
6.2.1. <i>Scelta dei parametri oggettivi</i>	134
6.2.2. <i>Livello di pressione</i>	136
6.2.3. <i>L'EDT</i>	138
6.2.4. <i>L'ITDG</i>	141
6.2.5. <i>Il Lateral Fraction</i>	143
6.2.6. <i>Il calcolo dei Vettori qualità</i>	145
6.3. Validazione della metodologia	147
Capitolo 7 – Strumenti e tecniche di misura	149
7.1. Sistema lineare tempo invariante	149

7.2. La risposta all'impulso	151
7.3. La risposta all'impulso binaurale	154
7.4. La risposta all'impulso B-format	155
7.5. Tecniche di misura della risposta all'impulso	159
7.5.1. Segnale impulsivo	159
7.5.2. Segnale MLS	159
7.5.3. Segnale di sine sweep	161
7.6. Strumentazione utilizzata	170
7.7. Software di misurazione e di acquisizione dei dati	172
 Capitolo 8 – La simulazione del campo sonoro	 177
8.1. Introduzione	177
8.2. Modelli statistici: il campo semiriverberante	178
8.3. Il metodo delle sorgenti immagine	179
8.4. Ray Tracing	184
8.5. Confronto tra sorgenti virtuali e Ray Tracing	191
8.6. Evoluzioni del Ray Tacing	194
8.7. Il software di simulazione Odeon	198

Capitolo 9 – Determinazione dei parametri acustici oggettivi: campagna di misure e simulazioni acustiche	203
9.1. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	203
9.1.1. Risultati delle misurazioni	205
9.1.2. Risultati delle simulazioni e confronto	209
9.2. Il Teatro Olimpico di Roma	219
9.2.1. Risultati delle misurazioni	222
9.2.2. Risultati delle simulazioni e confronto	226
9.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	236
9.3.1. Risultati delle misurazioni	239
9.3.2. Risultati delle simulazioni e confronto	243
9.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	252
9.4.1. Risultati delle simulazioni per la configurazione sala da con- certo	255
9.4.2. Risultati delle simulazioni per la configurazione teatro	262
9.5. Il Teatro dell’Opera di Roma	267
9.5.1. Risultati delle misurazioni	272
9.5.2. Risultati delle simulazioni e confronto	277
 Capitolo 10 – Applicazione della teoria di Ando	 289
10.1. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	290
10.2. Il Teatro Olimpico di Roma	294

10.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	298
10.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	302
10.4.1. <i>Applicazione della teoria di Ando per la configurazione sala da concerto</i>	302
10.4.2. <i>Applicazione della teoria di Ando per la configurazione teatro</i>	306
10.5. Teatro dell’Opera di Roma	310
10.6. Conclusioni	315
 Capitolo 11 – Applicazione della teoria del Vettore qualità	 317
11.1. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	317
11.2. Il Teatro Olimpico di Roma	324
11.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	330
11.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	337
11.4.1. <i>Applicazione della teoria del Vettore qualità per la configurazione sala da concerto</i>	337
11.4.2. <i>Applicazione della teoria del Vettore qualità per la configurazione teatro</i>	342
11.5. Teatro dell’Opera di Roma	348
11.6. Conclusioni	355

Capitolo 12 – Confronto tra le teorie analizzate	362
12.1. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	362
12.2. Il Teatro Olimpico di Roma	366
12.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	370
12.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	373
12.4.1. <i>Confronto per la configurazione sala da concerto</i>	373
11.4.2. <i>Confronto per la configurazione teatro</i>	377
12.5. Teatro dell’Opera di Roma	380
12.6. Confronto tra le sale analizzate	384
 Capitolo 13 – Conclusioni	 386
13.1. Metodologia di studio	386
13.2. Discussione dei risultati	387
13.3. Possibili sviluppi futuri	392
 Appendice A – Risultati completi delle simulazioni	 394
A.1. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	394
A.2. Il Teatro Olimpico di Roma	403
A.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	421
A.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	435
A.4.1. <i>Risultati simulazioni per la configurazione sala da concerto</i>	435

A.4.2. Risultati simulazioni per la configurazione teatro	447
A.5. Teatro dell'Opera di Roma	456
Appendice B – Metodologia di calcolo completa dell'Indice di preferenza	472
B.1. Richiami di teoria	472
B.2. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	475
B.3. Il Teatro Olimpico di Roma	478
B.4. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	481
B.5. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	485
B.5.1. Applicazione della teoria per la configurazione sala da concerto	485
B.5.2. Applicazione della teoria per la configurazione teatro	488
B.6. Teatro dell'Opera di Roma	491
Appendice C – Metodologia completa di calcolo del Vettore qualità	495
C.1. Richiami di teoria	495
C.2. Teatro Consorziale di Budrio (BO)	503
C.3. Il Teatro Olimpico di Roma	510
C.4. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma	520
C.5. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma	529

<i>C.5.1. Applicazione della teoria per la configurazione sala da concerto</i>	529
<i>C.5.2. Applicazione della teoria per la configurazione teatro</i>	537
C.6. Teatro dell'Opera di Roma	544
Bibliografia	555

INTRODUZIONE

L'analisi della risposta acustica oggettiva, caratterizzata da una misurabilità e ripetitività strumentale a stimoli acustici preselezionati, è diventata ormai da anni il principale strumento a supporto della progettazione delle sale musicali.

L'esigenza di una descrizione oggettiva si rende necessaria a causa della complessità del problema: la sala tende a creare un campo sonoro distinto nelle varie posizioni, che dipende dall'interazione del suono prodotto con la sala stessa. Per questo, nel corso degli anni, sono stati proposti innumerevoli descrittori acustici, tutti derivabili dalla risposta all'impulso, che sintetizzassero il comportamento acustico delle sale.

La determinazione dell'intensità soggettiva dei suoni complessi rappresenta però storicamente un problema di difficile ed univoca soluzione. La valutazione della qualità acustica di una sala, e quindi l'individuazione di descrittori acustici compiutamente rappresentativi della risposta soggettiva alla specifica sorgente, non ha trovato ancora risposte completamente esaustive del problema. I numerosi indici di valutazione proposti in letteratura sono una riprova che ancora non è stata individuata una soluzione univoca che si dimostri del tutto soddisfacente.

Nella presente tesi si vuole illustrare una nuova metodologia volta ad ottenere una valutazione della qualità acustica delle sale basata su una procedura analitica.

Il metodo proposto fa riferimento ad una precedente teoria formulata dal Prof. Alfredo Badagliacca, originariamente volta all'individuazione di un indice globale di sensazione (visivo, acustico, termoigrometrico), ai fini della valutazione del benessere ambientale.

Facendo riferimento ad una serie di misure effettuate in diversi teatri storici, il lavoro mette a confronto una delle teorie maggiormente accettate per la valutazione della qualità acustica globale delle sale, cioè quella del Prof. Yoichi Ando, con il nuovo indice proposto.

Il lavoro si è articolato sostanzialmente in due grandi fasi: la prima di analisi e studio del problema dell'acustica architettonica e delle tecniche di correlazione psicoacustica, al fine di inquadrare l'ambito di studio e di evidenziarne tutte le problematiche e criticità; la seconda, invece, di carattere sperimentale.

In particolare la prima fase di studio si è svolta secondo i seguenti step:

1. analisi dello stato dell'arte e delle ricerche più recenti sulla qualità acustica di sale per la rappresentazione musicale, con particolare attenzione alla sto-

ria del teatro, alla teoria generale della propagazione del suono in ambienti chiusi e al legame tra acustica ed architettura;

2. studio dei parametri acustici oggettivi proposti negli anni dai principali ricercatori;
3. analisi delle principali tecniche di correlazione psicoacustica proposte dalla comunità scientifica;
4. analisi degli strumenti e delle tecniche di misura più avanzati; studio delle modalità di simulazione del campo sonoro.

La seconda fase di carattere sperimentale, invece, si è articolata secondo i seguenti passaggi:

1. elaborazione di una teoria per la determinazione di un nuovo indice di qualità acustica delle sale, prendendo le mosse dalla metodologia del bonum proposta dal Prof. Badagliacca (Capitolo 6);
2. predisposizione di una campagna di misure che ha riguardato 5 teatri italiani finalizzata all'acquisizione (nei punti in cui è stata effettivamente effettuata la misurazione) delle risposte all'impulso, allo scopo di ottenere una descrizione dei parametri acustici oggettivi. Delle stesse sale è stato poi predisposto un modello tridimensionale, tarato sulla base dei risultati ottenuti dalle misure, e si è effettuata una simulazione della propagazione acustica al fine di ottenere una completa descrizione del campo sonoro in un maggior numero di punti di ricezione;
3. applicazione a ciascuna sala, in tutti i punti di ricezione, della teoria di correlazione psicoacustica proposta da Yoichi Ando e determinazione dell'Indice di qualità totale. Si sono considerati come parametri indipendenti il Livello di pressione sonora in dB(A), la *IACC* media alle medie frequenze, l'*ITDG* e il Tempo di riverberazione soggettivo, integrato nei primi 10 dB alla frequenza di 500 Hz. L'indice di preferenza così calcolato è valido solo in relazione alla durata effettiva della funzione di autocorrelazione del brano scelto e del fissato valore della potenza sonora della sorgente. Nonostante questo i dati acquisiti consentono il calcolo dell'indice di preferenza relativo a qualsiasi brano e a sorgenti sonore di potenza diversa da quella utilizzata;

4. applicazione a ciascuna sala, in tutti i punti di ricezione, della teoria del Vettore qualità qui proposta e determinazione del Vettore qualità effettivo e del ΔV rispetto alla condizione ottimale. Si sono considerati come parametri indipendenti il Livello di pressione sonora in dB(A), il Lateral Fraction medio alle medie frequenze, l'*ITDG* e l'*EDT* a 500 Hz. Per ciascuno di essi viene calcolata la grandezza fisica oggettiva che provoca la sensazione descritta dal parametro e vengono determinati i limiti, superiore ed inferiore, del campo della qualità acustica per ciascuna grandezza. Infine vengono calcolate le variabili ridotte e l'indice di qualità globale;
5. confronto tra i risultati ottenuti dalle due metodologie e validazione della teoria proposta in questa sede.

Per una completa validazione della teoria proposta, sarebbe necessario attuare una metodologia sperimentale, basata su numerosi questionari proposti ad un campione abbastanza rappresentativo di ascoltatori, volta a verificare l'effettiva corrispondenza del giudizio soggettivo. Non essendo questo possibile per motivi logistici, si vuole validare la metodologia proposta attraverso il confronto della stessa con la teoria dell'indice globale di qualità acustica di Ando.

Il metodo del Vettore qualità si configura come una procedura standardizzata alla portata di tutti, che permette di avere in maniera intuitiva un riscontro immediato sulla bontà acustica della sala analizzata. Date le similitudini con la teoria di Ando, in questa sede è sembrato coerente scegliere quest'ultima tra le diverse tecniche di correlazione psico-acustica presenti in letteratura quale parametro di confronto per la validazione del metodo.

CAPITOLO 1 – LA STORIA DEL TEATRO

Essendo luogo in cui differenti discipline si uniscono e concretizzano nell'esecuzione dal vivo di un evento spettacolare, il teatro si configura da sempre come una delle forme artistiche più colte, raffinate e complesse.

Proveniente dal greco *θεαομαι* (“vedo”), comprende tutte le arti tramite cui può essere rappresentata, sotto forma di testo recitato o di drammatizzazione scenica, una storia. Una rappresentazione teatrale si svolge davanti ad un pubblico utilizzando quindi una combinazione variabile di parola, gestualità, musica, danza, vocalità, suono e, potenzialmente, di ogni altro elemento proveniente dalle altre arti performative.

Alle origini del teatro c'è l'aspirazione umana a rendere tangibile la relazione con le divinità, attraverso la rappresentazione del sacro nei riti e nelle danze, e allo stesso tempo il bisogno di intrattenere e definire i rapporti sociali, attraverso la funzione ludica e la forma della festa.

Il luogo teatrale, spazio “concreto” dell'azione scenica, può identificarsi con un teatro vero e proprio o con una qualsiasi altra struttura adatta ad ospitare una rappresentazione (fa eccezione il teatro di strada, in cui sono attori e pubblico ad adattarsi ad una struttura destinata ad altri scopi). All'interno del luogo teatrale può essere delimitato lo spazio scenico, ovvero il perimetro della rappresentazione vera e propria, affidata agli attori.

In generale, l'evoluzione degli edifici destinati alla rappresentazione è intrecciata strettamente con l'evoluzione della società, della cultura e dell'architettura: essi rappresentano sostanzialmente lo specchio delle culture e delle società che li hanno eretti.

1.1. Il teatro greco e romano

Il ritrovamento di un papiro nel 1928 da parte di Kurt Sethe ha dimostrato come, mille anni prima della nascita della tragedia greca, il teatro fosse praticato nell'antico Egitto sotto forma del culto dei “Misteri di Osiride”. Dall'archeologia sappiamo inoltre che la civiltà minoica conosceva l'uso di strumenti musicali, come la cetra e il flauto, e come l'arte della danza fosse già praticata come mimica di azioni di caccia o di guerra.

L'origine del teatro viene però storicamente attribuita alla civiltà Greca. I teatri greci erano sostanzialmente di due tipi:

- l'Odeon: inizialmente nacque come teatro all'aperto e successivamente fu coperto con travature in legno; era solitamente usato come sala per la musica. Le sue dimensioni erano dell'ordine dei 20 - 25 metri, quindi relativamente piccole, e i tempi di riverberazione non superavano i 2 secondi. A volte sotto la copertura in legno veniva messa una tenda a vela così che i tempi di riverbero diminuissero ancora;
- l'Anfiteatro: capace di contenere fino a 20 mila spettatori, era sempre scoperto, poiché i Greci, non conoscendo le strutture a volta, non erano in grado di coprire grandi luci. Era studiato in modo che le riflessioni potessero avvenire sul pavimento della scena o dell'orchestra, il quale era spesso libero o poco frequentato. Un riflettore importante era costituito dalla parete posta dietro alla scena, di materiale lapideo o formata da pannelli di legno che fungevano da risonatori.

Di fatto, il primo luogo assimilabile ad un teatro doveva essere poco più di un'area collocata ai piedi di un pendio collinare, sul quale si disponevano gli spettatori per vedere l'azione in corso in un'area appositamente marcata, precorritrice del palcoscenico. In seguito quest'area marcata è diventata l'orchestra circolare, circondata per circa due terzi da sedili (Fig.1.1) che, in certe realizzazioni, potevano ospitare anche più di 15000 spettatori.

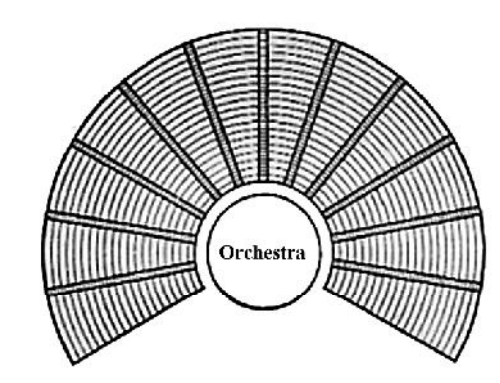


Fig. 1.1 – Forma schematica del teatro greco con l'orchestra circolare, con funzione di palcoscenico o di arena, e la distribuzione circolare di blocchi di sedili

Dal punto di vista acustico non è difficile accettare l'idea che l'embrione dell'auditorium fosse l'insieme di un oratore e di un gruppo di ascoltatori disposti intorno, pressoché alla stessa quota dell'oratore. La numerosità del pubblico può spiegare la necessità di innalzare il livello sia dell'oratore sia degli ascoltatori più distanti, mantenendo al minimo possibile la loro distanza dal centro dell'azione. Successivamente fu aggiunta una piattaforma elevata dietro l'orchestra destinata nei primi tempi al montaggio di una tenda o di una baracca (*schené*) temporanea, per il cambio dei costumi, il riposo e la ricreazione degli attori (Fig. 1.2).

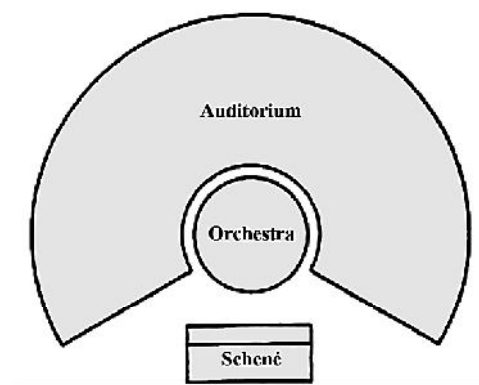


Fig. 1.2 – Forma schematica dei primi teatri greci con la *schené* costruita dietro l'orchestra

Con il tempo la *schené* fu trasformata in una struttura edificata stabile: il *logheion* (luogo per parlare). Nel periodo ellenistico, a partire dal III secolo a.C., l'azione fu trasferita dall'orchestra via via più in alto, verso il *proschenion*, un'area di palcoscenico tra l'orchestra e la *schené*.

Il primo edificio costruito con la funzione propria di far assistere il popolo ad una rappresentazione è il teatro di Dioniso ad Atene (Fig. 1.3), che risale al V secolo a.C.

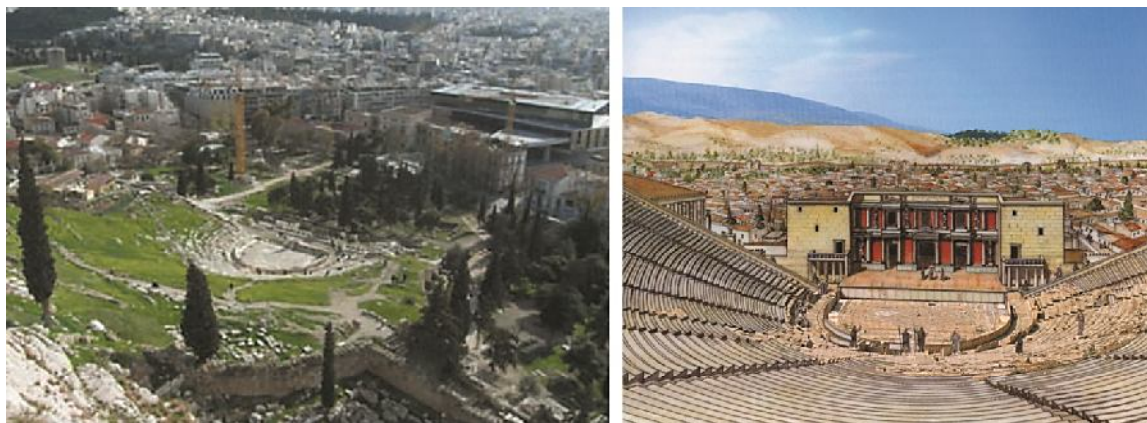


Fig. 1.3 – Il Teatro di Dioniso ad Atene: a sinistra come si presenta oggi, a destra in una ricostruzione di come fosse nel V sec. a.C.

Il teatro, eretto vicino al tempio dedicato al dio, permetteva la partecipazione ai riti di tutti i fedeli e, in seguito, man mano che la popolarità del teatro aumentava, fu utilizzato come palco per la propaganda politica nell'Atene occupata nella guerra contro i persiani.

Quindi, per esigenze di carattere visivo ed acustico la forma del teatro si andò evolvendo nel tempo: da una semplice zona rettangolare si passò alla forma ad emiciclo (o ad arco di cerchio maggiore di 180°) e si iniziò ad inclinare la parte dove siedono gli spettatori, in modo da portarli il più vicino possibile alla scena. In seguito, le conoscenze scientifiche e le nuove esigenze di spettacolo portarono alla costruzione di teatri in tutta la Magna Grecia, tra cui ricordiamo il Teatro di Epidauro (Fig. 1.4) costruito nel 350 a.C. considerato, secondo Pausanias, “il miglior teatro di tutta la Grecia”.

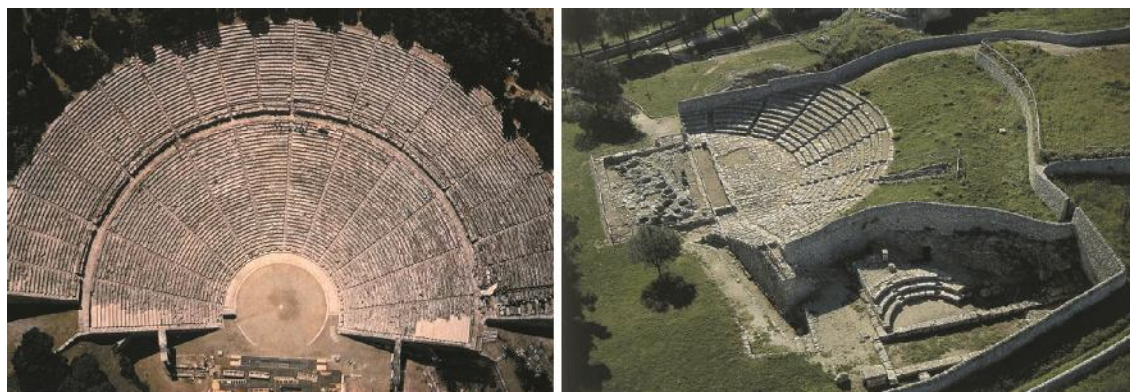


Fig. 1.4 – Il Teatro di Epidauro in pianta (a sinistra) e visto dall'alto (a destra)

Quest'ultimo è l'esempio perfetto di ciò che i greci intendessero per "edifici per lo spettacolo". Oltre alla sua forma ad arco di circonferenza con apertura di 210° , presenta tutti gli elementi caratteristici del teatro greco e rispecchia i criteri della progettazione acustica del tempo.

Il primo criterio era la scelta del luogo, come detto solitamente a ridosso di una collina, in luoghi isolati, in modo da garantire un basso rumore di fondo ed un naturale effetto schermante; l'orientamento rispetto al sole era tale da garantire una corretta illuminazione nelle ore del pomeriggio.

La scena era conformata in modo da rinforzare il suono delle voci degli attori: essendo poco profonda, essi si trovavano con una parete riflettente subito alle spalle, con lo scopo di rimandare l'energia sonora verso il pubblico.

Immediatamente davanti alla scena c'era l'orchestra, posizionata su un piano ribassato rispetto a quello dell'azione e pavimentato con lastre di pietra o marmo, anch'esse molto riflettenti. Qui stava anche il coro, che accompagnava la rappresentazione con canti e musiche ritmiche.

Le gradinate su cui sedevano gli spettatori erano molto ripide in modo da garantire una buona visuale a tutti ed evitare che la dissipazione del suono incidente in modo radente sugli ascoltatori. La forma a ventaglio dell'anfiteatro consentiva inoltre una minore distanza media tra gli ascoltatori e gli attori, a parità di numero di posti.

Negli anni si sono fatti vari tentativi per dimostrare come gli architetti greci avessero cognizioni acustiche più approfondite di quanto non si pensi, conoscendo il fenomeno delle riflessioni speculari e dimensionando le gradinate in modo che le onde riflesse giungessero in ogni punto con riflessioni di ampiezza e ritardo opportuni.

Sicuramente i Greci dell'antichità riconoscevano l'insufficienza della potenza acustica della voce degli attori nei teatri di dimensioni maggiori. L'orchestra e gli attori potevano allora avvalersi delle riflessioni delle pareti della scena, del pavimento, delle porte del palcoscenico e di alcuni piccoli vasi risonatori, che venivano posti nell'alzata dei gradini delle scale del teatro, vicino agli spettatori. Nei teatri più grandi quest'ultimi erano collocati in tre ranghi orizzontali, di 12 risonatori ciascuno, equi spazati lungo la direzione verticale. Essi erano accordati con cura per rispondere a particolari note secondo i sistemi musicali. Pertanto, l'energia sonora re-irradiata in poche decine di millisecondi dopo l'istante

di eccitazione per via aerea poteva enfatizzare componenti spettrali particolari della voce e degli strumenti musicali. La Fig. 1.5 mostra un'ipotesi riportata da Bruel sulla distribuzione, sulla forma e le dimensioni dei risonatori. Permangono comunque molti dubbi sull'esistenza di questi vasi risonanti e sulla loro efficacia.

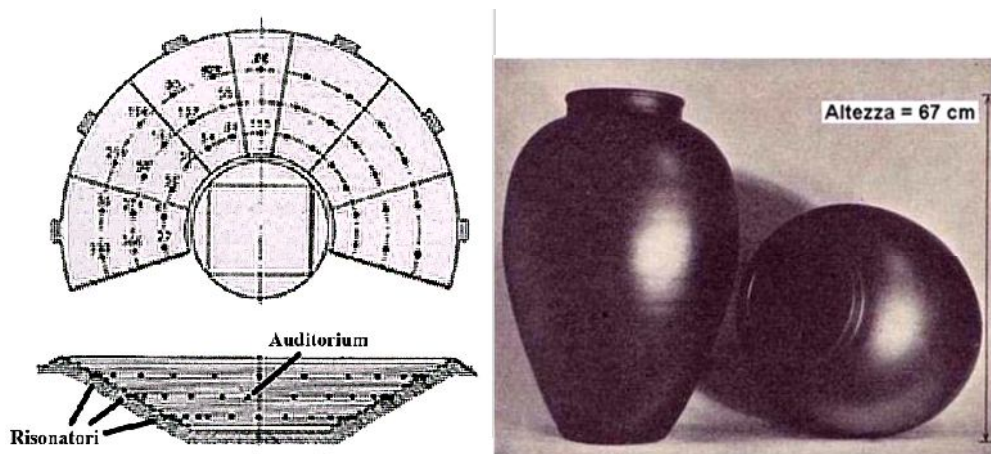


Fig.1.5 – (sinistra) Distribuzione dei vasi risonanti per ranghi. (destra) Ipotesi sulla forma e le dimensioni dei risonatori

Il teatro greco trovò sbocco, a livello culturale, in quello romano, che ne arricchì notevolmente la varietà di generi e forme espressive.

L'auditorium (cavea) era costituito da una distribuzione semicircolare di blocchi di sedili collegata direttamente alla struttura del palcoscenico. L'orchestra fu ridotta ad un semicerchio, o meno, integrato come parte dell'auditorium. La *schené* divenne una piattaforma ampia, ben elevata e confinata da superfici riflettenti, dietro (b-b nella Fig. 1.6) ed ai lati (a-a nella Fig. 1.6). Il piano del palcoscenico elevato, che preserva la visione e l'integrità del suono diretto (il suono diretto subisce attenuazioni aggiuntive se si propaga in radenza alle teste degli ascoltatori), nonché la diffusione del suono rinviato dalla molteplicità delle articolazioni delle superfici dure, contribuivano positivamente all'acustica di questi luoghi.

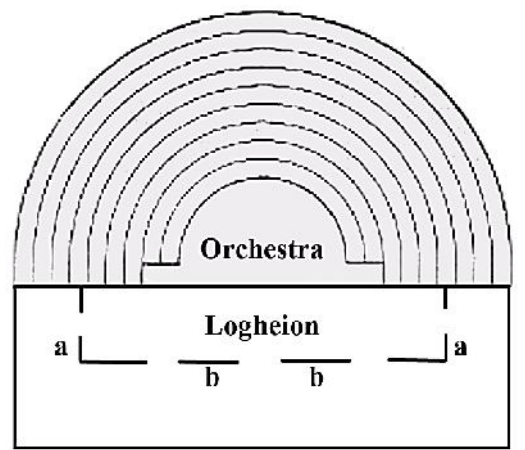


Fig.1.6 – Pianta dei teatri Romani antichi con l'orchestra semicircolare, la distribuzione semicircolare di sedili ed il logheion

Dal punto di vista acustico, oltre al già citato muro di fondo della scena, bisogna tenere in conto inoltre che la zona in cima alla tribuna (o cavea), costituita da archi, era una vera e propria cassa di risonanza che suppliva al mancato uso del pavimento dell'orchestra come riflettore, poiché occupato dalle autorità.

Questa trasformazione strutturale nasce dall'esigenza di costruire queste strutture all'interno della città (maggiore altezza = maggiore protezione dai rumori della *polis*) e dall'uso di un conglomerato cementizio che permette di erigere archi di sostegno (altro apporto latino, a differenza del teatro greco che si poggiava direttamente sul terreno, che evitava la ricerca di un particolare sito in pendenza per la costruzione della struttura).

Secondo Vitruvio, nella sua opera *De Architectura*, gli architetti greci inserivano nel circolo dell'orchestra tre quadrati concentrici, in modo che i dodici angoli di questi dividessero la circonferenza in dodici parti uguali, che davano le divisioni della platea, e il lato del quadrato parallelo al diametro segnava la linea della scena; gli architetti romani, invece, inscrivevano nella circonferenza quattro triangoli equilateri e procedevano similmente a fissare la distanza della scena dal centro e le divisioni della platea.

Egli infatti, a proposito dei teatri, nel libro IV, cap.7 (1) riporta:

“Nel teatro Greco alcune cose sono diverse. In primo luogo, nell'orchestra gli angoli di tre quadrati toccano la circonferenza mentre nel teatro Romano abbiamo gli angoli di quattro triangoli. Nel teatro Greco la linea del proscenio è tracciata lungo il lato del

quadrato più vicino alla scena dove interseca la circonferenza. Dallo stesso lato è tracciata una linea parallela che tocca l'esterno del cerchio e qui si marca il fronte della scena. Si traccia poi un'altra linea parallela passante per il centro dell'orchestra di fronte al proscenio. Ponendo la punta del compasso nel punto di intersezione con la circonferenza a destra, con un raggio pari alla distanza del punto di intersezione a sinistra, si traccia una circonferenza che intercetta la linea di proscenio e ne determina l'estensione dal lato sinistro. Allo stesso modo, ponendo la punta del compasso nel punto di intersezione opposto diametralmente si determina l'estremo destro del bordo del proscenio.”.

A proposito del teatro Romano nel libro V cap. 6 (1) Vitruvio invece recita:

“ La pianta del teatro deve essere organizzata in questo modo: si prende il centro dell'estensione di area destinata all'orchestra al livello del suolo. Si traccia la circonferenza e si inscrivono in essa quattro triangoli equilateri che toccano la circonferenza ad intervalli (proprio come nel caso dei dodici segni celesti; gli astronomi effettuano il calcolo in base alla divisione musicale delle costellazioni). Di questi triangoli, il lato di quello più vicino alla scena determinerà il fronte della scena , nella parte dove taglia la curva del cerchio. Si tratterà una linea parallela attraverso il centro del cerchio che dividerà la piattaforma (pulpitum) del proscenio dall'orchestra. Così il palcoscenico sarà reso più ampio di quello dei Greci in quanto tutti gli attori reciteranno la loro parte sul palcoscenico, mentre l'orchestra sarà assegnata ai sedili dei senatori...”.

Oltre le raccomandazioni per la progettazione architettonica, Vitruvio riporta osservazioni in materia di acustica:

“Si deve avere cura particolare affinché il sito non sia sordo ma sia un luogo in cui la voce può viaggiare con la massima chiarezza. Ciò può essere conseguito se si sceglie un sito dove non esistono elementi che generano eco.”.

Vitruvio distingueva i luoghi per la loro acustica in luoghi dissonanti (*catecuntes*), circumsonanti (*periecuntes*), risonanti (*antecuntes*) e consonanti (*sunecuntes*).

“...Sono dissonanti quei luoghi in cui il primo suono emesso, che è portato in alto, impatta contro corpi solidi in alto e, essendo rinviato indietro, si arresta in quanto blocca sul fondo la salita del suono successivo. I circumsonanti sono quelli nei quali la voce si espande in tutto l'intorno e poi è forzata verso il centro dove si dissolve. La sua fine non si ode ma si estingue lì in suoni di significato indistinto. I risonanti sono quelli in cui viene in

contatto con qualche sostanza solida e si riavvolge, producendo così un'eco e rendendo il suono finale doppio. I consonanti sono quelli in cui esso è supportato da sotto, aumenta nel procedere verso l'alto e raggiunge le orecchie in parole distinte e di tono chiaro. Pertanto, se il sito è scelto con cura, con questa precauzione, l'effetto della voce sarà perfettamente idoneo per gli scopi di un teatro.”.

Queste definizioni e raccomandazioni non sono facili da decifrare. Nondimeno, W. C. Sabine nella sua pubblicazione su *L'acustica dei teatri* ritiene che queste espressioni di Vitruvio costituiscono “...un'analisi ammirevole del problema dell'acustica dei teatri. Per renderle comprensibili nei termini della nomenclatura moderna bisogna sostituire la parola *interferenza* a *dissonanza*; la parola *riverberazione* a *circumsonanza* ed *eco* a *risonanza*.”.

La parola *consonanza*, nel senso usato da Vitruvio, corrisponde al concetto attuale che la sovrapposizione del suono diretto con lo stesso suono un poco ritardato (riflessione) non produce confusione, ma è percepito come un evento unico di intensità maggiore di quella del solo suono diretto.

Vale la pena riferire qui ancora altre osservazioni riportate da Vitruvio in merito alla fenomenologia acustica ed ai teatri:

“ La voce è un respiro d'aria fluente, percepibile all'orecchio per contatto. Si muove in un numero infinito di giri circolari come le innumerevoli onde circolari che appaiono quando un sasso è lanciato in uno specchio d' acqua calma e che si espandono senza fine dal centro se non sono interrotte da confini ristretti o da un'ostruzione che impedisce a queste onde di raggiungere la loro fine nell'assetto dovuto. Quando sono interrotte da ostruzioni, le prime onde, fluendo all'indietro, rompono la formazione di quelle che seguono.”.

“Allo stesso modo la voce esegue i suoi movimenti in cerchi concentrici; ma mentre nel caso dell'acqua i cerchi si muovono orizzontalmente su una superficie piana, la voce non solo si muove orizzontalmente ma ascende verticalmente per stadi regolari (...) così, se non esistono ostruzioni che interrompono la prima onda, non si rompono la seconda onda e le successive, ma tutte raggiungono gli orecchi degli spettatori, sia quelli più in basso sia quelli più in alto, senza eco”.

“Pertanto, gli architetti dell’antichità, seguendo i gradini della natura, hanno perfezionato le file ascendenti dei sedili nei teatri sulla base delle loro ricerche sulla voce ascendente e, tramite la teoria canonica dei matematici e quella dei musicisti, si sono sforzati a far giungere agli orecchi degli ascoltatori ogni voce emessa sul palcoscenico con maggiore chiarezza e dolcezza. Proprio come gli strumenti musicali sono portati alla perfezione della chiarezza del suono delle loro corde mediante lastre di bronzo o svasature a corno, così gli antichi inventarono metodi per aumentare la potenza della voce mediante l’applicazione degli armonici”.

I Romani inventarono peraltro forme di spettacolo diverse, non direttamente riconducibili all’ambito teatrale, che portarono alla realizzazione di immense opere quali l’Anfiteatro Flavio (Fig. 1.7). Per garantire il massimo numero di spettatori, l’originale forma dell’anfiteatro fu ingrandita fino a racchiudere completamente il luogo dello spettacolo stesso. Va detto che comunque in queste strutture non aveva molta importanza l’efficienza dell’ascolto, poiché vi si svolgevano eventi assimilabili più a manifestazioni sportive che ad esecuzioni di rappresentazioni teatrali o musicali.



Fig. 1.7 – L’Anfiteatro Flavio: a sinistra come si presenta oggi, a destra in una ricostruzione dell’originale

1.2. Il teatro nell'età medievale

A causa delle forti pressioni che esercitarono i re barbari per la scomparsa del teatro e del volere della chiesa, che permise solo le rappresentazioni liturgiche, dirette ad aumentare il suo potere, durante il medioevo si ebbe uno sviluppo teatrale pressoché nullo.

Anche la costruzione di edifici per lo spettacolo terminò, e le chiese divennero l'unico luogo pubblico in cui poter assistere a rappresentazioni ed ascoltare musica. I soli che fecero sopravvivere lo spettacolo teatrale furono gli artisti di strada, che arrivarono a costruire piccoli teatri improvvisati con teloni e strutture in legno.

La scienza acustica fu utilizzata con l'unico scopo di realizzare chiese molto alte con pareti laterali molto vicine, tutte in pietra e marmo, senza alcun elemento assorbente, in modo che il prete potesse, nei momenti più espressivi della liturgia, godere di un tempo di riverberazione molto alto che conferisse alla sua voce un tono altisonante.

1.3. Il teatro dal rinascimento all'età moderna

Nel periodo rinascimentale iniziò a riscoprirsi l'interesse per la musica e l'arte scenica: i signori iniziarono a accogliere nei propri salotti musicisti e compagnie teatrali per allietare i propri incontri e, in Italia particolarmente, ricominciò la costruzione di pochi teatri, sulla base della tradizione greca e romana.

La prima struttura realizzata come teatro fisso, che può essere anche considerato il primo teatro coperto al mondo, è il Teatro Olimpico a Vicenza, costruito nel 1584 da Palladio (Fig. 1.8).



Fig. 1.8 – Il Teatro Olimpico di Vicenza progettato da Palladio

La sua pianta è un chiaro richiamo al teatro romano a pianta semicircolare con la scena posta di fronte alla tribuna, con la differenza di essere coperto e quindi di avere riflessioni del suono sia sulle pareti laterali che sul pavimento e sul tetto. Questa caratteristica, congiunta all'uso di materiali come marmo e pietra, porta questa sala ad essere molto riverberanti quando è vuota (assorbimento solo da parte dell'aria) e con smorzamento quasi immediato del suono quando è piena (assorbimento da parte del pubblico e dell'aria), quindi molto adatta per l'ascolto del parlato.

Nel XVII sec. la pianta andò poi evolvendo verso la cosiddetta forma a ferro di cavallo, furono inseriti nella scenografia pesanti stoffe drappeggiate per aumentare l'assorbimento e moltissimi arredi come statue, prismi e altri piccoli abbellimenti, che iniziarono a portare i primi problemi di interferenza sonora che, però, non incisero mai molto sulla qualità acustica di queste sale per il loro volume ancora contenuto.

L'impianto architettonico venne fondamentalmente modificato: scomparve la gradinata per gli spettatori, sostituita da palchi sovrapposti in più ordini, mentre la zona dell'orchestra, sempre ribassata rispetto alla scena, venne adibita agli spettatori, ribattezzata "platea" e dotata di una minima pendenza verso la scena. Quest'ultima venne dotata anch'essa di una lieve pendenza verso gli spettatori; venne creato un grande boccascena, chiudibile dal sipario per consentire il cambio delle scene dietro il palcoscenico. Davanti al boccascena si trovava il cosiddetto proscenio, prolungamento del palcoscenico che consente agli attori di avanzare nel corso della rappresentazione verso il pubblico. Tra il proscenio e la platea, ulteriormente in basso, c'era un piccolo spazio destinato all'orchestra.

Un esempio di questa prima trasformazione fu il Teatro Farnese a Parma (Fig. 1.9), costruito da Aleotti nel 1618, che presentò già nuove concezioni acustiche come la costruzione di un colonnato in cima alla tribuna che fungeva da risonatore.



Fig. 1.9 – Il Teatro Farnese a Parma

Nel '700 comparirono le prime sale a pianta ovale o a "U". A causa della crescente richiesta di partecipazione alle rappresentazioni, ormai punti d'incontro mondani per la società del tempo, le strutture crebbero in altezza, presentando nei piani più alti le gallerie e i palchi che possiamo ancora ammirare nei teatri italiani come il teatro "Alla Scala" a Milano (1778, capienza 2800 persone per un volume di sala pari a 11245 m^3) con sala a pianta ovale e scena frontale (Fig.1.10),

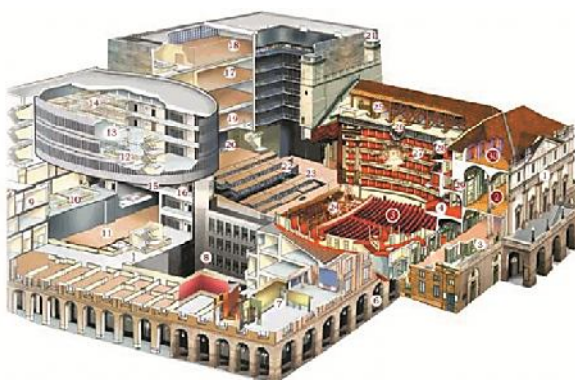


Fig. 1.10 – Il Teatro Alla Scala di Milano: spaccato assonometrico a sinistra, vista interna a destra

il Teatro Argentina a Roma (1732) e il San Carlo a Napoli (Fig. 1.11),



Fig. 1.11 – Il Teatro Argentina a Roma a sinistra e il Teatro San Carlo di Napoli a destra

la Fenice a Venezia (1792) e il Teatro Regio a Torino (1738) (Fig. 1.12),

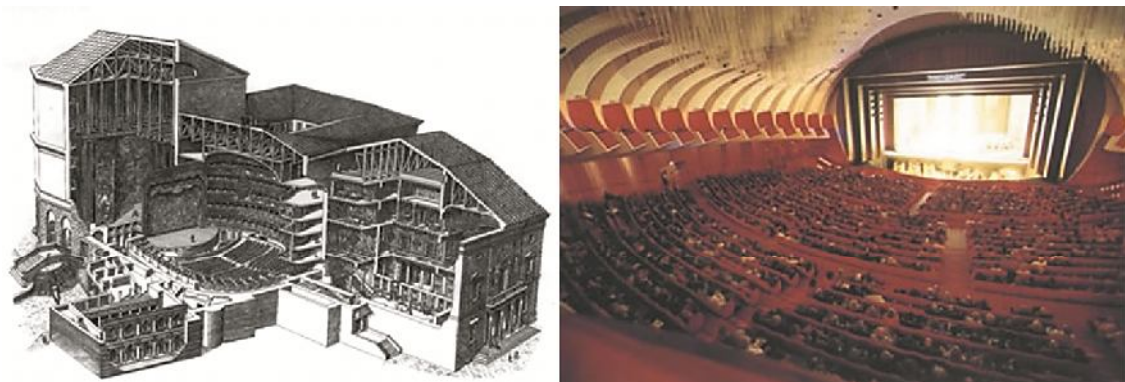


Fig. 1.12 – La Fenice a Venezia a sinistra e il Teatro Regio a Torino a destra

e, in Francia, l'Opera di Parigi (1671 - 1875), altro prototipo di struttura che subirà vari cambiamenti per adattarla ad una capienza di 2.200 persone per un volume di 11237 m³ (Fig. 1.13).



Fig. 1.13 – L'Opera di Parigi

Dal punto di vista acustico iniziò l'uso di materiali maggiormente riflettenti e assorbenti all'interno della sala come il legno e il velluto, la costruzione di tetti dalle forme adatte ad una buona ripartizione del suono e la scomparsa dei sontuosi addobbi del periodo barocco, che portò ad una notevole diminuzione del tempo di riverberazione. Nacquero però problemi di audizione per l'ampiezza delle sale (il suono diretto e riflesso dovevano fare un lunghissimo percorso per raggiungere determinati spettatori seduti nei palchi) e di diffrazione, perché la maggior parte delle strutture aveva pilastri a vista che comportavano riflessioni non controllabili.

In più, vi fu un ampliamento dell'orchestra e del numero e della varietà degli strumenti usati, portando così ad un aumento delle dimensioni della fossa dove era alloggiata, come nella celebre *Altes Gewandhaus* a Lipsia (1781): una sala rettangolare nella quale gli spettatori, seduti perpendicolarmente all'orchestra, stanno da una parte e dall'altra rispetto ad una corsia centrale. Il palco accoglie fino a 60 musicisti, per l'epoca un numero abbastanza grande (Fig.1.14).

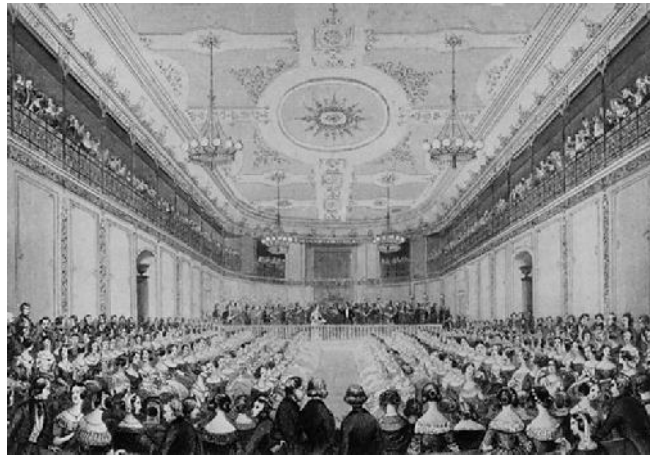


Fig. 1.14 – L’Altes Gewandhaus a Lipsia

Le forme di teatro più comuni in questo periodo, in Italia e in Europa sono quindi sostanzialmente tre (Fig. 1.15):

- A. a ferro di cavallo;
- B. a “U”;
- C. a ventaglio.

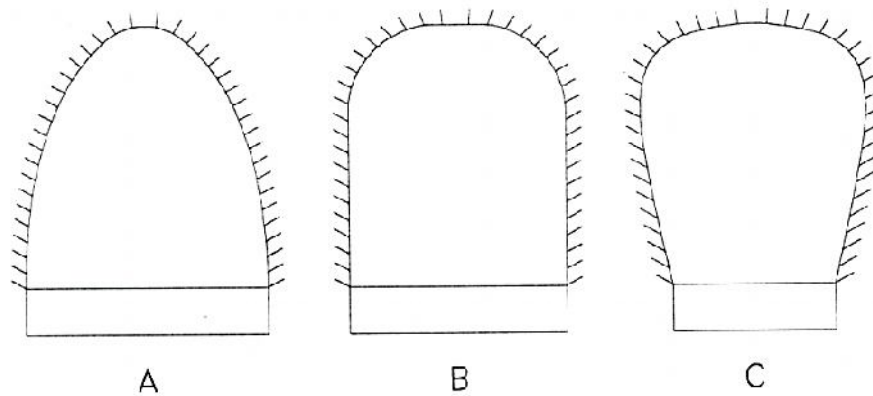


Fig. 1.15 - Schemi di piante di teatri del ‘700

In questi teatri le zone riflettenti sono costituite dal pavimento del palcoscenico, dal soffitto e dai parapetti. I palchi hanno invece una funzione assorbente.

1.4. Il Teatro nell'800

Con il tempo, la musica guadagnò una propria dignità e conquistò un suo proprio spazio di esecuzione, parallelo a quello della rappresentazione scenica: con la creazione di nuovi strumenti e il genio di molti compositori, si posero le basi per la costruzione di spazi dedicati unicamente a quest'arte.

L'orchestra esce dalla fossa cui era stata destinata nel secolo passato e si accomoda sul palco diventando la protagonista delle rappresentazioni; i luoghi per concerti diventano più numerosi e più importanti e il dibattito sulla forma di queste sale si intensifica, fino a concentrarsi su un'unica e sola questione come la loro dimensione.

Due ragioni principali stanno alla base del progressivo aumento della grandezza degli spazi per la musica e il teatro:

- l'accessibilità delle rappresentazioni, grazie all'aumento dei concerti, allo sviluppo del repertorio e all'affermazione delle nuove idee che danno libero accesso alle arti e alle scienze;
- una questione economica: il successo di pubblico della rappresentazione teatrale e operistica rende sempre più fiduciosi committenti ed investitori sui futuri guadagni che si possono ricavare da queste strutture.

Nel 1876 nasce il Teatro moderno grazie alla realizzazione del *Festspielhaus de Bayreuth*, progetto di R. Wagner con l'architetto Otto Bruckwald e il direttore teatrale, nonché scenografo, Karl Brandt. La sala è ad emiciclo, costruita prendendo come esempio un settore di 60° del teatro di Epidauro, con il raggio della prima fila di poltrone pari a 10 m. La sezione verticale è tale che ogni fila di posti goda di perfetta visibilità e, quindi, l'espansione del campo sonoro arrivi senza ostacoli agli spettatori con un tempo di riverberazione di 1,55 sec (Fig. 1.16).

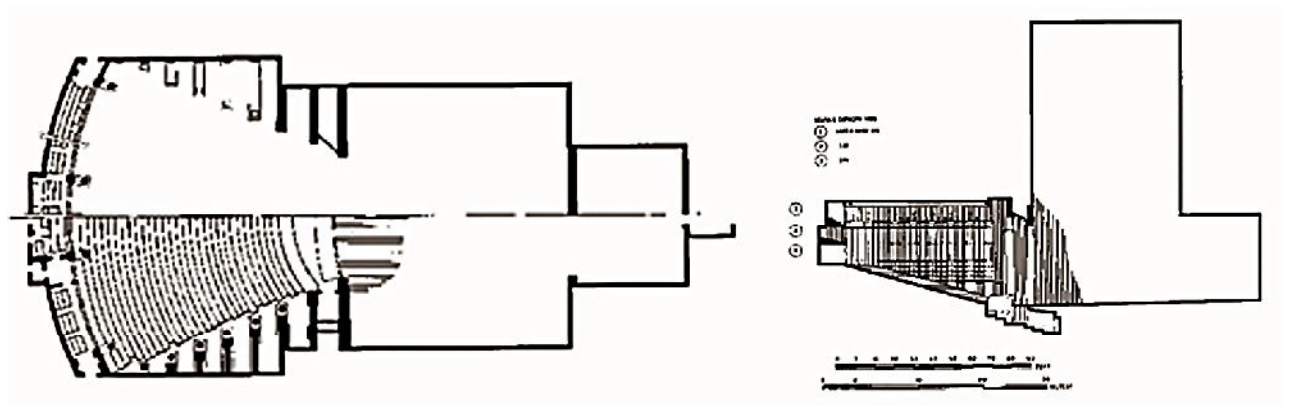


Fig. 1.16 – Il Festspielhaus de Bayreuth

L'innovazione maggiore di questa realizzazione sta però proprio nella promozione del teatro musicale, dove la musica era la sola protagonista.

All'inizio dell'800 nasce infatti lo stile sinfonico, che dà più importanza al complesso musicale che alle voci dei cantanti; è pertanto necessario ampliare ulteriormente lo spazio dell'orchestra. Fu in particolare Wagner che impose modifiche architettoniche sostanziali, poiché necessitava di alloggiare una numerosa orchestra senza allontanare troppo gli spettatori dalla scena: egli inventò dunque il “golfo mistico”, interrato sotto il proscenio, dove il suono di molti strumenti si amalgamava ed usciva rinforzato come da una cassa armonica. In molti teatri di questo tipo, sotto il pavimento del golfo mistico realizzato in legno, si trova una cavità concava, simile alla parte inferiore di una botte, con lo scopo di creare un ulteriore rinforzo.

Tre sale tuttavia, secondo lo studioso di acustica Michael Forsyth, dovrebbero essere prese come riferimento anche adesso per la loro eccellente qualità:

- la *Grosser Musikvereinssaal* (1870, T.R. von Hansen) di Vienna, che secondo Beranek, altro famoso studioso, è la migliore al mondo. Presenta una sala quadrata molto allungata con palco frontale dove prende posto l'orchestra, dietro la quale è situato un organo; la capienza è di 1680 posti situati nella platea, sulle due gallerie e sulla balconata superiori; le sedie e il pavimento sono in legno; il tempo di riverberazione è pari a 2 secondi (Fig. 1.17);

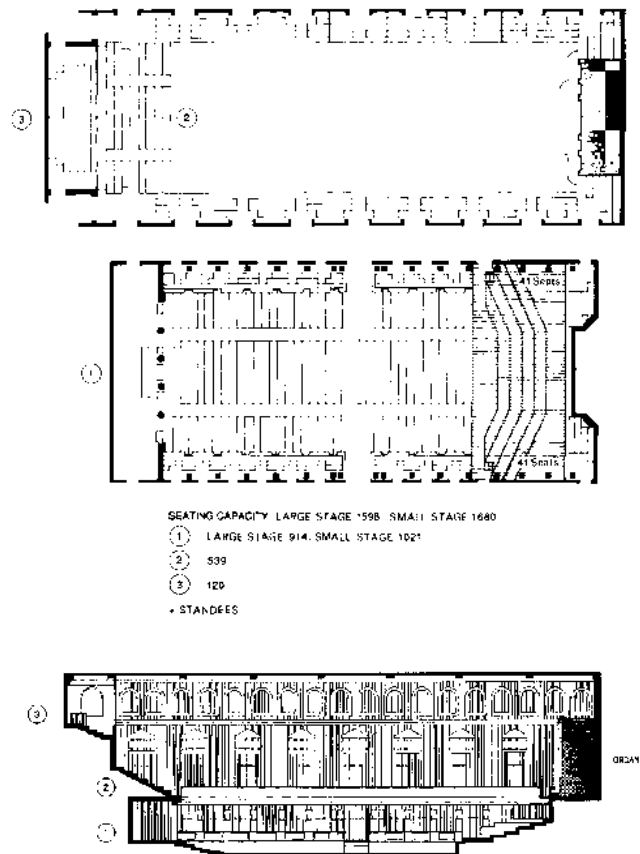


Fig. 1.17 – La Grosser Musikvereinssaal di Vienna

- la *Neues Gewandhaus* (1886) a Lipsia, distrutta durante la seconda guerra mondiale e sostituita nel 1981 da un auditorium, presentava 2 sale, entrambe rettangolari, di cui la piccola era la copia esatta dell'*Altes Gewandhaus* e la grande aveva una capienza di 1500 posti (Fig. 1.18);

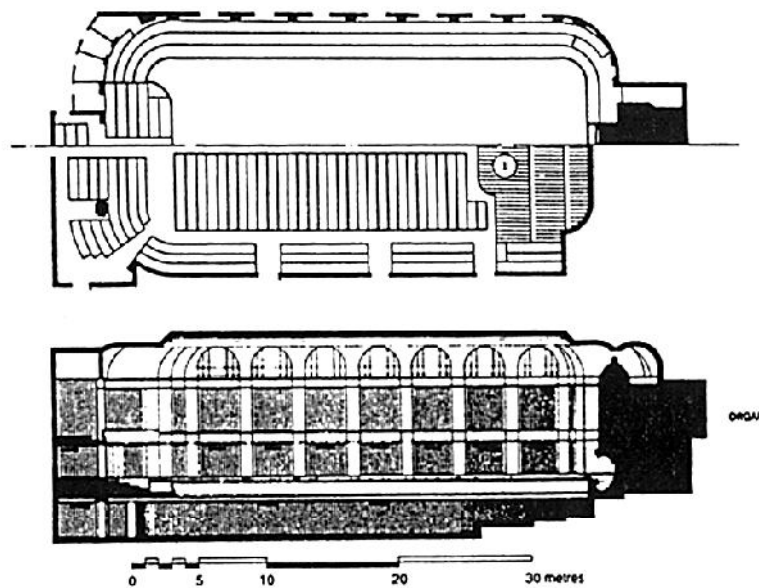


Fig. 1.18 – La Neues Gewandhaus di Lipsia

- la *Concertgebouw* (1888) di Amsterdam, “una delle tre sale da concerto migliori al mondo” (L. Beranek): presenta una sala rettangolare molto ampia ed una corta balconata su tre lati che, insieme alla platea e ad una piccola parte dietro il palco, accoglie tutti i 2037 spettatori (Fig. 1.19); il tempo di riverberazione alle medie frequenze è pari a 2 secondi.

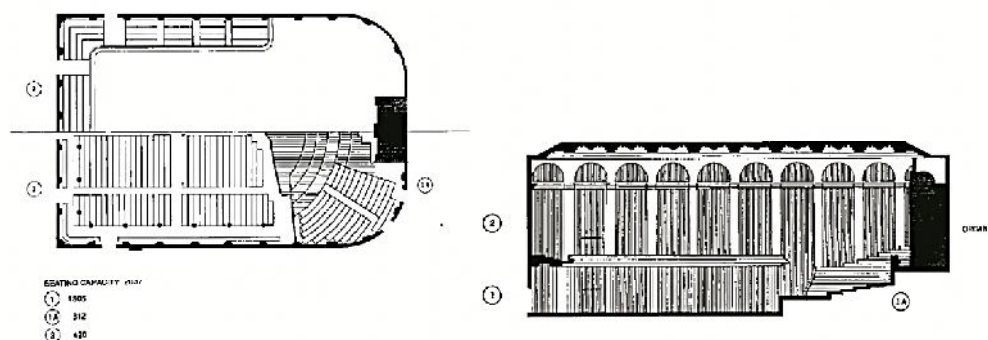


Fig. 1.19 – La Concertgebouw ad Amsterdam

1.5. Il teatro nel '900

La fine dell'800 e i primi del '900, fino alla seconda guerra mondiale, furono anni di innovazioni tecnologiche e progresso.

W.C. Sabine, un architetto americano, iniziò ad analizzare il campo sonoro in relazione alle forme delle sale, ai materiali e agli elementi decorativi, e, in questo modo, arrivò alla teoria del Tempo di Riverberazione. Secondo M. Forsyth per riverberazione *“si intende il fenomeno per il quale il suono, quando si arresta la sorgente sonora, continua ad essere percepito con intensità decrescente per un certo tempo a causa delle successive riflessioni multiple delle pareti e del soffitto fino al pratico annullamento”*.

In parallelo si andavano sviluppando le analisi di J.S. Russel, che faceva appello a un metodo di rappresentazione grafica dei suoni per analogia con i raggi luminosi (utilizzando un modellino di sala con piccoli specchi che fungevano da riflettori e una torcia che rappresentava la sorgente sonora).

La sala più importante di questo periodo viene costruita a Boston con il nome di Symphony Hall (1900). Sabine, consulente acustico per il progetto, la usò come laboratorio per i suoi primi studi sull'assorbimento del suono, al fine di trovare una formula matematica che gli permettesse di calcolare in anticipo la velocità di smorzamento delle onde in funzione del volume e dei materiali assorbenti presenti nell'ambiente.

Considerata da L. Beranek tra le migliori sale al mondo dove *“è un'esperienza raccomandabile ascoltare la musica”*, è di pianta rettangolare con una grande platea orizzontale e due ampie balconate che accolgono i suoi 2625 spettatori, e, in più, l'orchestra frontale, dietro la quale appare un grande organo (Fig.1.20).

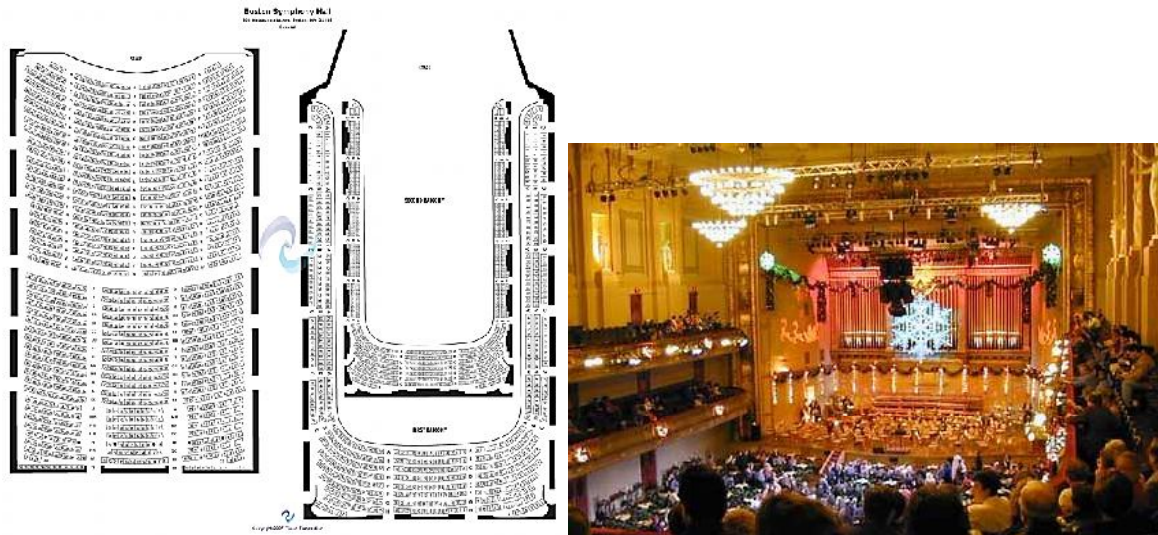


Fig. 1.20 – La Boston Symphony Hall

La prima sala che beneficiò completamente delle nuove conoscenze sperimentate fu la *Sala Pleyel* a Parigi (1927), nonostante gli architetti progettisti non tennero conto del fatto che il tetto parabolico da loro costruito inviava il suono nel fondo della sala e non alle pareti laterali che a loro volta dovevano portarlo agli spettatori.

Dopo la guerra, con la realizzazione della *Kammermusiksaal der Filarmonie* a Berlino, si assiste nel 1963 alla nascita del moderno Auditorium. Il progetto proponeva una sala a scena centrale, vera e propria innovazione, con 1138 posti, di cui Michael Forsyth dice: *"La musica è il centro dell'attrazione. Fin dall'inizio, quest'idea di base non soltanto ha prodotto la forma generale dell'auditorium (...), ma ha anche garantito la sua priorità incontestabile nello schema di tutto l'edificio. L'orchestra e il suo direttore si trovano sia spazialmente sia visivamente al centro di tutte le cose (...). L'uomo, la musica e lo spazio si incontrano in questo caso su nuove basi razionali"* (Fig. 1.21).

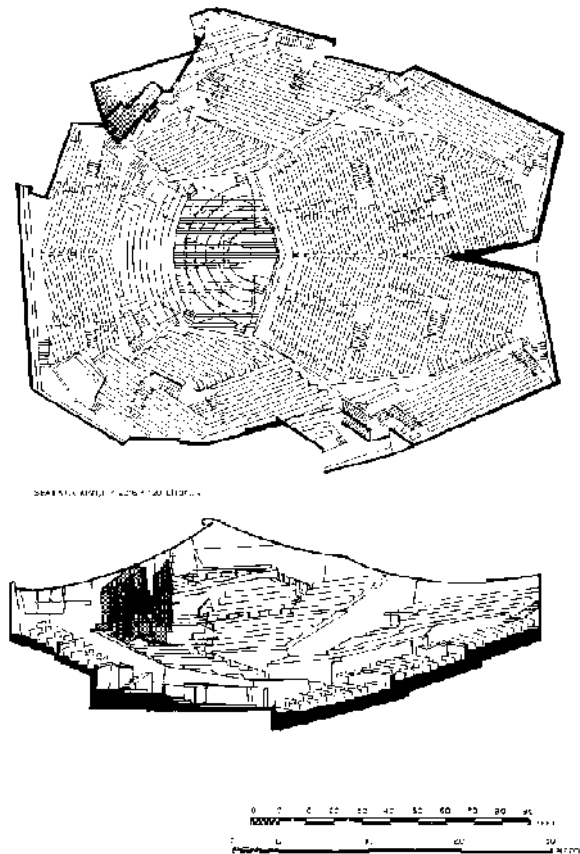


Fig. 1.21 – La Kammermusiksaal der Filarmonie a Berlino

Con una capacità di 1.138 spettatori e un tempo di riverberazione pari a 1,8 sec alle medie frequenze, presenta una particolarissima struttura asimmetrica che circonda il palco con due cerchie di posti a sedere. Le pareti laterali permettono quelle riflessioni che aiutano i musicisti a sentirsi l'uno con l'altro; i riflettori circolari posti ad un'altezza di 9 m sopra il pubblico e la copertura convessa permettono di spedire il suono a tutti i presenti e i 95 elementi di diffusione piramidali sul tetto fungono da risonatori e assorbitori di suono.

Riassumendo, i riferimenti formali delle sale da concerto moderne sono tre.

- la sala frontale, nota anche come rettangolare o a “scatola da scarpe”, è costituita dalla contrapposizione tra la scena e il pubblico. Questa configurazione è molto usata per la musica sinfonica e classica, e può evolversi e divenire bi-frontale o laterale, con gradoni disposti dietro l'orchestra e balconate più o meno strette che si appoggiano alle pareti laterali;

- la sala ad emiciclo, la cui forma in pianta sembra quella di un ventaglio nel quale i posti scendono dolcemente in pendenza fino al palco dell'orchestra. Nasce come evoluzione della scena frontale per garantire migliore visibilità a tutti gli spettatori. Queste strutture sono concepite maggiormente per l'opera ma, occasionalmente, possono accogliere anche concerti e musica strumentale;
- la sala a scena centrale, che presenta l'orchestra come fulcro dell'attenzione di tutto l'auditorium, ponendola al centro della visione degli spettatori. È una forma che permette di ospitare un gran numero di persone, però con un aumento considerevole di volume per raggiungere i valori richiesti del tempo di riverberazione, e si adatta molto bene a tutta la musica sinfonica e classica.

Oggi con la nuova musica e i nuovi suoni che si affacciano sui grandi palcoscenici di tutto il mondo, si sente sempre più l'esigenza di sale multifunzionali, nelle quali attraverso il movimento di pannelli riflettenti e l'uso di piccoli accorgimenti per i musicisti, è possibile cambiare le caratteristiche di volume e di riverberazione per adattare le sale alla nuova acustica richiesta. Questa nuova tendenza va però contro la specializzazione delle sale propugnata da tutti gli studiosi di acustica.

Nella storia dei progetti mai realizzati, c'è però un'idea di teatro globale che riesce a fondere in sé tutte e tre le tipologie appena citate, ed è il Teatro Totale di Walter Gropius.

L'architetto era fermamente convinto che il teatro dovesse funzionare come una macchina, sufficientemente mobile e flessibile, di modo che si potesse risolvere qualsiasi impostazione scenica; infatti, l'esperimento permetteva di porre il palcoscenico in qualsiasi posizione.

Il disegno era un recinto ovale, con posti a sedere, che potevano girare e scendere, ordinati come in un anfiteatro e distribuiti ruotando un piccolo palcoscenico a forma di cerchio, il quale era posto a $\frac{3}{4}$ di un altro più grande, sempre di forma circolare (Fig. 1.22).

Il loro movimento relativo permetteva:

- una configurazione quasi ad emiciclo con palcoscenico di profondità tradizionale, con o senza proscenio;
- una configurazione con palcoscenico centrale;
- un mix di rappresentazioni alternate o simultanee;

- proiezioni:
- platea di poltrone che si potevano girare.

L'innovativa impostazione delle poltrone, ruotando la sala e la scena, così come la possibilità di avvicinare e integrare il palcoscenico con il circuito sorgente-ricevitore, erano i benefici maggiori per l'acustica, potendo la sala variare nella forma adattandosi al tipo di rappresentazione in scena.

L'idea originale comprendeva anche l'uso di scenografie tridimensionali e di proiezioni sulle pareti, affinché lo spettatore potesse vivere un'esperienza globale anche dal punto di vista visivo creando l'illusione di essere completamente parte dello spettacolo a cui si stava assistendo.

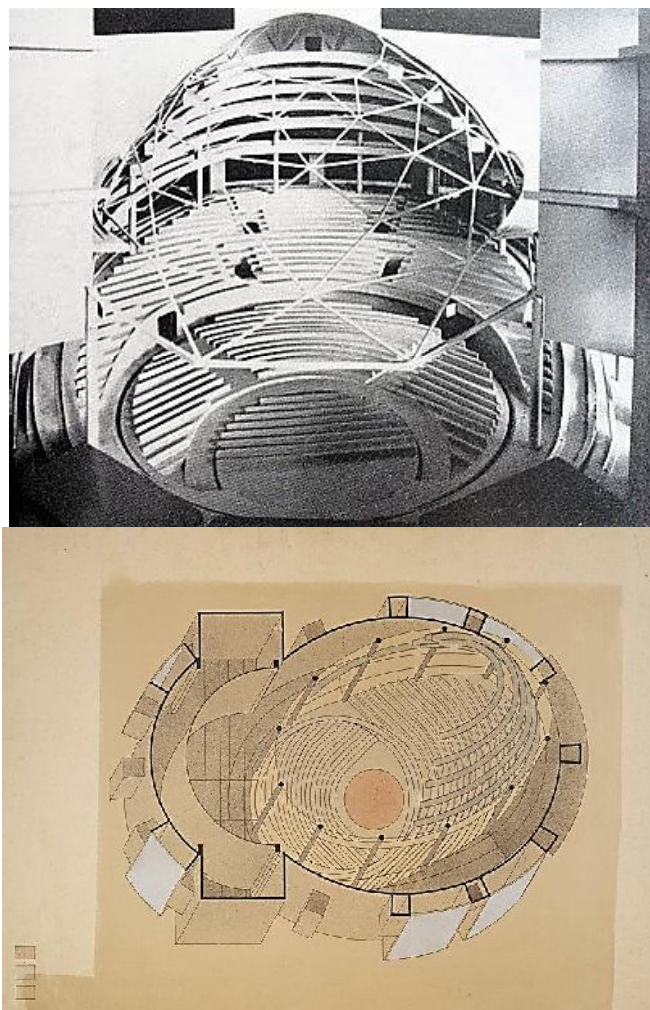


Fig. 1.22 – L'ipotesi di Teatro Totale di Walter Gropius

CAPITOLO 2 – ARCHITETTURA E ACUSTICA

2.1. Richiami di acustica architettonica

2.1.1. *Le onde sonore*

Il suono è una vibrazione meccanica che si propaga attraverso un mezzo materiale elastico e denso tramite onde di pressione. La sorgente sonora, cioè un corpo in vibrazione, trasmette al mezzo sollecitazioni di pressione al di sopra e al di sotto del valore della pressione atmosferica: si parla quindi di onde di compressione e di rarefazione.

Le particelle del mezzo, sollecitate, oscillano attorno alla loro posizione di riposo, dando origine a trasformazioni della loro energia potenziale elastica in energia cinetica e viceversa. Nel mezzo di propagazione si ha quindi una perturbazione di pressione, la cui velocità è chiamata velocità del suono. L'orecchio umano interpreta come stimoli auditivi solo fluttuazioni di pressione che hanno una frequenza compresa tra 20 a 20000 cicli per secondo o Hertz (Hz).

Un esempio di generazione delle onde sonore è illustrato nella Fig. 2.1.a, che mostra un condotto rettilineo con un pistone ad un suo estremo; questa schematizzazione può essere realizzata in pratica con un tubo che monta un altoparlante ad un suo estremo. Inizialmente l'aria all'interno del tubo è tutta alla pressione atmosferica; quando la membrana dell'altoparlante si muove rapidamente in avanti comprime l'aria a contatto con la sua superficie. Questa compressione viene rapidamente propagata allo strato di aria adiacente e da lì a quello successivo; non appena uno strato cede la sua energia a quello successivo ritorna al suo stato di pressione originario. Quello che osserviamo all'interno del condotto è il fronte d'onda, che si propaga alla velocità del suono c pari a circa 340 m/s.

La maggior parte dei suoni che noi studiamo è di tipo periodico. Il più semplice suono periodico è un tono puro come quello emesso da un diapason. Immaginiamo che la membrana dell'altoparlante dell'esempio precedente si muova con legge sinusoidale attorno alla sua posizione di equilibrio; se il primo movimento del diaframma è in avanti si genera una prima onda di compressione. Quando la membrana cambia direzione, la pressione dello strato d'aria ad essa adiacente scende al di sotto della pressione atmosferica: anche quest'onda di rarefazione si propaga con modalità simili a quelle già descritte nel caso della compressione. Questo ciclo di compressione e rarefazione è ripetuto, cosicché l'onda sonora che si propaga nel condotto ha una forma periodica. Riportando in un diagramma l'andamento della pressione dell'aria al variare della distanza dall'altoparlante (Fig. 2.1.c) troviamo un andamento di tipo sinusoidale il cui periodo è detto lunghezza d'onda (λ). Se si misura la variazione di pressione nel tempo in un qualunque punto del tubo (Fig. 2.1.d)

si ha ancora un andamento periodico di periodo T ; l'inverso del periodo è la frequenza f dell'onda sonora.

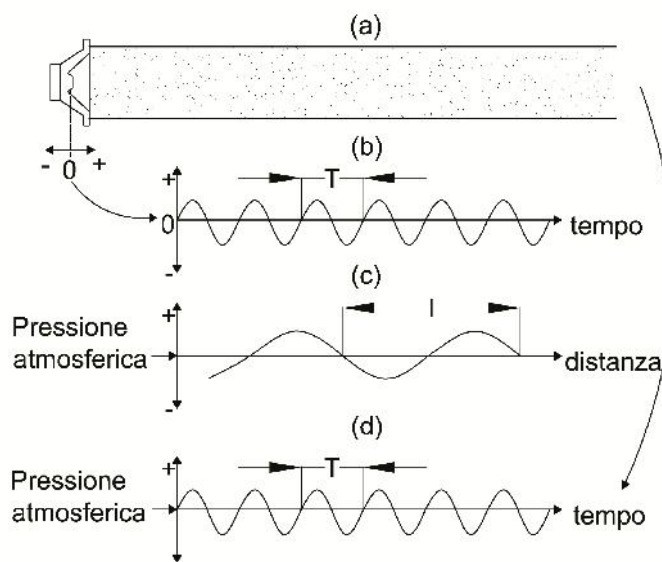


Fig. 2.1 - (a) Un altoparlante fissato all'estremità di un tubo genera un'onda sonora sinusoidale. (b) Rappresentazione dello spostamento del diaframma attorno alla sua posizione di equilibrio nel tempo. (c) Distribuzione istantanea delle variazioni di pressione lungo il tubo. (d) Variazione della pressione al variare del tempo in un punto interno al tubo

La lunghezza d'onda ed il periodo (e quindi la frequenza) sono legate fra loro per mezzo della velocità del suono (Fig. 2.2):

$$\lambda = c \cdot t \quad (2.1)$$

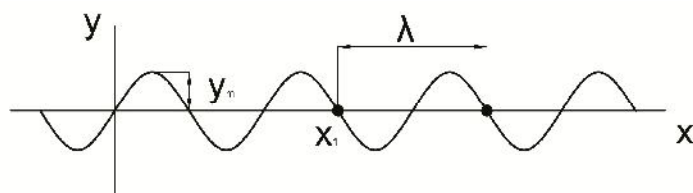


Fig. 2.2 – Legame tra lunghezza d'onda e periodo

Sapendo che $f = 1/T$, possiamo scrivere le equazioni seguenti:

$$\lambda = c/f \qquad f = c/\lambda \qquad c = f \cdot \lambda \qquad (2.2)$$

Due suoni di frequenze f_1 e f_2 definiscono una banda di ampiezza pari a $\Delta f = f_2 - f_1$ se il loro rapporto f_2 / f_1 è pari a 2, cioè una frequenza è doppio dell'altra. Il loro intervallo è chiamato banda di ottava o banda critica (Tab. 2.1).

f (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	6.000
λ (m)	5,302	2,672	1,336	0,668	0,334	0,167	0,084	0,042

Tab. 2.1 - Frequenze centrali delle bande di ottava e le loro lunghezze d'onda corrispondenti

L'ottava è una banda piuttosto larga e in talune applicazioni è necessario suddividerla in bande sottomultiple; i filtri di questo tipo sono chiamati a frazione d'ottava. La suddivisione più nota è quella di 1/3 d'ottava, ma sono comuni anche filtri di 1/6, 1/12, 1/24 d'ottava. Ogni filtro di questo tipo dovrà verificare che il rapporto tra la differenza delle frequenze f_2 e f_1 e la frequenza di centro-banda sia equivalente ad un valore costante.

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_2 - f_1}{f_c} = cost \qquad (2.3)$$

Questo valore costante per i filtri d'ottava equivale a:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \qquad (2.4)$$

La frequenza massima di un filtro risulta uguale alla minima di quello seguente. Se prendiamo in considerazione filtri a 1/3 d'ottava il rapporto tra f_1 e f_2 è il seguente:

$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^3 = \sqrt[3]{2} = 1,2599 \quad (2.5)$$

I filtri a 1/3 d'ottava sono i più utilizzati perché si rapportano meglio al sistema uditivo umano, specialmente per frequenze sopra i 600 Hz; al di sotto di questo valore non è infatti possibile riprodurre la risoluzione dell'udito umano.

Matematicamente la propagazione del suono è descritta dall'equazione delle onde, conosciuta come equazione di D'Alembert dove p [Pa] è la pressione mentre x, y, z sono le coordinate cartesiane.

$$c^2 \cdot \Delta p = c^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Inoltre la propagazione del suono nell'aria è illustrata da Huygens (Fig. 2.3): il fronte d'onda Σ avanza come se ognuno dei suoi punti emettesse delle onde sferiche elementari. Il fronte d'onda, dopo un intervallo di tempo, è proprio lo sviluppo di queste onde elementari.

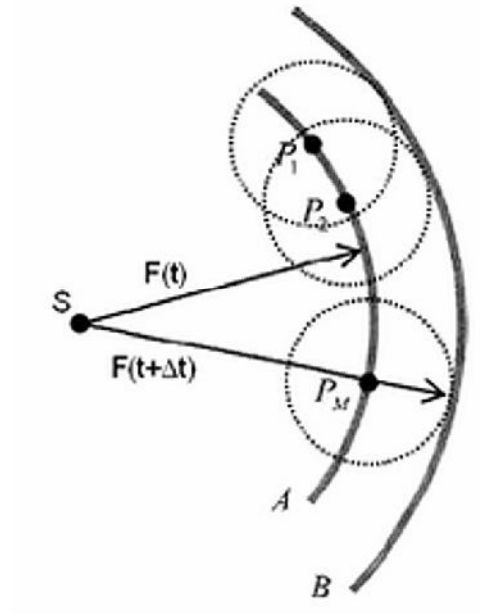


Fig. 2.3 - Principio di Huygens: propagazione di un fronte d'onda

Nell'ipotesi di una sorgente puntiforme il suono si propaga con un fronte d'onda sferico avente per centro la sorgente e raggio crescente con l'avanzare del fronte d'onda (Fig. 2.4).

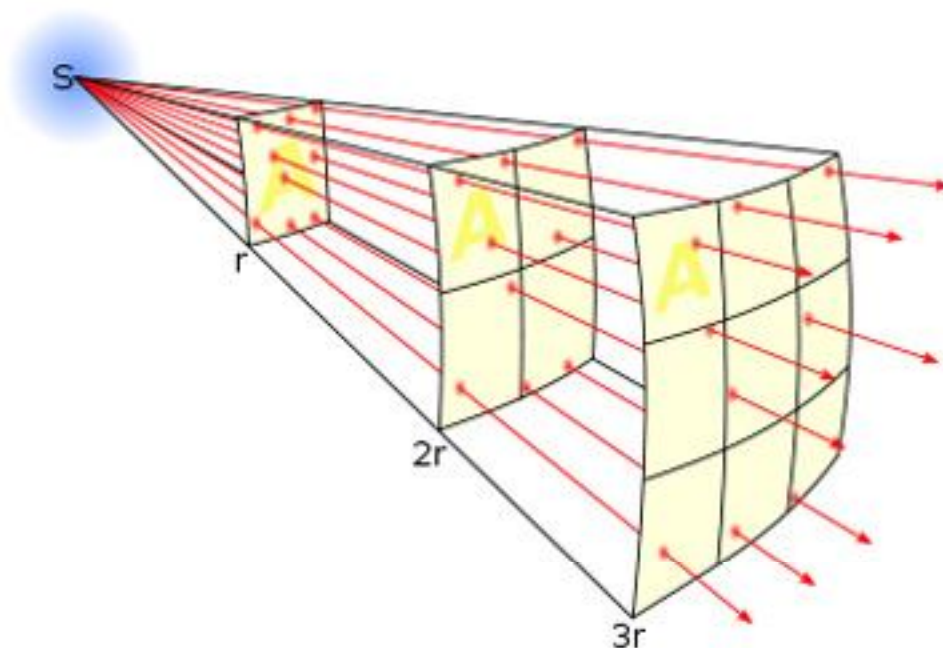


Fig. 2.4 - Legge della divergenza geometrica per la propagazione del suono

In termini pratici ciò significa che raddoppiando la distanza dalla sorgente si ottiene un'attenuazione del livello di intensità sonora di 6 dB.

2.1.2. I suoni complessi

Finora si è visto come una sorgente che si muova di moto armonico generi un suono caratterizzato da un'unica pulsazione, e quindi con una sola componente di frequenza. Per questo motivo i suoni generati da una sorgente che si muove di moto armonico sono detti suoni puri. Suoni ad una sola frequenza, tuttavia, costituiscono un'idealizzazione che non trova, in pratica, molti riscontri: i suoni che noi percepiamo sono molto più complessi.

Anche un suono complesso può essere periodico; se scomponiamo tale suono nelle sue componenti fondamentali scopriamo che esso è dato dalla combinazione di diverse forme d'onda sinusoidali che stanno fra loro in relazione armonica, ovvero hanno lunghez-

ze d'onda che sono multipli interi della frequenza fondamentale, che è quella avente periodo maggiore (Fig. 2.5). L'andamento nel tempo di una forma d'onda complessa dipende dall'ampiezza relativa delle componenti armoniche e della fondamentale e dalla posizione temporale di ogni armonica rispetto alle altre, ovvero dalla loro fase. La fase ha la dimensione di un angolo.

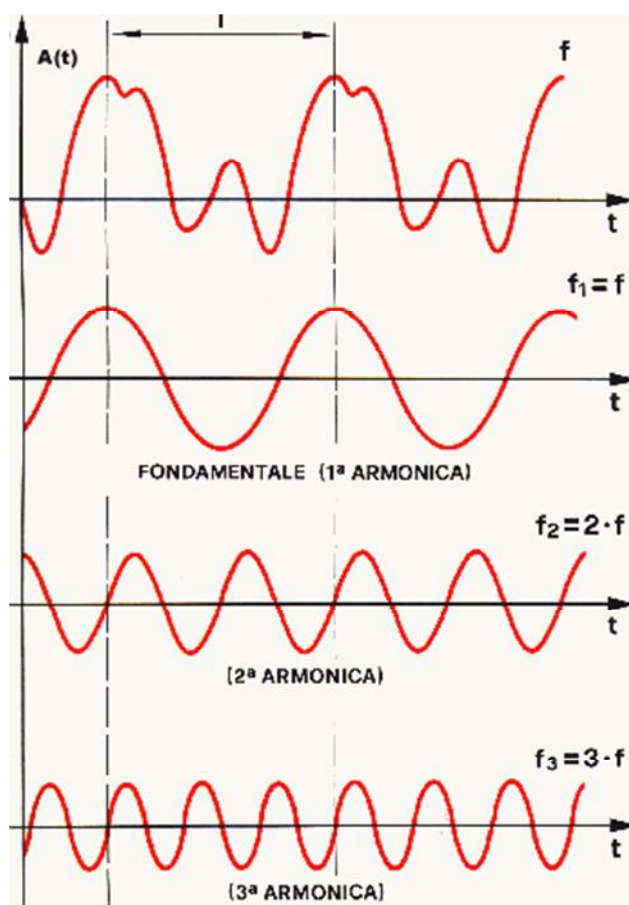


Fig. 2.5 - Una forma d'onda periodica complessa e le componenti armoniche sinusoidali nelle quali è possibile scomporla

Il campo sonoro udibile umano, come detto, si estende dai 20 Hz ai 20 kHz. L'orecchio però non è in grado di percepire tutte le frequenze allo stesso modo quindi si è interessati a valutare non tanto il livello sonoro complessivo, cioè l'energia totale del suono, bensì la sua distribuzione alle varie frequenze; infatti i fenomeni acustici sono fenomeni tipicamente spettrali, ovvero i loro effetti sono funzione della frequenza oltre che del contenuto energetico.

Le informazioni relative alla composizione di un suono complesso possono essere rappresentate in un diagramma ampiezza/frequenza che prende il nome di spettro di am-

piezza (Fig. 2.6.e). Nello spettro ogni linea rappresenta una differente armonica del suono complesso: l'ampiezza dell'armonica è data dall'altezza della linea, mentre la sua frequenza è data dalla posizione della linea sull'asse delle ascisse. Le informazioni riguardanti la fase delle varie armoniche sono contenute nel diagramma dello spettro di fase (Fig. 2.6.f).

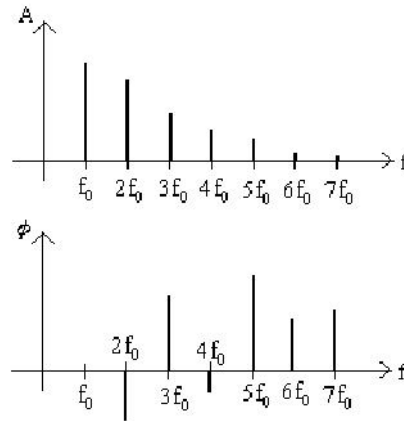


Fig. 2.6 - (sopra) Lo spettro di ampiezza e (sotto) lo spettro di fase

La rappresentazione della forma d'onda nel dominio del tempo è equivalente a quella riportata nel dominio delle frequenze. Le prove di questa importante considerazione sono state fornite da Fourier: la separazione di una forma d'onda complessa nelle sue componenti sinusoidali si dice analisi di Fourier, mentre il procedimento inverso, che permette di ricostruire (sintetizzare) la forma d'onda si dice sintesi di Fourier. Il processo che permette di convertire le informazioni dal dominio del tempo a quello della frequenza e viceversa si dice trasformazione di Fourier.

Se consideriamo una forma d'onda qualsiasi caratterizzata da un certo periodo (Fig. 7.6.a), lo spettro di quest'onda consiste, come è già stato accennato, in una serie armonica di componenti. Aumentando la frequenza della forma d'onda diminuisce il periodo, cosicché i picchi periodici vengono a trovarsi più vicini nel dominio del tempo; nel dominio della frequenza invece la fondamentale si sposterà verso destra e le armoniche resteranno sempre spaziate fra loro di multipli interi della frequenza fondamentale (Fig. 2.7.b e Fig. 2.7.c). L'effetto globale di un aumento della frequenza è quindi un aumento della distanza fra le varie armoniche, così come al diminuire della frequenza la loro distanza diminuisce. Portando questo ragionamento al limite, distanziando infinitamente i picchi ($T \rightarrow \infty$, ovvero $f = 0$) lo spazio fra le armoniche svanisce (Fig. 2.7.d). Possiamo dunque affermare che un impulso discontinuo o aperiodico ha uno spettro continuo.

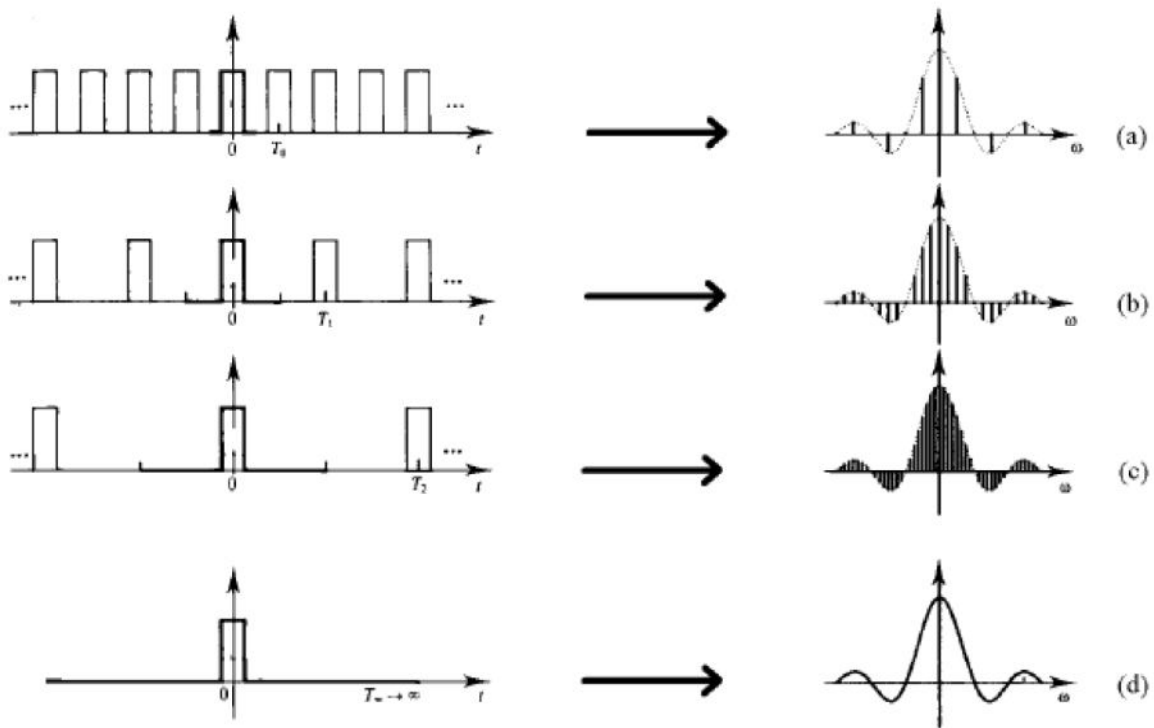


Fig. 2.7 - Rapporto fra lo spettro di ampiezza di un'onda periodica ed il suo periodo: all'aumentare del periodo le linee dello spettro si fanno sempre più ravvicinate, fino alla situazione limite di un unico impulso aperiodico

2.1.3. Grandezze acustiche

Come detto, il suono è una sensazione soggettiva causata dalle fluttuazioni della pressione dell'aria attorno al valore della pressione atmosferica al passaggio di un'onda di compressione e rarefazione. Tali fluttuazioni sono generate da un corpo vibrante posto all'interno di un mezzo elastico, le cui particelle non subiscono degli spostamenti permanenti, ma si muovono attorno alla loro posizione di equilibrio, trasferendo energia alle particelle adiacenti. In un punto del campo sonoro, la pressione varia al variare del tempo con una legge sinusoidale:

$$p(t) = p_{max} \cdot \sin(\omega t + \vartheta) \quad (2.7)$$

Dove: p = differenza tra pressione e pressione atmosferica;

t = tempo;

ω = pulsazione;

φ = fase, ossia il valore dell'argomento per $t = 0$.

Il suono che ha una funzione $p - t$ a forma di senoide corrisponde ad un suono puro.

Nell'acustica applicata viene definita pressione sonora la variazione media di pressione rispetto alla pressione atmosferica e, per avere una variazione media significativa, si fa riferimento al valore efficace, cioè al valore quadratico medio delle differenze tra pressione totale e pressione atmosferica.

Si definisce allora pressione efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2.8)$$

che per i suoni puri diventa:

$$p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

Il valore efficace della variazione di pressione dovuta alle onde sonore è detto semplicemente pressione sonora.

Per la propagazione del suono è necessaria una certa energia per ottenere uno spostamento delle particelle d'aria attorno alla loro posizione d'equilibrio. Per ottenere un raddoppio dello spostamento occorre raddoppiare la differenza di pressione, ovvero raddoppiare la forza impressa alle particelle; dal momento che il lavoro è il prodotto della forza per la distanza, l'energia sonora è proporzionale al quadrato dello spostamento delle particelle d'aria oppure, in termini più corretti, al quadrato della pressione sonora p (che si misura in Pascal).

L'energia sonora viene proiettata dalla sorgente nello spazio circostante ad essa; l'energia trasmessa nell'unità di tempo si dice potenza sonora W (misurata in Watt), mentre la potenza sonora che attraversa una superficie di area unitaria perpendicolarmente ad una direzione data si dice intensità sonora I (misurata in W/m^2): anche l'intensità sonora è proporzionale al quadrato della pressione sonora (Fig. 2.8).

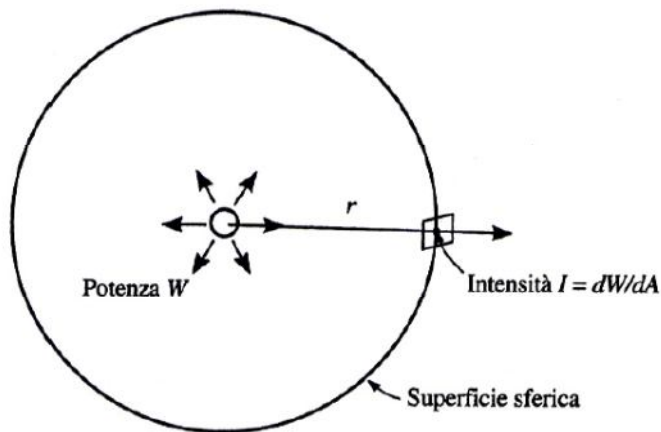


Fig. 2.8 - Intensità e potenza sonora per una sorgente puntiforme ed una superficie di contenimento sferica

Un'altra importante grandezza è la densità di energia sonora D , definita come l'energia sonora che, in un dato istante, risulta localizzata nell'unità di volume circostante ad un punto assegnato del mezzo di propagazione. Poiché tale definizione, diversamente da quella di intensità, non fa riferimento ad una direzione di propagazione, il suo uso è concettualmente corretto anche quando nella zona di spazio in esame coesistono contemporaneamente più onde sonore che si propagano in direzioni diverse, come avviene spesso negli ambienti chiusi.

Le grandezze sopra citate non vengono mai espresse per mezzo del loro valore bensì come logaritmo del rapporto fra il loro valore ed un valore di riferimento fissato convenzionalmente; tale rapporto si misura in decibel (dB):

Livello di pressione sonora L_p

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (2.10)$$

dove p_0 è la minima pressione udibile alla frequenza di 1000 Hz ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa).

Livello di potenza sonora L_w

$$L_w = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (2.11)$$

dove W_0 è la potenza sonora di riferimento (10^{-12} Watt).

Livello di intensità sonora L_j

$$L_j = 10 \cdot \log_{10} \frac{J}{J_0} \quad (2.12)$$

dove J_0 è l'intensità sonora di riferimento (10^{-12} W/m²).

Livello di densità sonora L_D

$$L_D = 10 \cdot \log_{10} \frac{D}{D_0} \quad (2.13)$$

dove D_0 è la densità sonora di riferimento ($3 \cdot 10^{-15}$ J/m³).

In condizioni ambientali normali ($p = p_{atm}$; $t = 20^\circ$ C) si ha che $L_p \approx L_j \approx L_D$.

Nella seguente tabella sono riportati alcuni valori della pressione sonora e i corrispondenti livelli di pressione, espressi in dB.

LIVELLO [dB]	POTENZA [W]	PRESSIONE [Pa]
170	10^5	$6,3 \cdot 10^3$
160	10^4	$2,0 \cdot 10^3$
150	10^3	$6,3 \cdot 10^2$
140	10^2	$2,0 \cdot 10^2$
130	10	$6,3 \cdot 10$
120	1	$2,0 \cdot 10$
110	10^{-1}	6,3
100	10^{-2}	2,0
90	10^{-3}	$6,3 \cdot 10^{-1}$
80	10^{-4}	$2,0 \cdot 10^{-1}$
70	10^{-5}	$6,3 \cdot 10^{-2}$
60	10^{-6}	$2,0 \cdot 10^{-2}$
50	10^{-7}	$6,3 \cdot 10^{-3}$
40	10^{-8}	$2,0 \cdot 10^{-3}$
30	10^{-9}	$6,3 \cdot 10^{-4}$
20	10^{-10}	$2,0 \cdot 10^{-4}$
10	10^{-11}	$6,3 \cdot 10^{-5}$
0	10^{-12}	$2,0 \cdot 10^{-5}$

Tab. 2.2 – Scala di livello di pressione sonora in dB

2.1.4. Riflessione, diffrazione ed interferenza

Riflessione

Una sorgente sonora che non sia in presenza di alcun ostacolo si dice in campo libero perché può irradiare le onde sonore in qualsiasi direzione senza che queste vengano deviate o modificate. Nella grande maggioranza dei casi le onde sonore incontrano degli ostacoli sul loro percorso in modo che la loro naturale propagazione viene modificata.

Il fenomeno è di natura ondulatoria e dipende dalla lunghezza d'onda. Se le dimensioni dell'ostacolo o di una qualsiasi superficie sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora e le irregolarità presenti sulla superficie sono molto piccole sempre rispetto alla lunghezza d'onda, l'interazione tende alla riflessione speculare. Se la superficie non è sufficientemente liscia ma presenta un certo numero di irregolarità di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda allora la riflessione è diffusa (diffusione) e, nel caso ideale,

segue la legge di Lambert o legge del coseno (Fig. 2.9). Nella realtà possiamo avere diverse forme come illustrato in Fig. 2.10.

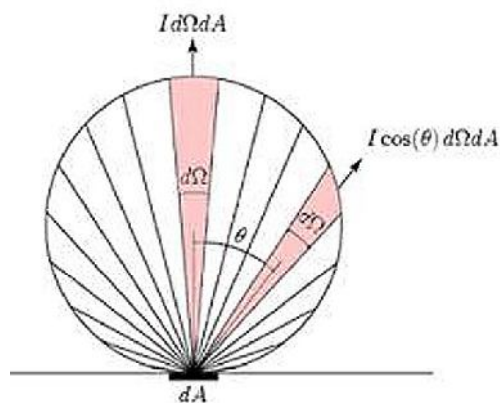


Figura 2.9 - Legge di Lambert o legge del coseno

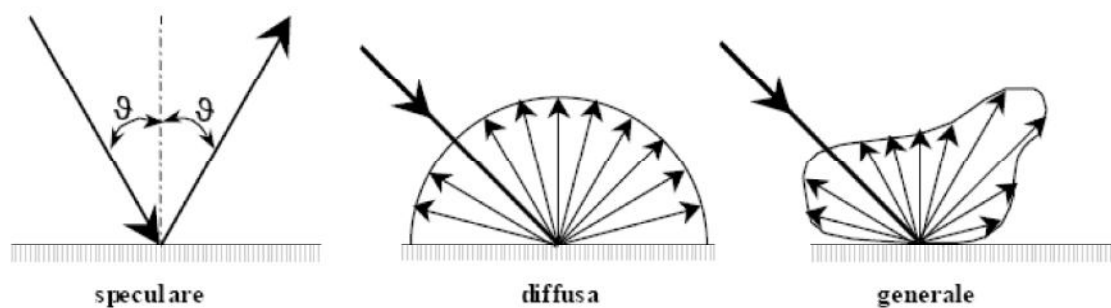


Figura 2.10 - Interazioni dell'onda con una superficie

È interessante considerare il caso di una riflessione regolare su superfici lisce rispettivamente concave o convesse (Fig. 2.11). Si osservi come, nel primo caso, si verifichi una concentrazione dei fronti d'onda, mentre nel secondo caso si abbia una loro dispersione su un'area più ampia.



Figura 2.11 - Riflessione su superficie concava (concentrazione dei fronti d'onda) e superficie convessa (dispersione dei fronti d'onda)

Diffrazione

Quando un'onda sonora incontra un ostacolo, che è più piccolo rispetto alla sua lunghezza d'onda, si comporta come se l'ostacolo non esistesse formando una piccola zona d'ombra. Al contrario se la frequenza del suono è sufficientemente alta e la lunghezza d'onda è perciò breve, si forma una zona d'ombra notevole. Gli effetti dovuti alla diffrazione possono essere suddivisi in tre gruppi: quelli dovuti alla presenza di una barriera, quelli causati da uno spigolo e gli ultimi dovuti ad una apertura (Fig. 2.12).

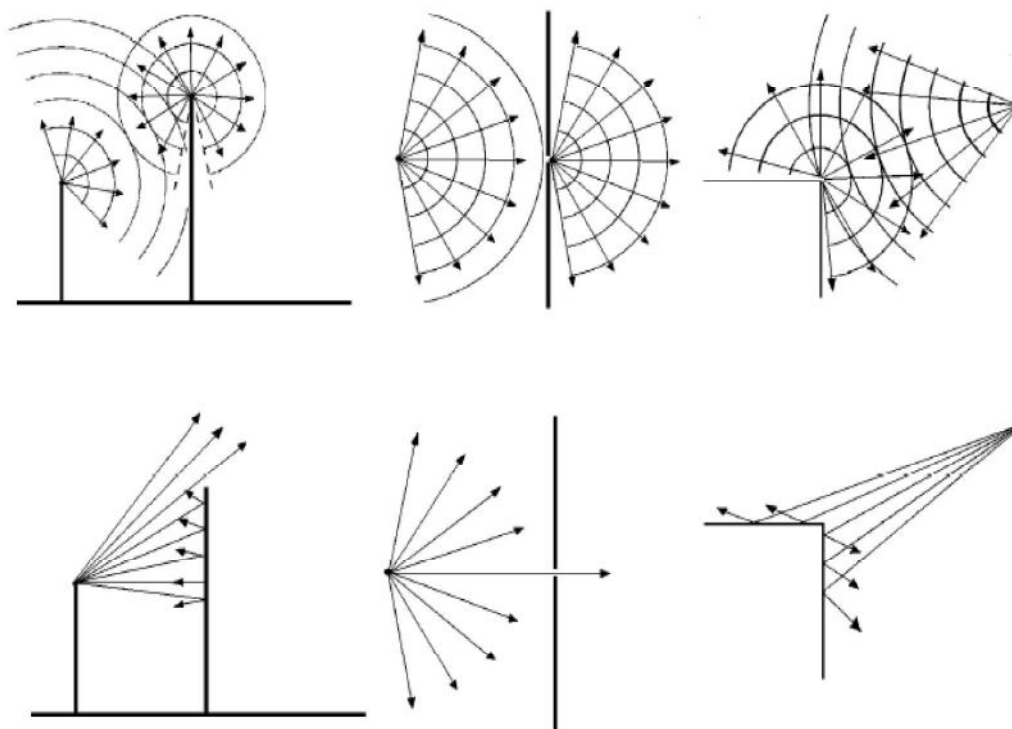


Figura 2.12 - Diffrazione dovuta ad un barriera che causa la presenza del suono dietro alla barriera stessa; diffrazione causata da un'apertura con perdita di energia; diffrazione per la presenza di uno spigolo o di un angolo con conseguente riflessione o diffusione

Interferenza

Consideriamo due onde sonore della stessa ampiezza e frequenza che giungono ad un ricevitore da due direzioni differenti: se le onde hanno pure la stessa fase il risultato è un'onda di ugual frequenza ed ampiezza doppia (interferenza costruttiva), mentre se le due onde sono fuori fase fra loro (ovvero sfasate di 180°) il risultato è la perfetta cancellazione reciproca (interferenza distruttiva). Nei casi di interesse pratico si verifica interferenza fra l'onda diretta proveniente dalla sorgente e le varie componenti riflesse che giungono ad un determinato ascoltatore; in questo caso l'ampiezza dell'onda riflessa è minore di quella diretta a causa dell'energia assorbita dalla superficie e dall'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica a causa della maggior distanza percorsa. Il tipo di interferenza (distruttiva o costruttiva) dipende dalla differenza di fase creata dal differente percorso delle due onde ovvero dal rapporto fra la differenza di distanza percorsa e la metà della lunghezza d'onda: se tale rapporto è un numero intero pari allora l'interferenza è costruttiva, se il rapporto è un intero dispari l'interferenza è di tipo distruttivo.

2.2. Il campo acustico all'interno di spazi chiusi

Il campo acustico in un ambiente fisicamente confinato differisce da quello di uno spazio aperto per la presenza, accanto alle onde sonore dirette (sorgente - ascoltatore), di onde sonore riflesse in vario modo dalle superfici delimitanti l'ambiente (Fig. 2.13).

Gli elementi presenti all'interno di un ambiente chiuso (pareti, arredamenti, persone, ecc.) condizionano la propagazione con effetti importanti sull'acustica dell'ambiente stesso poiché assorbono in diversa misura l'energia sonora che incide su di essi.

Il primo fronte d'onda emesso da una qualsiasi sorgente che colpisce le orecchie dell'ascoltatore viene definito suono diretto ed è quel suono che ha viaggiato senza subire l'influenza dell'ambiente esterno, in quanto ha percorso la minima distanza possibile tra sorgente e ricevitore.

I fronti d'onda successivi costituiscono il campo riverberante e sono dovuti al complesso delle interazioni tra l'onda sonora e le superfici che delimitano l'ambiente o gli oggetti in esso contenuti: oltre alle caratteristiche della sorgente, assume importanza l'attitudine delle superfici e degli oggetti presenti a riflettere il suono. In prossimità della sorgente è prevalente il campo diretto mentre ad una certa distanza prevale quello riverberante (diffuso).

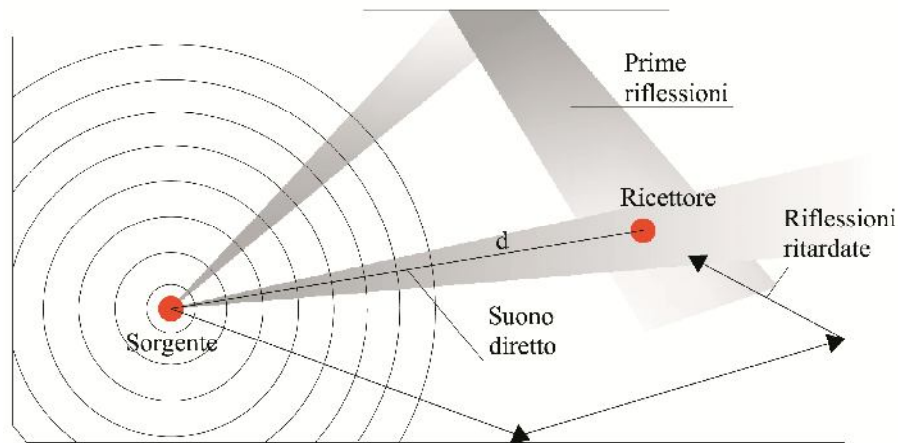


Fig. 2.13- Propagazione del suono all'interno di una stanza a forma rettangolare

L'onda diretta si comporta in maniera analoga alla propagazione sonora in campo libero, ossia decade per semplice divergenza geometrica, con una riduzione di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

Il suono diretto è caratterizzato da un'intensità acustica inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente e viene contemporaneamente integrato dalle prime riflessioni provenienti dalle superfici delimitanti.

L'intensità del campo sonoro è pari a:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.14)$$

dove W è la potenza espressa in Watt e $4\pi r^2$ è l'area della sfera di raggio r , corrispondente alla distanza dalla sorgente del punto in cui si misura il valore; mentre il livello di pressione sonora L_p è espresso dalla seguente formula:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10} r - 11 \quad (2.15)$$

dove L_w è il livello di potenza alla sorgente.

L'energia sonora totale, allora:

$$I_{tot} = \frac{W}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A^*} \quad (2.16)$$

dove il primo valore rappresenta l'intensità del suono diretto e il secondo l'intensità di quello riflesso con A^* che rappresenta l'assorbimento medio della sala, $A^* = \sum a_i S_i$ (a_i = assorbimento singola superficie, S_i = area singola superficie).

Il relativo livello di pressione sonora si esprime come:

$$L_{tot} = 10 \log_{10}(10^{L_p} + 10^{L_r}) \quad (2.17)$$

dove L_p è il livello diretto e L_r quello riflesso,

$$L_r = L_W - 10 \log_{10} A^* + 6 \quad (2.18)$$

Qualunque sia la posizione del ricevitore, l'energia corrispondente al suono diretto dipende dalla distanza dalla sorgente, mentre la riflessa dipende dal cammino percorso dal raggio sonoro, come anche dal grado di assorbimento sonoro dei materiali costituenti le superfici riflettenti.

Per il suono riverberato si distinguono le prime riflessioni, che pervengono all'ascoltatore entro poche decine di millisecondi dopo il suono diretto e che contribuiscono insieme a questo a costituire il segnale utile, dalle successive che risultano mascheranti.

La qualità acustica di una sala è determinata dalle rispettive entità e dalle modalità di sovrapposizione dei due campi sonori, diretto e riflesso. La combinazione ottimale dei due campi varia con il tipo di segnale sonoro da trasmettere nella sala: parlato o musica di vario genere.

Per ottenere una buona ricezione in un ambiente destinato all'ascolto della parola si fa riferimento a requisiti quali l'adeguato livello sonoro (L_p) e la sua uniformità spaziale.

La formula, da usarsi per un campo semiriverberato, che permette di trovare il livello di pressione percepito dall'ascoltatore in presenza di campo sia diretto che diffuso è la seguente:

$$L_p = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R^*} \right) = L_{dir} + L_{riv} \quad (2.19)$$

nella quale il primo termine entro parentesi rappresenta il contributo del campo diretto L_{dir} , con Q fattore di direzionalità (rapporto fra l'intensità sonora in un punto qualsiasi a distanza dalla sorgente e l'intensità sonora che si sarebbe avuta nello stesso punto nel caso in cui la stessa sorgente avesse irradiato uniformemente) e r distanza ascoltatore sorgente, mentre il secondo termine è il contributo del campo riverberato L_{riv} , considerato costante, con R^* costante d'ambiente:

$$R^* = \frac{\sum_i a_i}{1 - \bar{a}} \quad (2.20)$$

dove $\bar{a}$ è il coefficiente di assorbimento medio.

Dalla Fig. 2.14 si può notare che la curva che rappresenta il livello sonoro diretto è una retta decrescente. La curva che rappresenta il livello riverberante invece si stacca dalla curva del livello diretto e decresce fino ad un certo punto dopo di che diventa una retta orizzontale. Queste due curve determinano 3 aree con caratteristiche differenti.

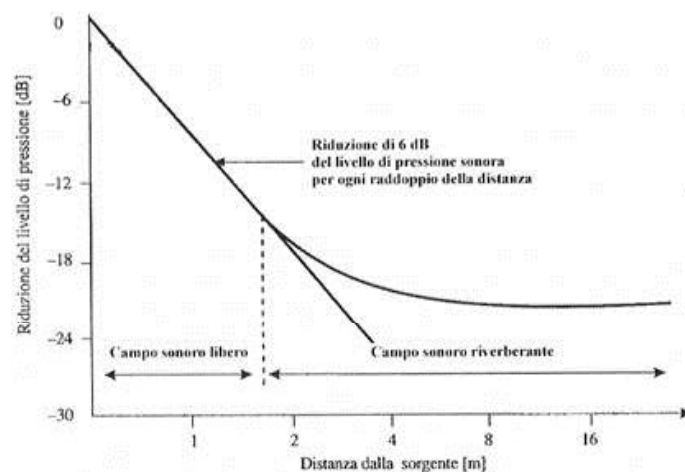


Fig. 2.14 - Riduzione sonora risultante dalla sovrapposizione dei due campi in funzione della distanza

Le tre aree in cui il grafico viene diviso rappresentano rispettivamente:

- campo vicino: precede la retta verticale passante per il punto di intersezione delle due curve; in questa zona per valori superiori di 10 dB a partire dalla retta del livello sonoro riverberante, il campo riverberante è trascurabile;
- campo semi-riverberante: va dal campo vicino fino alla retta verticale passante nel punto di intersezione tra la retta del suono diretto e una retta orizzontale con ordinata costante di 10 dB in meno rispetto alla retta orizzontale del suono riverberante. Nel campo semi-riverberante il livello sonoro diminuisce di 6 dB ogni raddoppio di distanza;
- campo diffuso: va dal campo semi-riverberante in poi. In questa area il livello di suono diretto è trascurabile.

Le rette del campo riverberante L_{riv} e del campo diretto L_{dir} si intersecano nel punto D_c che rappresenta la distanza critica, per cui $L_{riv} = L_{dir}$. Uguagliando i due livelli, si ottiene:

$$D_c = \sqrt{\left(\frac{Q}{16} \sum_i a_i \cdot S_i\right)} \quad (2.21)$$

La distanza critica è estremamente importante in termini di qualità e comprensione del messaggio che viene riprodotto: entro tale distanza dalla sorgente il suono diretto è predominante sul campo riverberante. Il suono diretto è chiaro, è nitido e porta un'informazione perfettamente intelligibile, viceversa il suono riverberante è confuso. Quindi soprattutto per quanto riguarda la comprensione della parola è importante che l'ascoltatore venga a trovarsi entro la distanza critica dalla sorgente.

In genere i suoni riflessi aiutano l'ascolto perché apportano un livello sonoro più alto. E' però importante non solo l'aspetto quantitativo di suono che arriva al ricevitore, ma anche quello qualitativo. Agli ascoltatori devono arrivare suoni con livello sufficientemente alto: in linea di massima si ritiene che l'ascoltatore più sfavorito debba ricevere un livello di almeno 45 dB. Il livello di potenza sonora per la voce umana nel parlato normale è in media attorno ai 70 dB. I valori più alti di potenza sonora competono alle vocali, valori più bassi alle consonanti. Benché un oratore cerchi di adattare la forza della propria voce alle esigenze della sala con un incremento che può arrivare fino a 6-12 dB sul parlato normale, è evidente che oltre una certa distanza (attorno a 20-30 metri) il suono diretto giunge con un livello troppo debole per un'audizione soddisfacente.

2.3. Il tempo di riverberazione

Con riferimento alla Figura 2.15, si consideri una sala vuota di forma semplice, dove si trovano una sorgente sonora S ed un ricevitore del segnale sonoro R . Il percorso più breve che l'energia sonora può compiere per andare da S ad R è, evidentemente, quello diretto d .

Vi sono, tuttavia, infiniti altri percorsi alternativi, del tipo $r_1, r_2, r_3, \dots$ che comportano una o più riflessioni successive sulle pareti di confine. Per semplicità, nella figura si sono rappresentate riflessioni di tipo speculare ma, nella realtà, queste riflessioni saranno di tipo più o meno diffuso.

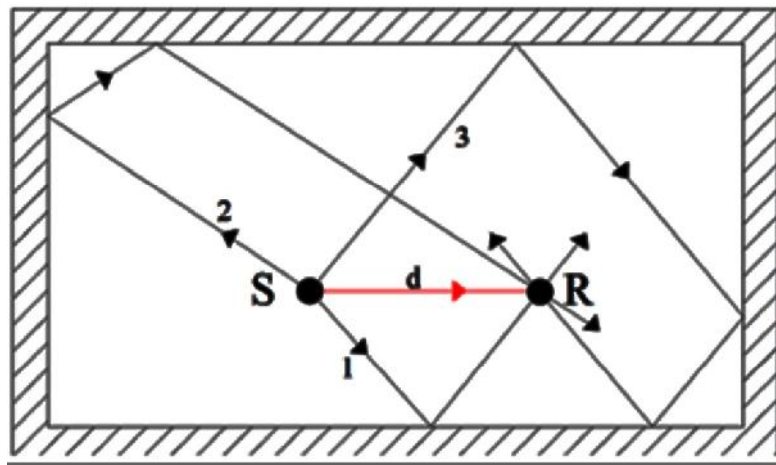


Figura 2.15 – Riflessioni multiple in una sala

Ciò premesso, con riferimento alla Figura 2.16 si supponga che la sorgente S emetta un suono con potenza sonora costante W per un intervallo di tempo $OO' = \Delta t$, e poi cessi di funzionare.

In corrispondenza al ricevitore R la densità d'energia sonora $D(t)$ varia nel tempo. Il primo contributo energetico che giunge in R , quello dell'onda diretta, arriva dopo un intervallo di tempo $OA = d/c$ dove d è la distanza SR tra la sorgente ed il ricevitore. Perciò nell'intervallo OA la densità sonora in R è ancora uguale a zero, anche se la sorgente ha iniziato ad emettere energia. L'incremento della densità d'energia sonora dovuto al suono diretto è rappresentato dal segmento AB .

Successivamente, fino all'arrivo della riflessione che ha seguito il percorso r_1 , e quindi per un intervallo di tempo di ampiezza pari a BC , il valore della densità d'energia sonora in R resta costante. L'arrivo della riflessione induce un incremento di densità

d'energia sonora pari a CD . Il processo si ripete all'arrivo in R dei contributi delle onde di prima riflessione che hanno seguito i percorsi $r_2, r_3, \dots$ più lunghi di r_1 , e poi si ripete ancora all'arrivo delle onde che hanno subito 2, 3, $\dots$, n riflessioni. I contributi ulteriori, tuttavia, sono sempre più ridotti a causa degli assorbimenti d'energia sonora ad ogni riflessione e dell'attenuazione delle intensità per la divergenza legata alla maggiore lunghezza dei percorsi seguiti.

I diversi incrementi producono quindi una crescita della densità d'energia sonora a gradini, con incrementi sempre più piccoli sino a giungere asintoticamente ad un valore limite $D(\infty)$ praticamente uguale alla densità d'energia sonora in regime stazionario. Il regime stazionario vero e proprio viene, evidentemente, raggiunto dopo un tempo infinito ma, ai fini pratici, basta che la sorgente continui ad erogare energia sonora per un tempo sufficiente per arrivare ad un valore della densità d'energia sonora molto prossimo a quello finale. In quel momento il transitorio d'attacco si può considerare concluso e, da quel momento, la densità d'energia sonora resta praticamente costante. Si noti come, nel punto R , la densità d'energia sonora a regime $D(\infty)$ sia alquanto maggiore, grazie alla riverberazione, della densità d'energia sonora dovuta al solo contributo del suono diretto, pari in questo caso ad AB .

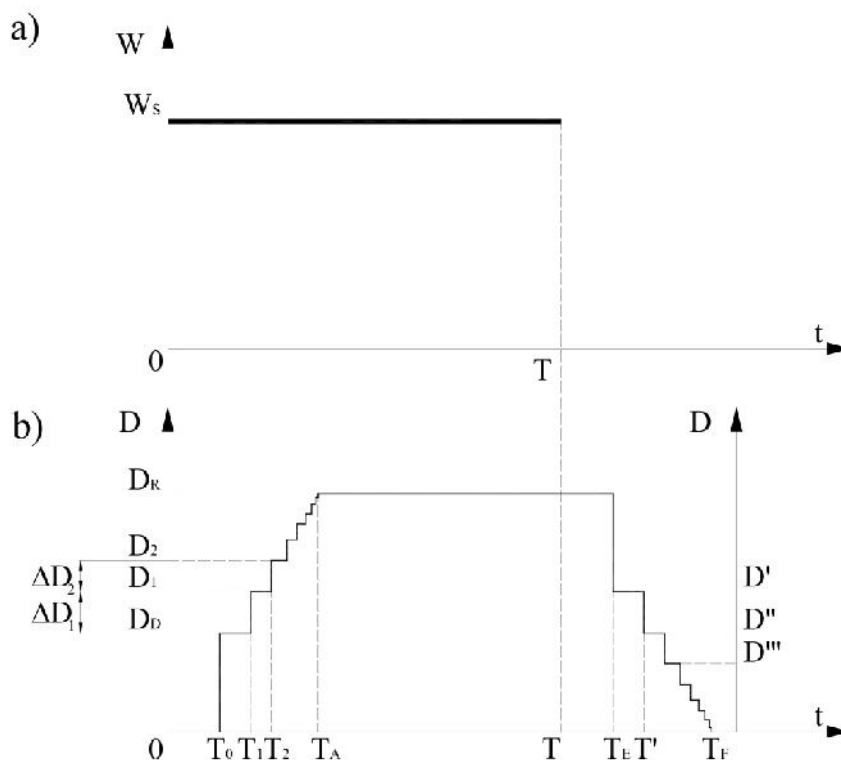


Figura 2.16 - Potenza sonora irradiata dalla sorgente S e densità di energia rilevata in funzione del tempo in R

Alla fine dell'intervallo di tempo OO' la sorgente emette l'ultimo contributo energetico, che impiega il tempo $O'A'$ per raggiungere R . Pertanto il valore di regime $D(\infty)$ si mantiene fino all'istante A' in cui viene a mancare il contributo del suono diretto. Da quel momento il fenomeno iniziale si riproduce in senso inverso, con gli stessi valori assoluti delle lunghezze dei segmenti prima considerati, mentre la densità d'energia sonora tende asintoticamente a zero. Il processo di decadimento della densità d'energia sonora, collegato al transitorio d'estinzione, prende il nome di coda sonora (Fig. 2.17).

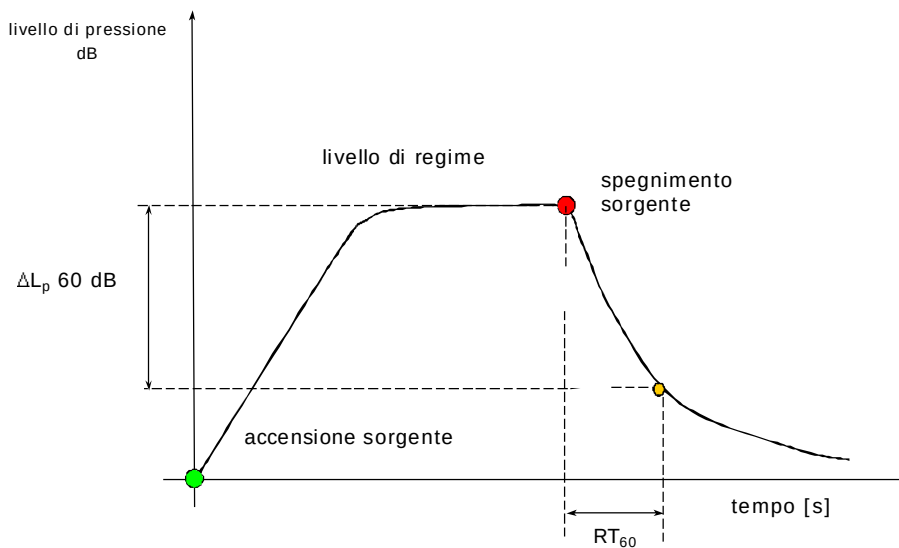


Figura 2.17 – Andamento del tempo di riverberazione

Per caratterizzare quantitativamente la rapidità d'estinzione del campo sonoro riverberato Sabine ha introdotto il parametro del tempo di riverberazione, che rappresenta la durata convenzionale della coda sonora. Esso è definito come il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora nell'ambiente si riduca di 60 dB. Tale riduzione implica una riduzione di un milione di volte del quadrato della pressione sonora efficace, e quindi anche della densità d'energia sonora, rispetto ai valori che tali grandezze avevano all'inizio del transitorio d'estinzione. Lo stesso Sabine ha poi trovato sperimentalmente che il valore del tempo di riverberazione T_{60} così definito è calcolabile in base alla formula:

$$T_{60} = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum_i a_i \cdot S_i} \quad (2.22)$$

Dove: T_{60} = tempo di riverberazione (s);

V = volume dell'ambiente (m^3);

a_i = coefficiente d'assorbimento della superficie i-esima;

S_i = area della superficie i-esima (m^2).

La suddetta formula può anche essere espressa nel seguente modo:

$$T_{60} = 0,16 \cdot \frac{V}{a_m \cdot S} \quad (2.23)$$

Dove: $a_m = \frac{\sum_i a_i S_i}{\sum_i S_i}$ = coefficiente di assorbimento medio.

La (2.23) può essere dimostrata anche teoricamente ammettendo le seguenti ipotesi:

1. stessa legge di variazione di intensità sonora in ogni punto della stanza;
2. diffusione perfetta dell'onda sonora da parte della superficie colpita;
3. percorso compiuto dall'onda tra due punti costante (libero cammino medio);
4. assorbimento dell'energia sonora da parte dell'aria trascurabile;
5. assorbimento continuo dell'energia sonora da parte delle pareti.

Dopo Sabine, Eyring propose una nuova formula basata sull'assorbimento discontinuo da parte delle pareti:

$$T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \ln \frac{1}{1 - a_m}} \quad (2.24)$$

Il valore ottimale del T_{60} in un ambiente chiuso dipende dal volume della sala (Fig. 2.18), dalla destinazione d'uso, dallo spettro di emissione della sorgente e dal tipo di messaggio sonoro che verrà prodotto (Tab. 2.3).

VOLUME [m ³]	TEMPO DI RIVERBERAZIONE T_{60} [s]	
	Musica	Parola
1.000	0,99 – 1,25	0,75 – 0,92
2.500	1,10 – 1,45	0,83 – 1,02
5.000	1,25 – 1,65	0,92 – 1,12
10.000	1,40 – 1,85	0,99 – 1,21
15.000	1,50 – 2,00	1,04 – 1,27
20.000	1,55 – 2,10	1,08 – 1,32
25.000	1,60 – 2,15	1,32 – 1,38

Tab. 2.3 – Tempi di riverberazione ottimali per la musica e la parola al variare del volume per $f = 500$ Hz

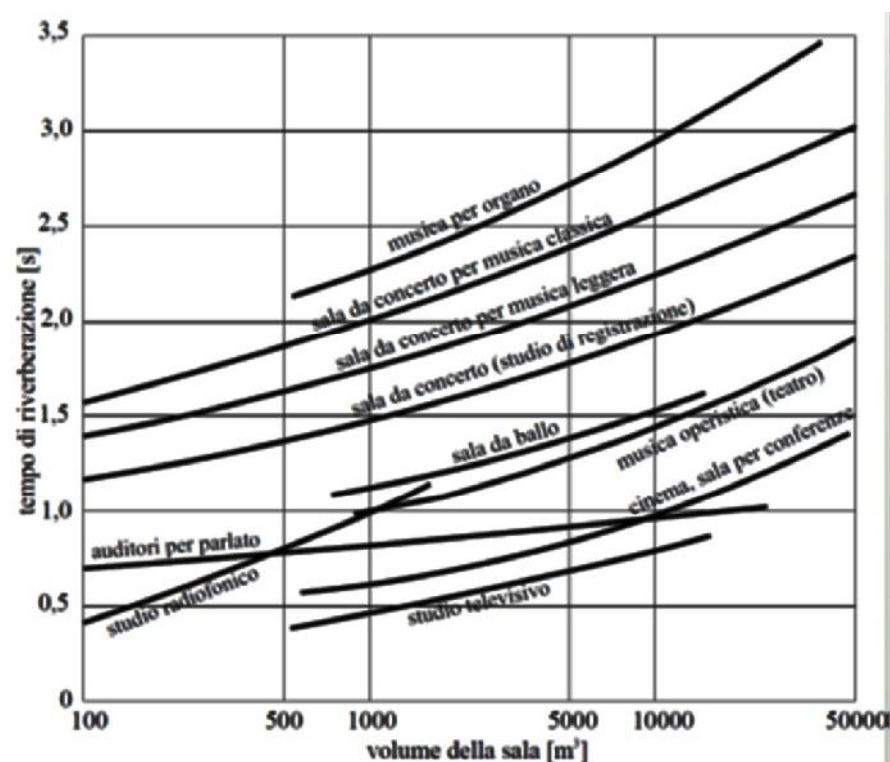


Fig. 2.18 – Valori ottimali del tempo di riverberazione in funzione del volume della sala e della destinazione d'uso

Il fenomeno della riverberazione presenta aspetti positivi e negativi. Infatti, se un certo valore del tempo di riverberazione aiuta a rinforzare il suono diretto e quindi a migliorarne l'ascolto, per contro, un valore eccessivo della coda sonora ne compromette la qualità. Per una buona ricezione, sia nel caso del parlato sia nel caso della musica, è neces-

sario contenere la “coda sonora” (valutando il tempo di riverbero) e assicurare una buona distribuzione spaziale del campo sonoro internamente alla sala in modo tale che tutti gli ascoltatori possano percepire e apprezzare il suono indipendentemente dalla zona dell’ambiente in cui si trovano. Un tempo di riverberazione ottimale rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente in tutti i punti dell’ambiente e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso di riverberazione.

La presenza di persone all’interno dell’ambiente influenza il valore del tempo di riverberazione, poiché determina un aumento dell’assorbimento acustico. È questo il caso dei cinema, auditori e teatri, ossia luoghi in cui l’affluenza di persone è numerosa.

Nella maggior parte dei casi le misure vengono effettuate a sala vuota ben sapendo che i risultati ottenuti non sono del tutto rappresentativi della reale risposta a sala occupata e in quanto tali andranno interpretati opportunamente. Il calcolo dell’assorbimento acustico, in questo caso, può essere compiuto attribuendo ad ogni persona un’area di assorbimento equivalente (A), pari a quelle riportate in Tab. 2.4:

VALORI DEL COEFFICIENTE D’ASSORBIMENTO PER PERSONA					
Frequenza (Hz)					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
Area di assorbimento equivalente (m^2)					
2,5	2,5	2,9	5	5,2	5

Tab. 2.4 – Valori di assorbimento equivalente per persona alle diverse frequenze

Nel caso, invece, l’intera superficie sia totalmente occupata dal pubblico il coefficiente di assorbimento acustico è il seguente (Tab. 2.5):

SUPERFICIE TOTALMENTE OCCUPATA DAL PUBBLICO					
Frequenza (Hz)					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
Coefficiente di assorbimento					
0,39	0,57	0,8	0,94	0,92	0,87

Tab. 2.5– Valori di assorbimento in caso di superficie interamente occupata dal pubblico alle diverse frequenze

CAPITOLO 3 – ARCHITETTURA E ACUSTICA

3.1. L'ascolto del suono nelle sale musicali

La piena comprensione ed ottimizzazione dell'acustica delle sale musicali possono essere raggiunte tramite la conoscenza della risposta acustica della sala stessa ad un segnale di brevissima durata generato da una sorgente posizionata sul palco (impulso).

Infatti, secondo il teorema di Duhamel, nota la risposta all'impulso, si può calcolare la risposta acustica ad un qualunque altro segnale diverso. L'ascoltatore sente per primo il segnale dovuto all'onda diretta che attraversa lo spazio in linea retta dalla sorgente fino alle orecchie. Successivamente seguono una serie di riflessioni dette immediate (*early*) provenienti dalle pareti orizzontali e verticali della sala. I suoni riflessi devono percorrere un cammino maggiore rispetto alle onde dirette e pertanto perdono via via di intensità risultando meno intense del suono diretto (a meno che non si verifichino effetti di concentrazione del suono).

L'ecogramma permette di rappresentare questi fenomeni come in Fig. 3.1, ponendo in ascisse il tempo (solitamente in ms) e in ordinate il livello sonoro delle onde acustiche. Al tempo $t = 0$, in coincidenza con l'origine degli assi, si trova l'onda diretta, in modo da facilitare la lettura dei tempi relativi delle riflessioni successive.

Se il suono emesso dalla sorgente è un impulso allora l'ecogramma rappresenta la risposta impulsiva della sala. In pratica l'ascoltatore sente il suono diretto ed una serie di riflessioni successive il cui percorso geometrico può essere perfettamente definito e calcolato geometricamente. Il suono che non viene del tutto assorbito continua ad essere riflesso e il numero di riflessioni immediate può essere notevolmente elevato (vedi Fig. 3.2).

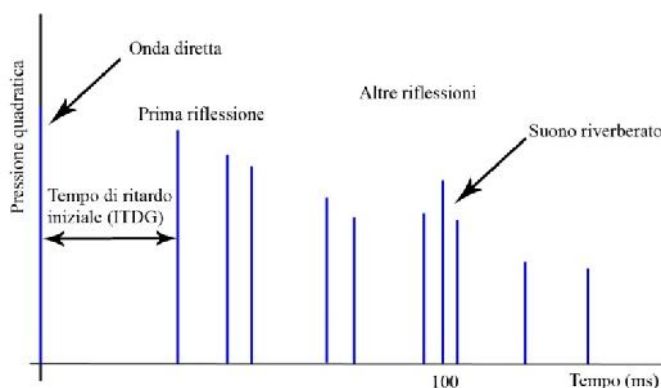


Fig. 3.1 – Ecogramma d tempo di ritardo iniziale

Nelle sale di grandi dimensioni il numero di riflessioni che arrivano 100 ms dopo il suono diretto è così elevato che non è più possibile distinguere le singole riflessioni. Questo tempo limite risulta inferiore per sale di minori dimensioni. Il suono oltre 100 ms dal suono diretto è detto suono riverberato: esso decade solitamente in modo lineare nel tempo. Su questa caduta di livello viene calcolato il tempo di riverberazione. In definitiva il suono ricevuto dall'ascoltatore può essere suddiviso in tre componenti:

- il suono diretto;
- le riflessioni immediate;
- le riflessioni ritardate (e riverberate).

Spesso le tecniche di progettazione di un auditorium coinvolgono solo una delle tre componenti sonore, piuttosto che tutte e tre. L'orecchio però riesce a percepire numerosi aspetti della risposta impulsiva, primo fra tutti il tempo di riverberazione. Le ragioni della sua importanza sono illustrate in Fig. 3.3. La natura temporale della musica e del linguaggio parlato è descrivibile con una serie di impulsi in successione del tipo indicato nelle Fig. 3.3.a e 3.3.b.

Come si nota in Fig. 3.4.a, se il tempo di riverberazione è basso, i singoli fenomeni acustici sono percepiti singolarmente; se invece il tempo di riverberazione è alto (Fig. 3.3.b) si ha il fenomeno di mascheramento di alcuni eventi acustici rispetto agli altri.

Esiste un tempo di riverberazione ottimo che viene determinato in funzione dell'utilizzo della sala e che in generale può essere indicato pari a 2 secondi per musica sinfonica e 1 secondo per linguaggio parlato.

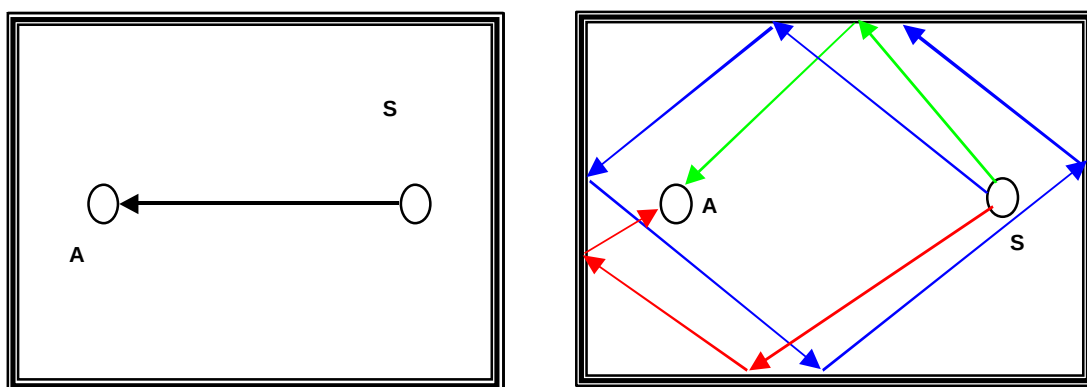


Fig. 3.2 – Suono diretto e riflessioni multiple di una sala

Come è intuibile, il giudizio soggettivo dell'acustica di una sala, però, non dipende solo dal tempo di riverberazione, ma da molti altri fattori: per il linguaggio parlato, ad

esempio, è importante il rapporto di energia che arriva per effetto delle riflessioni vicine rispetto all'energia totale (vedi la definizione dell'indice di definizione di Thiele che prende in considerazione come tempo limite i primi 50 ms).

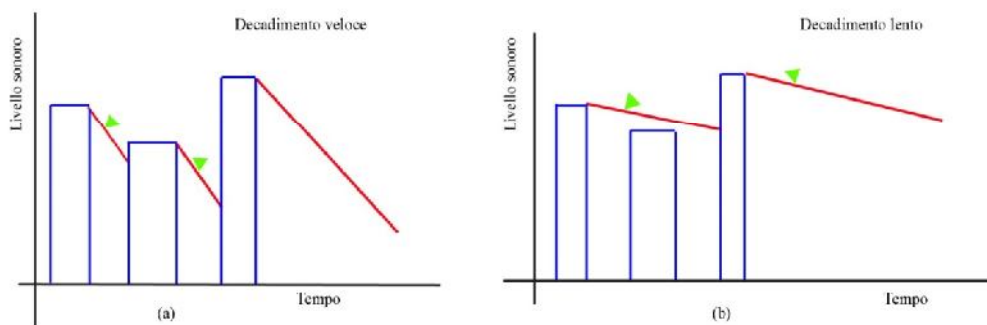


Fig. 3.3 – Fenomeno del mascheramento per riverberazione

Il linguaggio parlato è tanto più intelligibile quanto più questo rapporto è elevato e pertanto in termini progettuali occorre favorire le riflessioni immediate per avere migliori condizioni di ascolto.

Per la musica invece, parametri determinanti sono la chiarezza e il livello sonoro totale all'orecchio dell'ascoltatore. Questo dipende sia dal tipo di musica prodotta sia, a parità di condizioni, dalle dimensioni e dal progetto della sala. Tutte le informazioni relative a intelligibilità, chiarezza e intensità possono essere desunte, come detto, dalla risposta impulsiva della sala: sfortunatamente quest'ultima non può essere facilmente interpretata; essa può indicare, visivamente, la presenza di eco o di riflessioni lontane, ma non risulta immediatamente affidabile per il calcolo delle riflessioni vicine.

3.2. Interpretazione uditiva delle riflessioni acustiche

In una grande sala musicale, entro 1 secondo dal suono diretto, l'ascoltatore riceve circa 8000 riflessioni. Ciascuna riflessione è caratterizzata da:

- un livello sonoro;
- un ritardo rispetto al suono diretto;
- una direzione di provenienza.

L'orecchio umano è altamente selettivo nell'interpretazione di questi dati, come dimostrato dagli numerosi studi in questo settore condotti da M. Schroeder, Y. Ando e M. Barron.

In primo luogo l'orecchio deve stabilire con esattezza (almeno in senso psicologico) la direzione di provenienza del suono. Per fare ciò esso è in grado di isolare l'onda diretta e di localizzare il primo fronte d'onda ricevuto, giocando sulle differenze di tempo nella ricezione del segnale nell'orecchio destro e sinistro. Poiché le dimensioni della testa interagiscono solo con alcune frequenze, i meccanismi di localizzazione della direzione sono diversi a seconda della lunghezza d'onda del suono emesso. Per la localizzazione laterale del suono si utilizza, per basse frequenze, la differenza di tempo nella ricezione dei due segnali alle due orecchie, mentre per le alte frequenze viene utilizzata la differenza di livello. Questi meccanismi sono però di poca utilità per le onde provenienti da piani verticali perché le asimmetrie nelle orecchie vengono meno. J. Blauert (1983) ha dimostrato che per le onde in piani verticali viene utilizzato un meccanismo di distorsione della frequenza del segnale dovuta al padiglione uditivo esterno.

A causa del fenomeno della divergenza geometrica, l'onda diretta diminuisce di intensità con il quadrato della distanza dalla sorgente sonora. Tuttavia l'orecchio è in grado, al fine dell'intelligibilità e della chiarezza musicale, di combinare insieme l'energia dell'onda diretta e delle prime riflessioni laterali. Esiste un tempo limite utile per questa somma di energia che dipende dal meccanismo di ascolto e dal tipo di linguaggio (parlato o musicale). Valori tipici sono:

- 50 ms per linguaggio parlato;
- 80 ms per linguaggio musicale.

E' semplice dimostrare l'importanza del meccanismo di somma dell'energia diretta e delle prime riflessioni laterali, riportando qualche cifra: in una grande sala musicale il suono diretto diminuisce di 12 dB passando dai 10 ai 40 m dalla sorgente, mentre l'energia delle onde riflesse vicine entro 80 ms diminuisce tipicamente di 5 dB (vedi Fig. 3.4).

In base a quanto detto, si evidenzia l'importanza di curare la distribuzione delle riflessioni immediate in tutti i posti delle sale, soprattutto per quelle di maggiori dimensioni.

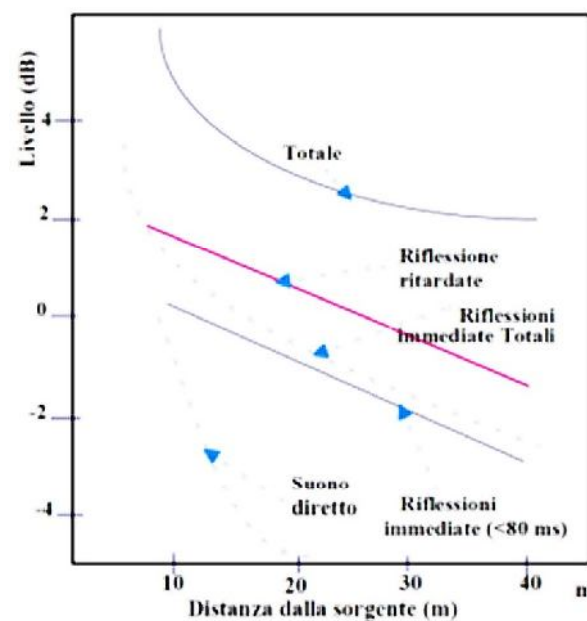


Fig. 3.4 – Effetti delle riflessioni immediate

3.3. Dimensioni, volume e forma

Si è già sottolineato come il tempo di riverberazione (fin dall'inizio intuito da Sabine come parametro energetico) sia rimasto per lungo tempo l'unico parametro utilizzato per analizzare l'acustica delle sale ed anche l'unico ad essere misurabile con relativa facilità. In realtà una progettazione che tenga conto del solo tempo di riverberazione può produrre specifiche generali per il solo volume della sala: la forma che questa assume è scarsamente rilevante e non è considerata nel calcolo dello stesso tempo di riverberazione, così come è irrilevante la presenza di schermi riflettenti o la disposizione delle superfici assorbenti.

Sulla base di queste considerazioni, spesso i progettisti hanno ritenuto di poter scegliere liberamente la forma architettonica da assegnare alle sale musicali senz'altro vincolo se non il rispetto del solo tempo di riverberazione e delle linee visive, producendo risultati non sempre accettabili.

La forma della sala è risultata fondamentale al crescere delle dimensioni della sala medesima, non potendosi più utilizzare semplici considerazioni di omotetia con sale più piccole (al di sotto di 1000 posti).

Il tempo ottimale per sale per musica sinfonica, alle medie frequenze, è compreso fra 1,8 e 2,2 secondi, sebbene in qualche caso può risultare necessario prevedere tempi anche maggiori, specialmente nel progetto di riflessioni dirette (Fig. 3.5). Tempi così lunghi si possono raggiungere con sale di grande volume e soffitti alti più di quanto necessario per

gli scopi visivi. Per esempio in una sala senza galleria e con il pavimento tutto ricoperto di orchestrali e pubblico, si richiede un'altezza di almeno 13 m. Le poltrone sono di solito altamente assorbenti e pertanto, per evitare di dover ulteriormente aumentare il volume della sala, è opportuno limitare l'assorbimento eccessivo negli altri materiali usati per l'arredamento.

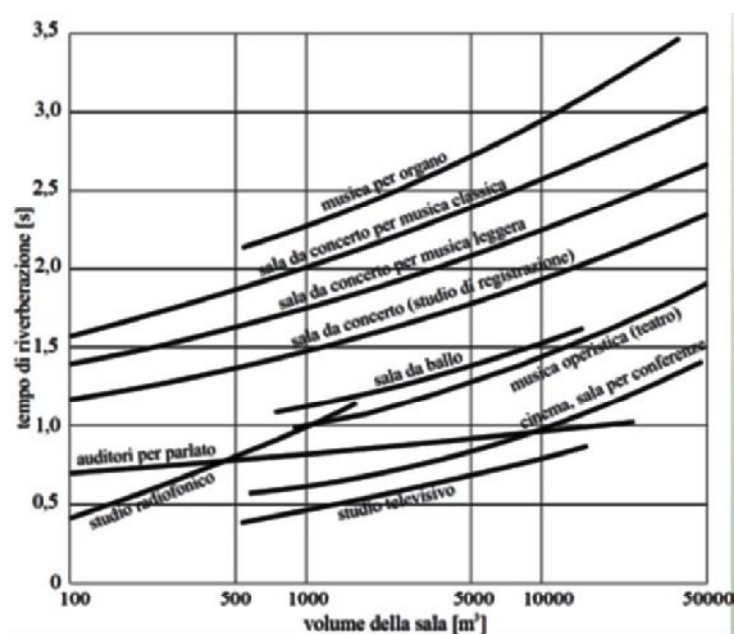


Fig. 3.5 – Diagramma per la determinazione del tempo di riverberazione ottimale

Normalmente il tempo di riverberazione ad alte frequenze ha un inevitabile decremento dovuto all'aumentare del fattore di assorbimento dei materiali (è bene perciò cercare di installare il minimo dei materiali assorbenti per ottenere più brillantezza della sala), mentre un incremento alle basse frequenze contribuisce ad accrescere il senso di calore: si raccomanda a 125 Hz un valore più elevato del 50% rispetto a quello delle frequenze intermedie.

La pratica progettuale ha indicato due valori limite per le dimensioni delle sala da concerto, uno basato sulla capacità di pubblico e l'altro sulle dimensioni lineari. Le difficoltà di una buona progettazione acustica crescono sensibilmente al crescere del numero di posti: un numero massimo consigliato è di 3000 posti. Oltre tale limite i problemi progettuali divengono veramente ardui da superare. In realtà non è tanto importante il numero di spettatori in sé, quanto l'area da essi occupata poiché è questa che determina in modo preponderante l'assorbimento totale che influenza il tempo di riverberazione e il livello sonoro totale. La distanza massima dal palcoscenico è solitamente fissata in 40 m per sale da concerto, sia per condizioni di visibilità ottimale sia per la resa acustica.

Secondo le moderne teorie acustiche questi due limiti (numero di posti e distanza massima dal palco) sono confermati dal criterio del livello sonoro totale, in base al quale tale livello deve essere sempre superiore al livello sonoro dell'onda diretta a 10 m dal palco. Qualora si soddisfi il criterio del tempo di riverberazione, occorre soddisfare anche tutti gli altri requisiti, che verranno presentati nel dettaglio nel Capitolo 4.

Una progettazione accurata risolve gran parte del problema: non è possibile un semplice cambio di scala nel passaggio dalle sale piccole alle grandi perché ciò provocherebbe, per l'aumento delle distanze, un aumento dei tempi di ritardo delle riflessioni laterali immediate. In questo modo solo poche riflessioni arriverebbero entro gli 80 ms e quindi tali da contribuire alla chiarezza della sala. Inoltre, a causa anche di un maggiore assorbimento nello spazio, tutti i componenti del livello di pressione totale (diretto e riflesso) tenderebbero a decrescere, portando ad un suono più debole e quindi ad una diminuzione della *loudness*.

3.4. Effetto delle riflessioni immediate

Come già più volte detto, le riflessioni immediate (< 80 ms) contribuiscono al senso di chiarezza, intimità, *loudness* e, se queste arrivano dai lati della sala, anche al senso di spazialità. Tutte queste caratteristiche sono necessarie per la buona acustica delle sale.

Con riferimento a semplici considerazioni di acustica geometrica, si può cercare di ottenere il risultato desiderato per le riflessioni laterali. Per una superficie infinita vi è un solo cammino di riflessione, mentre per una superficie finita si deve verificare la condizione che questa sia tangente ad un'ellisse che ha la sorgente e il ricevitore nei suoi fuochi (vedi Fig. 3.6).

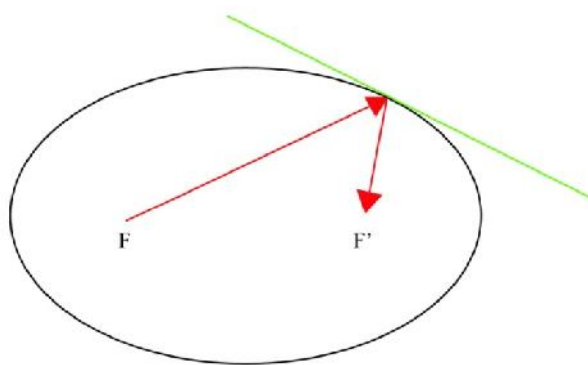


Fig. 3.6 – Riflessione da una superficie finita

A causa dell'interazione delle onde in funzione della propria lunghezza d'onda, piccole superfici riflettenti sono efficaci solamente per alte frequenze. Per avere un senso di spazialità e di inviluppo del suono, parte delle riflessioni devono provenire dai lati.

Possiamo dire che una riflessione è laterale se vi è una differenza di tempo fra il suo arrivo all'orecchio più vicino e a quello più lontano: in altre parole occorre che sia presente un ritardo inter-aurale. Con riferimento alla testa di un ascoltatore rivolto verso la scena sul palco, occorre anche avere un angolo sufficiente fra la direzione di provenienza dell'onda riflessa e il piano verticale che biseca la testa dell'ascoltatore (detto anche piano mediano). Maggiore è l'angolo, maggiore è la sensazione di spazialità che l'ascoltatore prova. Questo ha spiegazione con il comportamento dei singoli piani, come raffigurato in Fig. 3.7.

Nel caso della Fig. 3.7.a, il piano ha inclinazione acuta verso la sorgente e l'angolo di arrivo alle orecchie dell'ascoltatore è piccolo: in questo caso la sensazione di inviluppo tende a diminuire. Nel caso della Fig. 3.7.b la situazione si inverte e l'angolo di incidenza con il piano mediano aumenta e con esso l'impressione di spazialità. Il piano ad inclinazione ottusa (caso di Fig. 3.7.b) è poco realistico da utilizzare nella costituzione dei palchi, ma nell'inviluppo della sala è possibile usarlo con successo soprattutto per i posti più lontani dalla sorgente sonora.

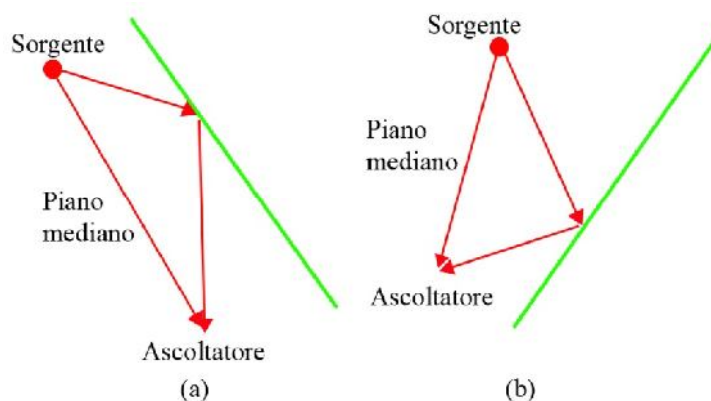


Fig.3.7 - Riflessioni con superfici inclinate

Anche le riflessioni a bassa frequenza devono essere presenti per avere una buona acustica della sala e per evitare i problemi della colorazione. Poiché le onde a bassa frequenza sono attenuate al passaggio sulla platea, occorre compensare quest'assorbimento con riflessioni laterali, soprattutto nei percorsi lontani dalla sorgente. Il tempo di ritardo della prima riflessione (*ITDG*) assume una certa importanza per le qualità acustiche della

sala e pertanto è opportuno limitarne il valore. In particolare per sale musicali questo limite è di 80 ms.

L'applicazione di questo criterio ($ITDG < 80\text{ms}$) porta ad alcune considerazioni progettuali di una certa importanza. Nelle sale dotate di simmetria assiale i posti che risultano più distanti dalle pareti sono le file vicine all'asse centrale. Con riferimento alla Fig. 3.8, per avere il criterio dell' $ITDG < 80$ occorre che una superficie riflettente sia tangente o interna all'ellisse k in modo da riflettere il suono dalla sorgente all'ascoltatore posto nel fuoco K . Mantenendo lo stesso $ITDG$ per uno spettatore in M sia avrebbe l'ellisse m , molto maggiore di k e pertanto un riflettore sul soffitto che avrebbe bisogno di altezze spesso impossibili.

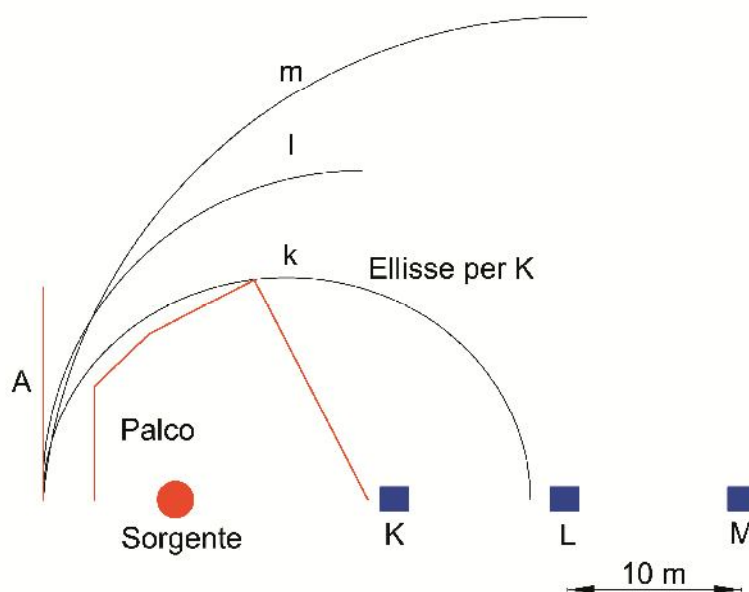


Fig.3.8 - Limitazione dell'ITDG a 80 ms

Per ottenere il risultato desiderato si può pensare di utilizzare un riflettore posto dietro la sorgente, come la superficie A . Un riflettore del genere è stato utilizzato per la prima volta nella *Salle Pleyel* (Parigi 1927), nel *Royal Festival Hall* di Londra 1951 e in altri teatri successivi. Sebbene quest'approccio sia fruttuoso per avere una buona *loudness*, esso presenta due inconvenienti seri: quello di creare una colorazione tonale e un'immagine di sorgente vicina.

Per sale musicali piccole si possono usare forme in pianta piuttosto semplici, come indicato in Fig. 3.9. Le forme rettangolari hanno mostrato molti meriti perché generano un

notevole numero di onde riflesse: per tale motivo si sono guadagnate un'ottima reputazione come una fra le forme migliori per sale da concerto.

Le forme a ventaglio o a sella presentano problemi acustici spesso notevoli, pur essendo utilizzate molto nei teatri: quando queste forme si allargano troppo per raggiungere adeguati tempi di riverberazione, finiscono per avere un numero di riflessioni laterali piuttosto basso rispetto alle sale rettangolari e per presentare problemi di focalizzazione tipici delle superfici concave posteriori.

La forma a rombo, come la sala a ventaglio, offre un buon compromesso tra la buona visibilità e angoli di incidenza delle onde riflesse più elevati e quindi maggiore sensazione di spazialità (Fig. 3.9.d).

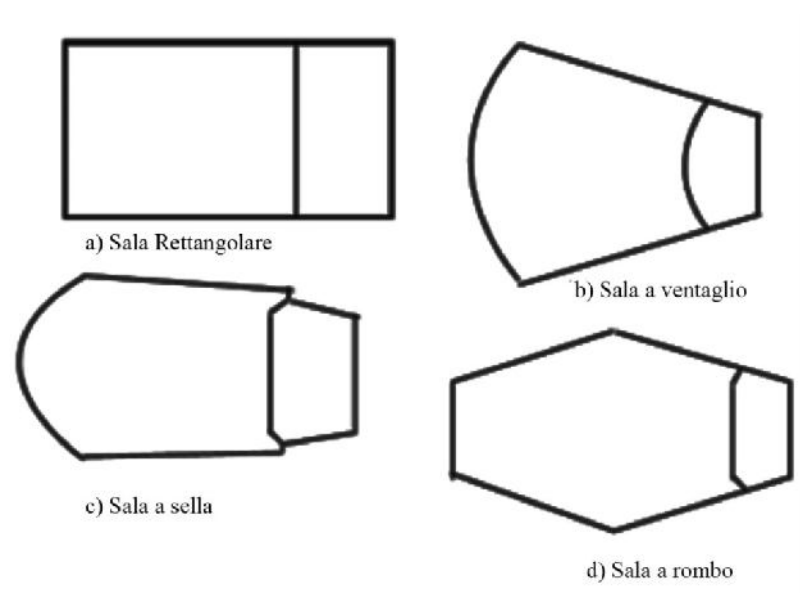


Fig. 3.9 - Forme diverse di sale musicali

Nel 1986 Cremer ha suggerito una forma a trapezi, come rappresentato in Fig. 3.10. Per ottenere le riflessioni geometriche laterali le superfici A, B e C devono essere leggermente inclinate verso il basso. Ad ogni livello di posti c'è una superficie riflettente con angolo ottuso per le riflessioni laterali (Fig. 3.11).

Il soffitto è di solito la maggiore superficie della sala: se la riflessione del soffitto è la prima o anche quella preminente nella sequenza delle riflessioni, allora è bene che questa sia diffusa, per evitare l'eccessiva colorazione del suono.

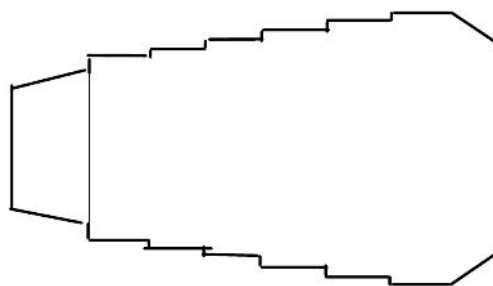


Fig. 3.10 - Sala a ventaglio modificata con pareti a gradini paralleli

In tempi recenti sono state costruite sale da concerto con soffitti inclinati per aumentare le riflessioni laterali, ma è molto dibattuto il quesito se non sia altrettanto conveniente e produttivo avere riflessioni dal bordo del soffitto orizzontale e la parete verticale, come indicato in Fig. 3.12.

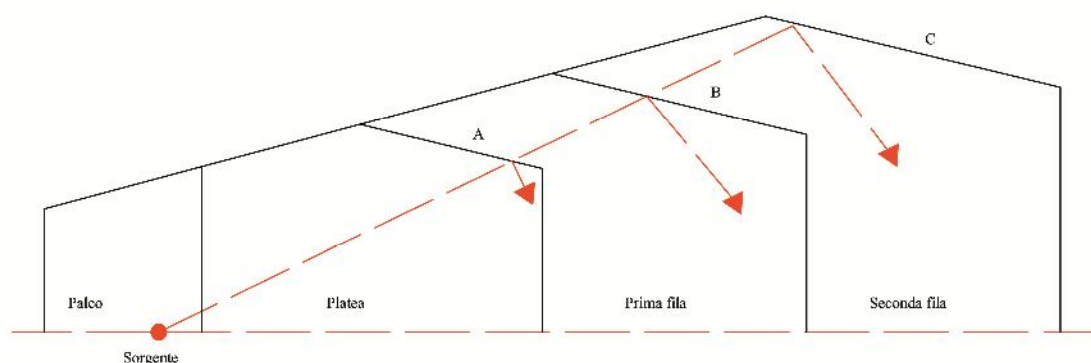


Fig. 3.11 - Forma a trapezi suggerita da Cremer (sezione trasversale)

La manipolazione delle riflessioni laterali non è tuttavia priva di rischi, soprattutto se si usano larghi piani riflettenti, perché sussiste sempre il pericolo dell'eccessiva colorazione del suono.

Diverso, ma spesso presente, è il problema della falsa localizzazione: il suono di un particolare strumento sembra provenire non più dal luogo reale di emissione, ma dallo schermo riflettente (spostamento di immagine). Questo succede, ad esempio, quando le trombe suonano con i registri più elevati (e quindi a causa della maggiore frequenza risultano maggiormente direzionali) e puntano nella direzione dello schermo riflettente.

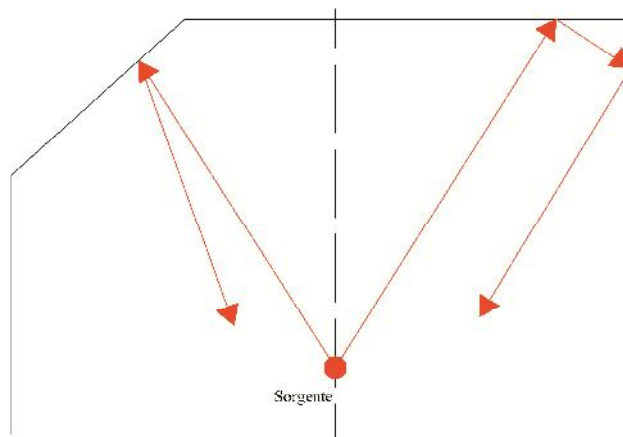


Fig. 3.12 - Riflessioni dal soffitto e dalla parete verticale (Sezione trasversale)

Un rimedio per eliminare i due inconvenienti sopra detti è quello di aggiungere un trattamento diffondente alla superficie dello schermo riflettente, sebbene quest'operazione aumenti la dispersione delle riflessioni a spese del livello delle emissioni nel percorso originario. Il suono ritardato (*late sound*) può essere anch'esso influenzato da un corretto progetto delle superfici riflettenti che tenda ad inviare il maggior numero di riflessioni verso la platea degli spettatori.

E' stato osservato che il senso soggettivo della riverberazione è meglio correlato con l'*EDT* (Early Decay Time) e si può immaginare che proprio questa correlazione giustifichi la diminuzione dell'*EDT* rispetto al tempo di riverberazione tradizionale. Se il tempo di riverberazione è basso rispetto ai valori ottimali allora il senso soggettivo della riverberazione può essere inadeguato. La soluzione migliore è allora quella di aumentare il volume (se si è in fase di progetto) in modo da lasciare sostanzialmente invariato l'*EDT* pur con un tempo di riverberazione crescente e addirittura superiore al valore ottimale di 2,2 secondi (musica sinfonica).

Quando le dimensioni della sala crescono oltre un certo limite occorre intervenire sulle riflessioni immediate in modo da compensare i problemi che si hanno per i posti più lontani dalla sorgente.

La gestione delle riflessioni necessarie per ottenere il comfort acustico, sebbene le moderne tecnologie consentano di avere validissimi aiuti progettuali. Con le teorie recenti sulle riflessioni acustiche si possono avere suggerimenti importanti ma non soluzioni matematiche certe.

3.5. Le problematiche dei Teatri dell'Opera

L'Opera è sempre stata una forma particolare d'arte poiché, oltre alla necessità di avere un'orchestra ed un palco, aggiunge quella dei cantanti.

In termini progettuali, tra tutte le forme per auditori quella delle sale operistiche è certamente la più obbligata. Innanzi tutto vi è la necessità per gli orchestrali e per i cantanti di vedere entrambi il direttore di orchestra: ciò ha portato ad avere un proscenio nel palco e a porre l'orchestra in una fossa orchestrale posta sotto il palco e innanzi alla platea. Anche il progetto della platea è vincolato dalle linee di vista che limitano l'angolo di apertura entro un massimo di 30° (vedi Fig. 3.13).

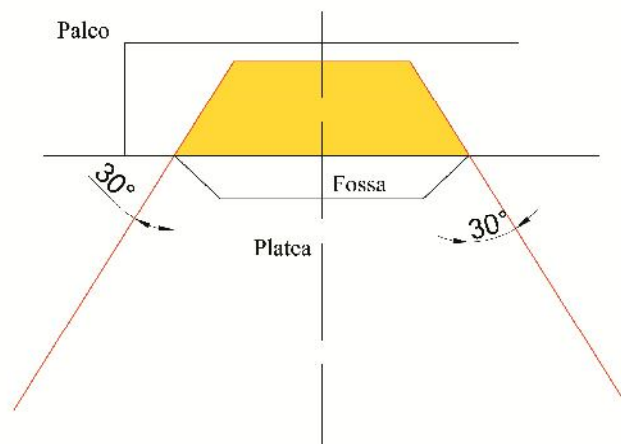


Fig. 3.13 – Angolo di apertura massimo in un teatro lirico

La massima distanza in sala dal palco è limitata sia dai vincoli visivi che acustici e si pensa che un valore di 30 m sia il limite da non oltrepassare.

Il progetto di un teatro d'opera deve soddisfare diverse esigenze spesso tra loro contrapposte. In termini acustici, il tempo di riverberazione ottimale per l'intelligibilità del parlato è di 1 secondo e per la musica sinfonica circa 2 secondi. Almeno da un punto di vista progettuale, è possibile avere un tempo di riverberazione sufficientemente lungo e al tempo stesso riflessioni laterali immediate sufficientemente forti tali da raggiungere la piena intelligibilità del parlato. Questa esigenza però è resa difficoltosa, e spesso irrealizzabile, per un teatro d'opera perché si tende ad ottenere la massima capienza di pubblico e ciò costituisce un vincolo architettonico notevole.

Per potere pervenire ad un compromesso fra l'intelligibilità del parlato e la riverberazione (e quindi senso di spazialità della musica) occorre capire quanto sia realmente ne-

cessario raggiungere la piena intelligibilità per la musica operistica. E' stato dimostrato da una ricerca ad hoc che su 100 parole solo 10 - 15 vengono chiaramente comprese da un pubblico non preparato e pur tuttavia questo scarso riconoscimento non autorizza a concludere che si abbia una scarsa comprensione del parlato. In un teatro lirico il linguaggio parlato da solo è utilizzato saltuariamente (vedi l'operetta) e in quelle occasioni se ne richiede la comprensione completa.

Per avere l'intelligibilità delle parole cantate dagli interpreti occorre avere un bilanciamento (a dire il vero piuttosto delicato) fra la *loudness* dell'orchestra e dei cantanti. Alcuni compositori ripetono più volte le parole per consentirne la comprensione, anche in considerazione del fatto che un acuto rende difficile l'enunciazione perfetta delle parole da parte dei cantanti. Anche il linguaggio musicale orchestrale deve essere sufficientemente chiaro per la piena comprensione dei dettagli e dei passaggi delicati: tale compromesso è se viene rispettato il tempo di riverberazione ottimale per musica sinfonica o con tempi inferiori ma non di molto. Il tempo di riverberazione ottimale per queste sale è, a media frequenza, di $1,3 \div 1,4$ secondi. Per ottenere un corretto bilanciamento fra la *loudness* orchestrale e la voce dei cantanti occorre non solo un controllo da parte del direttore d'orchestra (sarebbe deleterio avere una sopraffazione dell'orchestra sul cantante), ma anche agire sull'acustica della sala. Anche per la musica lirica è importante il livello sonoro totale, così come per la musica sinfonica, per dare all'ascoltatore un maggior senso di intimità.

Infine non si hanno ancora le idee chiare sulla necessità di avere un buon inviluppo per le sale operistiche; le riflessioni laterali si dimostrano importantissime nelle sale da concerto mentre per i teatri lirici sembra che queste rivestano un ruolo secondario.

E' maggiormente importante incrementare il livello sonoro totale per la voce del cantante piuttosto che esaltare la direzionalità del suono. A tale scopo risultano fondamentali le riflessioni verticali (al di sopra della testa degli ascoltatori). Il senso di inviluppo si rende necessario solo per la musica orchestrale: ponendo l'orchestra nella fossa, automaticamente se ne ha un incremento in sala, come dimostrato da alcuni recenti studi in alcuni teatri lirici.

In definitiva le specifiche di progetto per un teatro d'opera sono:

- intelligibilità del linguaggio parlato con la riduzione del tempo di riverberazione ottimale rispetto a quello delle sale concertistiche;
- adeguata chiarezza del suono orchestrale;
- buon senso della riverberazione per avere una buona sensazione di spazialità.

Nel bilancio fra livello sonoro totale orchestrale e quello vocale occorre favorire quest'ultimo, pur mantenendoli alti entrambi in sala. Queste specifiche si possono realizzare con una corretta localizzazione e orientazione delle superfici riflettenti e con il rispetto del tempo di riverberazione ottimale.

3.5.1. Influenza della pianta

Il proscenio, che ha un'apertura compresa (almeno per i grandi teatri) fra 14 e 18 metri, è l'elemento che maggiormente influenza il progetto della pianta di un teatro lirico.

L'altezza del proscenio è di norma 9 metri anche se per grandi teatri si hanno altezze maggiori. Nella progettazione delle superfici e del loro orientamento, la superficie immediatamente al di sopra del proscenio riveste moltissima importanza al fine di migliorare il livello vocale su quello orchestrale: occorre disporla accuratamente in modo da orientare le riflessioni provenienti dal palco (dove si trovano i cantanti) verso la sala.

Questa superficie si trova sopra il proscenio e nelle immediate vicinanze della fossa orchestrale (vedi Fig. 3.14) ed occorre inclinarla in modo da avere buone riflessioni verso la sala e al tempo stesso raccorderla bene con le pareti laterali. Esistono, inoltre, altre esigenze che devono essere valutate con attenzione per ottenere un buon compromesso come, ad esempio, l'esigenza di disporre l'illuminazione di scena sotto la copertura del proscenio. Questi compromessi devono sempre essere ridotti al massimo.

Le superfici piate sopra il proscenio sembrano dare i risultati peggiori poiché riflettono sia verso la platea sia verso il palco e la fossa orchestrale. Piccoli elementi di *scattering* (diffrazione) nello schermo del proscenio possono essere utili per riflettere parte dell'energia ad alta frequenza dell'orchestra verso le poltrone in platea.

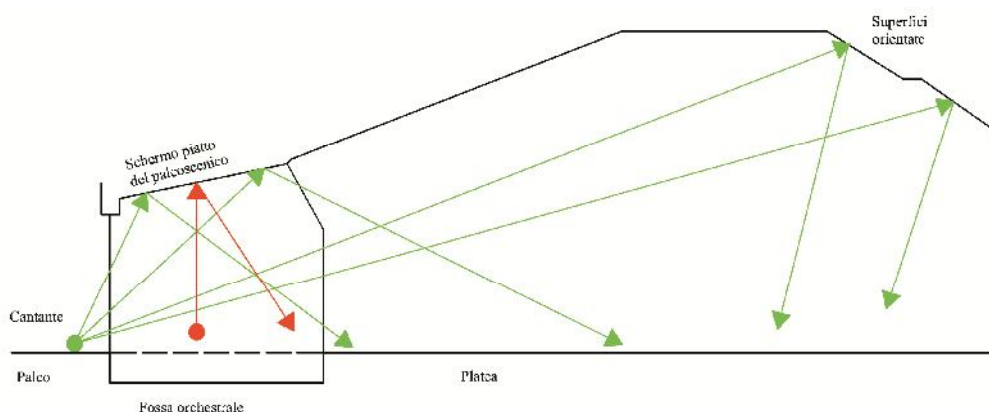


Fig. 3.14 – Inclinazione della superficie sopra il proscenio

In alcuni casi la funzione di specchio sopra indicata è attuata mediante superfici laterali con un piccolo angolo di inclinazione. Poiché i posti di ascolto più deboli in un teatro d'opera sono quelli al centro della sala e verso i tre quarti dal fondo, le pareti laterali possono essere inclinate in modo da orientare le riflessioni verso di essi per rafforzarne il livello totale. Le superfici di fondo curve, come di solito sono nei teatri lirici, sono invece disturbanti perché creano un effetto focalizzante e oggi si tende sempre più a realizzarle piane.

3.5.2. Influenza della copertura

Anche la copertura della sala (posta immediatamente dopo la copertura del prosenio e della fossa orchestrale) è di grande importanza al fine del rinforzo del livello sonoro dell'orchestra e dei cantanti. I principi di progettazione sono in tutto simili a quelli dello specchio sopra il prosenio. Fasold e Winkler (1976) suggeriscono una serie di superfici orizzontali al di sopra della fossa orchestrale (Fig. 3.15) che provvedano ad inviare sia le riflessioni del suono vocale verso la platea del pubblico sia quelle del suono orchestrale nella stessa fossa.

Nel caso di grandi teatri questi schermi possono però provocare notevoli ritardi, a causa delle altezze di posa. Se tali altezze non possono essere ridotte allora è opportuno rendere tali superfici (nonché il soffitto) acusticamente diffondenti.

Le riflessioni ritardate provenienti dal soffitto generano meno eco se sono precedute dalle riflessioni della balconata della galleria. Cremer e Muller (1982) hanno proposto una copertura con schermi inclinati ad angoli inversi in modo da coprire tutte le zone della platea e delle gallerie con tempi di ritardo inferiori a 50 ms..

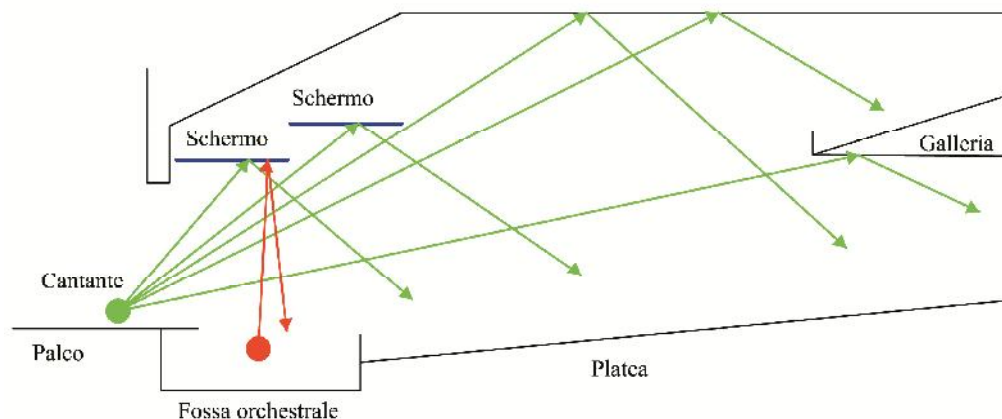


Fig. 3.15 – Uso degli schermi diffondenti

Per i grandi teatri lirici si ha sempre la difficoltà di conciliare la presenza di riflessioni immediate e tempi di riverberazione sufficientemente lunghi. L'uso degli schermi sospesi può in qualche modo alleviare questo problema. Il soffitto è solitamente la maggiore superficie disponibile per le riflessioni acustiche e pertanto è bene usarlo proficuamente per questo scopo.

Nel caso di soffitto a cupola (molto usato nel diciannovesimo secolo) si ottengono risultati non sempre buoni, a causa della natura focalizzante delle cupole. Si hanno pertanto concentrazioni sonore in aree particolari a danno di altre e quindi si può produrre una disuniformità del livello sonoro che appare sgradevole.

3.5.3. Il palco e la fossa orchestrale

Si è già sottolineata l'importanza dell'acustica del palco soprattutto per i cantanti: le sole superfici che possono assicurare riflessioni immediate agli interpreti vocali sono quelle dello stesso palco. Marshall e Meyer (1985) hanno dimostrato che i cantanti sono più sensibili alla riverberazione che alle riflessioni immediate e che quest'ultime, per essere utili, devono avere un ritardo massimo di 35 ms. Ciò significa che le superfici riflettenti devono avere una distanza massima di 6 m dai cantanti e spesso vengono utilizzate superfici solide poste nelle loro immediate vicinanze.

Perché si possa sentire la riverberazione proveniente dalla sala è necessario che questa sia visibile dal palco in modo che il suono riverberato possa essere riflesso. I problemi si acuiscono se si vogliono mettere d'accordo le esigenze dei cantanti con quelle dell'orchestra nella fossa orchestrale. Una ricerca piuttosto estesa condotta da Mackenzie (1985) su un campione di 5000 frequentatori di sale operistiche mostra come il pubblico ritenga troppo forte il suono dell'orchestra rispetto a quello del cantante.

Per bilanciare il rapporto fra livello totale dell'orchestra e quello del cantante si può pensare di coprire parzialmente la fossa orchestrale. La fossa semicoperta è spesso una necessità economica in quanto l'area occupata da questa viene sottratta ad una zona di prestigio della platea e quindi al pubblico meglio pagante. Essa però crea diversi problemi ed in particolare viene osteggiata dai musicisti perché:

- si hanno problemi di ergonomia nella disposizione degli strumenti e degli stessi orchestrali per mancanza di spazio utile;
- l'esigenza di vedere direttamente il direttore d'orchestra porta alla necessità di utilizzare pedane a più livelli e quindi si acuiscono ancora di più i problemi di spazio e di visibilità fra gli stessi orchestrali.

Da un punto di vista acustico un livello eccessivo nella fossa orchestrale è disturbante e al tempo stesso dannoso. Naylor (1985) ha rilevato livelli di 86 - 92 dB per le sezioni a fiato con picchi di 105 - 110 dB raggiunti 3 - 4 volte nel corso dell'opera e causati principalmente dagli strumenti a percussione. Tali livelli portano ad avere un L_{eq} di almeno 90 dB per un periodo di otto ore di lavoro continuo. Non meraviglia, pertanto, che alcuni musicisti soffrano di problemi uditivi con danni permanenti. Inoltre livelli sonori così elevati rendono problematico l'*ensemble* fra gli stessi musicisti, anche per fosse orchestrali totalmente aperte, e problematico è anche il raccordo con il cantante sopra il palco tanto da rendere spesso difficile il sincronismo con gli orchestrali.

Una fossa semicoperta si comporta come uno spazio legato alla sala con un tempo di riverberazione a doppio valore, per effetto della variazione del volume: la pendenza iniziale del decadimento è data dalle condizioni locali nella fossa e fornisce valori del tempo di riverberazione di 0,3 - 0,7 secondi, successivamente il decadimento assume la pendenza tipica dell'auditorio con valori più elevati.

La conseguenza di questo doppio valore è che i musicisti che si trovano nella parte scoperta della fossa sentono un suono proveniente dalla sala anche quando nessun musicista suona. La risoluzione del problema non è agevole: le variabili in gioco sono le dimensioni fisiche della fossa, il grado di copertura e l'altezza dell'apertura. Le superfici della fossa possono essere ricoperte da materiali assorbenti o diffondenti. Nel primo caso si riduce il livello sonoro ma a spese dell'*ensemble* fra gli orchestrali.

Con riferimento alla Fig. 3.16 si hanno le seguenti proporzioni consigliate: $V = 1 - 2$ m, $D = 2,5 - 3,5$ m, $H = 1$ m. In alcuni teatri (ad esempio l'*Opera House* di Sidney) la copertura della fossa si può estendere fino a 4 - 5 m anche se pare consigliabile non superare il limite di 4 m. L'altezza minima non deve essere inferiore a $D = 2$ m per fosse piccole, per garantire un contatto visivo con il direttore d'orchestra.

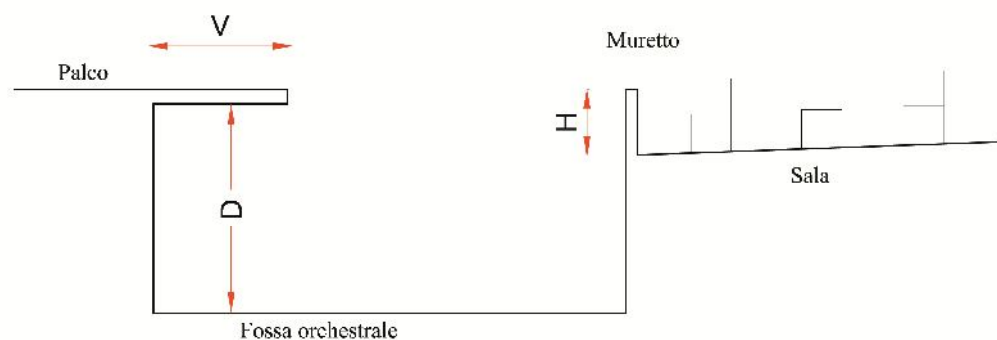


Fig. 3.16 – Dimensioni per la fossa orchestrale

Oggi si utilizzano sempre più spesso piattaforme mobili per garantire una completa flessibilità della fossa orchestrale. L'area della fossa va calcolata in funzione del numero di orchestrali e Naylor suggerisce un valore $1,5 \text{ m}^2$ per musicista per le sale operistiche e $1,1 \text{ m}^2$ per le sale sinfoniche. In proporzione la larghezza della fossa non dovrebbe essere superiore a 4 volte la lunghezza (misurata longitudinalmente). Inoltre, anche a causa della forma curva del proscenio, quella della fossa è rettangolare curva anziché rettangolare semplice.

Oggi si tende a superare tutti questi inconvenienti immettendo nella fossa orchestrale (e soprattutto nella parte coperta) il suono amplificato raccolto dalla stessa fossa e dalla sala. Mackenzie (1985) ha rilevato una riduzione di 3 dB in sala rivestendo la superficie del soffitto della fossa con materiale assorbente. Analoghe riduzioni di livello si hanno, ovviamente, per le riflessioni laterali e questo non pare un effetto utile. Si possono correggere questi comportamenti contrastanti delle superfici della fossa orchestrale mediante correzioni acustiche di tipo elettronico, anche in considerazione del fatto che i sistemi elettronici sono diventati sempre più affidabili e sofisticati. Harkness (1984) ha effettuato studi sull'uso di setti di separazione fra gli orchestrali e propone di separare l'area degli strumenti più deboli da quelli più forti proprio con l'inserimento di setti acustici. Quest'esigenza giustifica anche la necessità di avere aree d'ingombro per musicista maggiori che per le orchestre sinfoniche.

CAPITOLO 4 – I PARAMETRI ACUSTICI OGGETTIVI

L'analisi della risposta acustica oggettiva, caratterizzata da una misurabilità e ripetitività strumentale a stimoli acustici preselezionati, è diventato il principale strumento a supporto della progettazione delle sale musicali.

Questa risposta rappresenta una sorta di firma distintiva (*signature*) della sala, tale da caratterizzarla pienamente nel comportamento acustico.

La necessità di una descrizione oggettiva si rende necessaria a causa della complessità del problema: la sala tende a creare un campo sonoro distinto nelle varie posizioni e che dipende dall'interazione del suono prodotto con la stessa sala.

Per questo, nel corso degli anni, sono stati proposti innumerevoli descrittori acustici, tutti derivabili dalla risposta all'impulso, che sintetizzassero il comportamento acustico delle sale.

4.1. Il tempo di riverberazione

La misura sperimentale del T_{60} si può eseguire tramite il metodo del decadimento del livello sonoro allo spegnimento di una sorgente di suono continuo (rumore bianco), oppure con il metodo dell'integrazione all'indietro di Schröder (1965), in seguito illustrato.

Come si è detto, le risposte all'impulso contengono tutte le informazioni utili per descrivere il campo sonoro all'interno di uno spazio chiuso: una prima conferma di ciò sta nella possibilità di ricavare da questi diagrammi il tradizionale decadimento riverberante prodotto dallo spegnimento di una sorgente di rumore stazionaria e quindi, di conseguenza, il valore del tempo di riverberazione.

Questo legame è stato studiato da Schröder, che ha mostrato come la legge di decadimento riverberante sia ricostruibile attraverso un'integrale della risposta all'impulso esprimibile con la relazione:

$$\langle p^2(t) \rangle = N \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (4.1)$$

dove: $\langle p^2(t) \rangle$ = valore medio temporale di un numero infinito di decadimenti riverberanti;

$h^2(\tau)$ = risposta all'impulso;

τ = variabili fittizia (o muta) di integrazione;

t = tempo, che pur essendo un estremo di integrazione è variabile.

Essendo t variabile, si preferisce fare le integrazioni all'indietro da ∞ a t , usando la variabile fittizia di integrazione τ .

Si ottengono così una serie di valori di $p^2(t)$, che messi su un diagramma tempo – livello di pressione sonora, e congiunti tra loro, forniscono la curva di Schröder.

La (4.1) si può anche vedere come:

$$\langle p^2(t) \rangle = N \left(\int_0^\infty h^2(\tau) d\tau - \int_0^{t_0} h^2(\tau) d\tau \right) \quad (4.2)$$

Il primo integrale rappresenta l'energia ricevuta dal microfono prima dello spegnimento della sorgente, in condizioni stazionarie, e il secondo l'energia che arriva al microfono nell'intervallo $0 - t$. Si noti che $h^2(\tau)$ rappresenta la media temporale di un numero molto grande di misure del decadimento quadrato, indispensabile dal momento che il decadimento del rumore contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente lo spegnimento della sorgente.

In Fig. 4.1 è visibile la rappresentazione grafica dell'integrazione di Schröder: la ricostruzione della curva di decadimento può avvenire mediante l'integrazione all'indietro della risposta all'impulso quadrata (curva A) fino a raggiungere il livello di energia stazionario, oppure, procedendo per tempi crescenti, per sottrazione dal livello di energia stazionario calcolato a parte, dei valori assunti progressivamente dall'integrale delle risposta all'impulso quadrata (curva B).

Attualmente, con la registrazione di un semplice impulso, è possibile ottenere i tempi di riverberazione alle varie frequenze, utilizzando particolari strumentazioni in grado di ricostruire prima l'esatta risposta all'impulso dell'ambiente, e poi il classico decadimento riverberante mediante l'integrazione di Schröder. Queste misure si sono dimostrate sufficientemente confrontabili con quelle più tradizionali derivate direttamente dallo spegnimento di una sorgente di rumore stazionaria (secondo Schröder sono comunque i valori derivati dalla risposta all'impulso integrata ad essere meglio correlati con la sensazione soggettiva).

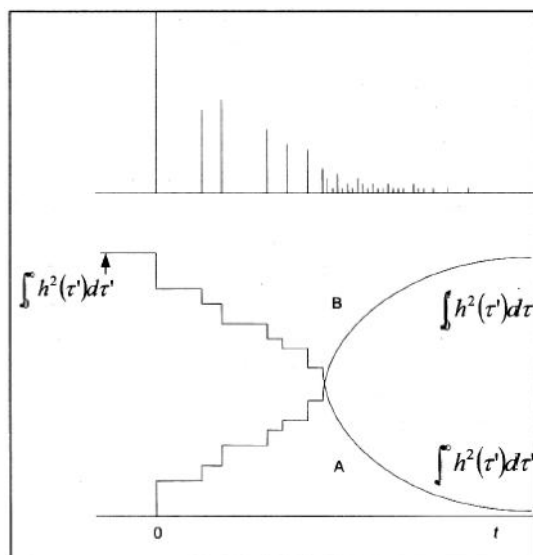


Fig. 4.1 – Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all'indietro

In Fig. 4.2 sono visibili, in scala logaritmica, una risposta all'impulso quadrata e la corrispondente curva di decadimento ottenuta con l'integrazione di Schröder: si può notare bene nell'immagine un tipico fenomeno di decadimento non esponenziale.

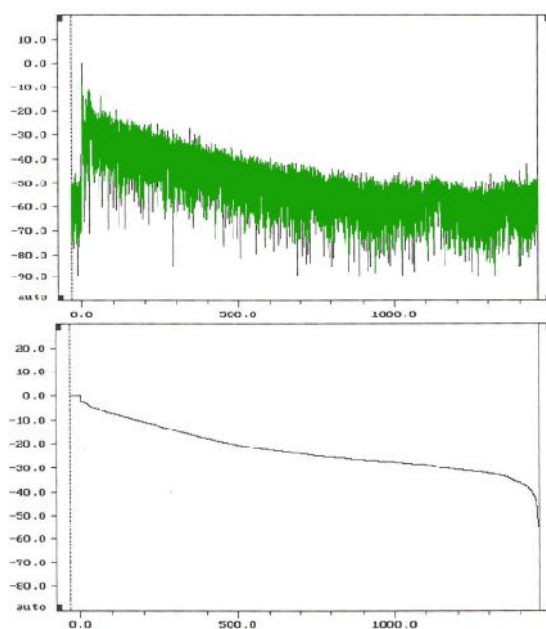


Fig. 4.2 – Risposta all'impulso in dB e corrispondente curva di decadimento

La curva di decadimento del livello sonoro può presentare delle pendenze multiple, dovute alle diverse riflessioni del suono all'interno di una stanza e al fatto che esso è composto da più suoni puri. Schröder, chiedendosi quale fosse la pendenza significativa di questa curva, cercò di determinarne una che non presentasse fluttuazioni. La risposta all'impulso ha una curva di decadimento continua, ma non può essere usata per determinare il T_{60} perché troppo ripida.

Si è visto che la sensazione soggettiva è maggiormente correlata alla parte iniziale del decadimento. Nella fase finale, infatti, il decadimento riverberante prodotto da uno specifico impulso, sia nel campo della parola sia in quello della musica, risulta di solito mascherato dagli eventi successivi (una volta che il livello sonoro è diminuito di 10 dB al di sotto del valore a regime). Per questo sono stati definiti altri tipi di tempo di riverberazione basati sull'estrapolazione grafica della prima parte della curva del decadimento.

L'*IRT* (Initial Reverberation Time) è il tempo di riverberazione iniziale. Si ottiene estrapolando la pendenza media dei primi 15 dB (partendo da -5 dB) dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora a -60 dB. Esso venne proposto da Schröder, Atal e Sessler (1965) e si indica con T_{15} .

Kürer e Kurze (1967) proposero il T_{20} e in seguito adottarono anche il T_{25} e il T_{30} . Oggi solitamente si usano il T_{15} e il T_{30} , ottenuti estrapolando il primo da -5 a -20 dB e il secondo da -5 a -35 dB dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora a -60 dB.

Jordan (1968) introdusse l'*EDT* (Early Decay Time) che è un tempo di riverberazione iniziale basato su un intervallo di estrapolazione ristretto ai primi 10 dB partendo da 0 dB. Tra tutti i tempi di riverberazione che sono stati definiti, l'*EDT* è risultato essere il più correlato alle valutazioni psico-soggettive dell'ascoltatore medio.

In Fig. 4.3 è riportato un grafico che chiarisce le differenze tra i vari tempi di riverberazione proposti.

Poiché i tempi di riverberazione variano al variare delle frequenze, Jordan (1981) propose il parametro *TB* (Tonal Balance) o equilibrio tonale:

$$TB = \frac{[T_{10}(200 \text{ Hz}) - T_{10}(250 \text{ Hz})]}{3} \quad (4.3)$$

Esso esprime la pendenza media del diagramma T_{10} in funzione della frequenza per bande di ottava; il suo valore ottimale è circa 0.

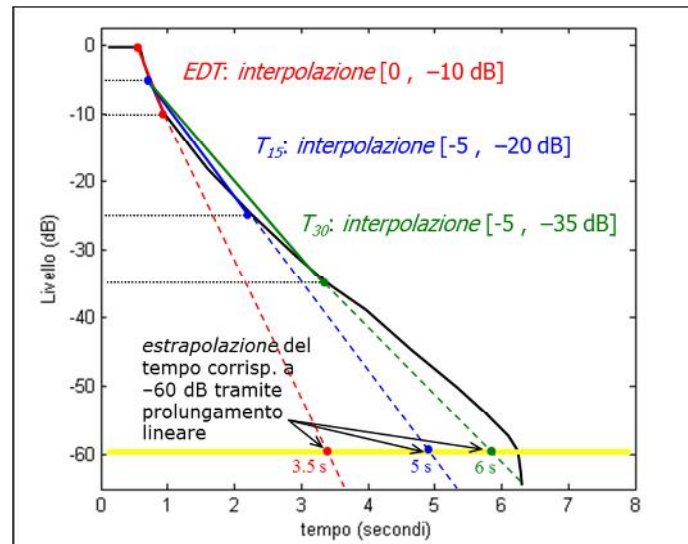


Fig. 4.3 – Intervalli di estrapolazione dei vari tempi di riverberazione

Nel linguaggio parlato i suoni elementari (fonemi) hanno carattere relativamente stazionario (le vocali e alcune consonanti) e si alternano con altri suoni aventi carattere di brevi transitori (le consonanti esplosive). Nel parlato l'interesse di un ascoltatore sta dichiaratamente nel percepire ogni fonema con la massima chiarezza, e quindi non mascherato da un suono di riverberazione. Nel caso della musica, invece, è indispensabile la presenza di un certo grado di riverberazione, variabile a seconda del genere musicale, necessario per ottenere certi effetti benefici quali il mescolamento dei suoni (amalgama) ed il legame delle note. In relazione alla discontinuità del messaggio sonoro, assume poi particolare importanza il potere di risoluzione temporale dell'udito, ossia la capacità di udire due suoni come distinti al ridursi dell'intervallo temporale che li separa.

Dalla psicoacustica è infatti noto come l'orecchio umano riesca a percepire due suoni diversi nello stesso istante, mentre tende a confondere due suoni uguali (di uguale frequenza) percepiti fino a qualche centesimo di secondo l'uno dall'altro; ciò dipende dal fatto che suoni di diversa frequenza vanno ad interessare terminazioni nervose diverse del nervo acustico, per cui le sensazioni prodotte sono mantenute distinte. In pratica l'apparato uditivo umano si comporta, frequenza per frequenza, come un filtro integratore.

Ai fini dell'ascolto si può quindi ritenere interamente utile solo quella parte della riverberazione di un segnale che viene percepita con un ritardo, rispetto all'onda diretta, non superiore a qualche decina di millisecondi.

Per ritardi maggiori (30 ms circa), il suono di riverberazione è integrato solo parzialmente all'onda diretta e per una frazione che decresce progressivamente all'aumentare

del ritardo, fino a risultare completamente disturbante quando il ritardo supera il centinaio di millisecondi.

Si comprende allora l'importanza che assume in ogni punto di una sala la distribuzione temporale dell'energia dovuta al campo riverberante; una volta definita la natura del messaggio sonoro, il contributo della riverberazione può ritenersi utile, se non in certi casi indispensabile, unicamente se è ridotto il ritardo con il quale viene percepito rispetto al contributo diretto della sorgente.

4.2. Spettro acustico e risposta in frequenza

La risposta all'impulso sperimentale è funzione della posizione; in ascisse sono posti i tempi e in ordinate la pressione sonora. In essa sono rappresentate le componenti del campo acustico presente tra sorgente-ricevitore in ordine di arrivo e può essere calcolata l'energia da esse trasportata. Qualora la risposta all'impulso sia ottenuta con una misura di registrazione del segnale all'interno di un ambiente, essa è più propriamente chiamata reflectogramma (Fig. 4.4).

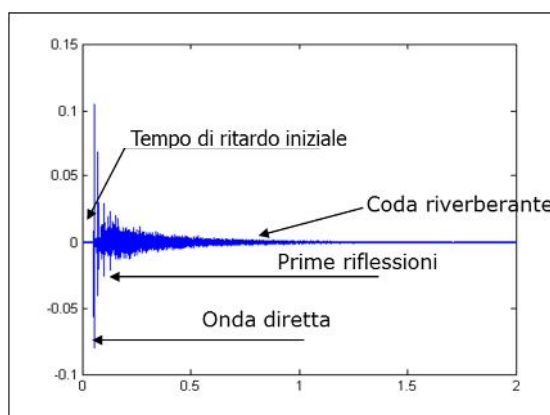


Fig. 4.4 – Esempio di reflectogramma

Dalla risposta all'impulso si determinano, come detto, quasi tutti i parametri acustici utilizzati nella descrizione delle caratteristiche acustiche dell'ambiente. Tra essi, ad esempio si ottiene l'*ITDG* (Initial Time Delay Gap), il quale rappresenta il tempo di ritardo con cui l'onda diretta segue l'onda riflessa. Questo parametro fu introdotto per la prima volta da Beranek (1962); esso dovrebbe essere misurato geometricamente in base ai disegni architettonici delle sale, attraverso la ostruzione dei percorsi medi delle onde sonore. Bera-

nek riteneva che l'*ITDG* fosse il più importante criterio acustico, direttamente correlato con la caratteristica soggettiva di “intimità”.

Secondo Ando (1985), tale parametro risulta essere uno dei fattori che influenzano la qualità acustica di una sala: in particolare essa risulta tanto maggiore quanto più breve è l'*ITDG*. In tale caso il valore preferito dell'*ITDG* è determinato in funzione di altri parametri, come illustrato in seguito.

Tuttavia è possibile procedere alla misura dell'*ITDG* in modo più diretto e con la tecnica della risposta all'impulso, misurando la differenza, sull'asse delle ascisse (l'asse dei tempi), tra le coordinate dell'onda diretta e della prima onda riflessa.

Questa determinazione può però risultare affetta da errori sistematici, qualora la risposta all'impulso presenti delle anomalie (ad esempio l'onda diretta è coperta e quindi difficilmente individuabile) oppure nel caso in cui più riflessioni si susseguono rapidamente, per cui non è chiara l'individuazione della prima onda riflessa.

Ando suggerisce di normalizzare il valore dell'*ITDG* tramite un parametro chiamato Ampiezza normalizzata della riflessione singola equivalente, definito come:

$$A_{eq} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left[\int_Y^T p^2(\tau) d\tau \right]^{1/2}}{\left[\int_0^Y p^2(\tau) d\tau \right]^{1/2}} \quad (4.4)$$

dove Y è la durata dell'onda diretta.

A seguito della difficoltà insita nella determinazione sperimentale dell'effettiva “prima onda riflessa”, è stato definito un “*ITDG* equivalente”, che fornisca un valore del parametro di certa determinazione. Tale parametro è stato definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra l'onda diretta e una “ampiezza equivalente-equivalente”, ossia tale da rappresentare l'energia contenuta nella risposta all'impulso, come se essa stessa fosse tutta concentrata in un unico punto.

La risposta in frequenza è il rapporto algebrico fra lo spettro di output e quello di input (Fig. 4.5). Facendo riferimento ad un ambiente chiuso, per risposta in frequenza si intende la capacità della sala di modificare la composizione spettrale della sorgente nel tragitto sorgente-ricevitore. Ogni punto della sala presenterà una diversa risposta in frequenza.

4.3. Descrittori energetici

All'interno di una sala esistono delle differenze di qualità dell'acustica da un posto all'altro. Basta guardare i diagrammi di risposta all'impulso di diversi punti della sala per accorgersi di quanto si differenzino. Il tempo di riverberazione, ad esempio, definisce l'intervallo di tempo necessario affinché l'energia sonora si riduca di un certo numero di volte, ma senza tenere conto di come è distribuita all'interno di tale intervallo.

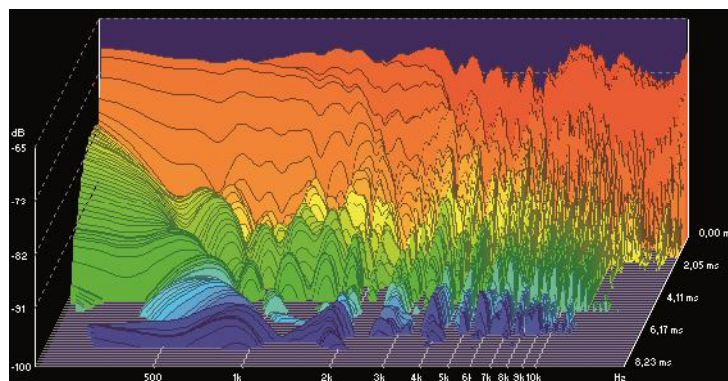


Fig. 4.5 -Esempio di risposta in frequenza al variare del tempo (waterfall) di un ambiente

Secondo Cremer, poiché si è dimostrato che il nostro orecchio funziona come un integratore, non c'è motivo per considerare i dettagli della risposta all'impulso oltre il tempo $t_{st} = 2\sqrt{V}$ ms (dove V è il volume della sala); la parte soggettivamente importante, responsabile delle differenze di qualità da un posto all'altro nella stessa sala, è quella iniziale determinata da riflessioni intense e piuttosto isolate. E' giustificabile, allora, la tendenza a condensare in criteri semplici l'esuberanza di informazioni contenute nella risposta all'impulso. Questo viene fatto introducendo dei parametri quali l'indice di definizione o l'indice di chiarezza.

Essi sono dei descrittori fisici che attraverso una frazione energetica distinguono l'energia utile da quella che contribuisce negativamente all'effetto sonoro.

L'indice di definizione, introdotto da Thiele (1953) viene definito in base alla seguente relazione:

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (4.5)$$

dove $p(t)$ = pressione sonora ricevuta, emessa da una sorgente non direttiva.

$t = 0$ è l'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di osservazione.

Secondo Jordan (1981) il valore di definizione ottimale è circa 0,34. L'integrazione, qui da 0 a 50 ms, da alcuni viene fatta da 0 a 80 ms.

Beranek e Schultz (1965) introducono un altro parametro, sempre basato sul criterio della frazione energetica: il rapporto R tra l'energia riverberante e l'energia iniziale:

$$R = 10 \log_{10} \frac{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt} \quad (4.6)$$

R è un numero puro, espresso in dB, e secondo Jordan (1981) il suo valore ottimale è circa 2,9 dB.

Secondo Schultz, il criterio R rappresenta una misura fisica dell'equilibrio fra il mescolamento desiderato dei suoni dei vari strumenti dell'orchestra (Blend) e la chiarezza (Definition, Clarity).

L'indice di chiarezza, introdotto da Reichard, Abdel Alim, e Schmidt (1975), è un parametro che ben caratterizza la trasparenza armonica orizzontale e verticale. Con la prima si intende la percezione nitida di note musicali suonate in successione rapida cioè orizzontalmente sul pentagramma, mentre con la seconda si intende la percezione nitida di note musicali suonate contemporaneamente da più strumenti, ossia verticalmente sul pentagramma.

Tale indice è così definito:

$$C = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (4.7)$$

La limitazione a 80 ms dell'energia utile, anziché a 50 ms, è dovuta al fatto che C si usa soprattutto nei riguardi della musica (per il parlato viene usato l'intervallo di 50 ms). Secondo Jordan (1981) il valore ottimale della chiarezza è compreso fra -2 e 2 dB.

Gli indici visti finora, basati sul criterio della frazione energetica hanno un inconveniente: l'integrazione in un certo intervallo di tempo della pressione quadratica varia no-

tevolmente a seconda che una riflessione intensa capiti immediatamente a monte o immediatamente a valle del limite scelto. Ciò non corrisponde ad un analogo comportamento della sensazione uditiva.

Per eliminare questo inconveniente è stato introdotto un parametro, definito in modo tale che l'elemento ($p^2 dt$) sia pesato con una funzione che dipende dall'istante di arrivo dell'onda riflessa.

Esso è il tempo baricentrico, o istante baricentrico, definito da Kürer (1969) nel seguente modo:

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \quad (4.8)$$

Secondo Jordan (1981) in condizioni ottimali esso deve essere minore di 140 ms.

4.4. Descrittori spaziali

La sensazione di spazialità è uno degli effetti soggettivi più importanti di una sala da concerto. Essa è un fenomeno molto complesso e dipende da svariati fattori, ma è stato dimostrato usando un'analisi multidimensionale che essa dipende da almeno due componenti: una è l'*Apparent Source Width* (ASW), che corrisponde alla percezione di una sorgente sonora più ampia di quella che è in realtà, restando comunque alquanto direzionale; la seconda è la sensazione dell'ascoltatore di immersione nel campo sonoro, detta *Listener Envelopment* (LEV).

I descrittori energetici sono parametri monoaurali (per determinarli è sufficiente un solo microfono) mentre i parametri spaziali sono binaurali (servono due microfoni).

La sensazione acustica che un individuo riceve in un ambiente chiuso non dipende solo dalla sequenza delle riflessioni e dal loro spettro, ma anche dalla direzione secondo cui l'energia riflessa giunge all'ascoltatore.

Normalmente l'udito non riesce a percepire la direzione di provenienza di ciascuna riflessione, ma è in grado di elaborare una sensazione che viene chiamata impressione spaziale. E' l'impressione acustica di trovarsi in uno spazio tridimensionale chiuso, di sentirsi avvolto dal suono e di percepire la fonte sonora più estesa di quanto essa non sia realmente. Affinché sorga una sensazione di spazialità è sufficiente che al campo sonoro diretto siano associate poche riflessioni, aventi le seguenti proprietà:

- siano prime riflessioni, cioè il loro ritardo rispetto al suono diretto non superi circa i 100 ms;
- giungano all'ascoltatore da direzioni laterali;
- abbiano un'intensità relativa a quella del suono diretto maggiore di una certa soglia;
- siano pressoché mutuamente incoerenti, condizione che è in buona parte automaticamente soddisfatta in una sala da concerto.

Tali considerazioni furono supportate da una notevole mole di risultati di indagine sull'impressione spaziale riportati da Barron e da Barron e Marshall. Essi stabilirono che il grado di impressione spaziale è una funzione lineare crescente della frazione della prima energia L_f , o frazione laterale (*Lateral fraction*), definita dalla relazione:

$$L_f = \frac{\sum_{5ms}^{80ms} E_r \cos \varphi}{\sum_{0ms}^{80ms} E} = \frac{\int_5^{80ms} p^2(t) \cos \varphi dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (4.9)$$

dove $t = 0$ corrisponde all'istante di arrivo del suono diretto;

j = l'angolo compreso fra la retta passante per le due orecchie dell'ascoltatore e la direzione di un raggio sonoro riflesso;

E = l'energia sonora;

E_r = l'energia sonora proveniente dalle sole onde riflesse.

La Frazione Laterale esprime il rapporto fra l'energia sonora associata a ciascuna riflessione che giunge all'ascoltatore nell'intervallo di tempo 5 - 80 ms, pesata secondo il coseno dell'angolo j , e l'energia sonora totale (comprendente anche l'energia sonora dell'onda diretta) che giunge all'ascoltatore nei primi 80 ms.

Secondo Jordan (1981) il valore ottimale della frazione laterale deve essere superiore a 0,25.

Esiste poi tutta una serie di parametri, proposti successivamente, simili alla Frazione Laterale.

L'efficienza laterale LE (*Lateral Efficiency*), suggerita da Jordan (1980) è un descrittore spaziale così definito:

$$LE = \frac{\int_{25ms}^{80ms} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_0^2(t) dt} \quad (4.10)$$

dove p_{∞} = pressione sonora rilevata con un microfono a caratteristica dipolare (sensibilità nulla verso il fronte d'onda diretto);

p_0 = pressione sonora rilevata con un microfono a caratteristica sferica (sensibilità uniforme in ogni direzione dello spazio).

La (4.10) esprime il rapporto esistente fra l'energia laterale che giunge all'ascoltatore nell'intervallo di tempo compreso fra i 25 e gli 80 ms e l'energia totale che giunge all'ascoltatore nei primi 80 ms. La LE appare alquanto simile alla frazione della prima energia laterale L_f . Oltre che nel ristretto intervallo di integrazione dell'energia utile al numeratore, la differenza fra LE ed L_f consiste nel peso direzionale dell'energia in quanto in L_f è l'energia che è pesata con $\cos\phi$, mentre in LE è la pressione sonora che è pesata con $\cos\phi$. Secondo Jordan (1981) si è in condizioni di Efficienza Laterale ottimale per valori superiori a 0,2 – 0,3.

Ultimamente una nuova versione della ISO/DIS 3382 introduce altre due varianti alla definizione di Lateral Fraction:

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_0^2(t) \cos^2\phi dt}{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) dt} \quad (4.11)$$

dove $p_L(t)$ è la pressione istantanea misurata con un microfono con caratteristica dipolare, puntato in modo da avere la massima sensibilità su di un asse perpendicolare alla congiungente la testa dell'ascoltatore e la sorgente sonora.

Dato che la direttività del microfono (Fig. 4.6) è essenzialmente descritta dalla funzione del coseno e i valori della pressione sono elevati al quadrato, la frazione di energia laterale risultante varia con il quadrato del coseno dell'angolo. Come alternativa, per ottenere un valore della frazione di energia laterale che vari con il coseno dell'angolo, la ISO/DIS 3382 propone la seguente approssimazione:

$$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} |p_L(t) \cdot p(t) dt|}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) |\cos\varphi| dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} p^2(t) dt} \quad (4.12)$$

che si pensa sia soggettivamente più accurata e che è di fatto coincidente con la L_f di Barron e Marshall.



Andamenti caratteristici di microfoni sferici e ad otto.

$$L_f = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2 d\tau}{\int_0^{80} p_0^2 d\tau} \quad L_{fc} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2 d\tau}{\int_0^{80} p_0^2 d\tau} \quad L_e = \frac{\int_{25ms}^{\infty} p_8^2 d\tau}{\int_0^{\infty} p_0^2 d\tau}$$

Early lateral energy Lateral Energy Fraction Efficienza Laterale

Fig. 4.6 – Direttività dei microfoni e indici spaziali

Esiste inoltre un descrittore spaziale che mette in evidenza il grado di diversità fra la pressione sonora che giunge all'orecchio destro e quella che giunge all'orecchio sinistro dell'ascoltatore; esso è stato definito da Schröder (1979) e viene indicato con *IACC* (Inter Aural Cross Correlation). Il significato di questo parametro può essere compreso tramite un'analogia con la statistica, paragonando le pressioni sonore che giungono all'orecchio destro e sinistro a due serie di valori.

Si considerino due serie di N valori ciascuna, X_i e Y_i , che siano in qualche modo correlate tra di loro e che possano essere graficizzate su un piano cartesiano. A seconda della disposizione che assumono i punti sul piano si ha un diverso grado di correlazione, esprimibile attraverso un coefficiente r , che può assumere valori nell'intervallo $]-1,1[$.

Questo coefficiente di correlazione tenderà rispettivamente a -1 e a 1 , man mano che i punti del piano si avvicinano all'andamento di una retta con pendenza negativa e positiva; tenderà, invece, a 0 quando si è in condizione di completa incorrelazione (Fig. 4.7).

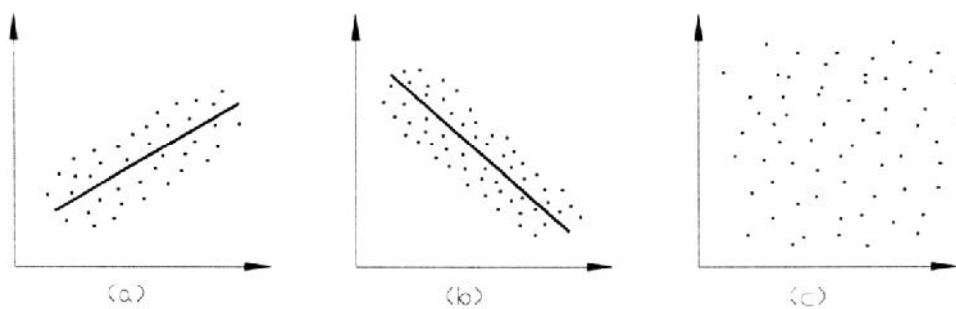


Fig. 4.7 - Esempi di correlazione tra diversi punti su un piano (Spiegel 1961):

- (a) correlazione lineare positiva
- (b) correlazione lineare negativa
- (c) incorrelazione.

Per definire il coefficiente di correlazione delle due serie di N valori, occorre considerare prima i loro valori medi, poi gli scostamenti dei singoli valori dai loro valori medi.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{N} \quad (4.13)$$

In base a questi si definiscono la varianza di X , quella di Y , e la covarianza di X e Y :

$$s_X^2 = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{N} \quad (4.14)$$

$$s_Y^2 = \frac{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}{N} \quad (4.15)$$

$$s_{XY}^2 = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{N} \quad (4.16)$$

Il coefficiente di correlazione si esprime, così, attraverso la seguente relazione:

$$r = \frac{s_{XY}}{\sqrt{s_X^2 \cdot s_Y^2}} \quad (4.17)$$

In acustica le varianze corrispondono alle autocorrelazioni nel punto di zero delle pressioni destre e sinistre, mentre le covarianze corrispondono alla cross-correlazione, come in (4.18), (4.19), (4.20).

$$\varphi_d(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \int_{-T}^T p_d^2(t) dt \right) \quad (4.18)$$

$$\varphi_s(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \int_{-T}^T p_s^2(t) dt \right) \quad (4.19)$$

$$\varphi_{ds}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \int_{-T}^T p_d(t) p_s(t + \tau) dt \right) \quad (4.20)$$

dove p_d = pressione sonora che giunge all'orecchio destro;

p_s = pressione sonora che giunge all'orecchio sinistro;

$2T$ = intervallo di campionamento;

τ = ritardo corrente.

In analogia al coefficiente di correlazione r , si può definire una grandezza $\rho(\tau)$, detta ritardo corrente:

$$\rho(\tau) = \frac{\varphi_{ds}(\tau)}{\sqrt{\varphi_d^2(0) \cdot \varphi_s^2(\tau)}} \quad (4.21)$$

Ricordando le (4.18), (4.19), (4.20) si ottiene:

$$\rho(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \int_{-T}^T p_d(t) \cdot p_s(t + \tau) dt \right)}{\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \sqrt{\int_{-T}^T p_d^2(t) \cdot \int_{-T}^T p_s^2(t + \tau) dt} \right)} \quad (4.22)$$

I limiti di integrazione possono teoricamente essere infiniti, in realtà si calcolano le risposte all'impulso per i primi 50 ms (alcuni propongono 80 ms).

La *IACC* è definita come il valore massimo che assume la (4.22), con ritardi correnti minori di 1 ms:

$$IACC = |\rho(\tau)|_{\max} \quad \text{per } \tau \leq 1 \text{ ms} \quad (4.23)$$

Da uno studio di Ando (1985) sulla inter aural cross correlazione ne scaturisce che questo parametro non dipende tanto dal segnale emesso dalla sorgente, quanto invece dall'angolo con il quale i raggi sonori giungono all'ascoltatore. Chiamato ξ l'angolo compreso fra l'asse orizzontale di simmetria dell'ascoltatore e la direzione del suono (Fig. 4.8), e τ il tempo di ritardo corrente, e facendoli variare, Ando ottenne diversi valori del parametro in esame.

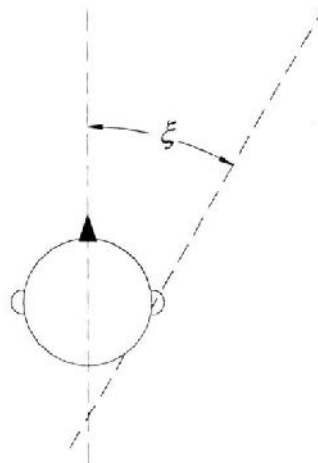


Fig. 4.8 – Angolo ξ di direzione dei raggi sonori, nello studio di Y. Ando

Va sottolineato che:

- i valori della *IACC* sono compresi nell'intervallo $]-1, +1 [$;
- il valore ottimale della *IACC* è 0,4 circa;
- i valori migliori si hanno per $\tau = 0$ e per $\xi = 55^\circ$.

In Tabella 4.1 sono riportati i valori complessivi della *IACC*, all'interno di una sala.

τ (ms)	ξ (deg)	<i>IACC</i>
0	0	1
0	55	0,3
0	90	0,1
0	180	0,7
0,5	0	0,5
0,5	55	0,5
0,5	90	0,2
0,15	180	0,3
1	0	0,3
1	55	0,1
1	90	0,2
1	180	0,3

Tab. 4.1 - Valori medi della *IACC* (Ando 1985)

4.5. Cenni sulla valutazione della intelligibilità

In una sala destinata a musica operistica, l'intelligibilità della parola diventa un parametro importante, in quanto la comprensione delle parole è un'esigenza fondamentale. Il più importante fra i caratteri descrittivi della parola è il cosiddetto *STI* (Speech Transmission Index), introdotto da Houtgast e Steeneken sulla base dell'ipotesi fondamentale che la voce umana si basa su segnali modulati in intensità e che la comprensione sarà buona se non varia troppo l'entità della modulazione alle varie frequenze. Esso viene calcolato dalla cosiddetta funzione di trasferimento della modulazione (MTF) definita dal rapporto tra l'ampiezza di modulazione ricevuta e quella inviata nell'ambiente per bande d'ottava tra 125 Hz e 8 kHz:

$$m(F) = \frac{m_0}{m_1} \quad (4.24)$$

Variando la modulante tra 0.63 Hz e 12.5 Hz si ottiene l'intera matrice MTF, composta da 7 (bande di frequenza)* 14 (frequenze modulanti) = 98 valori. I 14 valori per ogni banda d'ottava vengono elaborati e trasformati in un rapporto segnale/rumore equivalente e graficizzati; infine essi possono essere pesati per ottenere un valore unico di *STI*. Il peso è ovviamente diverso per l'uomo e per la donna. Dato che lo *STI* è un parametro fin troppo ricco di informazioni, spesso è sufficiente calcolare il parametro *RASTI* (Rapid Speech

Transmission Index) tenendo in considerazione soltanto le bande d'ottava di 500 Hz e 2 kHz e modulandole rispettivamente con 4 e 5 frequenze. E' stato dimostrato da Schröder che questi parametri possono essere misurati direttamente dalla risposta all'impulso a patto che il sistema sia lineare, passivo e tempo - invariante: nel caso in questione questo corrisponde all'ipotesi di basso rumore di fondo, ipotesi certamente verificata nelle sale da concerto. Per calcolare ogni valore di $m(F)$ dalla risposta all'impulso $h(t)$, viene applicato un filtro selettore.

4.6. Stabilità e affidabilità dei descrittori oggettivi

Uno dei maggiori problemi incontrati con i descrittori oggettivi è che essi non sono immediatamente fruibili come lo è stato il tempo di riverberazione: esso, infatti, è sufficientemente generalizzato per tutta la sala e poco dipendente (nell'ipotesi di campo sonoro diffuso) dalla posizione di ascolto. Il tempo di riverberazione è certamente un parametro distintivo e caratteristico di una sala, facilmente misurabile o calcolabile anche in fase progettuale e ciò giustifica il successo avuto fin dalla sua proposizione da parte di W.C. Sabine.

Le nuove misure oggettive sono quasi sempre fortemente dipendenti dalla posizione di ascolto o della sorgente sonora e l'utilizzo di un valore medio è spesso di poca utilità. Inoltre mentre il tempo di riverberazione è facilmente misurabile con apparecchiature commerciali standard (fonometro e registratore di livello) e i risultati sono di immediata interpretazione, ciò non si può dire dei nuovi descrittori oggettivi che richiedono apparecchiature speciali e costose e necessitano di un'analisi interpretativa quasi sempre non semplice e rapida. E ancora i nuovi descrittori oggettivi non sono spesso calcolabili a priori dai dati architettonici, come invece può farsi con il tempo di riverberazione. Tutto ciò ha limitato la loro diffusione a pochi specialisti in grado di avere le apparecchiature sofisticate necessarie e i programmi di calcolo per la loro valutazione. Tuttavia il grande vantaggio dei descrittori oggettivi è di poter fornire indicazioni analitiche (e non solo lessicali o qualitative) di qualità acustiche delle sale e dell'ascolto che altrimenti non potrebbero essere date.

Appare dunque legittima la domanda se questi criteri siano stabili, con riferimento alle misure acustiche oggi disponibili, nonché se siano ripetibili ed affidabili. Studi recenti hanno dimostrato una buona stabilità del tempo di riverberazione (T_{60}) e dell'Early Decay Time (EDT) rispetto ai metodi di misura e alla strumentazione utilizzati, mentre sono risultati particolarmente delicati gli indici energetici che dipendono da un rapporto di frazioni energetiche quali, ad esempio, C_{80} , D , LE .

Nel caso dell'Efficienza Laterale (LE) il rapporto di energie dipende dalla sensibilità di due diversi tipi di microfoni: uno omnidirezionale ed uno a figura di otto per la misura dell'energia delle riflessioni laterali e la cui calibrazione risulta molto delicata. Per questi motivi le misure di LE sembrano essere le più suscettibili di errori e le meno riproducibili rispetto agli altri indici esaminati. Le grandezze oggettive sopra citate sembrano dipendere molto dalla posizione della sorgente o del microfono di registrazione, dalla sensibilità di quest'ultimo e della direzionalità della sorgente di eccitazione.

Si riporta, a titolo di confronto qualitativo, una sintesi dei risultati ottenuti dal Peterson ed altri (1991) per la frequenza di 1 kHz e per quattro criteri oggettivi già presentati (Tab. 4.2). Nella tabella sono riportate le variazioni dovute al microfono e alla sorgente acustica (scarto medio δ fra le misure effettuate, ove con scarto si intende la differenza fra il valore massimo e minimo misurati) e la deviazione standard σ per la riproducibilità delle misure. I dati si riferiscono a teatri per concerti e teatri lirici di varia grandezza e capacità di pubblico (da 3000 a 21000 m³ e da 360 a 5000 posti) e le misure sono state effettuate dal CSTB francese.

	<i>EDT</i>	<i>T60</i>	<i>C80</i>	<i>D</i>
Riproducibilità σ	0.04	0.02	0.3	2.2
Microfono δ	0.05	0.05	0.5	
Altoparlante δ	0.1	1	2.5	10

Tab. 4.2 - Risultati ottenuti da Peterson

Lo studio in oggetto ha anche evidenziato che, proprio a causa delle grandi fluttuazioni di alcuni criteri oggettivi all'interno di una stessa sala, risultano molto problematiche le differenziazioni fra due diverse sale basate su tali indici e quindi possono risultare aleatori i criteri di confronto basati su tali descrittori.

CAPITOLO 5 – TECNICHE DI CORRELAZIONE PSICOACUSTICA

5.1. Psicoacustica: stato dell'arte

Nel caso di auditori destinati al parlato, si giudica buona l'acustica se si riescono a capire distintamente le parole in ogni punto dell'ambiente e questa qualità acustica può essere misurata oggettivamente ad esempio in termini di Indice di articolazione *PSA* (*Percentage Syllable Articulation*) che misura la percentuale di sillabe comprese su quelle pronunciate e viene determinato con opportuni test statistici.

Per quanto riguarda invece i teatri e le sale destinate alla musica, non è altrettanto semplice definire la qualità acustica.

Alcuni autori (Cremer, Müller, 1982) hanno pensato di applicare test simili a quelli usati per l'intelligibilità del parlato per valutare la capacità di distinguere i diversi strumenti musicali e le note. Tali test sarebbero però stati limitati ad un ristretto circolo di persone con una cultura musicale; inoltre la valutazione dell'intelligibilità delle note non è né l'unico né il più importante aspetto della qualità acustica di una sala: ci sono infatti strumenti e composizioni musicali per cui è richiesta, al contrario, una certa fusione dei suoni allo scopo di ottenere una maggiore espressività e pathos.

La mancanza di un criterio inequivocabile per la musica solleva la questione se ci possa essere un comune accordo sulla qualità acustica di una sala destinata ad esecuzioni musicali. Alcuni aspetti della qualità acustica mettono d'accordo la maggioranza delle persone, ma ce ne sono altri per cui le significative differenze tra i giudizi di diversi gruppi di ascoltatori possono essere considerate solo una questione di gusti.

Bisogna poi considerare che il giudizio soggettivo sulla qualità acustica di una sala può essere influenzato da diversi fattori e può variare notevolmente anche per la stessa persona.

In generale le preferenze degli ascoltatori variano con il tipo di musica e con lo stile musicale ("classico", "romantico", "moderno") come ha dimostrato W. Kuhl (1954); inoltre è praticamente impossibile separare il giudizio di qualità acustica di una sala dal giudizio sulla qualità musicale delle esecuzioni, per cui le sale da concerto in cui suonano regolarmente artisti stranieri hanno maggiori opportunità di avere una reputazione di buona acustica rispetto alle sale in cui raramente hanno luogo eventi musicali di una certa importanza.

Il giudizio soggettivo dipende anche dalla posizione occupata nella sala, perché si è visto che le caratteristiche del campo sonoro variano da punto a punto e, infine, può essere

influenzato anche da fattori extra-acustici come la visuale, la comodità della poltrona, le condizioni termo-igrometriche.

Delle conclusioni psicoacustiche inconfutabili richiedono, oltre ad un numero molto grande di persone da testare, ulteriori condizioni che sono difficilmente realizzabili nella pratica. Ad esempio dovrebbe essere variata una sola condizione alla volta, allo scopo di valutare accuratamente l'effetto di tale cambiamento, mentre spesso i confronti tra diverse sale vengono fatti con composizioni musicali ed esecutori diversi. Inoltre l'osservatore non dovrebbe conoscere quali condizioni sperimentali sono state cambiate durante le sue osservazioni. Questo è possibile, entro certi limiti, se si è in grado di registrare fedelmente il suono (su disco, nastro o con il computer) e di riprodurlo in un "luogo neutro" per mezzo di altoparlanti o cuffie. In tal modo sarebbe anche possibile testare la ripetibilità del giudizio di una persona, presentando la stessa situazione o lo stesso confronto più volte, a sua insaputa.

Validi giudizi acustici dovrebbero essere formulati senza riferimento alle opinioni di altri, così idealmente le persone non dovrebbero avere la possibilità di parlare tra loro durante le valutazioni d'ascolto. Inoltre, per avere giudizi validi, le situazioni da confrontare dovrebbero essere presentate l'una di seguito all'altra, ma ciò è praticamente impossibile, se non attraverso l'ascolto di esempi registrati. Confronti dal vivo in sale diverse implicano distanze temporali al minimo di alcune ore, più probabilmente di diversi giorni, se non di anni.

Le ricerche passate hanno seguito procedimenti diversi nel tentativo di definire criteri di qualità acustica musicale nelle sale:

- la raccolta diretta di informazioni sui giudizi degli ascoltatori;
- i giudizi basati su modifiche strutturali operate nella sala;
- i giudizi basati sulle modifiche operate nei campi sonori sviluppati mediante sintesi elettroacustica;
- il confronto di registrazioni fatte in sale sotto diverse condizioni acustiche.

Le indagini psico-soggettive sulla qualità acustica dei teatri e delle sale esistenti attraverso questionari sono state le prime ad essere intraprese, al fine di fornire i descrittori acustici più opportuni per definire le caratteristiche del campo sonoro che si crea nell'ambiente.

Il primo ad utilizzare questo tipo di indagine fu Sabine, che, per stabilire quale fosse il tempo di riverberazione ottimale per una sala, si servì del giudizio di un ristretto gruppo di musicisti (1929).

Watson (1924), che per primo tentò di sviluppare una relazione quantitativa tra il tempo di riverberazione ottimale e il volume di una sala da concerto, calcolò il tempo di riverberazione di sei sale “dichiarate buone dalla pubblica opinione”, basandosi così sul giudizio diretto del pubblico.

Parkin e altri (1952) inviarono questionari scritti, riguardanti 12 antiche Concert Halls inglesi ad un gruppo di esperti musicali (che comprendeva professori di musica, critici, compositori, musicisti o interpreti), ritenendo che il giudizio di questi ultimi derivasse dalla loro esperienza sul palcoscenico e perciò differisse da quello degli ascoltatori.

Il questionario richiedeva un giudizio generale sulla qualità acustica della sala, con tre soli gradi di valutazione: “good”, “fair”, “bad”. Di 170 questionari, ne tornarono 75 e solo 42 poterono essere considerati attendibili e utilizzabili. La Tab. 5.1 mostra il risultato dell’indagine in cui le sale sono riportate secondo l’ordine di qualità acustica decrescente, basata sulla percentuale di giudizi “good”. In generale si deduce una scarsa correlazione tra qualità acustica, tempo di riverberazione e volume della sala, per cui si può dedurre che, se c’è un tempo di riverberazione ottimale, esso è compreso in un campo abbastanza ampio.

Room	N° of obsever	Good	Fair	Bad	% of good responses	V (m ³)	T (s) – 500 Hz
Liverpool Philharmonic	25	22	2	1	90	13500	1,6
Covent Garden	39	31	7	1	80	10100	1,1
St. Andrew’s Hall	17	12	5	0	70	16100	2,2
Usher Hall	21	14	6	1	65	15700	1,8
De Montfort Hall	16	10	5	1	65	12500	1,6
People’s Palace	29	17	11	1	60	8900	1,4
Hastings Pavilion	18	11	7	0	60	7900	1,3
A	33	14	13	6	40	-	-
B	26	10	15	1	40	14400	1,8
C	18	7	8	3	40	16900	2,1

Tab. 5.1 - Distribuzione dei giudizi soggettivi di alcune sale da concerto

5.2. La teoria di Beranek

Un primo tentativo sistematico di qualificazione acustica delle sale da concerto si deve a Leo Beranek ed è documentato nell'opera *Music, Acoustics and Architecture* (1962).

Beranek visitò personalmente 54 sale da concerto e teatri d'opera tra i più famosi al mondo, sebbene molti colleghi contribuirono alla sua ricerca con importanti informazioni.

Per ogni sala furono eseguite misure del tempo di riverberazione a diverse frequenze, a sala piena e vuota, e furono raccolte informazioni tecniche relative alla geometria della sala, tipo di arredamento, natura delle superfici interne, etc.

Quindi Beranek fece compilare dettagliati questionari a 23 direttori d'orchestra tra i più famosi e a 21 critici musicali, sulle sale di cui avevano esperienza tra quelle considerate. Il risultato di tali questionari contribuì alla valutazione complessiva.

L'estrema cura con cui Beranek raccolse i dati oggettivi sulle sale appare in contrasto con la tecnica di manipolazione dei giudizi soggettivi di qualità acustica, che sembra quasi arbitraria. Infatti, basandosi su tali giudizi e sulle sue opinioni personali, egli classificò le 54 sale in 5 categorie di qualità acustica:

CATEGORIA	QUALITA'	PUNTEGGIO
A+	Eccellente	p. 90 - 100
A	Da Molto buona a Eccellente	p. 90 - 80
B+	Da Buona a Molto buona	p. 80 - 70
B	Da Sufficiente a Buona	p. 70 - 60
C	Sufficiente	p. 60 - 50
Non Utilizzabile		p. < 50

Tale suddivisione è opinabile, perché non sono illustrate dettagliatamente le caratteristiche delle varie categorie e non viene spiegato come le sale furono assegnate alle varie classi.

L'obiettivo della ricerca di Beranek era quello di ricavare un sistema di valutazione quantitativa della qualità acustica di una sala basato solo sulle informazioni ricavabili dai disegni e su parametri acustici oggettivamente misurabili: egli rivolse la sua indagine sugli aspetti in cui le sale "eccellenti" differivano acusticamente da quelle giudicate "meno buone". A questo scopo egli stabilì una scala di valutazione e assegnò ad ogni categoria di

qualità acustica un intervallo di valori sulla scala. Sebbene per molto tempo il tempo di riverberazione fosse stato considerato come il criterio decisivo per la qualificazione dell'acustica ambientale, Beranek mostrò che non era il parametro più importante ma solo uno tra numerosi altri. Questo era evidente per il fatto che le sale del gruppo A+ avevano tempi di riverberazione che andavano da 1,7 a 2,05 s; per quelle del gruppo A variavano da 1,2 a 2 s e così via.

Beranek concluse che altre qualità positive potevano compensare tempi di riverberazione non adeguati: tra queste egli riteneva che la più importante fosse l'*ITDG*; tale parametro risultava rispettivamente:

- inferiore a 20 ms in tutte le sale del gruppo A+;
- inferiore a 33 ms nelle sale del gruppo A;
- inferiore a 57 ms nelle sale del gruppo B;
- pari a 70 ms nell'unica sala del gruppo C (*Royal Albert Hall* di Londra).

Beranek attribuì a tale parametro un peso rilevante nella sua scala di valutazione: poteva assumere un massimo di 40 punti sui 100 totali disponibili. Al Tempo di riverberazione alle medie frequenze dato da:

$$T_{med} = (T_{500} + T_{1000})/2 \quad (5.1)$$

venne assegnato un peso massimo di 15 punti, uguale al peso attribuito al rapporto dei bassi (*bass ratio*), parametro che caratterizza la dipendenza del tempo di riverberazione dalla frequenza:

$$\frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} = \frac{T_{125} + T_{250}}{2T_{med}} \quad (5.2)$$

A questi e agli altri parametri oggettivi considerati fu associata una scala numerica dalla quale si poteva dedurre il corrispondente punteggio (Fig. 5.1). Alcuni punteggi possono risultare negativi e in questo caso vengono sottratti nella valutazione del punteggio totale. Si tratta dei punteggi che corrispondono alle eventuali caratteristiche negative della sala, come l'eco, il rumore di fondo o la distorsione tonale.

Ciascuno di questi difetti può produrre fino ad un massimo di 50 punti di penalizzazione cosicché una sala “eccellente” ma con un impianto di condizionamento rumoroso può cadere nella categoria “insufficiente” e quindi essere classificata non utilizzabile.

Numerose sono le critiche che sono state mosse a Beranek per il metodo di assegnazione dei pesi numerici ai vari parametri oggettivi, che si può considerare basato in gran parte sul suo giudizio personale, ma ancora più discutibile è il suo tentativo di correlare parametri oggettivi e caratteristiche soggettive di qualità acustica.

Beranek, infatti, aveva individuato 18 “attributi soggettivi della qualità acustica musicale”, come ad esempio “intimità” (*intimacy*), “vivezza del suono” (*liveness*), “calore” (*warmth*), etc. Molti di questi furono collegati univocamente a parametri oggettivi (ad esempio l’intimità è stata collegata all’*ITDG*, e il calore al rapporto dei bassi), altri invece furono collegati allo stesso parametro oggettivo (ad esempio la vivezza e la pienezza dei toni sono entrambe state collegate al tempo di riverberazione alle medie frequenze), dando luogo a correlazioni multiple. In ogni caso tali correlazioni non sono state determinate sulla base di uno studio statistico ma in modo pressoché arbitrario.

A parte questo scarso rigore nel trattare le caratteristiche soggettive della qualità acustica, il metodo di valutazione di Beranek ha il merito di rappresentare il primo tentativo di calcolare la qualità acustica g_k di una sala k come somma dei prodotti di parametri oggettivamente quantificabili f_{ik} per i corrispondenti fattori di peso w_i , ossia:

$$g_k = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_{ik} \quad (5.3)$$

dove n = numero dei parametri oggettivi.

Questo metodo può sembrare simile alla tecnica dell’analisi dei fattori, oggi comunemente usata, ma in realtà se ne differenzia notevolmente per il fatto che, mentre per Beranek il numero, il significato e i pesi di questi parametri oggettivi sono noti e vengono calcolati a priori, nell’analisi dei fattori i giudizi soggettivi sono i dati su cui basarsi per determinare, prima, il numero dei fattori necessari a spiegarli e, in seguito, i pesi da attribuirvi.

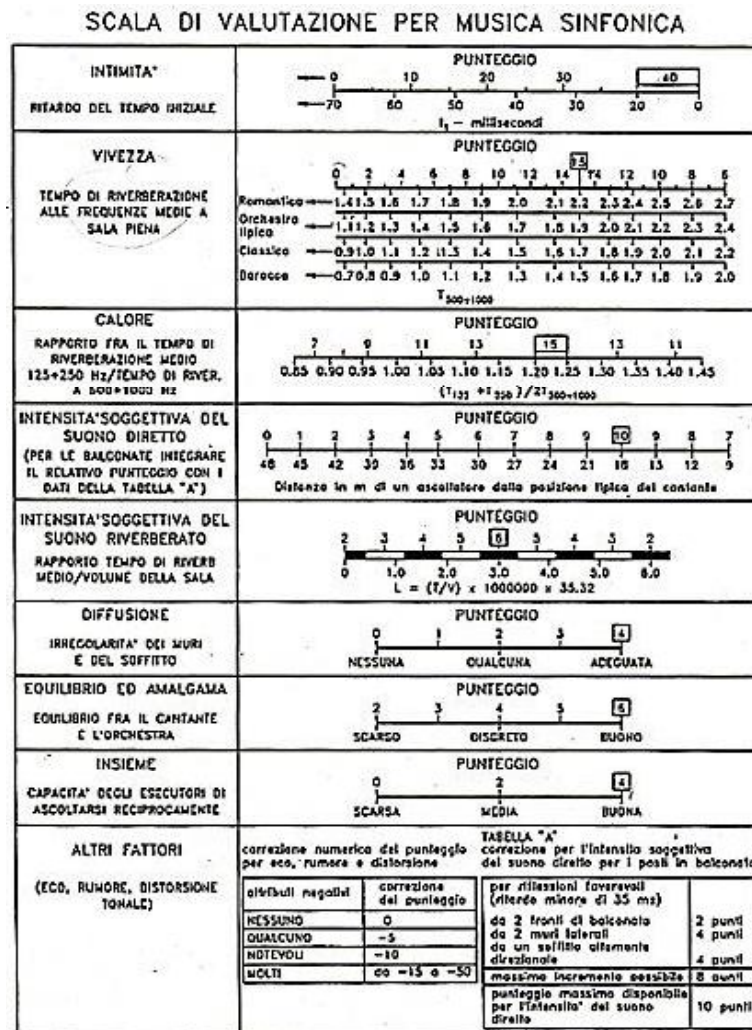


Fig. 5.1 – Scala numerica per la determinazione dei punteggi

5.3. Tecniche numeriche di correlazione: l'analisi dei fattori

Al perfezionamento delle tecniche di misura, che ha permesso di introdurre numerosi descrittori fisici per definire oggettivamente le caratteristiche del campo sonoro di una sala, e agli sforzi fatti per arrivare a formulare giudizi soggettivi di qualità acustica il più possibile attendibili, devono corrispondere delle tecniche per l'analisi dei dati a disposizione che producano la maggior quantità possibile di informazioni con la massima sicurezza. Per questo, nella valutazione delle correlazioni tra parametri acustici oggettivi e giudizi di qualità acustica, vengono impiegate le moderne tecniche di analisi statistica multivariata; tra queste, l'analisi dei fattori è quella che è stata usata più frequentemente e anche la più adatta ai problemi di acustica ambientale.

I dati che devono essere analizzati si possono considerare in generale come gli n attributi di N oggetti: tali dati possono essere raccolti in una matrice dei dati $[x_{i,k}]$ di ordine $n \times N$, le cui righe corrispondono agli attributi i e le cui colonne corrispondono agli oggetti j .

La matrice dei dati può essere costituita ad esempio dai valori assunti dai parametri fisici (righe) in corrispondenza dei punti di misura (colonne), oppure da giudizi soggettivi forniti dai questionari (righe) in corrispondenza dei punti di misura o delle varie sale considerate (colonne).

L'obiettivo dell'analisi è quello di esprimere tale matrice come prodotto di due altre matrici $[w_{i,j}]$ e $[F_{j,k}]$, di ordine $n \times m$ e $m \times N$ rispettivamente, dette matrice dei pesi e matrice dei fattori, ossia:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & \cdots & f_{mN} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

dove n = numero di parametri oggettivi;

m = numero di fattori indipendenti;

N = numero dei punti di misura o delle sale esaminate.

In tale modo gli n attributi iniziali possono essere espressi come somma dei prodotti di un numero minore m di altri attributi detti fattori per i relativi pesi.

In realtà questo è un caso particolare dell'analisi dei fattori, detto analisi delle componenti principali, in cui la matrice dei pesi si deduce in maniera univoca dall'analisi.

Lo svantaggio principale è che, se si vuole rappresentare esattamente la matrice dei dati, il numero dei fattori è pari al numero degli attributi iniziali. Ma poiché è possibile ordinare i fattori sistematicamente secondo la loro importanza nell'approssimare la matrice dei dati (ossia secondo il loro contributo relativo a spiegare la varianza complessiva del sistema degli attributi iniziali), il numero dei fattori che si considerano può dipendere dal grado di approssimazione voluto (ossia dalla percentuale della variabilità complessiva che si vuole che tali fattori spieghino).

L'analisi dei fattori cerca di ridurre le dimensioni del sistema multivariato degli attributi iniziali mediante un modello che leghi gli n attributi osservati a m fattori. Nell'analisi dei fattori la relazione (5.4) viene espressa più generalmente come:

$$X = \Lambda F + U \quad (5.5)$$

dove F rappresenta la matrice dei fattori comuni a tutti gli attributi e U la matrice dei fattori specifici di ciascun attributo.

La principale differenza tra l'analisi dei fattori e quella delle componenti principali è che, mentre i valori individuali dalle componenti principali possono essere direttamente calcolati, i punteggi fattoriali, ossia i valori assunti dai fattori per ciascun oggetto devono essere stimati.

Il numero dei parametri ritenuti fondamentali e sufficientemente indipendenti può essere determinato mediante l'analisi dei fattori. Si tratta, in breve, di determinare per prima il numero e la significatività di scale di giudizio soggettive legate a particolari esperienze e poi trovare i parametri fisici oggettivi che mostrano la correlazione maggiore con le suddette scale di giudizio.

La prima fase può essere attuata presentando brani musicali registrati in diversi siti a diversi soggetti che debbono esprimere un giudizio o mediante una scala di valori prefissata o mediante un giudizio relativo di preferenza fra due possibili soluzioni. I dati raccolti per parecchi ascoltatori sono posti in forma matriciale avendo nelle righe i parametri oggettivi e nelle colonne i giudizi soggettivi.

L'analisi dei fattori consiste nel determinare una matrice di accoppiamento avente numero di righe ridotte rispetto a quella iniziale. Tale problema è in pratica simile alla determinazione degli assi maggiori di un ellissoide multidimensionale con la differenza che il numero delle dimensioni è noto a priori. Il risultato di quest'analisi è il numero r di scale percettive indipendenti, dette fattori, e la significatività di ciascuno dei suddetti fattori.

Questi fattori possono essere immaginati come assi coordinati di uno spazio ad r dimensioni nel quale ciascun campo sonoro è rappresentato da un punto. Se $r = 2$ lo spazio percettivo coincide con un piano con assi rettangolari di nome $F1$ ed $F2$. Se l'analisi dei fattori si è basata su test di preferenza allora la scala individuale di preferenza di un soggetto può essere rappresentata da un vettore nel piano $(F1, F2)$, come indicato nella Fig. 5.2.

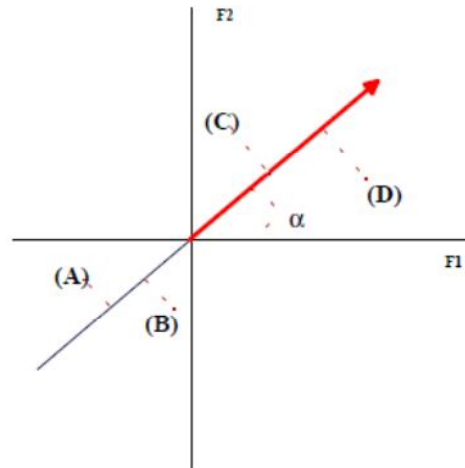


Fig. 5.2 – Esempio di spazio percettivo a due dimensioni

Secondo l'angolo α che il vettore forma con l'asse $F1$, questo ascoltatore fornisce un giudizio pari a $F1\cos\alpha$ per $F1$ ed $F2\sin\alpha$ per $F2$. Le proiezioni sugli assi forniscono i giudizi personali di preferenza di questo ascoltatore.

Allo stesso modo se si fosse utilizzata una scala bipolare si sarebbero ottenute due direzioni nel diagramma. Per ottenere i migliori risultati dall'analisi dei fattori occorre presentare i dati agli ascoltatori in modo omogeneo, ad esempio registrandoli in modo stereofonico utilizzando gli stessi brani musicali secchi (cioè registrati in camera anecoica) riprodotti nelle sale da esaminare, dove sono registrati con una testa artificiale e presentati poi in cuffia (Siebrasse) agli ascoltatori.

Questa nuova tecnica si contrappone a quella classica seguita da Wilkens e Plenge (1974) che fanno eseguire alla stessa orchestra lo stesso programma musicale ma in diverse sale da concerto, registrando i brani in modo stereofonico con una testa artificiale e presentandoli ai soggetti mediante cuffie. Wilkens e Plenge hanno trovato tre fattori principali denominati:

- $F1$; fattore intensità (47%);
- $F2$; fattore distinzione (28%);
- $F3$; fattore timbro (14%).

Il numero in parentesi indica il peso relativo dei tre fattori. Essi sono pari all'89% del peso totale. Da queste ricerche è interessante osservare come si individuino due gruppi di ascoltatori:

- un primo gruppo preferisce suoni intensi (alti valori di $F1$);

- un secondo gruppo preferisce distinguere i suoni (alti valori di $F2$).

Analoghi risultati sono stati trovati da M. Barron (1988) in un'indagine sulle sale musicali britanniche.

P. Lehemann (1976) ha condotto un'indagine per individuare quali parametri oggettivi si correlassero ai fattori $F1$, $F2$ ed $F3$ (in uno spazio tridimensionale delle preferenze). $F1$ è ben correlato alla grandezza G (livello normalizzato) definita dalla seguente relazione:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt}{\int_0^{\Delta t} h(t)_0^2 dt} \quad (5.6)$$

dove: $h(t)$ è la risposta impulsiva della sala,

$h(t)_0$ è la risposta impulsiva ad una distanza specifica,

Δt è la durata dell'impulso di eccitazione.

$F2$ è ben correlato con il centro di gravità T_c definito da Kurer e $F3$ sembra essere correlato alla dipendenza frequenziale dell' EDT .

K.F. Siebrasse (1973) ha utilizzato ancora l'analisi dei fattori ma con una metodologia nuova rispetto agli altri. Egli ha utilizzato brani musicali (la sinfonia *Jupiter* di Mozart) registrati in camera anecoica e riprodotti nelle sale musicali da esaminare nei punti di misura prescelti. Il suono ottenuto era poi registrato mediante una testa artificiale in stereofonia. I dati così registrati venivano presentati agli ascoltatori in campo libero, a livello costante e compensato in modo da togliere gli effetti di reazione delle registrazioni incrociate dei microfoni posti nelle orecchie della testa artificiale.

Non era utilizzata una scala di preferenze bensì veniva richiesto a ciascun ascoltatore di esprimere una preferenza relativa fra due brani alla volta. L'applicazione dell'analisi dei fattori ha permesso di determinare 4 fattori ($F1$, $F2$, $F3$, $F4$) aventi significatività pari al 45%, 16%, 12% e 7%. I risultati di questo spazio a 4 dimensioni venivano di volta in volta proiettati su due assi. Nella Fig. 5.3 si ha un esempio dei risultati ottenuti. I vettori che rappresentano le scale di preferenza individuale hanno lunghezza differente perché hanno componenti non nulle anche nelle altre due direzioni non rappresentate in figura. Il fatto che tutti questi vettori siano orientati verso destra porta a concludere che $F1$ sia il fattore di consenso mentre i componenti nella direzione $F2$ riflettono le differenze nei gusti personali degli ascoltatori. Queste considerazioni valgono, altresì, per gli altri due fattori

$F3$ ed $F4$. Pertanto ulteriori ricerche dovrebbero indirizzarsi verso il fattore $F1$ poiché questo conduce a criteri di validità generale.

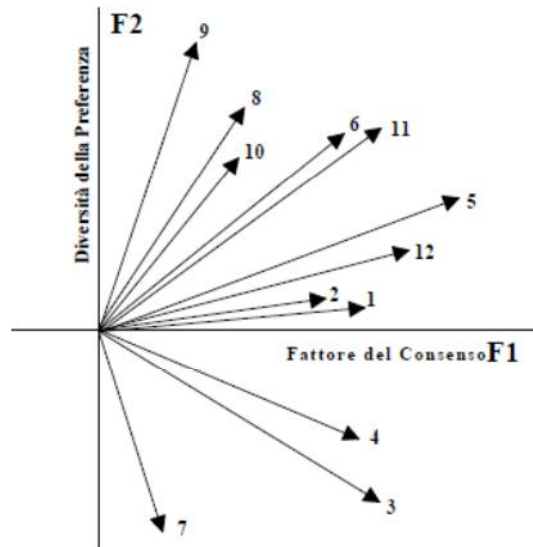


Fig. 5.3 - Esempio di Spazio delle Preferenze a 4 dimensioni per 12 test. Rappresentazione del piano $F1$ - $F2$

Il fattore di consenso $F1$ è ben correlato anche con la correlazione mutua interaurale ($IACC$). La $IACC$ è approssimativamente correlata con la frazione laterale immediata di energia, mentre si è rivelata virtualmente indipendente dal tempo di riverberazione. Un secondo parametro che ben si correla ad $F1$ è la larghezza della sala: sono preferite, quindi, le sale più strette alle sale larghe.

Tutto ciò dimostra ulteriormente quanto detto da M. Barron (1983) sull'importanza delle riflessioni laterali immediate: una sala stretta ha un numero maggiore di riflessioni immediate di una sala larga. Inoltre una sala stretta porta ad avere un minor valore della $IACC$ e quindi più alti consensi.

5.4. Applicazioni delle tecniche di analisi multivariata

I metodi di analisi multivariata furono inizialmente sviluppati allo scopo di determinare il numero minimo di aspetti del giudizio soggettivo e la possibilità di esistenza di differenze individuali.

Hawkes e Douglas (1971) formularono questionari in cui alle persone testate veniva chiesto di valutare le loro impressioni acustiche, relative allo stesso concerto alla *Royal Festival Hall* di Londra, in scale monodimensionali le cui estremità erano individuate da aggettivi opposti. Ognuna di queste coppie esprimeva una percezione soggettiva senza assumere che ci fosse un parametro oggettivo altamente correlato con essa come aveva fatto Beranek.

Considerando i diversi posti come gli “oggetti” dell’analisi essi, tramite l’analisi dei fattori, ricercarono il numero minimo di fattori necessario per spiegare le varianze e ne individuarono quattro:

- definizione;
- riverberazione;
- bilanciamento e fusione dei suoni;
- prossimità.

Siebrasse (1973), indagando sulle preferenze soggettive riguardo ai posti o alle sale, presentò coppie di registrazioni una di seguito all’altra e chiese alle persone testate di esprimere un giudizio di preferenza p_{ij} che poteva assumere i valori 1, -1, 0 rispettivamente, a seconda che essi preferissero i o j o che non avessero preferenze.

Il giudizio di qualità della k -esima persona relativo all’ i -esimo oggetto (posto o sala) $g_{k,i}$, veniva ricavato in base a tutti i giudizi di preferenza che riguardavano l’oggetto stesso, come:

$$g_{k,i} = \sum_{j=1}^N (p_{i,j}^k - p_{j,i}^k) \quad (5.7)$$

includendo così anche i casi in cui le persone sembrano contraddirsi.

Esaminando 25 sale diverse (e diversi posti in molte di esse) e 13 persone, in base all’analisi dei fattori trovò che la varianza complessiva del sistema era sufficientemente spiegata da quattro fattori. I dati (cioè i giudizi di qualità relativi alle varie sale e ai vari posti in esse) potevano allora essere rappresentati in uno spazio delle preferenze quadridimensionale, tramite proiezioni su tre piani.

In base a tale risultato egli concluse che le varie sale non differiscono l’una dall’altra più di quanto non differiscano tra loro i posti all’interno di una stessa sala.

L'esempio più significativo dell'applicazione dell'analisi dei fattori allo studio della correlazione tra parametri acustici e aspetti soggettivi della qualità acustica, è rappresentato dall'indagine di Wilkens (1975). Egli fece compilare ad un gruppo di soggetti dei questionari, chiedendo di valutare le loro impressioni acustiche su scale che andavano da 1 a 6 e le cui estremità erano individuate da aggettivi opposti.

Riconoscendo che il risultato dell'analisi dei fattori dipende dalla scelta di queste coppie di aggettivi, Wilkens diede numerose informazioni riguardanti i principi che avevano guidato la sua scelta.

I questionari impiegati erano del seguente tipo:

1. small – large
2. pleasant – unpleasant
3. unclear – clear
4. soft – hard
5. brilliant – dull
6. rounded – pointed
7. vigorous - muted
8. appealing - unappealing
9. blunt - sharp
10. diffuse - concentrated
11. overbearing - reticent
12. light - dark
13. muddy - transparent
14. dry - reverberant
15. weak - strong
16. emphasized treble - treble not emphasized
17. emphasized bass - bass not emphasized
18. beautiful - ugly
19. soft – loud

Analizzando le distribuzioni delle risposte, Wilkens evidenziò la presenza di due diversi tipi di gusto musicale tra le persone. Ad esempio, la distribuzione delle risposte corrispondenti alla coppia “piacevole - spiacevole” presentava due picchi per cui Wilkens, pensò che fosse opportuno dividere le persone testate in due gruppi, con gusti apparentemente diversi, per le successive elaborazioni. In ogni caso non riuscì a trovare alcuna relazione tra la differenza di gusto e il livello di educazione musicale dei soggetti. Wilkens, conducendo l'analisi dei fattori separatamente per i due gruppi, riuscì a rappresentare le 19 coppie di attributi in due spazi dei fattori tridimensionali che spiegavano circa il 90% delle varianze.

In seguito tramite rotazione degli assi riuscì a far praticamente coincidere, per i due spazi, i vettori corrispondenti a tutte le categorie di qualità tranne quelli corrispondenti alle categorie generali; questo confermava così che esiste fondamentalmente accordo nella formulazione dei giudizi da parte delle persone relativamente a certi quesiti proposti (ad esempio nel definire una sala *clear* oppure *strong*), ma sono diversi i pesi che esse assegnano a tali giudizi.

Il risultato finale dell'analisi, rappresentato in uno spazio tridimensionale, condusse Wilkens a concludere che il primo fattore è correlato con la percezione di intensità ed estensione della sorgente, il secondo fattore con la chiarezza ed il terzo con il timbro.

5.5. Il questionario di Barron

Barron tra il 1981 e il 1985 condusse un ampio studio sull'acustica delle sale da concerto inglesi tramite indagini oggettive e soggettive.

Nell'ambito dell'indagine soggettiva, si basò su studi precedenti condotti da Beranek, Hawkes e Douglas, Schröder, Gottlob e Siebrasse e Wilkens, che, tramite l'applicazione dell'analisi dei fattori alle caratteristiche soggettive di qualità acustica, avevano individuato un numero di fattori indipendenti (e significativi) compreso tra tre e sei, Barron condusse delle esperienze personali che lo portarono a concludere che il giudizio soggettivo potesse essere descritto con cinque dimensioni fondamentali.

Sulla base di ciò egli elaborò un questionario (Fig. 5.10) comprendente cinque scale di valutazione (esprese tramite coppie di aggettivi opposti) ciascuna corrispondente ad una dimensione fondamentale:

1. Chiarezza (*clarity*);
2. Riverberazione (*reverberance*);
3. Avvolgimento (*envelopment*);
4. Intimità (*intimacy*);
5. Intensità soggettiva (*loudness*).

In questo modo non solo veniva limitata la fatica della compilazione ma si evitava la riduzione delle dimensioni con l'analisi dei fattori. Nel questionario (rappresentato in Fig. 5.10) viene evitata la divisione centrale di ogni scala in quanto potrebbe assumere un significato ambiguo non essendo possibile decidere se il valore centrale è quello medio o quello "ottimo"; inoltre la scala relativa al giudizio complessivo è stata disposta in fondo al questionario, per evitare che la valutazione complessiva possa influenzare le valutazioni relative alle varie scale nella medesima direzione. Sono state poi incluse ben tre scale per

la valutazione dell'equilibrio tonale e una relativa all'eventuale presenza di rumori di fondo.

Il questionario comprende anche uno schema da compilare con l'indicazione del posto occupato dall'ascoltatore, dell'opera, dell'orchestra e delle sue dimensioni e, in fondo, uno spazio per eventuali commenti personali.

Dall'uso di tale questionario nell'ambito di una indagine soggettiva su 11 sale da concerto inglesi (Barton 1988), il principale risultato emerso è stato quello che gli ascoltatori sembrano valutare l'avvolgimento in due modi diversi: da una parte si rileva infatti una elevata correlazione tra "avvolgimento" e "riverberazione" e dall'altra tra "avvolgimento" e "intimità". Questo porta a concludere che la scala di valutazione dell'avvolgimento è stata in tale caso impiegata per valutare due diversi effetti di spazialità del suono e quindi potrebbe essere sostituita da due scale distinte; ciò sembra confermare il risultato di studi (Soulondre, Bradley, 1994) secondo i quali, l'effetto di spazialità è prodotto sia dalle prime riflessioni laterali, responsabili di un effetto di ampliamento virtuale della sorgente, sia dalla riverberazione che determina un senso di avvolgimento vero e proprio.

E' interessante osservare che il questionario è accompagnato da istruzioni per la sua compilazione comprendenti anche la sommaria spiegazione delle terminologie acustico-musicali usate riportata di seguito:

- "Chiarezza" si riferisce alla capacità di percepire i dettagli della composizione musicale;
- "Riverberazione" si riferisce al grado di riverberazione in senso temporale;
- "Avvolgimento" si riferisce alla percezione dell'aspetto spaziale del suono;
- "Intimità" si riferisce al grado individuale di coinvolgimento nella rappresentazione ossia se ci si sente acusticamente coinvolti o distaccati da essa;
- "Intensità soggettiva" (*loudness*) deve essere valutata rispetto a quella che si ritiene accettabile in base alla potenza orchestrale coinvolta;
- "Impressione complessiva" fa riferimento alla impressione generale sull'acustica della sala, tenendo conto della potenza orchestrale coinvolta.

In questo modo non solo veniva limitata la fatica della compilazione, ma si evitava la riduzione delle dimensioni con l'analisi dei fattori.

Nel questionario viene evitata la divisione centrale di ogni scala in quanto potrebbe assumere un significato ambiguo non essendo possibile decidere se il valore centrale è quello medio o quello ottimo; inoltre la scala relativa al giudizio complessivo è disposta in fondo al questionario, per evitare che la valutazione complessiva possa influenzare le valutazioni relative alle varie scale nella medesima direzione.

Hall	_____	Initials	_____	Date	_____
Seat N°	_____	Seat Position	_____	L/R	_____
Orchestra	_____		Orchestra Size	_____	
Composer	_____		Opus	_____	

CLARITY	Muddy	_____	Clear
REVERBERANCE	Dead	_____	Live
ENVELOPMENT	Expansive	_____	Constricted
INTIMACY	Remote	_____	Intimate
LOUDNESS	Loud	_____	Quiet

BALANCE :

Treble	re. mid-frequencies	Weak	_____	Loud
Bass	re. mid- frequencies	_____		
Singers/Soloists	re. orchestra	_____		

BACKGROUND NOISE :

| Inaudible | Acceptable | Tolerable | Intolerable |

OVERALL IMPRESSION :

| Very poor | Poor | Mediocre | Reasonable | Good | Very good | Excellent |

N.B. : scale extremes refer to experience limits

Other comments (continue overleaf if necessary) :

Fig. 5.10 – Il questionario proposto da Barron

Sono state poi incluse ben tre scale per la valutazione dell'equilibrio tonale e una relativa all'eventuale presenza di rumori di fondo.

Il questionario comprende anche uno schema da compilare con l'indicazione del posto occupato dall'ascoltatore, dell'opera, dell'orchestra e delle sue dimensioni e, in fondo, uno spazio per eventuali commenti personali.

Dall'uso di tale questionario nell'ambito di una indagine soggettiva sulle sale da concerto inglesi, il principale risultato emerso è stato quello che gli ascoltatori sembrano valutare l'avvolgimento in due modi diversi: da una parte si rileva infatti una elevata correlazione tra "avvolgimento" e "riverberazione" e dall'altra tra "avvolgimento" e "intimità". Questo porta a concludere che la scala di valutazione dell'avvolgimento è stata in tale caso

impiegata per valutare due diversi effetti di spazialità del suono e quindi potrebbe essere sostituita da due scale distinte; ciò sembra confermare il risultato di recenti studi condotti da Soulondre e Bradley, secondo i quali, l'effetto di spazialità è prodotto sia dalle prime riflessioni laterali, responsabili di un effetto di ampliamento virtuale della sorgente, sia dalla riverberazione che determina un senso di avvolgimento vero e proprio.

5.6. Teoria di Ando

Yoichi Ando collaborò nel 1969 con il gruppo di Göttingen (D. Gottlob, KF. Siebrasse, U. Eyshold), sotto la direzione di M. Schröder, alla ricerca dell'interrelazione tra i parametri fisici di una sala da concerto e la sua qualità soggettiva.

Furono eseguite registrazioni con tecnica binaurale, in posti diversi di circa 20 sale, impiegando come sorgente musica registrata in camera anecoica e furono poi ripetute in camera anecoica; fu così possibile raccogliere valutazioni attendibili della qualità acustica delle diverse sale attraverso giudizi di preferenza.

Variando i campi acustici simulati studiò l'influenza di numerosi descrittori fisici sui giudizi di preferenza e ricavò i valori ottimali per tali parametri.

Egli stabilì che la qualità acustica degli ambienti chiusi può essere sufficientemente descritta attraverso quattro parametri significativi:

- il livello di ascolto;
- il tempo di ritardo della prima riflessione (*ITDG*);
- il tempo di riverberazione;
- la coerenza mutua inter-aurale (*IACC*).

Ando saggiò la loro mutua indipendenza nell'influenza sul giudizio di preferenza facendo variare simultaneamente due parametri e mantenendo costanti gli altri due e ricavò le scale di preferenza per ciascuno di essi; quindi fu in grado di definire una scala globale della preferenza, ottenuta dalla sovrapposizione lineare delle scale di preferenza dei singoli parametri indipendenti.

Rielaborando i dati ottenuti tramite l'analisi dei fattori dei giudizi di preferenza, Ando determinò il legame funzionale, detto "Fattore di consenso" per coppie di parametri oggettivi:

1. Legame livello d'ascolto – IACC

Si nota che i due parametri non sono del tutto indipendenti, poiché il valore del livello che rende massima la preferenza varia leggermente con la IACC (Fig. 5.4).

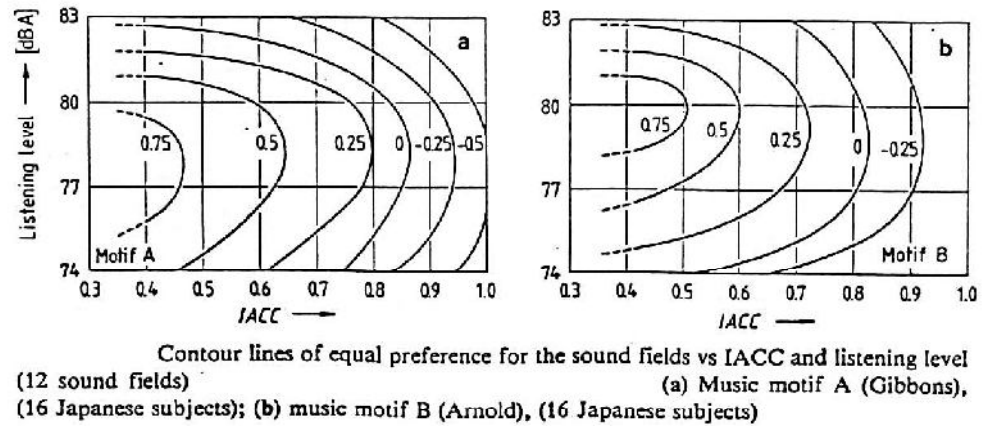


Fig. 5.4 – Fattore di consenso F1 in funzione del livello d'ascolto e della IACC

2. Legame T_{sub} – ITDG

Il valore del $T_{sub,pref}$ non dipende dall'ITDG, mentre il valore preferito di quest'ultimo dipende leggermente dal primo (Fig. 5.5).

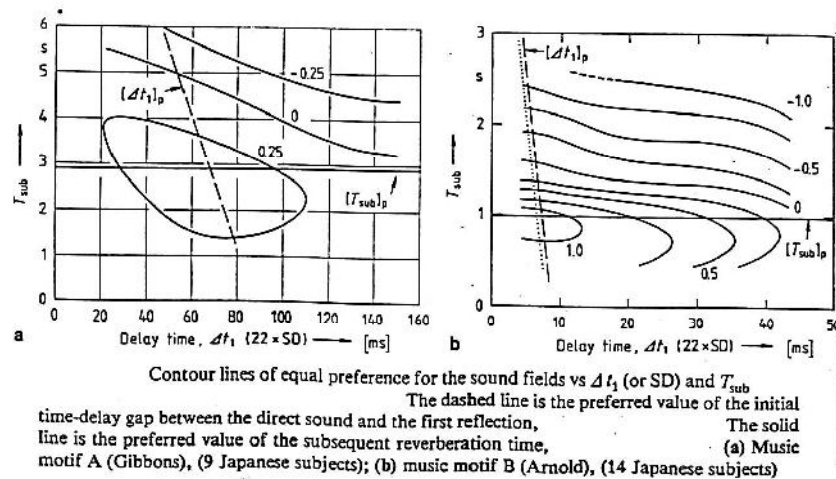


Fig. 5.5 – Fattore di consenso F1 in funzione del tempo di ritardo della prima riflessione e del tempo di riverberazione

I valori del fattore di consenso dipendono fortemente dal tipo di brano musicale: se però si normalizzano i parametri oggettivi rispetto al valore preferito, si ottiene un legame funzionale indipendente dal brano musicale analizzato.

Per ridurre i diagrammi funzionali così ottenuti ad un'unica scala di preferenza si ammette che esista una funzione $g(x)$ del parametro x tale che:

$$F_i = A + g(x_i) * B \quad (5.8)$$

con $A, B = \text{costanti}$.

Uguagliando la costante A al fattore di consenso F_i , imponendo $F_i = 0$ come condizione preferita e imponendo che la funzione $g(x_i)$ sia la stessa per ogni coppia di parametri, si determina la costante B .

In questo modo si ottiene una scala di preferenza per ogni i -esimo parametro avente come valore massimo 0: sommando i valori numerici delle varie scale si ha l'indice di preferenza complessivo.

In base all'ipotesi di linearità, l'indice di preferenza ottenuto è un indicatore della distanza del campo acustico dalle condizioni ideali per il brano adottato.

Le scale di valutazione della preferenza dei singoli parametri indipendenti assumono tutte la forma generale:

$$S_i = -w_i |x_i|^{3/2} \quad (5.9)$$

dove x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) rappresenta il valore del parametro normalizzato ossia espresso in termini di scostamento dal valore preferito e w_i è il coefficiente di peso che garantisce la corretta importanza relativa del parametro considerato.

La scala di valutazione è stata definita in modo che quando $x_i = 0$ (ossia quando il valore del parametro considerato ha uno scostamento nullo dal valore ottimale) l'indice di valutazione della preferenza i -esima si annulla ($S_i = 0$), mentre per ogni altro valore del parametro si ha un valore della preferenza negativo ($S_i < 0$).

In particolare:

- per il Livello d'ascolto (Fig. 5.6)

$$S_1 = -w_1 |x_1|^{3/2} \quad (5.10)$$

Con

$$x_1 = 20 \log \left(\frac{P}{P_p} \right) = L_p - L_{p,pref} \quad (5.11)$$

$$\begin{array}{ll} \text{dove } w_1 = 0.07 & \text{se } x_1 > 0 \\ w_1 = 0.04 & \text{se } x_1 < 0 \end{array}$$

Il livello di ascolto preferito, per ogni punto di ricezione è:

$$L_{p,pref} = L_w + 10 \log(1 + A^2) - 20 \log(d_0) - 11 \quad (5.12)$$

dove

A = ampiezza totale delle riflessioni nel punto considerato;

d_0 = distanza tra la sorgente e l'ascoltatore.

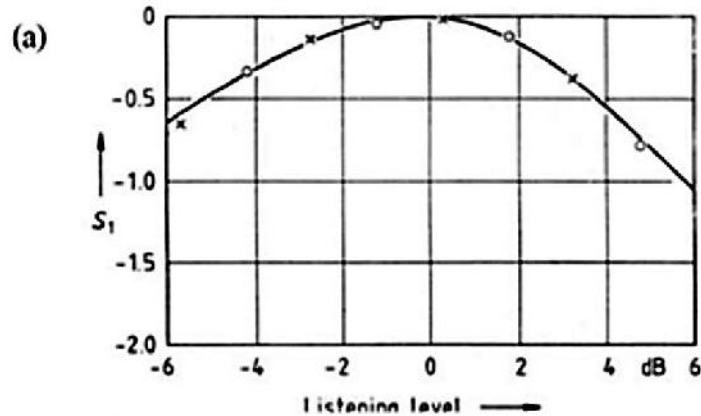


Fig. 5.6 – Scala di preferenza del Livello d'ascolto

- per l'ITDG (Fig. 5.7):

$$S_2 = -w_2 |x_2|^{3/2} \quad (5.13)$$

con

$$x_2 = 20 \log \left(\frac{ITDG}{ITDG_p} \right) \quad ITDG_p = (1 - \log A) \tau_e \quad (5.14)$$

$$w_2 = 1.42 \quad \text{se} \quad x_2 > 0$$

$$w_2 = 1.11 \quad \text{se} \quad x_2 < 0$$

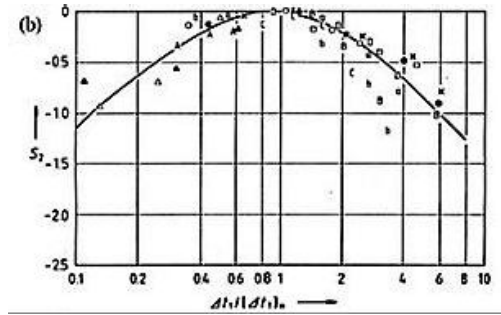


Fig. 5.7 – Scala di preferenza dell'ITDG

- per il Tempo di riverberazione susseguente (Fig. 5.8):

$$S_3 = -w_3 |x_3|^{3/2} \quad (5.15)$$

con

$$x_3 = 20 \log \left(\frac{T_{sub}}{T_{sub,p}} \right) \quad (5.16)$$

$$w_3 = 0.45 + 0.74A \quad \text{se} \quad x_3 > 0$$

$$w_3 = 2.36 - 0.42A \quad \text{se} \quad x_3 < 0$$

e

$$T_{sub,p} = 23 \tau_e \quad (5.17)$$

dove

A = ampiezza totale delle riflessioni: è il rapporto tra l'energia riflessa e la diretta; rappresenta l'importanza del campo riflesso rispetto al diretto.

$$A = \sqrt{\frac{\int_5^\infty p(t)^2 dt}{\int_0^5 p(t)^2 dt}} \quad (5.18)$$

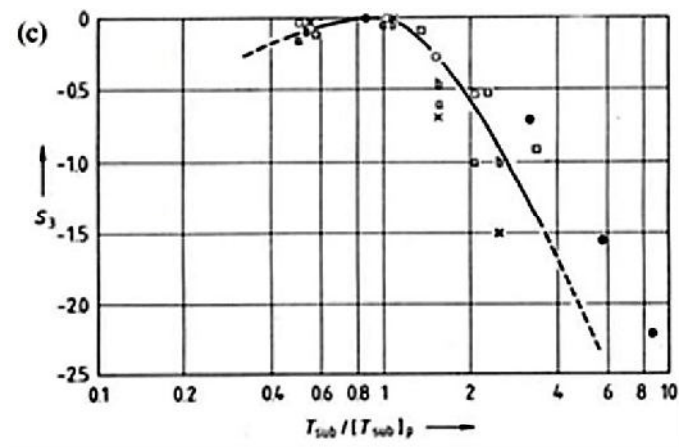


Fig. 5.8 – Scala di preferenza del Tempo di riverberazione

- la $IACC$ è l'unico parametro con andamento lineare: c'è un costante incremento della preferenza al calare del valore di $IACC$ (Fig. 5.9).

$$S_4 = -w_4 |x_4|^{3/2} \quad \text{con} \quad w_4 = 1.45 \quad (5.19)$$

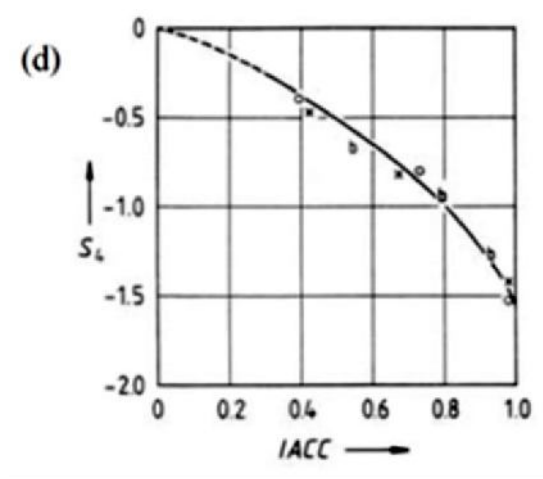


Fig. 5.9 – Scala di preferenza dello IACC

I valori preferiti dipendono dalla durata effettiva della funzione di autocorrelazione del segnale musicale τ_e , che rappresenta il tempo in cui si annulla l'involuppo della funzione di autocorrelazione.

E' indice della ripetitività del segnale: tanto più la funzione di autocorrelazione si smorza rapidamente tanto più il brano ha un ritmo rapido e note poco a lungo sostenute; misura la "riverberazione intrinseca".

Questo è stato motivo di numerose critiche incentrate sull'impossibilità di caratterizzare una composizione musicale con solo questo parametro, trascurando la composizione in frequenza.

Calcolando gli indici di preferenza nei vari punti di una sala si possono ricavare mappe con curve ad uguale indice di preferenza, sia parziali sia totale.

Si può così concludere che gli indici di valutazione della preferenza rappresentano la diminuzione di preferenza per uno scostamento del parametro dal valore ottimale.

Ando definì poi l'indice di preferenza totale come somma degli indici di preferenza dei quattro parametri indipendenti, ossia da:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (5.20)$$

Tale indice esprime il grado complessivo di qualità acustica in un determinato punto della sala e dipende dai valori dei quattro parametri indipendenti visti precedentemente, misurati nel punto di prova, che a loro volta dipendono dalla durata effettiva del tempo di autocorrelazione del segnale musicale τ_e , che risulta tanto più contenuto quanto il brano musicale è variabile per caratteristiche dinamiche, fino ad assumere il valore più contenuto per la parola (Tab. 5.2).

Sound source	Title	Composer	τ_e [ms]
Music A	Royal Pavane	Gibbons	127
Music B	Sinfonietta, Opus 48; IV movement; allegro con brio	Malcom Arnold	43
Music C	Symphony n° 102 in B flat major; II movement; adagio	Haydn	65
Music D	Siegfried Idyll; Bar 322	Wagner	40
Music E	Symphony in C major, K-V n° 551, Jupiter IV movement; molto allegro	Mozart	38
Speech S	Poem read by a female	D. Kunikita	10

Tab. 5.2 - Brani musicali usati e valori delle durate effettive di autocorrelazione

I valori degli indici di preferenza possono essere calcolati in vari punti di una sala e per diversi brani musicali ricavando poi delle “mappe” rappresentanti le curve di uguale preferenza per i vari parametri considerati e le curve di uguale preferenza totale. Questo è quanto fece Ando, durante la sperimentazione del metodo, per la *Symphony Hall* di Boston.

La teoria di Ando, pur presentando dei limiti, dovuti sia al tentativo di caratterizzare una composizione musicale con il solo valore del parametro τ_e sia al fatto di trascurare completamente la risposta in frequenza, tuttavia, per il rigore scientifico, rappresenta pur sempre un miglioramento rispetto alla teoria di Beranek.

5.7. La fuzzy logic

Di recente è stata proposta una nuova teoria sulla valutazione delle sale musicali basata sull'uso della fuzzy logic. Il termine fuzzy significa incerto, sfumato e pertanto la fuzzy logic è la logica incerta ossia basata su variabili non più definite in modo esatto (variabili crisp) ma affette da incertezza definibile in vari modi.

Le misure affette da errore vengono espresse in modo naturale come grandezze fuzzy. La formulazione di giudizi (qualunque sia l'applicazione che si desideri studiare) è una tipica generazione di grandezze fuzzy: dire quasi sufficiente, poco più che buono, fra 6 e 7,....., equivale ad esprimere grandezze fuzzy che possono essere inquadrare nella più ampia categoria di fuzzy set ossia di insieme fuzzy la cui formulazione analitica può essere particolarizzata alla tipologia dell'applicazione che si desidera studiare.

La fuzzy logic utilizza lo stesso concetto introdotto nella teoria degli insiemi fuzzy (detta anche fuzzy set theory): una proposizione logica fuzzy non deve essere necessariamente vera o falsa, ad essa può essere associato, o per essa può essere ricavato, un valore di verità variante con continuità da 0 ad 1.

Le tecniche fuzzy potrebbero fornire uno strumento semplificatore nella fase di progettazione di modelli di valutazione dell'acustica delle sale e, in un secondo tempo, permettere di costruire sistemi fuzzy all'interno dei quali inserire oltre alla conoscenza tecnica (acustica e architettonica) quella soggettiva in modo da costruire un vero e proprio Sistema Esperto con il compito di inferire, in maniera più o meno approssimata e soggettiva, la giusta o più probabilistica valutazione dell'acustica della sala musicale.

Tale opinione nasce da una serie di osservazioni sulla reale natura del processo di valutazione soggettiva di una sala e più precisamente dalle seguenti :

- i valori degli elementi di una classica matrice di valutazione possono essere linguistici; più precisamente i modelli di valutazione soggettiva non possono essere semplici adattamenti di modelli deterministici in cui i giudizi possano essere aggiunti e trattati alla stessa stregua delle variabili quantitative propriamente dette;
- la definizione dei criteri di giudizio è spesso un processo soggettivo dipendente da fattori non sempre quantificabili.

L'implementazione del metodo fuzzy prevede di utilizzare due tipi di funzioni di appartenenza delle variabili all'insieme fuzzy:

- le funzioni caratteristiche di intervalli, caratterizzate da un valore di picco a e dell'ampiezza o varianza α , cioè del tipo $(a - \alpha, a, a + \alpha)$;
- le funzioni π della teoria fuzzy, quadratiche a tratti ed anch'esse caratterizzate da valori di picco e da ampiezza.

L'elaborazione della matrice di relazione (o matrici di causa ed effetto costituite da tante righe quante sono le variabili oggettive e tante colonne quante sono i criteri soggettivi) segue le stesse regole che si hanno nel caso deterministico, già esposte precedentemente, l'unica differenza è che le operazioni aritmetiche sono interpretate secondo le regole della teoria fuzzy (che, nel caso degli intervalli, si riducono a quelle dell'Analisi di Intervalli). Si ottiene poi (si vedrà nel prosieguo la procedura operativa) un vettore di valutazione finale le cui componenti sono insiemi fuzzy, caratterizzati cioè da un valore di picco e dall'ampiezza di oscillazione (varianza).

L'analisi fuzzy si rivela più probante rispetto all'analisi tradizionale (crisp) in quanto meglio descrittiva delle condizioni di soggettività e di incertezza proprie dei giudizi. Le va-

rianze, infatti, indicano come la centralità del giudizio venga alterata dall'incertezza degli stessi giudizi.

La combinazione degli intervalli di variazione secondo la fuzzy set theory risulta più congruente e matematicamente più corretta a posizionare il vettore di giudizio che non il semplice calcolo dei massimi effetti positivi o negativi dell'analisi di sensitività usualmente applicata al caso di valori di giudizio variabili all'interno di intervalli definiti e noti.

Quanto detto può già lasciar intravedere una fuzzyficazione delle problematiche relative all'acustica delle sale nel senso che è possibile già oggi pensare in termini di grandezze fuzzy anziché grandezze usuali crisp. Pertanto le metodologie fuzzy possono validamente supportare lo studio dei sistemi multicriteriali e quindi contribuire alla corretta valutazione dell'acustica delle sale cioè alla combinazione di alcuni descrittori oggettivi e soggettivi per la determinazione delle preferenze totali. Nel lavoro di S. Wu sono presi in esame i descrittori suggeriti da V. L. Jordan come convenienti per la valutazione dell'acustica delle sale. Naturalmente si possono utilizzare anche altri set di descrittori purché se ne abbiano i dati per un numero significativo di sale. S. Wu definisce inizialmente tre set fuzzy denominati:

- set dei fattori (factor set): $F = f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$
- set delle prove (test set): $T = t_1, t_2, t_3, \dots, t_r$
- set di valutazione (evaluation set): $E = e_1, e_2, e_3, \dots, e_m$.

V.L. Jordan suggerisce un gruppo di descrittori oggettivi e precisamente: Tempo di riverberazione RT o Early Decay Time EDT , Chiarezza C_{80} , Efficienza laterale LE , Pendenza di EDT o di RT . La pendenza EDT è definita dalla relazione:

$$EDT'(f) = \frac{EDT_{2000Hz} - EDT_{250Hz}}{3} \quad (5.21)$$

Analoga formulazione si ottiene per la pendenza del tempo di riverberazione $RT'(f)$ sostituendo nella relazione precedente RT a EDT . V.L. Jordan suggerisce, inoltre, di utilizzare anche la variazione totale di C_{80} e $10\log(LE)$ quali misure dell'omogeneità di un auditorio. Si può subito osservare la mancanza, ad esempio, di parametri oggettivi oggi ritenuti importanti quali il livello totale di pressione e il tempo di ritardo della prima riflessione. I dati possono essere rilevati sia per sala piena che per sala vuota. Allo scopo di ridurre il numero degli elementi del factor set si può subito effettuare un'analisi di correlazione per vedere se i descrittori indicati sono del tutto indipendenti. Si può pensare di raggruppare i dati in forma matriciale ponendo nelle righe i valori dei descrittori delle sale (colonne).

La procedura di calcolo è la seguente. Si calcolano le medie per ciascuna colonna mediante la relazione:

$$(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_{ti} \quad \text{per } i = 1, 2, \dots, 7 \quad (5.22)$$

poi la varianza data dalla relazione:

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N [x_{ti} - x_i]^2 \quad \text{per } i = 1, 2, \dots, 7 \quad (5.23)$$

E infine il coefficiente di correlazione fra l' i -esimo e il j -esimo parametro dato dalla relazione:

$$r_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N y_{ti} - y_{tj} \quad \text{per } i, j = 1, 2, \dots, 7 \quad (5.24)$$

con N numero dei campioni.

Si può così ottenere una matrice di correlazione avente pari righe e colonne (i descrittori di V. L. Jordan) e nelle loro intersezioni i coefficienti di correlazione.

Il factor set può perciò essere costituito, nelle ipotesi di V. L. Jordan, così:

$$F = [RT \text{ o } EDT, LE, EDT'(f), V_{\max(10\log LE)}] = [f_1, f_2, f_3, f_4]$$

ove, si ricordi, $EDT'(f)$ può essere sostituito da $RT'(f)$.

Gli altri due set possono così essere definiti:

- per le misure: T = Misure a sala piena, Misure a sala vuota = t_1, t_2 ;
- per le valutazioni: E = Eccellente, Buono, Accettabile, Non Buono = e_1, e_2, e_3, e_4 .

Per potere determinare gli effetti dei vari descrittori e delle varie prove occorre assegnare degli opportuni pesi.

Per il factor set si ha: $WF = (W_{f1}, W_{f2}, W_{f3}, \dots, W_{fn})$

Per il test set si ha: $WT = (W_{t1}, W_{t2}, W_{t3}, \dots, W_{tr})$

ove deve essere:

$$\sum_{i=1}^n w_{fi} = 1 \quad \text{e} \quad \sum_{i=1}^n w_{tj} = 1 \quad (5.25)$$

Per la valutazione delle sale, considerando l'importanza relativa di ciascun fattore e la conoscenza degli effetti di ciascun fattore sulla qualità acustica, si può assegnare un vettore dei pesi del tipo seguente:

$$WF = W_{f1}, W_{f2}, W_{f3}, W_{f4} = 0,4 ; 0,3 ; 0,15 ; 0,15 \quad (5.26)$$

Si osservi come *EDT* (o *RT*) ha un peso maggiore rispetto agli altri descrittori essendo, sempre secondo V. L. Jordan, il parametro oggettivo di maggiore importanza per l'acustica della sala. Segue nella scala dei pesi *LE* e poi gli altri due parametri. Il peso di *EDT'(f)* è minore anche per la mancanza di dati certi sulle tolleranze limiti. Per il test set (cioè l'insieme delle misure) si possono definire i seguenti pesi:

$$WT = W_{t1}, W_{t2} = 0,6, 0,4 \quad (5.27)$$

Questo vettore dà maggiore importanza alle misure con sala piena rispetto alle misure con sala vuota. Qualora si abbiano misure solo in una delle condizioni allora il vettore dei pesi sarà, rispettivamente:

- solo con sala piena: $WT = (1, 0)$
- solo con sala vuota : $WT = (0, 1)$.

Un metodo più congruente di assegnare i pesi è fondato sull'aggregazione media: sia $W_i(j)$ il valore dell'*i*-esimo elemento in un vettore peso (*WF* o *WT*) indicato dal *j*-esimo esperto, allora la diversità di opinione (o il senso di comune accettazione) è tenuta in conto assumendo per il peso *i*-esimo il valore medio dei pesi indicati dai vari esperti:

$$w_i = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k w_i^{(j)} \quad (5.28)$$

ove k è il numero di esperti consultati.

La fase più importante della procedura di valutazione delle sale è la costruzione della matrice di valutazione fuzzy. Si tratta di costruire una matrice avente nelle righe gli insiemi dei fattori (factor set) e nelle colonne l'insieme di valutazione (evaluation set). A questo scopo si utilizza il concetto di funzione di appartenenza (membership function) che è l'elemento centrale di tutta la logica fuzzy. Esso rappresenta numericamente il grado di appartenenza di ciascun elemento all'insieme stesso ed è variabile con continuità nell'intervallo $[0, 1]$. In termini di matrice di valutazione (rating matrix) il valore della funzione di appartenenza è dato dal termine r_{ij} che riflette la grandezza dell'impatto di una data misura dell' i -esimo fattore sul j -esimo criterio di valutazione. Per l'elemento i -esimo dell'insieme dei fattori f_i si può costruire un vettore funzione di appartenenza dato da:

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{in}) \quad \text{per } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5.29)$$

Per tutto l'insieme dei fattori (factor set) possiamo scrivere i vettori di funzioni di appartenenza e pertanto in forma matriciale si ha:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{2m} \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Di solito i termini dei singoli vettori (ovvero delle singole righe della matrice precedente) sono normalizzati in modo tale che risulta: $\sum_j = 1$ e $r_{ij} = 1$ per $i = 1, 2, \dots, n$. Per l'insieme delle misure (test set) con analogo ragionamento possiamo scrivere il vettore delle funzioni di appartenenza per l'impatto del fattore i -esimo sul j -esimo criterio di valutazione, cioè:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{ij}^{(1)} \\ r_{ij}^{(2)} \\ \vdots \\ r_{ij}^{(r)} \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

ove $r_{ij}(k)$ indica il vettore dei valori della funzione di appartenenza basato sul k -esimo risultato di misura.

Al fine di costruire la matrice di valutazione occorre costruire le funzioni di appartenenza dei singoli membri utilizzando i dati reperibili in letteratura. In particolare, sempre con riferimento ai dati pubblicati da V. L. Jordan si hanno i valori consigliati dati in Tab. 5.3:

FATTORE	SALA PIENA	SALA VUOTA
RT (s)	1,8 – 2,2	1,4 – 2,2
EDT (s)	1,9 – 2,2	1,8 – 2,6
LE (dB)	0,3	0,1
$EDT'(f)$ (dB/ott)	< 0,1	< 0,1 – 0,15
$V_{max(10\log LE)}$ (dB)	< 3	3 - 5

Tab. 5.3 – Valori consigliati da Jordan

Nel predisporre le tabelle di funzioni di appartenenza si sono effettuati le seguenti posizioni: quando la misura dell' i -esimo fattore cade nell'intervallo definito ottimo allora la qualità acustica corrispondente della sala è giudicata eccellente o almeno buona e i valori dei giudizi sono $r_{i1} = 0,7$ e $r_{i2} = 0,3$ rispettivamente.

Quando le misure dell' i -esimo fattore cadono fuori dall'intervallo ideale ma ancora nei limiti che possiamo definire tollerabili allora la qualità acustica della sala è giudicata accettabile e ad essa è assegnato il voto 0,33 o 0,34 a seconda della variabilità di giudizio dell'audience o del tipo di brano musicale utilizzato

Quando, infine, le misure dei fattori ricadono fuori dai limiti tollerabili allora il giudizio è non buono e il voto assegnato è pari ad 1.

Una volta costruite le matrici di valutazione per tutti i tipi di misura (sala piena e sala vuota) si possono costruire le matrici aggregate di valutazione $R = (r_{ij})$ combinando i

valori di ingresso di tutte le misure. Le funzioni di appartenenza normalizzate divengono, pertanto:

$$r_{ij} = W_T R_{ij} \quad (5.32)$$

Infine calcoliamo il vettore globale di valutazione S nel quale il valore dell' i -esimo elemento indica la probabilità con la quale il sistema verrà giudicato nell' i -esimo valore di giudizio:

$$S = WFR \quad (5.33)$$

Per ciascun risultato di calcolo occorre determinare la propensione di qualità della sala mediante il principio della maggiore approssimazione. Detto $S_k = \max(S_i)$ si calcola:

$$\sum_{i=1}^{k-1} S_i \quad \text{e} \quad \sum_{i=k+1}^m S_i \quad (5.34)$$

Se risulta:

$$\sum_{i=1}^{k-1} S_i \leq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m S_i \quad \text{o} \quad \sum_{i=k+1}^m S_i \leq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m S_i \quad (5.35)$$

allora il sistema appartiene al giudizio S_k . Se si ha:

$$\sum_{i=1}^{k-1} S_i \geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m S_i \quad \text{o} \quad \sum_{i=k+1}^m S_i \geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m S_i \quad (5.36)$$

allora il sistema appartiene al giudizio s_{k-1} o s_{k+1} .

Nel caso valgano i segni di eguaglianza nelle disuguaglianze sopra indicate allora la decisione deve essere effettuata in base ai pesi corrispondenti.

CAPITOLO 6 – UN NUOVO INDICE DI QUALITÀ ACUSTICA

La determinazione dell'intensità soggettiva dei suoni complessi rappresenta storicamente, come detto, un problema di difficile ed univoca soluzione. La valutazione della qualità acustica di una sala, e quindi l'individuazione di descrittori acustici compiutamente rappresentativi della risposta soggettiva alla specifica sorgente, non ha trovato ancora risposte completamente esaustive del problema. I numerosi indici di valutazione proposti in letteratura sono una riprova che ancora non è stata individuata una soluzione univoca che si dimostri del tutto soddisfacente.

Nella presente tesi si vuole illustrare una nuova metodologia volta ad ottenere una valutazione della bontà acustica basata su una procedura analitica razionalmente oggettiva.

Il metodo proposto fa riferimento ad una precedente teoria formulata dal Prof. Alfredo Badagliacca, originariamente volta all'individuazione di un indice globale di sensazione (visivo, acustico, termoigrometrico), ai fini della valutazione del benessere ambientale.

Facendo riferimento ad una serie di misure effettuate in diversi teatri storici, il lavoro mette a confronto una delle teorie maggiormente accettate per la valutazione della qualità acustica globale delle sale, cioè quella di Y. Ando, con il nuovo indice proposto, denominato Vettore qualità.

6.1. La teoria del bonum

6.1.1. *Approccio globale al problema del benessere*

Lo studio del rapporto tra uomo e ambiente in generale coinvolge diverse realtà fenomenologiche, che vengono studiate con propri, e differenziati tra loro, approcci disciplinari.

Nel campo fisico, la determinazione dello stato di benessere segue in genere la seguente procedura: si considera una sensazione caratterizzante l'interazione in corso e si correla con l'espressione di un giudizio soggettivo. Questo, da parte sua, assume valore significativo, e quindi oggettivo, se viene acquisito operativamente per mezzo di procedure statistiche, le quali mettono a confronto combinazioni di valori delle grandezze oggettive coinvolte nell'interazione con il tipo di giudizio espresso da un numero significativo di campioni. In armonia con tale contesto si sono sviluppati studi finalizzati alla determinazione del benessere termoigrometrico, di quello visivo, etc...

A complicare il problema interviene, però, la circostanza che la ricerca di correlazioni tra valutazioni di sensazioni e grandezze oggettive coinvolte risulta possibile a condizione che l'indagine sia delimitata ad interazioni che stimolano una sola sensazione. Se le sensazioni coinvolte sono di più, pur essendo l'uomo capace non solo di sintetizzare un giudizio di bontà di rapporto, ma anche di articolarlo in livelli comparativamente differenziati, allo stato non si è ancora in grado di operare correlazioni significative.

D'altra parte, il bisogno di riferimenti oggettivi e significativi ai fini degli interventi ingegneristici, architettonici ed economici ha fatto sì che nei rapporti complessi, capaci cioè di coinvolgere più sensazioni, il giudizio di bontà del rapporto complessivo possa ritenersi conseguito quando è acquisito operativamente per ogni rapporto settoriale.

In tal modo, però, da una parte si dà risposta ad una esigenza oggettiva, dall'altra si finisce col porre in essere una semplificazione non suffragata da riscontri scientifici, costituita dall'ipotesi che sia applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti ai risultati conseguiti per ogni singola area disciplinare.

Ne è conseguita una mancata visione unitaria del problema, che ha finito con il produrre una situazione complessa ai fini della determinazione della soluzione. E, oggettivamente, tale stato di cose ha finito con il favorire lo sviluppo di studi disaggregati fra loro, per cui si procede "in ordine sparso" alla ricerca di correlazioni settoriali, dispiegando gli studi per percorsi afferenti a settori specifici d'interazione.

D'altra parte non sfugge che il problema presenta difficoltà del tutto peculiari, in quanto il livello di sensazione di benessere viene espresso attraverso un procedimento di sintesi personale delle valutazioni sull'insieme dei rapporti con l'ente esterno, di cui sfugge il meccanismo.

La teoria del bonum si prefigge di superare le limitazioni citate cercando d'individuare per il rapporto uomo-ambiente una formalizzazione del tutto generale, entro cui incastonare, specificandone ipotesi e approssimazioni, i risultati dei differenti approcci riportandoli ad un unico comun denominatore.

È infatti evidente che solo attraverso una tale procedura si può conseguire l'elemento base utile a determinare una normativa unificante sulle specifiche da imporre a tutte le grandezze con cui l'opera costruita interviene nelle relazioni tra uomo e ambiente.

I rapporti interattivi tra uomo e ambiente prevedono che le interazioni funzionali, cioè quelle che richiedono all'uomo azioni compensatrici rispetto alle sollecitazioni che provengono dall'ambiente, possano suddividersi in due categorie:

- azioni involontarie, ovvero quelle azioni di adattamento a variazioni delle grandezze dell'ambiente entro un intervallo che non produce l'insorgere di sensazioni fastidiose. Esse non sono in genere il risultato di una scelta ragionata, finalizzata ad una qualche protezione, e pertanto possono essere anche definite azioni incoscienti. Questo tipo di azione si affianca a quelle necessarie all'interazione attiva in corso. Per fissare le idee, se si sta leggendo e si varia l'esposizione del piano di lettura per meglio focalizzare lo scritto, questo tipo di azione non è da ascrivere a quelle di protezione, in quanto dettata non da preservazione, ma dalla necessità di conseguire un obiettivo nell'ambito di un'interazione attiva.
- azioni volontarie, ovvero quelle azioni di protezione che discendono da una scelta ragionata e sono finalizzate alla compensazione di variazioni delle grandezze ambientali in grado di determinare sensazioni di disturbo, di fastidio o, peggio, di dolore. Esse pertanto possono essere anche definite azioni coscienti.

L'insieme dei valori di ogni grandezza ambientale presenta un sottoinsieme per il quale non occorre che l'uomo metta in opera alcuna azione per la sua protezione. Le grandezze oggettive dell'ambiente in grado di stimolare sensazione con i loro valori, infatti, possono dar luogo ad un intervallo di sensazioni comprese tra due condizioni estreme:

- una, detta soglia superiore, corrispondente allo stato di fastidio determinato da valori relativi elevati delle grandezze stimolanti (valori più elevati determinano sensazione di dolore fisico o malessere);
- l'altra, detta soglia inferiore, corrispondente ad una delle seguenti condizioni:
 1. una condizione di fastidio determinata da valori relativi bassi delle grandezze stimolanti;
 2. una condizione di neutralità sensoriale rispetto allo stimolo esterno.

Si può notare, inoltre, che la variazione del valore dell'intensità della grandezza stimolante comporta una variazione dello stesso segno dell'intensità della sensazione. I valori compresi tra la soglia inferiore e quella superiore determinano il campo della tolleranza biologica.

Quando l'ambiente sollecita l'uomo con più grandezze, magari differenti tra loro per natura, ai fini della valutazione degli effetti sinergici che tali grandezze hanno sull'uomo, si cozza contro la difficoltà che discende dalla non applicabilità del principio di sovrapposizione degli effetti in materia di sensazioni indotte.

Le varie interazioni tra il “sistema uomo” e l’ambiente determinano delle sensazioni che, a livello macroscopico, si traducono in azioni involontarie di adattamento o azioni volontarie di protezione verso gli stimoli fastidiosi o dannosi. L’assenza di malessere si configura quindi con l’assenza di azioni volontarie di protezione.

Nelle interazioni uomo-ambiente (stimolo-sensazione), l’essere umano può essere schematizzato come un sistema che interagisce con lo spazio circostante (l’ambiente) attraverso scambi di massa ed energia, ma anche attraverso informazioni sensoriali di tipo acustico, visivo, tattile, olfattivo, mediante organi preposti collocati sulla superficie di confine del sistema.

È possibile allora schematizzare l’uomo come un sistema operativo S che definisce il rapporto funzionale tra le grandezze ambientali, che si configurano come stimoli, e la sensazione di soddisfazione, che a sua volta si configura come uscita del sistema (Fig. 6.1).

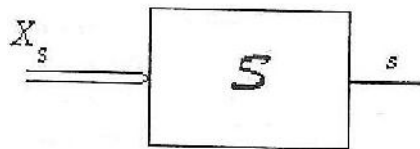


Fig. 6.1 – Schema operativo del rapporto funzionale tra il vettore algebrico X_s delle grandezze stimolanti dell’ambiente e la sensazione s indotta

6.1.2. Il vettore benessere

Agli effetti pratici il problema della realizzazione delle condizioni ambientali che determinano lo stato di benessere si risolve ricercando gli insiemi dei valori delle grandezze ambientali che ne rendono possibile l’esistenza. Operativamente risulta però più conveniente considerare il malessere che l’ambiente può indurre sull’uomo.

Si può affermare che uno stato privo di malessere è determinato dal fatto che le grandezze ambientali ricadono nel dominio di tolleranza biologica e concludere, pertanto, che lo stato di assenza di malessere di un uomo viene individuato dall’assenza di sue azioni volontarie di protezione.

Il coacervo degli stati di soddisfazione, da parte sua, si configura come un sottoinsieme degli stati privi di malessere (Fig. 6.2).

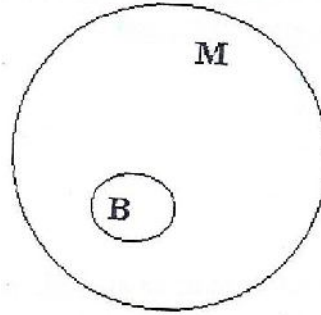


Fig. 6.2 – M denomina l'insieme degli stati privi di malessere, $B \subset M$ è il sottoinsieme degli stati di benessere

Il benessere può dunque configurarsi come una grandezza soggettiva del sistema uomo di tipo logico, che pertanto va valutata in termini booleani (1 o 0: esiste o non esiste). In altri termini si verifica che a insiemi di valori acquisibili dalle grandezze oggettive dell'ambiente possono correlarsi, funzionalmente in modo logico, e, di norma, per il tramite di una sensazione fisica di riferimento, giudizi di sussistenza della condizione di benessere.

Nel caso in cui vengano contemporaneamente coinvolti più organi sensoriali, stante la natura logica del benessere, si assume che la condizione di benessere sia desumibile per mezzo di un prodotto logico, vale a dire legato alla contemporanea esistenza del benessere relativo ad ogni singolo settore.

In termini formali, indicando il benessere globale con B e quello settoriale con B_i ($i = 1, 2, \dots$), essendo i il generico organo sensoriale, si ha:

$$B = B_1 \wedge B_2 \wedge B_3 \wedge \dots \quad (6.1)$$

Schematizzando l'uomo come un sistema macroscopico U , tenendo conto che le interazioni presenti nel rapporto uomo – ambiente non evidenziano la sola presenza di fenomeni consueti nelle relazioni meccaniche, chimiche e termiche, la sussistenza dell'equilibrio termodinamico è condizione necessaria ma non sufficiente.

Per la consistenza del modello, occorre avanzare l'ipotesi dell'esistenza di un'opportuna variabile macroscopica T , avente proprietà intensive, responsabile delle azioni di adattamento poste in essere dall'uomo (Fig. 6.3). Tale grandezza T sarà denominata "tensione ambientale".

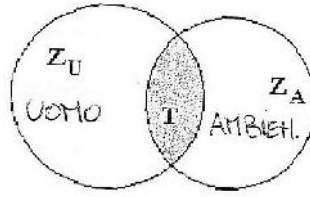


Fig. 6.3 – Insieme T dei valori della tensione ambientale come intersezione tra gli insiemi dei valori delle grandezze di stato Z_U dell'uomo e quelli Z_A dell'ambiente

Un generico “stato sensoriale” del soggetto, può essere allora rappresentato da una grandezza T_i , rappresentativa delle varie sensazioni in gioco s_i , esprimibile con la seguente relazione:

$$T_i = g(s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (6.2)$$

Corrispondentemente, l'insieme delle variabili indipendenti ambientali (y_i) che hanno prodotto quelle sensazioni può essere anch'esso rappresentato da un'analogia grandezza T_j esprimibile con la relazione:

$$T_j = f(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (6.3)$$

Dalle (6.2) e (6.3) si deduce che deve sussistere la seguente relazione:

$$F(s_1, s_2, \dots, y_1, y_2, \dots) = 0 \quad (6.4)$$

Uno squilibrio tra l'ambiente ed il “sistema uomo” è determinato dall'azione di stimoli ambientali agenti sul sistema, che attivano le azioni di adattamento o protezione. Tale situazione può essere rappresentata dalla relazione

$$T_i \neq T_j \quad T_i > < T_j \quad (6.5)$$

Una volta che si sono attivate le azioni volontarie o involontarie susseguenti agli stimoli impressi, si instaura una condizione di equilibrio tra il sistema e l'ambiente. Tale condizione è esprimibile con l'espressione:

$$T_i = T_j = T \quad (6.6)$$

La variabile T , responsabile delle operazioni di adattamento, si configura come una variabile con proprietà intensive e viene chiamata "tensione ambientale". In base alla (6.6) esisterà quindi una corrispondenza tra le grandezze ambientali che agiscono sul soggetto e le sensazioni da esse generate. Le grandezze ambientali sono legate funzionalmente dalla (6.3) e in generale, determinano uno spazio R^n con assi di riferimento dimensionalmente non omogenei. In tale spazio, i valori delle y_i responsabili dell'interazione danno luogo a un insieme Y in esso contenuto e, in base alla corrispondenza stimolo – sensazione, esisterà una corrispondenza tra tale insieme di valori y_i e il livello di sensazione S .

Questa corrispondenza in genere non è determinata per via analitica, ma per via statistica. I livelli di sensazione determinati, a loro volta, determinano un insieme S .

Ordinando S per mezzo di una corrispondenza biunivoca con l'insieme dei numeri reali si finisce con il trattare s come grandezza analogica e si formalizza esprimendola in cifre.

Esprimendo il legame di corrispondenza con il simbolo " $\xrightarrow{\ell}$ ", quanto detto può essere formalizzato nel modo seguente:

$$Y \xrightarrow{\ell} S \quad (6.7)$$

Essendo S ed Y rispettivamente il codominio ed il dominio della corrispondenza.

Peraltro, le grandezze ambientali non possono variare arbitrariamente, infatti esse possono variare in un intervallo ben definito determinato dalla tolleranza da parte dell'uomo a quella particolare variabile (intervallo di tolleranza biologica). Tale intervallo sarà costituito da una soglia inferiore in corrispondenza della quale, a seconda della variabile ambientale che si considera, si ha la prima sensazione o si verifica una sensazione di forte fastidio o dolore. La soglia superiore corrisponderà al valore dello stimolo per cui si verifica una forte sensazione di fastidio o dolore. Indicando con i pedici " lt " ed " ut " rispet-

tivamente i valori di soglia inferiore e di soglia superiore, e detti rispettivamente P_{lt} e P_{ut} i punti di Y corrispondenti alle condizioni:

$$f(y_{1,lt}, y_{2,lt}, \dots, y_{n,lt}) = 0 \quad (6.8)$$

$$f(y_{1,ut}, y_{2,ut}, \dots, y_{n,ut}) = 0$$

consegue che la (6.7) dà luogo alle relazioni:

$$P_{lt} \xrightarrow{\ell} s_{lt} \quad (6.9)$$

$$P_{ut} \xrightarrow{\ell} s_{ut} \quad (6.10)$$

Le condizioni:

$$y_{i,lt} \leq y_i \leq y_{i,ut} \quad \forall i \quad (6.11)$$

delimitano una porzione di spazio $T \subset R^n$, che costituisce il dominio delle relazioni di tolleranza biologica, e al quale l'operazione $\xrightarrow{\ell}$ fa corrispondere l'intervallo $[s_{ut} - s_{lt}]$.

Effettuando ora una trasformazione di coordinate del tipo:

$$\sigma = \frac{s - s_{lt}}{s_{ut} - s_{lt}} \quad (6.12)$$

$$\eta_n = \frac{y_n - y_{n,lt}}{y_{n,ut} - y_{n,lt}} \quad (6.13)$$

Si chiamino tali grandezze ausiliarie variabili ridotte. Si tratta sostanzialmente di una trasformazione di coordinate, grazie alla quale lo spazio R^n si trasforma nello spazio ridotto R_r^n .

Operando nella (6.4) le opportune sostituzioni, l'interazione uomo – ambiente viene espressa dall'equazione:

$$\Phi(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots) = 0 \quad (6.14)$$

che determina una superficie nello spazio ridotto.

Nello spazio R_r^n si verificano le seguenti circostanze:

- l'origine O degli assi individua la condizione globale di soglia inferiore;
- tutti gli assi sono dimensionalmente omogenei. In particolare ogni punto di un asse rappresenta la misura della distanza dalla soglia inferiore rapportata all'entità dell'intervallo di tolleranza, sicché gli intervalli di tolleranza biologica hanno per estremi 0 e 1 per ognuno degli assi;
- tutte le dimensioni lineari sono omogenee agli assi. Pertanto il segmento che unisce l'origine degli assi con il generico punto

$$P(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots)$$

individua, per le condizioni di tale punto, la distanza dello stato dell'uomo dallo stato di soglia inferiore delle interazioni rapportata all'intervallo di tolleranza relativo alla direzione individuata.

Analogamente, quindi, sulla superficie $\Phi(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots) = 0$, una determinata interazione Φ_p sarà rappresentata da una curva che descriverà la traiettoria dell'interazione data, e il luogo dei punti dei possibili punti di soglia superiore deve soddisfare alla condizione:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_3^2 + \dots = 1 \quad (6.15)$$

mentre tutti i punti corrispondenti a generici stati di possibile benessere devono rispettare le condizioni restrittive:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_3^2 + \dots \leq 1 \quad (6.16)$$

$$0 \leq \sigma_i \leq 1$$

$$0 \leq \eta_i \leq 1$$

La (6.15) e le (6.16) nello spazio R^n_r individuano un volume in cui ogni punto interno è suscettibile d'individuare un possibile stato di benessere.

Si indicherà tale volume con il nome di spazio della tolleranza biologica o del benessere possibile e il tratto della (6.14), particolarizzata per l'interazione in esame, con il nome di traiettoria del benessere.

Ogni punto dell'iperspazio individua dunque un segmento orientato OP , con O il centro degli assi di riferimento (la soglia inferiore).

Si definisce OP come il vettore sensazione (ed eventualmente vettore benessere) $\vec{b}$, il vettore avente componenti $\vec{\sigma}_1, \vec{\sigma}_2, \dots, \vec{\eta}_1, \vec{\eta}_2, \dots$. Quindi:

$$\vec{b} = \vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2 + \dots + \vec{\eta}_1 + \vec{\eta}_2 + \dots \quad (6.17)$$

Da quanto detto per l'assenza di malessere il modulo del vettore sensazione deve verificare la seguente condizione:

$$|\vec{b}|_{max} \leq 1 \quad (6.18)$$

Pertanto condizione necessaria perché nello spazio R^n_r , un punto P definisca uno stato di benessere è che tanto il relativo vettore benessere quanto tutti i suoi componenti siano non negativi e con modulo ≤ 1 .

Dalla (6.15) si evince che, anche nel caso che le singole grandezze componenti siano comprese nell'intervallo di tollerabilità biologica, può accadere che $|\vec{b}|$ sia maggiore di 1. Ciò esprime la circostanza che, essendo il vettore $\vec{b}$ rappresentativo del coacervo di sensazioni generate sul soggetto, può accadere che, sensazioni che singolarmente risulterebbero tollerabili, agendo simultaneamente possono superare il limite di tollerabilità. La condizione di tollerabilità è quindi espressa dalla (6.16).

L'omogeneità dello spazio ridotto R_r^n consente che esso possa essere oggetto di partizione e, quindi, scrivere:

$$R_r^n = T \oplus V \oplus A \oplus \dots \quad (6.19)$$

in cui T rappresenta il subspazio ridotto determinato dalle proprietà interessate alle relazioni termoigrometriche, V quello relativo alle interazioni visive, A quello relativo alle interazioni acustiche e così via.

Altro risultato consentito da questo approccio deriva dal fatto che nell'iperspazio ogni punto è individuato oltre che dal modulo del vettore sensazione anche dai coseni direttori:

$$m_i = \frac{|\vec{b}_i|}{|\vec{b}|} \quad (6.20)$$

i quali rappresentano gli indici della sensibilità relativa all' i -esima componente, ovvero all' i -esimo stimolo ambientale.

6.2. Applicazione del bonum all'acustica delle sale

6.2.1. Scelta dei parametri oggettivi

Come è noto, l'intensità soggettiva di un suono complesso è determinata dalla coazione delle singole componenti tonali, ma non può essere determinata come la sovrapposizione degli effetti, a causa del mascheramento reciproco delle singole componenti. In tale ambito, l'applicazione della teoria sopra illustrata necessita l'individuazione delle grandezze ambientali che determinano la sensazione di intensità soggettiva ed il relativo campo di tollerabilità biologica.

Parlando però in questo caso di "qualità" e non di "tollerabilità", sarà necessario individuare un insieme che rappresenti il benessere acustico, delimitato dai valori delle grandezze ambientali che corrispondono a valori ottimali, minimo e massimo, delle grandezze oggettive che li rappresentano.

In pratica, come esemplificato in Fig. 6.4, si deve procedere all'identificazione di :

- un intervallo di benessere, delimitato superiormente da un valore corrispondente alla condizione ottimale massima ($V_{ott,max}$), ed inferiormente da un valore corrispondente alla condizione ottimale minima ($V_{ott,min}$);
- un valore effettivo del vettore di qualità, rappresentativo della situazione reale tale che, nel caso di benessere acustico, sia:

$$V_{ott,min} < V_{effettivo} < V_{ott,max} \quad (6.21)$$

- un valore ottimale del vettore, rappresentativo delle condizioni ottimali per la particolare situazione analizzata, tale che

$$V_{ott,min} < V_{ottimale} < V_{ott,max} \quad (6.22)$$

- un ΔV che rappresenti la distanza della condizione reale dall'ottimale:

$$\Delta V = V_{effettivo} - V_{ottimale} \quad (6.23)$$

in modo da avere un immediato riscontro sulla qualità acustica complessiva della sala analizzata.

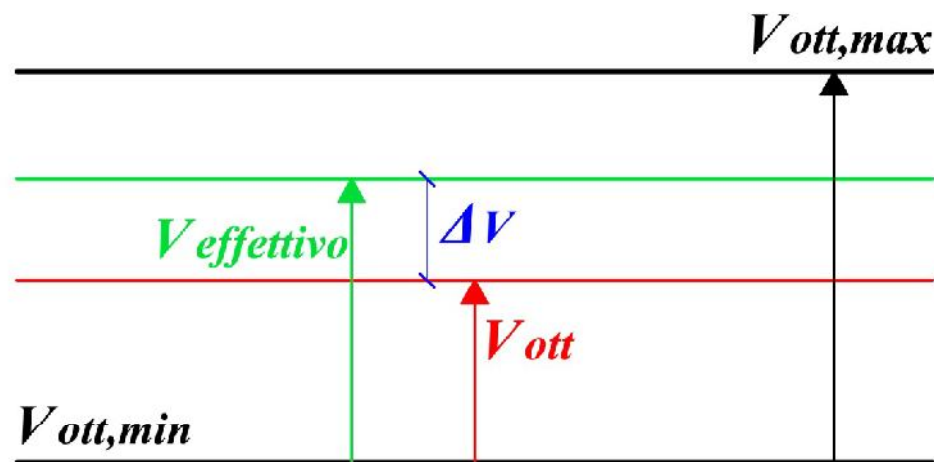


Fig. 6.4 – Schematizzazione grafica degli intervalli analizzati e calcolati

Pertanto il primo passo è consistito nell'individuazione di un set ristretto di parametri acustici oggettivi, atti a descrivere il più possibile le caratteristiche del campo sonoro in un ambiente chiuso. Tali parametri sono:

- il livello di pressione sonora L_p ;
- l' EDT , che come visto è il tempo di riverberazione più correlato alle valutazioni psico-soggettive dell'ascoltatore medio;
- l'Initial Time Delay Gap ($ITDG$), che rappresenta il tempo di ritardo con cui l'onda diretta segue l'onda riflessa e che secondo Beranek ed Ando risulta essere uno dei fattori che influenzano la qualità acustica di una sala perché direttamente correlato con la caratteristica soggettiva di "intimità";
- il Lateral Fraction (LF_{80}), che descrive la sensazione di spazialità percepita dall'ascoltatore all'interno dell'ambiente.

Per applicare la teoria esposta, si è individuata, per ciascun parametro oggettivo scelto, la grandezza fisica oggettiva che descrive la sollecitazione che genera nell'ascoltatore la particolare sensazione soggettiva che il parametro descrive.

6.2.2. Livello di pressione

In particolare per il livello di pressione sonora si è assunto come stimolo il valore efficace della pressione acustica. Dalla definizione di livello di pressione sonora:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (6.24)$$

dove p_0 è la minima pressione udibile alla frequenza di 1000 Hz ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa), si ottiene:

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (6.25)$$

Relativamente al campo di benessere acustico, questo è stato individuato facendo riferimento alla letteratura e alla normativa.

Quale limite inferiore si è scelto un valore minimo del livello di pressione capace di superare il rumore di fondo. In letteratura il livello ponderato con la curva "A" di rumore-

sità ambientale (rumore di fondo) normalmente accettato per sale da concerto e teatri d'opera è di 45 dB(A). Pertanto quale soglia inferiore si è assunto un valore del livello di pressione che superi di 10 dB il fondo, pari quindi a di 55 dB(A).

Quale limite superiore si è considerato il valore di 95 dB(A), come indicato dal Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 16/04/1999, n. 215, “Regolamento recante norme per la determinazione dei requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo e nei pubblici esercizi”.

Il valore ottimale del Livello di pressione si è presunto come media tra i due, quindi pari a 75 dB(A).

Tali valori sono stati considerati ottimali ad una distanza di 20 m dalla sorgente. Per calcolare il livello di pressione ottimale in tutti i punti della sala, si è ricorso all'espressione già adottata da Ando:

$$L_{p,ott} = L_{w,ott} + 10 \log(1 + A^2) - 20 \log(d_0) - 11 \quad (6.26)$$

dove:

$$L_{w,ott} = L_{p,ott(20m)} + 20 \log(20) + 11 \quad (6.27)$$

Cioè il livello di potenza sonora ottimale da attribuire alla sorgente è stato determinato a ritroso, considerando il livello di pressione sonora ottimale di 75 dB(A) a 20 m dalla sorgente ed applicando la formula inversa della divergenza geometrica. Analogamente si sono calcolati il $L_{p,ott,min}$ e il $L_{p,ott,max}$.

Comunque, qualsiasi altra assunzione relativamente al campo di benessere acustico non lede il principio generale del metodo.

Si sono calcolati quindi i valori delle pressioni sonore efficaci per le 4 condizioni citate (effettiva, ottimale, ottimale minima e ottimale massima):

$$p_{effettiva} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,effettiva}}{20}} \quad (6.28)$$

$$p_{ott} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,ott}}{20}}$$

$$p_{ott,min} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,ott,min}}{20}}$$

$$p_{ott,max} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,ott,max}}{20}}$$

Si è proceduto, infine, al calcolo delle relative variabili ridotte:

$$\eta(L_{p,effettivo}) = \frac{p_{effettiva} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}}$$

$$\eta(L_{p,ott}) = \frac{p_{ott} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}}$$

(6.29)

$$\eta(L_{p,ott,min}) = \frac{p_{ott,min} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}} = 0$$

$$\eta(L_{p,ott,max}) = \frac{p_{ott,max} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}} = 1$$

6.2.3.L'EDT

Perquanto riguarda il tempo di riverberazione, si è scelto di considerare quale grandezza fisica stimolante l'energia del decadimento. Per un generico processo di decadimento sonoro si può assumere una relazione di tipo esponenziale:

$$I_1 = I_0 e^{-kt} \quad (6.30)$$

Con I_1 intensità di energia al tempo t e I_0 intensità di energia all'istante iniziale, t il tempo e k data dalla relazione:

$$k = \frac{cA}{4V} \quad (6.31)$$

dove c è la velocità del suono, V il volume della sala ed A le unità assorbenti :

$$A = \sum_i a_i \cdot S_i \quad (6.32)$$

Considerando che l'intensità di energia all'istante iniziale I_0 è costante ed integrando la (6.28) tra il tempo 0 e il tempo di riverberazione, si ottiene l'energia contenuta nel processo di decadimento sonoro:

$$E_{dec} = \frac{4V}{cA} \left(1 - e^{\frac{-cA}{4V} RT} \right) \quad (6.33)$$

dove:

V = volume della sala (m^3);

c = velocità di propagazione del suono (m/s);

A = unità assorbenti della sala;

EDT = tempo di riverberazione (s).

Per determinare i valori ottimali si è attinto alla letteratura, utilizzando il diagramma per la determinazione del tempo di riverberazione ottimale in Fig. 6.5, considerando che i valori ottimali dell' EDT dovrebbero essere superiori del 10% rispetto a quelli del T_{60} .

I limiti superiore ed inferiore del campo di qualità acustica sono invece stati dedotti in funzione del tempo di riverberazione ottimale, sulla base delle relazioni indicate da Arrau:

$$EDT_{ott,min} = (0.9 * EDT_{ott}) - 0.5 \quad (6.34)$$

$$EDT_{ott,max} = EDT_{ott} + 0.5 \quad (6.35)$$

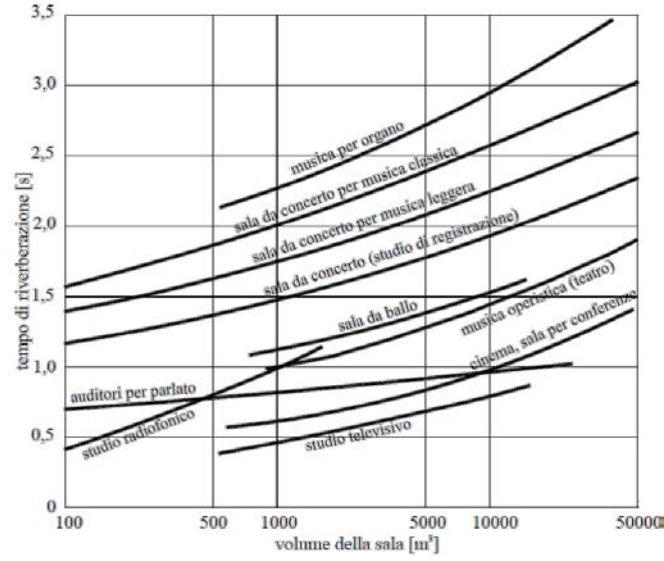


Fig. 6.5 – Diagramma per la determinazione del tempo di riverberazione ottimale

Analogamente a quanto visto per il livello di pressione si sono calcolati i valori delle energie del decadimento nei 4 casi. Il valore delle unità assorbenti è stato di volta in volta calcolato secondo la:

$$A = 0.16 \frac{V}{EDT} \quad (6.36)$$

considerando caso per caso il valore del tempo di riverberazione interessato (effettivo, ottimale, ottimale minimo e massimo).

I valori delle grandezze fisiche oggettive considerate sono:

$$E_{dec,effettiva} = \frac{4V}{cA_{effettiva}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{effettiva}}{4V} EDT_{effettiva}} \right)$$

$$E_{dec,ott} = \frac{4V}{cA_{ott}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{ott}}{4V} EDT_{ott}} \right) \quad (6.37)$$

$$E_{dec,ott,min} = \frac{4V}{cA_{ott,min}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{ott,min}}{4V} EDT_{ott,min}} \right)$$

$$E_{dec,ott,max} = \frac{4V}{cA_{ott,max}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{ott,max}}{4V} EDT_{ott,max}} \right)$$

Le variabili ridotte, allora, saranno:

$$\begin{aligned} \eta(EDT_{effettiva}) &= \frac{E_{dec,effettiva} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} \\ \eta(EDT_{ott}) &= \frac{E_{dec,ott} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} \\ \eta(EDT_{ott,min}) &= \frac{E_{dec,ott,min} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} = 0 \\ \eta(EDT_{ott,max}) &= \frac{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} = 1 \end{aligned} \tag{6.38}$$

6.2.4. L'ITDG

L'ITDG rappresenta, come detto, il tempo di ritardo della prima riflessione rispetto all'onda diretta. Questo ritardo si traduce, in termini energetici, in una variazione dell'intensità sonora dovuta ai due singoli contributi. In particolare, l'intensità sonora dovuta all'onda diretta è data da:

$$I_d = \frac{W}{4\pi r^2} \tag{6.39}$$

dove W = potenza sonora della sorgente (W);

r = distanza del punto di ricezione considerato dalla sorgente (m).

Analogamente l'intensità sonora dovuta alla prima riflessione sarà:

$$I_r = \frac{Wa}{4\pi d^2} \tag{6.40}$$

dove a = coefficiente di riflessione del materiale che riveste la superficie che genera la riflessione;

d = percorso compiuto dal raggio riflesso (m).

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva cercata è proprio la differenza di intensità:

$$\Delta I = I_d - I_r = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d^2)} \quad (6.41)$$

L'incognita, che in questo caso è il percorso compiuto dall'onda riflessa, è deducibile proprio dal valore dell'*ITDG*. Essendo infatti:

$$\Delta r = ITDG \cdot c \quad (6.42)$$

ed essendo r noto a priori, allora

$$d = r + \Delta r \quad (6.43)$$

I valori di riferimento dell'*ITDG* vengono, ancora una volta, dalla letteratura:

- $ITDG_{ott,min} = 0\text{ms}$;
- $ITDG_{ott,max} = 80\text{ ms}$ per la musica e 50 ms per il parlato;
- $ITDG_{ott} = 30\text{ ms}$, come indicato da Beranek.

I valori delle 4 grandezze considerate, allora:

$$\begin{aligned} \Delta I_{effettivo} &= I_d - I_{r,effettivo} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{effettivo}^2)} \\ \Delta I_{ott} &= I_d - I_{r,ott} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{ott}^2)} \end{aligned} \quad (6.44)$$

$$\Delta I_{ott,min} = I_d - I_{r,ott,min} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{ott,min}^2)} = 0$$

$$\Delta I_{ott,max} = I_d - I_{r,ott,max} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{ott,max}^2)}$$

È bene sottolineare il caso particolare per cui l' $ITDG_{ott,min} = 0$ ms corrisponde ad una differenza di percorso nulla tra l'onda diretta e la prima riflessione. Dalla (6.38) si deduce, allora, che il percorso compiuto dal raggio riflesso è lo stesso del diretto, e quindi le due intensità sono uguali. La loro differenza è pertanto nulla.

Le variabili ridotte, allora, saranno:

$$\begin{aligned}\eta(ITDG_{effettivo}) &= \frac{\Delta I_{effettiva} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} \\ \eta(ITDG_{ott}) &= \frac{\Delta I_{ott} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} \\ \eta(ITDG_{ott,min}) &= \frac{\Delta I_{ott,min} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} = 0 \\ \eta(ITDG_{ott,max}) &= \frac{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} = 1\end{aligned}\tag{6.45}$$

6.2.5. Il LateralFraction

Il LateralFraction è un parametro energetico definito, come già ricordato (Capitolo 4):

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}\tag{6.46}$$

dove $p_L(t)$ è la pressione istantanea misurata con un microfono con caratteristica dipolare, puntato in modo da avere la massima sensibilità su di un asse perpendicolare alla congiungente la testa dell'ascoltatore e la sorgente sonora.

In altre parole tale parametro rappresenta il rapporto tra l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms, e l'energia omnidirezionale nei primi 80 ms. Poiché è il termine al numeratore a determinare la sensazione di spazialità, si è scelta questa quantità di energia come grandezza oggettiva stimolante. Allora:

$$E_{5-80} = LF \cdot E_{80} \quad (6.47)$$

dove E_{5-80} = energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms;

E_{80} = l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms.

Il campo di benessere acustico è stato individuato facendo riferimento alla letteratura, in particolare:

- $LF_{ott,min} = 0$;
- $LF_{ott,max} = 1$;
- $LF_{ott} = 0,4$ come indicato da Beranek.

Anche qui bisogna sottolineare che i valori ottimali massimo e minimo corrispondono a due situazioni limite. Nel primo caso, infatti, il $LF_{ott,max} = 1$ implica che $E_{5-80} = E_{80}$; mentre il $LF_{ott,min} = 0$ si traduce in $E_{5-80} = 0$. Infatti:

$$\begin{aligned} E_{(5-80),effettiva} &= LF_{effettiva} \cdot E_{80} \\ E_{(5-80),ott} &= LF_{ott} \cdot E_{80} \end{aligned} \quad (6.48)$$

$$E_{(5-80),ott,min} = LF_{ott,min} \cdot E_{80} = 0$$

$$E_{(5-80),ott,max} = LF_{ott,max} \cdot E_{80} = E_{80}$$

Ricordiamo che valori tipici del LateralFraction sono compresi tra 0,05 e 0,35. Le variabili ridotte, allora, saranno:

$$\begin{aligned}
\eta(LF_{effettivo}) &= \frac{E_{(5-80)effettiva} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}} \\
\eta(LF_{ott}) &= \frac{E_{(5-80)ott} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}} \\
\eta(LF_{ott,min}) &= \frac{E_{(5-80)ott,min} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}} = 0 \\
\eta(LF_{ott,max}) &= \frac{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}} = 1
\end{aligned} \tag{6.49}$$

6.2.6. Il calcolo dei Vettori qualità

Una volta effettuata la trasformazione di coordinate, ci si è quindi ricondotti ad uno spazio ridotto R^n_r a quattro dimensioni, in cui un generico punto è individuato dalla relazione $P(\eta(L_{p,i}), \eta(EDT_i), \eta(ITDG_i), \eta(LF_i))$ dove con i si intendono le situazioni analizzate (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima). Pertanto, in base ai calcoli effettuati, si individueranno nello spazio 4 punti, ciascuno rappresentativo di una specifica relazione uomo – ambiente, e in particolare:

$$\begin{aligned}
P_{effettivo}(\eta(L_{p,effettivo}), \eta(EDT_{effettivo}), \eta(ITDG_{effettivo}), \eta(LF_{effettivo})) \\
P_{ott}(\eta(L_{p,ott}), \eta(EDT_{ott}), \eta(ITDG_{ott}), \eta(LF_{ott})) \\
P_{ott,min}(\eta(L_{p,ott,min}), \eta(EDT_{ott,min}), \eta(ITDG_{ott,min}), \eta(LF_{ott,min})) \\
P_{ott,max}(\eta(L_{p,ott,max}), \eta(EDT_{ott,max}), \eta(ITDG_{ott,max}), \eta(LF_{ott,max}))
\end{aligned} \tag{6.50}$$

Come detto, il segmento che unisce l'origine degli assi con il generico punto individuato, per le condizioni di tale punto, la distanza dello stato dell'uomo dallo stato di soglia inferiore delle interazioni rapportata all'intervallo relativo alla direzione individuata. Il modulo del vettore che unisce l'origine del sistema cartesiano a quattro dimensioni e i punti P_i rappresenta il valore cercato del Vettore qualità (Fig.6.6). Quindi:

$$\begin{aligned}
\vec{V}_{effettivo} &= \sqrt{\eta(L_{p,eff})^2 + \eta(EDT_{eff})^2 + \eta(ITDG_{eff})^2 + \eta(LF_{eff})^2} \\
\vec{V}_{ott} &= \sqrt{\eta(L_{p,ott})^2 + \eta(EDT_{ott})^2 + \eta(ITDG_{ott})^2 + \eta(LF_{ott})^2} \\
\vec{V}_{ott,min} &= \sqrt{\eta(L_{p,ott,min})^2 + \eta(EDT_{ott,min})^2 + \eta(ITDG_{ott,min})^2 + \eta(LF_{ott,min})^2} \\
\vec{V}_{ott,max} &= \sqrt{\eta(L_{p,ott,max})^2 + \eta(EDT_{ott,max})^2 + \eta(ITDG_{ott,max})^2 + \eta(LF_{ott,max})^2}
\end{aligned} \tag{6.51}$$

In particolare il valore del $V_{ott,min}$ è pari a 0, essendo tutte le coordinate del punto nulle. Esso pertanto coincide con l'origine degli assi e, come detto, rappresenta la soglia inferiore del campo di benessere acustico. Il $V_{ott,max}$, invece, sarà pari a 2. Infatti:

$$\vec{V}_{ott,max} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2} = \sqrt{4} = 2 \tag{6.52}$$

Pertanto l'intervallo di qualità acustica cercato è $[0;2]$: tutti i punti rappresentativi dell'interazione uomo – ambiente che ricadono all'interno di questo intervallo, rappresentano condizioni di benessere acustico, e quindi il loro valore del Vettore qualità è una misura della qualità acustica della sala analizzata. La (6.22) pertanto diventa:

$$0 < V_{ottimale} < 2 \tag{6.53}$$

Il calcolo del ΔV secondo la (6.23), che come detto rappresenta la distanza della condizione reale dall'ottimale, permette di avere un immediato riscontro sulla qualità acustica complessiva della sala analizzata.

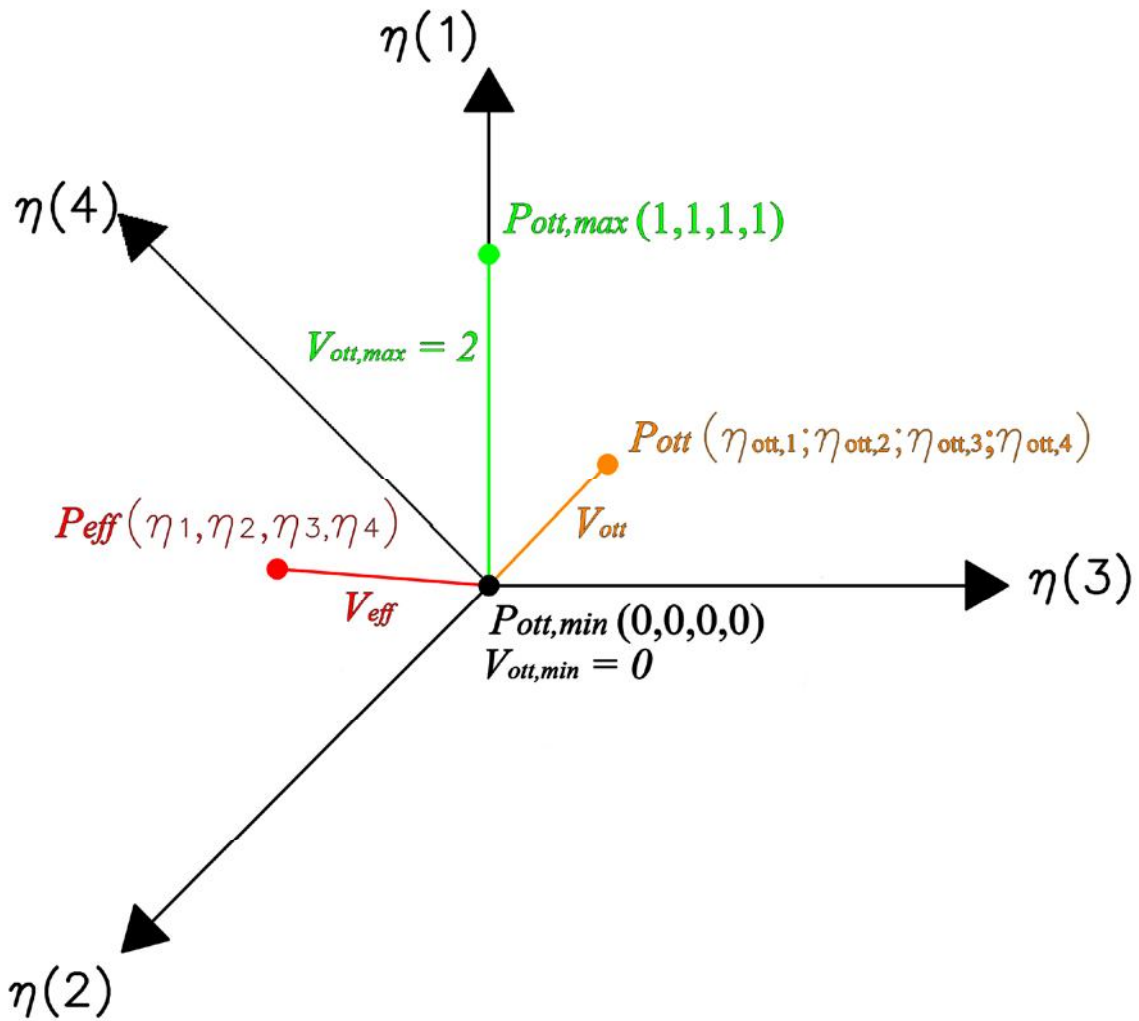


Fig. 6.6 – Schematizzazione dello spazio a 4 dimensioni che rappresenta il campo di esistenza della qualità acustica e dei vettori di qualità

6.3. Validazione della metodologia

Il presente lavoro vuole mirare alla validazione della metodologia proposta, attraverso il confronto della stessa con la teoria dell'indice globale di qualità acustica di Ando.

Nonostante gli studi di Ando siano un po' datati e siano stati soggetti a diverse critiche da parte degli studiosi, la scelta di tale teoria quale metro di paragone è stata dettata da considerazioni di carattere pratico e tecnico.

Tutte le metodologie di correlazione psicoacustica analizzate, infatti, da quella proposta da Beranek alla fuzzylogic, sono basate su questionari o su un set di valutazioni espresse da esperti o da semplici ascoltatori. Questo rende le suddette teorie inapplicabili in caso di sale esistenti soltanto in fase di progettazione, sulla cui qualità è quindi impossibile chiedere la formulazione di giudizi. La sola fuzzylogic, avendo come Ando parametrizzato

e standardizzato i pesi da assegnare ai diversi parametri, potrebbe essere utilizzata anche in tal senso.

La scelta tra le due teorie è stata appannaggio di quella di Ando data la sua semplicità. La metodologia proposta, infatti, vuole configurarsi come uno strumento semplice e facilmente applicabile, anche da progettisti non propriamente del mestiere, e in tal senso di avvicina molto di più alla teoria dello studioso giapponese. La fuzzylogic, pur essendo probabilmente più esaustiva e completa, è uno strumento delicato e complesso, difficilmente alla portata di tutti.

Il metodo del Vettore qualità si configura invece come una procedura standardizzata alla portata di tutti, che permette di avere in maniera intuitiva un riscontro immediato sulla bontà acustica della sala analizzata. Data la similitudine alla teoria di Ando, in questa sede è sembrato più coerente scegliere questa quale parametro di confronto per la validazione del metodo.

Nei capitoli successivi saranno riportati i risultati delle campagne di misure effettuate in diversi teatri italiani. Tali risultati sono stati utilizzati per la taratura di ciascun modello costruito con il software di simulazione Odeon, in modo da ottenere valori realistici in tutti i punti delle sale, e non soltanto in quelli di misura. A ciascuna sala sono state quindi applicate sia la metodologia di Ando sia quella del Vettore qualità; come si vedrà, il confronto tra i risultati ottenuti valida completamente la teoria qui proposta.

CAPITOLO 7 – STRUMENTI E TECNICHE DI MISURA

Il procedimento di misurazione impiegato è il metodo della risposta integrata all'impulso, con il quale si ottengono curve di decadimento mediante integrazione inversa delle risposte all'impulso quadro. Come è noto, per la determinazione del tempo di riverberazione esistono altre possibili tecniche di acquisizione, tra cui il metodo del rumore interrotto. Per quanto riguarda invece la determinazione degli altri parametri acustici, il metodo della risposta integrata all'impulso risulta essere la tecnica attualmente più diffusa ed affidabile.

7.1. Sistema lineare tempo invariante

La determinazione dei parametri acustici percepiti dagli ascoltatori durante una normale performance è la finalità ultima di misurazioni e simulazioni acustiche degli ambienti chiusi. Durante lo svolgimento delle misurazioni, nonché durante l'operazione di simulazione del campo acustico di una sala, appare pertanto essenziale ritrovare esattamente le condizioni di funzionamento dell'ambiente esaminato. L'ipotesi fondamentale di tutte le teorie acustiche formulate sugli ambienti chiusi consiste nell'ipotizzare ciascun ambiente musicale come sistema lineare tempo invariante.

Un qualunque sistema fisico può essere considerato lineare quando, presi due segnali di ingresso separati (A e B) e determinati i loro corrispondenti segnali di uscita (C e D), qualunque combinazione lineare dei segnali di ingresso verrà mantenuta immutata nei segnali di uscita. Ad esempio la somma dei segnali di ingresso ($A + B$) produrrà la somma dei segnali di uscita ($C + D$).

Allo stesso modo, il sistema fisico potrà essere considerato tempo-invariante se non si modifica in alcun modo al passare del tempo. Ciò significa che il sistema dovrà essere immutato per tutto il periodo di analisi.

In particolare nell'acustica degli spazi chiusi si definiscono i seguenti sistemi:

- Sistema acustico. Si definisce sistema acustico o spazio acustico-musicale l'insieme delle componenti fisiche che delimitano l'ambiente nel quale si svolge l'attività musicale che è oggetto di studio. Esso è quindi costituito dall'architettura dello spazio, comprendendo la sala, il palcoscenico e tutto ciò che normalmente ne costituisce parte integrante, come le poltrone, le quinte, la macchina scenica, etc. In esso vanno anche comprese le caratteristiche termoigrometriche dell'ambiente, ossia la temperatura dell'aria ed il

suo gradiente termico, la velocità dell'aria, l'umidità relativa. Possono essere compresi anche gli strumenti musicali.

- Sistema elettronico. Il sistema elettronico include tutto ciò che non costituisce il normale spazio acustico, ma viene utilizzato esclusivamente per lo svolgimento delle misurazioni. Vanno quindi compresi gli apparati di misurazione quali microfoni, sorgenti sonore, trasduttori di potenza, schede audio, cavi di collegamento ed interfacciamento.

Nel caso dell'acustica dei teatri si assume l'ipotesi di perfetta linearità del sistema elettroacustico, costituito cioè dal sistema acustico (spazio acustico-musicale) e dal sistema elettronico (la strumentazione utilizzata), e di invariabilità assoluta di tutto il sistema nel corso dello svolgimento delle misure (ma anche del normale utilizzo durante un concerto).

La realtà fisica è comunque ben diversa, anche se l'ipotesi di linearità del sistema acustico-musicale non appare eccessivamente forzata: in effetti la propagazione acustica e le caratteristiche fluidodinamiche dell'aria interessata dalla propagazione della perturbazione sonora possono essere ritenute lineari.

Non è invece ipotizzabile ritenere lineare il comportamento dei trasduttori impiegati durante l'effettuazione delle misure. Sia la sorgente sonora sia i microfoni sia gli strumenti musicali possiedono un comportamento altamente non lineare, specie alle alte frequenze.

Inoltre l'ipotesi fatta richiederebbe la perfetta invarianza fisica dei due sistemi (sistema acustico-musicale e sistema elettronico) sia durante lo svolgimento delle performance musicali sia durante la campagna di misurazioni. Anche in questo caso la realtà fisica differisce dall'ipotesi teorica, dacché il minimo spostamento all'interno dell'ambiente provoca una sua variazione nel tempo. Ad esempio, il solo spostamento della strumentazione durante la campagna di misura comporta una variazione fisica nel sistema acustico-musicale, così come la semplice variazione delle condizioni termoigrometriche (temperatura e umidità dell'aria) e la variazione termica per effetto joule all'interno dei trasduttori.

L'obiettivo di una campagna di misurazioni sperimentali di qualità acustica all'interno di un ambiente per la musica consiste comunque nel determinare proprio le caratteristiche del sistema acustico-musicale, a prescindere dalle caratteristiche della strumentazione utilizzata. La misurazione quindi dovrà essere in grado di separare i contributi non lineari (in modo particolare le distorsioni) causati dalla strumentazione dalla risposta acustica dello spazio acustico-musicale.

Questi limiti presenti tra i requisiti teorici necessari allo svolgimento dei rilievi e la realtà fisica del sistema sotto analisi spiega una diversa risposta delle tecniche sperimentali

applicate alla determinazione dei parametri acustici dei teatri, ed in particolare dei segnali di prova impiegati per la determinazione delle risposte all'impulso.

Riassumendo, il sistema “sala d'ascolto” infatti non è lineare e tempo-invariante per diversi motivi:

- non è lineare, in quanto in esso è sempre presente un rumore di fondo; inoltre le pareti possono rispondere alle stimolazioni acustiche con meccanismi non lineari (che però sono trascurabili alle potenze sonore usate);
- non è tempo-invariante, in quanto, oltre a dipendere dalla presenza o meno di pubblico e di esecutori (ed ovviamente dal tipo di pubblico e esecutori: basti solo pensare che ad esempio d'inverno il pubblico sarà presente nella sala con abiti più pesanti e quindi più fonoassorbenti), ma dipende anche dalle condizioni di temperatura e di umidità, che andranno a far variare la velocità del suono e l'assorbimento, soprattutto alle alte frequenze.

Inoltre bisogna considerare che le perdite di energia dell'ambiente lo rendono non isolato dall'esterno (in un senso e nell'altro, ovvero con perdita di energia sonora dall'interno verso l'esterno e con introduzione di rumore esterno verso l'interno della sala). Tuttavia è possibile rimediare a queste problematiche considerando che:

- il rumore presente nella sala da concerto è di poche decine di dB (in genere al di sotto di 25 dB), tale da influire poco sulle misurazioni a patto che esse vengano fatte con un livello di intensità molto alto rispetto ad esso;
- le misurazioni possono essere eseguite a sala vuota e a sala piena, come se fossero due sale differenti). Naturalmente si opera in modo da garantire alla sala sempre le stesse condizioni termiche e igrometriche.

Dunque se vengono tenute in conto queste ultime considerazioni, la sala può essere ritenuta un sistema lineare e tempo-invariante. I problemi di non-linearità potranno quindi essere attribuiti al sistema elettro-acustico.

7.2. La risposta all'impulso

Detto dunque che, in linea generale, l'acustica di una sala da concerto o di un teatro d'opera può essere fisicamente considerato sistema lineare tempo invariante, sarà allora possibile determinarne le proprietà fisiche

La risposta all'impulso contiene tutte le informazioni di cui è dotato il sistema: il contenuto informativo necessario e sufficiente per una completa caratterizzazione dell'acustica di una sala è racchiuso nella sua risposta all'impulso.

Il sistema considerato, nel caso dell'acustica degli ambienti chiusi, è costituito da una particolare sorgente, teoricamente puntiforme, e da un particolare punto d'ascolto, anch'esso ipotizzato puntiforme, collocati all'interno dell'ambiente. Va sottolineato quindi che, all'interno di un ambiente per la musica, esistono infiniti sistemi lineari possibili, daché esistono ∞^3 diverse possibilità di collocare la sorgente sonora (supposta omnidirezionale) ed altrettante possibilità per il microfono. Inoltre, anche l'orientazione sia della sorgente (se supposta non omnidirezionale) sia del microfono (se anch'esso supposto non omnidirezionale) contribuiscono ad aumentare esponenzialmente i gradi di libertà presenti all'atto della scelta delle misurazioni.

Il segnale emesso dalla sorgente $x(t)$ (Fig. 7.1) e il risultato delle modifiche prodotte dal sistema (considerato in gergo come black box) sul segnale in ingresso (il segnale raccolto dall'ascoltatore) $y(t)$, sono tra di loro correlati dalla risposta all'impulso dell'ambiente, chiamata $h(t)$.

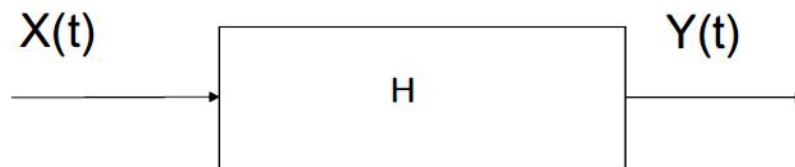


Fig. 7.1 - Risposta di un sistema ad una sollecitazione

Se si suppone che il sistema in esame sia stabile, lineare e tempo-invariante, allora l'informazione completa del modo in cui il sistema risponde ad una sollecitazione è contenuta nella sua risposta all'impulso, $h(t)$. La linearità presunta del sistema, infatti, obbedisce al principio di sovrapposizione degli effetti, e quindi tutto ciò che fa il sistema è ridistribuire gli impulsi che ha ricevuto nel tempo. La formulazione matematica di questo procedimento è l'operazione di convoluzione:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot x(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) \cdot x(t) d\tau \quad (7.1)$$

in cui il terzo membro dell'equazione esprime la proprietà commutativa della convoluzione. Dunque se si immette nel sistema una δ di Dirac, all'uscita del sistema si otterrà proprio la risposta all'impulso:

$$y(t) = \delta \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot \delta(t - \tau) d\tau = h(t) \quad (7.2)$$

Nelle misure reali non è possibile immettere nel sistema energia praticamente infinita in un brevissimo tempo come richiederebbero le proprietà della δ di Dirac. Passando nel dominio delle frequenze tramite trasformata di Fourier, la convoluzione diventa una semplice moltiplicazione tra gli spettri:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \Rightarrow Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega) \quad (7.3)$$

La funzione $H(\omega)$ è detta funzione di trasferimento del sistema (FDT). Il corrispettivo numerico della trasformata di Fourier sarà la Fast Fourier Transform (FFT), che viene calcolata ovviamente non su una scala del tempo continua ma su finestre campione.

Un altro modo per ottenere la risposta all'impulso di un sistema è la cosiddetta Time Reversal Mirror, attraverso il capovolgimento della funzione di partenza sull'asse dei tempi. Il problema di questa tecnica è che se il segnale non è a spettro piatto, in uscita la sua “colorazione” (ovvero il suo spettro in frequenza non piatto) sarà ulteriormente rafforzata, distorcendo quella della risposta all'impulso. Per questo motivo si tende ad eccitare il sistema con segnali a spettro piatto. Le tecniche MLS e di sine sweep descritte in seguito si basano proprio sul Time Reversal Mirror, in quanto sono a spettro piatto (la prima) o di facile bilanciamento spettrale (la seconda). Infatti in questo modo si ottiene il cosiddetto filtro inverso, ovvero la funzione che, convoluta col segnale di partenza, rende una δ di Dirac:

$$x \otimes x^{-1} = \delta \quad (7.4)$$

e quindi

$$y \otimes x^{-1} = x \otimes h \otimes x^{-1} = h \otimes \delta = h \quad (7.5)$$

In base a queste considerazioni, tutta la problematica della misurazione e della simulazione acustica può essere ricondotta in estrema sintesi alla determinazione della risposta all'impulso: quando $x(t)$ è la pressione sonora alla sorgente, l'uscita $y(t)$ è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale si possono calcolare i parametri acustici di interesse.

Quanto ora affermato rimane valido anche qualora si voglia tenere in debita considerazione estensione e direttività delle sorgenti sonore, oltre alla loro potenza sonora e risposta in frequenza, e si vogliano anche considerare l'orientazione dei ricevitori e l'effetto della conformazione dei padiglioni auricolari, che consentono all'ascoltatore di sentire assai diversamente da quanto sente un normale microfono.

7.3. La risposta all'impulso binaurale

Se è vero che la risposta all'impulso rappresenta il parametro fisico in grado di esprimere esaurientemente le caratteristiche fisico-acustiche di un teatro, è però necessario tenere in debita considerazione che il brano musicale viene percepito tramite le orecchie dell'ascoltatore. La risposta all'impulso pertanto deve essere modificata e riferita anche alla conformazione dell'apparato uditivo medio, considerando anche le funzioni di trasferimento relative alla testa (Head-Related Transfer Function, *HRTF*). Esse sostanzialmente trasformano la risposta in frequenza del microfono normale (omnidirezionale) in una coppia di microfoni binaurali, operazione necessaria se si vuole simulare una risposta all'impulso binaurale. Nel corso delle misurazioni essa viene operata molto semplicemente ricorrendo ad un apparato sperimentale appropriato, ossia una testa artificiale (dummy head), che consente di effettuare misurazioni binaurali di risposte all'impulso. In Fig. 7.2 si riporta un esempio di risposta all'impulso binaurale sperimentale.

Le risposte all'impulso binaurali sono state a lungo utilizzate allo scopo di effettuare misurazioni all'interno degli ambienti dedicati alla musica, per quantificare anche parametri binaurali (in particolare la *IACC*), nonostante presentino limitazioni molto forti, in particolare in relazione alla possibilità di quantificare esattamente la spazializzazione del campo acustico nei teatri. Va inoltre sottolineato come esse devono essere utilizzate esclusivamente per il calcolo di parametri binaurali e non monoaurali (sebbene assai frequentemente vengano impiegate anche per questo scopo), e viceversa (le risposte all'impulso monoaurali non sono sufficienti per determinare i parametri acustici binaurali).

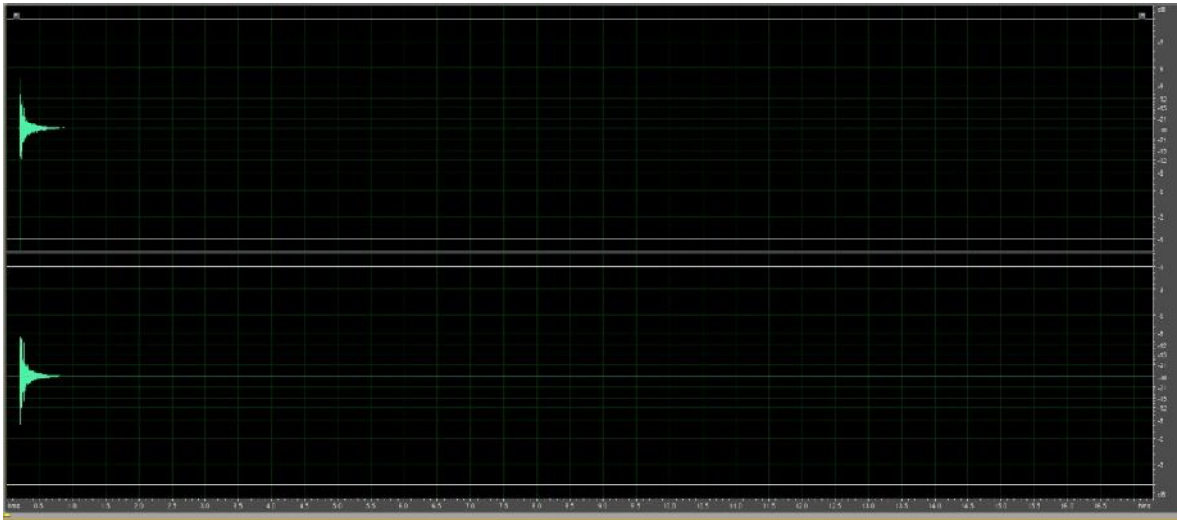


Fig. 7.2 - Risposta all'impulso binaurale sperimentale

7.4. La risposta all'impulso B-format

La risposta all'impulso di tipo B-format rappresenta una sorta di sviluppo della risposta binaurale, dacché riunisce in sé le caratteristiche monoaurali e tridimensionali del campo acustico. Un esempio tipico di microfono tridimensionale è illustrato in Fig. 7.3, assieme ad una testa artificiale. Entrambi sono montati sopra un “torso” che sintetizza la presenza del corpo umano.



Fig. 7.3 - Testa artificiale (dx) e microfono tridimensionale (sx) montati su dei torsi

Alla base del funzionamento del sistema vi è l'intuizione di Gerzon di utilizzare un sistema di registrazione a quattro canali caratterizzato da quattro microfoni cardioidi montati su un supporto tetraedrico regolare, chiamato A-format (Gerzon, 1975). Tale sistema, utilizzato per le riprese sonore di eventi musicali dalla BBC, doveva poi essere decodificato tramite opportune relazioni per essere successivamente riprodotto in un ambiente d'ascolto secondo una serie di formule che costituivano la teoria Ambisonics. Nella Fig. 7.4 si riporta lo schema del sistema A-format.

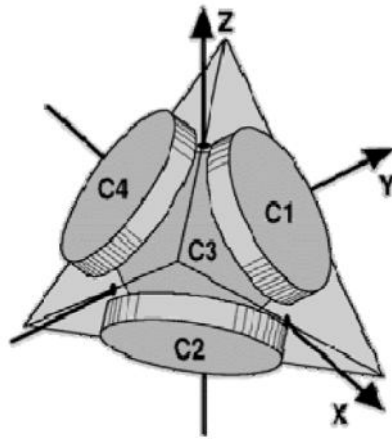


Fig. 7.4 - Le quattro capsule dell'A-format del sistema Ambisonic

I segnali in ingresso nelle capsule del sistema A-format possono essere elaborati, secondo le semplici relazioni della formule 7.6, ottenendo una serie di segnali virtualmente provenienti da altre direzioni, chiamate B-format, come indicato nella Fig. 7.5.

$$C1 + C2 + C3 + C4 = W$$

$$C1 + C2 - C3 - C4 = X$$

(7.6)

$$C1 - C2 + C3 - C4 = Y$$

$$C1 - C2 - C3 + C4 = Z$$

Il significato di questa trasformazione è immediato: il segnale W rappresenta un segnale omnidirezionale, come se virtualmente nel baricentro delle capsule A-format vi fosse un microfono omnidirezionale. Gli altri segnali (X , Y e Z) rappresentano ciascuno tre

microfoni cardioidi virtuali collocati lungo gli assi di una terna cartesiana, e forniscono quindi i valori del campo sonoro proveniente da ciascun asse cartesiano.

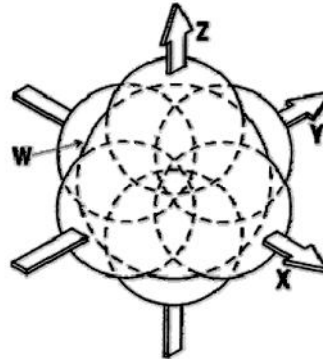


Fig. 7.5 - Gli armonici sferici e gli assi del sistema B-format

La loro combinazione consente la creazione di un nuovo microfono virtuale corrispondente a un'armonica sferica semplice o complessa del primo ordine che punta in una direzione qualsiasi, ottenuta semplicemente sommando vettorialmente le tre componenti, secondo i coseni direttori della direzione considerata. Questi tre segnali corrispondono a tre armoniche sferiche semplici del primo ordine, orientate a 90° le une in rapporto alle altre, mentre il segnale W rappresenta un'armonica sferica di ordine zero.

I tre assi considerati sono orientati nella maniera seguente (Fig. 7.6):

- “X” punta avanti,
- “Y” punta verso sinistra,
- “Z” punta verso l'alto.

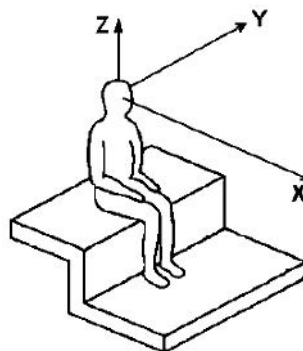


Fig. 7.6 - Sistema di riferimento cartesiano per misure B-format

Le misurazioni di risposta all'impulso di tipo B-format, così importanti per determinare le caratteristiche tridimensionali del campo acustico, possono esse effettuate esclusivamente con un microfono A-format, ossia con il microfono Soundfield (Fig. 7.7).



Fig. 7.7 - Montaggio tetraedrico a quattro capsule del microfono Soundfield

Come si può vedere nella Fig. 7.7, i microfoni di tipo Soundfield sono costituiti da quattro capsule sub-cardioidi o cardioidi disposte come se fossero i lati di un tetraedro regolare. L'uscita a 4 canali di questo microfono è in A-format.

Il microfono Soundfield MK V costituisce il primo prototipo di microfono tridimensionale utilizzato in acustica architettonica. In esso il segnale A-format è inviato a un'unità di controllo per essere preamplificato. In seguito, viene convertito in B-format e corretto nelle sue irregolarità di frequenza. Il segnale B-format può essere successivamente modificato, sia al momento dell'acquisizione, sia nella post produzione. Le modifiche possibili, ottenute agendo su azimuth, elevation e dominance, permettono complete rotazioni virtuali del microfono in orizzontale (assi X e Y), nel piano meridiano (assi X e Z), e nel fronte sonoro (distorsione frontale o posteriore). In sostanza risulta possibile orientare virtualmente il microfono nello spazio, analizzare le componenti del campo acustico provenienti da direzioni particolari, od effettuare operazioni tra varie componenti laterali (ad esempio calcolare la frazione laterale, LF). In realtà oggi esistono altri sistemi analoghi, seppure con diverse sfumature nella realizzazione delle componenti elettroniche, pertanto è più corretto parlare del Soundfield come tipo o tecnica di registrazione, piuttosto che come modello di una compagnia in particolare.

7.5. Tecniche di misura della risposta all'impulso

7.5.1. Segnale impulsivo

Un metodo di misura della risposta all'impulso di un sistema acustico è quella di fornire mediante un impianto meccano-acustico o elettro-acustico una perfetta δ di Dirac al sistema. Questo metodo, seppure semplicissimo concettualmente, è di difficile attuazione pratica: infatti l'impulso dovrà superare di alcune decine di dB il rumore di fondo della sala e avere la durata di pochissimi intervalli di campionamento (che sarà, a seconda dei casi, di 44.1, 48 o 96 KHz, a seconda della scheda di campionamento). I modi per ottenere una risposta all'impulso con metodo impulsivo saranno dunque l'applicazione di una δ di Dirac a un sistema amplificatore-diffusore, che soffre dello svantaggio di non consentire un buon livello sonoro e di introdurre una distorsione del segnale causata dal diffusore, oppure l'utilizzo del forte rumore causato da un'esplosione: nella fattispecie si usa lo scoppio di un palloncino, una scintilla elettrica, oppure lo sparo di una pistola caricata a salve, con uno spettro possibilmente piatto, cosa che non sempre è possibile e controllabile. Inoltre questa tecnica soffre del problema che il suono diretto non è una vera δ di Dirac ma si protrae nel tempo a diverse decine di tempi di campionamento.

Per tutte queste ragioni le tecniche di misura con segnale impulsivo sono oggi usate raramente.

7.5.2. Segnale MLS

Il segnale MLS (Maximum Length Sequence) è una sequenza pseudo-casuale di valori binari ed ha delle caratteristiche peculiari: per quanto deterministico, esso ha spettro praticamente piatto (per questo è detto pseudo-casuale) (Fig. 7.8); inoltre il suo periodo dipende soltanto dalla lunghezza dello shift-register, in quanto il valore iniziale dello shift-register si ripresenterà soltanto dopo $2^n - 1$ valori (in acustica si utilizzano spesso i 16 bit, corrispondenti a 65535 campioni).

Un ulteriore vantaggio del segnale MLS consiste nella semplice determinazione dell'inversa MLS^{-1} , ottenibile semplicemente usando lo stesso segnale ribaltato sull'asse dei tempi, e, come detto, composto soltanto da 0 e 1: ciò rende la deconvoluzione del segnale immediata, in quanto si riduce a delle semplici somme. Quest'ultimo vantaggio è stato ritenuto di non poco conto fino a qualche anno fa, quando la potenza dei calcolatori in commercio era molto inferiore rispetto a quella attuale; infatti sono state messe in commercio apparecchiature che implementavano lo shift-register via hardware e corredate di un software particolarmente efficace chiamato MLSSA.

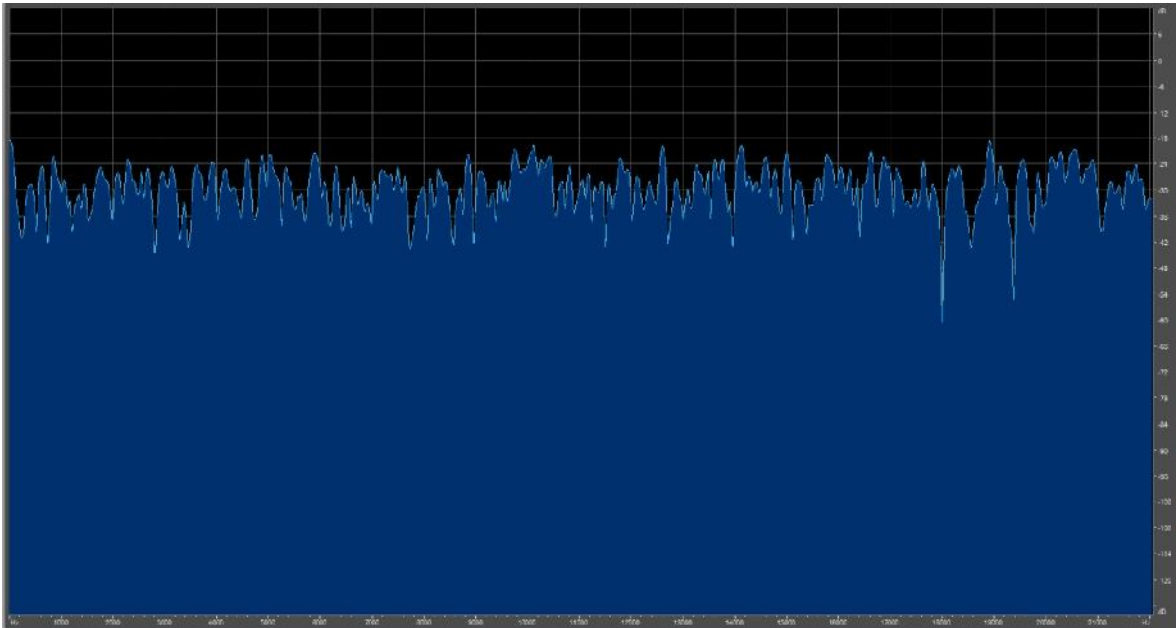


Fig. 7.8 – Analisi in frequenza di un segnale MLS: lo spettro è piatto a tutte le frequenze per tutta la lunghezza del segnale

Il difetto di questo sistema è l'estrema sensibilità a fenomeni di distorsione non lineare presenti nei trasduttori, che comportano a volte la creazione di picchi spuri che appaiono come echi in realtà inesistenti (Fig.7.9). Ciò rende la tecnica MLS soggetta a distorsioni nella valutazione dei parametri acustici e nella auralizzazione di segnali.

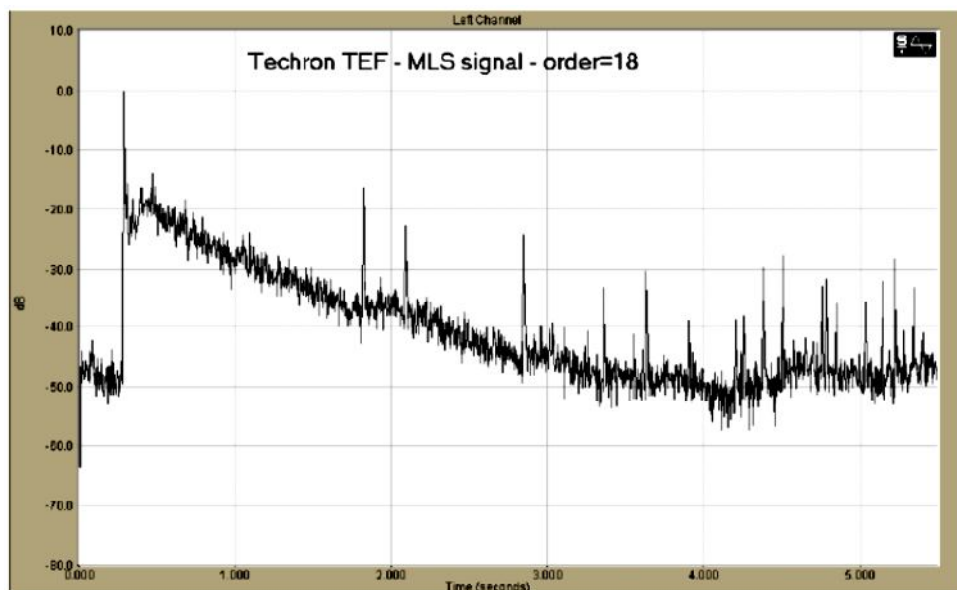


Fig. 7.9 - Risposta all'impulso sperimentale ottenuta con tecnica MLS con la comparsa di echi fittizi dovuti alle non linearità

7.5.3 Segnale di sine sweep

Un ulteriore metodo per la stima della risposta all'impulso di un sistema lineare tempo-invariante è quello di sottoporlo a un segnale sinusoidale, la cui frequenza vari nel tempo, del tipo $x(t) = A \sin(\omega t)$, con $\omega = \omega(t)$.

Il vantaggio principale del nuovo sistema di misura è la sua capacità di dividere la componente lineare da quelle di distorsione armonica, in quanto se il sistema sottoposto ad analisi a una data frequenza risponderà con la presenza di armoniche superiori, sarà evidente che esse provengono appunto da fenomeni non-lineari. In genere il segnale di sine sweep viene utilizzato con $\omega(t)$ che varia con legge lineare o esponenziale nello spettro dell'udibile umano: tra le due soluzioni la preferita è senza dubbio la seconda, in quanto si sofferma molto sulle basse e medie frequenze, "spazzando" velocemente quelle alte.

Sweep lineare.

Nel caso la generazione del segnale sinusoidale abbia variazione lineare della frequenza nel tempo, i segnali sweep corrispondenti vengono chiamati lineari. L'andamento della forma d'onda così definita può essere facilmente rappresentata in un diagramma tempo-frequenza, come in Fig. 7.10:

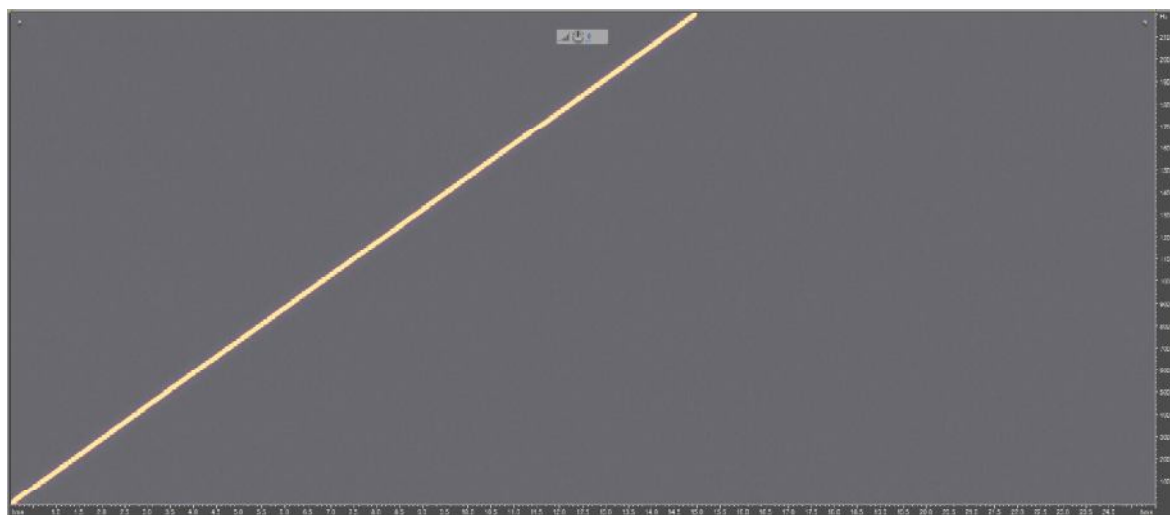


Fig. 7.10 - Spettrogramma di un sine sweep lineare e sua funzione inversa (scala di frequenze lineare)

Applichiamo il segnale sweep lineare appena descritto come segnale x in ingresso ad un sistema elettroacustico, costituito principalmente dai trasduttori elettronici. Per effettuare questa sperimentazione è sufficiente svolgere la misurazione in un ambiente semi-

anecoico collocando il microfono molto vicino all'altoparlante, o addirittura cortocircuitando input e output dell'apparato di misura. In uscita dal sistema si otterrà un segnale y , evidenziato in Fig. 7.11. Esso sarà stato modificato dalle caratteristiche del sistema acustico, caratterizzato dalla fondamentale dalla componente elettronica e quindi distorto dalle caratteristiche non lineari del sistema elettronico, in particolare dall'altoparlante utilizzato per la diffusione del segnale.

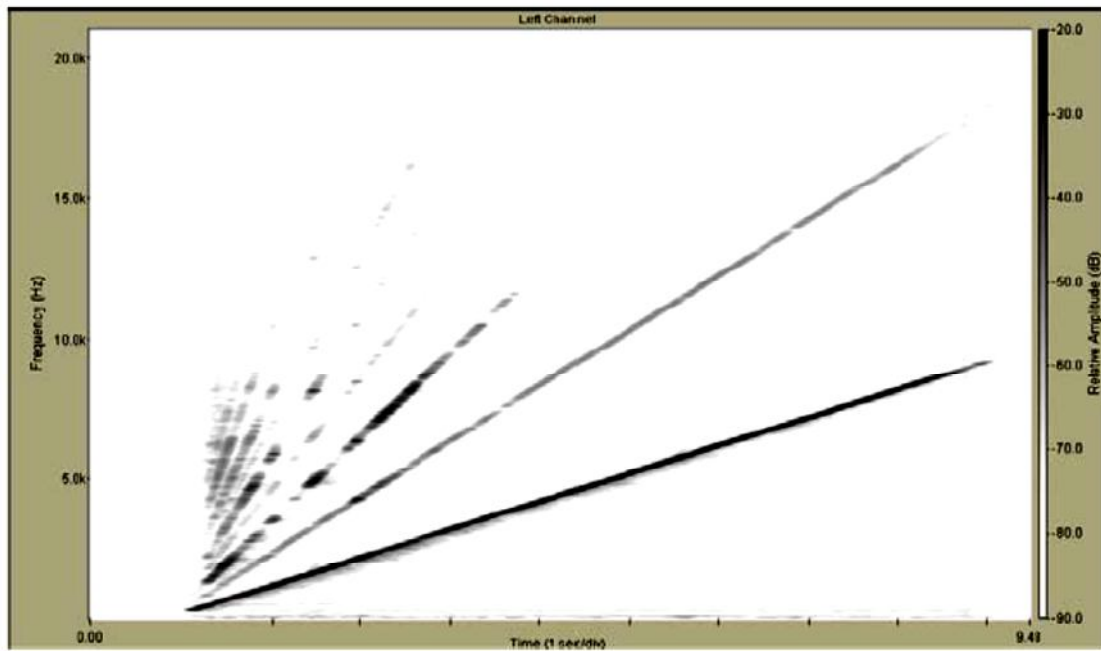


Fig. 7.11 - Segnale sweep lineare in uscita dal sistema elettroacustico

Per procedere con la misurazione sarà necessario determinare il corrispondente “filtro inverso”, ossia il segnale x^{-1} , che nel caso dello sweep lineare sarà costituito da una forma d'onda sinusoidale con frequenza decrescente linearmente nel tempo, rappresentata in Fig. 7.12, ottenuta ribaltando il segnale x lungo l'asse del tempo.

Effettuando quindi la convoluzione tra segnale in uscita y e filtro inverso x^{-1} si ottiene la risposta all'impulso del sistema elettroacustico. Come si può notare è possibile separare i contributi del sistema acustico, caratterizzato da una risposta all'impulso lineare, molto netta, dalle componenti non lineari dovute alle distorsioni indotte dalla catena di misura (Fig. 7.13). In particolare, la risposta all'impulso del sistema acustico è costituita dall'ultimo impulso più a destra, dacché il sistema era costituito prevalentemente dalla catena di misura impiegata.

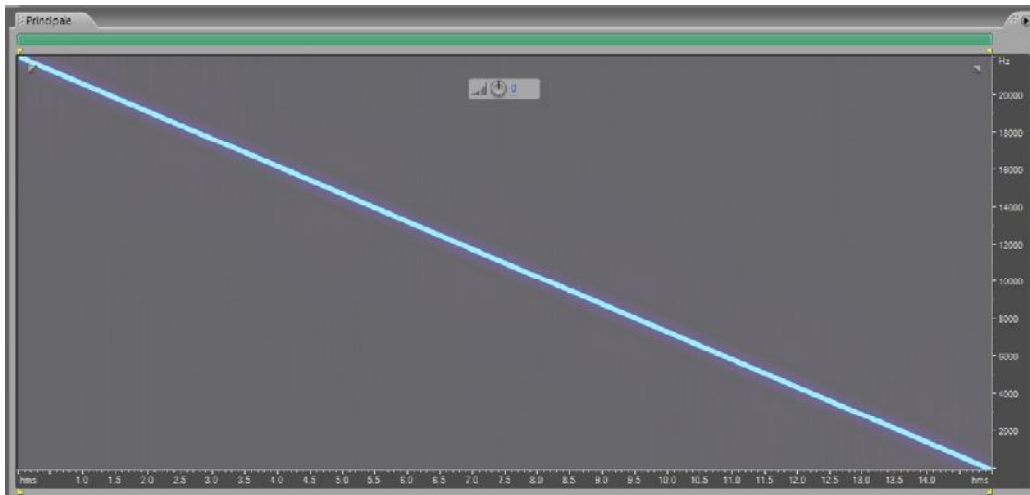


Fig. 7.12 - Filtro inverso o segnale x^{-1} corrispondente ad uno sweep lineare

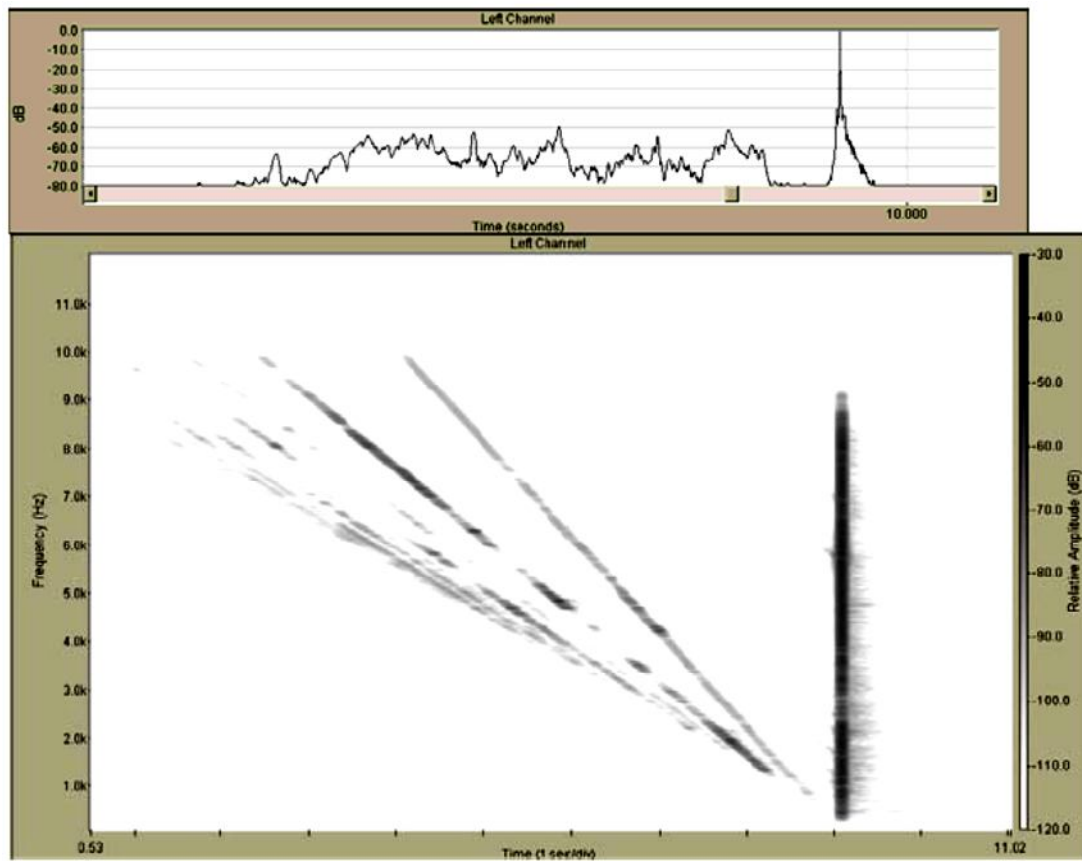


Fig. 7.13 - Risposta all'impulso nei domini del tempo (sopra) e nel piano tempo-frequenza (sotto) ottenuta da un segnale sweep lineare

Il segnale sweep lineare consente quindi la separazione dei due contributi, ossia ha fornito la risposta all'impulso del sistema separando effetti non lineari dei trasduttori elettronici (Farina, 2000).

Sweep esponenziale.

Un risultato ancora migliore è ottenibile con l'utilizzo di un segnale sweep esponenziale, rappresentato in Fig. 7.14, nel quale la crescita della frequenza corrispondente alla forma d'onda sinusoidale si sviluppa esponenzialmente con il trascorrere del tempo. In tale maniera la velocità con cui aumenta la frequenza percepita dal segnale sweep risulta costante su un asse logaritmico. In altre parole, la frequenza varia nel tempo per ottave, ossia al raddoppio dell'intervallo di tempo la frequenza diventa doppia. Si tratta quindi di un segnale molto più vicino alla normale pratica musicale rispetto allo sweep lineare.

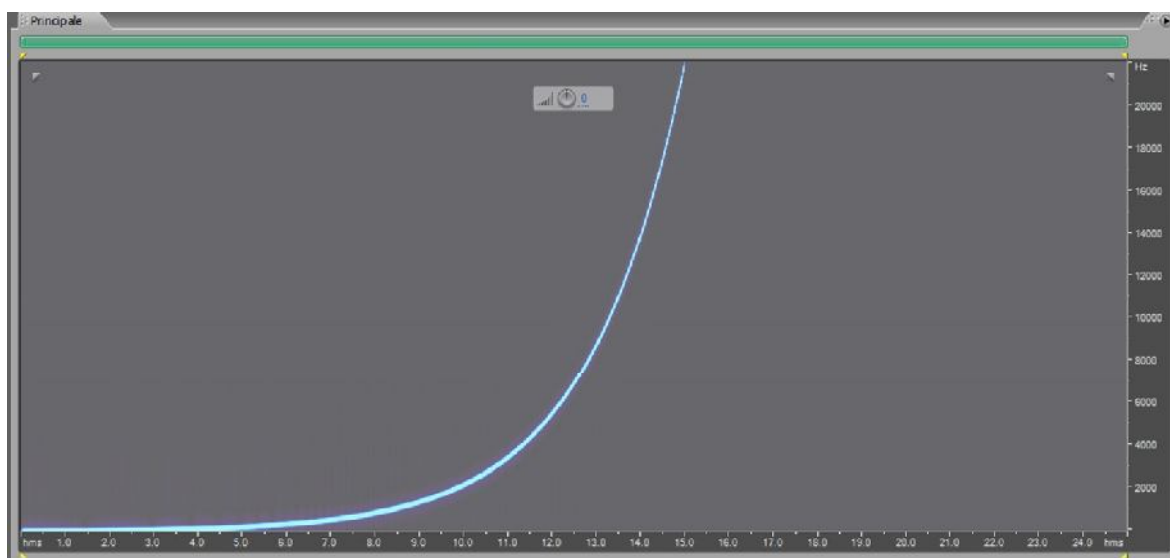


Fig. 7.14 - Rappresentazione nel dominio tempo-frequenza di un segnale sweep esponenziale

In questo caso, la risposta del sistema elettroacustico, ossia il segnale y , assume un andamento diverso dal caso dello sweep lineare. Osservando la Fig. 7.21 si nota che le distorsioni armoniche prodotte dalle componenti elettroniche mantengono la stessa pendenza sul piano tempo-frequenza (quest'ultima su scala logaritmica) del segnale di ingresso.

Se infatti consideriamo un sistema schematizzato a "black box" come in Fig. 7.15:

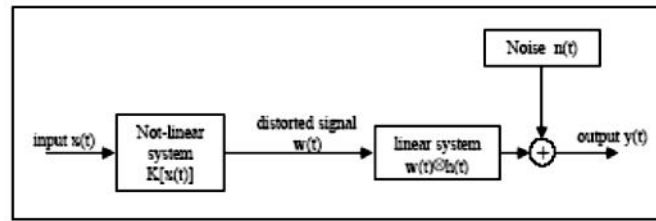


Fig. 7.15 - Flow chart di un segnale immesso in una sala

vediamo come il segnale passi attraverso un sistema non-lineare e tempo invariante (che nel nostro caso sarà il sistema elettro-acustico) e quindi, distorto, venga immesso nel sistema lineare e tempo-invariante (la sala); ad esso viene aggiunto del rumore e quindi viene presentato come uscita (si noti che la distorsione non-lineare del microfono è compresa nella parte di distorsione non-lineare iniziale). Trascurando il rumore è possibile sviluppare la risposta di un sistema non lineare.

Dunque immettendo il segnale nel sistema e registrando l'uscita $y(t)$, quest'ultima conterrà il segnale di sine sweep trasformato, con la distorsione armonica ben evidente nello spettrogramma. Ad esempio in Fig. 7.16 è rappresentato lo spettrogramma del segnale registrato con un semplice corto ingresso-uscita di un computer portatile, in cui l'ingresso è rappresentato dal segnale di sine sweep e la distorsione in uscita è causata dalla sola elettronica del sistema.

Nel caso del segnale sweep esponenziale il filtro inverso da utilizzare per la deconvoluzione, costituito dal segnale di test originario ribaltato lungo l'asse dei tempi, deve essere modificato. Infatti, il solo ribaltamento nell'asse dei tempi opererebbe un pesante filtraggio della risposta in frequenza misurata, in quanto già di per sé il segnale di test a sweep esponenziale possiede uno spettro che non è piatto, ossia simile ad un rumore bianco. Esso ha invece uno spettro rosa, cioè un spettro il cui livello sonoro decresce proporzionalmente con la frequenza, con pendenza pari a 3 dB/ottava. Il corrispondente «filtro inverso», pertanto, deve contenere uno spettro in grado di compensare l'andamento del segnale di ingresso. Tale compensazione si ottiene applicando un filtraggio delle ampiezze con pendenza positiva di 6 dB/ottava. Normalmente tale filtraggio viene effettuato direttamente durante la generazione del filtro inverso. A seguito del ribaltamento nell'asse dei tempi, visibile in Fig. 7.17, tale filtraggio appare visivamente come una diminuzione delle ampiezze alle basse frequenze.

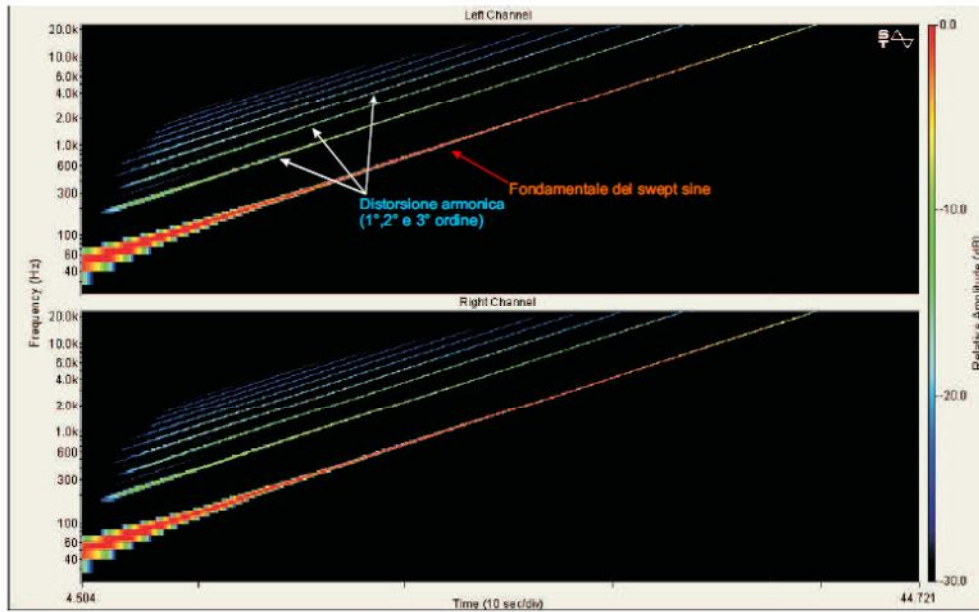


Fig. 7.16 - Spettrogramma della distorsione di un sistema

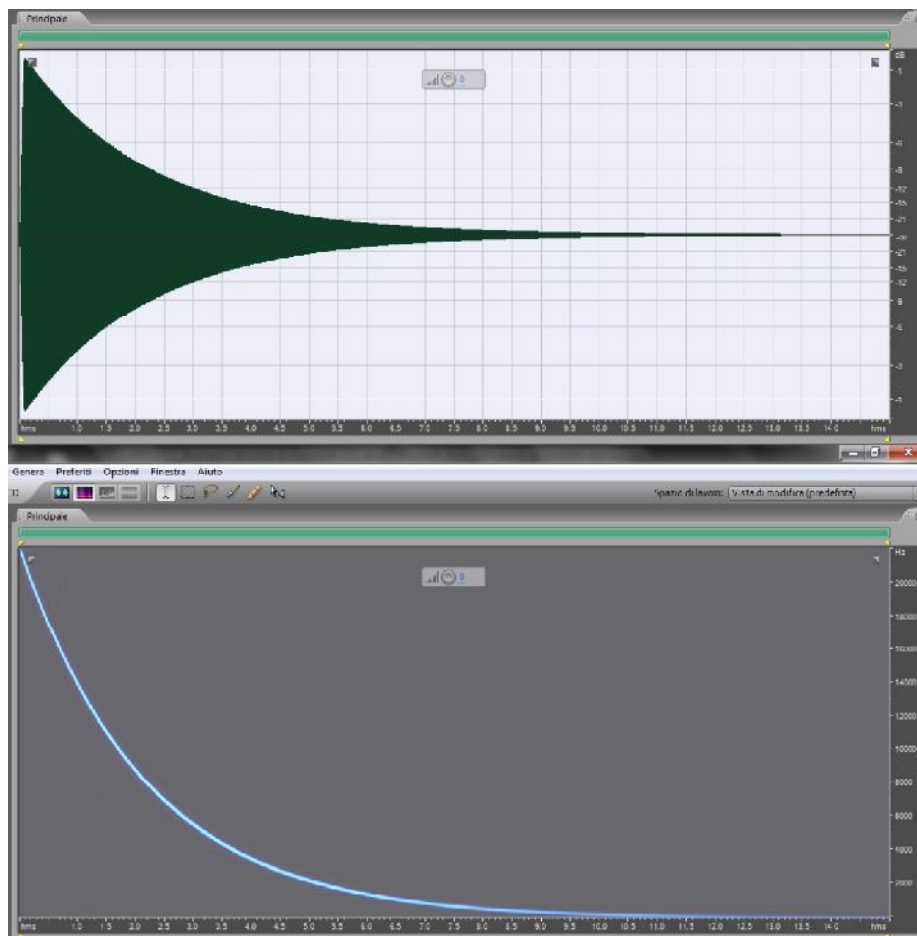


Fig. 7.17 - Filtro inverso corrispondente al segnale sweep esponenziale: diagramma nel dominio del tempo (sopra) e nel piano tempo-frequenza (sotto)

Analogamente a quanto riscontrato per il segnale sweep lineare, dal prodotto di convoluzione tra il segnale in uscita y e filtro inverso x^{-1} si ottiene la risposta all'impulso del sistema elettroacustico. I vari contributi di risposte all'impulso non lineari, ciascuna delle quali deriva dall'accumulazione della risposta ad un preciso ordine armonico, anticipano la risposta all'impulso del sistema acustico. Nella Fig. 7.18, tale separazione è chiaramente percepibile, sia nel dominio del tempo, sia sul piano tempo-frequenza.

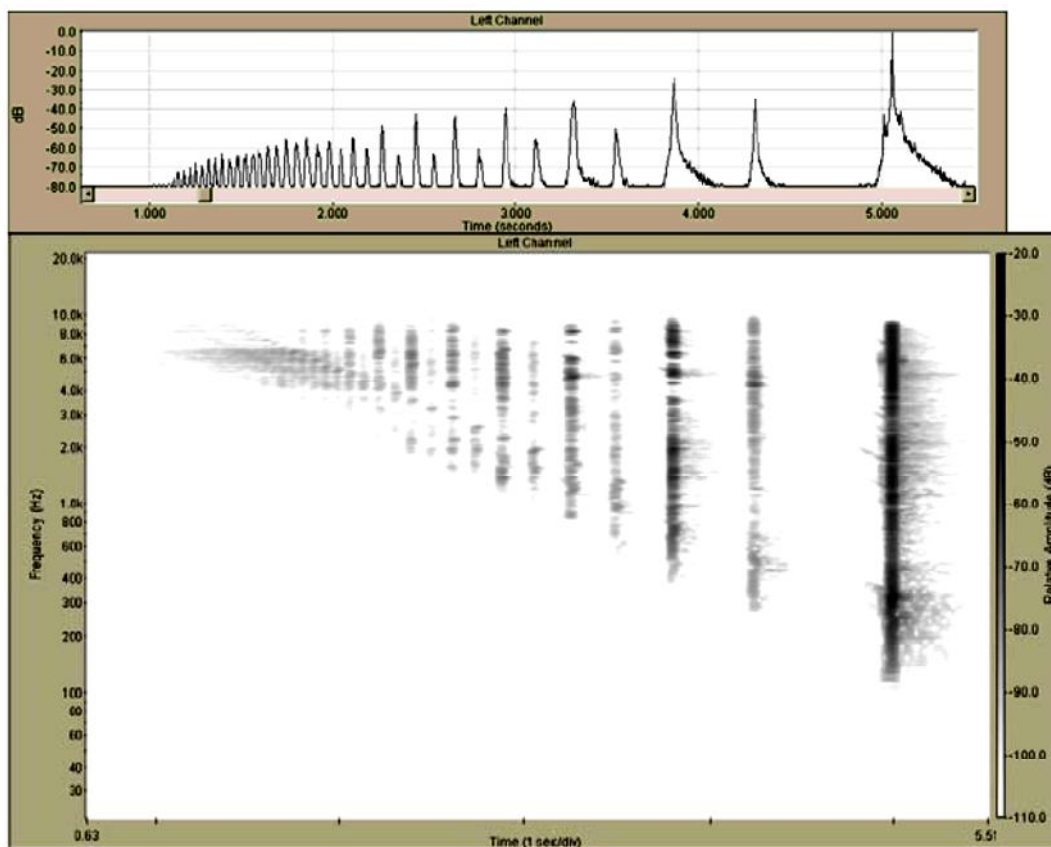


Fig. 7.18 - Risposta all'impulso nei domini del tempo (sopra) e nel piano tempo-frequenza (sotto) ottenuta da un segnale sweep esponenziale

La risposta all'impulso lineare, corrispondente al sistema acustico oggetto della misurazione, è collocata sulla destra dei diagrammi, e preceduta dall'insieme delle distorsioni armoniche indotte dalla catena di misurazione. Nel diagramma corrispondente al dominio del tempo, rappresentato dalla Fig. 7.18 (sopra) essa è costituita dall'ultimo picco a destra, più alto degli altri; gli impulsi precedenti, da destra verso sinistra, costituiscono le varie distorsioni armoniche, a partire dalla distorsione del 2° ordine, a seguire. Nella Fig. 7.18 (sotto) si può apprezzare il contributo in frequenza corrispondente sia alla risposta all'impulso del sistema acustico, sia delle varie distorsioni corrispondenti. La misurazione

effettuata con sweep di tipo esponenziale consente non solo di estrarre la risposta all'impulso lineare, corrispondente al sistema acustico, priva di qualsiasi artefatto causato dalle eventuali distorsioni nei trasduttori, ma anche di misurare la risposta non lineare del sistema, quantificando la risposta all'impulso di ciascun ordine armonico.

Confrontando la Fig. 7.19, che rappresenta la misurazione di risposta all'impulso effettuata in un teatro, con l'analoga misurazione effettuata con la tecnica MLS, riportata precedentemente, si nota facilmente il maggior rapporto segnale-rumore ottenuto con il segnale sweep esponenziale, e la totale assenza di distorsioni armoniche presenti nella misura MLS.

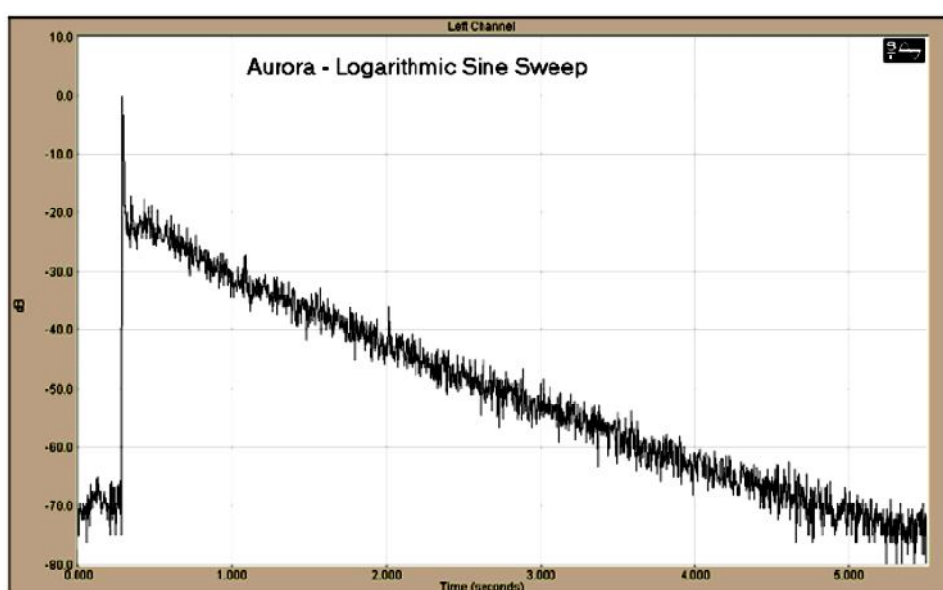


Fig. 7.19 - Misura con segnale sweep esponenziale di risposta all'impulso

Lo sweep esponenziale è, al giorno d'oggi, la tecnica più efficace per analizzare l'acustica di un ambiente in quanto possiede alcune proprietà matematiche particolarmente utili. In primis si può verificare che un segnale sweep x convoluto con la versione di se stesso ribaltata sull'asse del tempo x^l (vale a dire x letto dal ultimo campione al primo), dà come risultato una δ di Dirac (Fig. 7.20). Ciò vale a dire che nel momento in cui io utilizzo uno sweep come segnale di misura e applico la convoluzione tra l'uscita del mio sistema e il segnale sweep ribaltato rispetto all'asse tempo, ottengo la risposta all'impulso del sistema stesso.

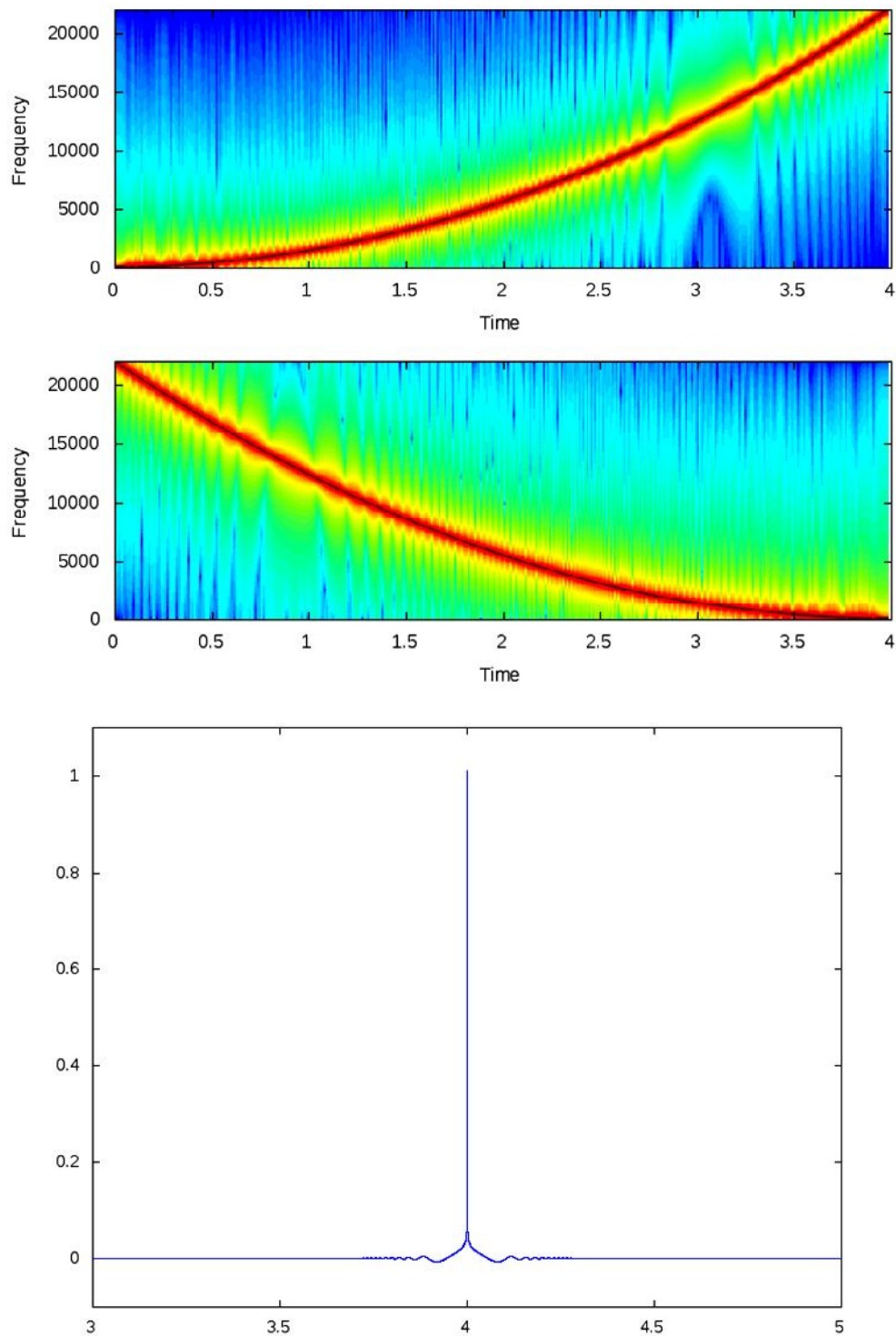


Fig. 7.20 - Sopra, due segnali: uno sweep esponenziale e la sua versione rovesciata nel tempo; sotto, l'impulso risultante dalla convoluzione dei due segnali

In secondo luogo, se si usa uno sweep esponenziale, questo non avrà uno spettro piatto, bensì come detto simile ad un rumore rosa (quindi calante di 3 dB per ottava), in quanto l'andamento esponenziale procede più lentamente alle basse frequenze e veloce-

mente alle alte. Questa distribuzione dell'energia nello spettro risulta migliore perché rispecchia maggiormente la sensibilità dell'orecchio umano ed inoltre richiede uno sforzo minore da parte delle componenti dei diffusori.

7.6. Strumentazione utilizzata

Le rilevazioni sono state effettuate utilizzando un sistema di diffusione dodecaedrico, composto da una cassa con speaker in posizione dodecaedrica, allo scopo di avere un'emissione il più possibile uniforme sull'intero angolo solido (Fig. 7.21).



Fig. 7.21 – Sorgente sonora dodecaedrica utilizzata

I rilevatori utilizzati in questa sede sono stati:

- un registratore digitale “A-format” a 4 canali, corredato di apposito software “Brahmavolver” per la conversione dei segnali registrati in formato B-format (tipo Ambisonics). Questo permette, mediante somme e sottrazioni nel tempo del segnale, di ottenere un segnale W , che si comporta da rilevatore di pressione e quindi funge da microfono omnidirezionale, e i tre segnali X, Y, Z (con X diretto verso il palco, Y verso i lati della sala e Z verso l'alto) che rappresentano rilevatori di velocità con figura direzionale a forma di 8 lungo le tre direzioni degli assi cartesiani. L'insieme di questi segnali forma il segnale B-format. Conoscendo le risposte all'impulso nelle direzioni degli

assi cartesiani, è possibile ottenere le risposte all'impulso in qualunque direzione sull'intero angolo solido mediante semplici calcoli vettoriali, e dunque ottenere un microfono virtuale con direzionalità a piacere (Fig. 7.22);



Fig. 7.22 – Registratore digitale “A-format” a 4 canali

- fonometro bicanale 01 dB Stell, modello Symphonie (n° di serie 1502, classe 1 IEC 651, IEC 61672-1 del 2002, IEC 60651, IEC 60804, IEC 61260 e IEC 61094-4) con:
 - canale 1 microfono cardiode 01 dB Stell, modello MCE212, n° di serie 18523; preamplificatore 01 dB Stell, modello PRE 12H, n° di serie 011232 (certificato di taratura n° 042 del 20/07/2011 rilasciato dal centro LAT n. 221);
 - canale 2 microfono cardiode 01 dB Stell, modello MCE212, n° di serie 20824; preamplificatore 01 dB Stell, modello PRE 12H, n° di serie 011234 (certificato di taratura n° 043 del 20/07/2011 rilasciato dal centro LAT n. 221);
- calibratore acustico Bruel & Kjaer, modello 4231, n° di serie 2147310, classe 1 IEC 942, IEC 60942 del 1988 (certificato di taratura n° 044 del 20/07/2011 rilasciato dal centro LAT n. 221);
- una testa artificiale binaurale Sennheiser MKE 2002, con all'interno due microfoni simili a quelli precedentemente descritti, con padiglioni inclusi (Fig. 7.23). La sua funzione è quella di simulare al meglio la funzione di trasferimento della testa, la quale allo scopo è costruita con materiali che hanno la stessa impedenza acustica di una testa umana reale.



Fig. 7.23 – Testa artificiale binaurale Sennheiser MKE 2002

La scheda audio utilizzata è una Roland UA - 1010, dotata di 8 ingressi e facilmente accessibile tramite un pannello di controllo software. L'amplificatore integrato utilizzato è un Luxman A-371 (90 Watt).

7.7. Software di misurazione e di acquisizione dei dati

L'acquisizione dei segnali in ingresso è stata effettuata con due diversi software. Per la registrazione delle misure con i 2 rilevatori a cardioide è stato utilizzato il software dBTRIG, della Suite 01dB Metravib. Adobe Audition, invece, è stato usato per l'acquisizione del segnale proveniente dalla testa artificiale.

Per l'analisi delle misure effettuate sono stati utilizzati diversi software, ognuno con una sua specifica utilità. Principalmente però, per elaborare le misure ed estrapolarne i dati utili, è stata usata una suite chiamata Aurora, perfezionata nel corso degli anni dal professor Angelo Farina, docente dell'Università degli Studi di Parma. La suite Aurora comprende una serie di plugin dedicati alle misurazioni acustiche e scritti per essere utilizzati con il software Adobe Audition (pertanto tutte le operazioni di analisi sono state effettuate in ambiente Windows). Ognuno di questi plugin svolge delle operazioni specifiche sui file da analizzare come convoluzioni, analisi degli impulsi, generazione di segnali di test come MLS e sweep, analisi di risposte binaurali ecc. Nel particolare, i plugin che sono stati utilizzati per analizzare le misure fatte sono:

1. Acoustical Parameter v4.3;
2. Convolve with clipboard.

Il primo di questo due plugin è un software che permette il calcolo dei vari parametri indicati nella norma ISO33827 a partire dall'analisi di un impulso. Una volta che si è selezionato l'impulso da analizzare, il software procede con il calcolo dei vari parametri. Questi vengono valutati secondo le modalità indicate nella ISO33827: la risposta all'impulso viene filtrata a bande di ottava all'interno di un range che va da 31 Hz a 16 kHz, elevata al quadrato e poi computata. Infine il software restituisce una finestra dove sono indicati tutti i valori ricercati, con la possibilità di visualizzare due tipologie di grafici diversi (Fig. 7.24): una che mostra il decadimento della risposta all'impulso nel tempo, con possibilità di visualizzarlo per ogni banda e con indicato in blu l'andamento secondo l'integrale di Schröder; un'altra che invece mostra i valori del parametro selezionato su di uno spettro diviso a bande di ottava (Fig. 7.25). Ultimo e interessante particolare di questo plugin è che permette di esportare tutti i valori calcolati in formato di testo così da poterli inserire in fogli di calcolo, per un'organizzazione più agevole e basata sulle proprie esigenze (Fig. 7.26).

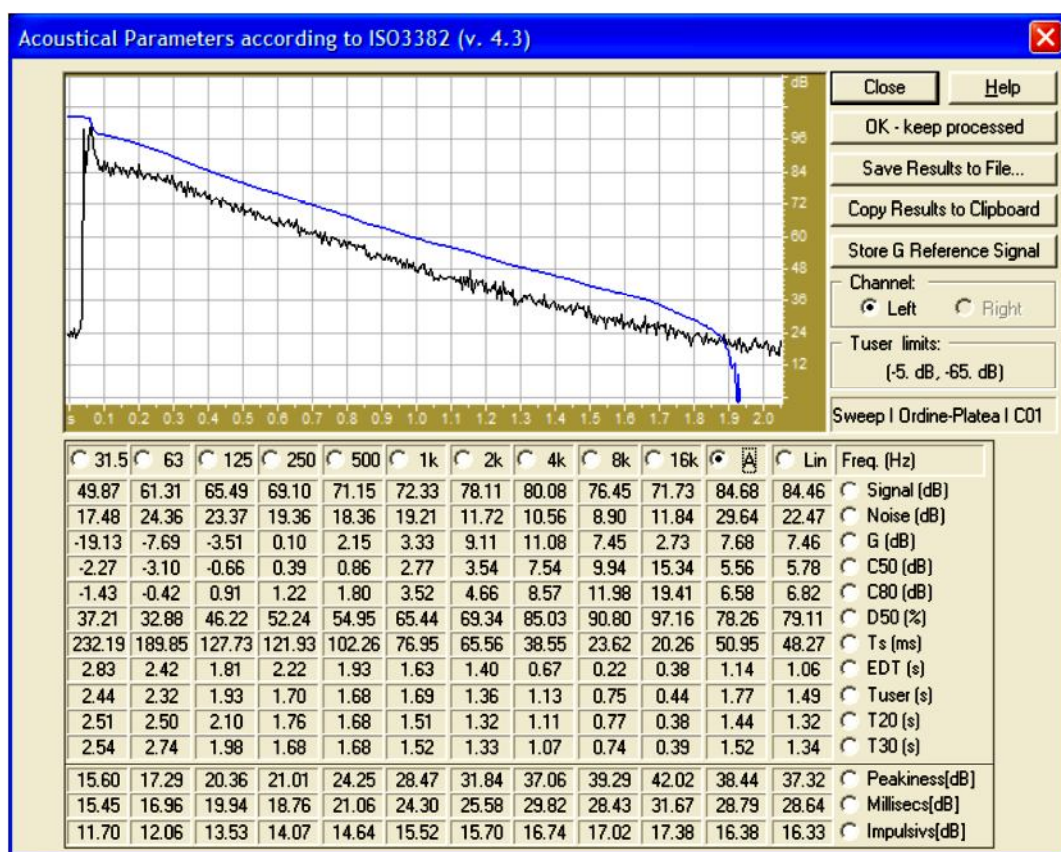


Fig. 7.24 - Finestra dei risultati del plugin Acoustical Parameter v 4.3: grafico di decadimento della risposta all'impulso

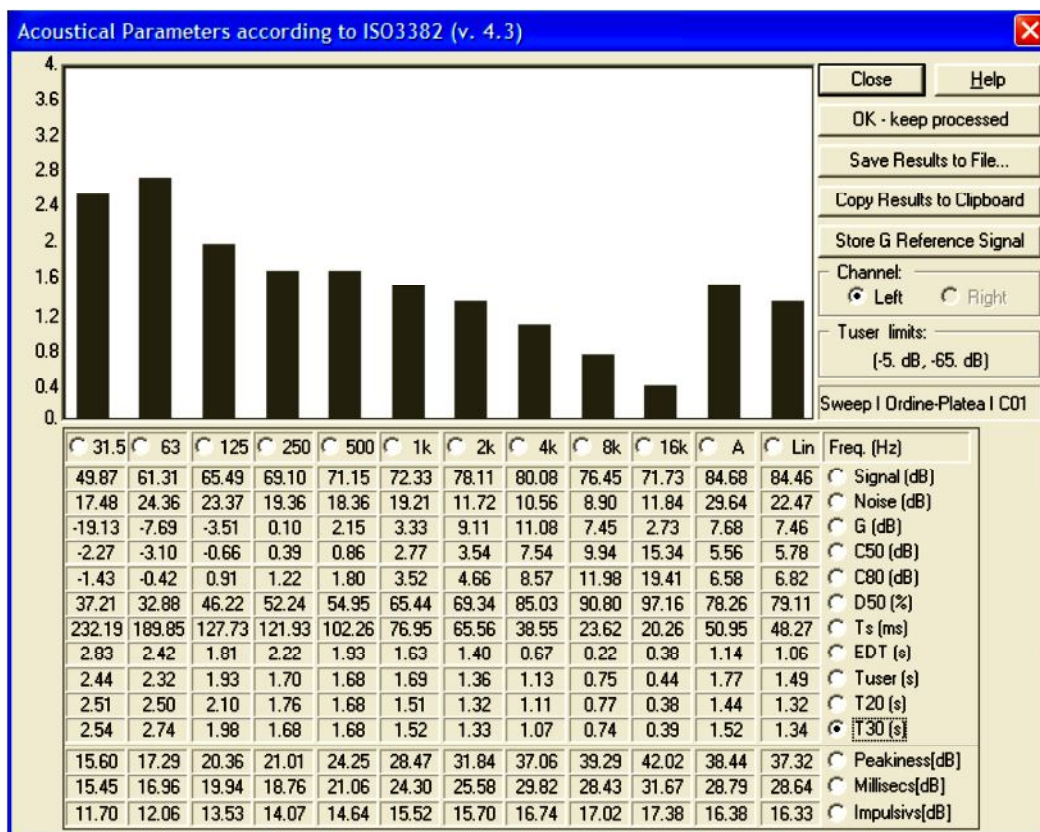


Fig. 7.25 - Finestra dei risultati del plugin Acoustical Parameter v 4.3: grafico per bande di ottava del valore T_{30}

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	ISO 3382 OCTAVE BAND ACOUSTICAL PARAMETERS											
2	Filename	Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
3	Sweep I Ordine-Platea I C01	Signal [dB]	49.87	61.32	65.49	69.1	71.15	72.33	78.11	80.08	76.45	71.73
4		Noise [dB]	17.48	24.36	23.38	19.36	18.36	19.21	11.72	10.56	8.9	11.84
5		strenGth [dB]	-19.13	-7.69	-3.51	0.1	2.15	3.33	9.11	11.08	7.45	2.73
6		C50 [dB]	-2.27	-3.1	-0.66	0.39	0.86	2.77	3.54	7.54	9.94	15.34
7		C80 [dB]	-1.43	-0.42	0.91	1.22	1.8	3.52	4.66	8.58	11.98	19.41
8		D50 [%]	37.21	32.88	46.22	52.24	54.95	65.44	69.34	85.03	90.8	97.16
9		ts [ms]	232.19	189.85	127.73	121.93	102.26	76.95	65.56	38.55	23.62	20.26
10		EDT [s]	2.83	2.42	1.81	2.22	1.93	1.63	1.4	0.67	0.22	0.39
11	RTU = RT User (-5. dB, -65. dB)	Tuser [s]	2.44	2.32	1.93	1.7	1.68	1.69	1.36	1.13	0.75	0.44
12		T20 [s]	2.51	2.5	2.11	1.76	1.68	1.52	1.32	1.11	0.77	0.38
13		T30 [s]	2.54	2.74	1.98	1.68	1.68	1.52	1.33	1.07	0.74	0.39
14		Peakiness[dB]	15.6	17.29	20.36	21.01	24.25	28.47	31.84	37.06	39.29	42.02
15		Millisecs[dB]	15.45	16.96	19.94	18.76	21.06	24.3	25.58	29.82	28.43	31.67
16		Impulsivs[dB]	11.7	12.06	13.53	14.07	14.64	15.52	15.7	16.74	17.02	17.38

Fig. 7.26 - Risultati ottenuti dal plugin Acoustical Parameter v 4.3 esportati in un foglio di calcolo

Il secondo plugin impiegato invece svolge l'operazione di convoluzione tra due segnali. Il primo segnale, quello "con cui" si vuole convolvere, deve essere presente nella clipboard di Windows. Per procedere con l'operazione, si seleziona il segnale "che" si vuole convolvere (lo sweep registrato in auditorium) e si avvia il plugin. Una volta che il processo viene completato il plugin restituisce un nuovo file con all'interno l'impulso risultante dall'operazione (Fig. 7.27).

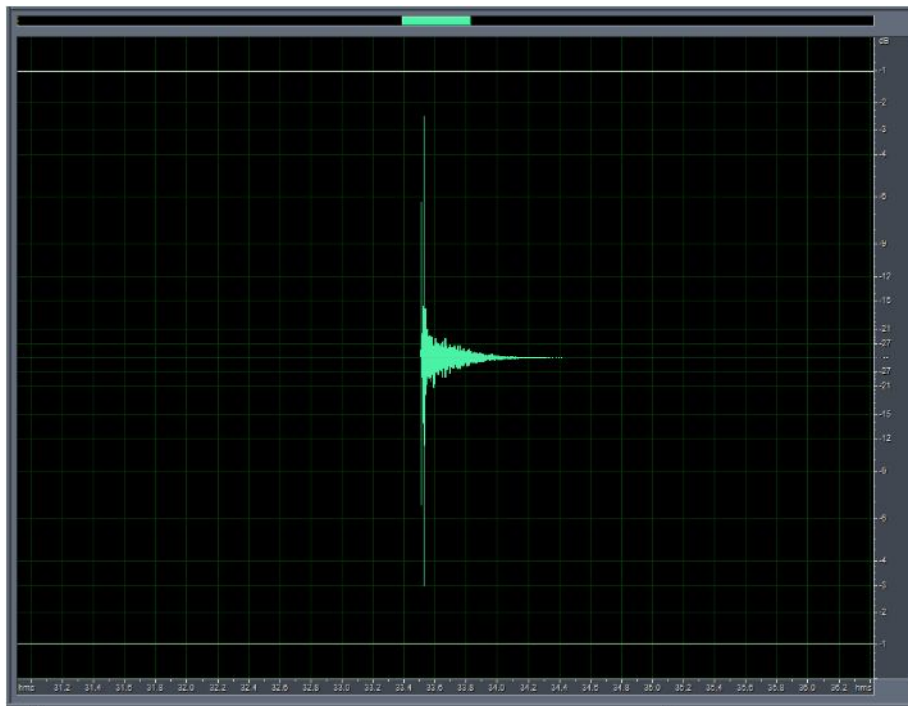


Fig. 7.27 - Impulso risultante dalla convoluzione di uno sweep e della sua versione rovesciata nel tempo tramite il plugin Convolve with clipboard

Per ottenere i valori dei parametri binaurali si segue lo stesso procedimento, partendo dai segnali registrati con la sonda antropomorfa (Fig. 7.28).



Fig. 7.28 - Impulso binaurale risultante dalla convoluzione di uno sweep e della sua versione rovesciata nel tempo tramite il plugin Convolve with clipboard

Si noti come lo sweep inverso, in questo caso, possa essere anche un segnale monoaurale: il software automaticamente lo convolverà con entrambi gli impulsi binaurali.

CAPITOLO 8 – LA SIMULAZIONE DEL CAMPO SONORO

8.1. Introduzione

In un luogo aperto la perturbazione sonora che è soluzione dell'equazione d'onda determina la formazione di semplici fronti d'onda piani, mentre in un luogo chiuso l'impatto ripetuto dei fronti d'onda con mezzi materiali diversi dall'aria genera fenomeni di riflessione, di diffrazione, di interferenza etc... A causa di queste condizioni al contorno, che impediscono di ottenere una soluzione esatta, la descrizione analitica del campo sonoro in un ambiente chiuso risulta particolarmente complessa.

Considerando l'intervallo spettrale dei suoni percepiti dall'uomo in un range di frequenza tra i 20 Hz e i 20 KHz (corrispondenti ad un intervallo di lunghezze d'onda all'incirca tra i 17 m e 17 mm) si vede come la soluzione analitica del campo sonoro in un ambiente come una sala da concerto sia praticamente impossibile. Per questo è necessario ricorrere a delle approssimazioni che tengano conto dell'ambiente che stiamo considerando.

Se le dimensioni dell'ambiente sono molto maggiori delle lunghezze d'onda in gioco allora possiamo approssimare le onde sonore ai soli fronti d'onda trascurando la loro fase, e quindi trascurando fenomeni di interferenza.

Similmente all'ottica, quest'approssimazione è detta di acustica geometrica.

Se al contrario le dimensioni dell'ambiente sono confrontabili con le lunghezze d'onda in gioco non possiamo non considerare le caratteristiche ondulatorie del campo sonoro. Tra le tecniche numeriche che rendono possibile un calcolo approssimato del campo sonoro in piccoli ambienti ricordiamo il metodo degli elementi finiti (Finite Elements Method, FEM) e il metodo degli elementi di contorno (Boundary Element Method, BEM).

Il FEM è un metodo numerico di approssimazione dell'equazione delle onde e consiste nella divisione dell'ambiente modellizzato in parti piccole in rapporto alle lunghezze d'onda considerate e che vanno infittite nei siti di maggior curvatura della frontiera. Ciò comporta una quantità di elementi in gioco che esplode con l'aumento delle dimensioni del dominio, risultando quindi proibitivo in una sala da concerto, ma utilizzabile in ambienti di piccole dimensioni (ad esempio per lo studio dei modi propri e delle frequenze di risonanza all'interno di veicoli).

Il BEM è un metodo numerico simile al precedente che però tiene in considerazione l'approssimazione della sola frontiera del dominio in studio. Questo metodo comporta quindi alcuni vantaggi per quel che riguarda la modellizzazione di spazi aperti. Entrambe le tecniche sono comunque ancora poco utilizzate nell'ambito dell'acustica (Fig. 8.1).

Per lo studio della propagazione acustica dei grandi spazi (sale da concerto, ma anche impianti industriali, commerciali e altro) i metodi che usano l'approssimazione dell'acustica geometrica sono i più utilizzati e sono implementati in molti programmi commerciali. Questi sono basati su diversi modelli, tra cui:

- modelli statistici, come quello del campo semiriverberante;
- la tecnica delle Sorgenti Immagine (Image Source);
- il Ray tracing;
- le evoluzioni del Ray tracing: modelli ibridi (Ray tracing + Sorgenti immagine), Beam tracing, Cone tracing e Pyramid tracing.

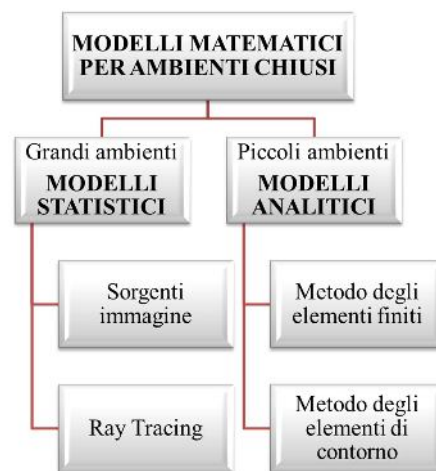


Fig. 8.1 – Modelli matematici per la simulazione del campo sonoro

8.2. Modelli statistici: il campo semiriverberante

Il modello di campo semiriverberante è un'estensione della formula di Sabine per valutare il livello sonoro (in dB) all'interno di un ambiente in modo semplice con una formula diretta:

$$L_{p,x} = L_w + 10 \log_{10} \left[S_0 \left(\frac{Q_\vartheta}{4\pi d^2} + \frac{4}{\sum_i a_i \cdot S_i} \right) \right] \quad (8.1)$$

in cui $L_{p,x}$ = livello di pressione sonora nel punto x in esame;

Q_ϑ = direzionalità della sorgente (ovvero un valore tra 0 e 1 di potenza nella particolare direzione di osservazione);

d = distanza dalla sorgente in m;

S_0 = superficie di riferimento pari ad 1 m^2 ;

$a_i \cdot S_i$ = valori del coefficiente di assorbimento sonoro per le aree delle superfici riflettenti.

Affinché il livello sonoro calcolato con questa formula (Fig. 8.2) sia una buona stima di quello reale, però, l'ambiente in esame deve sottostare alle seguenti restrizioni:

- l'ambiente deve avere forma abbastanza regolare;
- le dimensioni dell'ambiente devono essere confrontabili fra di loro;
- le superfici presenti nell'ambiente devono permettere una diffusione abbastanza uniforme senza privilegiare particolari direzioni;
- la distribuzione di materiale fonoassorbente deve essere abbastanza uniforme nell'ambiente.

Con la formula del campo semiriverberante si ottiene quindi una buona descrizione del suono diretto e una buona stima del livello sonoro in prossimità della sorgente; mentre allontanandosi dalla sorgente i risultati sono sempre meno affidabili, in quanto questo metodo non tiene conto della geometria del sistema.

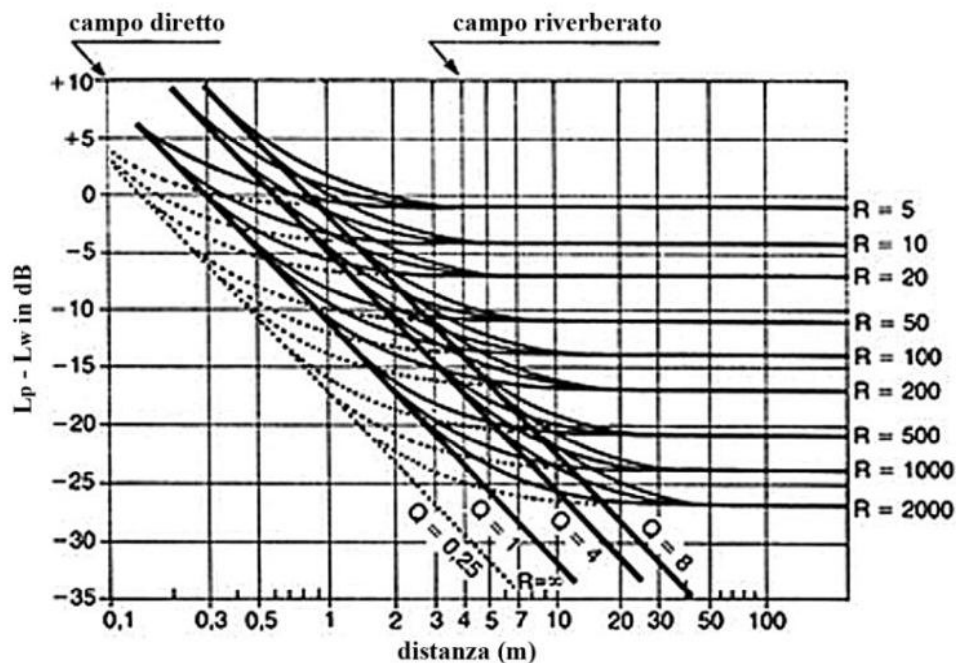


Fig. 8.2 - Livelli di intensità sonora all'interno di una camera semiriverberante

8.3. Il metodo delle sorgenti immagine

Il metodo delle sorgenti immagine si basa sulle regole dell'acustica geometrica e consiste nella creazione di sorgenti sonore “virtuali” generate dalla riflessione della sorgente sonora reale con le pareti dell'ambiente. Queste sorgenti sonore virtuali consentono il riconoscimento dei punti sulle pareti in cui il raggio sonoro impatta per raggiungere il ricevitore. Dunque è possibile calcolare non solo la distanza tra il ricevitore e le sorgenti virtuali, ma anche il tempo di volo del raggio sonoro, rendendo diretta quindi la ricostruzione della risposta all'impulso. Le ipotesi di base di questo metodo sono le seguenti:

1. valgono le approssimazioni dell'acustica geometrica;
2. sulle superfici di contorno il suono si riflette specularmente;
3. ad ogni riflessione speculare è associata una sorgente virtuale che si comporta in emissione come la sorgente reale dalla quale è originata;
4. ogni sorgente, reale o virtuale, emette fronti d'onda sferici (ipotesi esatta, a rigore, solo nel caso di sorgenti molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda e i cui punti oscillino in concordanza di fase);
5. la propagazione in fronti d'onda sferici è tracciabile mediante raggi sonori che vanno dalla sorgente, reale o virtuale, al ricevitore;
6. la potenza sonora che giunge ad un ricevitore è pari a quella emessa dalla sorgente diminuita per effetto della divergenza geometrica, dell'assorbimento delle superfici di confine attraversate dal raggio associato e dall'attenuazione del suono nell'aria.

Se un'onda sonora, rappresentabile come raggio sonoro, colpisce una parete piana viene riflessa dalla parete stessa. Ogni raggio emesso da una sorgente reale e riflesso dalla parete si può allora pensare come se fosse stato generato da una sorgente fittizia, la sorgente immagine appunto, situata dietro alla superficie riflettente alla stessa distanza della sorgente reale.

L'effetto della parete viene rappresentato completamente dalla sorgente immagine nell'ipotesi che essa emetta lo stesso segnale della sorgente e che le sue caratteristiche siano simmetriche a quelle della sorgente reale. In particolare, come rappresentato in Fig. 8.3, sempre mediante la schematizzazione dei raggi sonori, il raggio riflesso forma lo stesso angolo θ con la normale alla superficie del raggio incidente (angolo di incidenza ed angolo di riflessione sono uguali) e i due raggi giacciono sullo stesso piano. Si parla, quindi, di riflessione speculare o regolare.

L'energia riflessa è però solo una parte di quella incidente.

Ciascun raggio durante il suo percorso subisce infatti una serie di riflessioni multiple e l'energia da essi trasportata mano a mano diminuisce a causa della divergenza geometrica dovuta all'allontanamento progressivo dalla sorgente ed ad altri fenomeni dissipativi quali l'assorbimento delle superfici di confine attraversate dal raggio e l'attenuazione dell'aria.

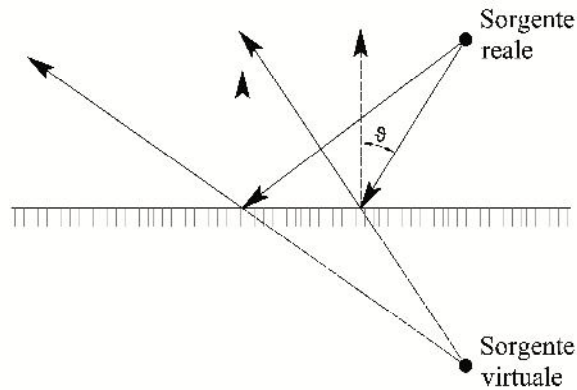


Fig. 8.3 – Illustrazione del metodo delle sorgenti immagine

L'assorbimento da parte della pareti viene rappresentato dal coefficiente α e dipende in generale dall'angolo di incidenza e dalla frequenza. Ad ogni riflessione il segnale si riduce di un fattore $(1 - \alpha)$ dell'intensità iniziale.

Se ci sono n riflessioni al secondo, dopo un tempo t , l'intensità si è ridotta di un fattore:

$$(1 - \alpha)^{n \cdot t} = e^{[t \cdot n \cdot \ln(1 - \alpha)]} \quad (8.2)$$

Inoltre, parte dell'intensità viene ulteriormente persa per l'assorbimento del mezzo, rappresentabile tramite una costante di smorzamento m , dovuta al fatto che l'aria non è un mezzo perfettamente elastico e quindi si ha, durante la propagazione sonora, una certa dissipazione. In totale l'intensità delle riflessioni nel punto di osservazione all'istante t ($t > 0$) è:

$$I = \frac{A}{(c \cdot t)^2} \cdot e^{[-m \cdot c \cdot n \cdot \ln(1 - \alpha)] \cdot t} \quad (8.3)$$

in cui A è una costante.

Il percorso di ogni raggio termina quando incontra una superficie perfettamente assorbente o finché la sua energia non si esaurisce (nei software di modellazione in commercio, il viaggio dei raggi sonori viene seguito finché il livello diventa minore di un prefissato livello L_0 , al di sotto del quale il raggio si estingue).

Il suo viaggio completo può essere rappresentato mediante sorgenti immagine di ordine superiore al primo (Fig. 8.4). La prima sorgente immagine A' è stata trovata in maniera analoga a quella di prima mentre la seconda sorgente immagine A'' viene costruita dalla prima ed è relativa alla parete successiva che il raggio colpirà.

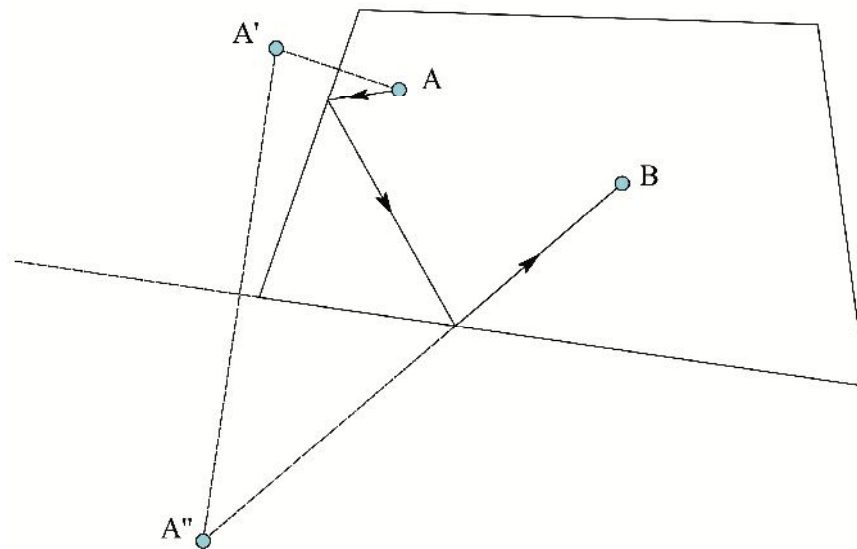


Fig. 8.4 – Sorgenti immagine del primo e del secondo ordine

I raggi continuano a riflettersi sulle altre pareti creando raggi riflessi di ordine superiore che si ottengono geometricamente continuando a specularizzare le sorgenti rispetto al loro piano, fino a creare una vera e propria rappresentazione geometrica dei percorsi dei vari raggi sonori.

I livelli sonori continuano a decrescere finché, ad un certo punto, si ha una sorta di coda sonora continua dove non è più possibile separare un'onda riflessa da un'altra in quanto ne arrivano una moltitudine negli stessi istanti di tempo, provenienti da direzioni diverse.

In una geometria particolarmente semplice il metodo è molto efficace ed è possibile generare iterativamente sorgenti di ordine molto elevato arrivando a descrivere corretta-

mente buona parte della coda riverberante costituita dall'arrivo di tutte le onde riflesse. Quando viceversa la geometria è più complicata, dopo aver generato un numero elevato di sorgenti virtuali, è necessario verificare quelle effettivamente viste dal ricevitore.

Definita una particolare posizione della sorgente e del ricevitore infatti non è detto che tutte le sorgenti virtuali siano in grado di inviare energia che “attraversi” tutte le superfici che hanno generato la sorgente virtuale: può succedere che il raggio sonoro colpisca il piano di una superficie al di fuori del contorno della stessa.

Può succedere che, pur venendo generate centinaia di migliaia di sorgenti immagine, solo una piccolissima percentuale delle stesse superi il test di visibilità, mentre tutte le altre non contribuiscano al campo sonoro nel ricevitore considerato. Poiché il calcolo comprende numerosi e complicati controlli che devono essere ripetuti per ogni ricevitore, l'elaborazione diviene molto lenta.

In genere non si riesce mai ad arrivare a previsioni superiori a 5 ordini di riflessioni, che da una parte sono adeguati per valutare l'andamento del livello sonoro ma dall'altra non sono sufficienti per ricostruire l'andamento della coda sonora (per calcolare ad esempio il tempo di riverberazione). La parte mancante di essa viene ricostruita, di solito ricorrendo alla teoria statistica del campo diffuso.

Se N è il numero delle pareti, si hanno N sorgenti immagine del primo ordine alle quali corrispondono $(N-1)$ sorgenti immagini del secondo ordine ed in totale verranno ad essere $N(N-1)$.

In generale il numero di sorgenti immagine di ordine i ($i \geq 1$) è $N(n-1)^{i-1}$. In totale il numero di sorgenti immagine fino all'ordine i_0 è:

$$N(t_0) = \frac{N \cdot (n-1)^{i_0} - 1}{N-1} \quad (8.4)$$

I dati relativi ai singoli arrivi di energia vengono rappresentati graficamente in un diagramma dove viene riportato il livello sonoro in funzione del tempo (Fig. 8.5).

I tempi ai quali arriva un nuovo raggio diventano via via sempre più fitti e si uniformano a causa della crescita veloce del numero di raggi riflessi, ma la loro intensità si riduce fino a decadere a zero a causa dell'assorbimento. Si ha allora il fenomeno noto come coda sonora o riverberazione.

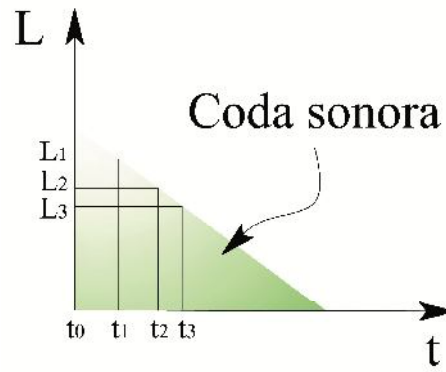


Fig. 8.5 – Andamento del livello in funzione del tempo

Praticamente una volta individuata la posizione di una sorgente immagine, si calcola il contributo al campo sonoro nel punto ricevente considerando la sorgente stessa come se fosse in campo libero alla distanza effettiva tra sorgente immagine e ricevitore con potenza sonora ridotta per effetto dell'assorbimento, ed impiegando la seguente relazione:

$$L_p = L_W + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_{dir}}{4\pi d_{dir}^2} + \frac{Q_{rif} \cdot \prod_i (1 - \alpha_i)}{4\pi d_{rifl}^2} \right) \quad (8.5)$$

dove i simboli hanno lo stesso significato che nella (8.1), mentre il pedice del coefficiente di assorbimento α si riferisce alla parete su cui il raggio sonoro impatta; si intende che la superficie è ancora rapportata alla superficie di riferimento di 1 m^2 , così che il termine contenuto nel logaritmo sia adimensionale. Se si vuole tenere in considerazione anche l'assorbimento dell'aria, bisogna moltiplicare all'interno del logaritmo per un fattore $e^{-\beta d}$, con β coefficiente di assorbimento.

Il livello sonoro complessivo di ogni singolo arrivo è quindi pari alla somma energetica dei livelli sonori di tutte le riflessioni e dell'onda diretta. Poiché in base alla distanza percorsa è noto il tempo impiegato dall'onda a raggiungere il ricevitore, è possibile ricostruire a partire dai singoli arrivi d'energia sonora la risposta all'impulso in ciascun ricevitore e tramite integrazione all'indietro valutare sia il livello sonoro a regime sia il tempo di riverberazione.

Come detto sono però numerosi i problemi legati a questa tecnica: infatti se la stanza è di forma complessa come una sala d'ascolto, occorre inserire nel programma di calcolo degli algoritmi di test fra ciascuna sorgente immagine e ciascun ricevitore, per essere sicuri che il raggio riflesso colpisca il piano di ciascuna parete interessata dalle riflessioni in

un punto interno all'elemento di superficie stesso. Per ottenere una densità di energia accettabile, occorrerebbe un numero di sorgenti immagine talmente grande che anche un computer moderno impiegherebbe tempi lunghissimi per ciascun ricevitore. Pertanto questo metodo non viene usato neanche con i moderni strumenti di simulazione, a meno di non considerare ambienti di forma molto semplice.

8.4. Ray tracing

A partire dalla sorgente sonora (considerata puntiforme) si lancia un gran numero di raggi in direzioni scelte a caso, con una certa energia iniziale dipendente dalla direttività della sorgente nella particolare direzione considerata. I raggi si propagano alla velocità del suono, restando rettilinei, e rimbalzano via via entro l'ambiente per effetto delle riflessioni multiple. Ad ogni rimbalzo, l'energia posseduta dal raggio viene ridotta di una quota a causa dell'assorbimento delle pareti, che può essere resa variabile in funzione dell'angolo di incidenza, e dell'attenuazione dovuta alla dissipazione nel mezzo (aria), mentre non deve essere presa in considerazione la divergenza sferica: a ciò provvede già la divergenza fra i raggi e la conseguente riduzione del numero di essi che va ad impattare su un ricevitore al crescere della distanza dello stesso dalla sorgente.

Le ipotesi base del modello sono le seguenti:

1. valgono le approssimazioni dell'acustica geometrica;
2. sulle superfici di contorno il suono si riflette specularmente;
3. l'energia sonora della sorgente viene quantizzata in un numero finito di pacchetti associati ai raggi sonori, detti anche particelle sonore o fononi;
4. a partire dalla posizione della sorgente, i raggi sonori si propagano in tutte le direzioni secondo le leggi dell'acustica geometrica;
5. i raggi sonori hanno sezione idealmente infinitesima e costante;
6. la divergenza geometrica dell'energia sonora emessa è rappresentata dalla divergenza geometrica dell'insieme dei raggi sonori;
7. i raggi sonori perdono energia per effetto dell'assorbimento delle superfici di confine urtate e dell'attenuazione del suono nell'aria.

La generazione dei raggi può avvenire secondo due diverse modalità (Fig. 8.6):

1. deterministica: le direzioni di emissione sono determinate dai vettori posizione di una sfera unitaria centrata nella sorgente secondo una regola geometrica di partizione;
2. statistica: i vettori direzionali sono determinati in base ad una regola statistica in modo da assicurare la copertura uniforme della sfera.

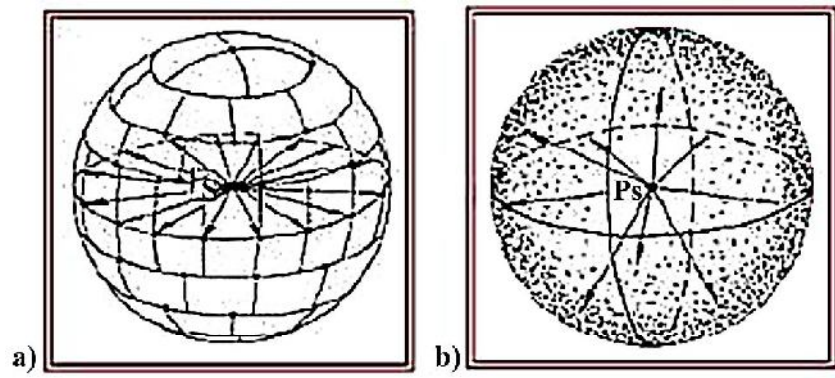


Fig. 8.6 – Metodi di generazione dei raggi sonori: a) deterministico; b) statistico. La sorgente è posizionata in P_s

I due metodi sono equivalenti per quanto riguarda l'uniformità della distribuzione dei raggi.

Il metodo deterministico la realizza solo quando i raggi sono stati generati nella loro totalità. Inoltre la distribuzione dei raggi dipende dal loro numero. Quindi la simulazione compiuta per un dato numero di raggi è inutilizzabile quando se ne varia il numero. Al contrario con la generazione statistica l'uniformità della distribuzione dei raggi è garantita qualunque sia il numero, purché sufficientemente elevato. I raggi vengono poi seguiti nelle loro riflessioni sulle superfici di contorno, che possono avvenire sia con legge speculare che diffusa; in quest'ultimo caso, viene impiegato un generatore di numeri casuali per reindirizzare il raggio in una direzione arbitraria. I ricevitori non possono essere puntiformi perché in tal caso la probabilità di captazione sarebbe nulla. Si usano quindi volumi finiti, di forma sferica, posizionati in corrispondenza dei punti di ricezione (Fig. 8.7).

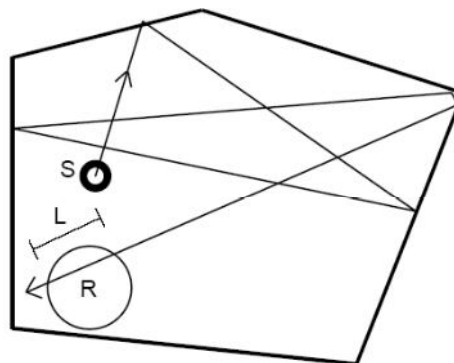


Fig. 8.7 – Generazione di raggi, di tracciamento degli stessi e di impatto su un ricevitore sferico a densità. Si noti come l'energia depositata nel ricevitore aumenti all'aumentare del suo diametro

La densità di energia D (in J/m^3) che ogni raggio cede al ricevitore al suo passaggio è data dalla formula:

$$D = e^{-\beta r} \cdot \frac{EL}{V} \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (8.6)$$

dove r è la distanza percorsa dalla sorgente, V il volume della sala, L il segmento del raggio che interseca il ricevitore (come in Fig. 8.6), α_i il coefficiente di assorbimento della superficie i -esima con cui il raggio ha impattato e E l'energia per metro di lunghezza trasportata dal raggio, calcolata come:

$$E = \frac{WQ_\vartheta}{Nc_0} \quad (8.7)$$

con W e Q_ϑ rispettivamente potenza e direzionalità della sorgente, N numero dei raggi in cui la sua potenza è stata divisa e c_0 velocità del suono.

Affinché il metodo fornisca risultati statisticamente stabili, è necessario generare un numero elevato di raggi e usare ricevitori sufficientemente grandi. In realtà se consideriamo il campo abbastanza diffuso, i contributi energetici dei raggi che arrivano al termine della coda riverberante saranno simili tra di loro, rispettando le regole dell'acustica statistica. Dunque sarà importante che arrivino anche pochi raggi, ma ben distribuiti nel tempo. Comunque il numero di raggi da lanciare non può essere inferiore ad alcune decine di migliaia.

Il generico raggio ha termine quando è verificata una delle seguenti condizioni:

1. la potenza trasportata ha raggiunto un valore minimo prefissato;
2. l'ordine di riflessione ha raggiunto un valore massimo prefissato;
3. la lunghezza del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato;
4. il tempo di percorrenza ha raggiunto un valore massimo prefissato.

Un problema che incontra questa tecnica è quello della criticità delle caratteristiche del ricevitore. Il risultato sarà infatti fortemente dipendente:

1. dalla dimensione del ricevitore, in quanto:
 - se il ricevitore è troppo grande potrebbe essere sovrastimato il contributo di ogni captazione e si avrebbe uno scarso realismo del mo-

dello, con un rilevatore enorme che attinge energia in una zona troppo estesa;

- se è troppo piccolo potrebbe non ricevere un numero adeguato di raggi;
2. dalla posizione del ricevitore, in quanto soggetto a forti variazioni di captazione per piccoli spostamenti (Fig. 8.8).
 - 3.

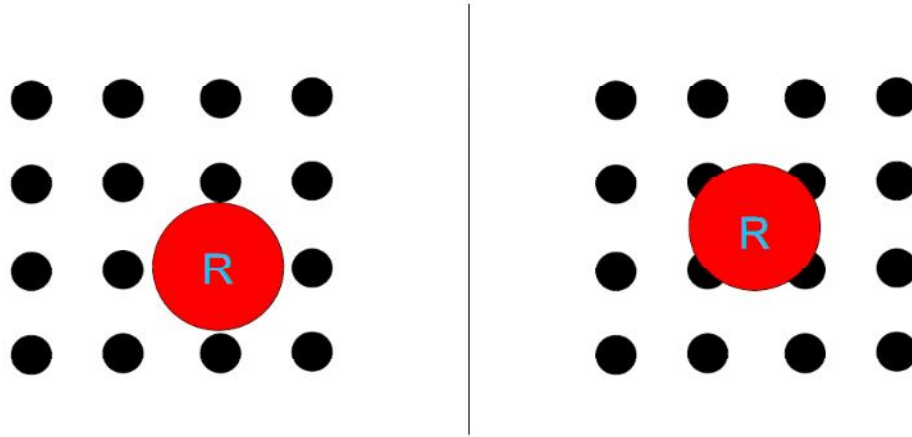


Fig. 8.8 – Sensibilità della posizione rispetto al numero di raggi captati

Per ovviare a questi inconvenienti si può usare la formula di Lehnert per il calcolo del raggio del ricevitore che minimizza gli errori detti precedentemente; la formula è la seguente:

$$r = R_0 \left(\frac{2\pi}{N} \right)^{1/2} \quad (8.8)$$

dove R_0 è il raggio di estinzione e N il numero di raggi.

In alternativa è possibile usare la seguente espressione, dove V_R e V sono rispettivamente il volume del ricevitore e dell'ambiente:

$$V_R = \frac{10V}{N} \quad (8.9)$$

da cui:

$$r = \left(\frac{15V}{2\pi N} \right)^{1/3} \quad (8.10)$$

Ogni volta che un raggio interseca una sfera ricevitore, le cede una certa dose di energia che è proporzionale alla lunghezza del segmento di raggio intersecato. Dato che quando si parla di ambienti chiusi si assume sempre l'ipotesi di campo sonoro diffuso si calcola la densità dell'energia sonora, quindi l'energia per unità di volume che si viene a stabilire nella sfera ricevente. I dati ricevuti vengono memorizzati dal “contatore” e poi restituiti sotto forma di istogramma nel quale viene riportato per ogni di tempo l'energia di tutti i raggi che attraversano il contatore stesso.

In prima approssimazione il modello del Ray tracing assume quattro diverse combinazioni di riflessioni. Esse sono : S-S, S-D, D-S, D-D dove S sta per speculare e D per diffusa (Fig. 8.9).

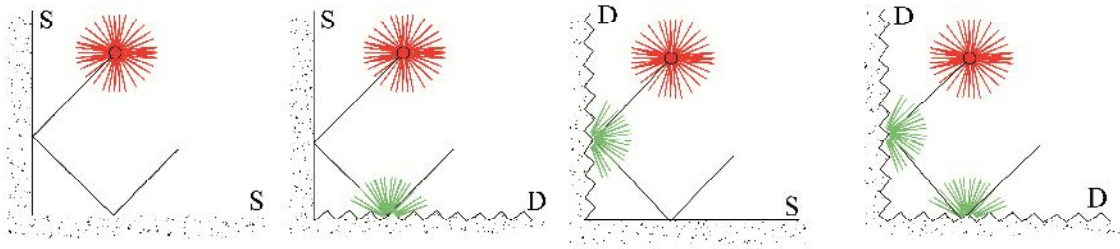


Fig. 8.9 – Quattro possibili combinazioni di riflessione nel Ray Tracing. S, speculare; D, diffusa

Per quantificare i due contributi, uno relativo alla riflessione speculare e l'altro a quella diffusa, è stato introdotto il coefficiente di diffusione δ , dato che dal rapporto fra la potenza sonora riflessa in direzione non speculare e la potenza sonora totale riflessa.

$$\delta = \frac{W_{riflessa,non_speculare}}{W_{riflessa,non_speculare} + W_{riflessa,speculare}} \quad (8.11)$$

Questa definizione è applicabile per un angolo di incidenza dato, supponendo che la potenza sia riflessa in parte in modo speculare ed in parte in modo diffuso. Dette P_{inc} la potenza sonora incidente, P_{rifl} quella riflessa totale, P_{diff} la componente diffusa e P_{spec} quella speculare, in base alla definizione precedente (Fig. 8.10):

$$P_{diff} = \delta \cdot P_{rifl} = \delta \cdot (1 - \alpha) \cdot P_{inc} \quad (8.12)$$

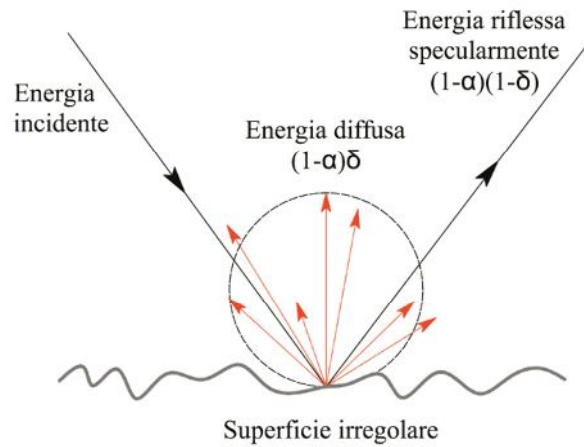


Fig. 8.10 – Una superficie irregolare colpita da un'onda sonora riflette specularmente parte dell'energia incidente che non viene assorbita, diffondendo la frazione di energia rimanente

Il coefficiente di diffusione può assumere valori compresi fra 0 e 1, dove $\delta = 0$ significa che la riflessione è puramente speculare e $\delta = 1$ significa che tutta la potenza è riflessa in modo diffuso e quella riflessa specularmente è nulla. Quando un raggio colpisce una superficie viene generato un numero di raggi casuale nel range $[0,1]$. Se il numero è più piccolo di δ si ha riflessione diffusa, altrimenti speculare.

La diffrazione è invece valutata in base al metodo proposto da Pierce (Fig. 8.11).

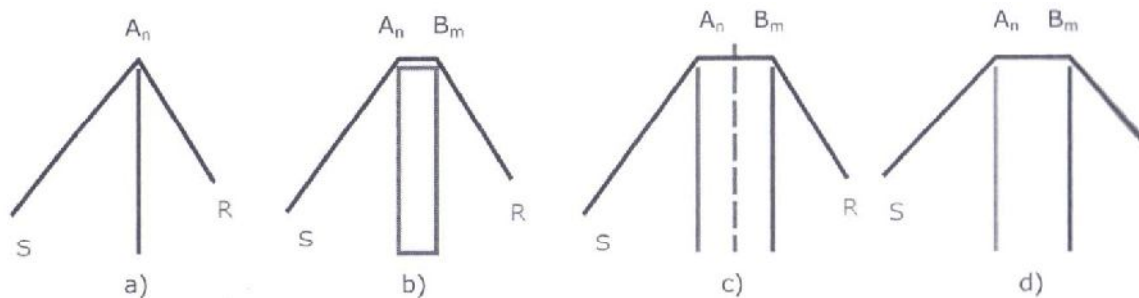


Figure 6-8. Diffraction paths and their detection. a) Odeon detects a 1 point diffraction path over a thin screen. b) Odeon detects a 2 point diffraction path over a wide barrier. c) Odeon fails to detect a diffraction path because the path from A_n - B_m is obscured by a third surface in fact it's a 3 point diffraction path. d) Odeon detects a diffraction path over two thin barriers.

Fig. 8.11 – Metodo di Pierce per la valutazione della diffrazione

Il Ray tracing è un metodo:

- diretto perché simula esplicitamente il processo di propagazione sonora: sono note a priori le posizioni delle sorgenti e dei ricevitori, la direzione di emissione dei raggi, ma non il punto in cui il raggio verrà captato;
- statistico, legato cioè alla convergenza statistica all'aumentare del numero di raggi. Si ha infatti che l'errore relativo ε della densità di energia per una sfera ricevente che ha captato j_m raggi è all'incirca:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{j_m}} \quad (8.13)$$

L'algoritmo richiede che siano effettuati i seguenti controlli:

1. i raggi devono colpire la parte interna delle pareti;
2. i raggi devono viaggiare davanti alle pareti;
3. i punti di riflessione devono appartenere alle pareti;
4. ogni raggio deve seguire il minimo percorso.

Il costo computazionale del Ray tracing aumenta linearmente con il numero di raggi e la loro durata. Ciò significa che si ha un rapporto costante tra lunghezza degli ecogrammi e tempo di calcolo. La parte più onerosa del metodo è la rappresentazione delle caratteristiche geometriche e fisiche (dimensioni della stanza, posizioni di sorgenti e ricevitori, caratteristiche di riflettività delle pareti...).

8.5. Confronto tra sorgenti virtuali e Ray tracing

Il metodo delle sorgenti virtuali è caratterizzato da un'inefficienza di fondo, in quanto dapprima costruisce tutte le potenziali sorgenti, per ordini di riflessione successivi, secondo un procedimento che percorre dall'origine tutti i percorsi logici delle sorgenti virtuali, poi, a causa del test di visibilità, ripete i percorsi in senso opposto, ricominciando da capo ogni volta che incontra una sorgente scartata, finché non rimangono selezionati tutti e soli i percorsi effettivi ricevitore – sorgente virtuale. Secondo il Ray tracing, invece, ogni raggio percorre una sola volta il percorso logico secondo l'esatta sequenza delle riflessioni, eliminando quindi a priori la possibilità di incorrere in sorgenti scartate. La limitazione principale del Ray tracing è la mancanza di una regola per la scelta del numero di raggi da tracciare e della dimensione del ricevitore. In particolare la dimensione dei ricevitori è un fattore critico e origina errori sistematici di tre tipi:

1. errori di captazione multipla (Fig. 8.12): il numero di raggi captati dipende dalla posizione reciproca di sorgente e ricevitore;
2. errori di captazione variabile (Fig. 8.13): un piccolo spostamento del ricevitore causa una notevole variazione dell'energia ricevuta;
3. errori di captazione non valida (Fig. 8.14).

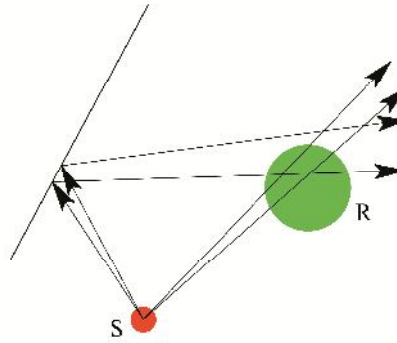


Fig. 8.12 – Esempio di captazione multipla

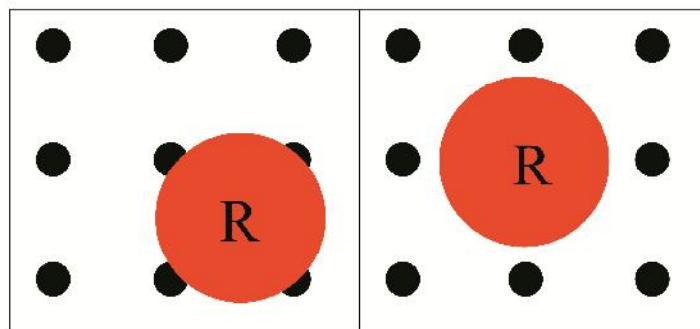


Fig. 8.13 – Esempio di captazione variabile

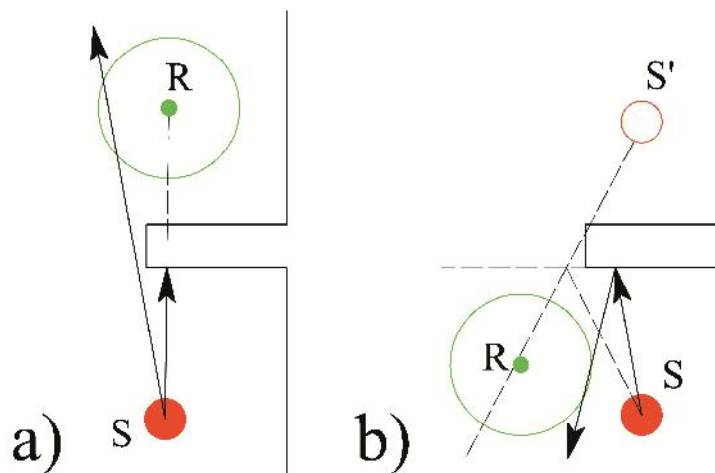


Fig. 8.14 – Esempio di captazione geometricamente non valida.; S, sorgente; R, ricevitore. A) La sorgente è schermata. B) Il punto di riflessione non giace sulla superficie

Questi errori possono essere minimizzati ad esempio scegliendo il raggio del ricevitore in base alla relazione:

$$r_m = L^* \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{J_0}} \quad (8.14)$$

dove L^* = cammino massimo dei raggi.

Tale relazione a parità di cammino massimo e numero di raggi emessi garantisce una percentuale di captazione superiore al 99%.

Il confronto tra i due metodi (Tab. 8.1) deve tenere conto di due fattori: tempo di calcolo e precisione raggiungibile. Questi fattori possono essere espressi in funzione del numero massimo di riflessioni. Nella pratica il metodo delle sorgenti immagine risulta più veloce quando il numero di riflessioni è basso e la precisione richiesta è ridotta (± 2 dB). Nel caso invece di numero elevato di pareti e/o riflessioni e di assorbimento delle pareti non elevato conviene utilizzare il Ray tracing, che fornisce tempi di calcolo e precisione comunque soddisfacenti.

CARATTERISTICA	SORGENTI VIRTUALI	RAY TRACING
Superfici curve	No	Semplificando la geometria
Riflessione diffusa	No	Sì
Diffusione	Con leggi di propagazione modificate	Sì
Schermi	A bassi ordini di riflessione	Con difficoltà
Diffrazione generalizzata	No	Con difficoltà
Rifrazione	No	Sì
Interferenza	Sì	No

Tab. 8.1 – Confronto tra le possibilità di sviluppo dei modelli delle sorgenti virtuali e del Ray tracing

Le limitazioni dei metodi considerati hanno portato allo sviluppo di metodi ibridi, che ne combinano le caratteristiche migliori. In questo metodo le prime riflessioni (early reflections) vengono modellate mediante il metodo delle immagini, mentre la coda del riverbero (late reflections) mediante sorgenti secondarie posizionate sulle pareti nei punti delle ultime riflessioni, che sono a tutti gli effetti delle nuove sorgenti.

8.6. Evoluzioni del Ray tracing

Il primo tentativo di miglioramento del Ray tracing è dovuto a Vorlander, il quale elaborò un modello ibrido Ray tracing / Sorgenti Immagine, allo scopo di alleggerire il calcolo dei test di visibilità, il maggior problema nel metodo delle Sorgenti Immagine. In questo modello il tracciamento di raggi serve semplicemente a identificare le superfici capaci di generare una sorgente immagine valida: il ricevitore è una sfera di raggio finito, allo scopo di intercettare i raggi provenienti dalla sorgente sotto forma di Traced Rays. Una volta identificati questi raggi, si torna indietro utilizzando per queste stesse superfici il metodo delle sorgenti immagine, e il ricevitore torna ad essere puntiforme. Il test di visibilità deve essere ancora effettuato, ma in questo modo risulta positivo per un numero molto maggiore di casi rispetto al modello delle sorgenti immagine.

Per ovviare all'inconveniente, molto frequente, che lo stesso percorso di riflessione generi più sorgenti immagine, come può accadere spesso per le prime riflessioni se i raggi sono molto fitti, si ricorre ad uno schema dati ad albero, sui cui rami siano rappresentati gli impatti con le superfici, come in Fig. 8.15.

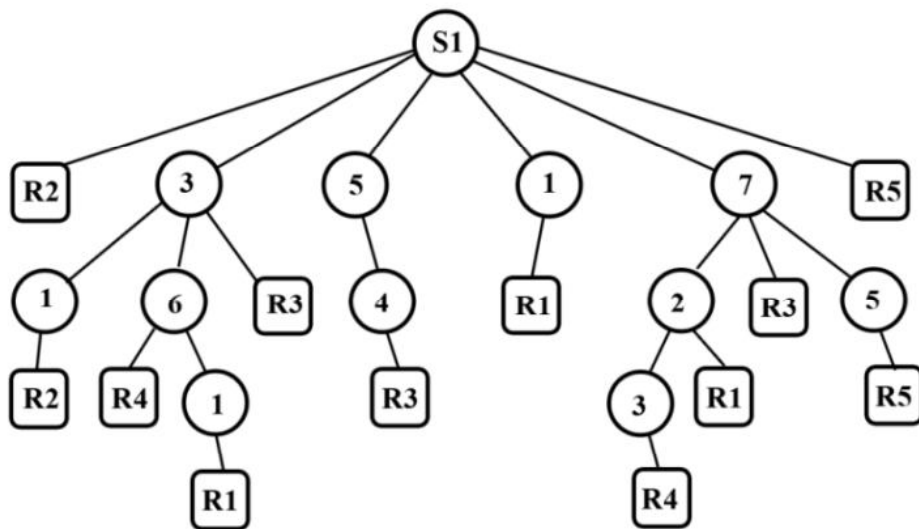


Fig. 8.15 - Schema dati ad albero nel metodo di Vorlander

Persiste comunque il problema della velocità di calcolo, tanto che è difficile superare il 10° - 11° ordine di riflessione. Inoltre la coda sonora non può essere valutata, come nel caso del Ray tracing puro, usando le leggi dell'acustica statistica, in quanto la perdita di raggi in questo caso non viene compensata dal fatto che i raggi esistenti possiedono una maggiore energia come nel Ray tracing, sottostimando così il valore del livello sonoro.

Un'ulteriore evoluzione è stata ispirata da tentavi di allargamento del raggio del ricevitore. Mentre nel metodo del Ray tracing puro l'allargamento del ricevitore aveva il solo scopo di approssimare meglio la coda sonora, in questo caso l'allargamento stesso avviene in maniera costante; la divergenza sferica dei raggi cresce di pari passo con l'allargamento della sorgente, in modo che il rapporto tra le aree resti costante. Questo prevede però che il raggio del ricevitore cresca in maniera spropositata, diventando più grande dell'ambiente stesso, finendo per ricevere energia qualunque sia il percorso del raggio.

Un altro modo per ottenere un effetto simile è quello di considerare settori di sfera divergenti invece di raggi. Il ricevitore torna ad essere puntiforme, in quanto riceverà un impulso sonoro ogni volta che esso viene a trovarsi all'interno del volume divergente spazzato dalla sorgente. La traiettoria dei settori viene comunque calcolata da un raggio centrale, che ad ogni impatto con una superficie verrà riflesso specularmente secondo le leggi dell'acustica geometrica; molti di questi modelli utilizzano poi un codice che definisce le sorgenti immagine per calcolare il livello sonoro.

Questo procedimento porta ad errori nella coda riverberante, in quanto quando il fascio diventa grande rispetto alle superfici. La situazione è ben evidente nella Fig. 8.16: il processo genera sempre una sottostima della coda, come dimostrato da Maercke e Martin.

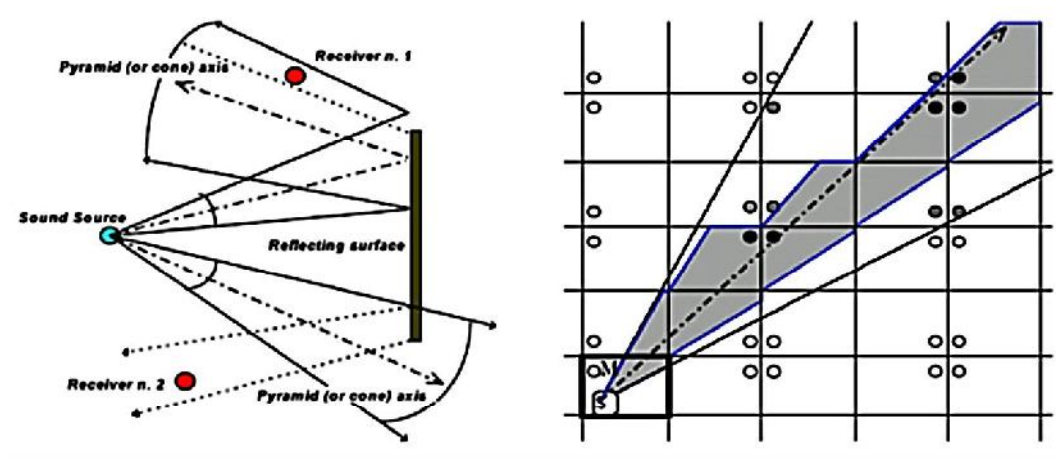


Fig. 8.16 - Perdita di sorgenti immagine: nella figura di sinistra si vede come il ricevitore 2 non venga irraggiato per effetto della riflessione del solo asse centrale; nella figura di destra la perdita di sorgenti immagine valide è evidente

Per i metodi di tracing sono state usate figure divergenti diverse; tra esse ricordiamo:

- il Cone tracing, in cui la sorgente viene divisa in cerchi che allontanandosi dalla sorgente stessa formano dei coni; i coni non coprono però alla perfezione la superficie di una sfera, in quanto se essi non sono adiacenti risulteranno dei buchi nella copertura della superficie sferica; nel caso in cui essi siano parzialmente sovrapposti, allo scopo di non lasciare spazi vuoti, se il ricevitore si trova nel punto d'intersezione tra due coni, riceverà un contributo energetico doppio rispetto al reale (Fig. 8.17). Ciò implica che il programma debba prevedere algoritmi che individuino i coni sovrapposti e dimezzino l'energia nel caso incontrino un ricevitore, una procedura onerosa per l'uso di memoria e di tempo di calcolo;

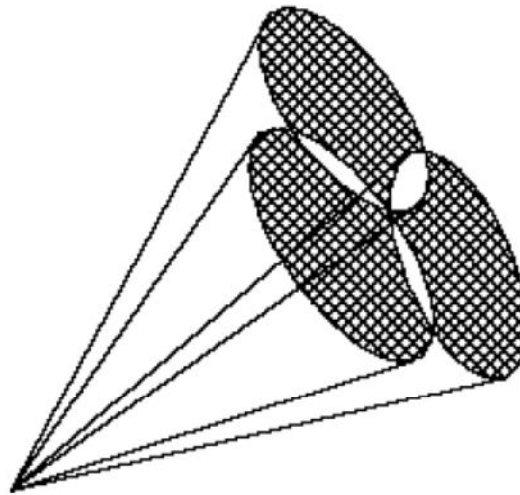


Fig. 8.17 - Sovrapposizione tra coni nel metodo del Cone Tracing

- il Beam tracing, in cui il fascio è sostituito da una distribuzione di energia che varia con legge gaussiana a seconda dell'angolo ϑ rispetto al raggio usato come asse: in questo modo i fasci sono ancora sovrapposti, ma l'intensità energetica si riduce di parecchio negli interstizi tra due raggi vicini. In questo modo si può ottenere una distribuzione di energia abbastanza uniforme (Fig. 8.18);

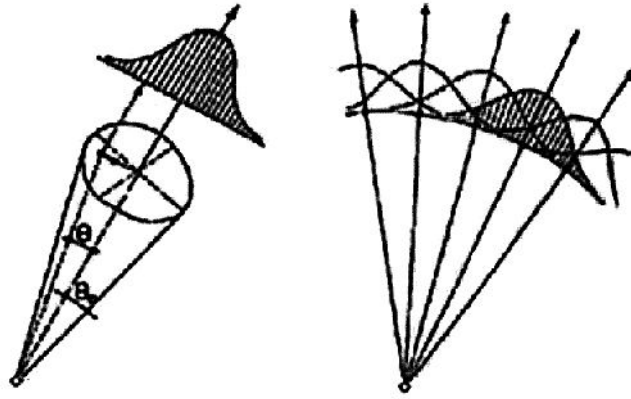


Fig. 8.18 - Illustrazione del metodo del Beam tracing; i fasci d'intensità hanno una distribuzione gaussiana

- il Pyramid tracing, in cui la sorgente viene divisa in triangoli curvilinei mediante una progressiva bisezione della sfera a partire dagli 8 ottanti generati dai piani cartesiani. Il numero di piramidi sarà pertanto sotto forma di potenze di 2: $N_p = 8 * 2^N$ con N ordine di bisezione. Le direzioni di emissione delle piramidi vengono scelte per via deterministica, evitando problemi di convergenza statistica tipiche di alcuni algoritmi di distribuzione dei raggi pseudocasuali di Ray tracing. La procedura permette di ottenere una divisione perfettamente isotropa della sorgente, oltre a minimizzare i problemi di sovrapposizione dei fasci incontrati con il Cone tracing e con il Beam tracing; piccoli problemi residui possono portare alla presenza di buchi nella propagazione delle piramidi. Per ovviare a questo inconveniente si sovrappongono leggermente le frontiere delle piramidi per un'estensione in lunghezza pari a $2e$, come in Fig. 8.19. Ciò comporta però, anche in questo caso, la ricezione di un doppio contributo energetico nel caso che il ricevitore si trovi esattamente nella zona di sovrapposizione delle due piramidi, e ciò può condurre ad una sovrastima particolarmente importante nell'onda diretta. Il raggio rappresentante la propagazione delle piramidi viene individuato dalla congiungente dei baricentri dei triangoli con il centro della sorgente; essi viaggeranno alla velocità del suono attraverso l'ambiente riflettendosi specularmente sulle superfici. L'individuazione dei punti d'impatto è la procedura più onerosa in termini di tempo di calcolo; si tratta infatti di verificare le condizioni di intersezione tra tutte le piramidi in gioco con tutte le superfici, andando ad individuare quella con cui il raggio effettivamente impatta.

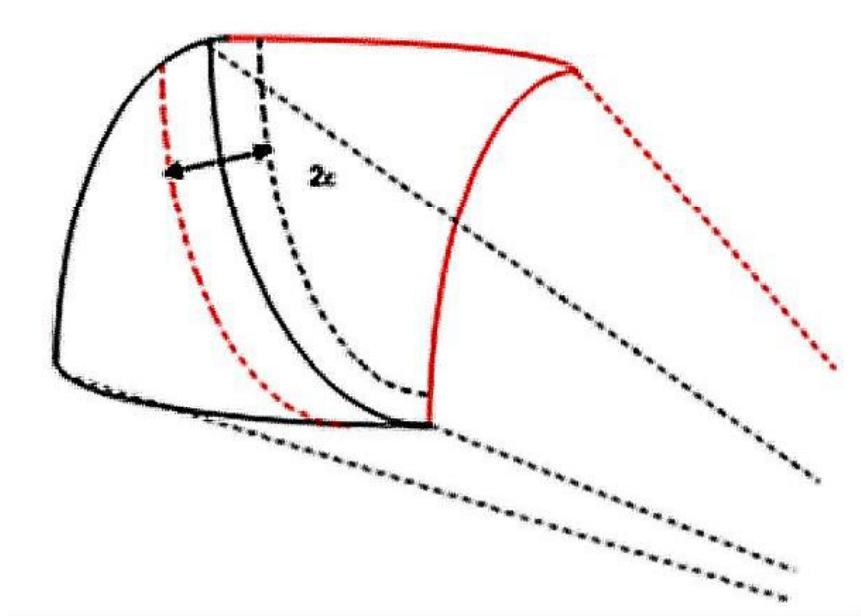


Fig. 8.19 – Sovrapposizione di piramidi

8.7. Il software di simulazione Odeon

Esistono numerosi software commerciali che permettono di eseguire simulazioni e ricreare virtualmente l'acustica di qualunque tipologia di ambiente. L'ultimo test di ricerca eseguito nel 2002 ha dimostrato che negli ultimi 10 anni sono stati compiuti enormi passi avanti per quanto riguarda l'attendibilità delle previsioni dei software di simulazione. Questo lavoro si avvale delle potenzialità del software Odeon 12.

Il programma Odeon 12 è un software prodotto dal "Department of Acoustic Technology" della "Technology University of Denmark" di Lyngby (Danimarca). Il metodo applicato per compiere le simulazioni è un metodo ibrido che combina il Ray tracing e il metodo delle sorgenti immagini. Tale programma abbina il metodo delle sorgenti immagine per le prime riflessioni (in genere fino al terzo ordine) e la tecnica del Ray tracing per l'ultima parte della risposta all'impulso. Si inviano un certo numero di raggi all'interno della sala e ogni volta che un raggio viene riflesso da una parete si genera una seconda sorgente in corrispondenza del punto di riflessione. La sorgente secondaria avrà un'energia che dipende dall'assorbimento, dalla lunghezza del percorso fatto e da un certo ritardo relativo alla sorgente primaria. Ogni sorgente secondaria avrà una certa direttività, data dalla legge di Lambert. Le riflessioni, in base al valore assunto dal coefficiente di scattering, possono essere speculari o diffuse. Le sorgenti secondarie, se sono visibili al ricevitore, inviano le riflessioni al ricevitore dove sono "raccolte" e memorizzate. Il test di visibilità delle sorgenti è fatto tramite Ray tracing, collegando il ricevitore con la seconda sorgente che si va a considerare.

Odeon fornisce due metodi per il calcolo del decadimento globale delle sale:

- *Quick Estimate*: è il metodo più veloce che permette una rapida valutazione dell'effetto del cambiamento di un materiale.

Va utilizzato solo per ottenere dei risultati non particolarmente precisi. Questo metodo elabora un coefficiente di assorbimento medio da inserire nelle formule di Sabine, Eyring e Arau - Puchades per avere una stima del tempo di riverberazione. Invece di prendere semplicemente le aree delle diverse superfici e moltiplicarle per il corrispondenti coefficienti di assorbimento al fine di ottenere l'assorbimento totale della stanza, Odeon invia anche delle "particelle" dalla sorgente, riflettendole nella stanza con il metodo di riflessione "Late Ray" (ultima fase del raggio), contando quante volte queste colpiscono ogni superficie. Le superfici che vengono intercettate molto spesso hanno poi grande rilevanza nel coefficiente di assorbimento medio globale della stanza; al contrario le superfici che non sono colpite affatto nel processo di Ray tracing sono escluse dai calcoli; ne consegue che il tempo di riverberazione è calcolato rispetto al sotto-volume nel quale la sorgente selezionata è inserita. I valori classici vengono calcolati con riferimento al coefficiente di assorbimento medio tradizionale, dato da:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i S_i a_i}{\sum_i S_i} \quad (8.15)$$

dove S_i e a_i sono rispettivamente l'area e il coefficiente di assorbimento della i -esima superficie della sala.

Il coefficiente di assorbimento medio modificato per effetto dell'uso delle particelle è dato da:

$$\bar{a}' = \frac{\sum_i H_i a_i}{\sum_i H_i} \quad (8.16)$$

Dove H_i è il numero di impatti sulla superficie i -esima.

Le formule di Sabine e Eyring necessitano di un valore per il volume della sala, che Odeon calcola dal cammino libero medio l ottenuto col Ray tracing, usando la relazione:

$$l = \frac{4V}{S} \quad (8.17)$$

in cui V è il volume della sala e S l'area totale delle superfici.

- *Global Estimate*: è il più accurato dei metodi e consente di ottenere risultati di alta qualità.

Questo metodo calcola i tempi di riverberazione globali T_{20} , T_{30} , il volume della sala, il cammino libero medio e genera una stima delle curva di decadimento. Sono pertanto ottenibili i valori di tutti i più comuni parametri acustici, sia monoaurali sia binaurali. Vengono emesse delle particelle in direzioni casuali dalla sorgente e riflesse utilizzando il metodo di riflessione “late ray”. Odeon registra la perdita di energia per ogni particella, che si verifica a causa dell'assorbimento delle superfici della sala e dell'aria, in funzione del tempo. Sommando i risultati di molte particelle otteniamo una funzione del decadimento globale dell'energia della sala. Se alcuni tempi di riverberazione sono pari a 0, l'Impulse response lenght (lunghezza della risposta all'impulso sonoro) impostata nella finestra di Room Setup (impostazione della sala) è senz'altro troppo breve.

Per quanto riguarda invece il calcolo della risposta dalle sorgenti ai ricevitori, al fine di ottenere i risultati per ricevitori singoli, multipli o griglie inseriti nei job (lavori, operazioni che si vuole il programma compia), viene usato un metodo di calcolo ibrido, in cui la prime riflessioni (early reflections) sono trattate utilizzando una mescolanza del modello a “sorgenti fittizie” (image sources) e del Ray tracing e le ultime riflessioni (late reflections) sono elaborate con l'utilizzo di uno speciale processo di Ray tracing che simula le riflessioni diffuse. I contributi del suono diretto e riflesso sono raccolti nel punto di ricezione permettendo il calcolo della risposta di ricevitori singoli, multipli e griglie.

Per quanto riguarda il Ray tracing di sorgenti puntiformi, i raggi prodotti vengono emessi in ogni direzione. Una volta emessi dalla sorgente, i raggi vengono seguiti nel percorso di riflessione nella sala e i dati geometrici vengono immagazzinati (come il numero di superfici intercettate con i loro coefficienti di assorbimento e di diffusione, i punti di incidenza, etc...). Il criterio che interrompe il tracciamento di un determinato raggio è normalmente di tipo geometrico: la lunghezza del percorso compiuto (impostato nel parametro Impulse response lenght) oppure il numero di riflessioni compiute (Max reflection order). I dati geometrici prodotti vengono progressivamente scritti sull'hard disk ed utilizzati in seguito per stabilire le riflessioni che interessano un determinato punto.

Le prime riflessioni dei raggi (Early Reflection) vengono considerate speculari se la riflessione in questione è di ordine inferiore o equivalente al valore impostato di Transition order (ordine di transizione) e quindi Odeon genera delle sorgenti fittizie. Sopra tale valore invece i raggi vengono riflessi con il metodo di Late ray (ultima fase del raggio). Ogni volta che un raggio tardivo è riflesso da una superficie viene generata una piccola sorgente, che ha un fattore di direttività di $4\cos\theta$ (secondo le leggi Lambertiane). Il processo delle ultime riflessioni non produce una crescita esponenziale del numero di riflessioni, come ci si potrebbe aspettare in una sala reale, ma mantiene la medesima densità di riflessioni in tutti i calcoli al fine di diminuire i tempi di elaborazione.

Uno dei vantaggi del metodo di Ray tracing utilizzato da Odeon, confrontato con i metodi tradizionali come il tracciamento conico o piramidale, è che non c'è la necessità che i raggi giungano vicini al ricevitore per dare un contributo. Così, persino in una doppia sala, è possibile ottenere un ragionevole numero di riflessioni per il ricevitore (necessarie per avere un risultato che sia statisticamente affidabile) con solo un modesto numero di raggi. Questo è il risultato di un preciso bilanciamento tra affidabilità dei risultati e tempo di elaborazione. I passaggi fondamentali ai fini di una corretta analisi di una sala sono in ordine cronologico:

1. creazione del modello tridimensionale. Il modello deve contenere solo entità tridimensionali, quindi è necessario realizzare un modello tridimensionale dell'ambiente (in formato dxf). In questi modelli le componenti architettoniche vengono descritte con un grado di dettaglio che trascura in genere le parti più minute: questo va fatto sia per limitare il tempo di calcolo sia per le approssimazioni insite negli algoritmi del calcolo. Sono da evitarsi anche superfici troppo piccole, che in buona parte delle frequenze utili non rispettano le condizioni di validità dell'acustica geometrica. E' fondamentale assicurarsi che il modello non sia mancante di superfici, anche estremamente piccole, per evitare la fuoriuscita di raggi sonori che comprometterebbero l'affidabilità della simulazione. Un altro errore è quello di creare superfici sovrapposte: a quel punto, nel calcolo non è chiaro quale coefficiente di assorbimento acustico assegnare alla porzione in sovrapposizione;
2. importazione del modello in Odeon;
3. impostazione corretta del Room Setup;
4. inserimento di sorgenti e ricevitori. E' necessario comunicare al programma la posizione, l'orientamento e le caratteristiche acustiche delle sorgenti sonore presenti e dei ricevitori;
5. assegnazione dei materiali alle superfici. Ai vari elementi che costituiscono il disegno devono essere associate le caratteristiche acustiche dei materiali a cui questi si riferiscono. E' infatti ovvio che il software di previsione neces-

siti di conoscere i materiali presenti nell'ambiente al fine di poter considerare in maniera opportuna il comportamento delle onde sonore che incidono sulle pareti, sul pavimento o su una qualsiasi superficie presente. Per quanto riguarda i materiali di rivestimento vengono forniti database contenenti i dati acustici (coefficienti di assorbimento) di svariati materiali alle diverse bande di frequenza; inoltre possono essere aggiornati dall'utente con eventuali nuovi elementi di cui si conoscono le caratteristiche. Modificando i materiali di rivestimento è possibile valutare direttamente l'adeguatezza degli interventi di trattamento fonoassorbente delle pareti;

6. analisi rapida tramite Quick estimate;
7. inserimento della griglia di calcolo, finalizzata alla restituzione di mappe di distribuzione dei diversi parametri acustici;
8. creazione dei job;
9. lancio del calcolo;
10. restituzione dei risultati.

Prima di procedere con qualunque tipo di analisi acustica, è fondamentale procedere con una corretta taratura del modello. In tal senso è necessaria la disponibilità dei rilievi acustici: la fase di taratura del modello di previsione numerica deriva dalla necessità di riprodurre fedelmente la realtà dello stato di fatto e ritrovare esattamente le condizioni di funzionamento dell'ambiente che si sta esaminando. Una volta realizzato un modello matematico affidabile, e quindi rappresentativo dell'ambiente considerato, è possibile operare su questo e simulare eventuali modifiche (variazioni della geometria, dei materiali e della sorgente), al fine di prevedere come queste variazioni potranno influenzare il campo sonoro.

Normalmente per tarare il modello, analogamente a quanto indicato da Barron per la misura in opera dalla ISO3382, si utilizzano l'indice *EDT* e l'indice di chiarezza C_{80} .

CAPITOLO 9 - DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI ACUSTICI OGGETTIVI: CAMPAGNA DI MISURE E SIMULAZIONI ACUSTICHE

La determinazione dei parametri acustici oggettivi per l'analisi psicoacustica oggetto della presente tesi è stata effettuata attraverso una campagna di rilievi acustici, che ha riguardato 5 sale per lo spettacolo, tra teatri ed auditoria.

Il più importante riferimento normativo per delle misurazioni del tipo considerato in questo contesto è la norma UNI EN ISO 3382.

I risultati delle campagne di misure sono stati utilizzati per la taratura dei modelli tridimensionali delle sale analizzate, implementati nel software di simulazione Odeon 12. In questo modo, attraverso le simulazioni, si sono ottenute informazioni sui parametri acustici in tutti i punti della sala, avendo così una casistica molto più ampia di quella che si avrebbe avuto con le sole misure in campo.

Nel presente Capitolo vengono presentati i soli risultati delle simulazioni utilizzati per la valutazione psicoacustica delle sale: la documentazione completa viene riportata in Appendice A.

9.1. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

Fatto costruire nel 1672 dal ricco budriese Paolo Sgarzi, che lo apriva al pubblico per rappresentazioni e balli, diventò di proprietà pubblica nel 1802, quando fu acquistato dal Consorzio dei Partecipanti, da cui il nome Consorziale. Al primo ottocento risale il rifacimento dell'interno in stile neoclassico, mantenuto fino ai primi decenni del '900. Per i gravi danni subiti durante la prima guerra mondiale, tra il 1924 e il 1928 il Consorzio lo ricostruì; venne ingrandita la sala e aumentata la capienza, riorganizzato il palcoscenico, che acquisì la forma attuale. Nei primi anni trenta del '900 il Consorzio della Partecipanza venne sciolto e la proprietà passò al Comune di Budrio.

Il restauro effettuato all'inizio del 2000 ha valorizzato l'intero edificio (Fig. 9.1).

I risultati presentati in questo capitolo si riferiscono alle misurazioni effettuate il 31 marzo 2012. Esse sono state ottenute utilizzando un segnale di sine sweep esponenziale tra 22 Hz e 22 KHz di frequenza, generato a 44100 Hz di frequenza di campionamento con una dinamica di 32 bit e usato per alimentare il sistema dodecaedro.

In Fig. 9.2 è visibile la strumentazione utilizzata. Le misure sono state effettuate durante il Corso di Alta Formazione “Spazializzazione acustica degli Auditoria”, organizzato dalla Facoltà di Ingegneria dell’Università di Bologna.



Fig. 9.1 – Teatro di Budrio, interno



Fig. 9.2 – Strumentazione di misura

In Fig. 9.3 sono visibili le posizioni dei diffusori e dei punti di ricezione scelti durante le misurazioni. Le registrazioni microfoniche sono state effettuate utilizzando contemporaneamente il registratore digitale A-format a 4 canali, il fonometro con due microfoni cardioidi e la testa artificiale binaurale.

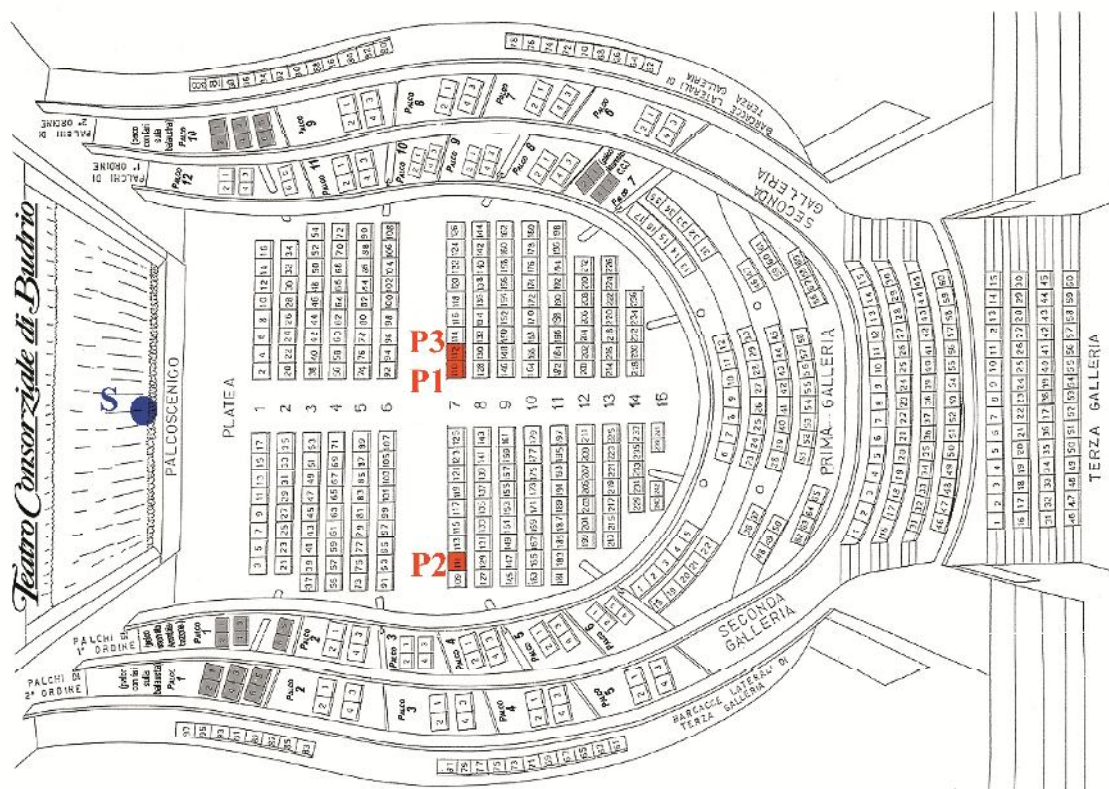


Fig. 9.3 – Punti di misura e posizione della sorgente

9.1.1. Risultati delle misurazioni

In Tab. 9.1, 9.2 e 9.3 sono riportati i risultati delle misurazioni nei tre punti di misura considerati.

PUNTO DI RICEZIONE P1 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.37	1.54	1.23	1.19	1.26	1.14	0.92	0.60
SPL (dB)	62.4	65.7	70.1	73.2	76.6	79.1	81.9	80.0
LF(80)	0.401	0.277	0.198	0.277	0.427	0.377	0.458	0.433

IACC	0.383	0.345	0.304	0.310	0.495	0.302	0.119	0.214
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tab. 9.1 – Valori dei parametri acustici misurati nel punto P1

PUNTO DI RICEZIONE P2 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.41	2.00	1.05	1.14	0.96	1.09	0.91	0.53
SPL (dB)	62.6	65.8	70.2	73.3	76.8	79.1	82.1	80.2
LF(80)	0.406	0.276	0.196	0.295	0.459	0.365	0.476	0.445
IACC	0.383	0.446	0.409	0.475	0.315	0.314	0.125	0.116

Tab. 9.2 – Valori dei parametri acustici misurati nel punto P2

PUNTO DI RICEZIONE P3 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.40	2.02	1.01	1.14	0.96	1.11	0.91	0.53
SPL (dB)	62.5	65.8	70.2	73.3	76.8	79.1	82.0	80.1
LF(80)	0.409	0.276	0.196	0.292	0.450	0.373	0.479	0.442
IACC	0.083	0.046	0.409	0.475	0.515	0.214	0.125	0.216

Tab. 9.3 – Valori dei parametri acustici misurati nel punto P3

Sono poi presentati i tempi di riverberazione riferiti al canale W del registratore digitale (il cui segnale è stato precedentemente trasformato in B-format) rivolto verso il palco, in banda d'ottava tra i 63 Hz e gli 8 KHz (Fig. 9.4).

Si nota come la risposta della sala sia molto simile nei tre punti in esame a tutte le frequenze. Alle medie frequenze (quelle di particolare interesse musicale) i tempi di riverberazione si mantengono tra 1 e 1.2 secondi, rendendo il Teatro di Budrio adatto alla musica operistica.

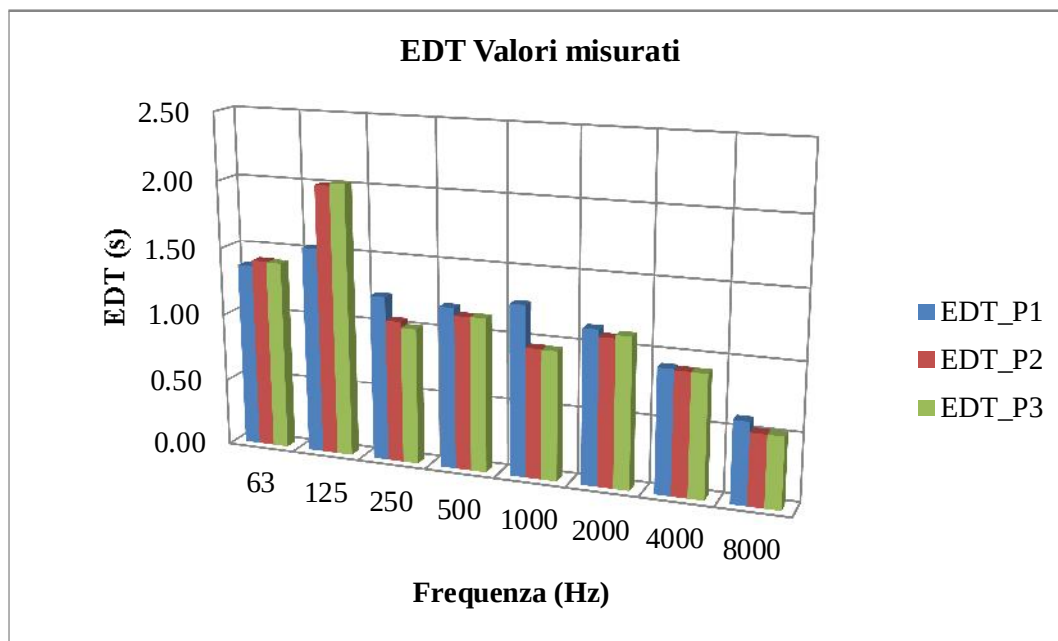


Fig. 9.4 – Valori dell'EDT nei punti di misura considerati

Il grafico in Fig. 9.5, invece, denota un andamento piuttosto uniforme del parametro LF , in particolare per le frequenze medio-alte. Ricordando che i valori del LF da considerare sono quelli medi tra i 500 e i 2000 Hz, nei tre punti di misura si hanno valori compresi tra 0.265 e 0.41. Poiché il valore ottimale del parametro è 0.3, si può concludere che il teatro presenta anche un'ottima spazialità.

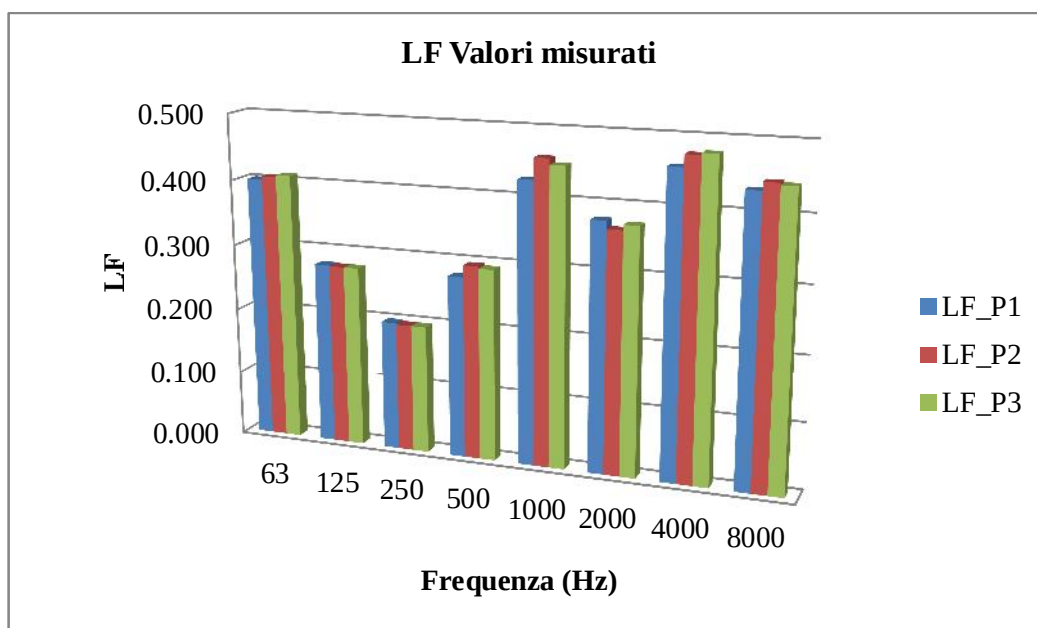


Fig. 9.5 – Valori del LF nei punti di misura considerati

Il grafico in Fig. 9.6 mostra l'andamento del Livello di pressione: i tre punti di misura hanno evidenziato valori del Livello di pressione praticamente identici (data anche la distanza molto simile della sorgente), il che indica una perfetta uniformità della sala.

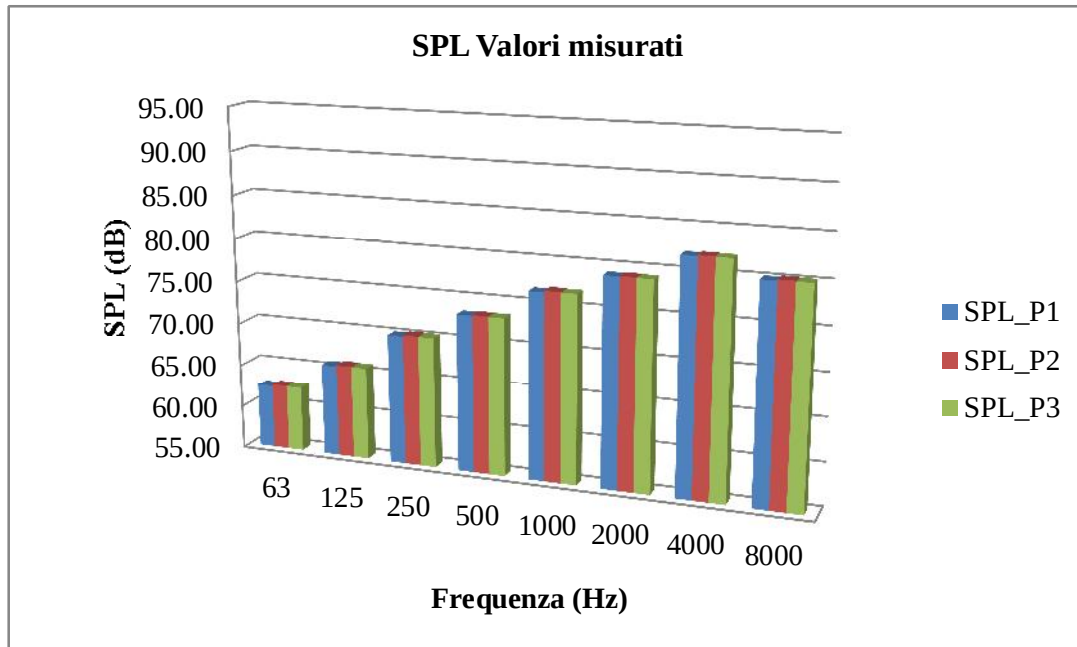


Fig. 9.6 – Valori del SPL nei punti di misura considerati

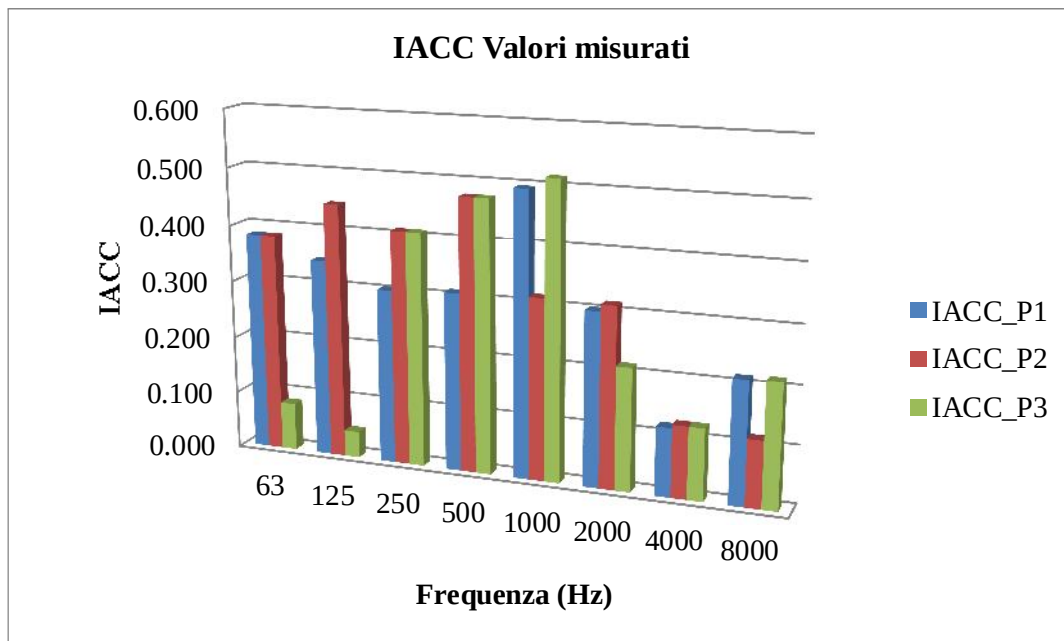


Fig. 9.7 – Valori della IACC nei punti di misura considerati

Infine vengono riportati gli andamenti in frequenza della *IACC* (Fig. 9.7): considerando che i valori alle basse e alle alte frequenze non sono indicativi, anche in questo caso i valori ottenuti durante le misurazioni sottolineano la bontà della sala, nonostante una certa disuniformità.

Come detto, i dati così ottenuti sono stati utilizzati per la taratura del modello tridimensionale. I parametri di confronto, a tale scopo, sono stati principalmente il Livello di pressione sonora e l'*EDT*.

9.1.2. Risultati delle simulazioni e confronto

Il modello digitale tridimensionale utilizzato per la simulazione della propagazione acustica all'interno della sala è stato costruito con il programma Autodesk AutoCAD a partire da piante e sezioni bidimensionali. Il progetto è stato costruito utilizzando soltanto entità di superficie 3DFaces (Fig. 9.8), ed è stato concepito trascurando i particolari di dimensione inferiore ai 40 cm, in quanto l'algoritmo di Ray Tracing è ideato in modo da rendere inutile una precisione maggiore nel disegno. Il modello definitivo è formato da 793 superfici, costituite di 7 materiali differenti.

La potenza sonora della sorgente onnidirezionale considerata è di 102 dB. Per il calcolo è stato utilizzato il Room setup "Precision" (Fig. 9.9).

Durante la simulazione sono stati utilizzati sia ricettori puntuali ad un'altezza di 1.2 m dal piano, posizionati come in Fig. 9.10, sia una griglia di calcolo con distanza tra i ricettori di 0.5 m (Fig. 9.11).

La taratura del modello è stata effettuata per rendere i risultati delle simulazioni congruenti con i dati sperimentali (Tab. 9.4, 9.5, 9.6); dato che non è stato possibile disporre dei valori esatti dei coefficienti di assorbimento dei materiali della sala, si sono utilizzati dei coefficienti di materiali simili, reperibili dal Database interno al software di simulazione, riadattandoli leggermente in modo da ottenere dei risultati compatibili con le misure.

Vengono poi presentati i risultati delle simulazioni confrontati con le misurazioni effettuate in sala per i punti di ricezione scelti. La descrizione di ogni parametro comprende un grafico che ne raffigura l'andamento medio in funzione della frequenza (in banda d'ottava), comparandolo con quello delle misurazioni; inoltre è presentata, per ogni parametro, una mappa di distribuzione all'interno della sala alla frequenza rappresentativa di 1000 Hz. I parametri sono l'*EDT*, il livello di pressione, il *LF* e la *IACC*, cioè quelli che verranno utilizzati per la valutazione psicoacustica della sala.

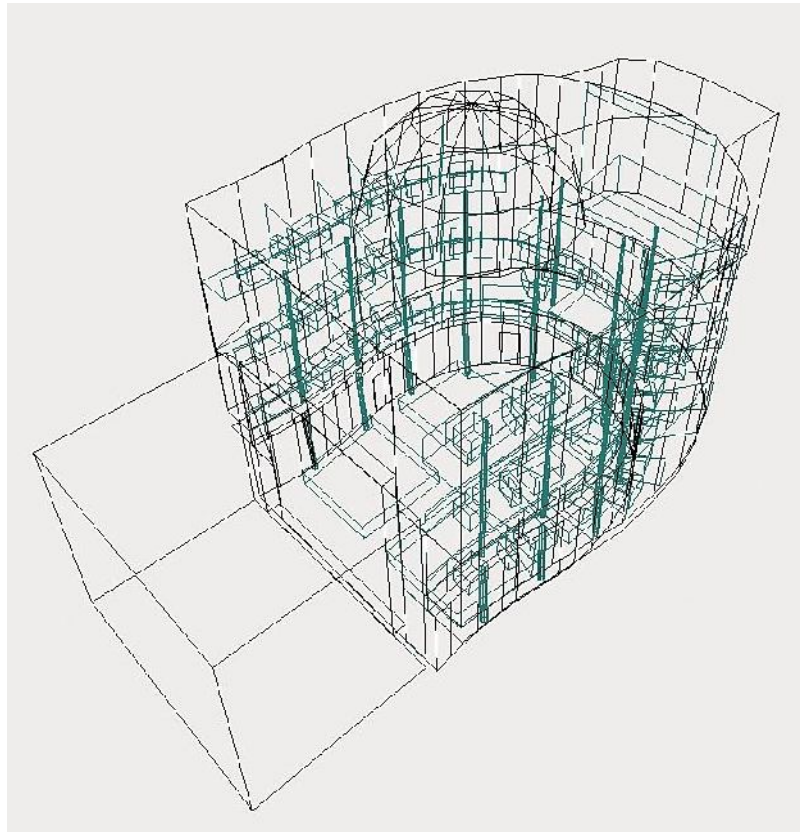


Fig. 9.8 – Modello 3D implementato in Odeon Auditorium

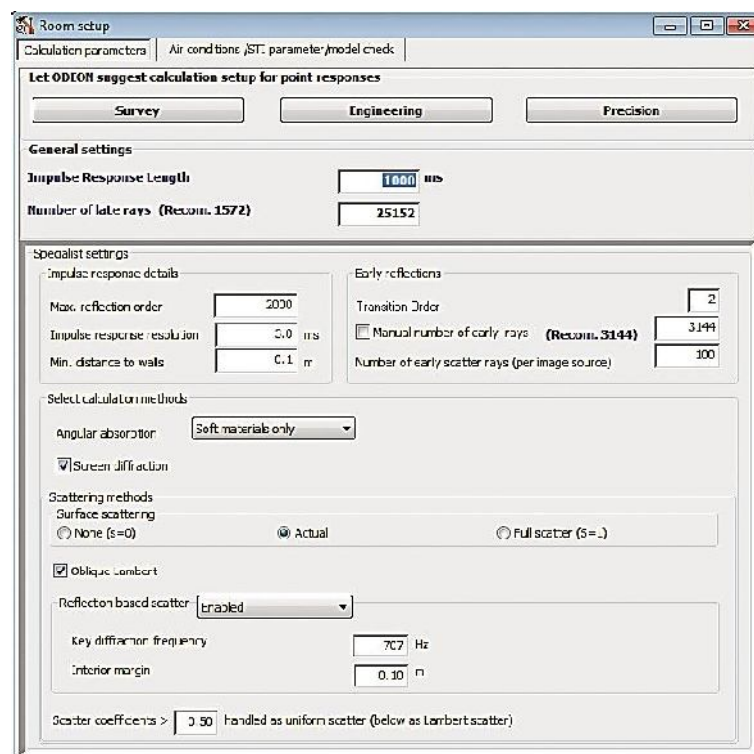


Fig. 9.9 – Room setup utilizzato per il Teatro di Budrio

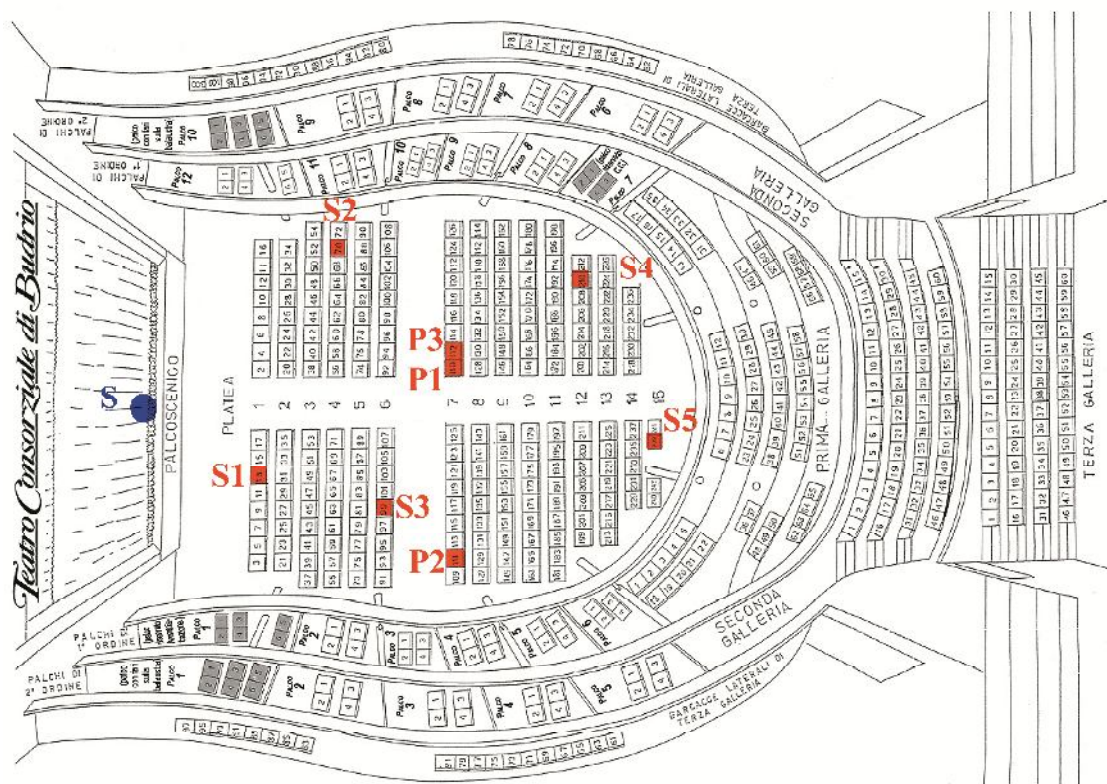


Fig. 9.10 – Posizionamento dei ricettori puntuali

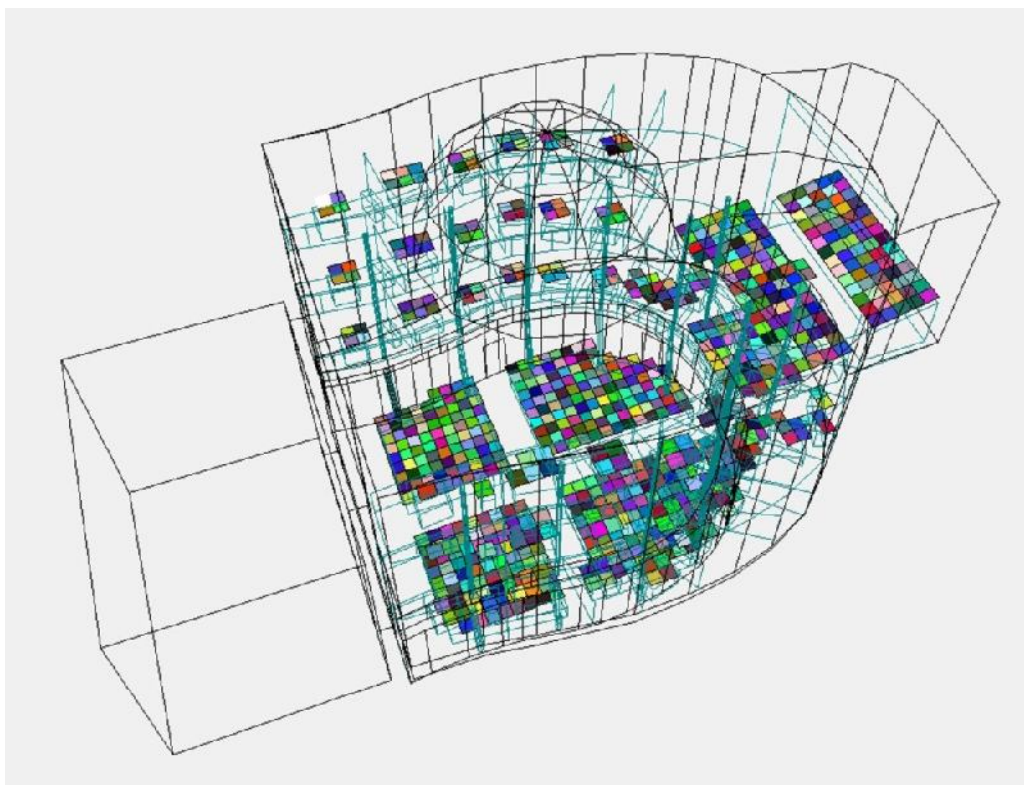


Fig. 9.11 – Griglia di calcolo

PUNTO DI RICEZIONE P1								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	0.78	0.94	1.11	1.19	1.25	1.20	1.11	0.73
SPL (dB)	78.0	78.6	78.8	78.3	77.8	77.4	77.0	74.8
LF(80)	0.363	0.363	0.355	0.338	0.322	0.324	0.322	0.280
IACC	0.280	0.365	0.218	0.430	0.528	0.343	0.084	0.075

Tab. 9.4 – Risultati delle simulazioni nel punto di ricezione P1 (posto 110)

PUNTO DI RICEZIONE P2								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	0.96	1.09	1.2	1.21	1.26	1.22	1.13	0.78
SPL (dB)	76.6	77.4	77.7	77.2	76.6	76.2	75.5	73.3
LF(80)	0.211	0.23	0.259	0.277	0.293	0.298	0.294	0.254
IACC	0.321	0.567	0.448	0.486	0.395	0.301	0.110	0.052

Tab. 9.5 – Risultati delle simulazioni nel punto di ricezione P2 (posto 111)

PUNTO DI RICEZIONE P3								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	0.91	1.04	1.17	1.23	1.28	1.24	1.15	0.78
SPL (dB)	76.8	77.6	77.9	77.4	76.9	76.6	76.1	73.6
LF(80)	0.397	0.404	0.421	0.417	0.404	0.4	0.393	0.341
IACC	0.081	0.07	0.393	0.403	0.508	0.318	0.122	0.107

Tab. 9.6 – Risultati delle simulazioni nel punto di ricezione P3 (posto 112)

In Fig. 9.12 è raffigurato l'andamento dei valori dell'*EDT* alla frequenza di 500 Hz per i punti di misurazione analizzati, confrontando i risultati ottenuti con la simulazione con i valori misurati in sala.

Dai grafici si nota un'ottima corrispondenza tra i risultati della simulazione e quelli delle misurazioni, con uno scarto massimo di 0.09 s. In Fig. 9.13 è rappresentata la mappa dello stesso parametro alla frequenza di 1000 Hz; si nota come le differenze da punto a punto siano minime anche nelle simulazioni.

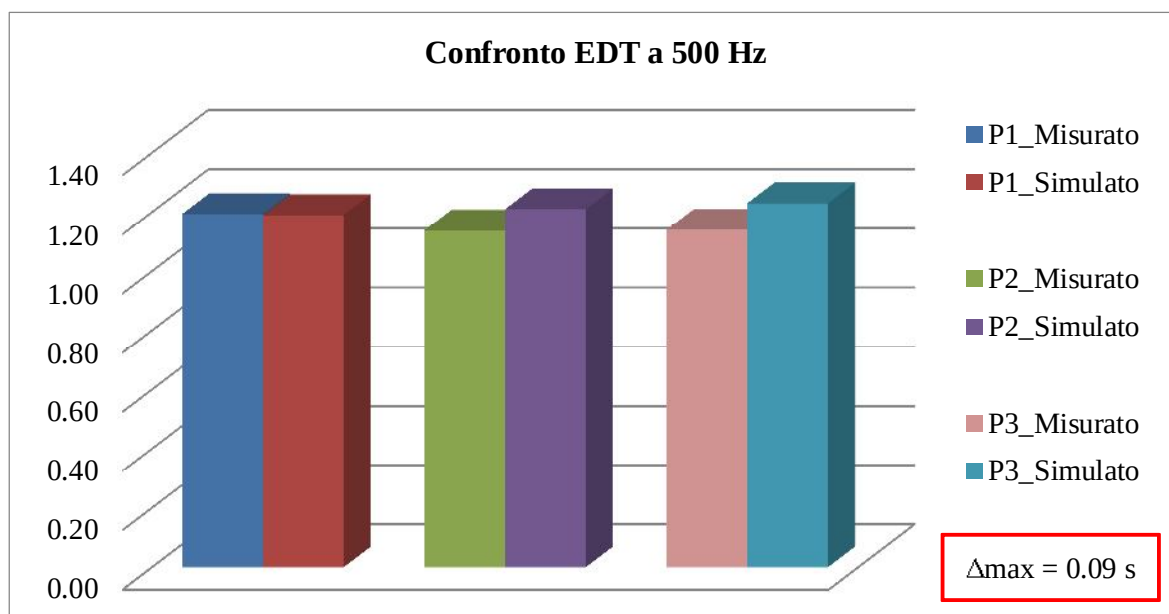


Fig. 9.12 – Confronto dei valori dell'EDT misurato e simulato a 500 Hz

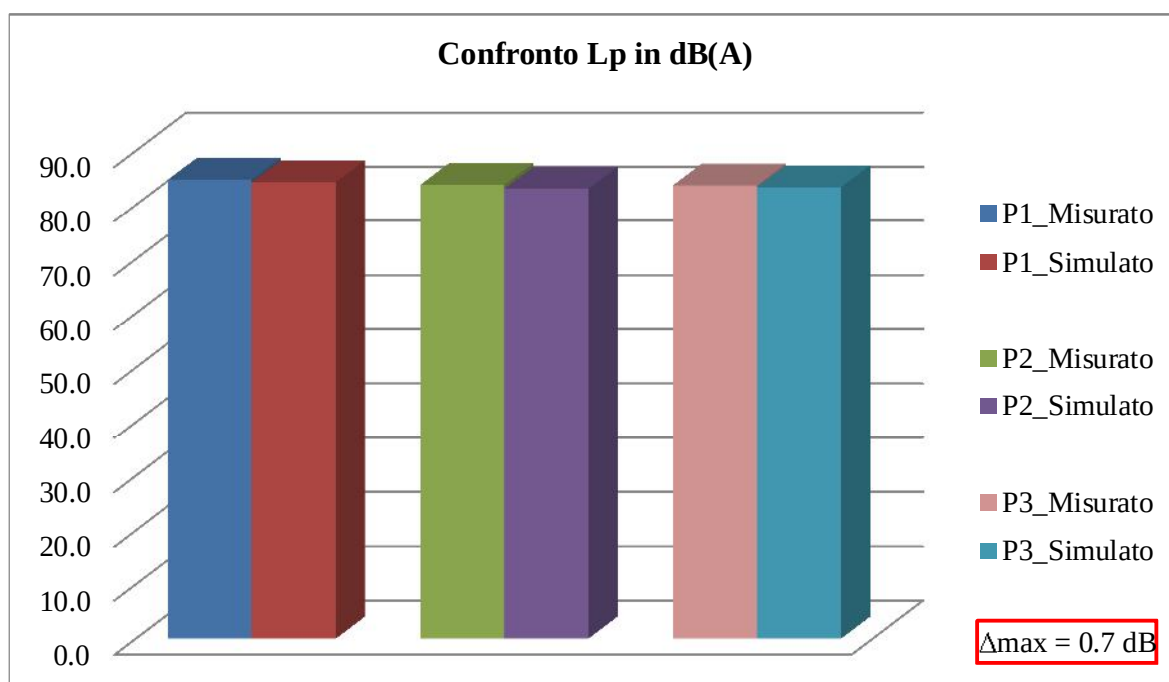


Fig. 9.14 – Confronto dei valori del SPL misurato e simulato in dB(A)

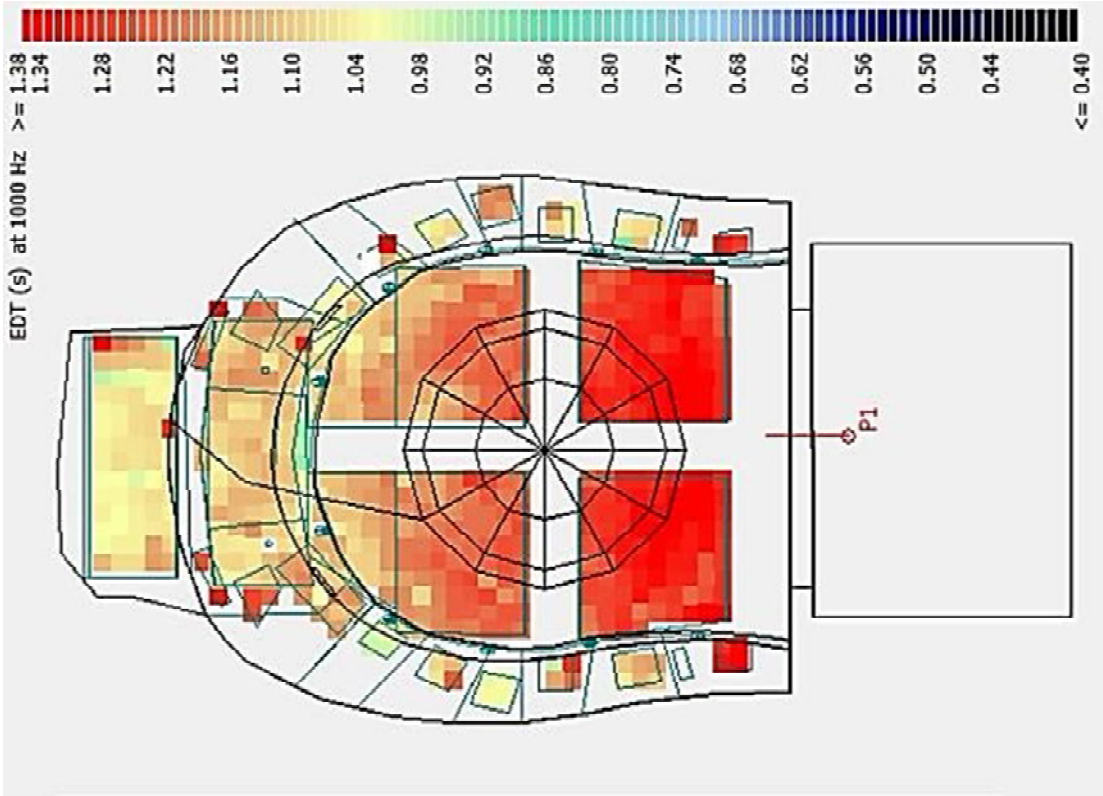


Fig. 9.13 – Mappa di distribuzione dell'EDT a 1000 Hz

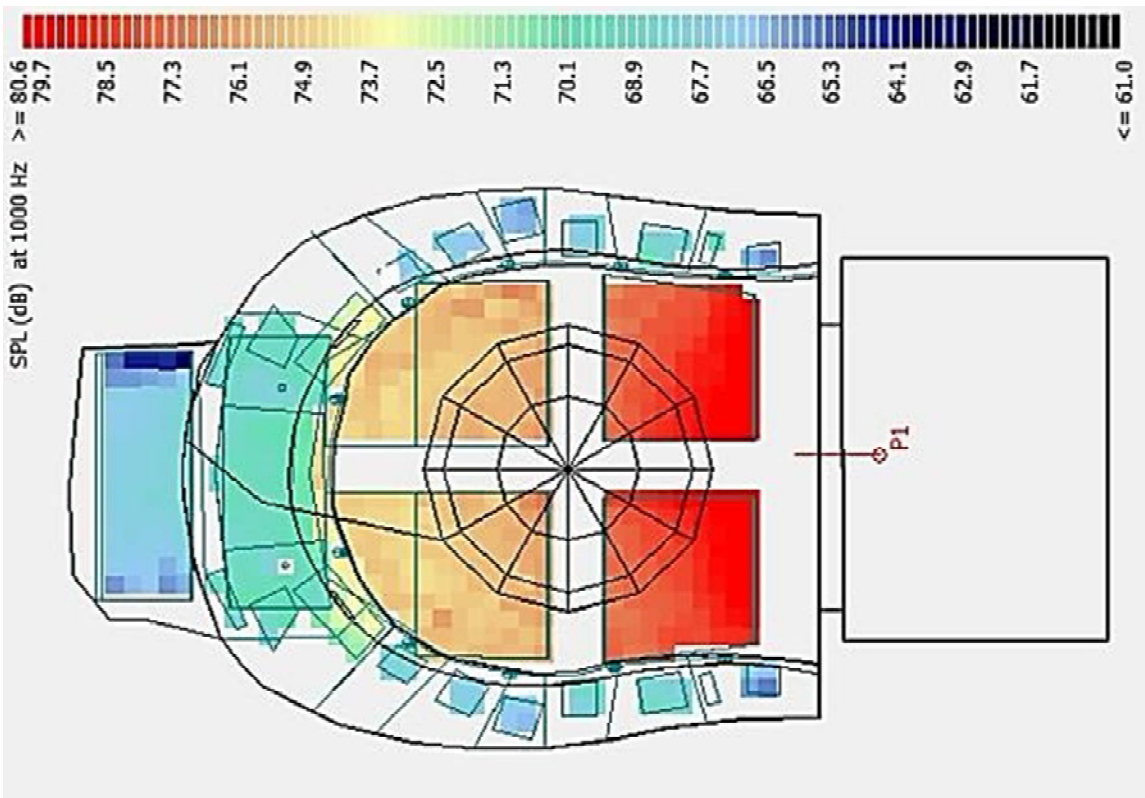


Fig. 9.15 – Mappa di distribuzione del SPL a 1000 Hz

Analogamente per il livello di pressione, il confronto evidenzia delle minime differenze (Fig. 9.14).

La mappa di distribuzione mostra una buona uniformità in platea, mentre si evidenzia una sensibile differenza tra questa e le gallerie sovrastanti (Fig. 9.15).

Per quanto riguarda il parametro di spazialità LF alle medie frequenze, che sono quelle significative, la concordanza tra valori misurati e simulati è accettabile (Fig. 9.16).

La mappa di distribuzione in Fig. 9.17 mostra come i valori del LF siano molto buoni in tutta la sala, con la sola eccezione delle prime file della platea, che vedono una netta diminuzione dell'energia laterale.

Infine nel caso del parametro binaurale relativo alla $IACC$, come nel caso del Lateral Fraction, la concordanza è molto buona tra i valori simulati e quelli misurati alle medie frequenze (Fig. 9.18).

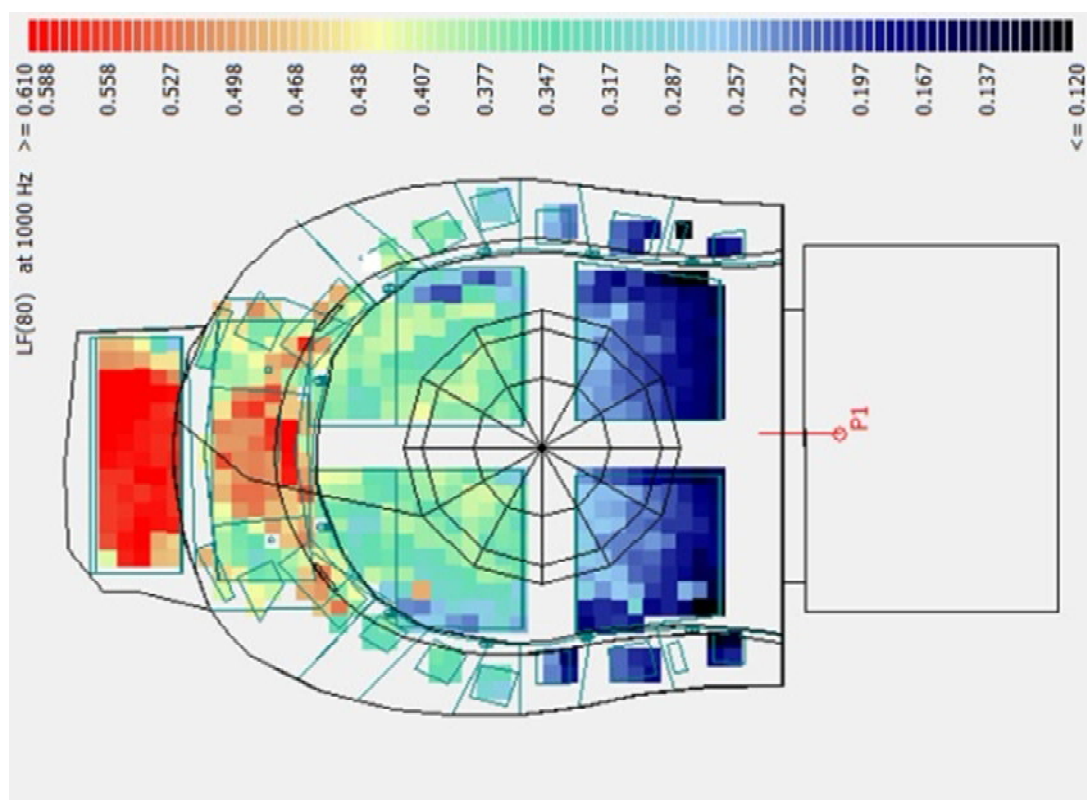


Fig. 9.17 – Mappa di distribuzione del LF a 1000 Hz

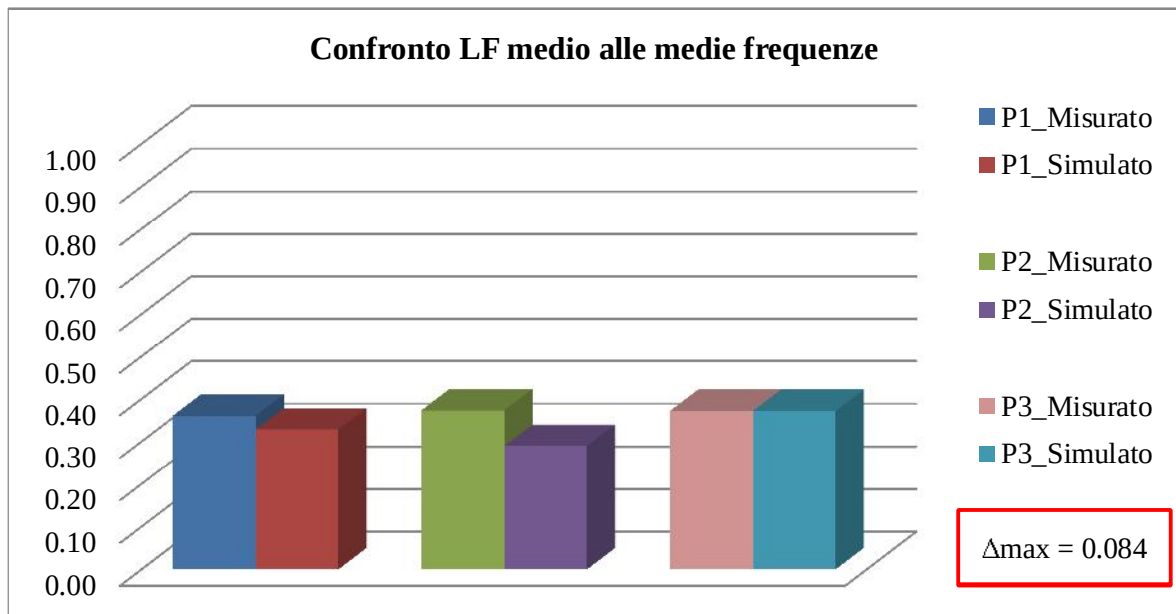


Fig. 9.16 – Confronto dei valori del *LF* misurato e simulato nel punto di ricezione P1 alle medie frequenze

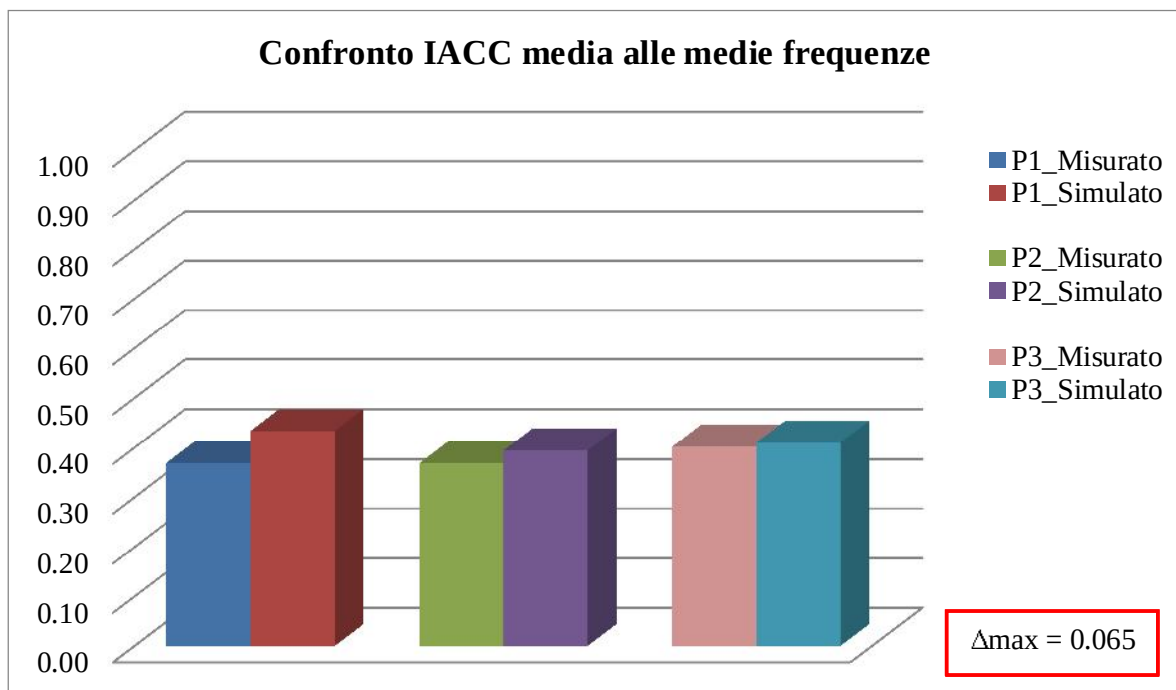


Fig. 9.18 – Confronto dei valori della *IACC* misurata e simulata nel punto di ricezione P1 alle medie frequenze

A titolo di esempio si riportano i confronti dei valori dei parametri simulati e misurati a tutte le frequenze per il solo punto di ricezione P1 (da Fig. 9.19 a Fig. 9.22).

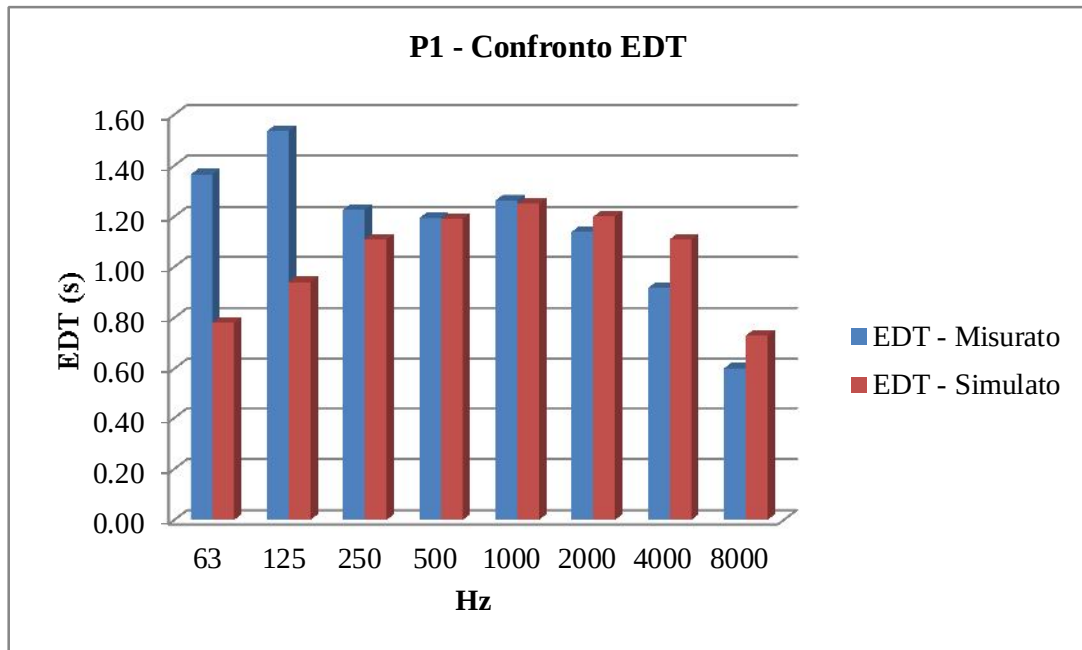


Fig. 9.19 – Confronto dei valori dell'EDT misurato e simulato nel punto di ricezione P1

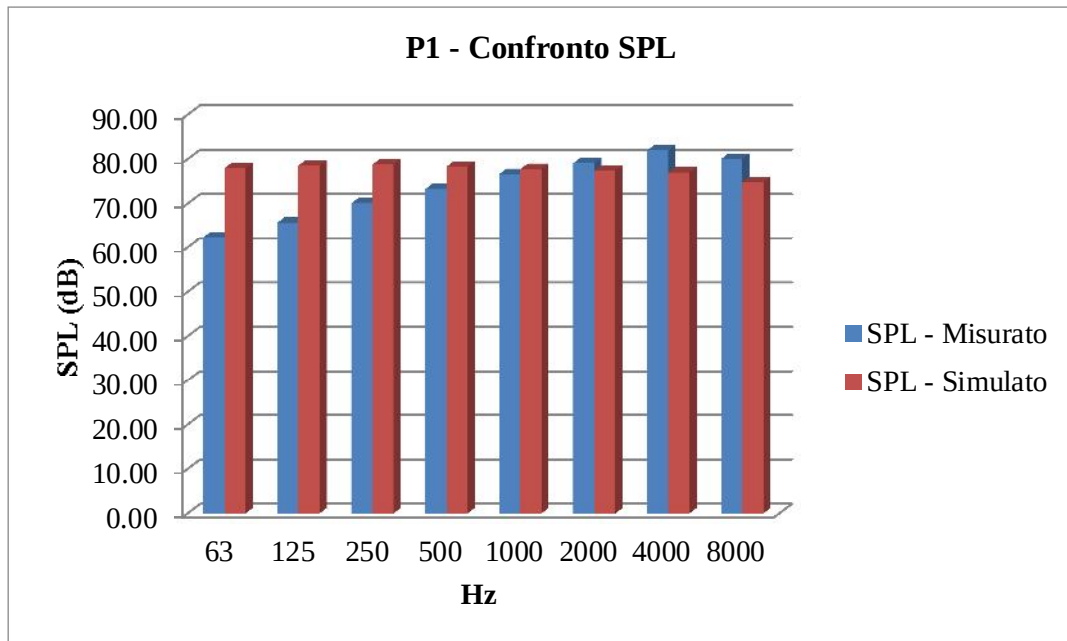
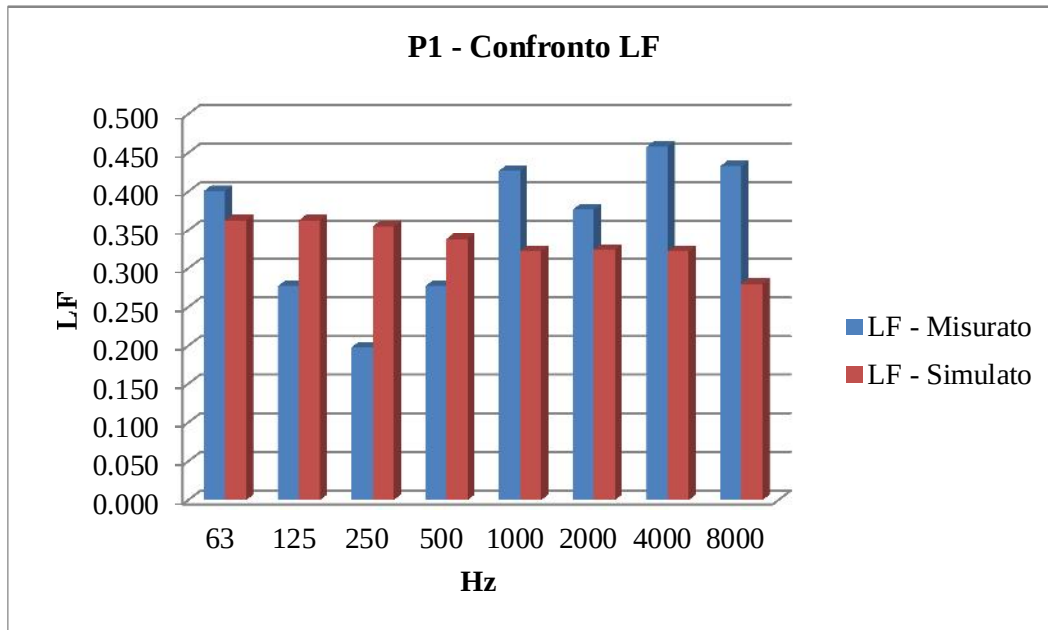
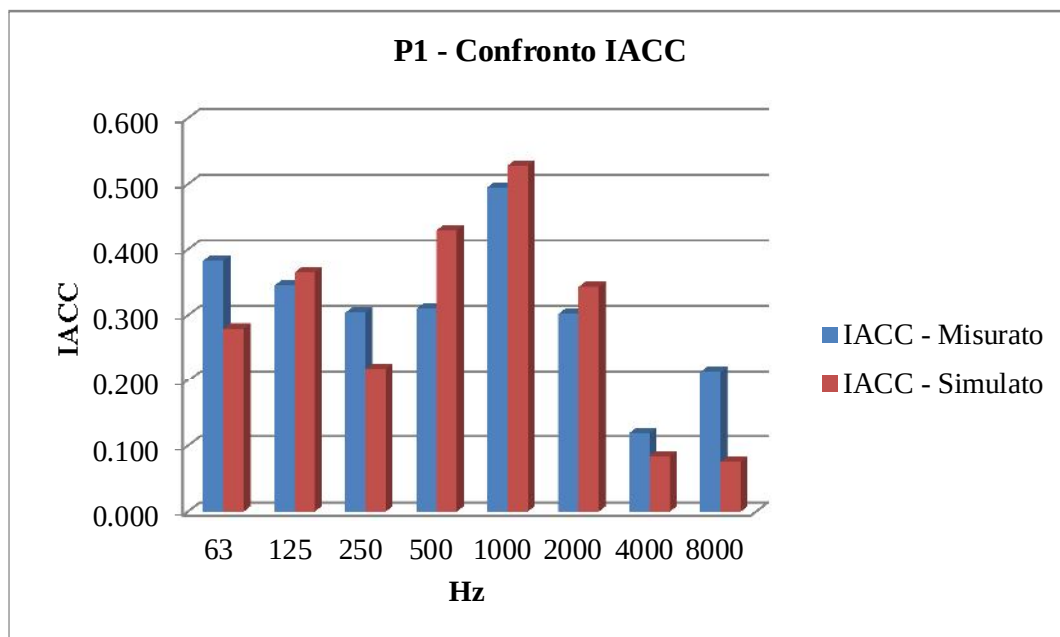


Fig. 9.20 – Confronto dei valori del SPL misurato e simulato nel punto di ricezione P1

Fig. 9.21 – Confronto dei valori del *LF* misurato e simulato nel punto di ricezione P1Fig. 9.22 – Confronto dei valori della *IACC* misurata e simulata nel punto di ricezione P1

L'analisi del reflectogramma (a titolo esemplificativo si riporta in Fig. 9.23 quello relativo al punto di misura P1 alla frequenza di 1000 Hz), evidenzia tempi di ritardo della prima riflessione compresi tra 12 e 30 ms, che assicurano la totale assenza di eco.

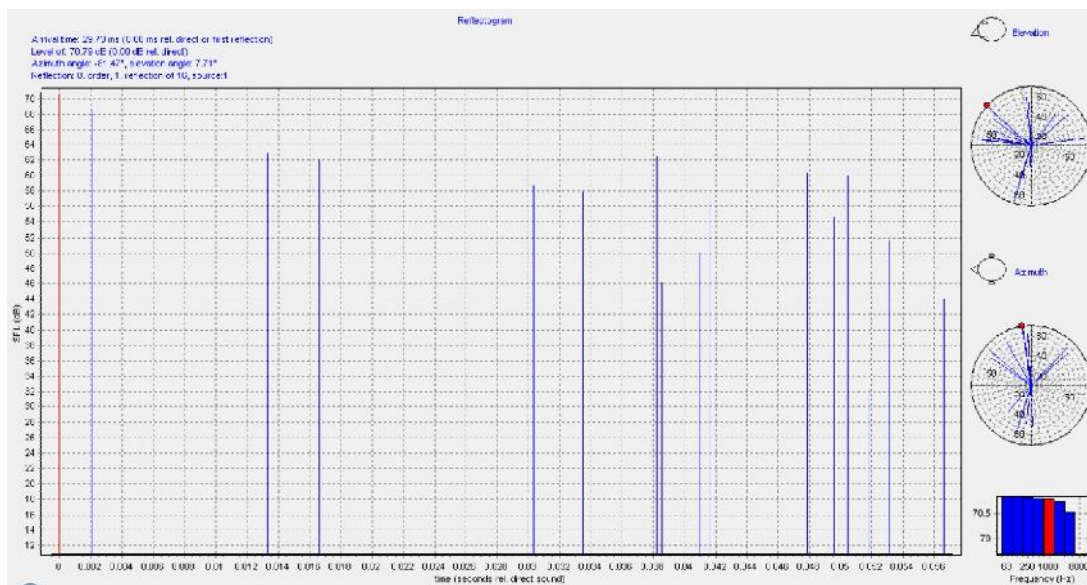


Fig. 9.23 – Reflectogramma del punto P110 a 1000 Hz

9.2. Il Teatro Olimpico di Roma

Il Teatro Olimpico di Roma, attivo come Cine –Teatro Olimpico dal 1936 e come Teatro Olimpico dal 1981, è uno dei più importanti teatri storici di Roma. È ubicato in Piazza Gentile da Fabriano sul Lungotevere Flaminio, all'altezza del nuovo Ponte della Musica.

Il teatro ospita, all'interno delle proprie stagioni, spettacoli di danza, prosa, commedia, musical, cabaret e *one-man-show* ed è anche la sede della maggior parte degli spettacoli organizzati dall'Accademia Filarmonica Romana, prestigiosa istituzione musicale della capitale.

Il teatro è stato recentemente ristrutturato con un adeguamento tecnico alle più moderne esigenze dello spettacolo e con un restauro che ha portato alla luce l'originario aspetto architettonico di stile tardo – razionalista.

La costruzione è realizzata in cemento armato, con solai di tipo misto e murature non portanti in mattoni pieni o forati o pietrame. Le facciate sono nel tipico stile dell'epoca, con largo impiego di travertino sia nell'altissima fascia di zoccolo basamentale, che nelle riquadrature dei vani di ingresso e delle finestre.

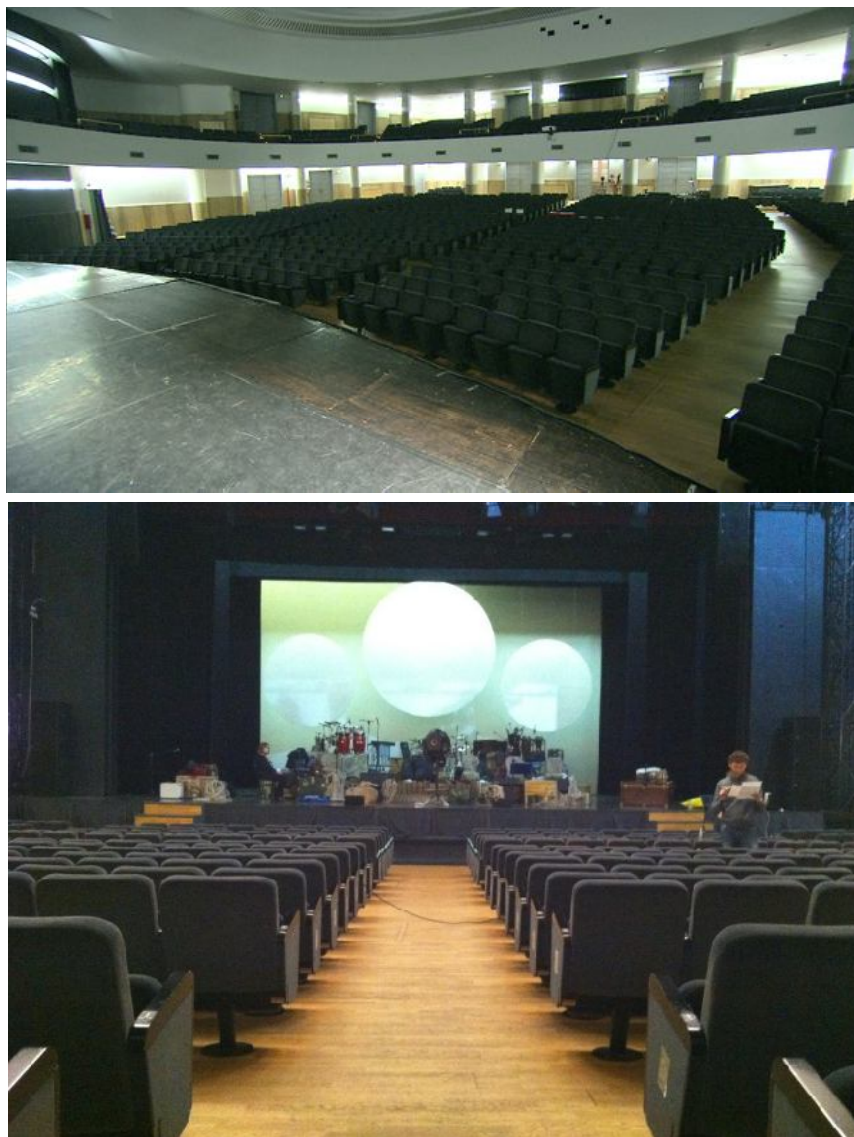


Fig. 9.24 – Foto del Teatro Olimpico di Roma

La sala è importante (1410 posti) ed è attrezzata per ospitare manifestazioni teatrali e musicali, oltre che per l'attività cinematografica; è molto larga e arredata con poltrone disposte ad anfiteatro. I posti in platea sono 966, disposti nella cavea in pendenza su linee a quota costante, ad anfiteatro. La galleria ha un'ampia forma a ferro di cavallo con le gradinate dei posti su linee curvilinee: ci sono 444 posti. Il palcoscenico misura circa 14 metri di profondità per 28 di larghezza, con pavimento in legno smontabile e fossa per l'orchestra (Fig. 9.24).

La struttura è provvista anche di un foyer a rotonda circolare, ampi corridoi e spazi interni sia a pianterreno che in galleria al piano rialzato. Al loro interno è ancora possibile ammirare alcune realizzazioni scenografiche utilizzate per importanti spettacoli del passato.

I risultati presentati si riferiscono alle misurazioni effettuate il 20 marzo 2013. Esse sono state ottenute utilizzando un segnale di sine sweep esponenziale tra 22 Hz e 22 KHz di frequenza, generato a 44100 Hz di frequenza di campionamento con una dinamica di 32 bit e usato per alimentare il sistema dodecaedro.

In Fig. 9.25 sono visibili le posizioni dei diffusori e dei punti di ricezione scelti durante le misurazioni. Le registrazioni microfoniche sono state effettuate utilizzando contemporaneamente il registratore digitale A-format a 4 canali, il fonometro con due microfoni cardioidi e la testa artificiale binaurale.

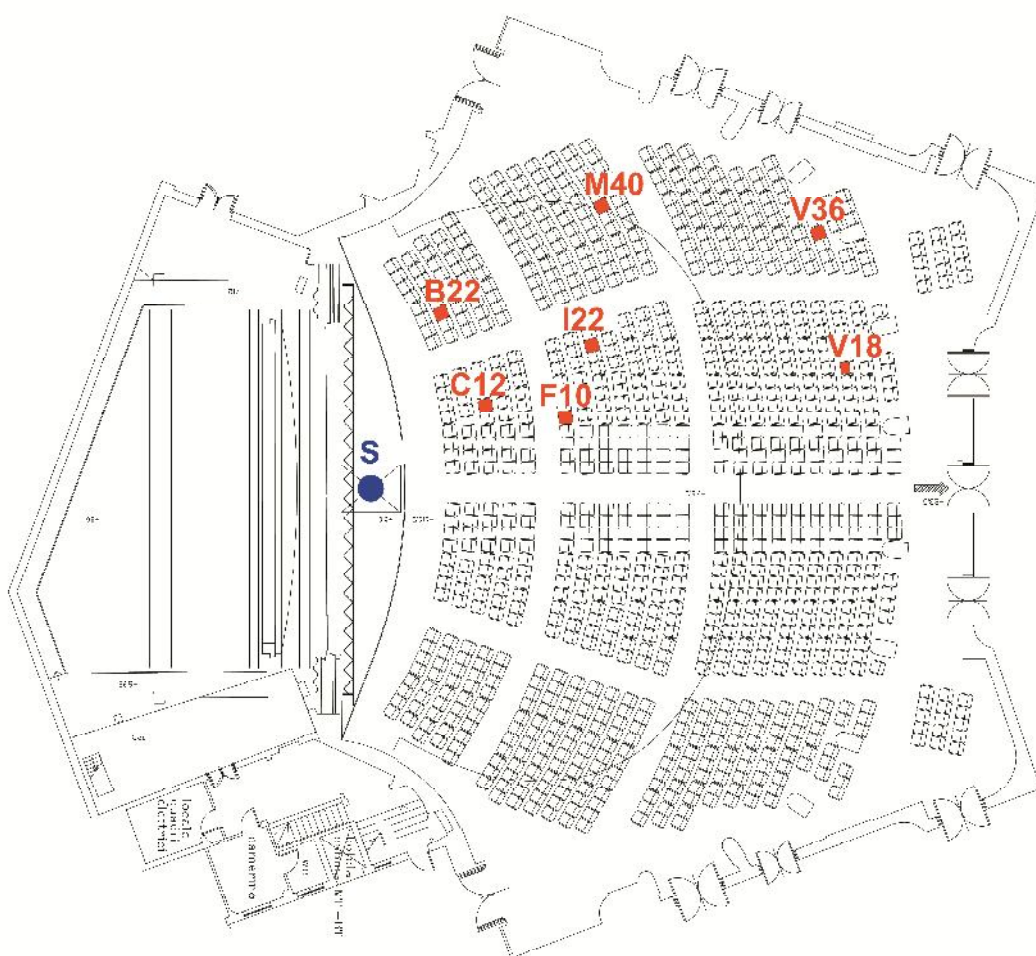


Fig. 9.25 – Punti di misura e posizione della sorgente

9.2.1. Risultati delle misurazioni

In Tab. 9.7 sono riportati i risultati delle misurazioni nei punti di misura considerati per i soli parametri acustici di interesse.

Punto di ricezione B22 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.00	2.14	1.21	1.22	1.50	1.49	1.88	1.20
SPL (dB)	77.8	77.3	77.0	71.3	73.3	74.3	73.1	72.5
LF(80)	0.136	0.114	0.110	0.045	0.094	0.045	0.057	0.019
IACC	0.569	0.460	0.544	0.527	0.336	0.336	0.145	0.145
Punto di ricezione C12 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.00	1.13	1.02	1.06	1.50	1.48	1.70	1.01
SPL (dB)	75.0	75.7	76.1	72.0	73.7	72.5	72.0	70.6
LF(80)	0.123	0.105	0.053	0.067	0.038	0.023	0.017	0.016
IACC	0.482	0.407	0.390	0.299	0.281	0.391	0.345	0.345
Punto di ricezione F10 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.27	1.71	1.93	1.32	1.38	1.35	1.40	1.23
SPL (dB)	71.2	73.0	74.8	73.9	73.2	71.3	72.7	73.2
LF(80)	0.121	0.053	0.042	0.072	0.058	0.021	0.077	0.027
IACC	0.550	0.552	0.590	0.431	0.481	0.591	0.545	0.145
Punto di ricezione I22 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.47	2.18	1.18	1.12	1.17	1.16	1.22	1.08
SPL (dB)	74.	74.6	74.3	72.5	71.3	71.7	71.1	70.4
LF(80)	0.359	0.561	0.643	0.153	0.232	0.200	0.400	0.146
IACC	0.201	0.166	0.490	0.349	0.336	0.391	0.391	0.145
Punto di ricezione M40 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.20	1.17	1.39	1.21	1.26	1.35	1.34	1.08

SPL (dB)	74.9	74.5	73.8	70.0	69.9	68.8	70.8	68.
LF(80)	0.110	0.473	0.383	0.142	0.022	0.018	0.029	0.030
IACC	0.246	0.488	0.635	0.572	0.636	0.436	0.545	0.445
Punto di ricezione V18 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.51	1.50	1.47	1.07	1.05	1.03	1.06	1.03
SPL (dB)	71.1	72.5	71.5	69.8	67.2	66.0	66.3	67.0
LF(80)	0.393	0.183	0.478	0.229	0.304	0.277	0.088	0.019
IACC	0.398	0.198	0.294	0.272	0.536	0.491	0.345	0.145
Punto di ricezione V36 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.45	1.43	1.42	1.08	1.33	1.41	1.71	1.14
SPL (dB)	69.6	71.2	69.4	69.4	61.8	65.5	63.3	59.2
LF(80)	0.212	0.405	0.500	0.165	0.149	0.124	0.151	0.094
IACC	0.550	0.490	0.290	0.249	0.436	0.391	0.391	0.145

Tab. 9.7 – Risultati delle misurazioni nei punti di ricezione considerati

Sono poi presentati i tempi di riverberazione riferiti al canale W del registratore digitale (il cui segnale è stato precedentemente trasformato in B-format) rivolto verso il palco, in banda d'ottava tra i 63 Hz e gli 8 KHz (Fig. 9.26). Dato l'elevato numero dei punti di misura, per una maggiore chiarezza del grafico, vengono riportati i valori medi.

Si nota come la risposta della sala sia molto simile nei punti in esame. Alle medie frequenze (quelle di particolare interesse musicale) i tempi di riverberazione si mantengono tra 1 e 1.4 secondi. Il tempo di riverberazione ottimale per la sala considerata è di 1.5 s. Per i soli punti di misura I22 e V18, l'EDT presenta dei valori troppo bassi, mentre nel resto della sala i tempi di riverberazione risultano abbastanza buoni.

Il grafico in Fig. 9.27, invece, denota un andamento disuniforme del parametro *LF*. Ricordando che i valori del *LF* da considerare sono quelli medi tra i 500 e i 2000 Hz, nei punti misura si hanno valori compresi tra 0.04 e 0.27. Soltanto i punti V18 e I22, pertanto, presentano valori accettabili: nel resto della sala la sensazione di spazialità è insufficiente, e quindi inaccettabile.

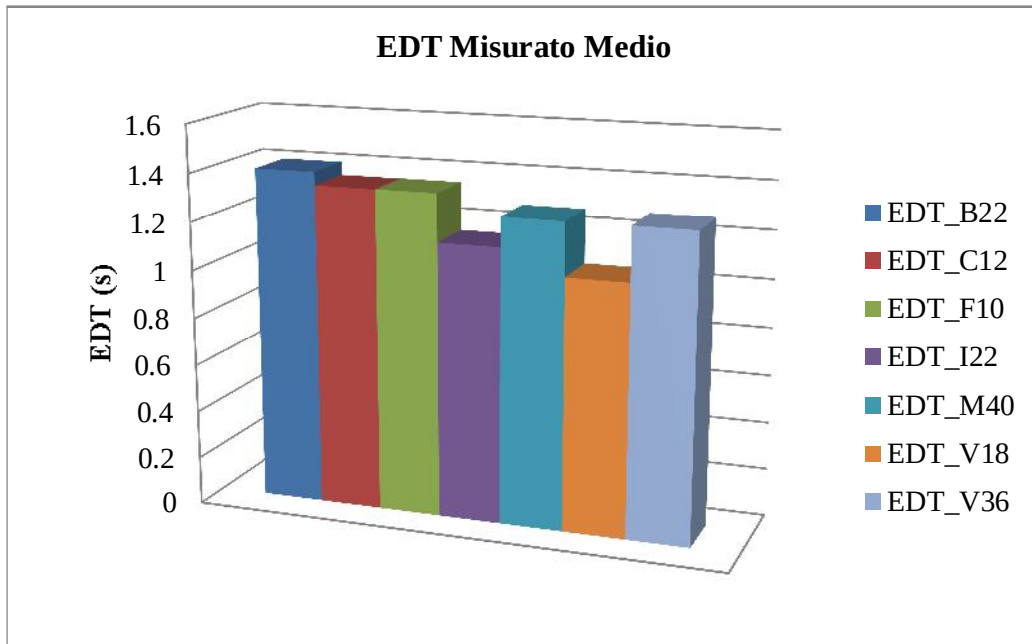


Fig. 9.26 – Valori dell'EDT medio nei punti di misura considerati

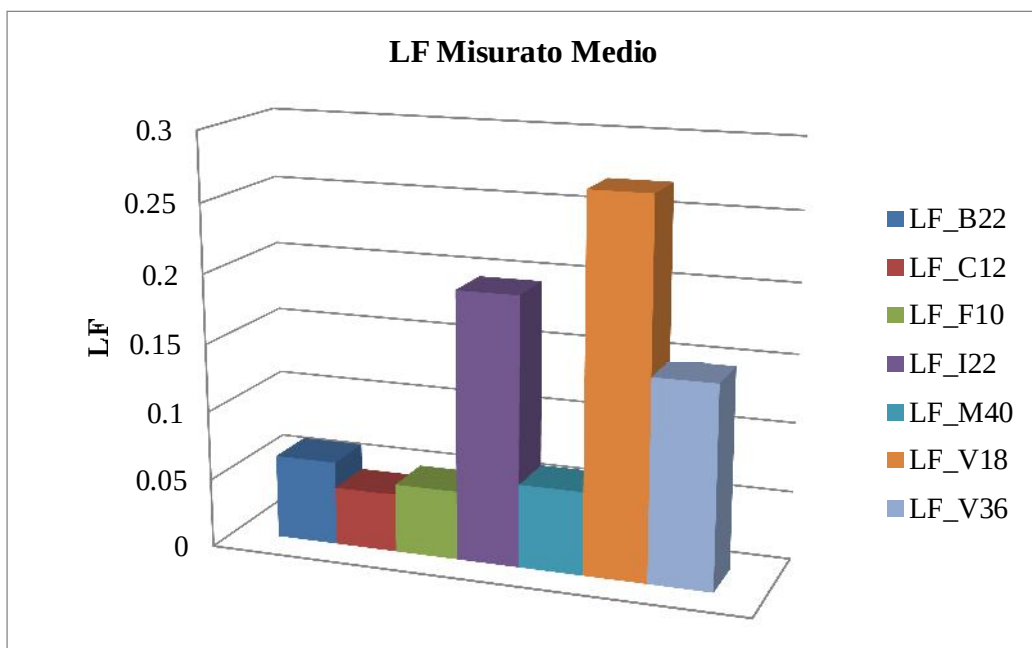


Fig. 9.27 – Valori del LF medio nei punti di misura considerati

Il grafico in Fig. 9.28 mostra invece l'andamento del Livello di pressione: i punti di misura hanno evidenziato valori del Livello di pressione variabili tra 79.5 e 68.5 dB. La differenza di 9 dB risulta troppo elevata: pur essendo i valori dei livelli adatti a consentire un buon ascolto, la sala presenta un problema di disuniformità.

Infine vengono riportati gli andamenti in frequenza della *IACC* (Fig. 9.29): considerando che i valori misurati sono compresi tra 0.323 e 0.54, si può considerare un'ottima percezione binaurale in tutti i punti di misura.

Come detto, i dati così ottenuti sono stati utilizzati per la taratura del modello tridimensionale. I parametri di confronto, a tale scopo, sono stati principalmente il Livello di pressione sonora e l'*EDT*.

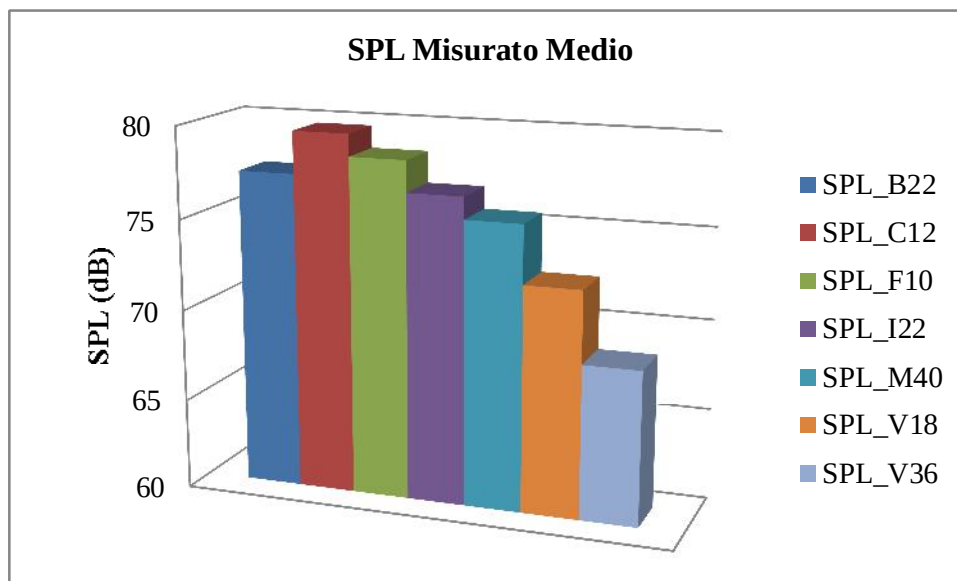


Fig. 9.28 – Valori del *SPL* medio nei punti di misura considerati

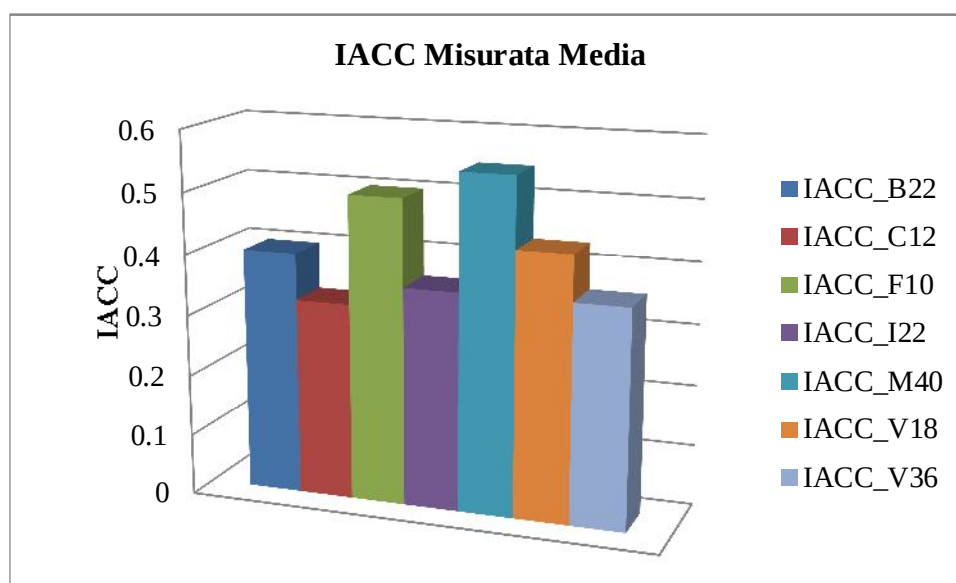


Fig. 9.29 – Valori della *IACC* nei punti di misura considerati

9.2.2. Risultati delle simulazioni e confronto

Il modello digitale tridimensionale definitivo (Fig. 9.30), costruito come descritto precedentemente, è formato da 1192 superfici, costituite da 8 materiali differenti.

La potenza sonora della sorgente onnidirezionale considerata è di 100 dB. Anche in questo caso per il calcolo è stato utilizzato il Room setup “Precision”.

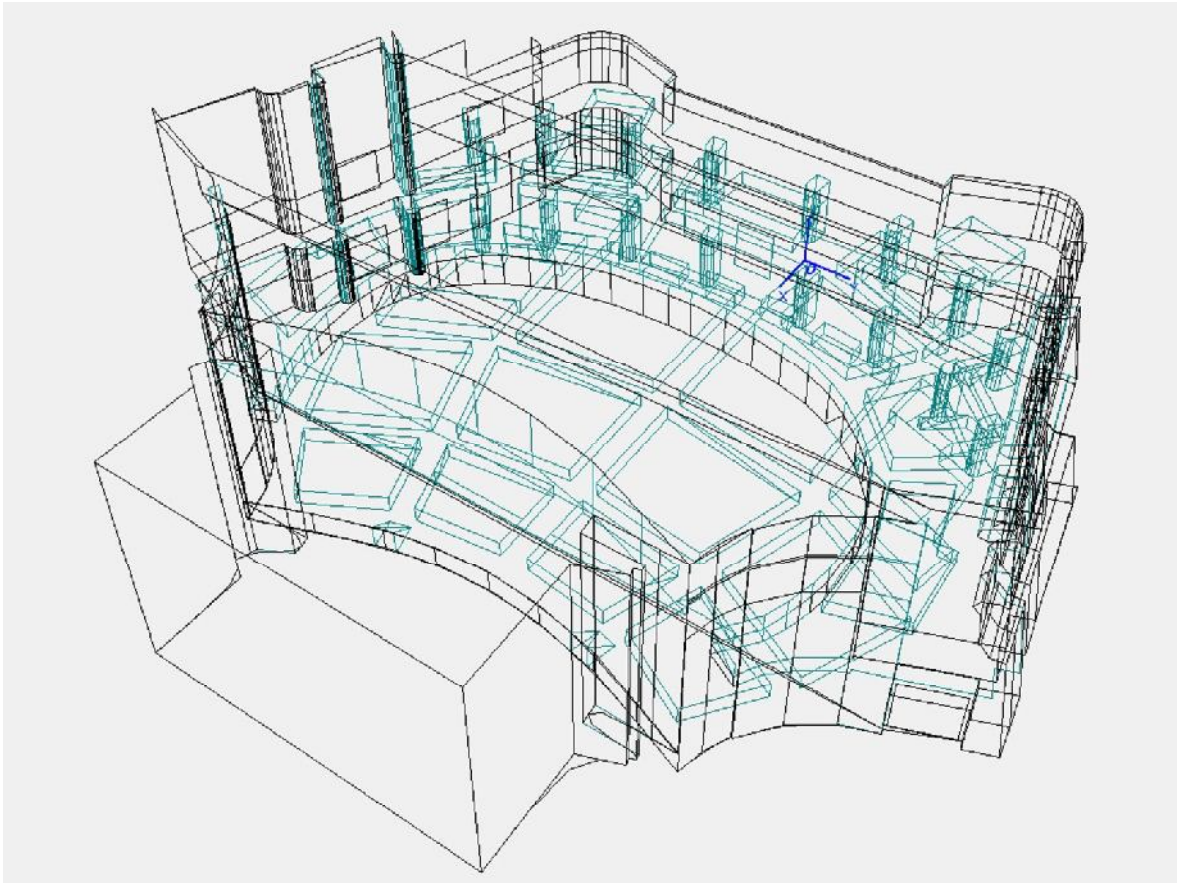


Fig. 9.30 – Modello 3D implementato in Odeon Auditorium

Durante la simulazione sono stati utilizzati sia ricettori puntuali ad un'altezza di 1.2 m dal piano, posizionati come in Fig. 9.31, sia una griglia di calcolo con distanza tra i ricettori di 0.5 m (Fig. 9.32).

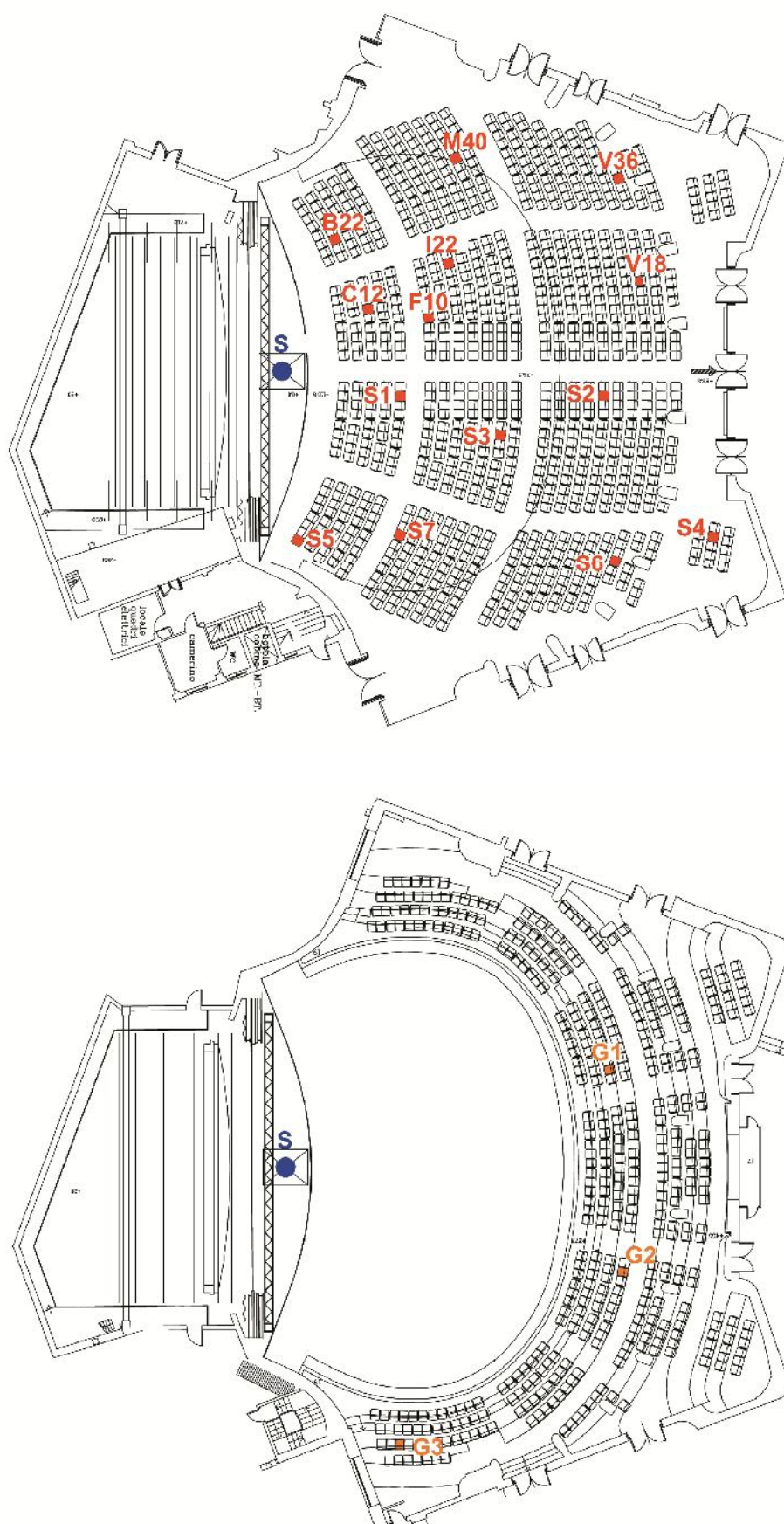


Fig. 9.31 – Posizionamento dei ricettori puntuali in platea (sopra) e in galleria (sotto)

La taratura del modello è stata effettuata per rendere i risultati delle simulazioni congruenti con i dati sperimentali; dato che non è stato possibile disporre dei valori esatti dei coefficienti di assorbimento dei materiali della sala, si sono utilizzati dei coefficienti di materiali simili reperibili dal Database interno al software di simulazione, riadattandoli leggermente in modo da ottenere dei risultati compatibili con le misure. Visto il gran numero di punti di ricezione considerati, vengono riportate le mappe di distribuzione dei singoli parametri e il solo confronto tra valori misurati e simulati.

La descrizione di ogni parametro comprende un grafico che ne raffigura l'andamento medio in funzione della frequenza (in banda d'ottava), comparandolo con quello delle misurazioni; inoltre è presentata, per ogni parametro, una mappa di distribuzione all'interno della sala alla frequenza rappresentativa di 1000 Hz. I parametri sono l'*EDT*, il livello di pressione, il *LF* e la *IACC*, cioè quelli che verranno utilizzati per la valutazione psicoacustica della sala.

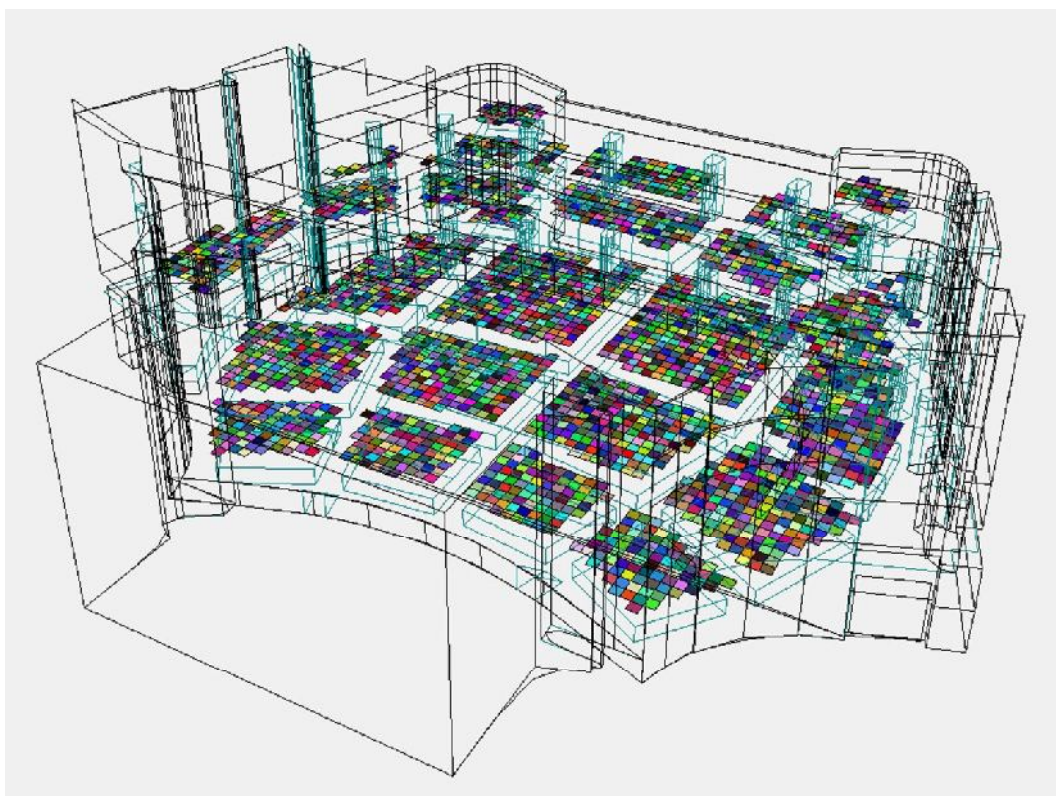


Fig. 9.32 – Griglia di calcolo

In Fig. 9.33 è raffigurato l'andamento dell'*EDT* a 500 Hz, confrontando i risultati ottenuti con la simulazione con i valori misurati in sala per i punti di misura considerati.

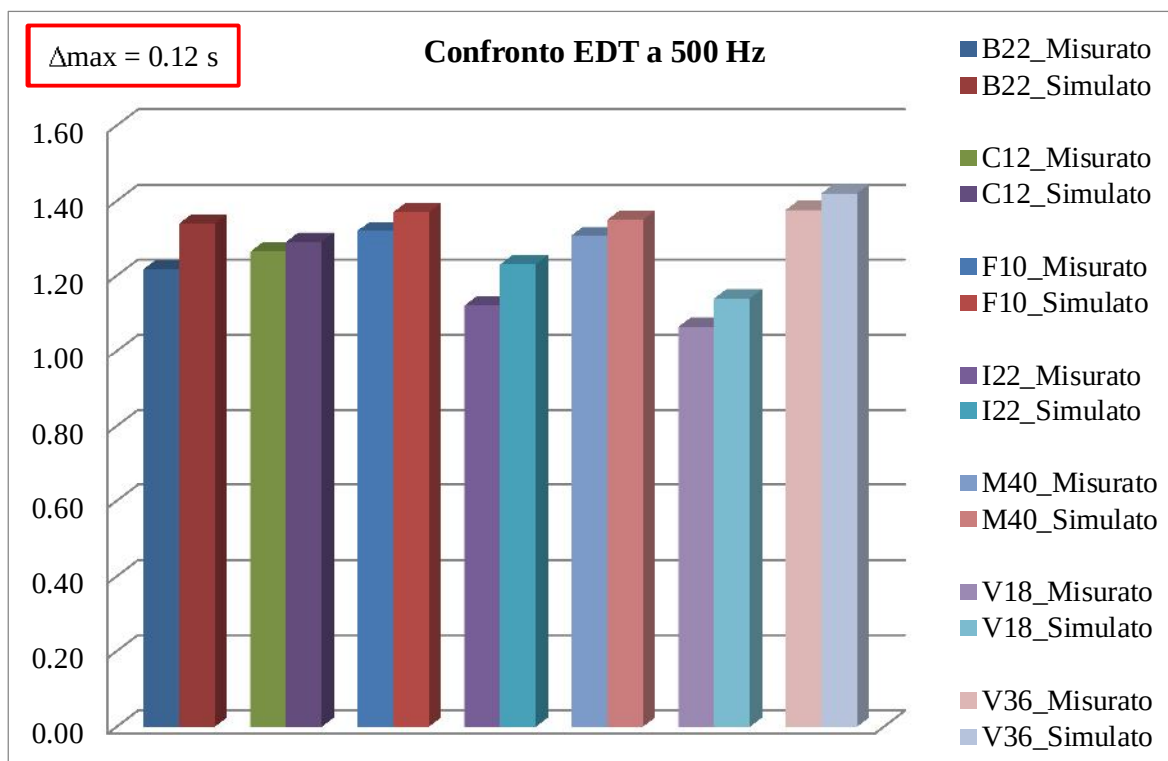


Fig. 9.33 – Confronto dei valori dell'*EDT* misurato e simulato a 500 Hz

Dai grafici si nota un'ottima corrispondenza tra i risultati della simulazione e quelli delle misurazioni: lo scarto maggiore si ha nel punto B22 ed è pari a 0.12 s. In Fig. 9.34 è rappresentata la mappa dello stesso parametro alla frequenza di 1000 Hz; si nota come le differenze da punto a punto siano minime anche nelle simulazioni.

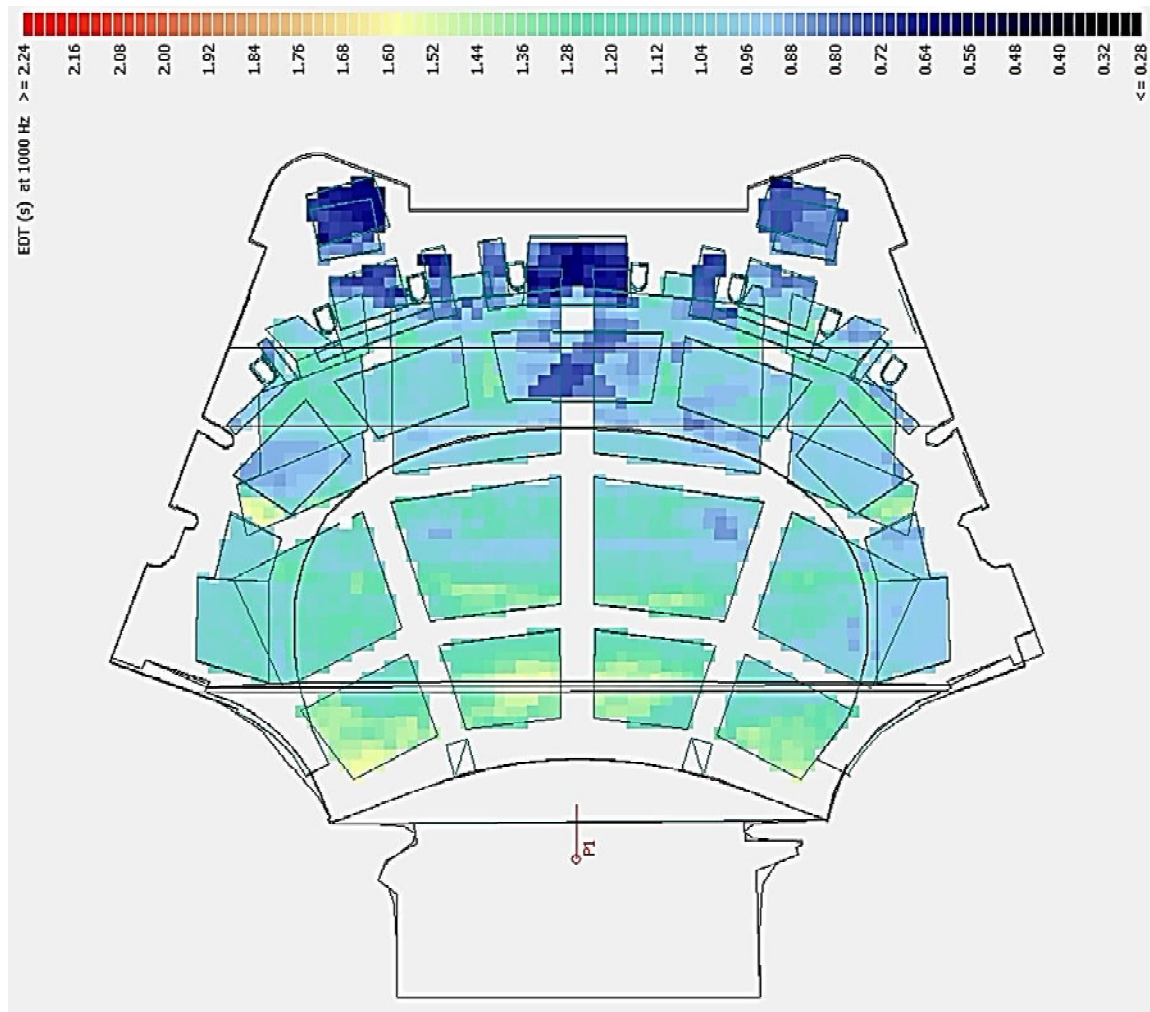


Fig. 9.34 – Mappa di distribuzione dell'EDT a 1000 Hz

Analogamente per il livello di pressione, il confronto evidenzia una differenza massima di 0.7 dB (Fig. 9.35).

La mappa di distribuzione mostra una scarsa uniformità, sia in platea sia in galleria (Fig. 9.36).

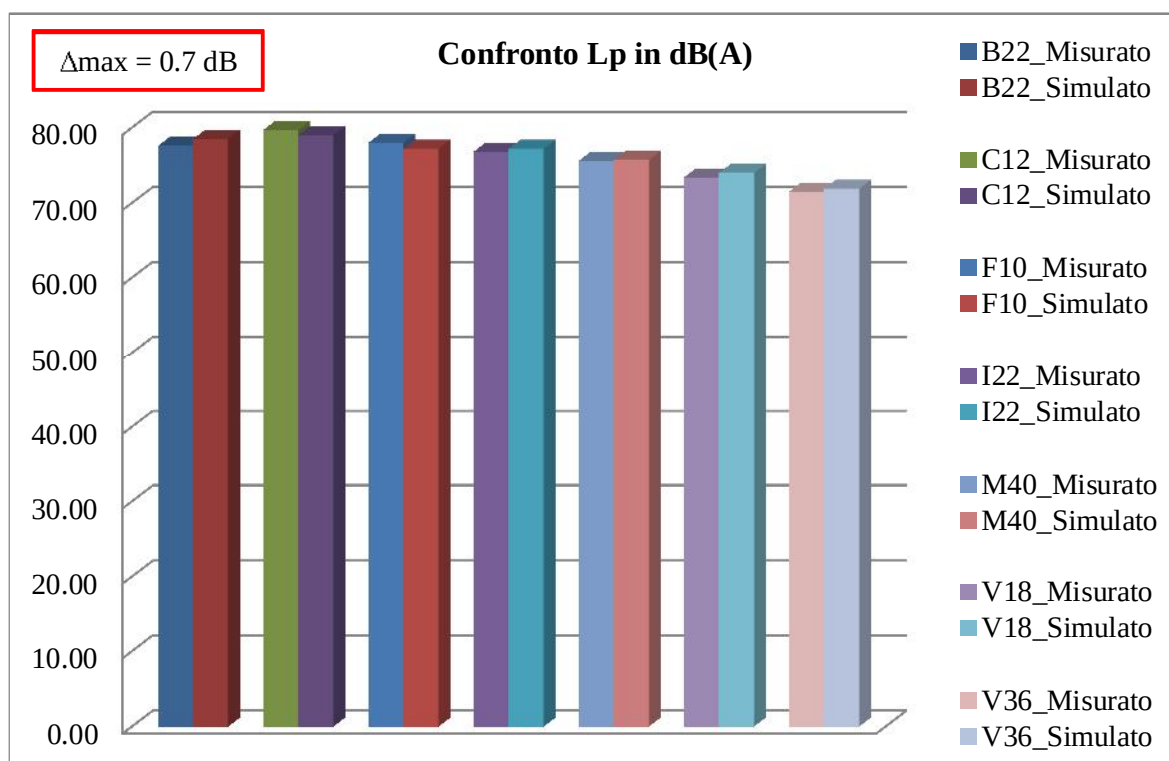
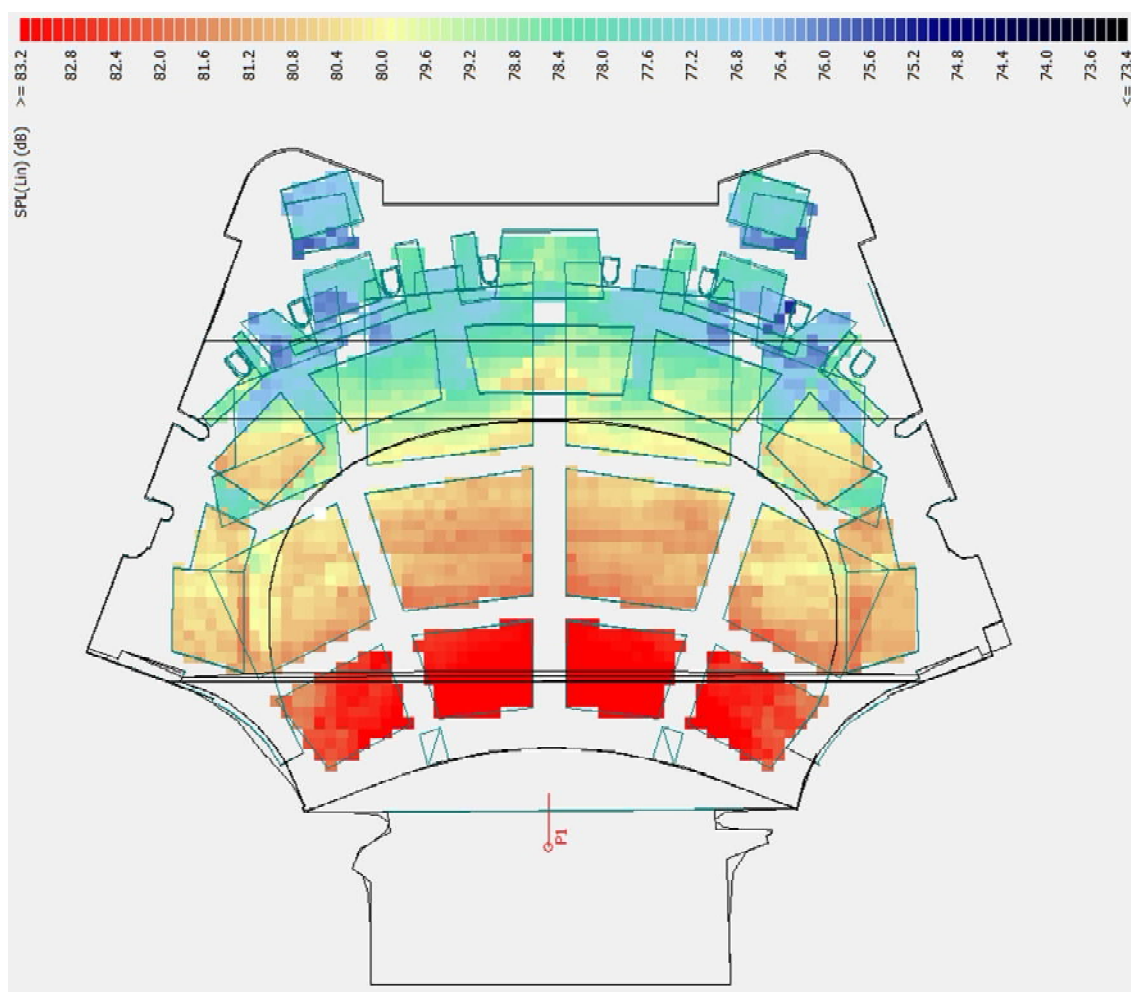
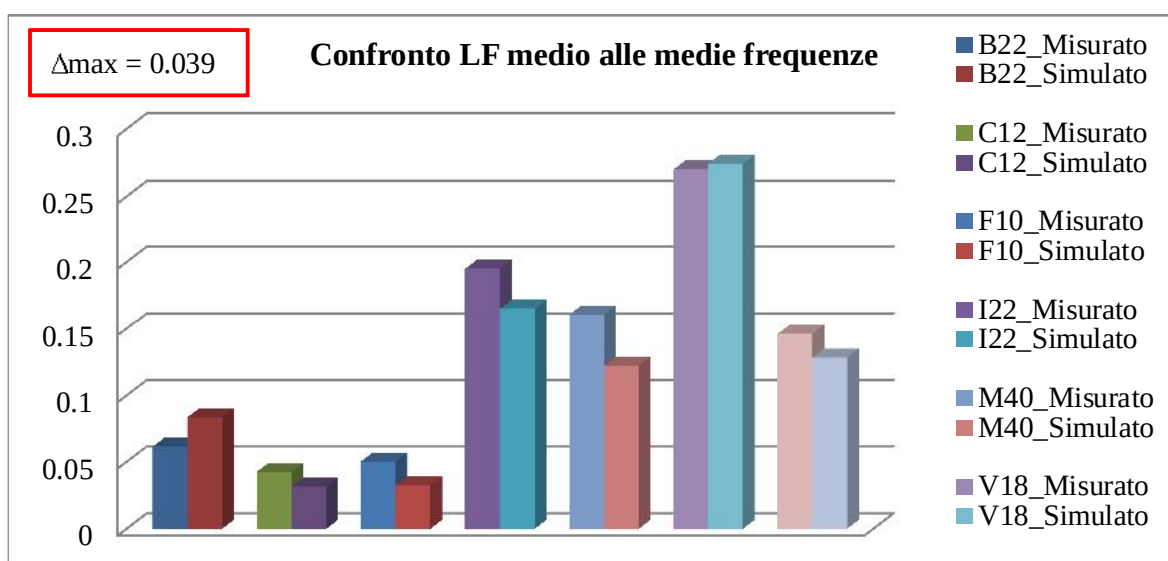


Fig. 9.35 – Confronto dei valori del SPL misurato e simulato in dBA

Il parametro di spazialità LF mostra una concordanza tra valori misurati e simulati accettabile alle medie frequenze, che sono quelle significative (Fig. 9.37). Lo scarto maggiore è di 0.039.

La mappa di distribuzione in Fig. 9.38 mostra una disuniformità inaccettabile del parametro considerato, sia in platea, sia in galleria. Inoltre le prime file della platea presentano anche valori del LF eccessivamente bassi, che significano una pessima spazialità della sala.

Infine il parametro binaurale relativo alla $IACC$, come nel caso del Lateral Faction, presenta una concordanza molto buona alle medie frequenze (Fig. 9.39). Lo scarto maggiore è di 0.034.

Fig. 9.36 – Mappa di distribuzione del *SPL* a 1000 HzFig. 9.37 – Confronto dei valori del *LF* misurato e simulato nel punto di ricezione B22

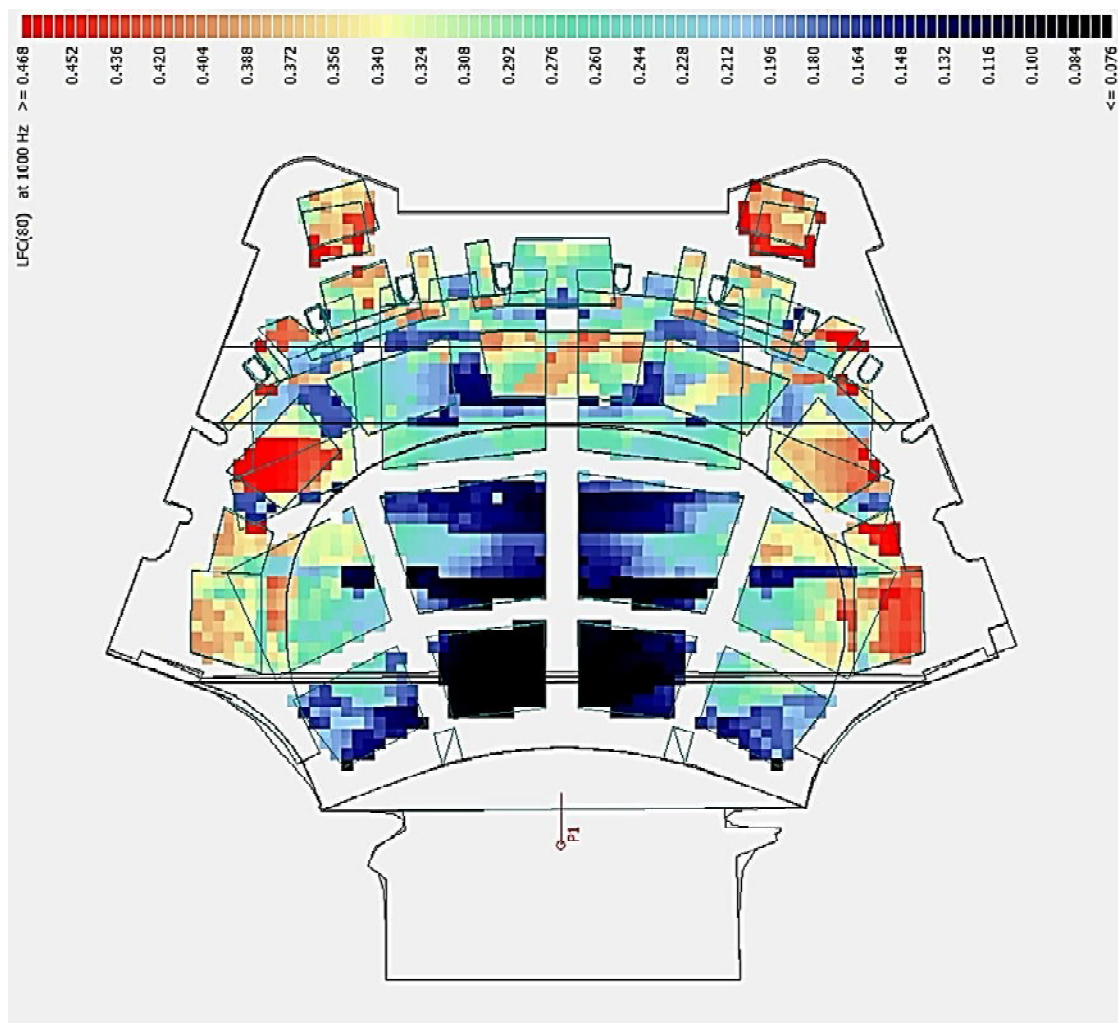
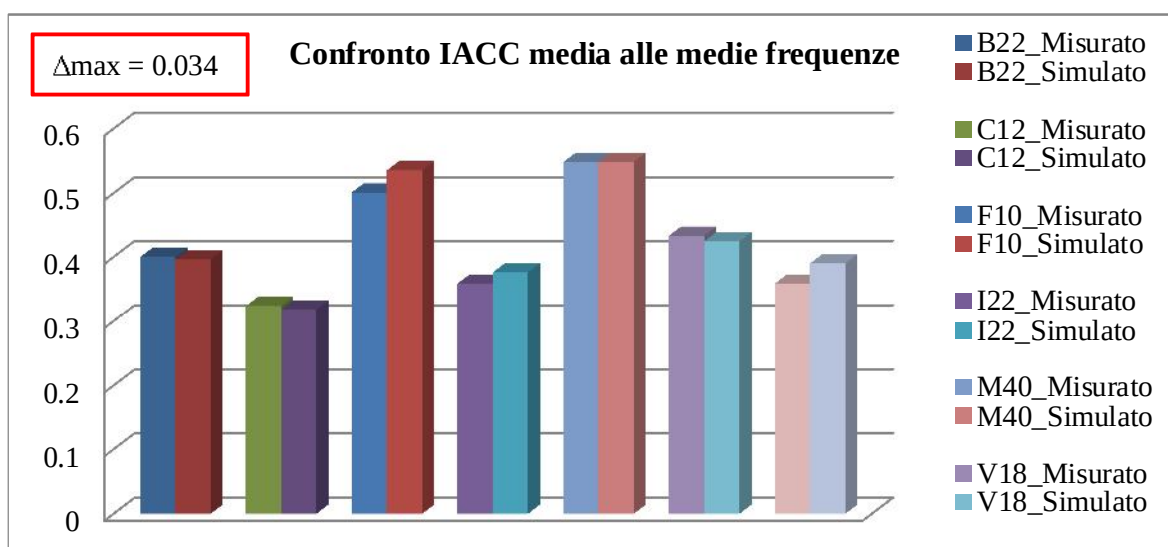
Fig. 9.38 – Mappa di distribuzione del LF a 1000 Hz

Fig. 9.39 – Confronto dei valori della IACC misurata e simulata nel punto di ricezione B22

A titolo di esempio si riportano i confronti dei valori dei parametri simulati e misurati a tutte le frequenze per il solo punto di ricezione I22 (da Fig. 9.40 a Fig. 9.43).

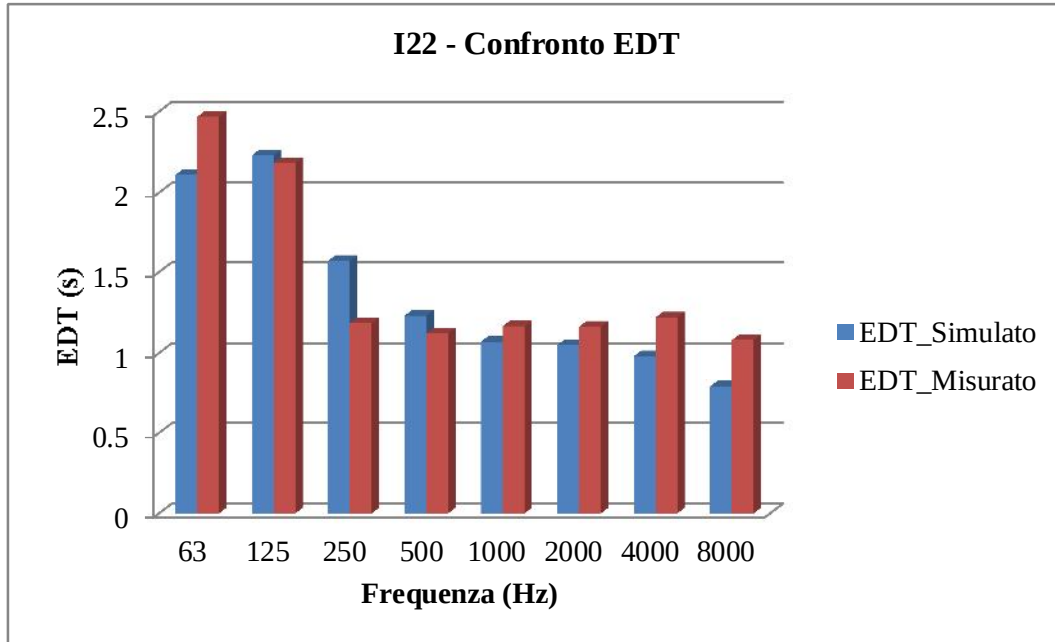


Fig. 9.40 – Confronto dei valori dell'EDT misurato e simulato nel punto di ricezione I22

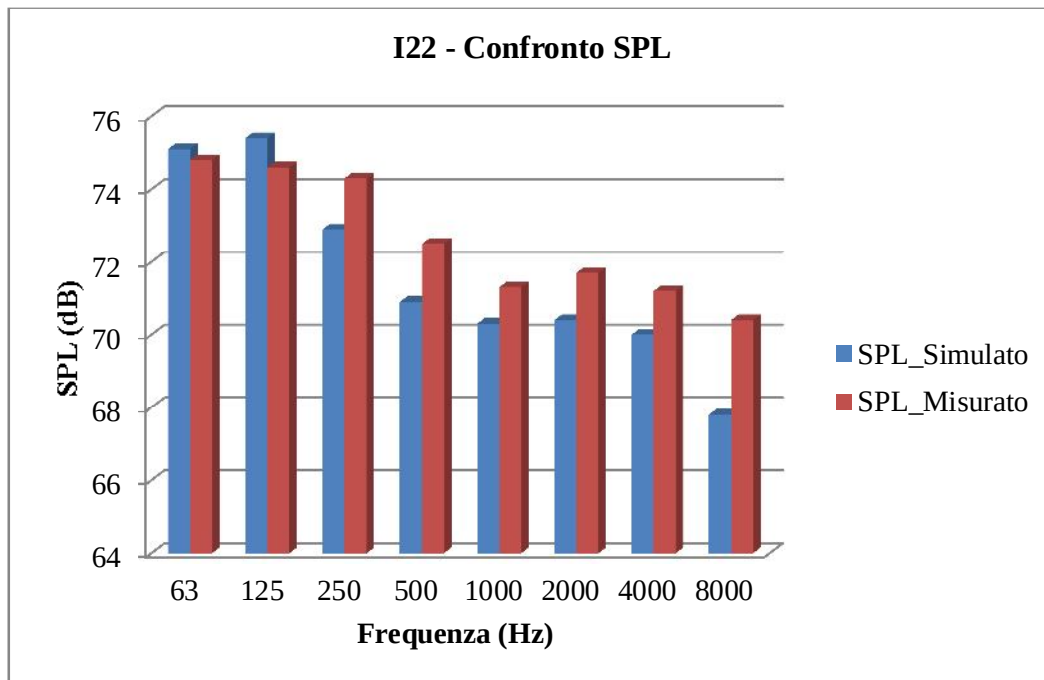
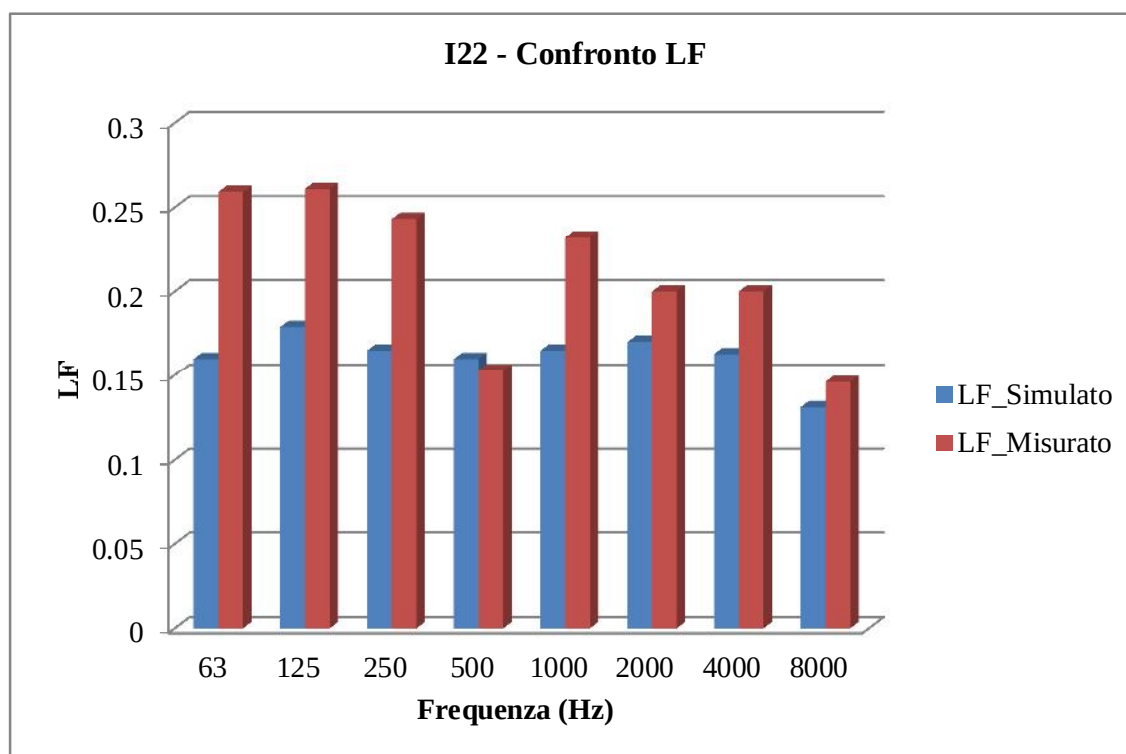
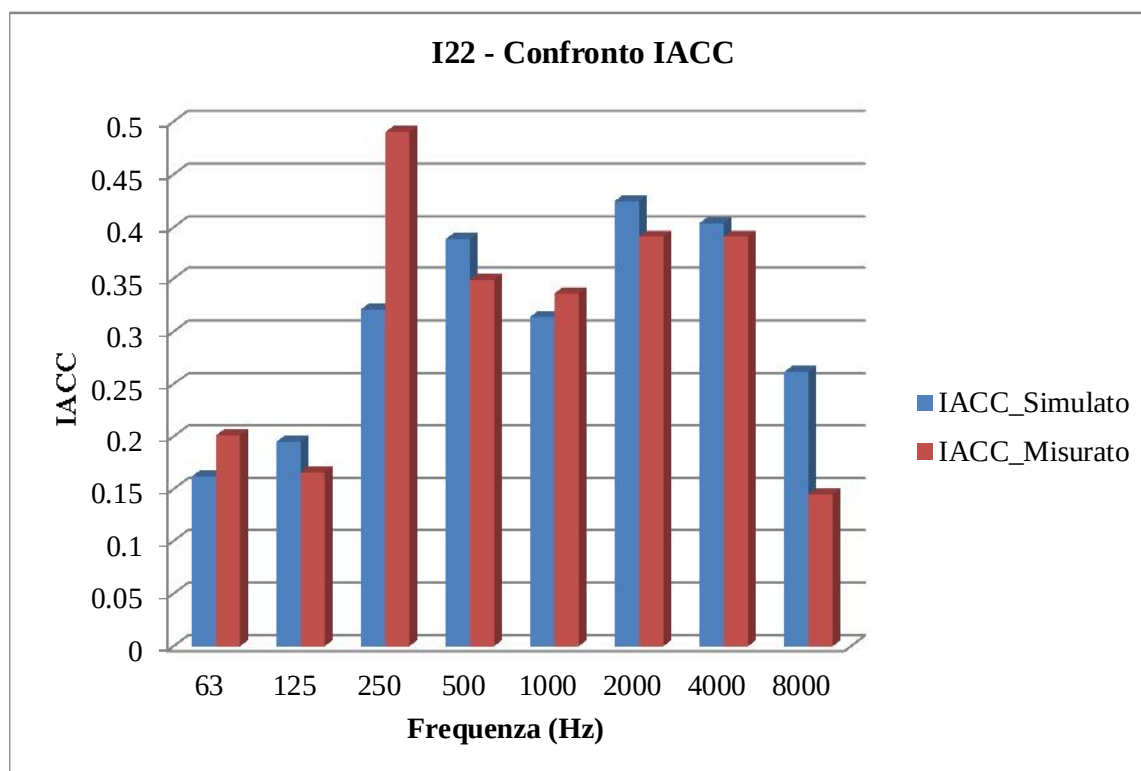


Fig. 9.41 – Confronto dei valori del SPL misurato e simulato nel punto di ricezione I22

Fig. 9.42 – Confronto dei valori del *LF* misurato e simulato nel punto di ricezione I22Fig. 9.43 – Confronto dei valori della *IACC* misurata e simulata nel punto di ricezione I22

I tempi di ritardo della prima riflessione sono compresi tra 11 e 45 ms in platea, mentre in galleria si attestano tra i 61 e gli 80 ms. Pur essendo al limite in galleria, i valori dell'*ITDG* assicurano l'assenza di eco (Fig. 9.44).

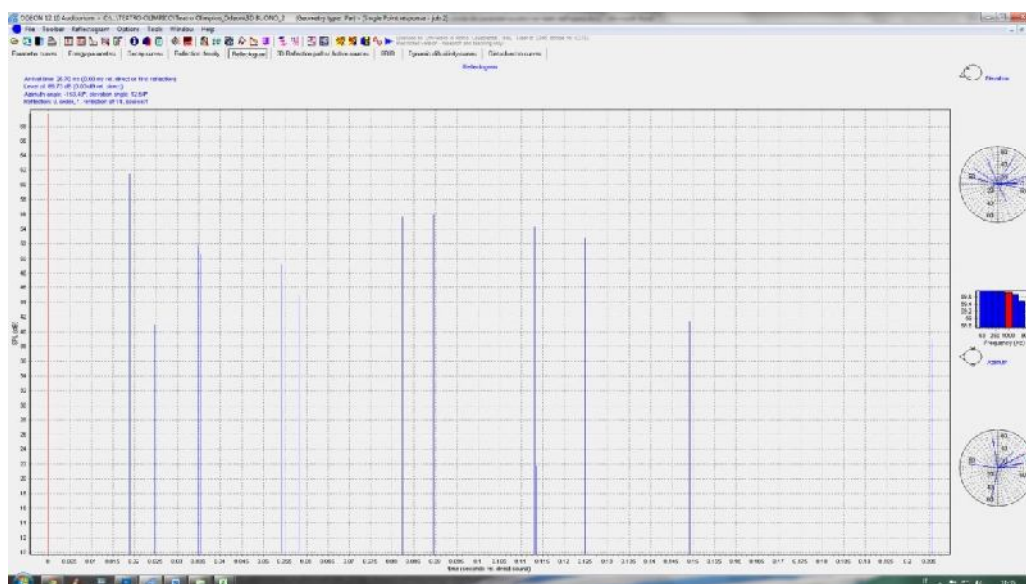


Fig. 9.44 – Reflectogramma relativo al punto B22 a 1000 Hz

9.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma

L'Aula Magna è il cuore del Rettorato, centro del sistema compositivo della Città Universitaria di Roma ed è stata realizzata su progetto dell'Arch. Marcello Piacentini negli anni 1933 - 1935.

Essa copre una superficie di 900 m² e, con un volume di circa 15000 m³, può contenere circa 1000 persone.

La pianta a sezione circolare è aperta a ventaglio e converge verso la tribuna degli oratori; essa comprende una grande loggia a sbalzo, conformata anch'essa ad anfiteatro e due file laterali di palchi (Fig. 9.45).

La forma di tutta la sala, delle pareti, del soffitto e quella della tribuna degli oratori, foggiate a riflettore acustico, vorrebbero corrispondere ai requisiti della massima visibilità e della migliore diffusione sonora.

Sul soffitto sono rappresentati un enorme cherubino di stucco (simbolo dell'Università Sapienza) e un distico: *Doctrinae studium vitam producit et auget, immor-*

talis eris si sapias iuvenis (L'amore per lo studio genera e fa prosperare la vita, o giovane, se saprai, sarai immortale).

Sulla parete di fondo del palco fu realizzato da Mario Sironi nel 1935 l'affresco "L'Italia tra le Arti e le Scienze", simbolo dell'ascesa morale e sociale della patria, con un procedimento pittorico che può essere chiamato "tecnica mista", caratterizzato dalla presenza di una prima stesura a fresco su intonaco steso "in giornate", alla quale si sovrappongono una o più campiture a tempera (Fig. 9.46). L'opera fu restaurata una prima volta nel 1953 dal pittore Carlo Siviero e una seconda volta nel 1982 dal Consorzio Tecni.re.co. Attualmente sono riprese le indagini conoscitive e si sta cercando la possibilità di ricondurre il dipinto alla sua stesura originaria. L'Aula Magna è sede di numerose e svariate manifestazioni di grande interesse culturale: convegni internazionali, attività didattica e concerti.



Fig. 9.45 – Interno dell'Aula Magna del Rettorato della Sapienza di Roma

I risultati presentati in questo capitolo si riferiscono alle misurazioni effettuate il 22 maggio 2013. Esse sono state ottenute utilizzando un segnale di sine sweep esponenziale tra 22 Hz e 22 KHz di frequenza, generato a 44100 Hz di frequenza di campionamento con una dinamica di 32 bit e usato per alimentare il sistema dodecaedro.

In Fig. 9.47 sono visibili le posizioni dei diffusori e dei punti di ricezione scelti durante le misurazioni. Le registrazioni microfoniche sono state effettuate utilizzando contemporaneamente il registratore digitale A-format a 4 canali, il fonometro con due microfoni cardioidi e la testa artificiale binaurale.



Fig. 9.46 – Affresco di Mario Sironi sul fondo del palco



Fig. 9.47 – Punti di misura e posizione della sorgente

9.3.1. Risultati delle misurazioni

In Tab. 9.8 sono riportati i risultati delle misurazioni nei punti di misura considerati per i soli parametri acustici di interesse.

Punto di ricezione 1 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.38	2.58	2.68	2.69	2.38	1.81	1.32	0.51
SPL (dB)	67.3	75.4	81.2	84.2	79.8	82.1	73.0	67.3
LF(80)	0.507	0.4	0.313	0.429	0.391	0.341	0.323	0.374
IACC	0.46	0.519	0.635	0.722	0.591	0.191	0.145	0.045
Punto di ricezione 2 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	3.06	2.46	2.73	2.29	2.29	2.03	1.70	1.32
SPL (dB)	76.4	77.7	76.9	76.5	75.3	74.7	74.2	71.6
LF(80)	0.224	0.292	0.297	0.379	0.367	0.3408	0.327	0.202
IACC	0.175	0.154	0.358	0.472	0.191	0.291	0.145	0.145
Punto di ricezione 3 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.35	2.76	2.23	2.22	2.18	2.11	1.59	1.02
SPL (dB)	77.6	78.9	78.7	76.5	75.9	75.9	73.9	72.6
LF(80)	0.409	0.350	0.425	0.417	0.406	0.406	0.365	0.316
IACC	0.837	0.302	0.590	0.527	0.336	0.391	0.145	0.045
Punto di ricezione 4 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.58	2.30	2.18	2.16	1.89	1.88	1.67	1.27
SPL (dB)	75.9	76.7	78.2	75.1	75.0	75.3	74.0	70.3
LF(80)	0.372	0.436	0.475	0.441	0.448	0.438	0.302	0.452
IACC	0.37	0.32	0.59	0.572	0.436	0.191	0.145	0.045
Punto di ricezione 5 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.37	2.27	2.14	1.89	2.03	1.78	1.50	0.90

SPL (dB)	75.0	77.3	77.8	74.8	75.6	74.9	70.6	67.5
LF(80)	0.427	0.384	0.400	0.464	0.426	0.486	0.419	0.356
IACC	0.633	0.224	0.290	0.302	0.281	0.291	0.145	0.045
Punto di ricezione 6 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.46	3.00	2.52	1.97	1.84	1.83	1.68	1.30
SPL (dB)	75.2	76.3	76.1	76.1	76.2	76.1	72.8	66.3
LF(80)	0.306	0.413	0.405	0.443	0.441	0.457	0.37	0.149
IACC	0.655	0.224	0.49	0.372	0.381	0.191	0.045	0.045
Punto di ricezione 7 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.98	2.82	1.91	1.96	2.19	1.90	1.69	1.23
SPL (dB)	70.9	75.2	77.5	72.4	73.5	72.2	71.4	67.2
LF(80)	0.671	0.526	0.522	0.541	0.493	0.528	0.524	0.489
IACC	0.330	0.270	0.590	0.572	0.481	0.191	0.045	0.045

Tab. 9.8 – Valori dei parametri acustici misurati nei punti di ricezione considerati

Sono di seguito presentati i tempi di riverberazione riferiti al canale W del registratore digitale (il cui segnale è stato precedentemente trasformato in B-format) rivolto verso il palco, in banda d'ottava tra i 63 Hz e gli 8 KHz (Fig. 9.48). Dato l'elevato numero dei punti di misura, per una maggiore chiarezza del grafico, vengono riportati i valori medi.

Si nota come la risposta della sala sia molto simile nei punti in esame. I tempi di riverberazione si mantengono tra 1.89 e 2.69 secondi. Il tempo di riverberazione ottimale per la destinazione d'uso ad auditorium è di 1.1 s. E' evidente come la sala sia eccessivamente riverberante per l'esecuzione del parlato in tutti i punti di misura.

Il grafico in Fig. 9.49, invece, denota un andamento molto uniforme del parametro *LF*. Ricordando che i valori ottimali del *LF* sono attestabili intorno allo 0.4, nei punti misurati si hanno valori compresi tra 0.36 e 0.52. La sala pertanto mostra un'ottima spazialità, sia in termini di valori sia in termini di uniformità.

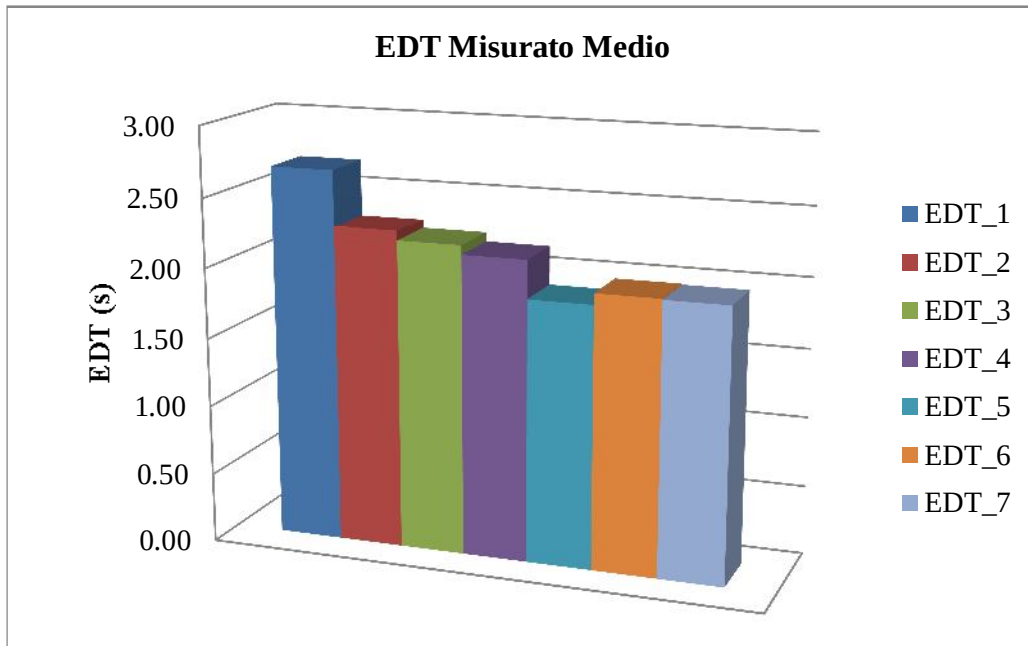


Fig. 9.48 – Valori dell'EDT medio nei punti di misura considerati

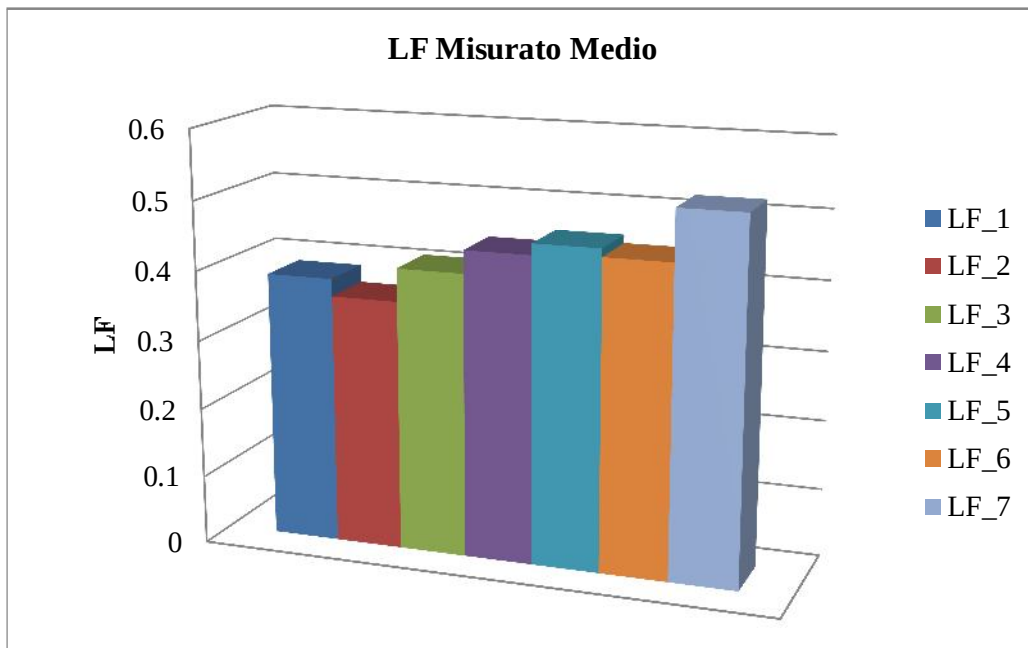
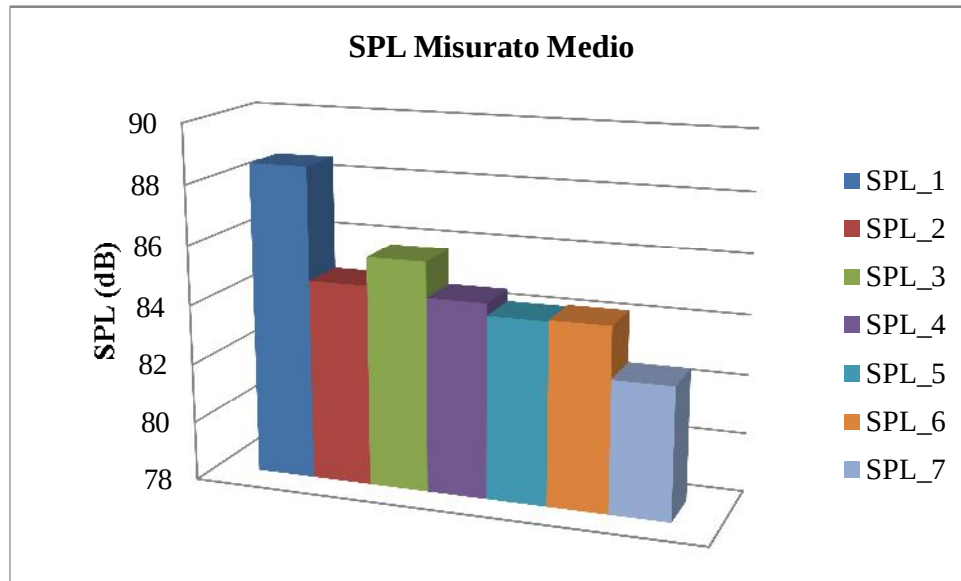


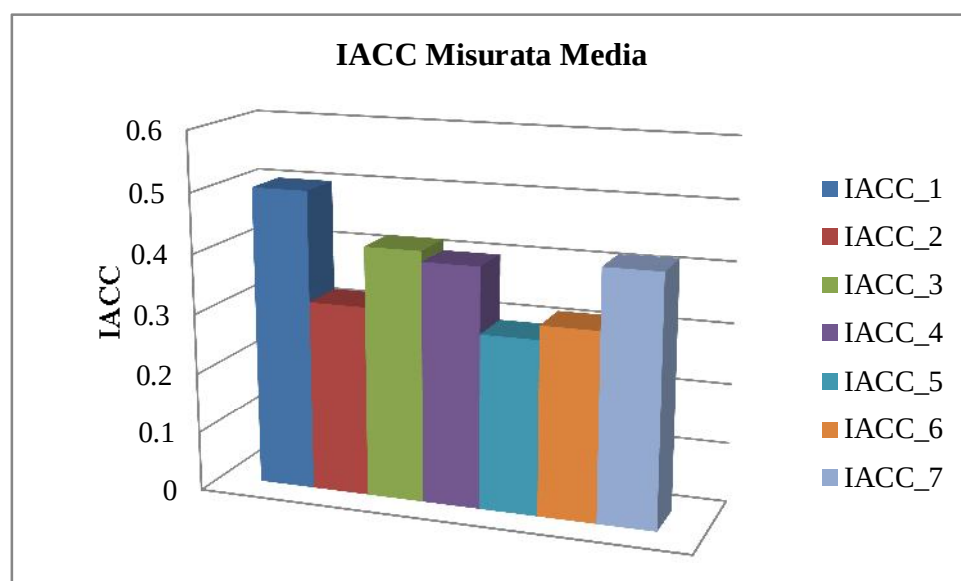
Fig. 9.49 – Valori del LF medio nei punti di misura considerati

Il grafico in Fig. 9.20 mostra invece l'andamento del Livello di pressione: i punti di misura hanno evidenziato valori del Livello di pressione variabili tra 82.5 e 88.5 dB. La differenza di 6 dB risulta leggermente elevata, seppur non eccessiva: la sala presenta valori dei livelli adatti per consentire un buon ascolto e un'uniformità accettabile.

Fig. 9.50 – Valori del *SPL* medio nei punti di misura considerati

Infine vengono riportati i valori della *IACC* (Fig. 9.51): considerando che i valori misurati sono compresi tra 0.29 e 0.50, si può considerare un'ottima percezione binaurale in tutti i punti di misura.

Come detto, i dati così ottenuti sono stati utilizzati per la taratura del modello tridimensionale. I parametri di confronto, a tale scopo, sono stati principalmente il Livello di pressione sonora e l'*EDT*.

Fig. 9.51 – Valori della *IACC* nei punti di misura considerati

9.3.2. Risultati delle simulazioni e confronto

Il modello digitale tridimensionale definitivo (Fig. 9.52), costruito come descritto precedentemente, è formato da 478 superfici, costituite da 7 materiali differenti.

La potenza sonora della sorgente onnidirezionale considerata è di 100 dB. Anche in questo caso per il calcolo è stato utilizzato il Room setup “Precision”.

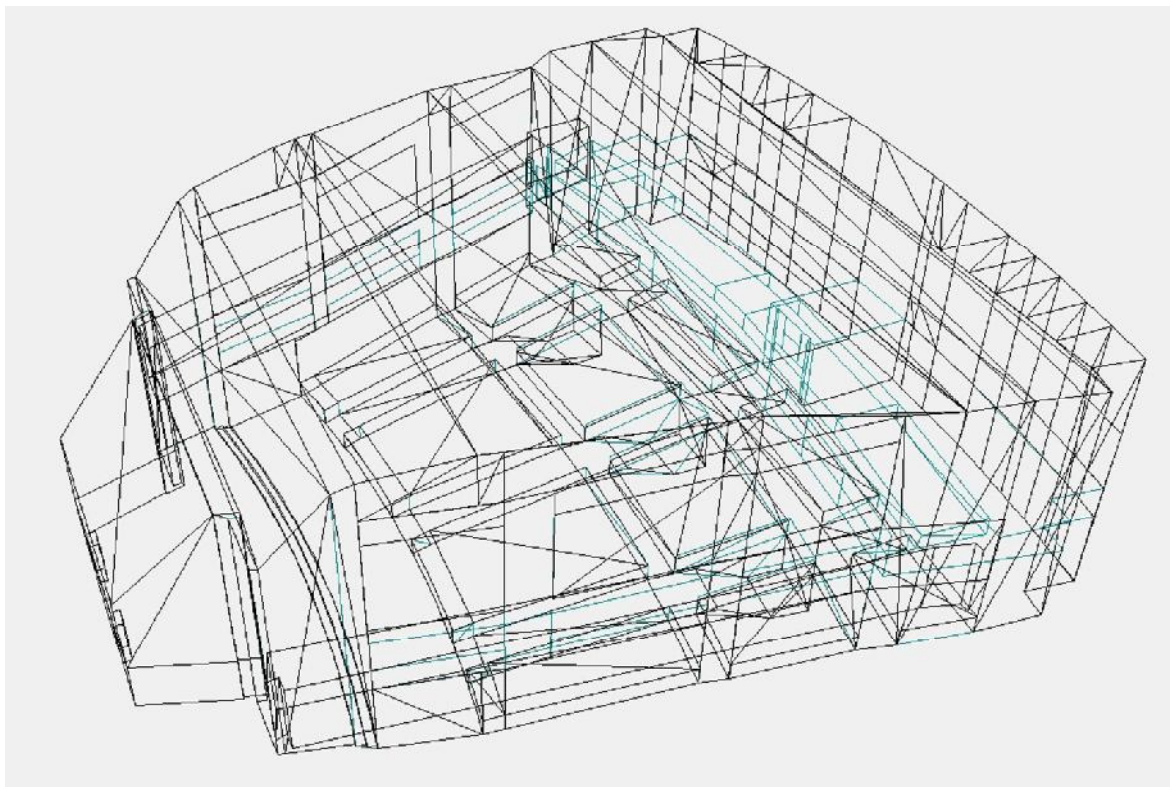


Fig. 9.52 – Modello 3D implementato in Odeon Auditorium

Durante la simulazione sono stati utilizzati sia ricettori puntuali ad un'altezza di 1.2 m dal piano, posizionati come in Fig. 9.53, sia una griglia di calcolo con distanza tra i ricettori di 0.5 m (Fig. 9.54). I ricettori puntuali indicati con il colore arancione sono posizionati in galleria, quelli di colore rosso in platea.

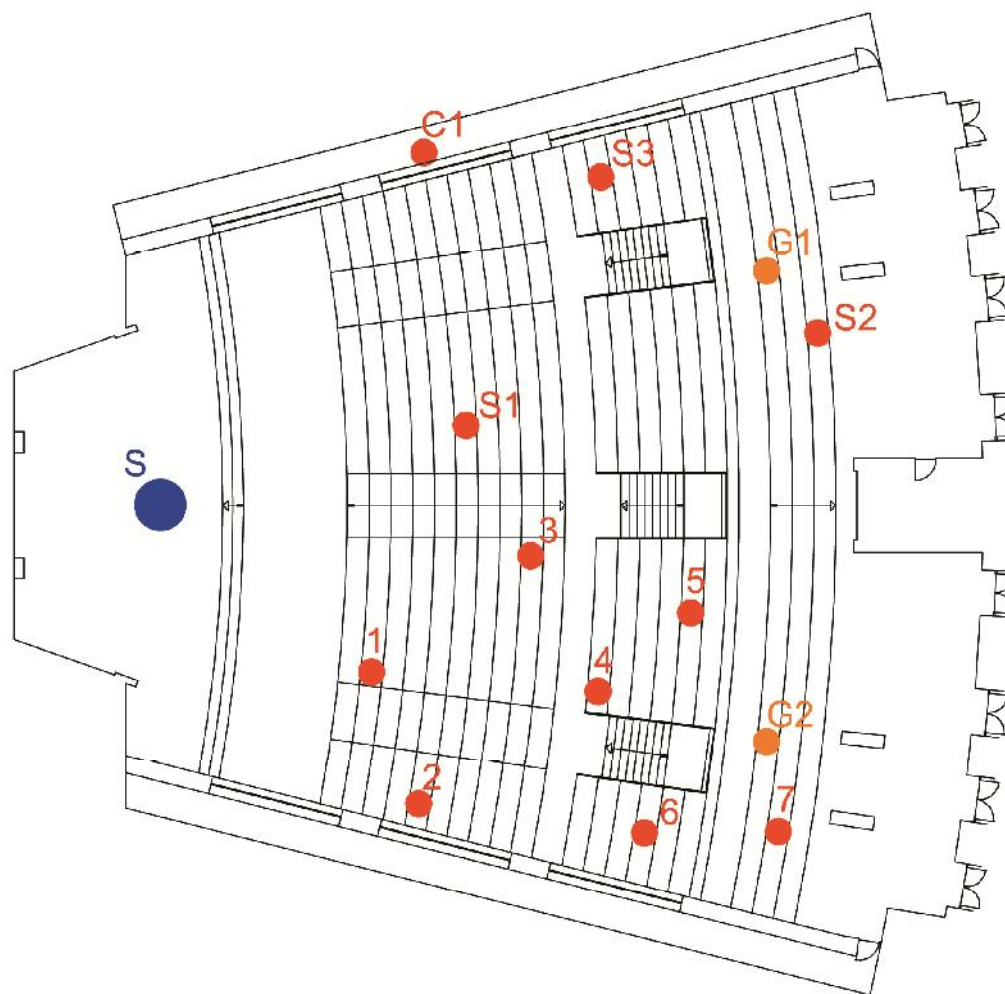


Fig. 9.53 – Posizionamento dei ricettori puntuali

In Fig. 9.55 è raffigurato l'andamento dell'*EDT* alla frequenza di 500 Hz, confrontando i risultati ottenuti con la simulazione con i valori misurati in sala per i punti di misura analizzati.

Dai grafici si nota un'ottima corrispondenza tra i risultati della simulazione e quelli delle misurazioni, con uno scarto massimo di 0.11 s. In Fig. 9.56 è rappresentata la mappa dello stesso parametro alla frequenza di 1000 Hz; si nota come le differenze da punto a punto siano minime anche nelle simulazioni.

Analogamente per il livello di pressione, il confronto evidenzia una differenza massima di 0.4 dB (Fig. 9.57).

La mappa di distribuzione mostra una discreta uniformità, sia in platea sia in galleria, mentre i due corridoi laterali presentano delle zone d'ombra agli estremi, dove comunque non sono posizionate poltrone per gli ascoltatori (Fig. 9.58).

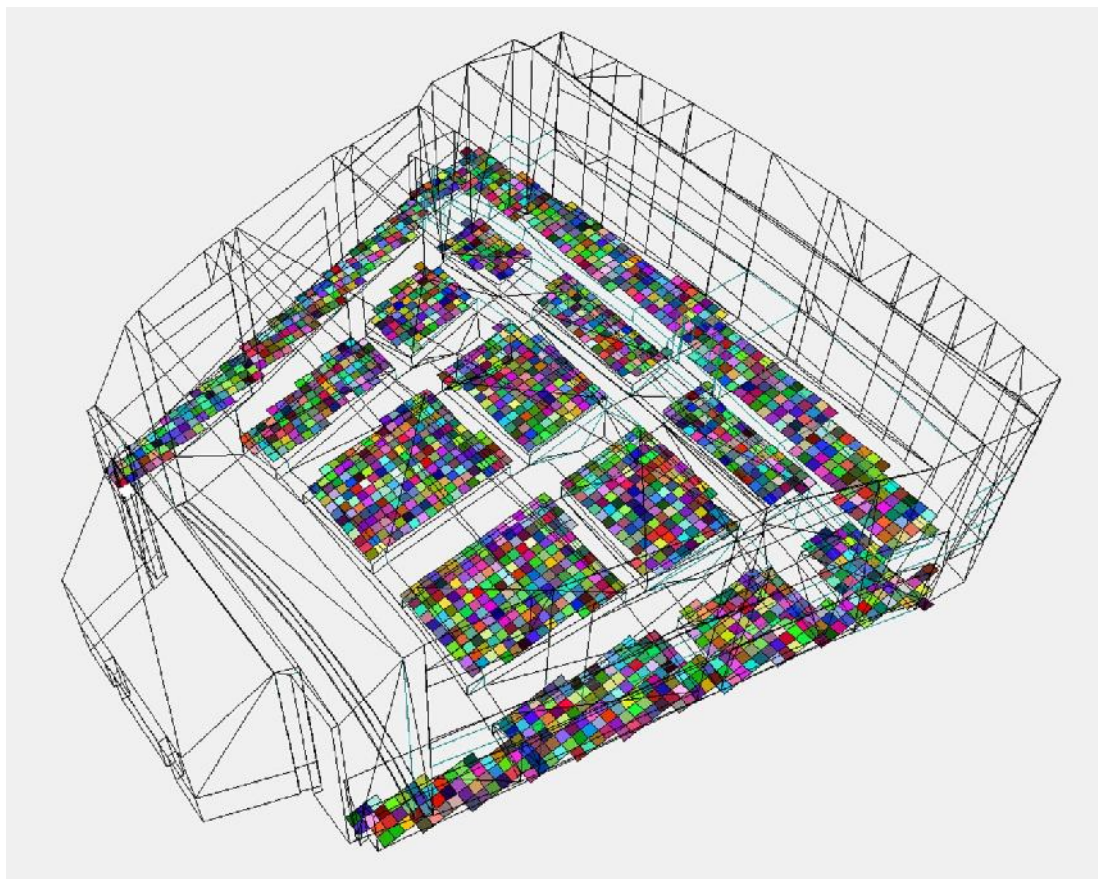


Fig. 9.54 – Griglia di calcolo

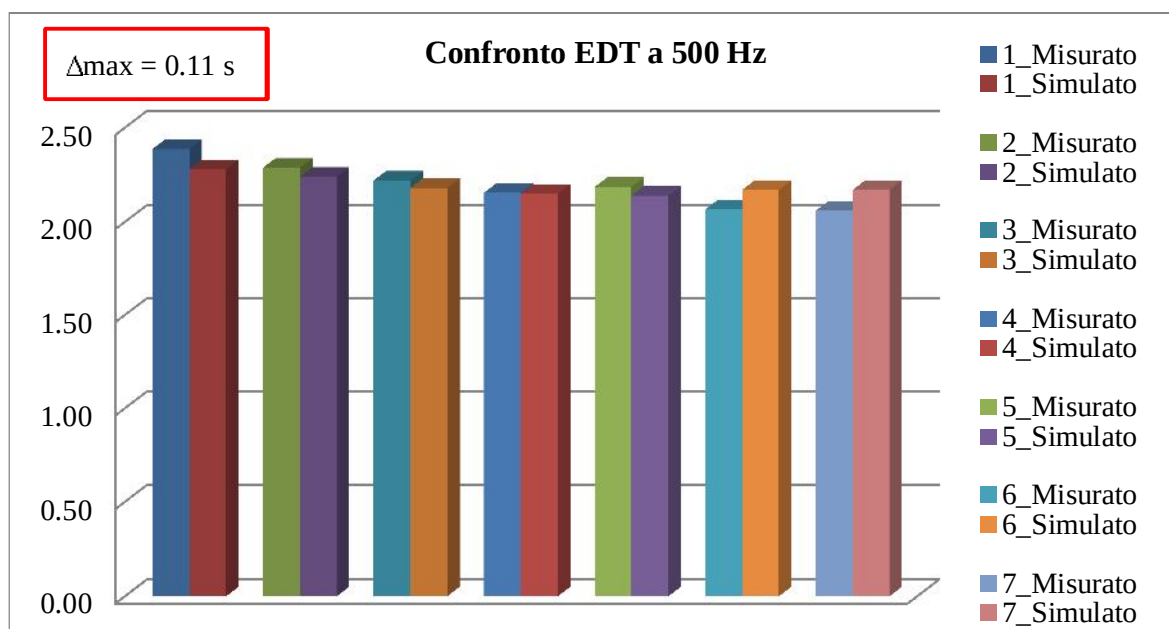


Fig. 9.55 – Confronto dei valori dell'EDT misurato e simulato a 500 Hz

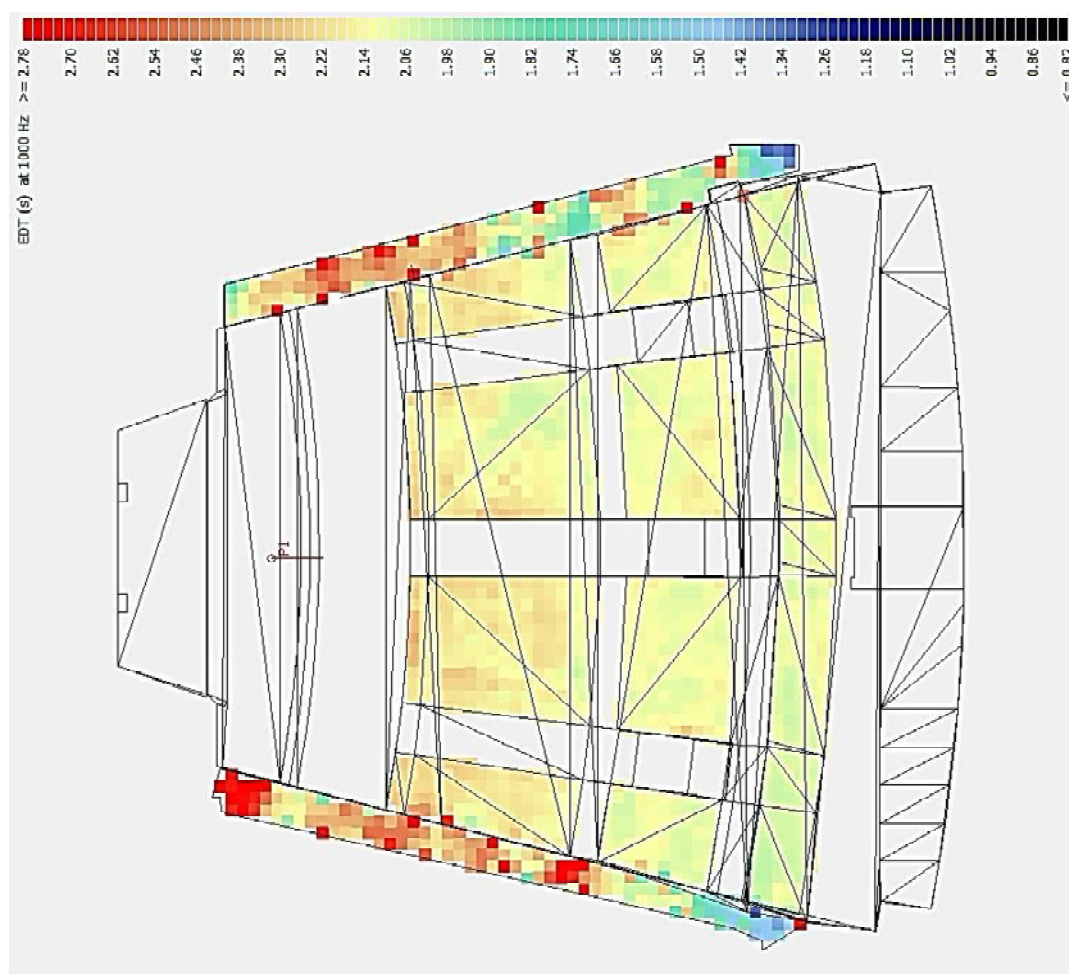


Fig. 9.56 – Mappa di distribuzione dell'EDT a 1000 Hz

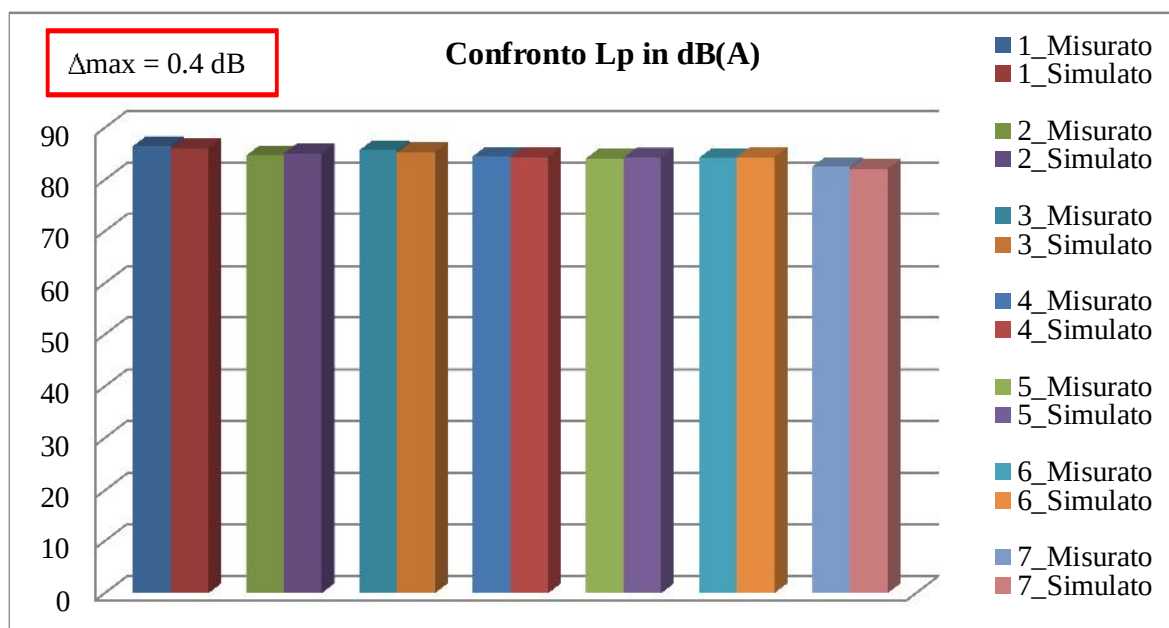
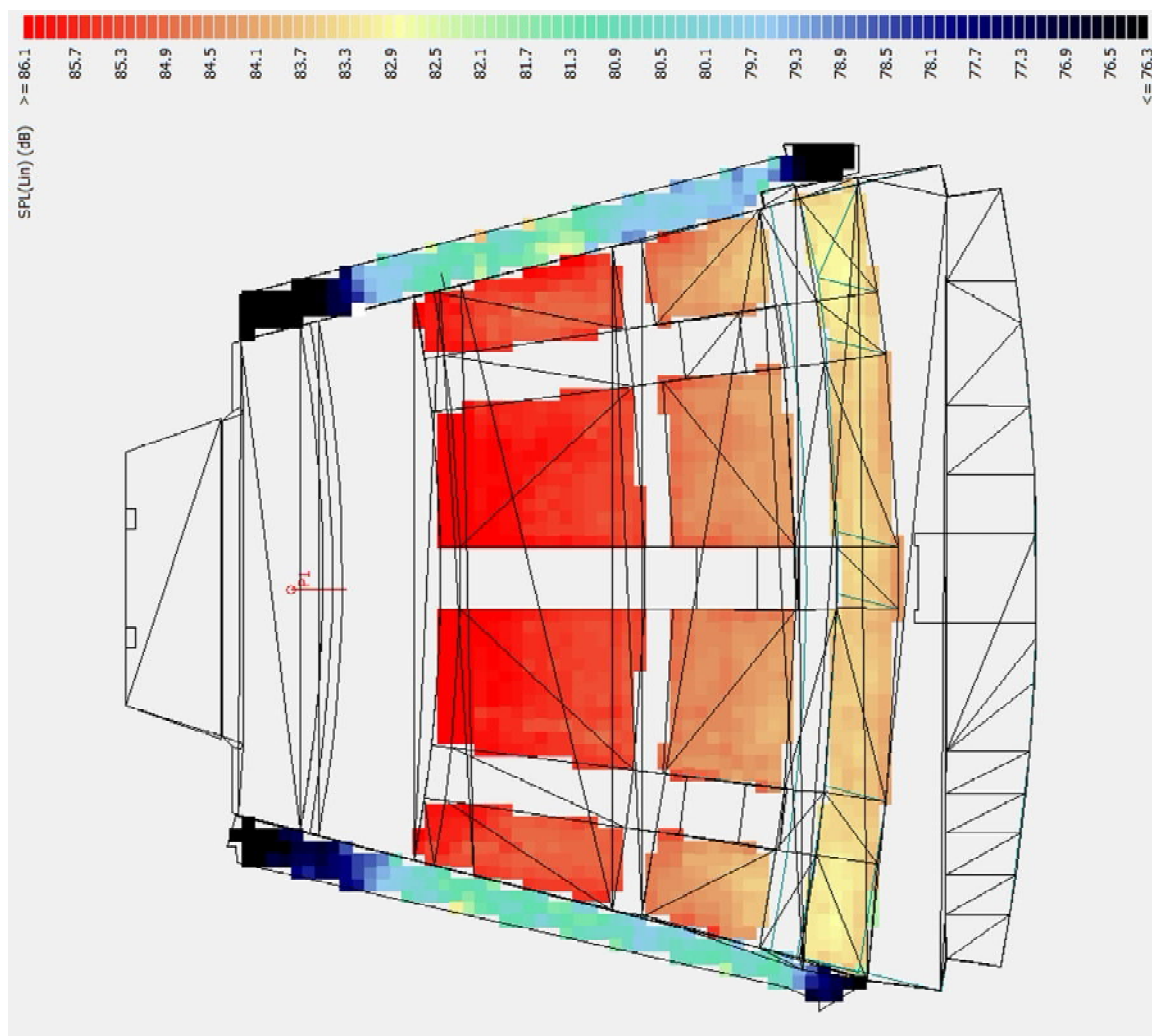


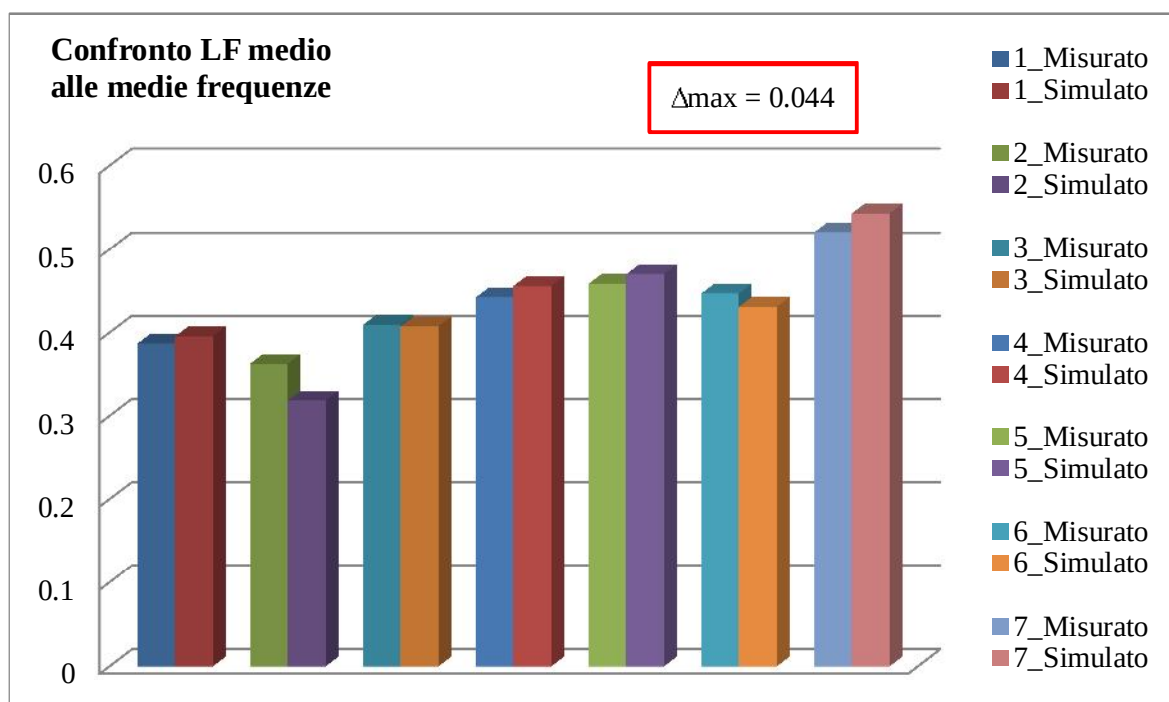
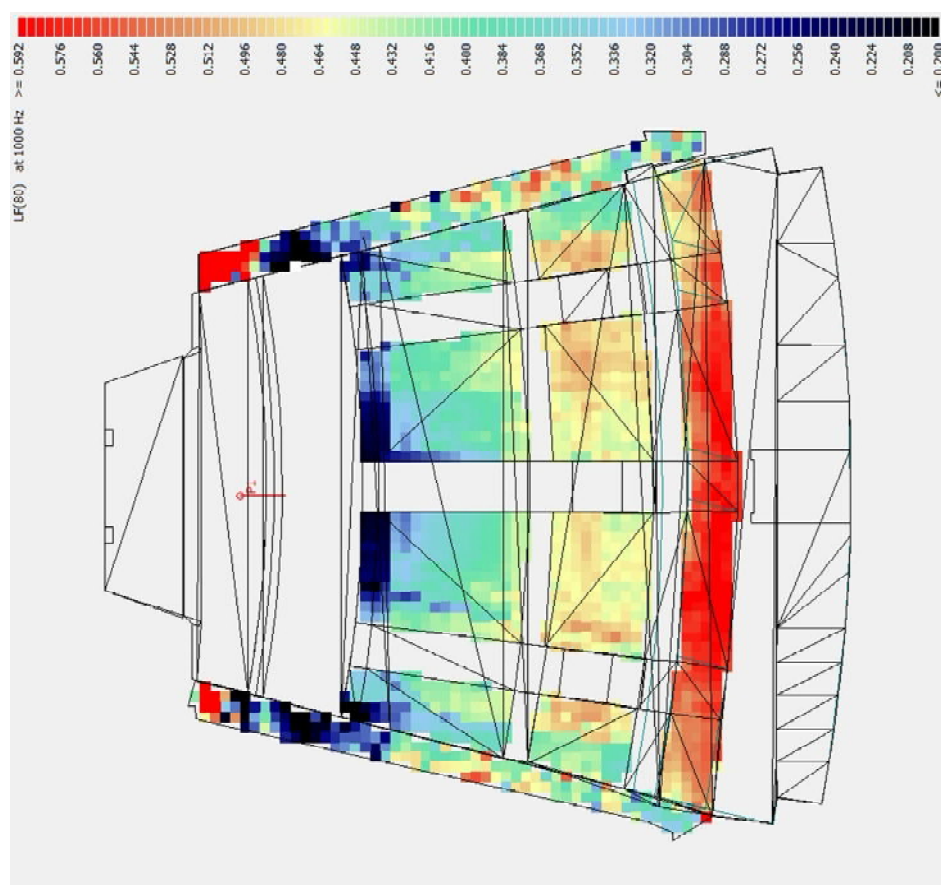
Fig. 9.57 – Confronto dei valori del SPL in dBA, misurato e simulato

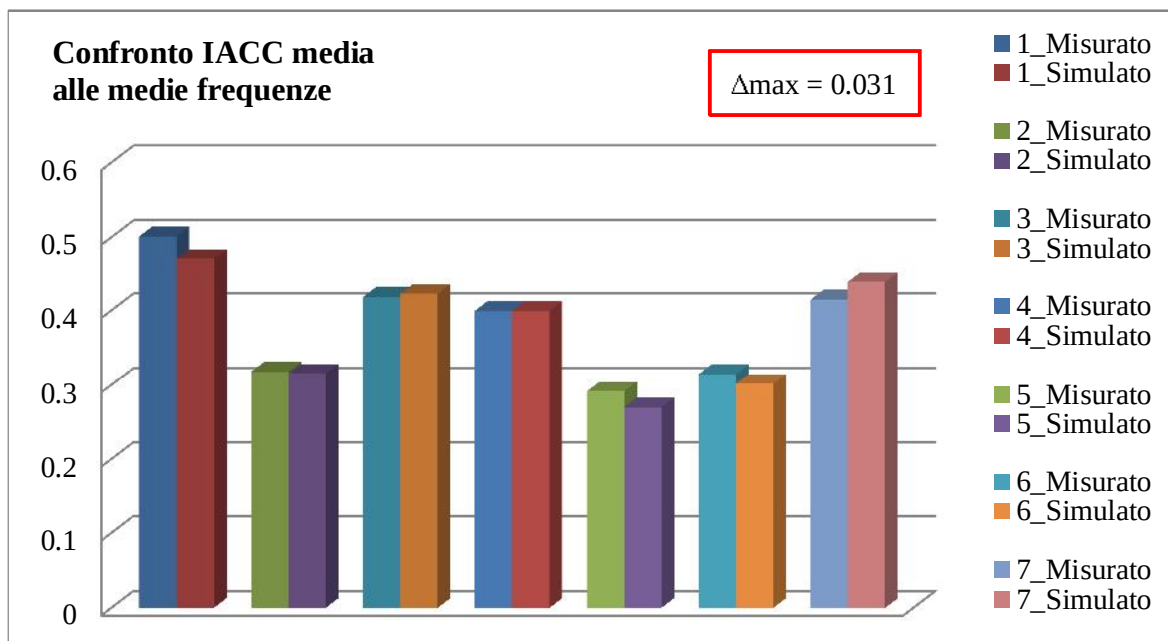
Fig. 9.58 – Mappa di distribuzione del *SPL* a 1000 Hz

Il parametro di spazialità *LF* mostra delle discordanze alle basse e alle alte frequenze, mentre alle medie frequenze, che sono quelle significative, la concordanza tra valori misurati e simulati è accettabile, con uno scarto massimo di 0.44 (Fig. 9.59).

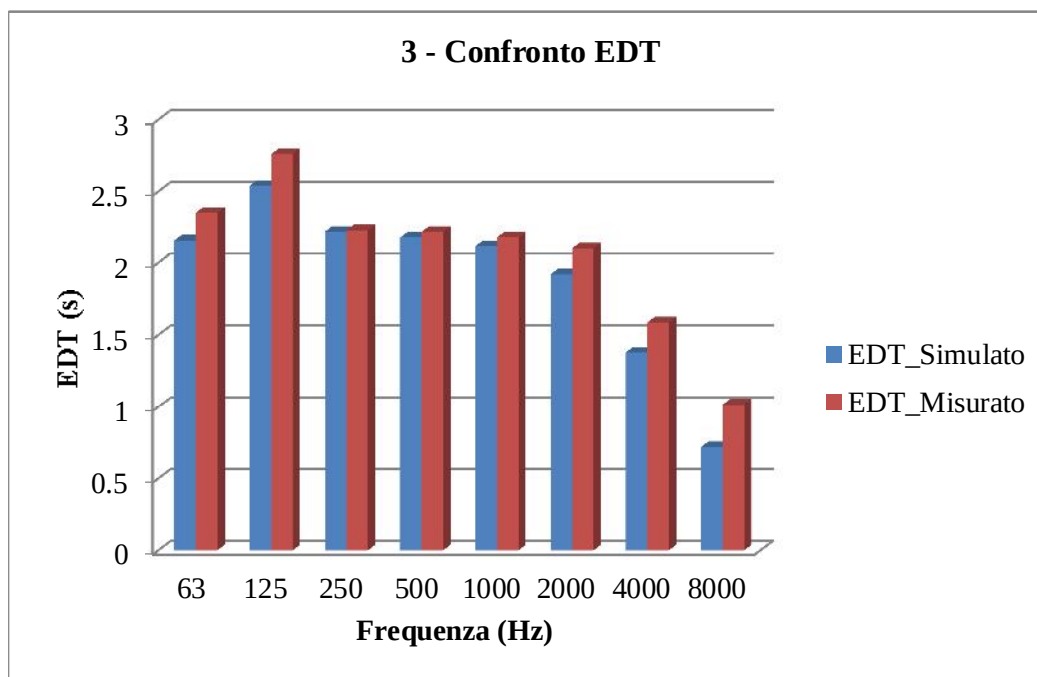
La mappa di distribuzione in Fig. 9.60 mostra una disuniformità inaccettabile del parametro considerato in platea, mentre la situazione migliora molto in galleria. In tutti i punti della sala, comunque, i valori del *LF* sono abbastanza buoni.

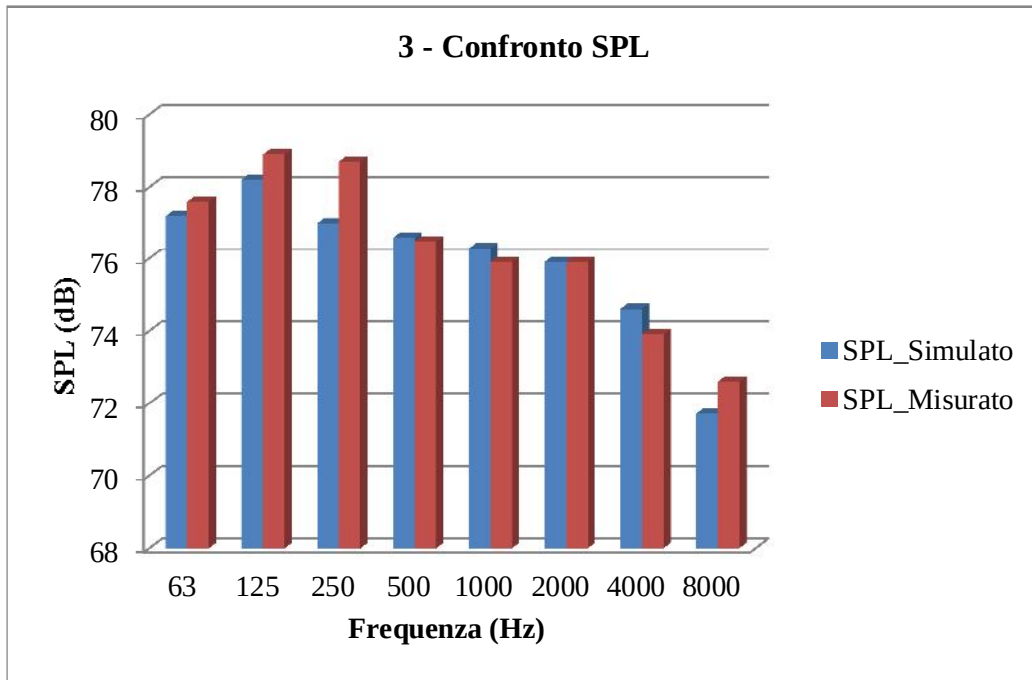
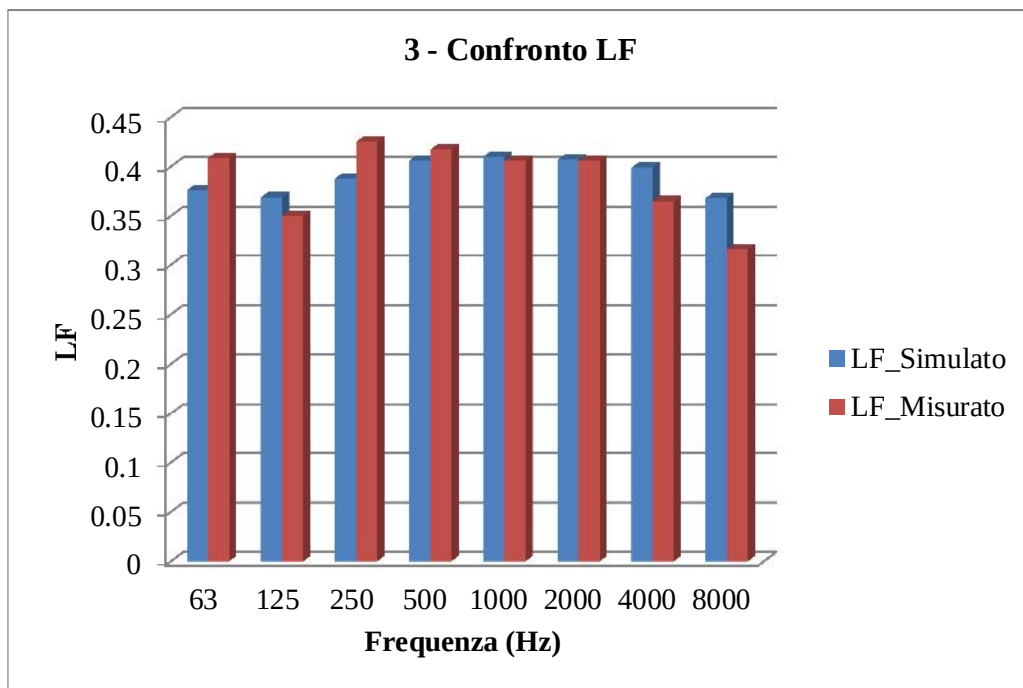
Infine il parametro binaurale relativo alla *IACC*, come nel caso del Lateral Fraction, presenta una concordanza molto buona alle medie frequenze tra i valori simulati e quelli misurati (Fig. 9.61).

Fig. 9.59 – Confronto dei valori del LF misurato e simulatoFig. 9.60 – Mappa di distribuzione del LF a 1000 Hz

Fig. 9.61 – Confronto dei valori della *IACC* misurata e simulata

A titolo di esempio si riportano i confronti dei valori dei parametri simulati e misurati a tutte le frequenze per il solo punto di ricezione 3 (da Fig. 9.62 a Fig. 9.65).

Fig. 9.62 – Confronto dei valori dell'*EDT* misurato e simulato nel punto di ricezione 3

Fig. 9.63 – Confronto dei valori del *SPL* misurato e simulato nel punto di ricezione 3Fig. 9.64 – Confronto dei valori del *LF* misurato e simulato nel punto di ricezione 3

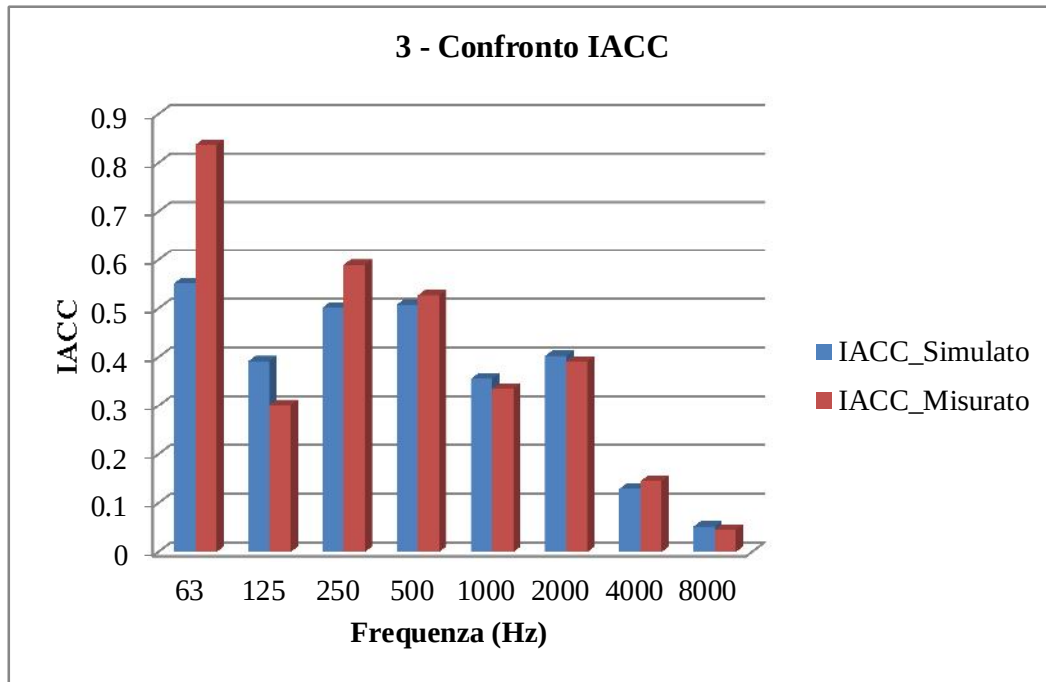


Fig. 9.65 – Confronto dei valori della *IACC* misurata e simulata nel punto di ricezione 3

L'analisi del reflectogramma (a titolo esemplificativo si riporta in Fig. 9.66 quello relativo al punto di misura 3 alla frequenza di 1000 Hz), evidenzia tempi di ritardo della prima riflessione compresi tra 12 e 35 ms, che assicurano la totale assenza di eco.

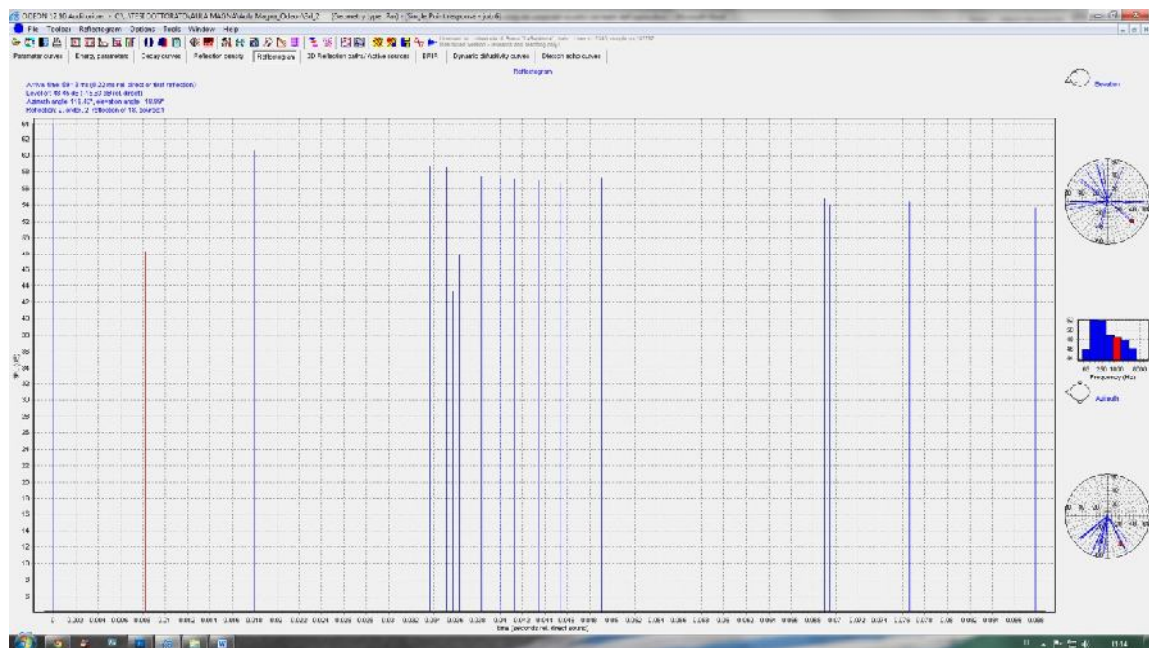


Fig. 9.66 – Reflectogramma relativo al punto 3 a 1000 Hz

9.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

Il Teatro Ateneo è l'unico teatro esistente in un'università italiana e fu costruito nel 1935 come Teatro dell'Università di Roma. Nel 1954 fu fondato l'Istituto del teatro, con il compito primario di programmare l'attività del Teatro Ateneo; ad esso si appoggiò, dal 1961, l'insegnamento di "Storia del teatro e dello spettacolo" della Facoltà di Lettere e filosofia, tenuto prima da Giovanni Macchia e poi da Ferruccio Marotti.

Nel 1981 il Rettore Ruberti decise di separare l'attività del Teatro Ateneo dall'attività didattica dell'Istituto del teatro, trasformato nel 1985 in Dipartimento di Musica e spettacolo. Il Centro Teatro Ateneo ha organizzato laboratori, seminari, convegni, mostre, pubblicazioni e dal 1987 le stagioni teatrali del Teatro Ateneo, riprendendo così la propria attività di teatro pubblico, dopo oltre trent'anni di silenzio.

Dall'anno accademico 1995 - 96 questa importante attività è stata sospesa e il numero di laboratori e seminari ridotto. L'obiettivo del Centro è stato quello di affiancare all'attività didattica accademica (rappresentata dall'insieme dei corsi di discipline dello Spettacolo) un insieme di iniziative che consentano a tutti gli studenti di avvicinarsi al mondo dello spettacolo attraverso una conoscenza diretta del fare e del vedere teatro. Ulteriore finalità è promuovere la ricerca sull'interazione fra il teatro e le nuove tecnologie audiovisive, digitali e multimediali e il loro uso come strumenti di lavoro teatrale e di analisi del teatro.

Nel 2012 sono iniziati dei lavori di ristrutturazione del Teatro, commissionati dal Provveditorato agli studi di Roma, che prevedono il rifacimento completo della sala (Fig. 9.67).

Dal punto di vista acustico, il progetto prevede due configurazioni possibili: la prima è caratterizzata dalla presenza di una fossa orchestrale e quindi adibita a concerti e musica operistica (Fig. 9.68); la seconda prevede una diminuzione delle sedute, con allungamento del palco, per rappresentazioni teatrali (Fig. 9.69). I materiali di finitura previsti sono legno sul pavimento, pannelli fonoassorbenti sulle pareti e intonaco. Da progetto, il soffitto è piano.

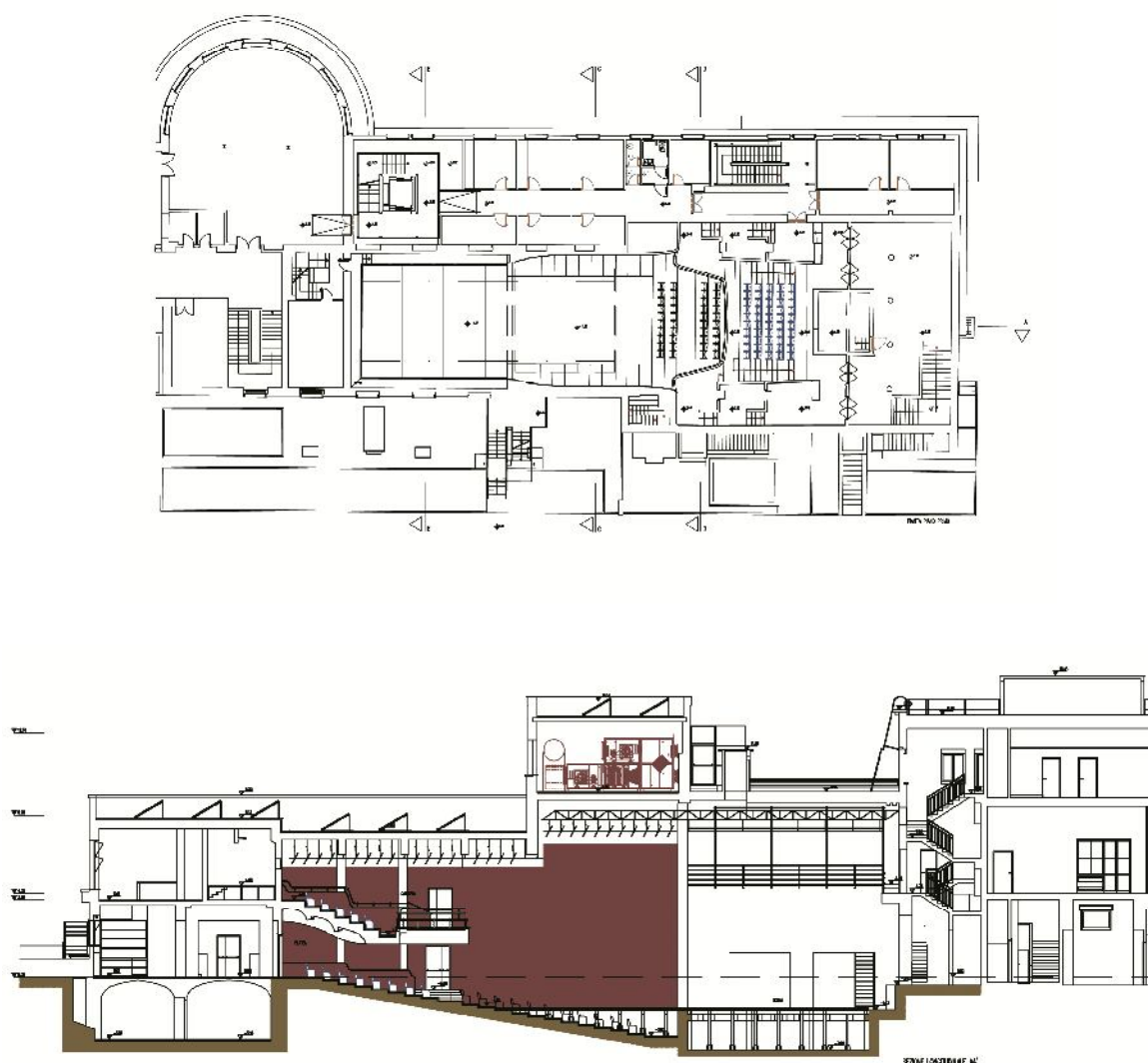


Fig. 9.67 – Pianta e sezione del progetto di ristrutturazione del Nuovo Teatro di Ateneo

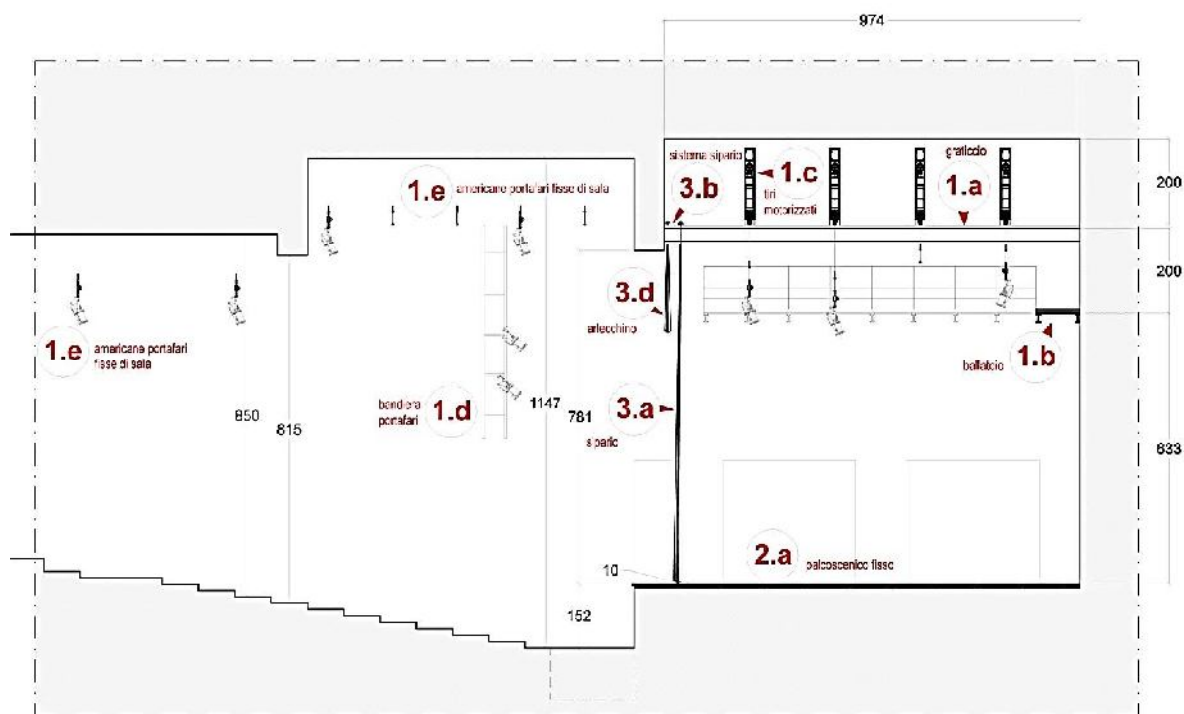


Fig. 9.68 – Configurazione della sala per concerti

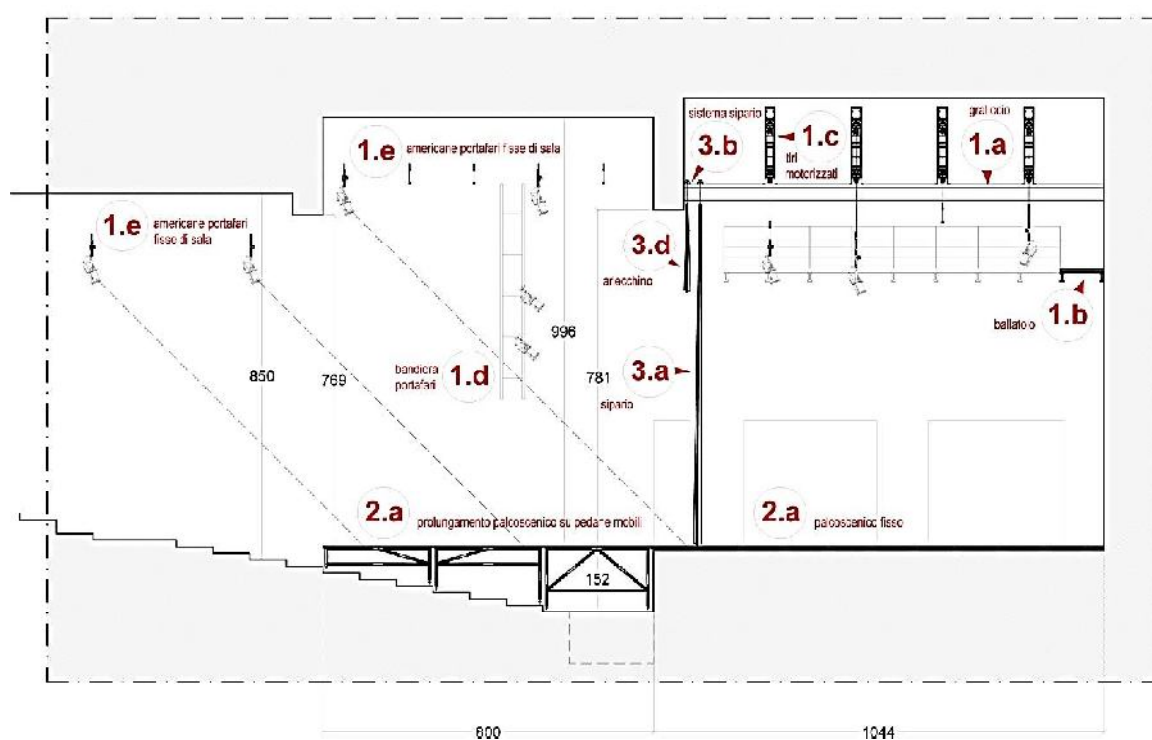


Fig. 9.69 – Configurazione della sala per rappresentazioni teatrali

Al fine di valutare la bontà delle scelte architettoniche nelle due configurazioni dal punto di vista acustico, sono stati predisposti dei modelli tridimensionali per effettuare le simulazioni. In questo caso non è stato possibile effettuare una campagna di misure con cui tarare il modello, essendo il Teatro ancora in fase di progettazione

9.4.1. Risultati delle simulazioni per la configurazione sala da concerto

Il modello digitale tridimensionale definitivo (Fig. 9.70), costruito come descritto precedentemente, è formato da 208 superfici, costituite da 7 materiali differenti.

In questo caso è stata considerata la presenza contemporanea di due sorgenti:

- una sorgente onnidirezionale posizionata nella fossa orchestrale con potenza sonora di 100 dB, rappresentativa dei musicisti;
- una sorgente onnidirezionale posizionata al centro del palco con potenza sonora di 80 dB, rappresentativa dei cantanti e/o oratori.

Anche in questo caso per il calcolo è stato utilizzato il Room setup “Precision”.

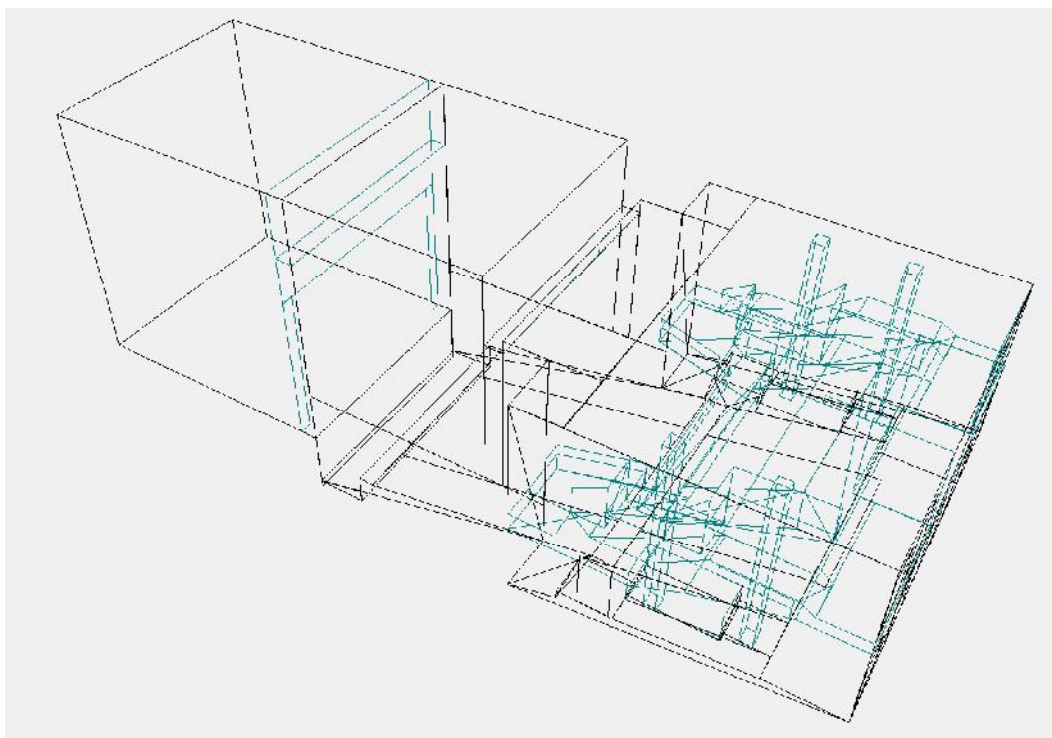


Fig. 9.70 – Modello3D implementati in Odeon

Durante la simulazione sono stati utilizzati sia ricettori puntuali ad un'altezza di 1.2 m dal piano, posizionati come in Fig. 9.71, sia una griglia di calcolo con distanza tra i ricettori di 0.5 m (Fig. 9.72).

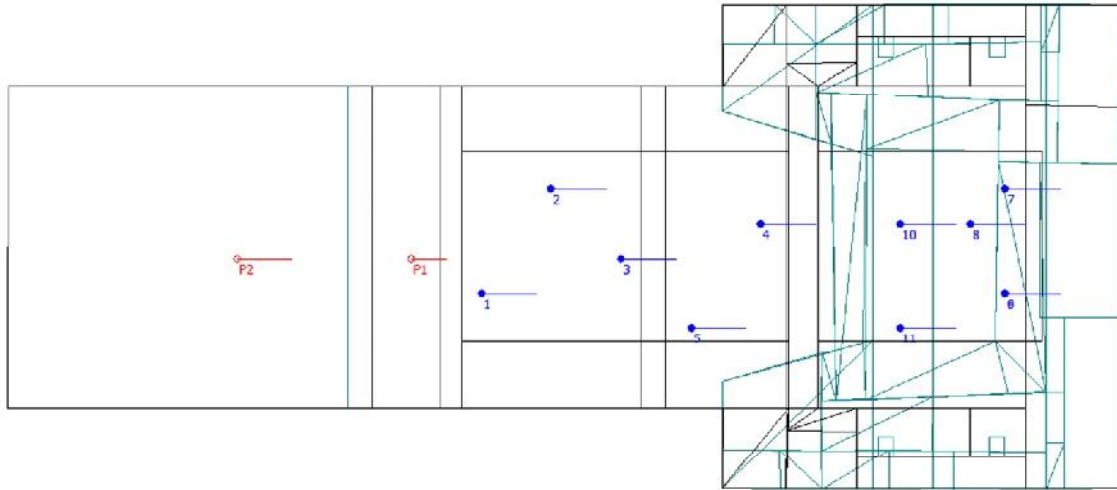


Fig. 9.71 – Posizionamento dei ricettori puntuali

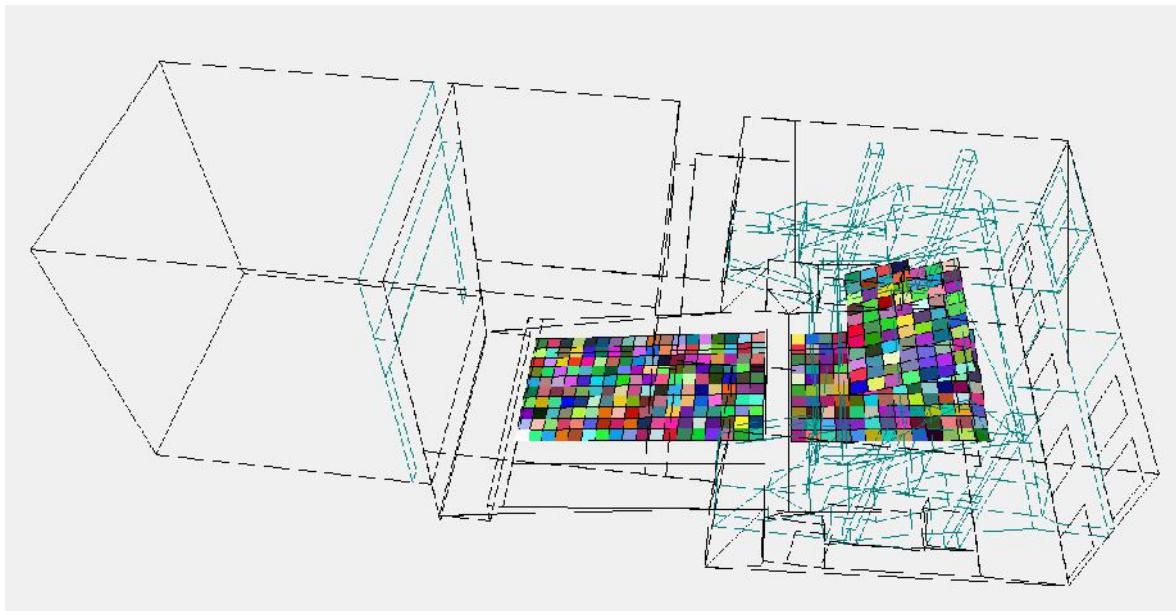


Fig. 9.72 – Griglia di calcolo

Vengono riportate le tabelle con i valori simulati dei principali parametri acustici (Tab. 9.9) e le mappe di distribuzione dei singoli parametri: è presentata, per ogni parametro, una mappa di distribuzione all'interno della sala alla frequenza rappresentativa di 1000 Hz. I parametri scelti sono l'*EDT*, il livello di pressione, il *LF* e la *IACC*, cioè quelli che verranno utilizzati per la valutazione psicoacustica della sala.

Punto di ricezione R1								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.37	1.27	0.79	0.65	0.65	0.84	0.69	0.38
SPL (dB)	85.3	85.2	85	85	85	85.1	84.7	83.8
LF(80)	0.207	0.207	0.208	0.208	0.209	0.211	0.201	0.182
IACC	0.616	0.247	0.245	0.297	0.453	0.336	0.257	0.161
Punto di ricezione R2								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.51	1.41	0.98	0.87	0.85	1.02	0.86	0.50
SPL (dB)	82.8	82.7	82	81.8	81.8	82.1	81.7	80.3
LF(80)	0.325	0.325	0.325	0.321	0.318	0.316	0.305	0.287
IACC	0.663	0.495	0.528	0.280	0.385	0.247	0.121	0.103
Punto di ricezione R3								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.51	1.42	0.97	0.86	0.85	1.01	0.86	0.53
SPL (dB)	81.8	81.7	80.6	80.2	80.3	80.7	80.2	78.6
LF(80)	0.322	0.321	0.317	0.310	0.309	0.312	0.303	0.288
IACC	0.860	0.240	0.276	0.248	0.601	0.564	0.539	0.179
Punto di ricezione R4								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.46	1.36	0.92	0.82	0.81	0.98	0.85	0.57
SPL (dB)	80.4	80.3	78.9	78.2	78.2	78.8	78.3	76.3
LF(80)	0.310	0.298	0.279	0.268	0.263	0.272	0.265	0.253
IACC	0.404	0.533	0.536	0.227	0.497	0.407	0.292	0.187
Punto di ricezione R5								
Parametri	Frequenza (Hz)							

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.47	1.36	0.91	0.83	0.82	0.99	0.85	0.55
SPL (dB)	81.5	81.5	80.3	79.7	79.6	80.2	79.6	77.7
LF(80)	0.301	0.289	0.286	0.283	0.284	0.290	0.284	0.273
IACC	0.643	0.688	0.445	0.135	0.472	0.442	0.342	0.138
Punto di ricezione R6								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.23	1.15	0.8	0.73	0.7	0.9	0.76	0.52
SPL (dB)	76.2	76.3	75	74.4	74.3	75.3	74.5	72
LF(80)	0.223	0.217	0.186	0.158	0.158	0.197	0.201	0.190
IACC	0.605	0.365	0.302	0.381	0.603	0.335	0.234	0.111
Punto di ricezione R7								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.23	1.15	0.8	0.77	0.75	0.94	0.76	0.52
SPL (dB)	76.2	76.2	74.9	74.2	74.2	75.2	74.5	72
LF(80)	0.224	0.220	0.190	0.161	0.161	0.201	0.204	0.193
IACC	0.213	0.698	0.276	0.219	0.560	0.377	0.201	0.084
Punto di ricezione R8								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.24	1.16	0.81	0.75	0.73	0.91	0.76	0.53
SPL (dB)	76.7	76.8	75.5	74.9	74.8	75.6	74.9	72.5
LF(80)	0.253	0.241	0.206	0.174	0.173	0.207	0.209	0.195
IACC	0.521	0.698	0.623	0.413	0.669	0.331	0.295	0.170
Punto di ricezione G1								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.39	1.27	0.7	0.62	0.62	0.81	0.7	0.44
SPL (dB)	78.8	78.5	76.7	75.7	75.7	77	76.5	73.9
LF(80)	0.237	0.229	0.2	0.169	0.174	0.215	0.222	0.214
IACC	0.641	0.568	0.442	0.184	0.398	0.433	0.191	0.103
Punto di ricezione G2								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.36	1.26	0.79	0.75	0.75	0.88	0.75	0.50
SPL (dB)	79.4	79.2	77.1	75.6	75.5	76.9	76.7	74.3

LF(80)	0.238	0.229	0.184	0.135	0.137	0.191	0.208	0.204
IACC	0.088	0.634	0.294	0.317	0.398	0.308	0.208	0.069
Punto di ricezione G3								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.37	1.26	0.78	0.69	0.69	0.87	0.76	0.50
SPL (dB)	79.3	79	76.9	75.8	75.8	76.9	76.6	74.2
LF(80)	0.418	0.410	0.354	0.301	0.304	0.358	0.376	0.371
IACC	0.441	0.216	0.254	0.291	0.464	0.451	0.323	0.097

Tab. 9.9 – Valori simulati dei principali parametri acustici nei punti di ricezione considerati

In Fig. 9.73 è rappresentata la mappa dell'*EDT* alla frequenza di 1000 Hz .

I tempi di riverberazione sono eccessivamente bassi, considerando che l'ottimale si attesta intorno agli 1.7 s. L'eccessiva distribuzione di pannelli fonoassorbenti rende la sala troppo sorda per l'ascolto della musica, nonostante ci sia una buona uniformità.

Al contrario per il livello di pressione, la mappa di distribuzione mostra livelli abbastanza buoni in tutta la sala (94 – 84 dB), ma con una disuniformità eccessiva soprattutto in platea. Le ultime file, in particolare, a causa del solaio troppo basso della galleria, sono fortemente penalizzate (Fig. 9.74).

La Fig. 9.75 mostra la mappa di distribuzione del *LF*: analogamente a quanto accade per il livello di pressione, la sensazione di spazialità risulta essere buona nella prima metà della platea (*LF* di 0.3 ca.), mentre sul fondo della platea e in galleria si hanno valori eccessivamente bassi (0.15 ca.). Si evidenzia quindi anche in questo caso una forte disuniformità.

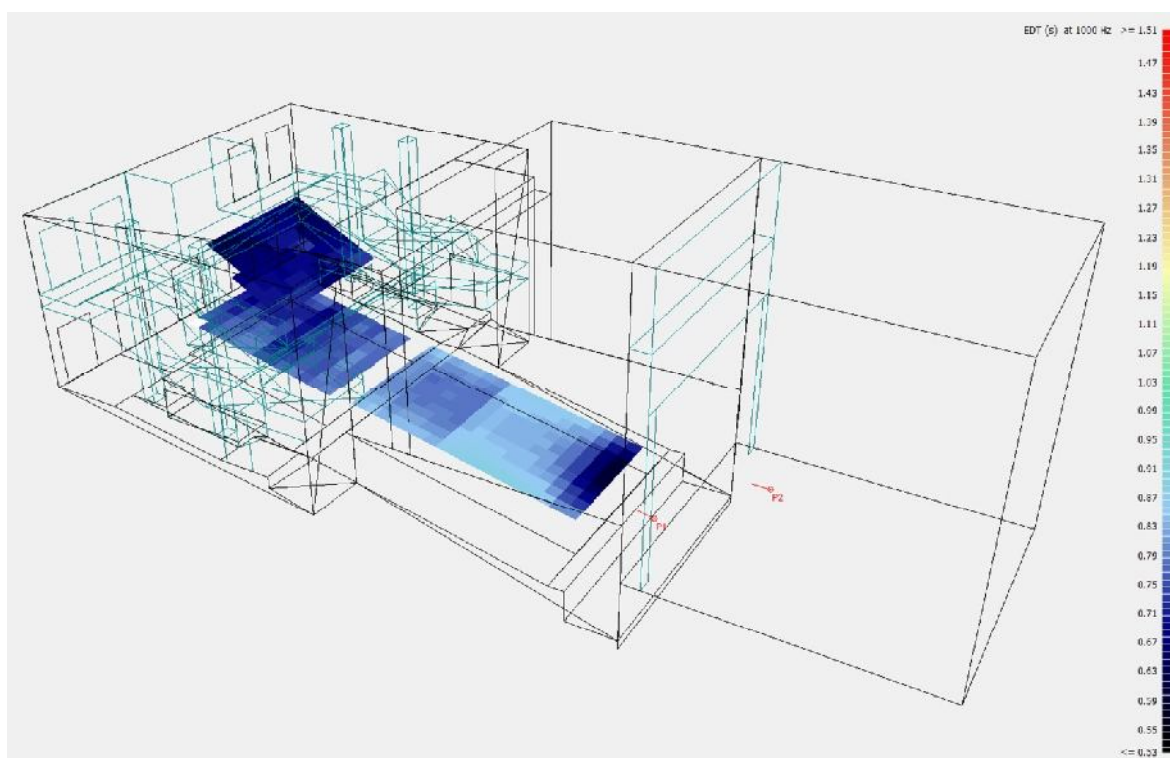


Fig. 9.73 – Mappa di distribuzione dell'EDT a 1000 Hz

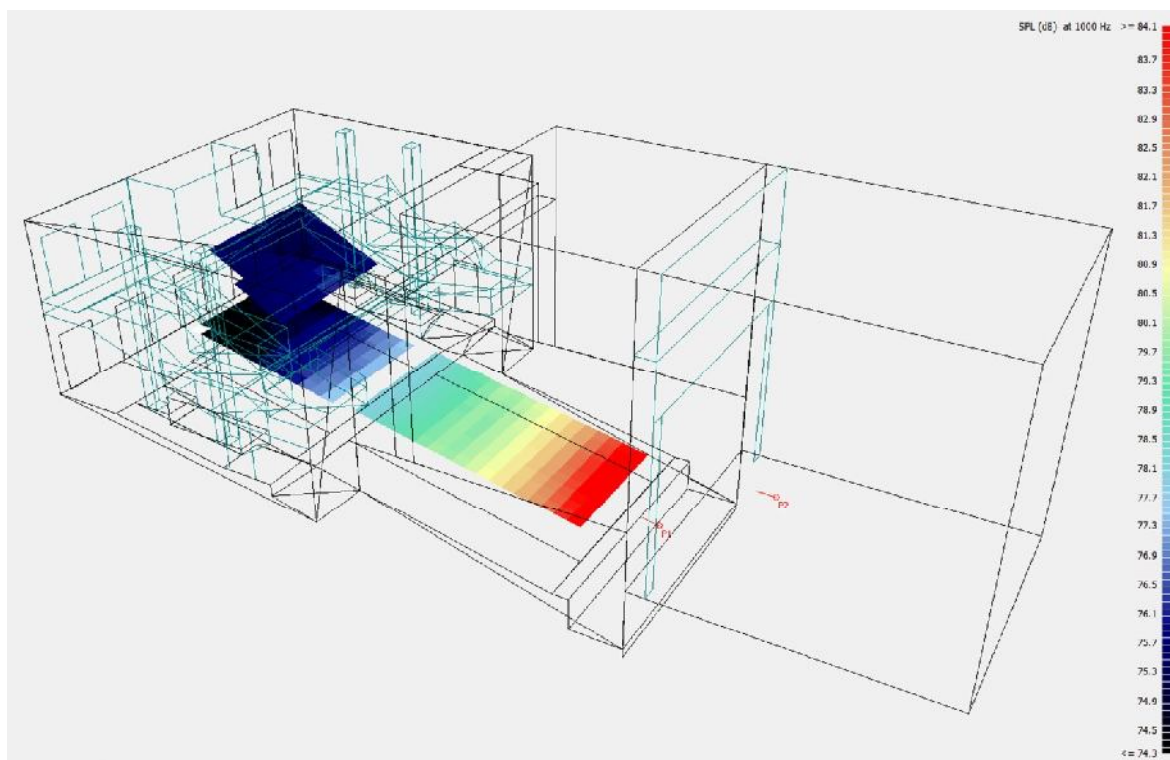
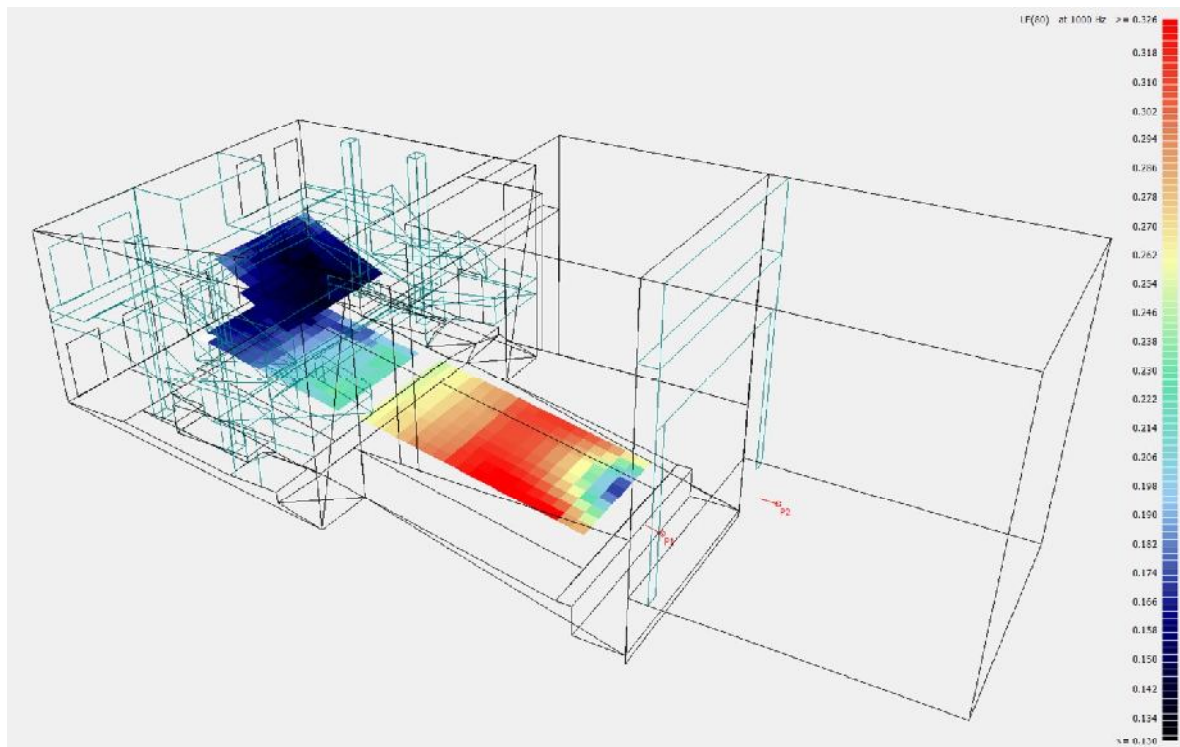


Fig. 9.74 – Mappa di distribuzione del SPL a 1000 Hz

Fig. 9.75 – Mappa di distribuzione del LF a 1000 Hz

L'analisi del reflectogramma (a titolo esemplificativo si riporta in Fig. 9.76 quello relativo al punto di misura G3 alla frequenza di 1000 Hz), evidenzia tempi di ritardo della prima riflessione molto ridotti, che assicurano la totale assenza di eco.

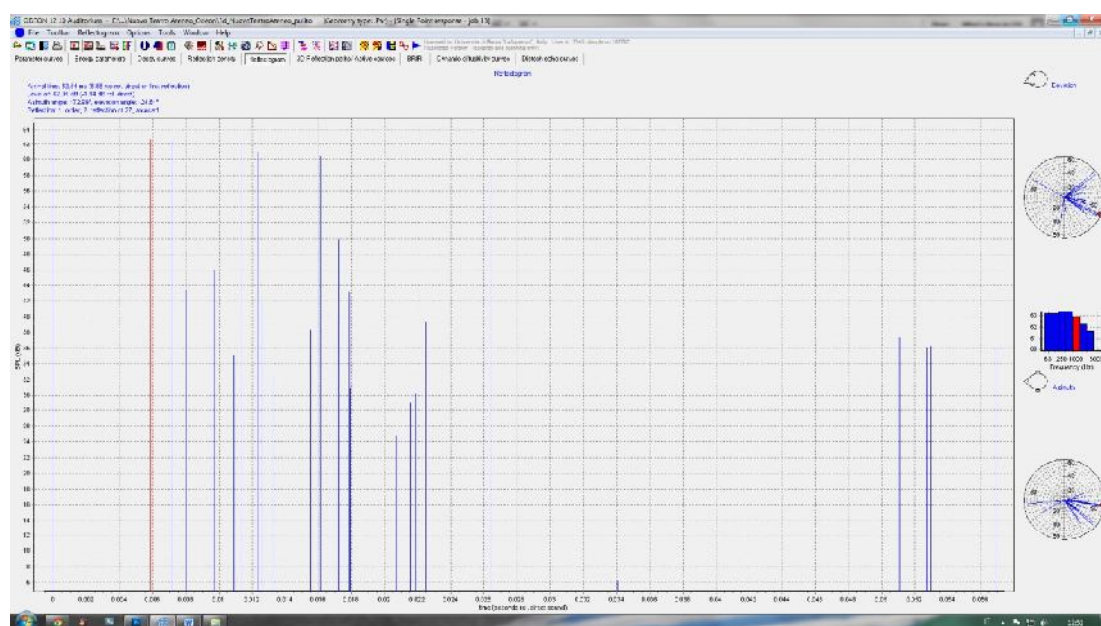


Fig. 9.76 – Reflectogramma relativo al punto G3 a 1000 Hz

9.4.2. Risultati delle simulazioni per la configurazione teatro

Il modello digitale tridimensionale definitivo (Fig. 9.77), costruito come descritto precedentemente, è formato da 202 superfici, costituite da 7 materiali differenti.

In questo caso è stata considerata una sorgente onnidirezionale posizionata al centro del palco allungato con potenza sonora di 85 dB. Anche in questo caso per il calcolo è stato utilizzato il Room setup “Precision”.

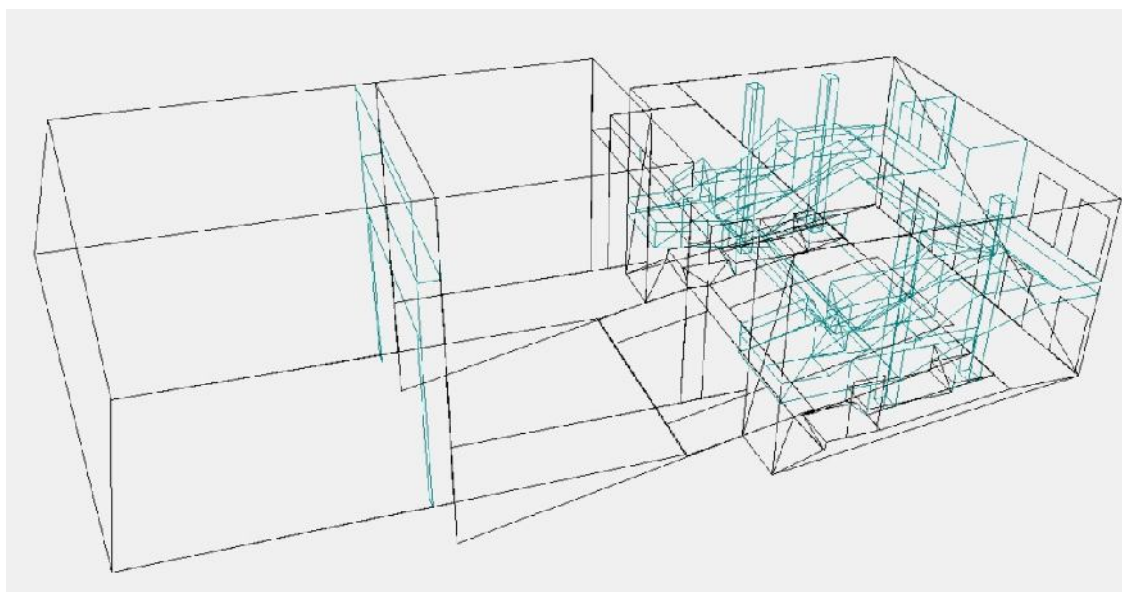


Fig. 9.77 – Modello 3D implementato in Odeon

Durante la simulazione sono stati utilizzati sia ricettori puntuali ad un'altezza di 1.2 m dal piano, posizionati come in Fig. 9.78, sia una griglia di calcolo con distanza tra i ricettori di 0.5 m (Fig. 9.79). I ricettori puntuali sono gli stessi della configurazione per sala da concerto, epurati di quelle sedute che vengono rimosse in caso di allungamento del palco.

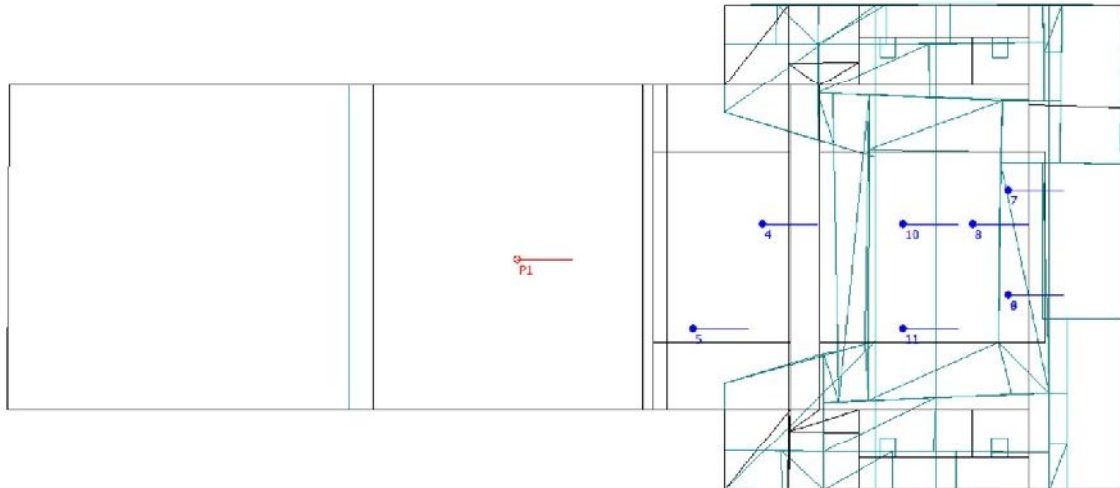


Fig. 9.78 – Posizionamento dei ricettori puntuali

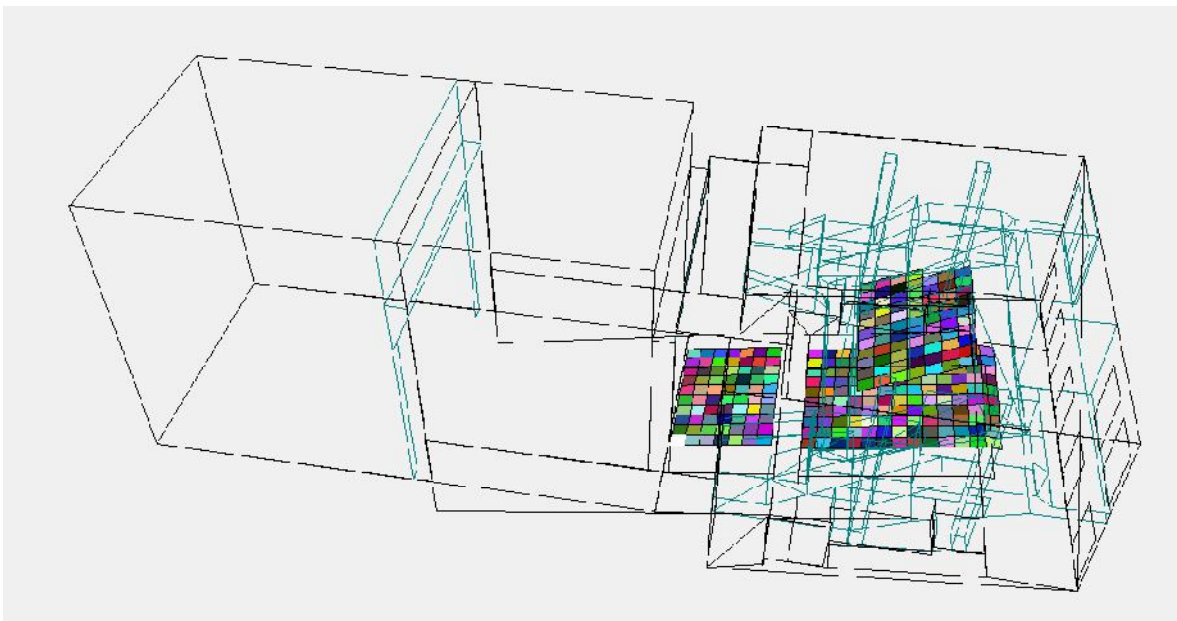


Fig. 9.79 – Griglia di calcolo

Vengono riportate le tabelle con i valori simulati dei principali parametri acustici (Tab. 9.10) e le mappe di distribuzione dei singoli parametri: è presentata, per ogni parametro, una mappa di distribuzione all'interno della sala alla frequenza rappresentativa di 1000 Hz. I parametri scelti sono l'*EDT*, il livello di pressione, il *LF* e la *IACC*, cioè quelli che verranno utilizzati per la valutazione psicoacustica della sala.

Punto di ricezione R4								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.63	1.47	1.08	0.97	0.97	1.22	1.08	0.68
SPL (dB)	66.6	66.4	65.1	64.5	64.2	64.6	64.1	62.4
LF(80)	0.319	0.311	0.307	0.303	0.299	0.293	0.284	0.268
IACC	0.873	0.883	0.448	0.213	0.661	0.682	0.572	0.218
Punto di ricezione R5								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.68	1.53	1.14	1.09	1.08	1.26	1.10	0.71
SPL (dB)	67.6	67.3	66.1	65.6	65.3	65.8	65.3	63.8
LF(80)	0.300	0.298	0.294	0.288	0.280	0.273	0.263	0.245
IACC	0.385	0.059	0.234	0.231	0.353	0.495	0.421	0.129
Punto di ricezione R6								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.44	1.36	1.17	1.21	1.20	1.23	1.15	0.83
SPL (dB)	60.6	60.6	58.6	57.5	57.3	58.6	57.8	55.3
LF(80)	0.218	0.204	0.161	0.135	0.143	0.199	0.199	0.183
IACC	0.519	0.369	0.320	0.297	0.653	0.614	0.358	0.124
Punto di ricezione R7								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.44	1.34	1.09	1.05	1.04	1.23	1.03	0.68
SPL (dB)	60.8	60.9	59.1	58.2	58.1	59	58.3	56.1
LF(80)	0.232	0.222	0.194	0.167	0.165	0.203	0.202	0.190
IACC	0.256	0.078	0.242	0.352	0.658	0.590	0.354	0.082
Punto di ricezione R8								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.48	1.40	1.15	1.13	1.09	1.22	1.06	0.67
SPL (dB)	61.3	61.4	59.5	58.4	58.3	59.3	58.7	56.4
LF(80)	0.217	0.210	0.185	0.164	0.160	0.198	0.201	0.190
IACC	0.208	0.600	0.306	0.383	0.660	0.622	0.430	0.121
Punto di ricezione G1								
Parametri	Frequenza (Hz)							

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.57	1.44	1.38	1.39	1.38	1.40	1.33	0.88
SPL (dB)	63.3	62.9	61.2	60.7	60.6	61.4	60.8	58.0
LF(80)	0.226	0.227	0.173	0.146	0.160	0.212	0.226	0.223
IACC	0.563	0.167	0.227	0.164	0.408	0.449	0.245	0.079
Punto di ricezione G2								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.58	1.44	1.16	1.18	1.20	1.32	1.18	0.72
SPL (dB)	64.9	64.6	62.5	61.4	61.1	62.2	61.9	59.5
LF(80)	0.221	0.211	0.166	0.133	0.137	0.189	0.209	0.206
IACC	0.159	0.170	0.113	0.242	0.577	0.552	0.343	0.091
Punto di ricezione G3								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.59	1.47	1.17	1.15	1.18	1.33	1.19	0.71
SPL (dB)	64.8	64.5	62.3	61.1	60.8	62.0	61.6	59.3
LF(80)	0.266	0.255	0.196	0.144	0.148	0.208	0.231	0.231
IACC	0.310	0.367	0.252	0.237	0.578	0.522	0.341	0.135

Tab. 9.10 – Valori simulati dei principali parametri acustici nei punti di ricezione considerati

In Fig. 9.80 è rappresentata la mappa dell'*EDT* alla frequenza di 1000 Hz .

I tempi di riverberazione sono leggermente bassi, soprattutto in prossimità del palco, considerando che il valore ottimale si attesta intorno agli 1.3 s. L'eccessiva distribuzione di pannelli fonoassorbenti rende la sala troppo sorda, nonostante ci sia una buona uniformità.

Al contrario per il livello di pressione, la mappa di distribuzione mostra livelli abbastanza buoni in tutta la sala (75 – 67.5 dB), ma con una disuniformità eccessiva soprattutto in platea. Le ultime file, in particolare, a causa del solaio troppo basso della galleria, sono fortemente penalizzate (Fig. 9.81).

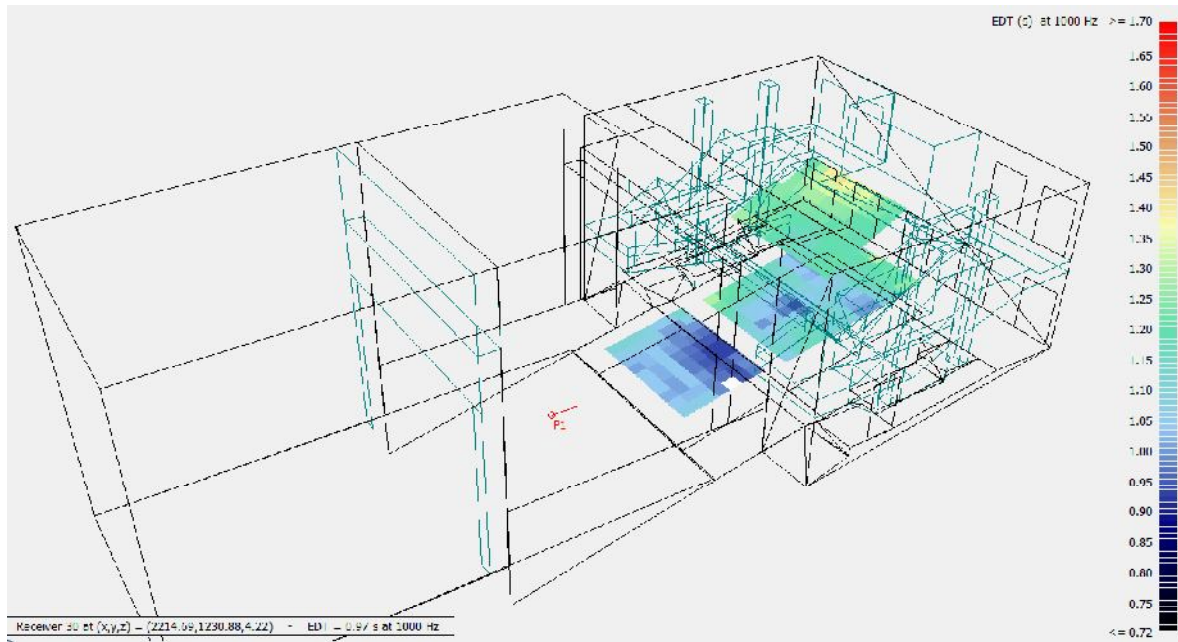


Fig. 9.80 – Mappa di distribuzione dell'EDT a 1000 Hz

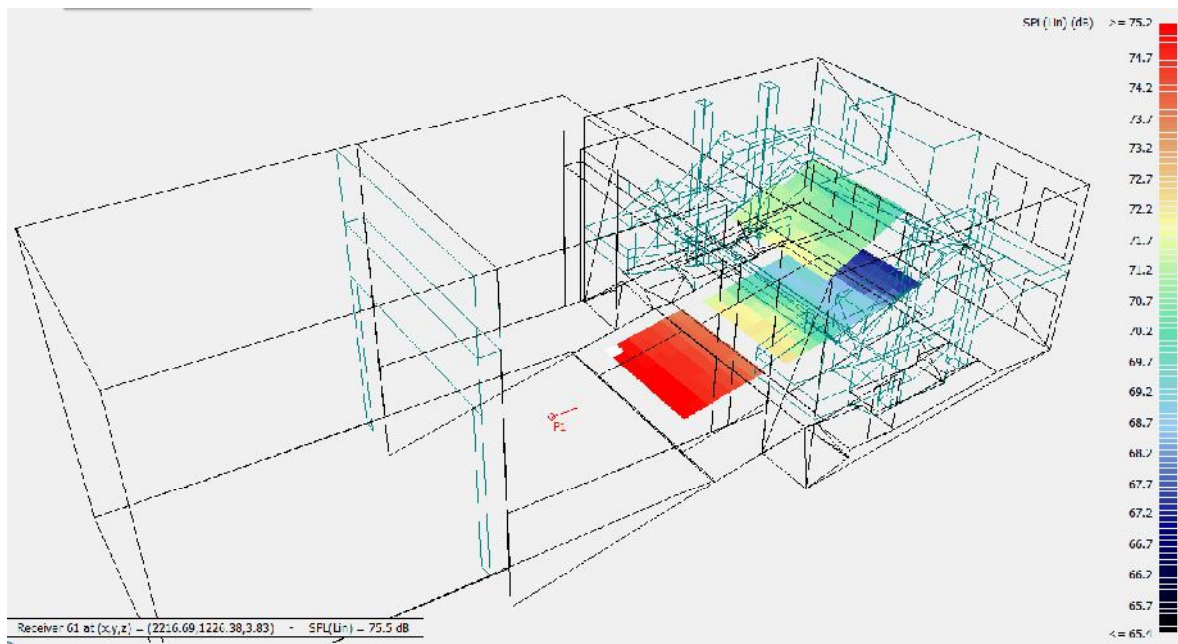


Fig. 9.81 – Mappa di distribuzione del SPL a 1000 Hz

La Fig. 9.82 mostra la mappa di distribuzione del *LF*: analogamente a quanto accade per il livello di pressione, la sensazione di spazialità risulta essere buona nella prima metà della platea (*LF* di 0.3 ca.), mentre sul fondo della platea e in galleria si hanno valori

eccessivamente bassi (0.15 ca.). Si evidenzia quindi anche in questo caso una forte disuniformità, confermata dalla percezione binaurale buona in platea ed insufficiente in galleria.

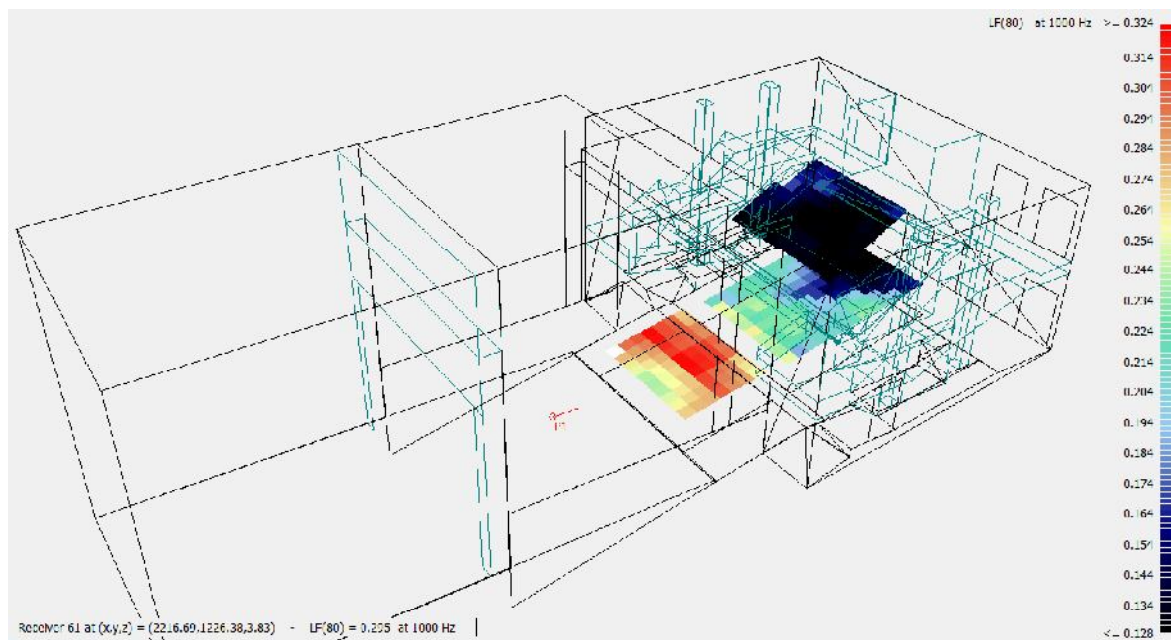


Fig. 9.82 – Mappa di distribuzione del LF a 1000 Hz

L'analisi del reflectogramma evidenzia tempi di ritardo della prima riflessione molto ridotti, che assicurano la totale assenza di eco.

9.5. Teatro dell'Opera di Roma

Il Teatro dell'Opera di Roma è il teatro romano dedicato all'opera lirica e al balletto; è anche conosciuto come Teatro Costanzi, dal nome del suo artefice, Domenico Costanzi.

Ancor prima che la capitale d'Italia fosse trasferita a Roma, monsignor Francesco Saverio De Merode, che possedeva la vallata di San Vitale, vide con chiarezza che urbanizzare il percorso dalla stazione ferroviaria (allora in costruzione) a Via del Corso sarebbe stato un vero affare. Domenico Costanzi partecipò all'iniziativa e comprò dei terreni, sui quali fece costruire prima l'Hotel Quirinale lungo la nuova via Nazionale nel 1874, poi sul terreno confinante il Teatro d'Opera, che nella nuova capitale ancora mancava. L'albergo comunicava col teatro attraverso un passaggio sotterraneo, che garantiva la massima privacy agli artisti (i quali anche per questo apprezzavano molto la sistemazione).

L'architetto Achille Sfondrini in due anni costruì il teatro, nello stile neorinascimentale di moda all'epoca. Il teatro non era di grandi dimensioni, ma aveva un'ottima acustica e una bella cupola dipinta da Andrea Brugnoli. L'opera fu inaugurata alla presenza del re Umberto I di Savoia e della regina Margherita di Savoia il 27 novembre 1880, con la *Semiramide* di Rossini.

La soluzione presentata per il Politeama è il compromesso tra una tecnologia avanzata nello studio dell'organismo teatrale (il Teatro Costanzi suscitò notevole interesse in Italia e all'estero) e una definizione formale poco più che mediocre nell'ambito di uno sciatto eclettismo.

All'esterno i volumi funzionali della cupola e del palcoscenico sovrastano un parallelepipedo che da un lato ricalca il lotto edilizio e dall'altro cerca di interpretare con il filtro del neocinquecentismo l'idea del migliore dei teatri possibili per Roma. *“Lo stile architettonico prescelto – dichiara – si fu quello del Cinquecento, siccome il meglio rispondente all'eleganza e alla severità onde al tempo stesso deve essere informato il concetto artistico d'un teatro”*. Le facciate ancora conservate su Via Firenze e su Via Torino, e in parte quella verso l'albergo, lasciano intravedere la sintassi scolastica di arcate ripetute con leggere variazioni in orizzontale e verticale. Nel progetto si sovrappongono gli ordini toscano e composito (arricchito quest'ultimo nell'esecuzione da maschere e strumenti musicali), sintetizzando la canonica successione dei tre o quattro ordini, comune agli antichi teatri o anfiteatri romani e ripresa nel codice classico rinascimentale.

L'interno della sala teatrale, scandito dalle tre fasce orizzontali dei palchi, delimitati da archi su colonne di gusto quattrocentesco, era senz'altro riscattato dalla cupola e dal sistema di illuminazione che permetteva di effettuare anche spettacoli a luce diurna. La sala veniva rischiarata dalla corona di finestre circolari nell'ordine superiore (luce filtrata dal diaframma del colonnato) e dalla seconda serie di finestre pure circolari della lanterna. Di notte attraverso un *“meccanismo di nuova invenzione che distribuiva il gas mediante calcolatori ed apparecchi speciali”* si ottenevano effetti straordinari per l'epoca. L'architetto sottolineava poi orgogliosamente i diversi meccanismi del teatro: *“Il piano della Platea per mezzo di apposito meccanismo può essere interamente sollevato fino al livello del palco scenico (...). Lo stesso piano del palco è costruito in modo da potersi, richiedendolo il meccanismo di qualche grande spettacolo, dismettere e comunicare col sottopalco della profondità da sei a dodici metri (...). La platea ed il palco scenico possono venire all'istante separati da un piano verticale reticolato di ferro che in occasione d'incendio permetta l'isolamento del fuoco. La stessa rete metallica isola pure i camerini ai lati del palco scenico”*.

Il giorno dell'inaugurazione, il 27 novembre 1880, il Teatro fu salutato come “uno dei più ragguardevoli non solo d'Italia ma d'Europa”, e un prolungato applauso tributato al

committente e all'architetto. Si ricomponeva così, nel giorno del trionfo, una vicenda triennale intessuta di entusiasmi ma anche di contrasti e di amarezze e perfino di incomprensioni tra il generoso Costanzi, che rischiò il fallimento personale per coronare il suo sogno, e l'ambizioso Sfondrini, che proponeva continuamente nuove varianti, facendo sballare di molto il preventivo iniziale. La vicenda, vista dalla parte del committente, assume perfino aspetti di tragedia e di disperazione; mentre, vista dalla parte dell'architetto, rivela caratteri di frustrazione a causa dei numerosi compromessi subiti nel passaggio dal progetto alla realizzazione. *“Malgrado il regime dell'economia a cui fu condannato l'architetto, specialmente verso la fine, il Teatro Costanzi riuscì il più bello e grandioso che sia in Italia e uno dei pochi in Europa di simil genere. La struttura metallica, il mirabile studio dei contrasti e di resistenze, le belle linee dell'esterno, la maestà della curva interna, la cupola arditamente slanciata, il sistema di illuminazione di effetto magico, la perfetta acustica dell'ambiente e la sagace scelta dei valentissimi artisti per le decorazioni, meritavano allo Sfondrini il plauso generale. Quando il Teatro venne inaugurato il successo fu imponente; e ancor più grandioso e splendido allorché il teatro, fantasticamente inondato di luce, venne aperto ai veglioni”*.

Sfondrini progettò il teatro privilegiando soprattutto il risultato acustico e concependo la struttura interna come una “cassa armonica”; la forma a ferro di cavallo ne è una delle prove più evidenti (Fig. 9.83).

In origine il teatro, in grado di accogliere 2212 spettatori, disponeva come detto di tre ordini di palchi (Fig. 9.84), di un anfiteatro e di una galleria.

Nel 1926 il Comune di Roma acquistò il teatro e ne assunse la gestione. I lavori di completamento, ampliamento e ristrutturazione furono affidati all'architetto Marcello Piacentini, che rifece integralmente i prospetti esterni e aumentò di uno i tre ordini di palchi originali e fece installare uno straordinario lampadario di cristallo di Murano, oggi considerato il più grande del mondo. Il teatro assunse il nome di Teatro Reale dell'Opera e fu reinaugurato il 27 febbraio 1928 con il Nerone di Arrigo Boito. Fu poi eliminato l'ingresso di rappresentanza, che si affacciava sui giardini sul retro dell'hotel Quirinale, accessibile da un vicolo cieco oggi non più esistente. L'ingresso principale fu spostato da via Firenze a via del Viminale, ma non fu possibile, per la ristrettezza dei tempi, creare la nuova facciata sulla piazza secondo un progetto più radicale predisposto da Piacentini e rimasto tuttora inedito.



Fig. 9.83 – Teatro Costanzi, interno



Fig. 9.84 – Ordini di palchi sovrapposti

Eliminato l'epiteto "reale" con il passaggio alla Repubblica, nel 1956 il Comune di Roma affidò allo stesso Piacentini l'incarico di curare un nuovo intervento di ampliamento e restauro. I lavori, che hanno previsto tra l'altro la creazione di uno scalone d'onore e di un foyer dei palchi, di locali per uffici, l'installazione di nuovi arredi e il rifacimento della facciata in uno stile novecentesco, furono ultimati nel 1960. Il Teatro dell'Opera di Roma ha oggi una capienza di circa 2200 posti.

In Fig. 9.85 sono visibili le posizioni dei diffusori e dei punti di ricezione scelti durante le misurazioni. Le registrazioni microfoniche sono state effettuate utilizzando contemporaneamente il registratore digitale A-format a 4 canali, il fonometro con due microfoni cardioidi e la testa artificiale binaurale.

I risultati presentati in questo capitolo si riferiscono alle misurazioni effettuate il 29 luglio 2013. Esse sono state ottenute utilizzando un segnale di sine sweep esponenziale tra 22 Hz e 22 KHz di frequenza, generato a 44100 Hz di frequenza di campionamento con una dinamica di 32 bit e usato per alimentare il sistema dodecaedro.

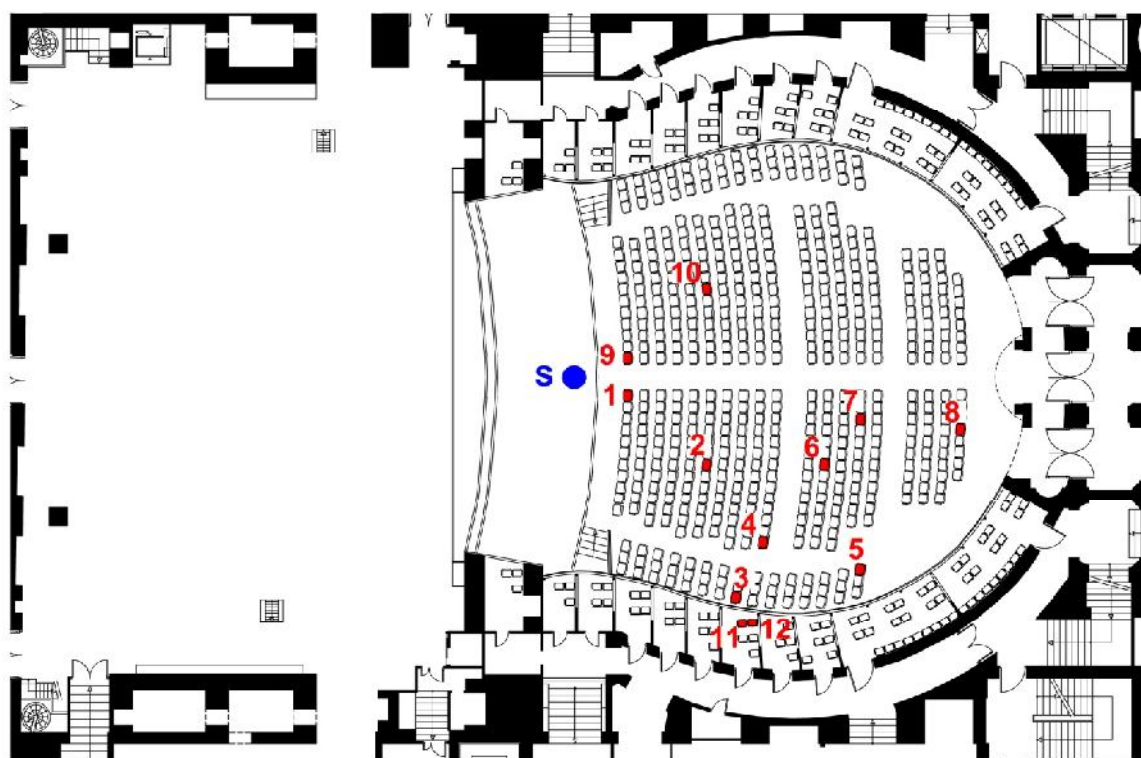


Fig. 9.85 – Punti di misura e posizione della sorgente

9.5.1. Risultati delle misurazioni

In Tab. 9.11 sono riportati i risultati delle misurazioni nei punti di misura considerati.

Punto di ricezione 1 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.61	1.75	1.29	1.31	1.63	2.29	1.74	0.63
SPL (dB)	71.8	72.0	71.9	72.7	73.0	73.3	72.8	70.1
LF(80)	0.064	0.082	0.116	0.121	0.107	0.106	0.128	0.092
IACC	0.300	0.234	0.390	0.472	0.381	0.291	0.145	0.145
Punto di ricezione 2 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.87	2.14	1.96	2.03	2.17	2.68	2.28	1.10
SPL (dB)	70.2	70.7	70.2	70.3	70.5	71.4	70.1	68.2
LF(80)	0.030	0.025	0.028	0.031	0.054	0.071	0.060	0.061
IACC	0.198	0.560	0.270	0.272	0.361	0.291	0.145	0.045
Punto di ricezione 3 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.88	1.73	2.11	1.81	2.22	1.96	1.72	1.47
SPL (dB)	69.8	69.7	69.9	70.4	70.8	71.1	70.2	67.4
LF(80)	0.030	0.079	0.113	0.124	0.160	0.151	0.112	0.100
IACC	0.813	0.340	0.390	0.672	0.681	0.331	0.145	0.135
Punto di ricezione 4 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.64	1.42	1.85	1.49	1.79	2.47	1.59	1.02
SPL (dB)	70.1	70.4	70.1	70.0	70.7	71.8	70.3	67.6
LF(80)	0.206	0.209	0.217	0.268	0.278	0.321	0.313	0.210
IACC	0.479	0.411	0.490	0.672	0.536	0.191	0.145	0.045
Punto di ricezione 5 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.79	2.08	1.93	1.83	2.13	2.64	2.07	1.06

SPL (dB)	69.0	69.5	69.3	70.0	70.7	71.3	69.9	66.9
LF(80)	0.106	0.143	0.188	0.224	0.212	0.168	0.126	0.130
IACC	0.760	0.734	0.790	0.762	0.581	0.491	0.245	0.145
Punto di ricezione 6 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.89	1.99	1.75	1.76	1.83	2.52	1.37	0.99
SPL (dB)	68.9	69.5	69.0	69.1	69.7	70.1	69.3	66.0
LF(80)	0.205	0.246	0.224	0.229	0.225	0.242	0.219	0.201
IACC	0.198	0.156	0.159	0.272	0.481	0.209	0.145	0.045
Punto di ricezione 7 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.62	1.95	1.60	1.47	1.69	2.34	1.71	0.96
SPL (dB)	69.2	69.6	69.1	69.1	70.5	70.8	69.3	65.7
LF(80)	0.358	0.315	0.337	0.350	0.363	0.342	0.351	0.302
IACC	0.510	0.234	0.159	0.372	0.381	0.291	0.145	0.045
Punto di ricezione 8 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.26	1.74	1.26	1.27	1.43	2.25	1.71	0.71
SPL (dB)	69.4	69.8	69.3	69.7	70.0	70.9	69.9	66.2
LF(80)	0.430	0.481	0.461	0.424	0.426	0.430	0.463	0.404
IACC	0.387	0.356	0.390	0.272	0.608	0.591	0.245	0.045
Punto di ricezione 9 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.28	1.48	1.13	1.26	1.47	2.15	1.33	1.01
SPL (dB)	73.0	73.3	72.9	73.4	73.8	74.5	73.5	71.0
LF(80)	0.102	0.126	0.235	0.221	0.246	0.242	0.238	0.202
IACC	0.036	0.154	0.134	0.350	0.272	0.281	0.191	0.045
Punto di ricezione 10 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.77	2.10	1.96	1.84	1.90	2.68	1.77	1.01
SPL (dB)	70.8	71.0	70.5	70.8	71.0	71.8	71.1	69.0
LF(80)	0.012	0.047	0.016	0.051	0.061	0.070	0.027	0.020
IACC	0.080	0.156	0.159	0.242	0.281	0.391	0.245	0.045
Punto di ricezione 11 - VALORI MISURATI								

Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	3.33	2.73	2.00	1.68	1.66	1.66	1.27	0.69
SPL (dB)	66.2	66.7	65.5	64.7	63.3	62.4	60.6	56.2
LF(80)	0.206	0.292	0.133	0.238	0.221	0.219	0.215	0.201
IACC	0.245	0.472	0.490	0.520	0.521	0.389	0.201	0.117
Punto di ricezione 12 - VALORI MISURATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.98	2.14	2.13	1.54	1.46	1.47	0.91	0.35
SPL (dB)	70.0	69.4	68.6	69.8	70.0	69.3	67.1	66.5
LF(80)	0.204	0.276	0.123	0.123	0.211	0.207	0.111	0.121
IACC	0.658	0.492	0.278	0.602	0.625	0.497	0.433	0.381

Tab. 9.11 – Valori dei parametri acustici misurati nei punti di ricezione considerati

Sono poi presentati i tempi di riverberazione riferiti al canale W del registratore digitale (il cui segnale è stato precedentemente trasformato in B-format) rivolto verso il palco, in banda d'ottava tra i 63 Hz e gli 8 KHz (Fig. 9.86). Dato l'elevato numero dei punti di misura, per una maggiore chiarezza del grafico, vengono riportati i valori medi.

Si nota come la risposta della sala sia abbastanza simile nei punti in esame: i tempi di riverberazione si mantengono tra 1.5 e 2.2 secondi, rendendo il Teatro dell'Opera adatto alla musica operistica.

Il grafico in Fig. 9.87, invece, denota un andamento piuttosto disuniforme del parametro *LF*, comprensibile data la natura estremamente diffondente della sala. Nei punti di misura si hanno valori compresi tra 0.052 e 0.427, crescenti mano a mano che ci allontana dalla sorgente: la sensazione di spazialità è pertanto ottima sul fondo della sala, mentre è praticamente inesistente nelle prime file.

Il grafico in Fig. 9.88 mostra invece l'andamento del Livello di pressione: i valori misurati sono molto simili in tutti i punti di misura, il che indica un'ottima uniformità della sala, con la sola eccezione del ricettore 11 che risulta parzialmente nascosto dai divisori dei palchetti.

Infine vengono riportati gli andamenti in frequenza della *IACC* (Fig. 9.89): considerando che i valori misurati sono compresi tra 0.3 e 0.6 circa, si può concludere che la sensazione di binauralità della sala è molto buona, nonostante una certa disuniformità.

Come detto, i dati così ottenuti sono stati utilizzati per la taratura del modello tridimensionale. I parametri di confronto, a tale scopo, sono stati principalmente il Livello di pressione sonora e l'*EDT*.

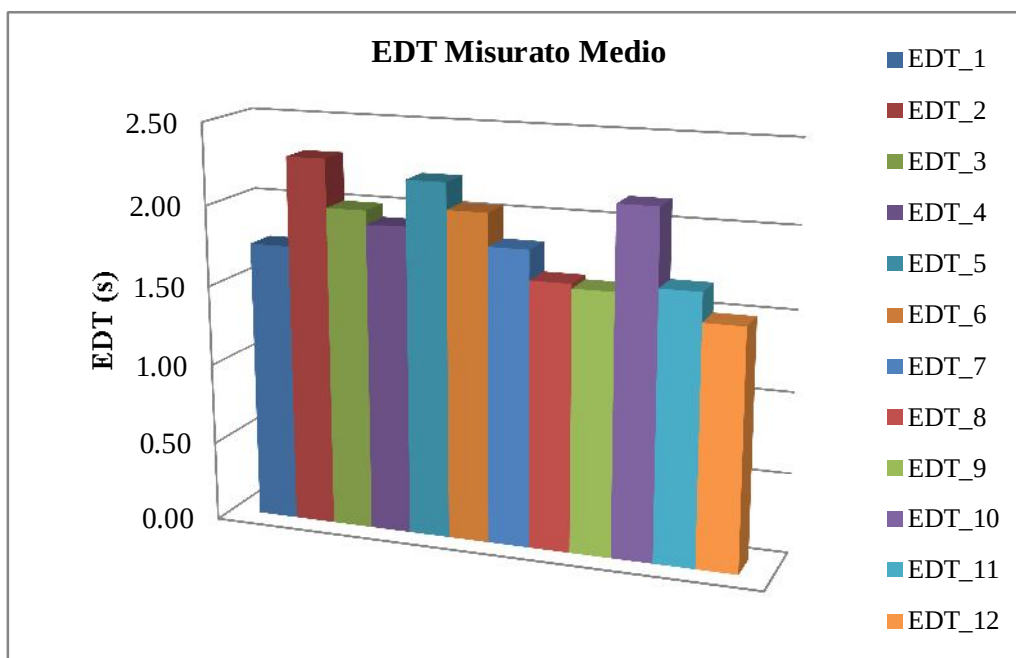


Fig. 9.86 – Valori dell'*EDT* medio alle medie frequenze nei punti di misura considerati

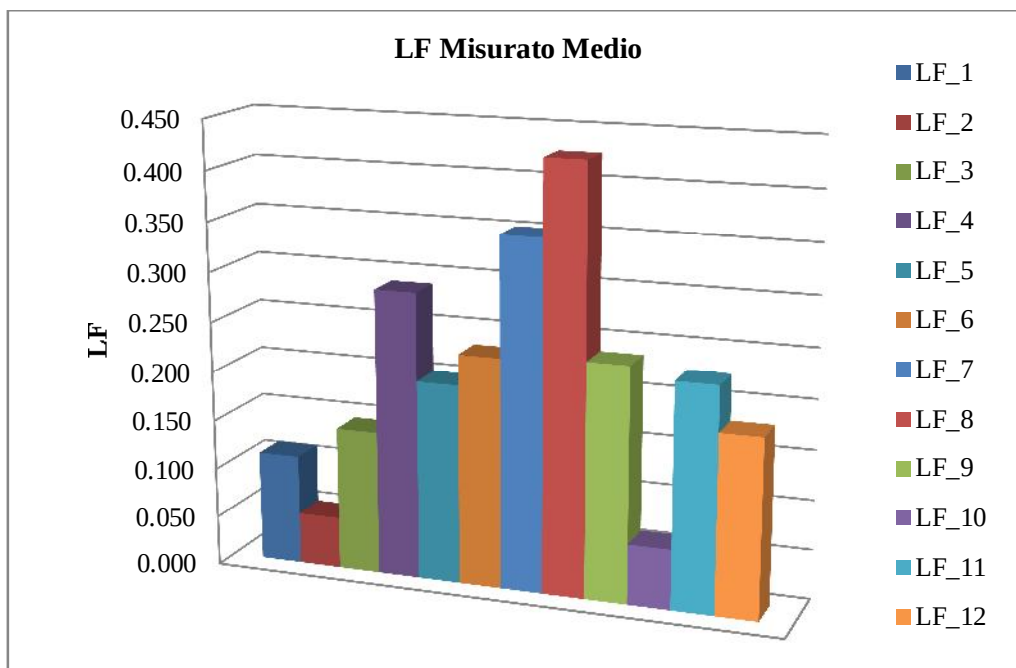
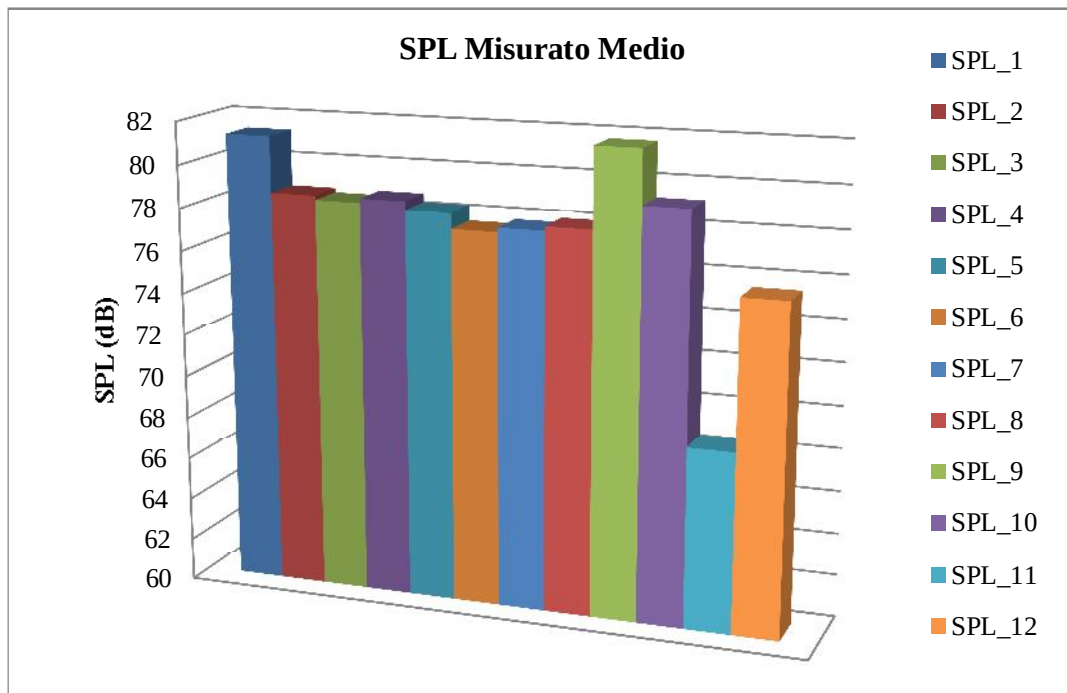
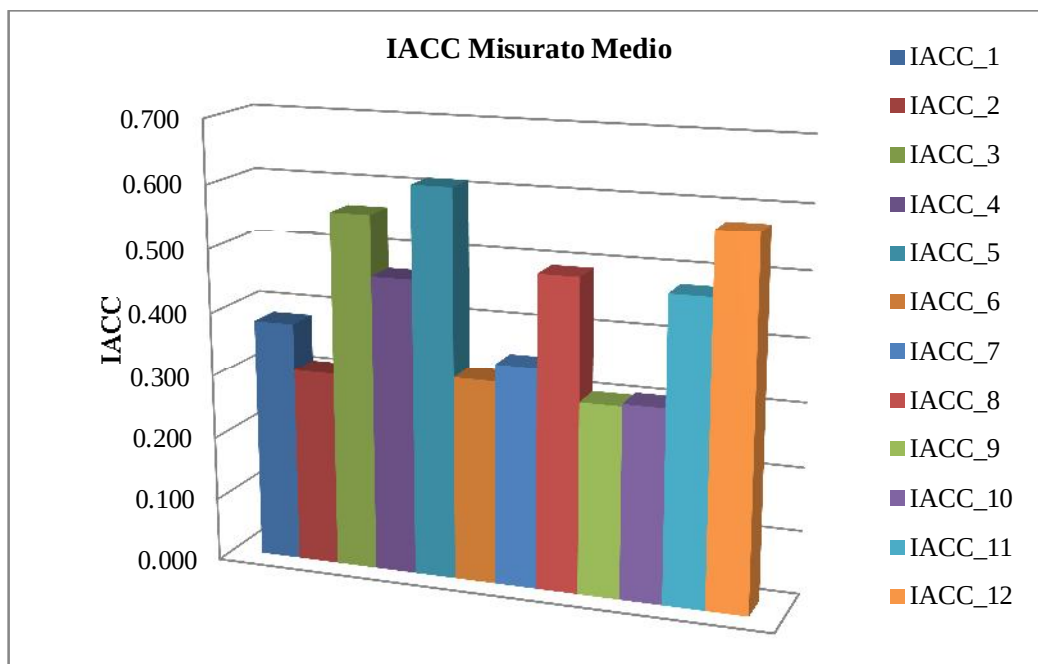


Fig. 9.87 – Valori del *LF* medio nei punti di misura considerati

Fig. 9.88– Valori del *SPL* nei punti di misura consideratiFig. 9.89 – Valori della *IACC* media alle medie frequenze nei punti di misura considerati

9.5.2. Risultati delle simulazioni e confronto

Il modello digitale tridimensionale utilizzato per la simulazione della propagazione acustica all'interno della sala è stato costruito con il programma Autodesk AutoCAD a partire da piante e sezioni bidimensionali. Il progetto è stato costruito utilizzando soltanto entità di superficie 3DFaces (Fig. 9.90), ed è stato concepito trascurando i particolari di dimensione inferiore ai 40 cm, in quanto l'algoritmo di Ray Tracing è ideato in modo da rendere inutile una precisione maggiore nel disegno. Il modello definitivo è formato da 5223 superfici, costituite di 9 materiali differenti.

La potenza sonora della sorgente onnidirezionale considerata è di 100 dB. Per il calcolo è stato utilizzato il Room setup "Precision" (Fig. 9.91).

Durante la simulazione sono stati utilizzati sia ricettori puntuali ad un'altezza di 1.2 m dal piano, posizionati come in Fig. 9.92, sia una griglia di calcolo con distanza tra i ricettori di 0.5 m (Fig. 9.93).

La taratura del modello è stata effettuata per rendere i risultati delle simulazioni congruenti con i dati sperimentali (Tab. 9.9); dato che non è stato possibile disporre dei valori esatti dei coefficienti di assorbimento dei materiali della sala, si sono utilizzati dei coefficienti di materiali simili, reperibili dal Database interno al software di simulazione, riadattandoli leggermente in modo da ottenere dei risultati compatibili con le misure.

In Tab. 9.12 sono riportati i risultati delle simulazioni per i punti di ricezione analizzati.

Vengono poi presentati i risultati delle simulazioni confrontati con le misurazioni effettuate in sala per i punti di ricezione scelti. La descrizione di ogni parametro comprende un grafico che ne raffigura l'andamento medio in funzione della frequenza (in banda d'ottava), comparandolo con quello delle misurazioni; inoltre è presentata, per ogni parametro, una mappa di distribuzione all'interno della sala alla frequenza rappresentativa di 1000 Hz. I parametri sono l'*EDT*, il livello di pressione, il *LF* e la *IACC*, cioè quelli che verranno utilizzati per la valutazione psicoacustica della sala.

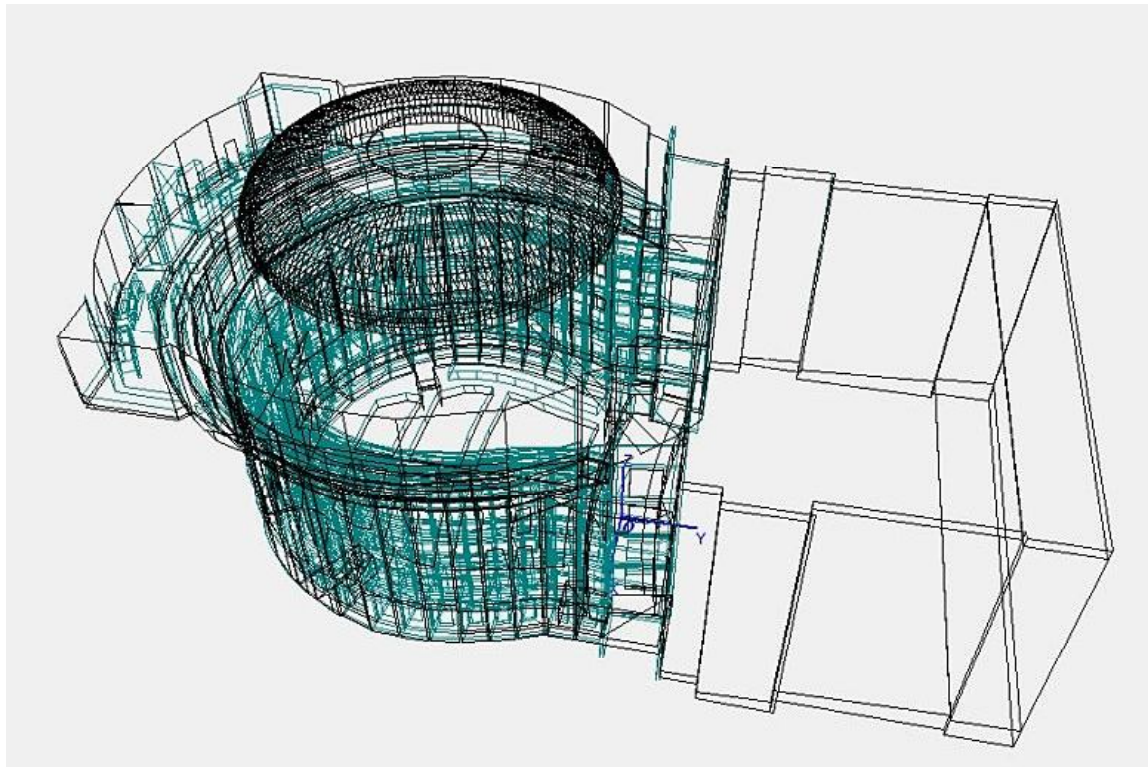


Fig. 9.90 – Modello 3D implementato in Odeon Auditorium

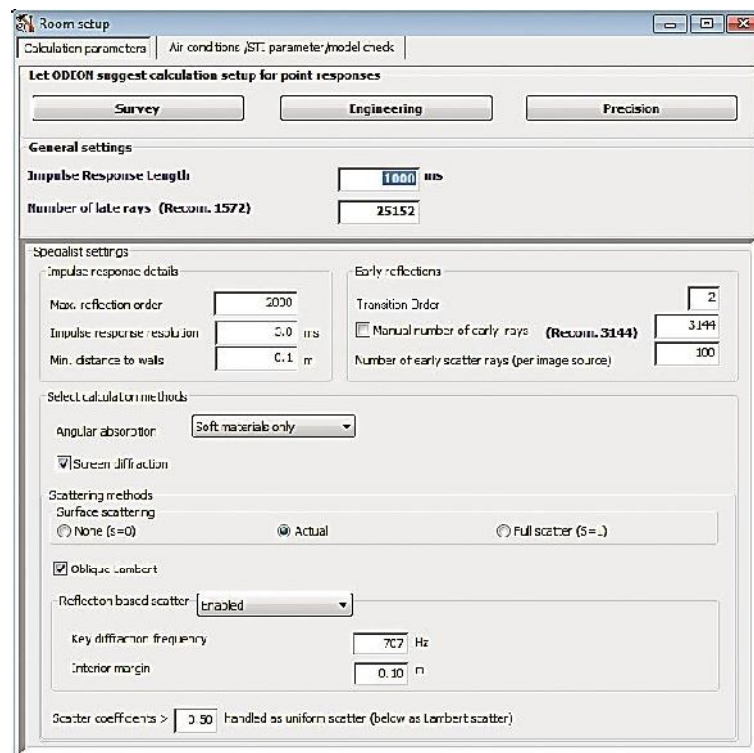


Fig. 9.91 – Room setup utilizzato per il Teatro dell'Opera

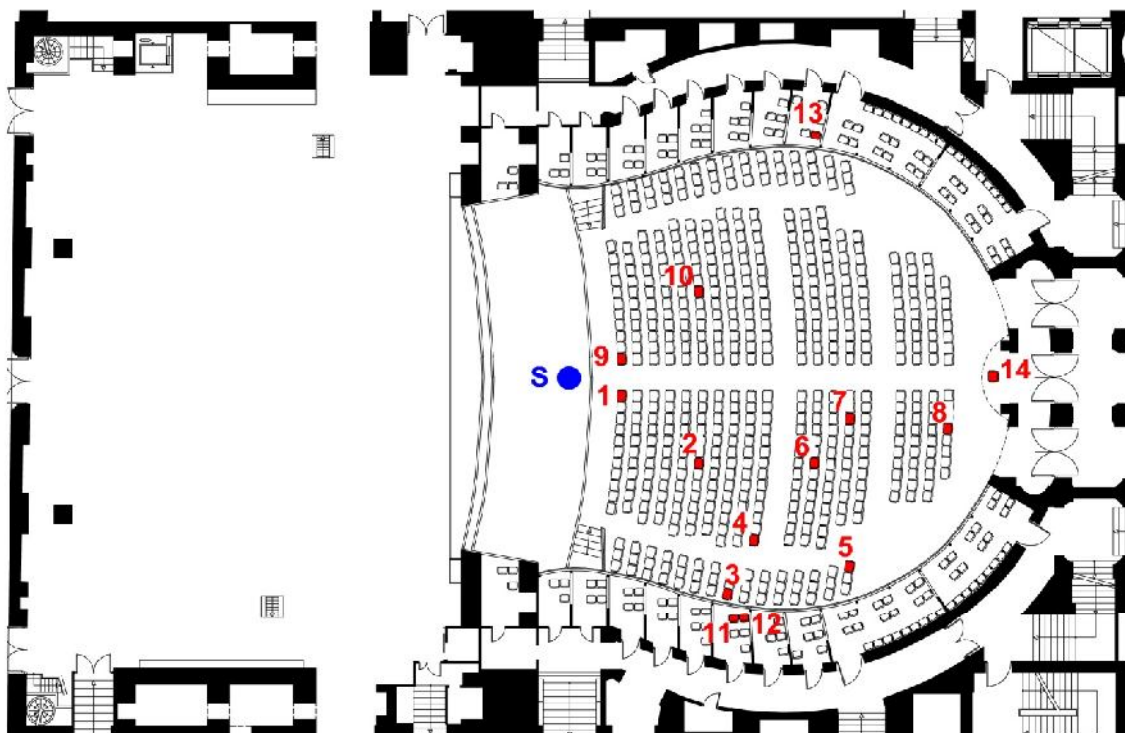


Fig. 9.92 – Posizionamento dei ricettori puntuali

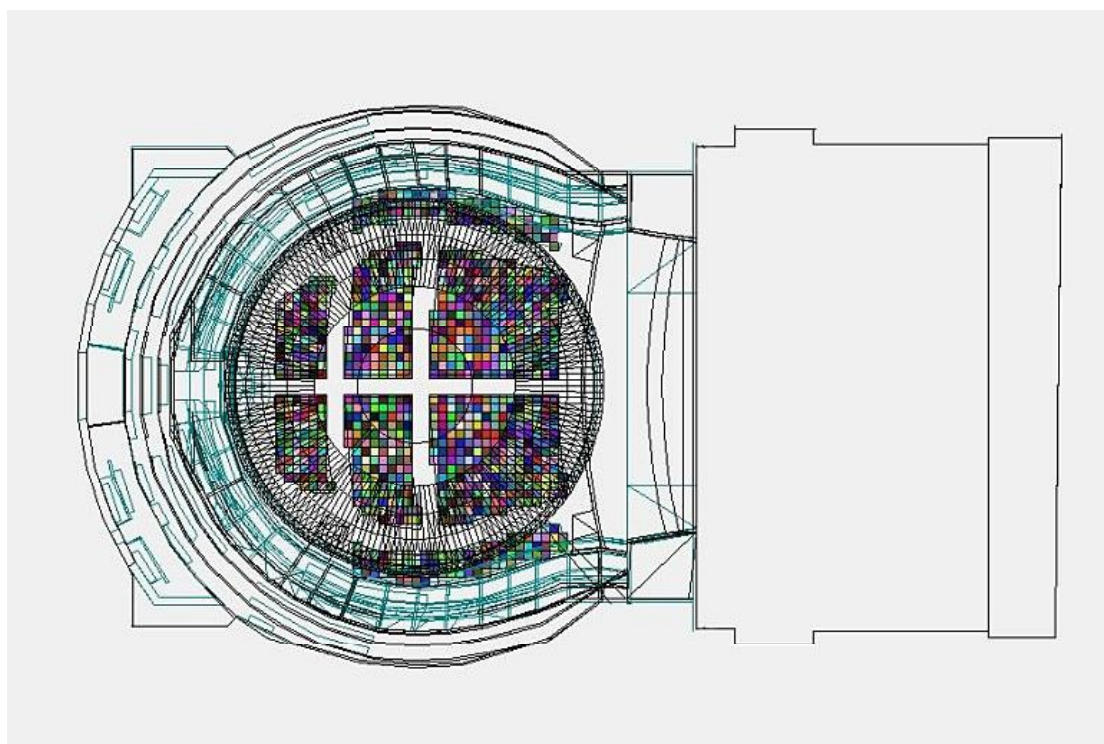


Fig. 9.93 – Griglia di calcolo

PUNTO DI RICEZIONE 1 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.57	1.73	1.32	1.39	1.59	2.31	1.64	0.59
SPL (dB)	72.2	72.4	72.3	72.5	72.9	73.4	72.6	70.5
LF(80)	0.078	0.085	0.104	0.112	0.114	0.110	0.105	0.092
IACC	0.307	0.226	0.326	0.469	0.385	0.274	0.257	0.132
PUNTO DI RICEZIONE 2 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.95	2.10	1.94	2.00	2.15	2.70	2.10	1.19
SPL (dB)	70.0	70.5	70.1	70.1	70.2	71.0	69.8	67.0
LF(80)	0.059	0.058	0.045	0.047	0.052	0.064	0.063	0.051
IACC	0.251	0.431	0.267	0.269	0.347	0.292	0.154	0.045
PUNTO DI RICEZIONE 3 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.03	2.15	1.78	1.78	1.92	2.57	1.95	0.95
SPL (dB)	68.9	69.5	69.4	69.7	70.4	71.0	69.9	66.9
LF(80)	0.099	0.092	0.094	0.131	0.165	0.152	0.129	0.111
IACC	0.783	0.410	0.343	0.713	0.701	0.292	0.135	0.121
PUNTO DI RICEZIONE 4 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.61	1.75	1.51	1.55	1.76	2.44	1.82	0.94
SPL (dB)	69.7	70.1	69.7	69.8	70.2	70.9	69.8	66.7
LF(80)	0.253	0.246	0.253	0.272	0.288	0.291	0.293	0.287
IACC	0.551	0.403	0.499	0.681	0.542	0.171	0.115	0.092
PUNTO DI RICEZIONE 5 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.87	2.04	1.88	1.86	2.01	2.61	2.07	1.08
SPL (dB)	68.6	68.9	68.8	69.3	70.0	70.7	69.4	66.2
LF(80)	0.189	0.177	0.172	0.210	0.205	0.180	0.156	0.125
IACC	0.806	0.754	0.755	0.785	0.599	0.443	0.207	0.103
PUNTO DI RICEZIONE 6 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

EDT (s)	1.85	1.98	1.74	1.75	1.86	2.50	1.91	0.98
SPL (dB)	68.4	68.8	68.5	68.6	69.1	70.0	68.7	65.1
LF(80)	0.220	0.219	0.223	0.230	0.240	0.246	0.238	0.206
IACC	0.134	0.258	0.146	0.308	0.467	0.209	0.144	0.051
PUNTO DI RICEZIONE 7 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.68	1.86	1.54	1.49	1.66	2.38	1.79	0.85
SPL (dB)	68.7	69.0	68.7	68.8	69.2	70.0	68.6	65.0
LF(80)	0.330	0.331	0.341	0.350	0.359	0.352	0.344	0.313
IACC	0.416	0.226	0.136	0.337	0.427	0.282	0.188	0.077
PUNTO DI RICEZIONE 8 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.30	1.49	1.23	1.27	1.46	2.20	1.54	0.74
SPL (dB)	68.9	69.1	68.9	69.0	69.6	70.4	69.3	65.6
LF(80)	0.415	0.413	0.416	0.414	0.432	0.440	0.439	0.424
IACC	0.357	0.391	0.392	0.215	0.622	0.627	0.283	0.053
PUNTO DI RICEZIONE 9 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.31	1.46	1.15	1.24	1.43	2.09	1.49	0.64
SPL (dB)	72.7	72.8	72.7	72.8	73.1	73.7	72.9	70.7
LF(80)	0.191	0.198	0.217	0.228	0.235	0.230	0.221	0.194
IACC	0.075	0.185	0.240	0.317	0.288	0.300	0.157	0.067
PUNTO DI RICEZIONE 10 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	1.87	1.99	1.76	1.83	1.97	2.58	1.97	1.12
SPL (dB)	70.2	70.6	70.2	70.3	70.5	71.2	70.1	67.2
LF(80)	0.065	0.065	0.053	0.056	0.063	0.074	0.073	0.059
IACC	0.091	0.182	0.127	0.243	0.289	0.372	0.237	0.076
PUNTO DI RICEZIONE 11 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	3.26	3.07	2.52	1.65	1.70	1.64	1.31	0.67
SPL (dB)	68.5	67.8	64.3	62.4	62.6	62.3	61.1	57.4
LF(80)	0.197	0.246	0.182	0.194	0.226	0.244	0.255	0.255
IACC	0.268	0.402	0.411	0.550	0.557	0.326	0.199	0.185

PUNTO DI RICEZIONE 12 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	3.29	3.10	1.97	1.53	1.44	1.44	1.55	0.59
SPL (dB)	70.7	70.4	69.1	68.6	69.0	68.7	67.9	65.6
LF(80)	0.214	0.207	0.177	0.178	0.187	0.181	0.164	0.137
IACC	0.767	0.537	0.328	0.587	0.649	0.501	0.478	0.392
PUNTO DI RICEZIONE 13 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	2.99	2.86	2.43	2.29	2.23	2.09	1.80	1.13
SPL (dB)	69.4	68.5	63.6	60.0	60.3	60.0	59.0	55.0
LF(80)	0.294	0.327	0.276	0.256	0.289	0.310	0.323	0.323
IACC	0.371	0.363	0.409	0.340	0.376	0.547	0.236	0.096
PUNTO DI RICEZIONE 14 – VALORI SIMULATI								
Parametri	Frequenza (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	3.00	2.78	2.14	1.45	1.43	1.32	1.16	0.82
SPL (dB)	69.8	69.2	65.7	63.3	64.3	64.5	63.7	60.2
LF(80)	0.244	0.235	0.154	0.062	0.132	0.159	0.171	0.167
IACC	0.454	0.393	0.456	0.547	0.270	0.836	0.464	0.279

Tab. 9.12 – Risultati delle simulazioni nei punti di ricezione considerati

In Fig. 9.94 è raffigurato l'andamento dei valori dell'*EDT* alla frequenza di 500 Hz per i punti di misurazione analizzati, confrontando i risultati ottenuti con la simulazione con i valori misurati in sala.

Dai grafici si nota un'ottima corrispondenza tra i risultati della simulazione e quelli delle misurazioni, con uno scarto massimo di 0.08 s. In Fig. 9.95 è rappresentata la mappa dello stesso parametro alla frequenza di 1000 Hz; si nota una certa disuniformità del parametro, evidenziata anche dalle misure effettuate.

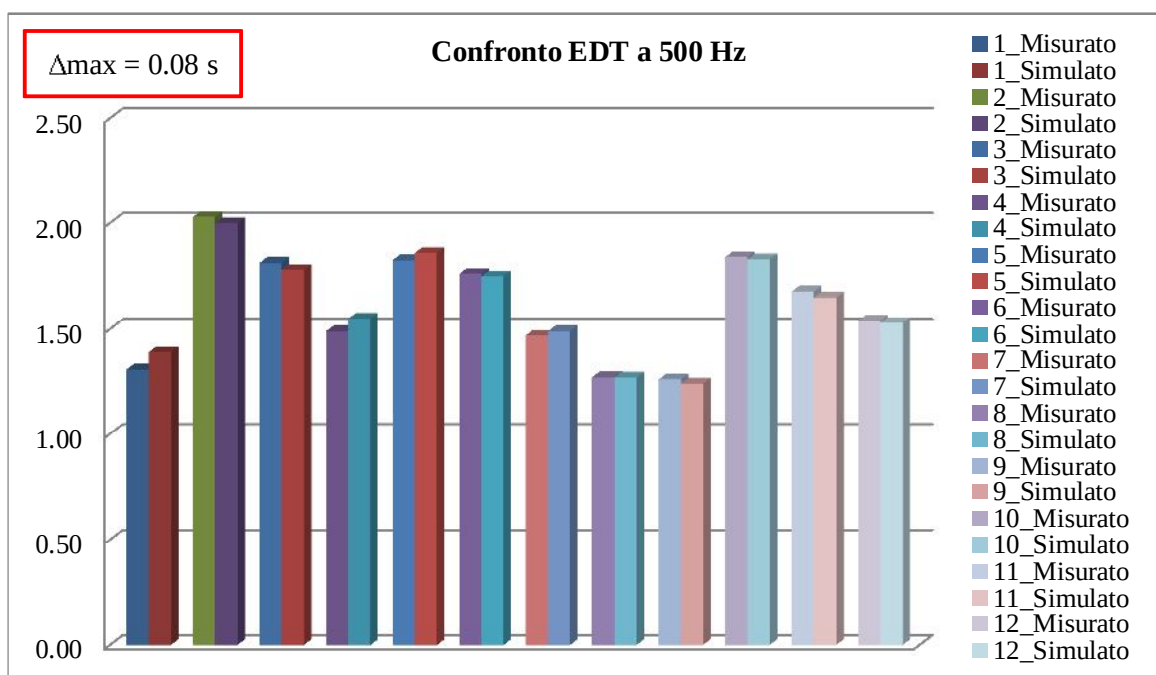


Fig. 9.94 – Confronto dei valori dell'EDT misurato e simulato a 500 Hz

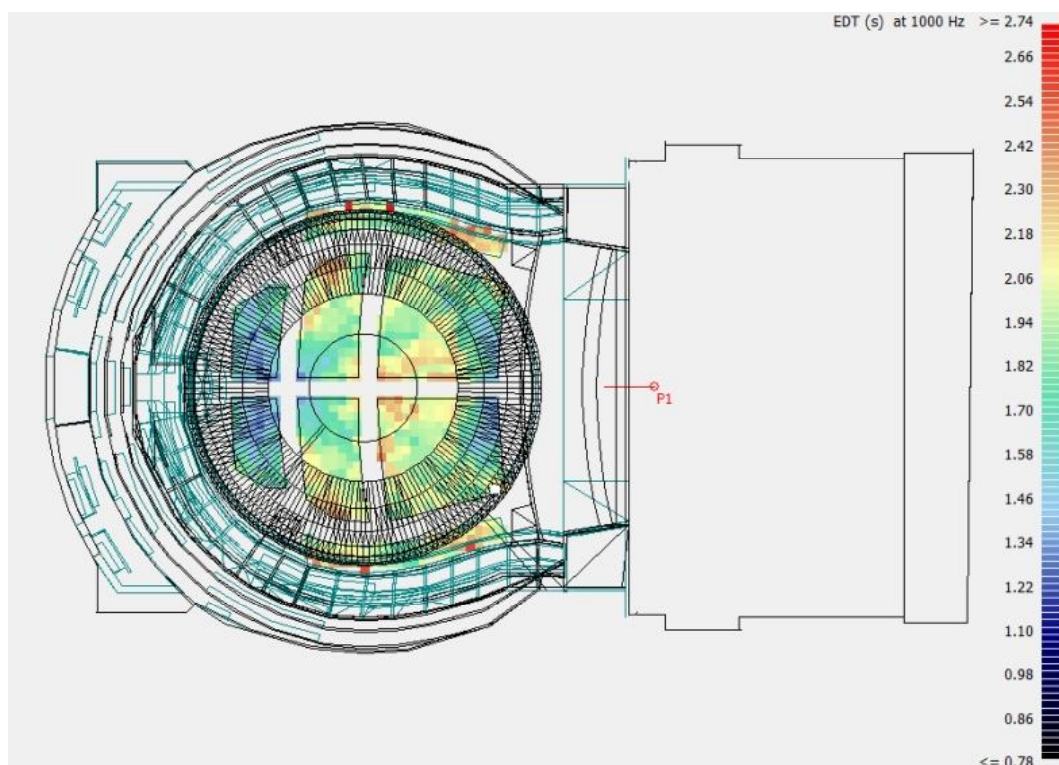
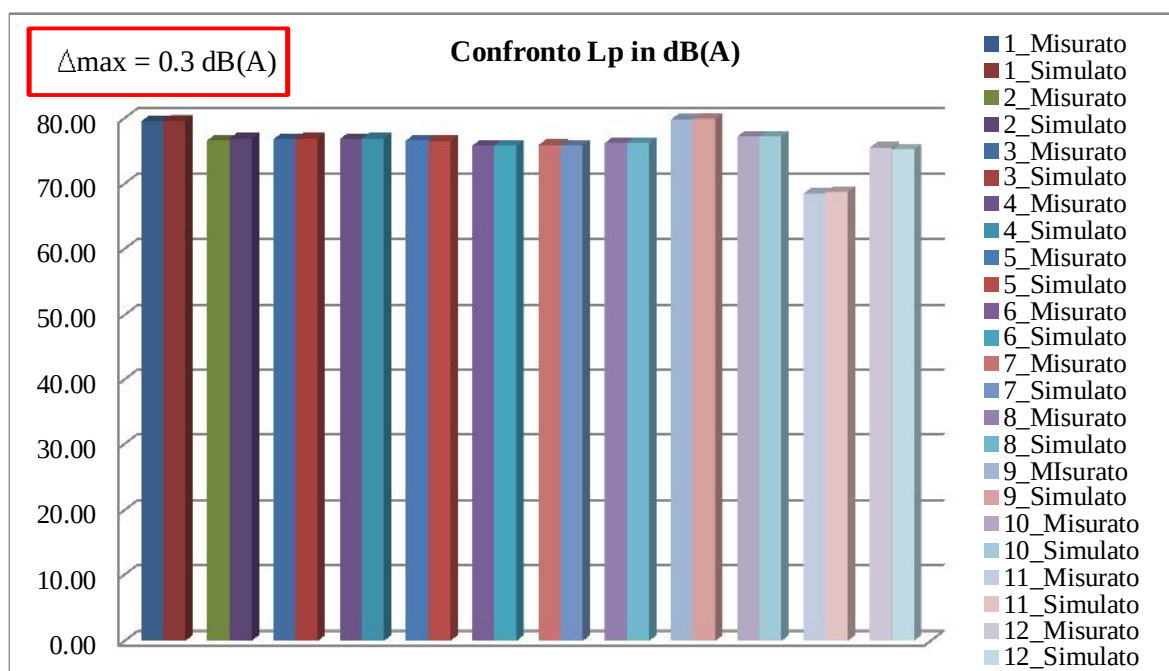
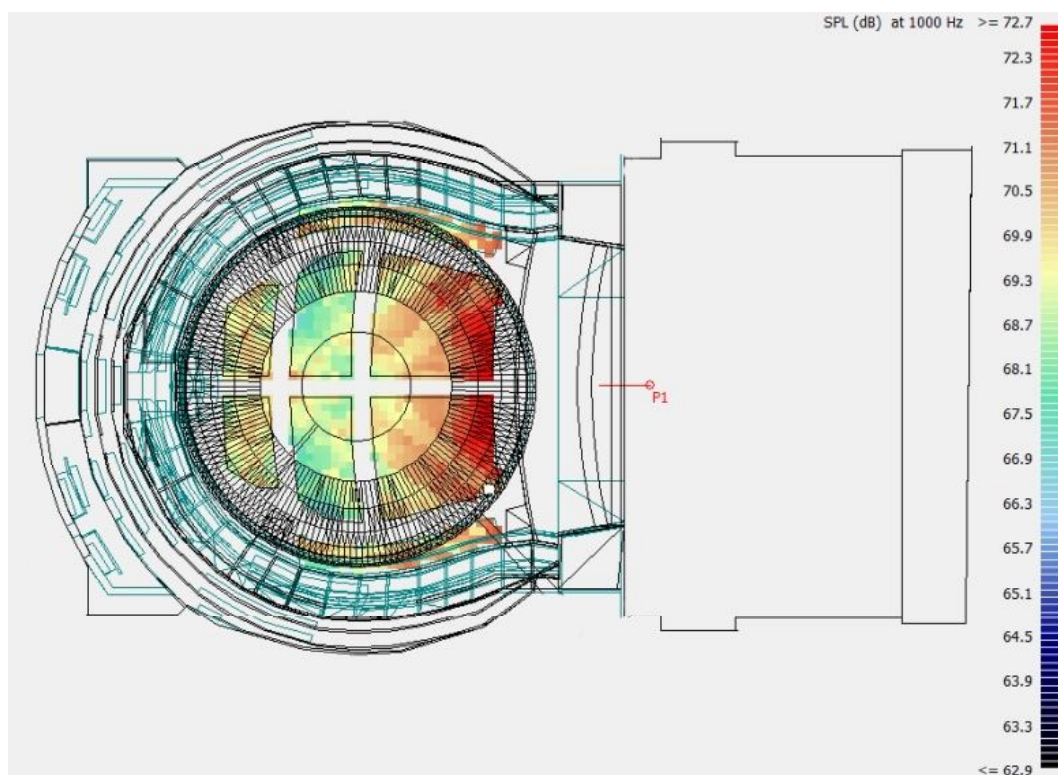


Fig. 9.95 – Mappa di distribuzione dell'EDT a 1000 Hz

Fig. 9.96 – Confronto dei valori del SPL misurato e simulato in dB(A)Fig. 9.97 – Mappa di distribuzione del SPL a 1000 Hz

Analogamente per il livello di pressione, il confronto evidenzia delle minime differenze (Fig. 9.96).

La mappa di distribuzione mostra una discreta uniformità con differenze che però, in alcuni casi, raggiungono anche i 10 dB (Fig. 9.97).

Per quanto riguarda il parametro di spazialità LF alle medie frequenze, che sono quelle significative, la concordanza tra valori misurati e simulati è ottima, con uno scarto massimo di 0.007 (Fig. 9.98).

La mappa di distribuzione in Fig. 9.99 mostra come i valori del LF siano molto buoni in tutta la sala, con la sola eccezione delle prime file della platea, che vedono una netta diminuzione dell'energia laterale.

Infine nel caso del parametro binaurale relativo alla $IACC$, come nel caso del Lateral Faction, tra i valori simulati e quelli misurati alle medie frequenze la concordanza è molto buona (Fig. 9.100).

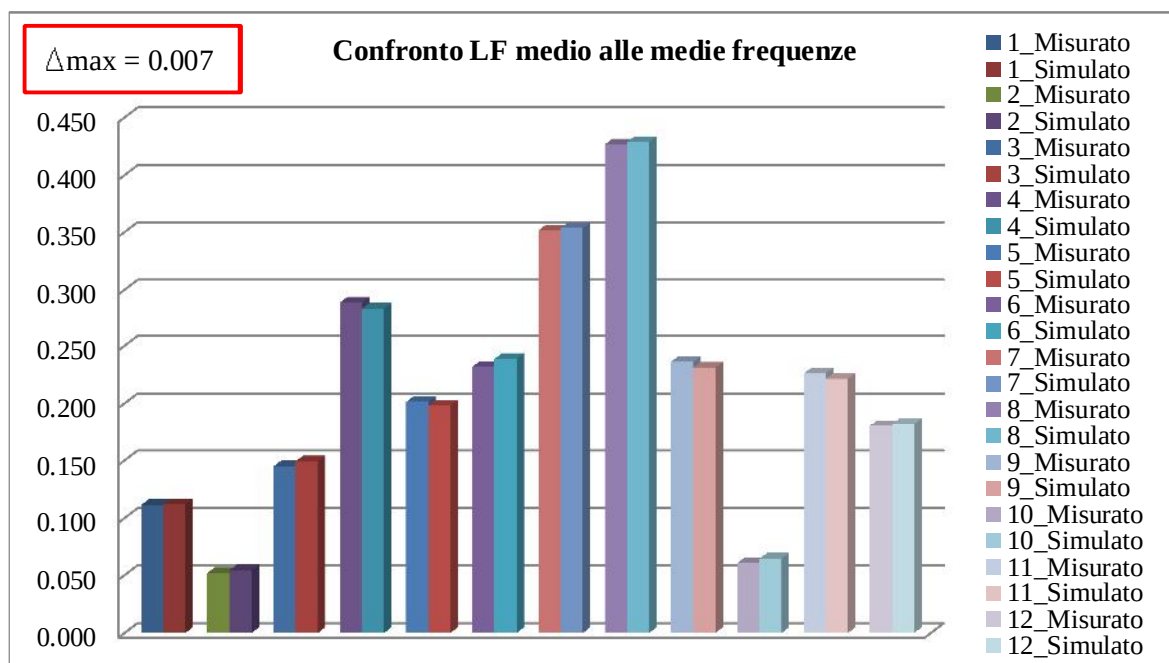
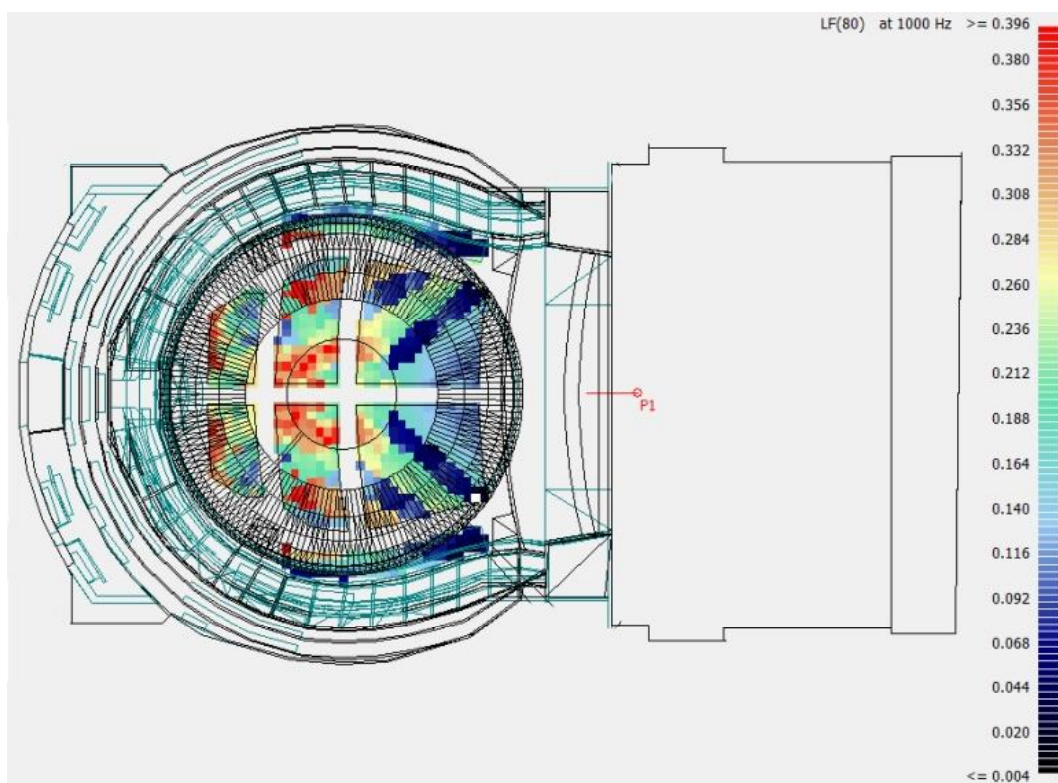
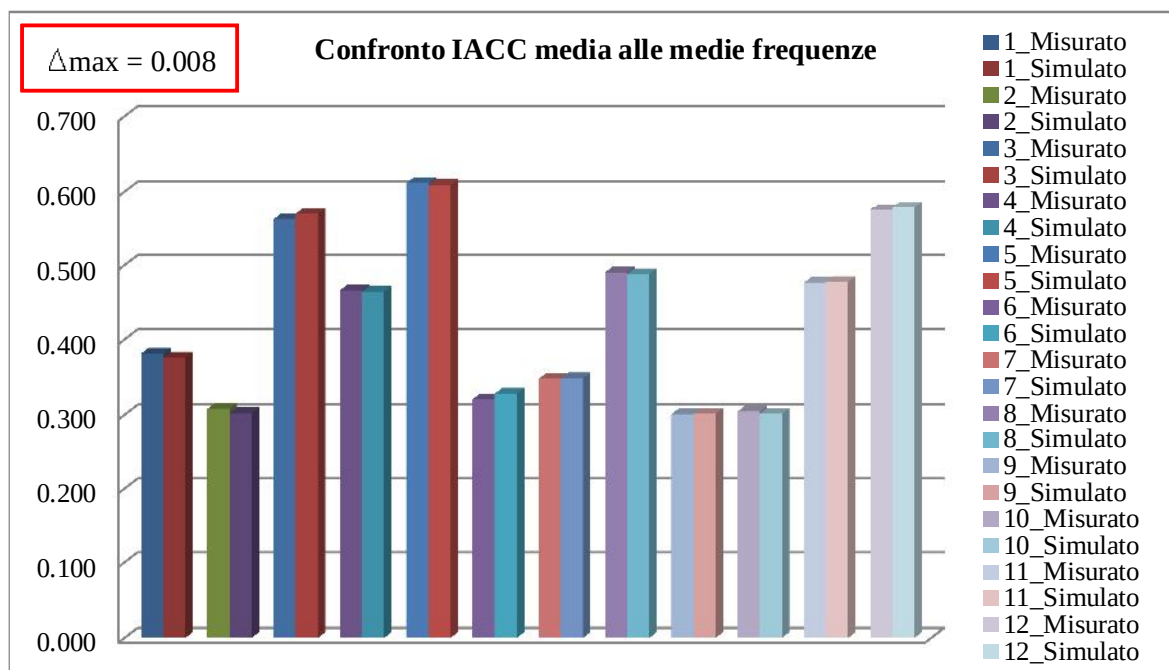


Fig. 9.98 – Confronto dei valori del LF misurato e simulato alle medie frequenze

Fig. 9.99 – Mappa di distribuzione del LF a 1000 HzFig. 9.100 – Confronto dei valori della $IACC$ misurata e simulata alle medie frequenze

A titolo di esempio si riportano i confronti dei valori dei parametri simulati e misurati a tutte le frequenze per il solo punto di ricezione 5 (da Fig. 9.101 a Fig. 9.104).

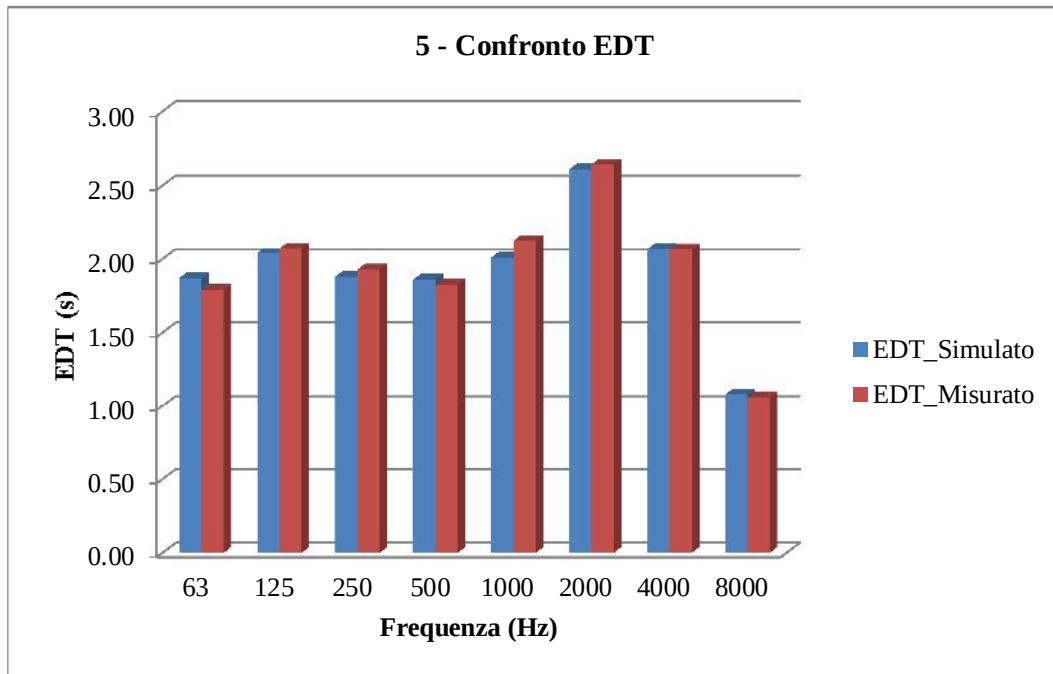


Fig. 9.101 – Confronto dei valori dell'EDT misurato e simulato nel punto di ricezione 5

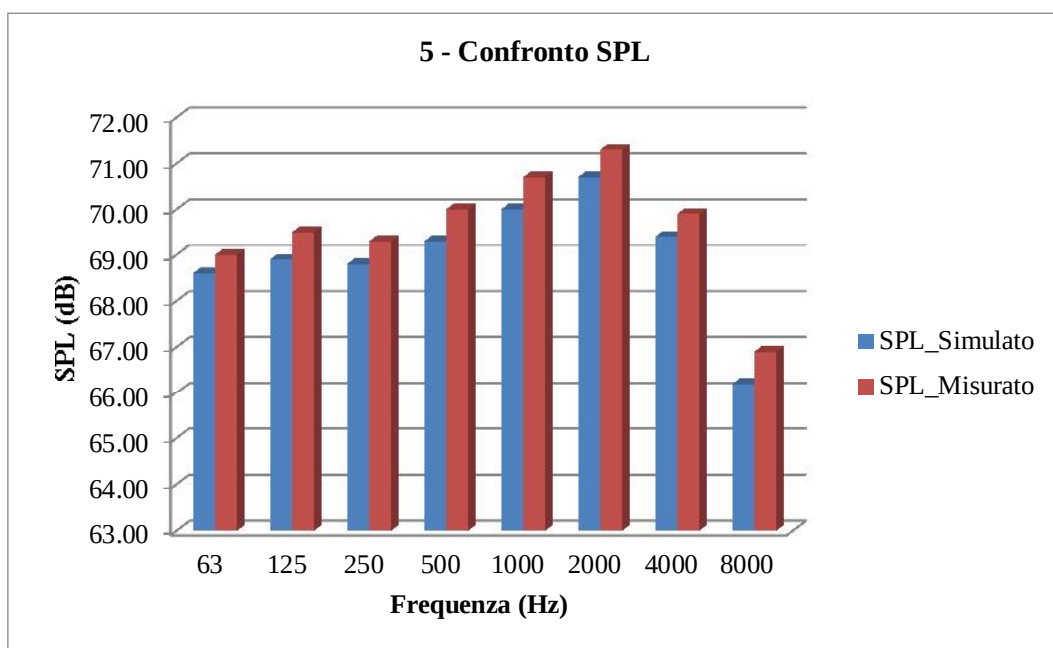
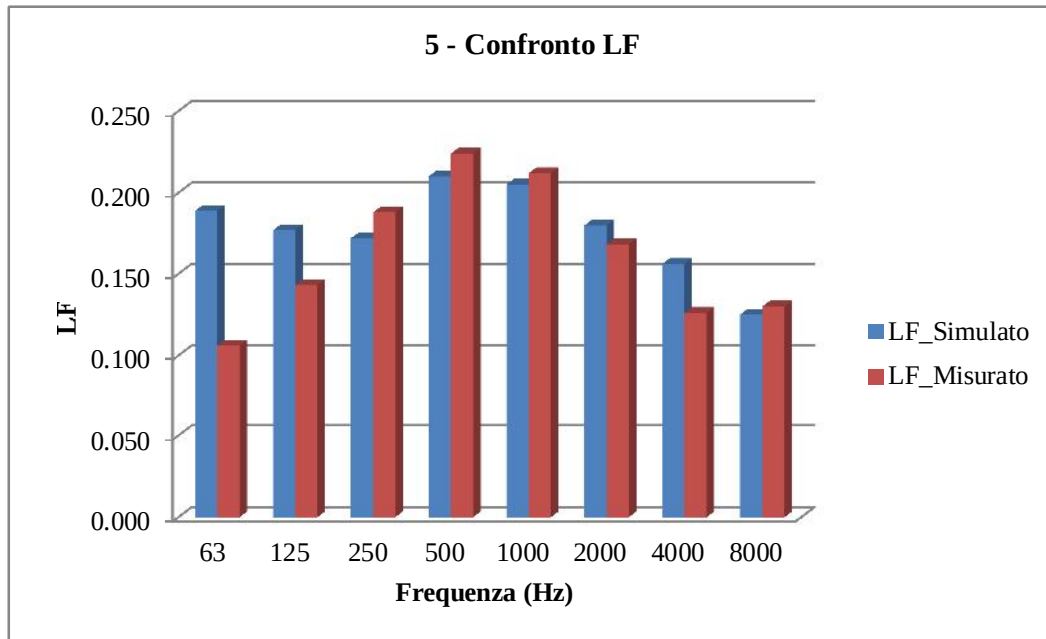
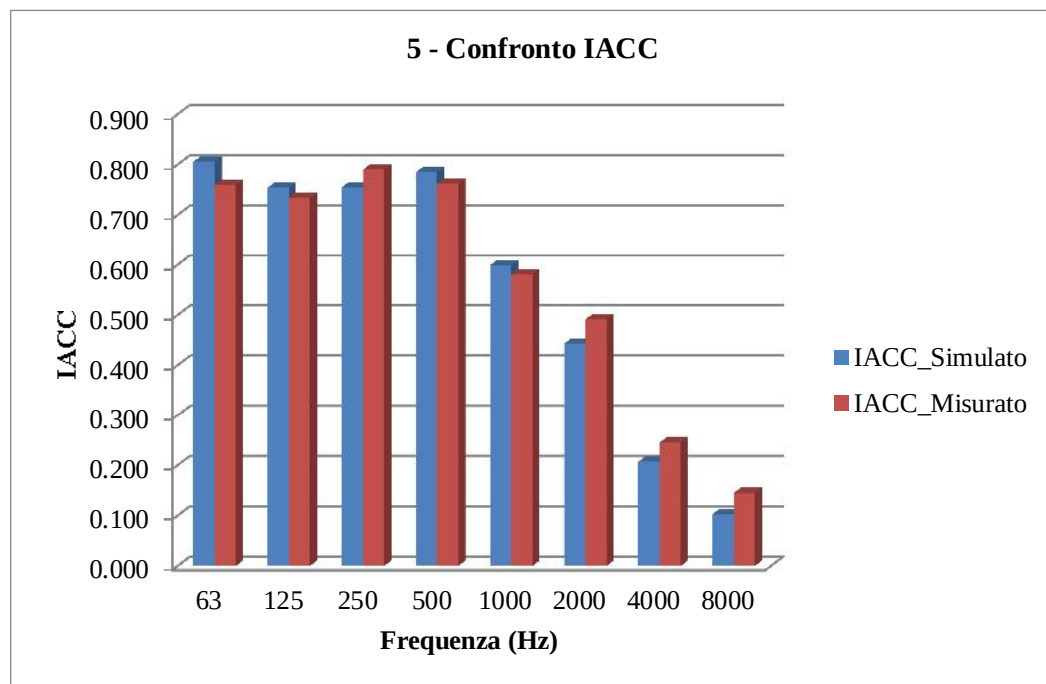


Fig. 9.102 – Confronto dei valori del SPL misurato e simulato nel punto di ricezione 5

Fig. 9.103 – Confronto dei valori del *LF* misurato e simulato nel punto di ricezione 5Fig. 9.104 – Confronto dei valori della *IACC* misurata e simulata nel punto di ricezione 5

L'analisi del reflectogramma evidenzia tempi di ritardo della prima riflessione molto ridotti, che assicurano la totale assenza di eco.

CAPITOLO 10 – APPLICAZIONE DELLA TEORIA DI ANDO

Partendo dai dati dei parametri oggettivi ottenuti dalle misure, è stato calcolato, in ciascun punto di ricezione delle sale analizzate un descrittore numerico della qualità acustica, in base allo schema di valutazione proposto da Ando.

Si considerano come parametri indipendenti il Livello di pressione sonora in dB(A), la *IACC* media alle medie frequenze, l'*ITDG* e il Tempo di riverberazione soggettivo, integrato nei primi 10 dB alla frequenza di 500 Hz.

Per ciascuno di essi viene calcolato un indice di preferenza parziale, che è funzione dello scostamento del parametro stesso dal suo valore ottimale. Per due di essi, il T_{sub} e l'*ITDG*, la funzione che fornisce l'indice di preferenza è influenzata dal valore dell'Ampiezza della Riflessione Equivalente e dal tipo di musica considerato.

Per questo è stato necessario ipotizzare il tipo di sorgente sonora e il brano (musicale o parlato) eseguito: in questo caso, la valutazione della qualità è stata fatta facendo riferimento ad un brano musicale con un tempo di autocorrelazione di 43 ms per le sale a prevalente destinazione operistica, e ad un brano parlato con un tempo di autocorrelazione di 12 ms per le sale destinate principalmente a conferenze. Soprattutto per quanto riguarda il brano musicale, la scelta si è basata sul risultato dell'analisi delle rappresentazioni previste dai diversi cartelloni teatrali degli ultimi anni. I tempi di autocorrelazione sono forniti dallo stesso Ando. La somma degli indici di preferenza parziali opportunamente pesati fornisce l'indice di preferenza complessivo. Le scale numeriche sono aggiustate in modo che esso sia un numero sempre negativo, che raggiunge il valore zero solo nel caso in cui tutti i parametri fisici siano prossimi al valore ottimale. Poiché non esiste un valore minimo dell'indice di preferenza, non è possibile riportare il risultato in una scala a punti.

La valutazione di qualità acustica è stata eseguita considerando in tutte le sale analizzate una sorgente sonora di potenza adeguata, capace di avvicinarsi il più possibile al $L_{p,ott}$ in tutti i punti della sala. I risultati sarebbero stati sostanzialmente diversi se fosse stata utilizzata sempre la stessa potenza sonora in tutte le sale, ma in effetti quella seguita è l'unica procedura che permette di paragonare le diverse sale senza introdurre ulteriori discriminanti.

L'indice di preferenza così calcolato è valido solo in relazione alla durata effettiva della funzione di autocorrelazione del brano scelto e del fissato valore della potenza sonora della sorgente. Nonostante questo i dati acquisiti consentono il calcolo dell'indice di preferenza relativo a qualsiasi brano e a sorgenti sonore di potenza diversa da quella utilizzata.

In questo Capitolo verranno riportati solo i risultati fondamentali ottenuti dall'applicazione della teoria di Ando: per il procedimento di calcolo completo si veda l'Appendice B.

10.1. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni nei tre punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 5 punti. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.10 del Capitolo 9. E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 115 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 78 dB.

In Tab. 10.1 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	8269
Potenza sonora della sorgente (dB)	115
Livello di pressione a 20 m (dB)	78
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. 10.1 – Teatro di Budrio, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. 10.2 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
110	10.2	2.11	84.2	13.29	1.19	0.434
111	10.86	2.09	83	14.65	1.21	0.394
112	10.29	2.14	83.3	12.06	1.23	0.410
Simulazione 1	4.56	2.04	88.5	15.31	1.31	0.413
Simulazione 2	7.85	2.04	85.4	23.71	1.24	0.339
Simulazione 3	7.65	2.24	85	26.81	1.27	0.367
Simulazione 4	13.61	1.41	81.3	30.37	1.21	0.382
Simulazione 5	10.04	1.41	81.3	23.42	1.21	0.433

Tab. 10.2 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Fig. 10.1 è riportato l'andamento dell'indice di preferenza del Livello sonoro: esso si riduce leggermente solo nei posti situati in prossimità della sorgente sonora, in cui probabilmente il contributo del suono diretto risulta talmente elevato da risultare lievemente disturbante.

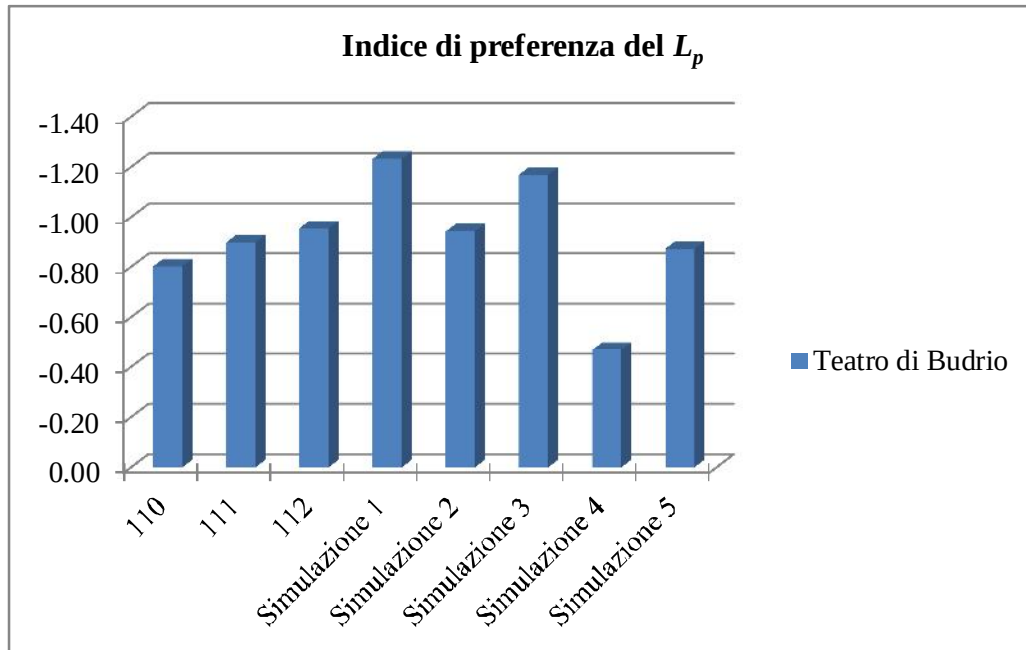


Fig. 10.1 – Indice di preferenza del livello sonoro

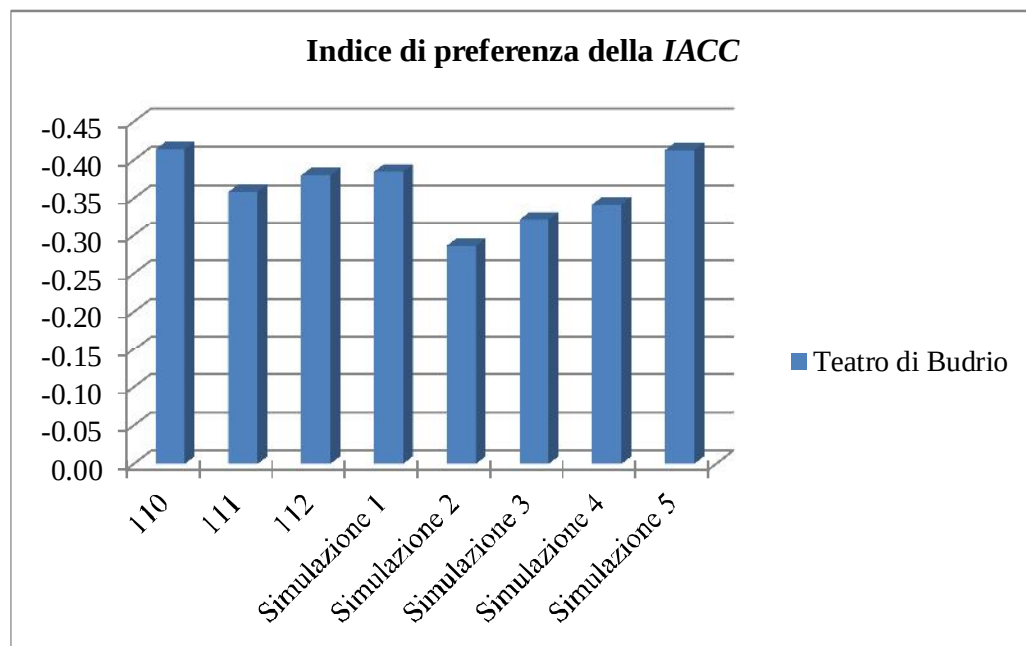


Fig. 10.2 – Indice di preferenza della IACC

L'indice di preferenza della *IACC* (Fig. 10.2) mostra ciò che era già evidente dalle misurazioni del parametro fisico: si nota infatti un'elevata preferenza in tutti i punti di ricezione considerati.

Considerando un brano con $\tau_e = 43$ ms, si nota come l'indice di preferenza della prima riflessione, riportato in Fig. 10.3, mostri i suoi minimi valori nella parte centrale della sala. Il Teatro ha una pianta piuttosto larga e le riflessioni provenienti dalle pareti laterali compiono un percorso abbastanza lungo per raggiungere le poltrone centrali. Nelle altre zone, l'*ITDG* ha valori prossimi all'ottimale e questo fa alzare notevolmente il valore dell'indice di preferenza.

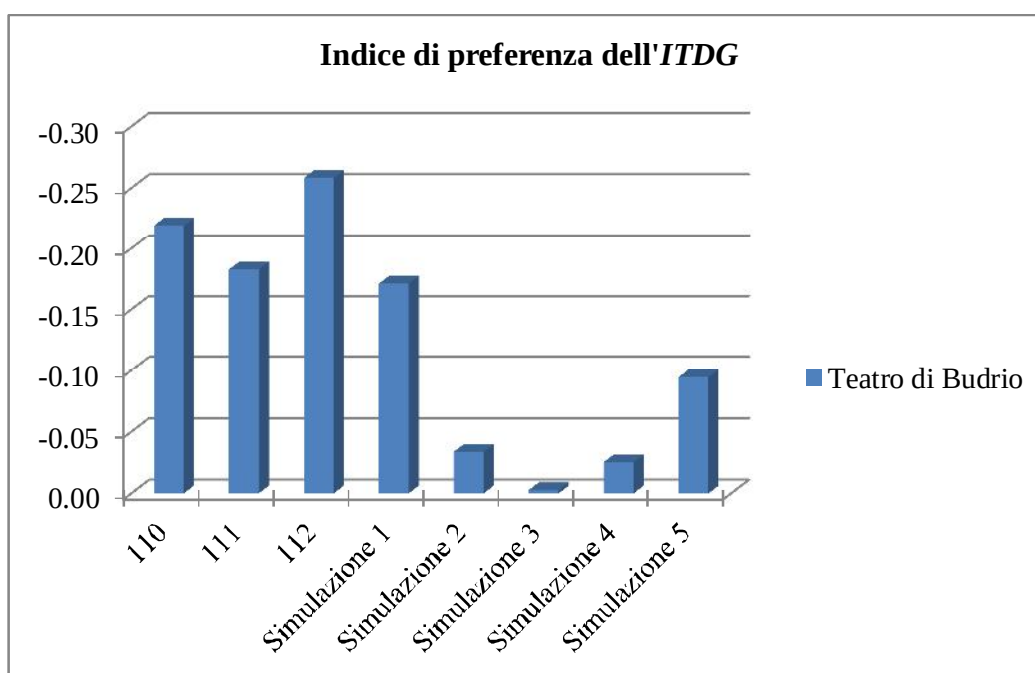


Fig. 10.3 – Indice di preferenza dell'*ITDG*

Il tempo di riverberazione della sala è molto prossimo all'ottimale in tutti i punti di ricezione e questo è evidenziato da valori dell'indice di preferenza prossimi allo zero nei ricettori considerati (Fig. 10.4). Si nota però una certa variabilità, cui fa riscontro la completa uniformità del valore dell'*EDT*: è la diversa ampiezza equivalente delle riflessioni (*A*) che produce questa variabilità, poiché dove questa è maggiore è più avvertibile un eccesso di riverberazione.

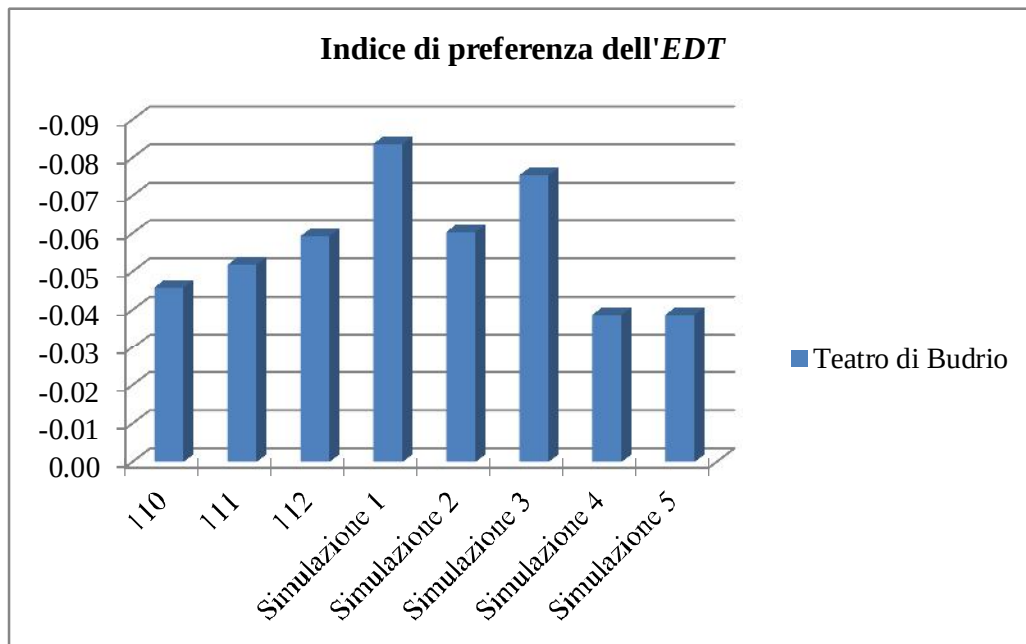


Fig. 10.4 – Indice di preferenza dell'EDT

Considerando, infine, l'indice di preferenza totale (Fig. 10.5), esso è molto simile in tutti i punti di ricezione considerati, il che denota un'ottima uniformità di ascolto della sala. Il valore medio dell'indice, riferito sempre ad un brano con $\tau_e = 43$ ms, è di - 1.46, il che significa un giudizio complessivo molto buono.

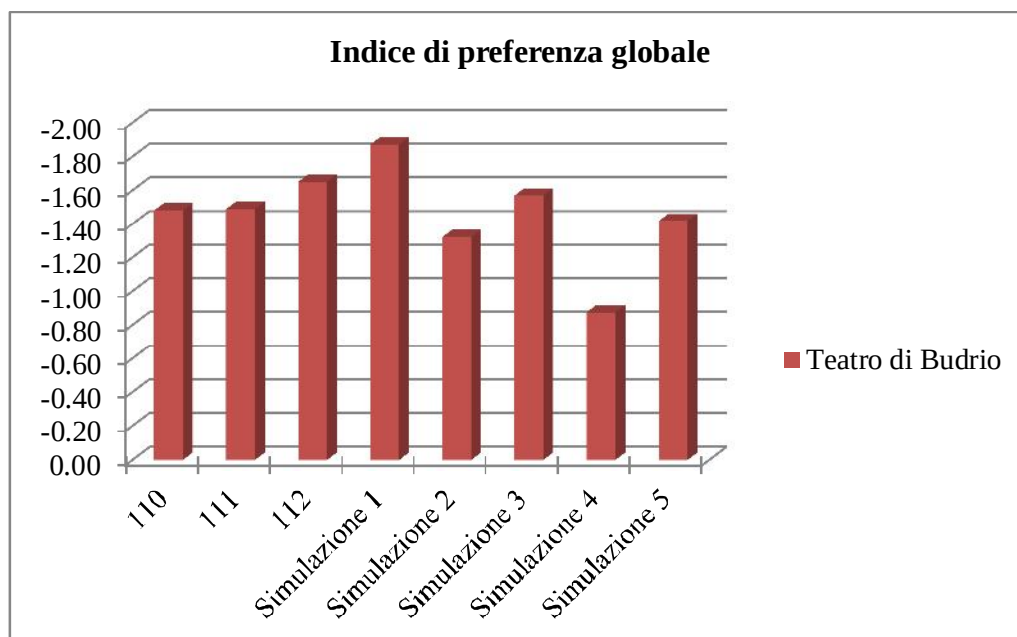


Fig. 10.5 – Indice di preferenza globale

10.2. Il Teatro Olimpico di Roma

Anche in questo caso per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 10 punti, di cui 3 posizionati in galleria. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.31 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 109 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 73 dB.

In Tab. 10.3 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	13607
Potenza sonora della sorgente (dB)	109
Livello di pressione a 20 m (dB)	73
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. 10.3 – Teatro Olimpico, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. 10.4 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura		d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
B	22	10.2	1.40	78.5	17.64	1.34	0.318
C	12	9.16	1.16	79	18.83	1.29	0.396
F	10	12.51	1.00	77.2	24.19	1.37	0.535
I	22	14.88	2.16	77.2	23.76	1.23	0.376
M	40	17.78	3.47	75.7	11.85	1.35	0.548
V	18	25.75	1.95	74	25.6	1.14	0.424
V	36	25.34	1.22	71.9	2.89	1.42	0.390
Simulazione 1		10.38	1.11	79	17.32	1.25	0.580
Simulazione 2		22.14	1.06	73.4	26.88	1.24	0.456
Simulazione 3		16.58	1.07	75.8	49.75	1.41	0.500
Simulazione 4		26.96	1.50	76.8	34.93	1.26	0.461
Simulazione 5		10.95	1.06	78.3	41.27	1.4	0.484
Simulazione 6		24.46	1.60	72.2	72.26	1.36	0.292
Simulazione 7		14.27	1.45	71.6	43.21	1.27	0.371
Galleria 1		23.07	1.64	73.8	79.19	1.2	0.411

Galleria 2	27.69	1.68	73.9	80.68	1.1	0.683
Galleria 3	19.19	2.00	77.6	61.01	1.06	0.316

Tab. 10.4 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Fig. 10.6 è riportato l'andamento dell'indice di preferenza del Livello sonoro: esso si riduce molto solamente nel punto di misura M40, che in effetti presenta una notevole differenza tra il Livello di pressione misurato e quello ottimale teorico.

Si nota una forte variabilità dell'indice di preferenza, supportata dalla disuniformità del livello evidenziata dalle simulazioni effettuate. In generale, comunque, i valori dell'indice parziale evidenziano una complessiva bontà della sala.

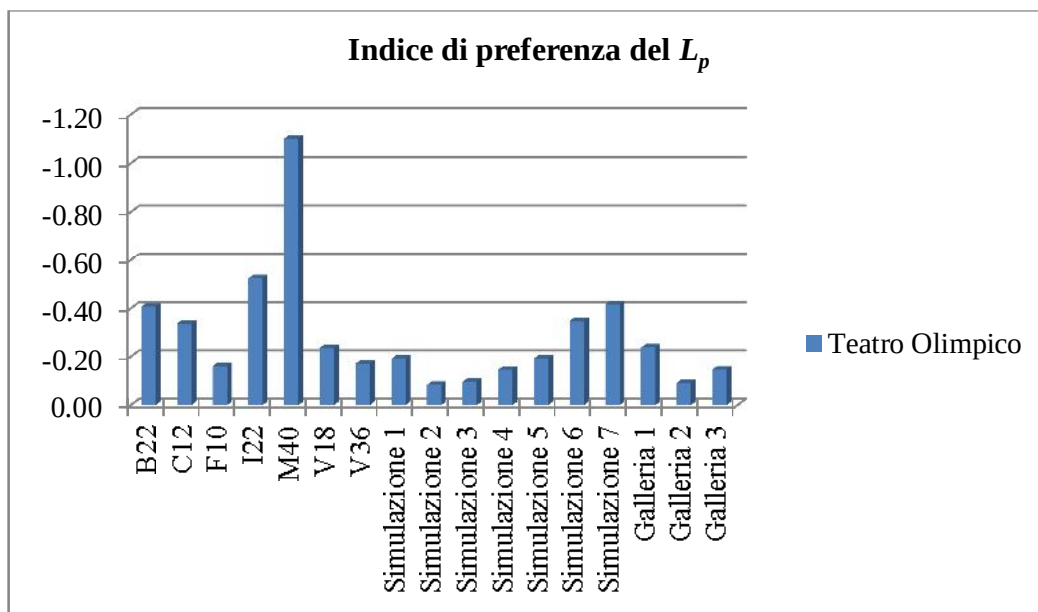


Fig. 10.6 – Indice di preferenza del livello sonoro

L'indice di preferenza della $IACC$ (Fig. 10.7) mostra un giudizio di preferenza buono in tutti i punti di ricezione considerati.

Considerando un brano con $\tau_e = 43$ ms, si nota che l'indice di preferenza della prima riflessione, riportato in Fig. 10.8, ha dei valori estremamente alti: l'indice mostra un elevato gradimento da parte di tutti gli ascoltatori, con la sola eccezione del punto V36: sul

fondo della sala, la prima riflessione è generata dal solaio della galleria, con un *ITDG* molto lontano dal valore ottimale.

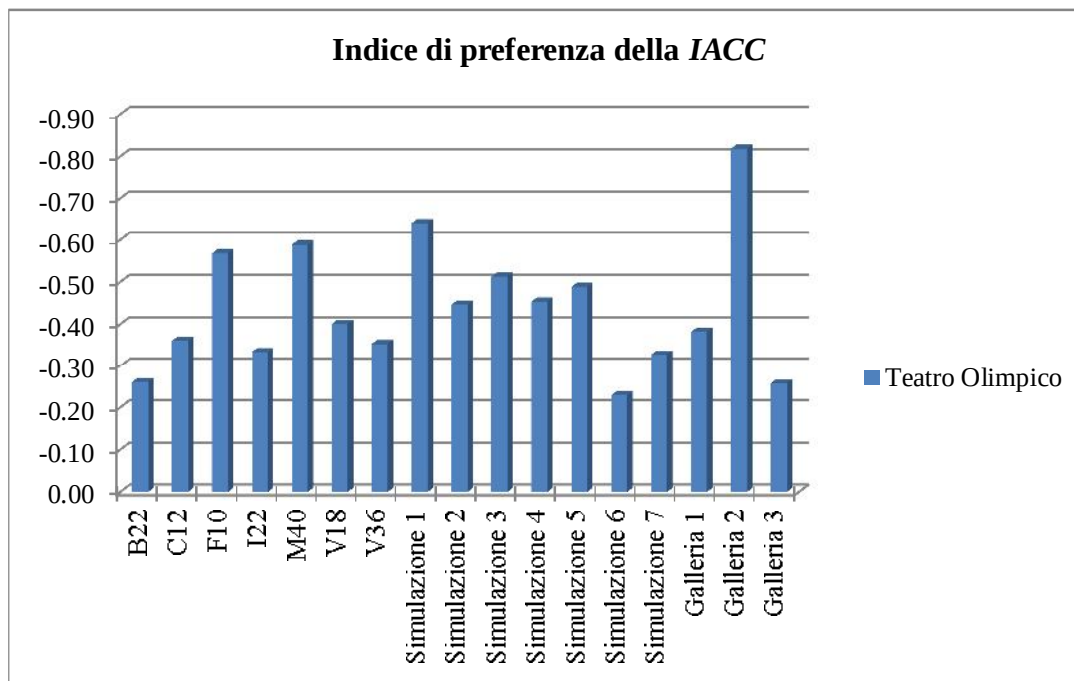


Fig. 10.7 – Indice di preferenza della *IACC*

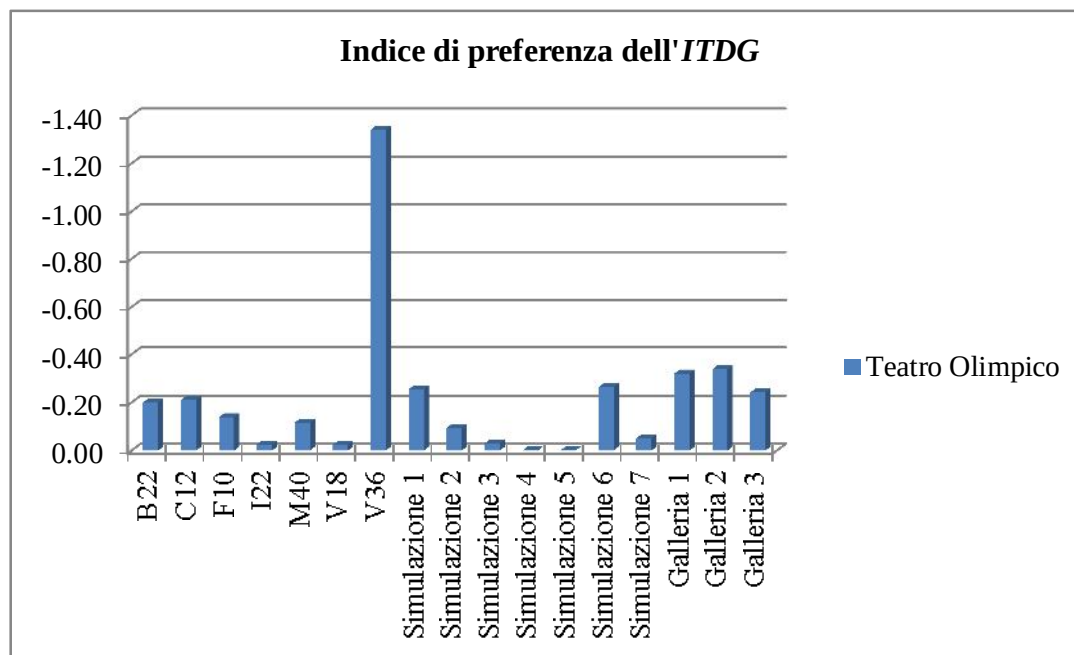


Fig. 10.8 – Indice di preferenza dell'*ITDG*

Il tempo di riverberazione ha valori prossimi all'ottimale in tutti i punti della sala e questo è evidenziato da valori dell'indice di preferenza alti nei i punti considerati (Fig. 10.9). Anche in questo caso, come per il Teatro di Budrio, si nota una certa variabilità dell'indice di preferenza, cui fa riscontro la completa uniformità del valore dell'*EDT*, a causa della diversa ampiezza equivalente delle riflessioni (*A*).

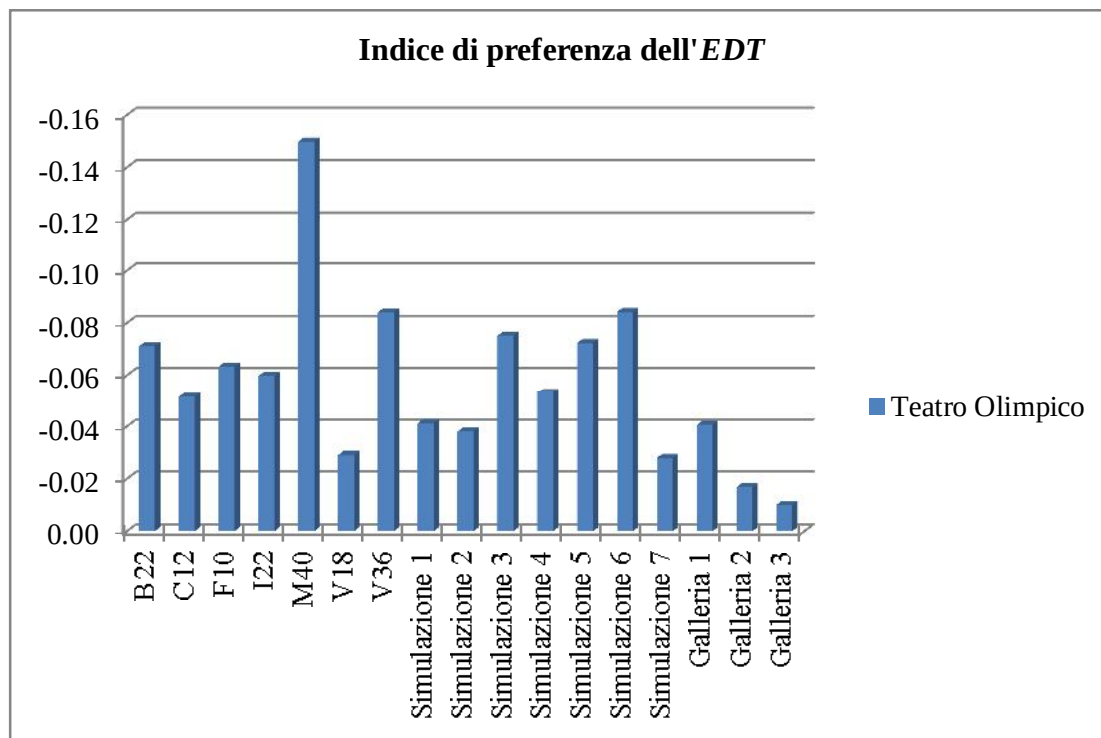


Fig. 10.9 – Indice di preferenza dell'*EDT*

Considerando, infine, l'indice di preferenza totale (Fig. 10.10), esso è molto simile in tutti i punti di ricezione considerati, il che denota un'ottima uniformità di ascolto della sala. Il valore medio, riferito sempre ad un brano con $\tau_e = 43$ ms, è di - 1.00, il che significa un giudizio complessivo molto buono.

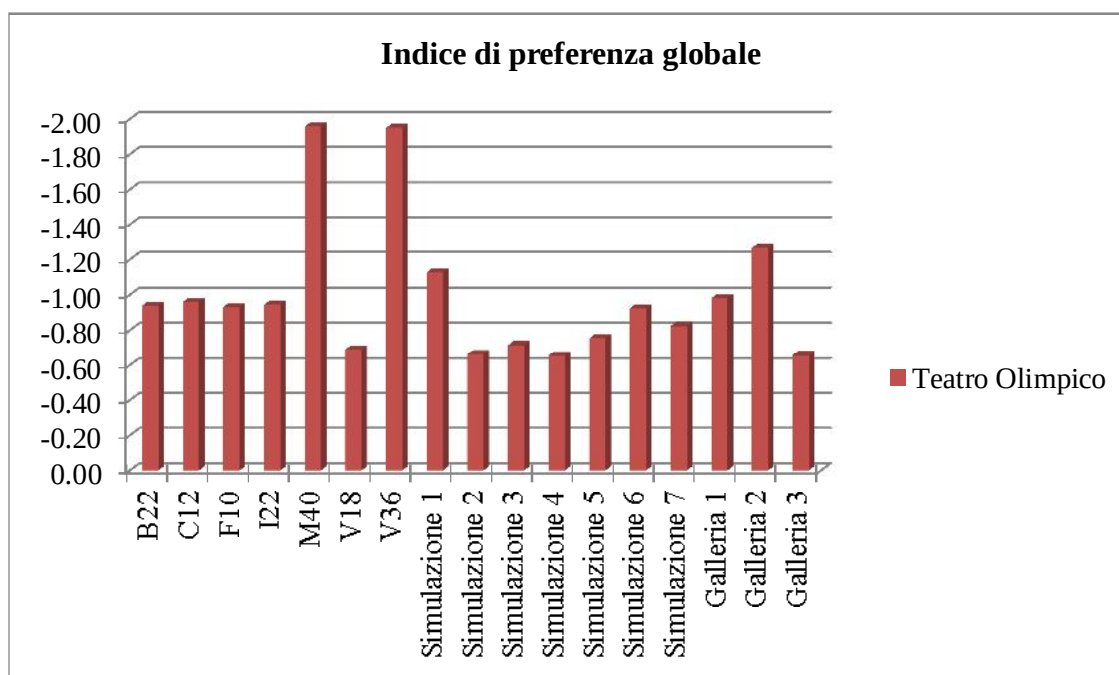


Fig. 10.10 – Indice di preferenza globale

10.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 6 punti, di cui 2 posizionati nella galleria frontale e 1 nella galleria laterale. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.53 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

In questo caso, essendo la sala destinata prevalentemente a conferenze, si è considerato per l'applicazione della teoria, un brano con tempo di autocorrelazione di 12 ms.

In Tab. 10.5 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	15288
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	12

Tab. 10.5 – Aula Magna del Rettorato, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. 10.6 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
1	10	3.02	83.3	12.56	2.28	0.316
2	14.87	3.35	82.2	4.67	2.24	0.470
3	13.16	1.70	82.4	32.04	2.18	0.422
4	17.47	3.67	81.4	8.22	2.15	0.400
5	19.45	3.43	81.2	24.23	2.14	0.270
6	21.42	3.94	81.5	2.81	2.17	0.302
7	26.46	3.80	79.2	5.25	2.17	0.438
Simulato 1	10.44	1.05	82.7	35.92	2.29	0.392
Simulato 2	24.57	3.27	79.4	23.95	2.33	0.255
Simulato 3	20.63	4.07	81.4	4.73	2.17	0.281
Galleria 1	24.64	4.47	81.2	13.6	2.07	0.525
Galleria 2	30.11	3.39	80.4	2.48	2.07	0.384
Corridoio 1	17.58	3.80	80.5	3.58	2.06	0.262

Tab. 10.6 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Fig. 10.11 è riportato l'andamento dell'indice di preferenza del Livello sonoro. Si nota una forte variabilità dell'indice di preferenza, supportata dalla disuniformità del livello evidenziata dalle simulazioni effettuate, con dei picchi per i punti situati nelle gallerie laterali e per il ricettore 1, posizionato nelle primissime file, che mostra un livello misurato estremamente inferiore rispetto all'ottimale previsto. In generale, comunque, i valori dell'indice parziale sono abbastanza bassi, a parte qualche piccola eccezione, il che significa uno scarso gradimento da parte degli ascoltatori.

L'indice di preferenza della $IACC$ (Fig. 10.12) mostra dei valori abbastanza buoni in tutti i punti, il che significa un ascolto binaurale accettabile.

Considerando un brano con $\tau_e = 12$ ms, si nota che l'indice di preferenza della prima riflessione, riportato in Fig. 10.13, ha dei valori estremamente variabili: l'indice mostra un gradimento minimo da parte degli ascoltatori nella parte centrale della sala, per tutta la sua lunghezza, mentre i valori sono ottimi per i ricettori situati lateralmente. Ciò è spiegabile analizzando le prime riflessioni: queste provengono sempre dalle pareti laterali e quindi il percorso che devono compiere per raggiungere la zona centrale della sala è maggiore.

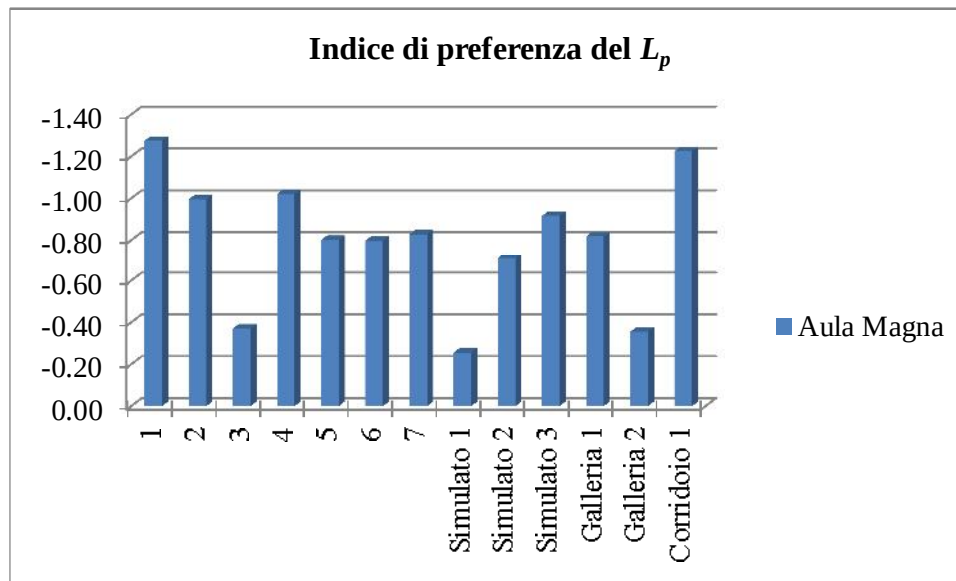


Fig. 10.11 – Indice di preferenza del livello sonoro

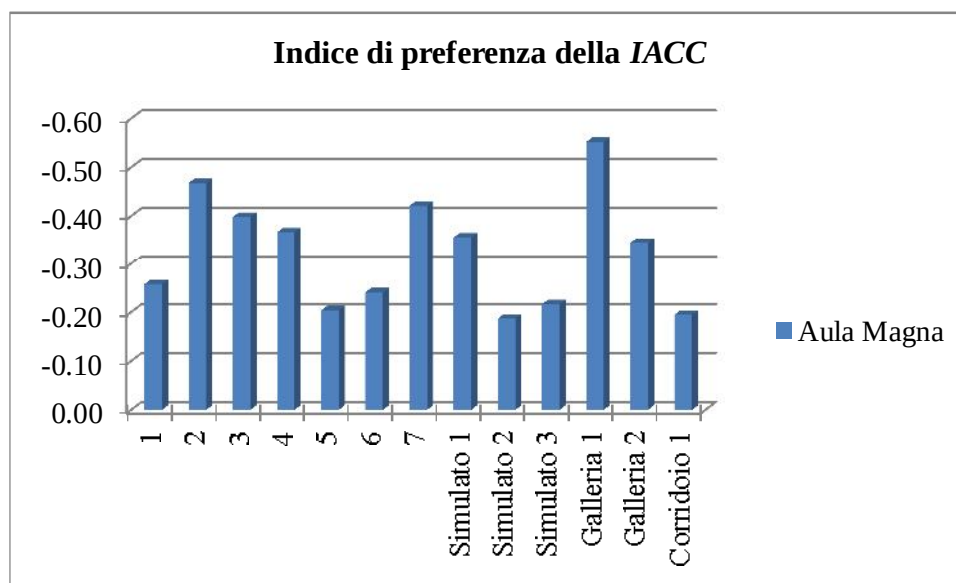
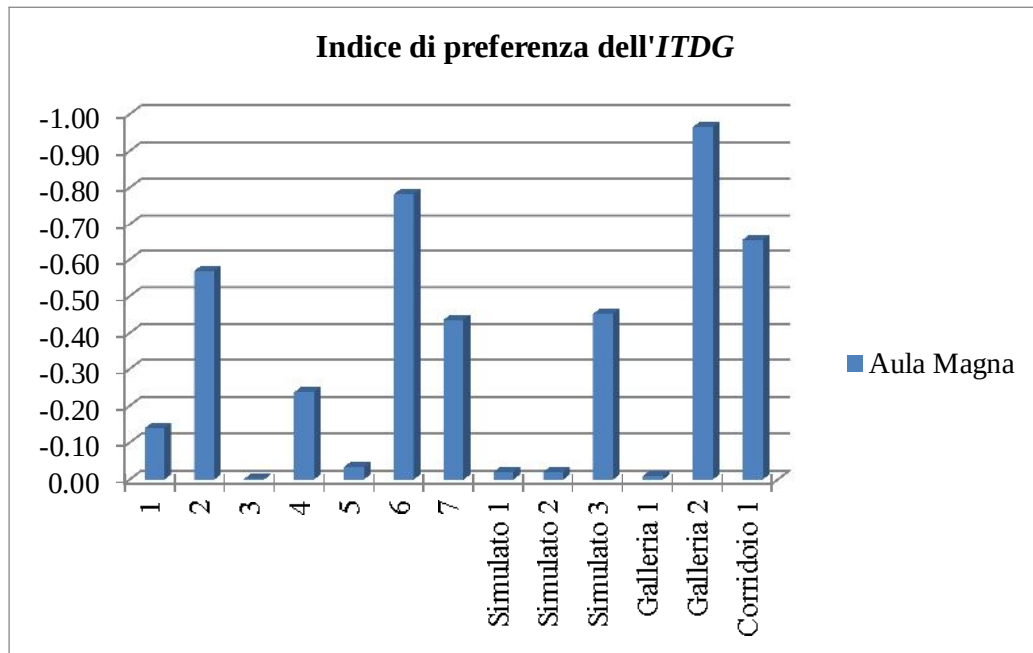
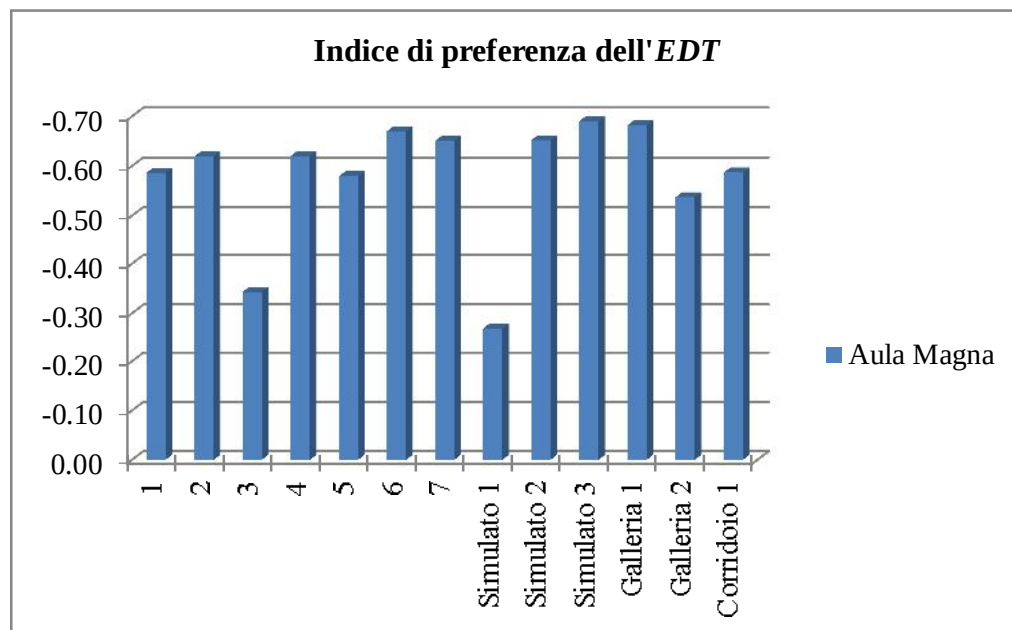


Fig. 10.12 – Indice di preferenza della IACC

Il tempo di riverberazione della sala ha valori estremamente elevati rispetto all'ottimale. La sala risulta essere estremamente riverberante, a causa degli affreschi ed intonaci che la rivestono, e quindi non particolarmente adatta all'utilizzo per sala conferenze. Ciò è evidente nei valori dell'indice di preferenza parziali (Fig. 10.14), che sono molto bassi praticamente in tutti i punti di ricezione.

Considerando, infine, l'indice di preferenza totale (Fig. 10.15), esso è estremamente variabile, il che denota una certa disuniformità di ascolto della sala. Il valore medio dell'indice di qualità, riferito sempre ad un brano con $\tau_e = 12$ ms, è di - 2.03, il che significa un giudizio complessivo tutt'altro che buono.

Fig. 10.13 – Indice di preferenza dell'*ITDG*Fig. 10.14 – Indice di preferenza dell'*EDT*

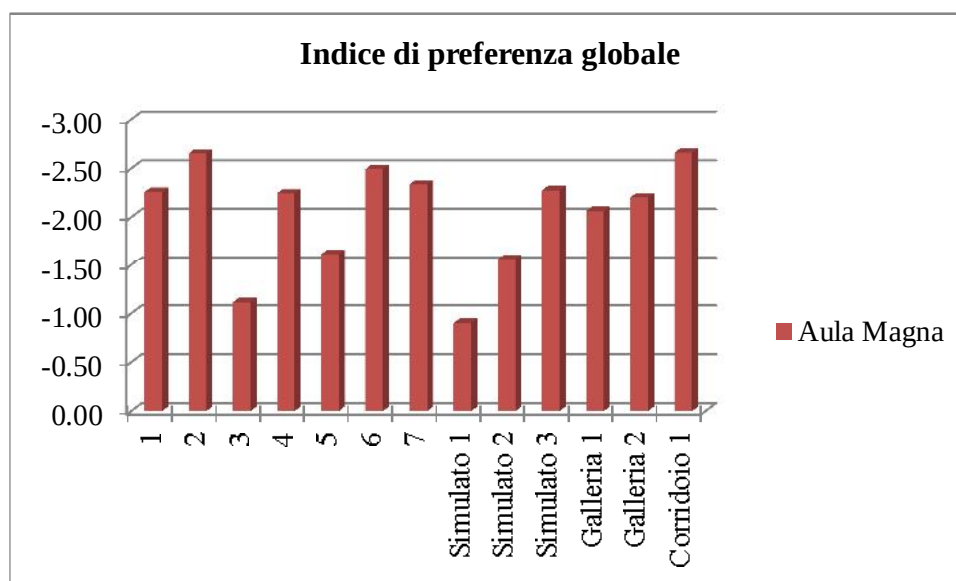


Fig. 10.15 – Indice di preferenza globale

10.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

10.4.1. Applicazione della teoria di Ando per la configurazione sala da concerto

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni negli 11 punti di ricezione considerati, di cui 8 in platea e 3 in galleria. Ricordo che in questo caso non è stato possibile effettuare una campagna di misure, essendo il teatro ancora in fase di progettazione. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.71 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

Essendo in questa configurazione (con il palco più corto e la fossa orchestrale) la sala destinata a musica orchestrale, si è considerato, per l'applicazione della teoria, un brano con tempo di autocorrelazione di 43 ms.

In Tab. 10.7 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	5603
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77

Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43
--	----

Tab. 10.7 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando nella configurazione per sala da concerto

La Tab. 10.8 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
R1	2.98	2.72	93.9	16.74	0.65	0.362
R2	4.78	1.23	88.6	5.87	0.87	0.304
R3	6.35	1.00	87.1	6.35	0.86	0.471
R4	10.45	2.72	85.2	6.38	0.82	0.377
R5	8.61	2.43	86.5	5.84	0.83	0.349
R6	17.51	2.75	81.4	6.45	0.73	0.439
R7	17.6	3.13	81.3	6.42	0.77	0.385
R8	16.49	2.57	81.8	6.44	0.75	0.471
G1	18.77	4.73	83.1	5.18	0.62	0.338
G2	15.92	3.80	83.1	5.91	0.75	0.341
G3	16.01	3.43	83.2	5.88	0.69	0.402

Tab. 10.8 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Fig. 10.16 è riportato l'andamento dell'indice di preferenza del Livello sonoro. Si nota una forte variabilità dell'indice di preferenza, supportata dalla disuniformità del livello evidenziata dalle simulazioni effettuate, con un picco per il ricettore 1, posizionato nelle primissime file, che mostra un livello simulato estremamente inferiore rispetto all'ottimale previsto. In generale, quindi, i valori dell'indice parziale sono abbastanza bassi, a parte qualche piccola eccezione, il che significa uno scarso gradimento da parte degli ascoltatori.

L'indice di preferenza della $IACC$ (Fig. 10.17) mostra dei valori abbastanza buoni in tutti i punti, il che significa un ascolto binaurale accettabile.

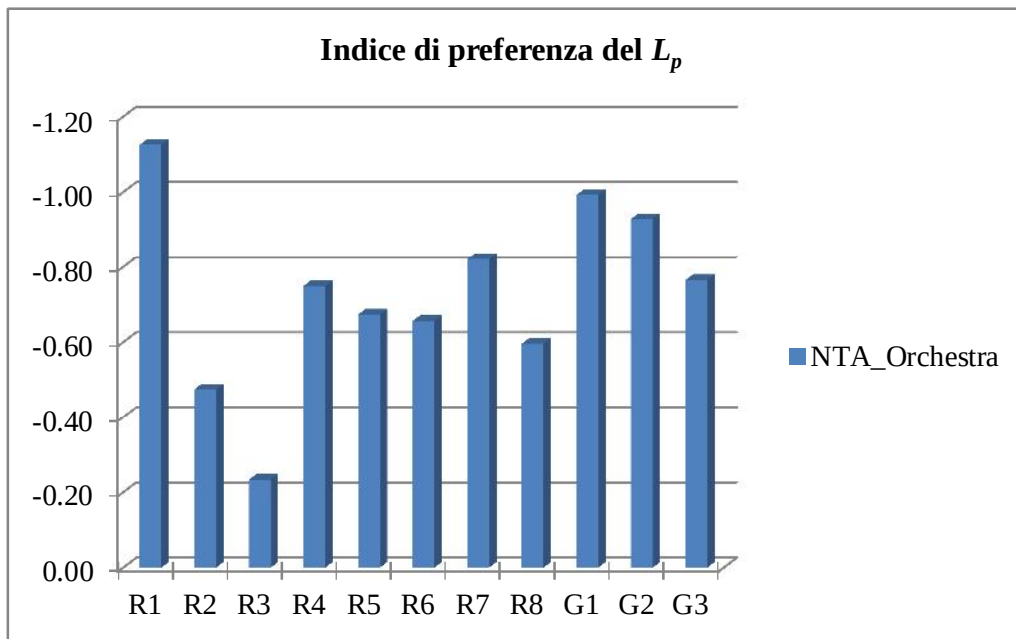


Fig. 10.16 – Indice di preferenza del livello sonoro

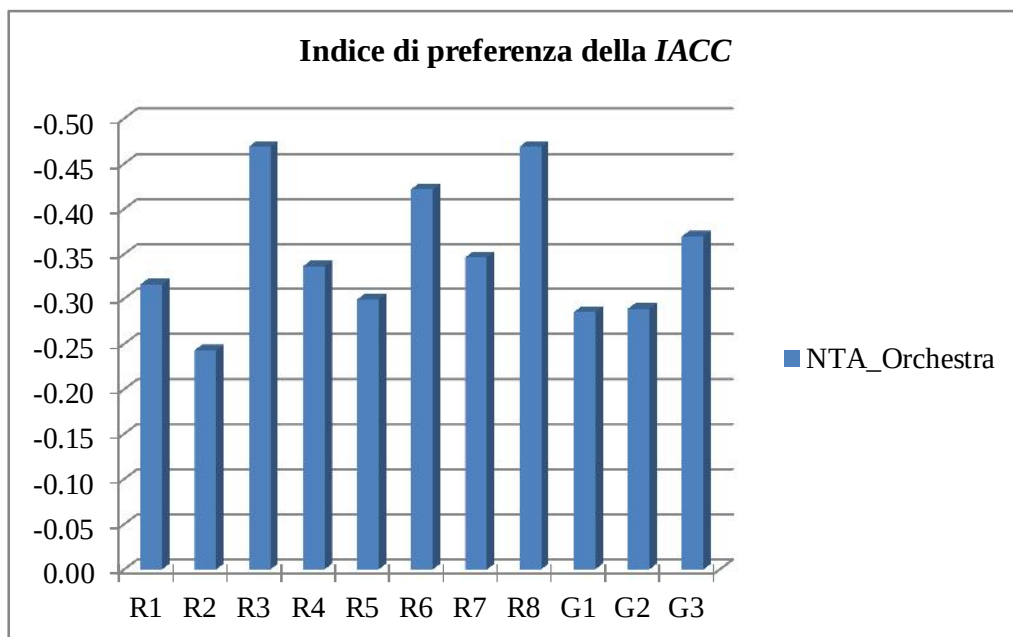


Fig. 10.17 – Indice di preferenza della IACC

Considerando un brano con $\tau_e = 47$ ms, si nota che l'indice di preferenza della prima riflessione, riportato in Fig. 10.18, ha dei valori estremamente variabili: l'indice mostra un gradimento minimo da parte degli ascoltatori a metà della platea, per tutta la sua lunghezza, mentre i valori sono ottimi o buoni per gli altri i ricettori.

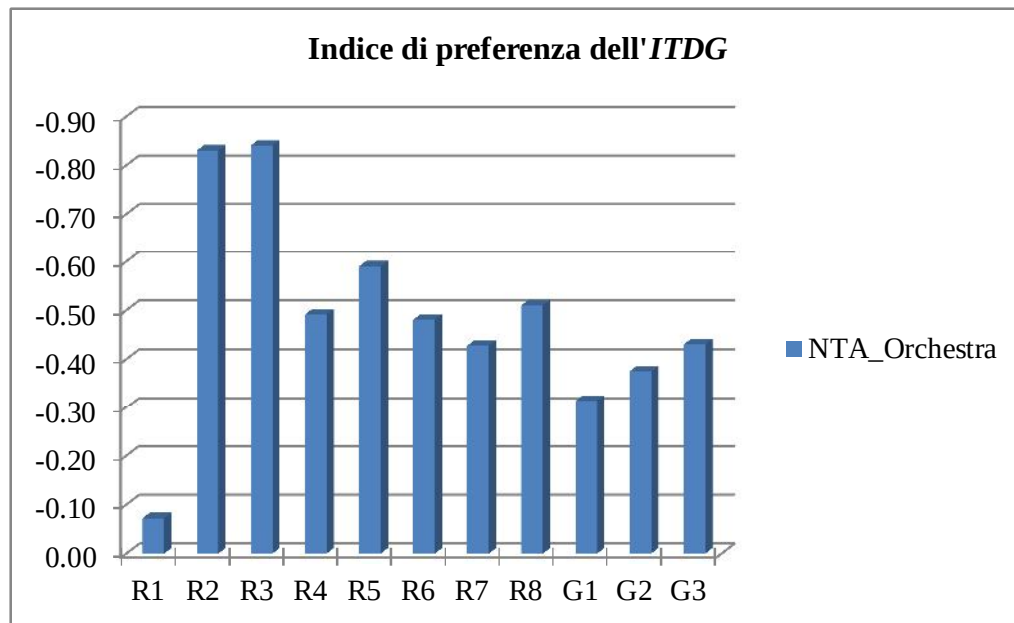


Fig. 10.18 – Indice di preferenza dell'ITDG

Il tempo di riverberazione della sala ha valori estremamente bassi rispetto all'ottimale. Nonostante questo, il tempi di riverberazione soggettivo preferito, secondo Ando, è di circa 0.9 s, il che spiega gli ottimi valori dell'indice di preferenza parziale (Fig. 10.19).

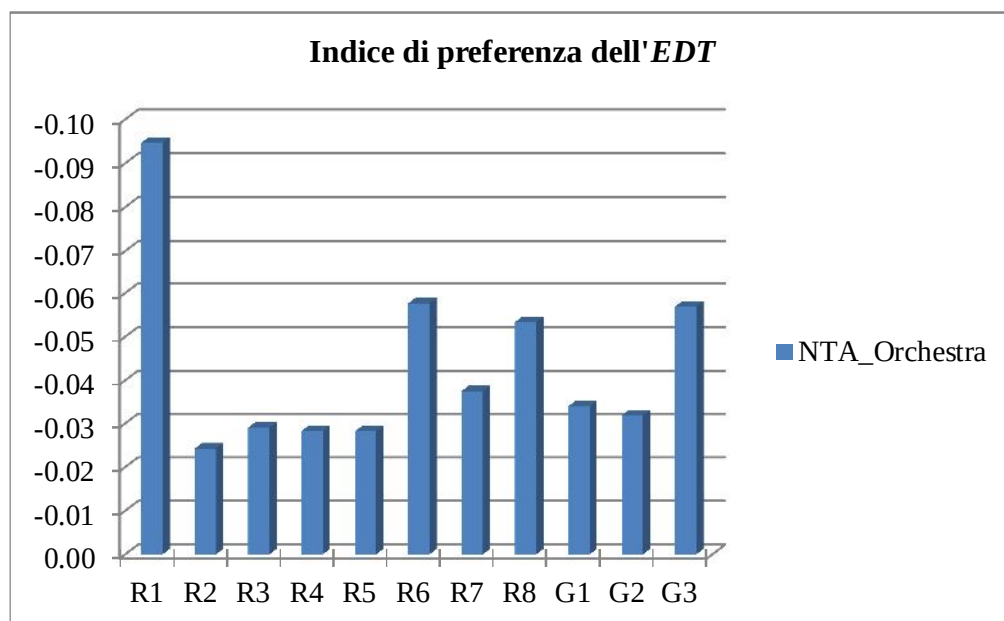


Fig. 10.19 – Indice di preferenza dell'EDT

Considerando, infine, l'indice di preferenza totale (Fig. 10.20), esso è praticamente costante nei punti di ricezione considerati, il che denota come, pur essendo il teatro caratterizzato da una forte disuniformità dei parametri acustici, il giudizio soggettivo sia invece lo stesso per tutti i potenziali ascoltatori. Il valore medio dell'indice di qualità della sala è di -1.61, il che significa un giudizio complessivo accettabile.

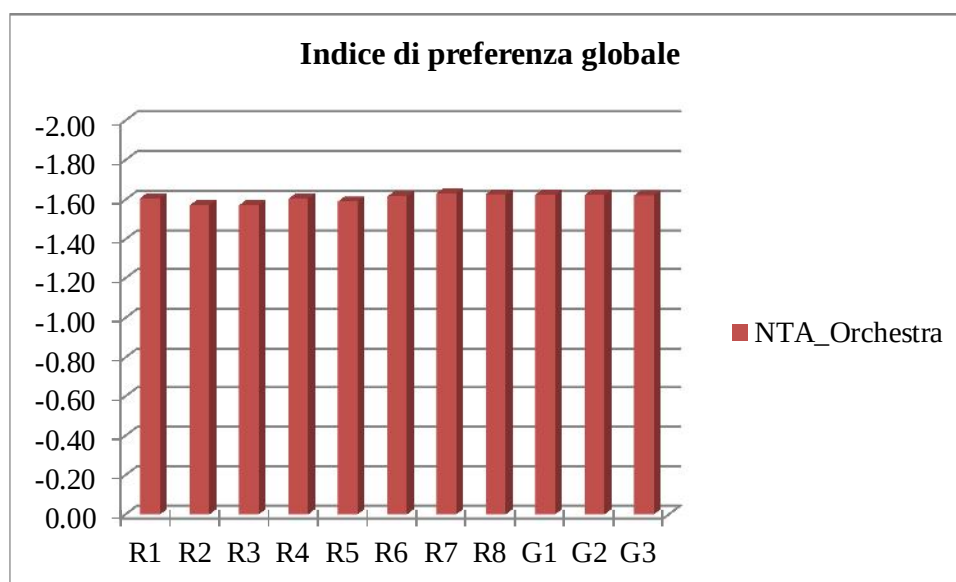


Fig. 10.20 – Indice di preferenza globale

10.4.2. Applicazione della teoria di Ando per la configurazione teatro

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni nei 7 punti di ricezione considerati, di cui 8 in platea e 3 in galleria. I ricettori sono gli stessi della configurazione per sala da concerto, decurtati delle 4 sedute che da progetto devono essere smontate per consentire l'allungamento del palco. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.78 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 99 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 62 dB.

Essendo in questa configurazione (con il palco più lungo e senza la fossa orchestrale) la sala destinata prevalentemente al parlato, si è considerato per l'applicazione della teoria, un brano con tempo di autocorrelazione di 12 ms.

In Tab. 10.9 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	5603
Potenza sonora della sorgente (dB)	99
Livello di pressione a 20 m (dB)	62
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	12

Tab. 10.9 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando nella configurazione per teatro

La Tab. 10.10, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
R4	7.07	1.50	71.1	12.51	0.97	0.518
R5	5.39	1.40	72.3	8.25	1.09	0.359
R6	14.11	1.83	64.6	18.19	1.21	0.521
R7	14.22	1.06	65.2	9.78	1.05	0.533
R8	13.1	1.10	65.5	8.93	1.13	0.555
G1	14.99	1.45	67.6	4.71	1.39	0.34
G2	12.08	1.51	68.5	6.83	1.18	0.457
G3	12.2	1.53	68.2	6.77	1.15	0.445

Tab. 10.10 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Fig. 10.21 è riportato l'andamento dell'indice di preferenza del Livello sonoro. Si notano valori abbastanza alti dell'indice di preferenza, che indicano una buona qualità acustica, ad eccezione dei punti di ricezione più prossimi alla sorgente, che hanno una differenza tra il livello simulato e quello preferito maggiore.

L'indice di preferenza della $IACC$ (Fig. 10.22) mostra una certa disuniformità e dei valori abbastanza bassi, che si traducono in una sensazione di ascolto binaurale non troppo buona.

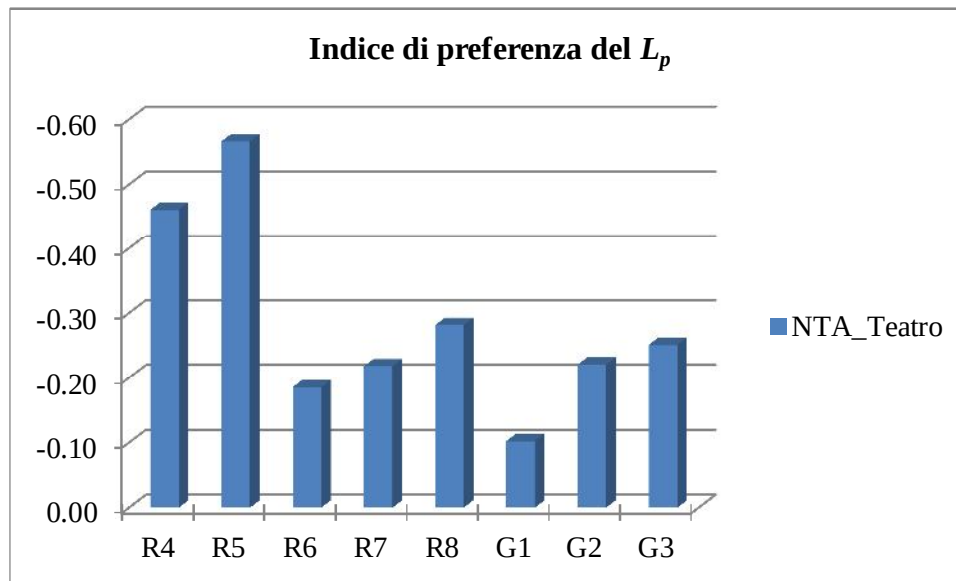


Fig. 10.21 – Indice di preferenza del livello sonoro

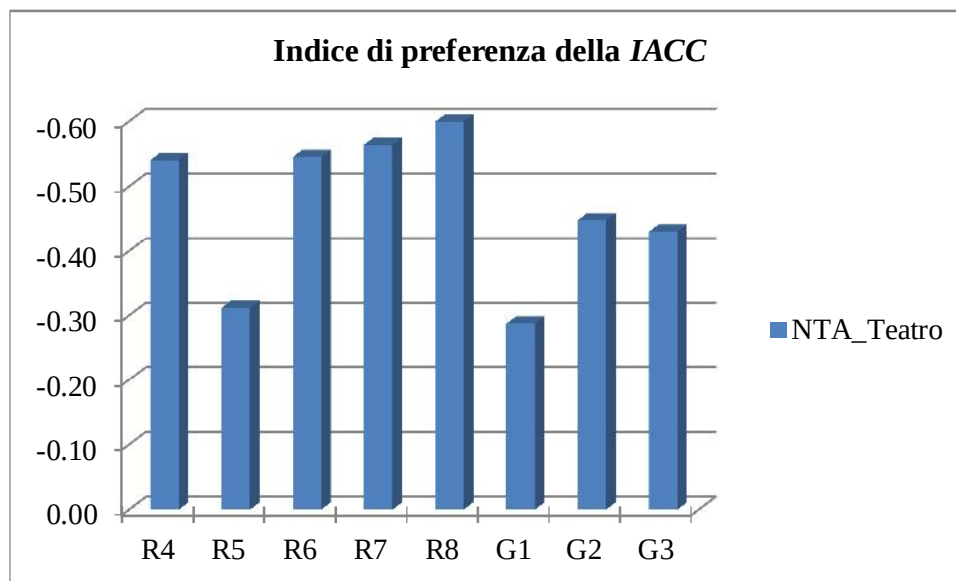


Fig. 10.22 – Indice di preferenza della IACC

Considerando un brano con $\tau_e = 12$ ms, si nota che l'indice di preferenza della prima riflessione, riportato in Fig. 10.23, ha dei valori estremamente alti: l'indice mostra un ottimo gradimento da parte degli ascoltatori, spiegabile con le dimensioni non eccessive della sala. L'unico punto in cui il valore dell'indice diminuisce, pur rimanendo a livelli molto buoni, è il G1: dall'analisi del reflectogramma si evince come la prima riflessione in questo caso sia dovuta al soffitto, che è abbastanza alto.

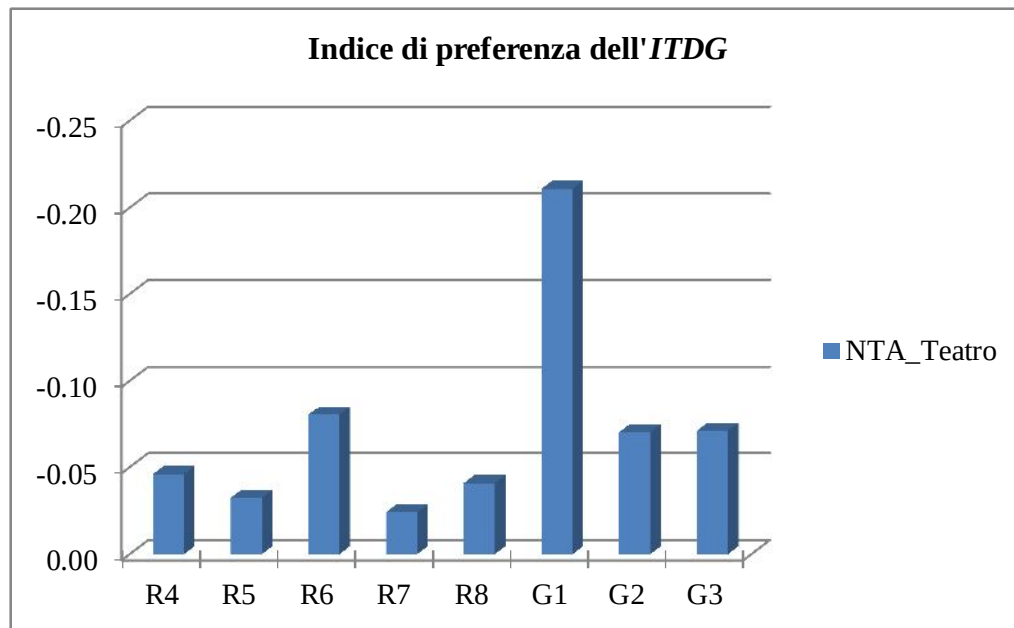


Fig. 10.23 – Indice di preferenza dell'ITDG

Il tempo di riverberazione della sala ha valori molto maggiori rispetto al tempo di riverberazione soggettivo preferito suggerito Ando. Ciò spiega i valori molto bassi dell'indice di preferenza, soprattutto in galleria (Fig. 10.24). La leggera disuniformità dell'indice, inoltre, rispecchia quella dell'EDT.

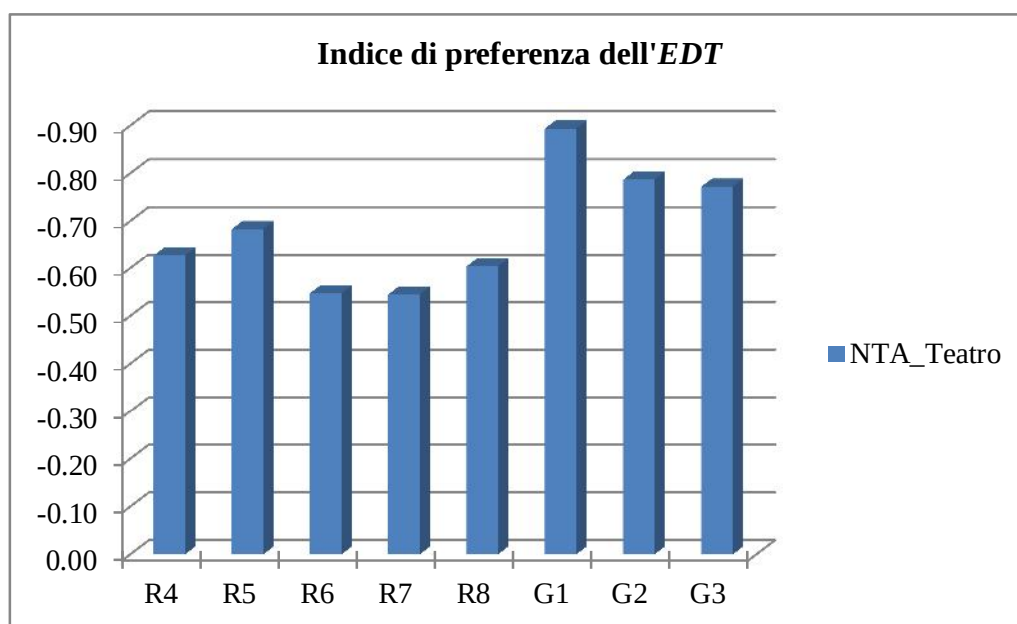


Fig. 10.24 – Indice di preferenza dell'EDT

Considerando, infine, l'indice di preferenza totale (Fig. 10.25), esso è praticamente costante nei punti di ricezione considerati, il che denota come, pur essendo il teatro caratterizzato da una forte disuniformità dei parametri acustici, il giudizio soggettivo sia invece lo stesso per tutti i potenziali ascoltatori. Il valore medio dell'indice di qualità della sala, riferito sempre ad un brano con $\tau_e = 12$ ms, è di -1.51, il che significa un giudizio complessivo accettabile.

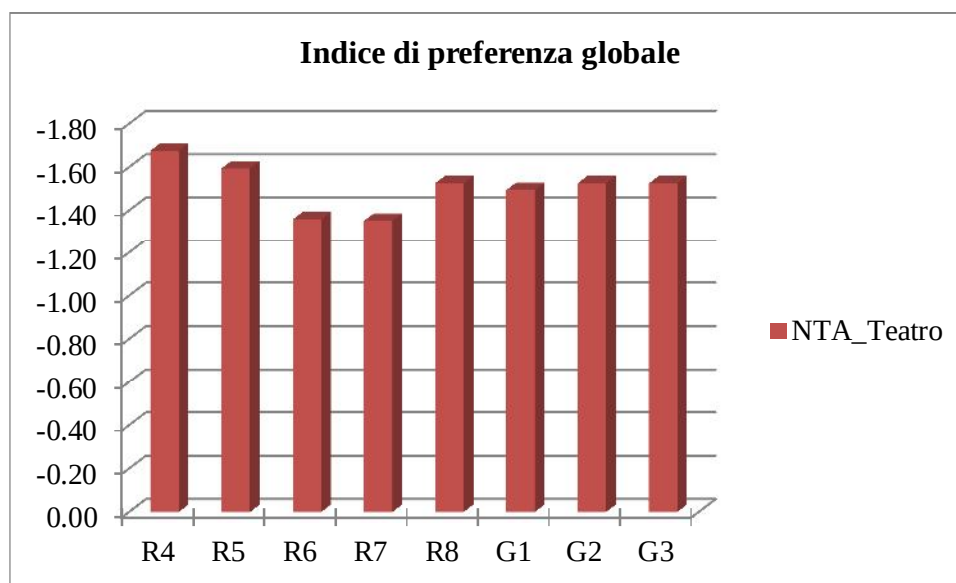


Fig. 10.25 – Indice di preferenza globale

10.5. Teatro dell'Opera di Roma

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea e sui palchi del primo ordine nei 12 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 2 punti, posizionati sui palchi di ordine superiore al primo. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.92 del Capitolo 9. E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 100 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 63 dB.

In Tab. 10.11 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	25200
Potenza sonora della sorgente (dB)	100

Livello di pressione a 20 m (dB)	63
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. 10.11 – Teatro dell’Opera, dati fondamentali per l’applicazione della teoria di Ando

La Tab. 10.12 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell’indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	ITDG (ms)	EDT (s)	IACC
1	10.19	3.35	79.6	27.03	1.39	0.376
2	13.92	3.27	76.9	66.16	2.00	0.303
3	17.68	2.11	76.9	2.00	1.78	0.569
4	17.53	1.70	76.9	8.88	1.55	0.465
5	23.3	3.98	76.5	3.33	1.86	0.609
6	19.46	3.20	75.8	28.42	1.75	0.328
7	21.23	3.02	75.8	25.27	1.49	0.349
8	25.6	3.67	76.2	18.52	1.27	0.488
9	10.19	2.75	79.9	26.83	1.24	0.302
10	13.92	2.60	77.2	65.71	1.83	0.301
11	19.15	2.51	68.7	38.90	1.65	0.477
12	19.3	3.55	75.2	38.20	1.53	0.579
13	25.22	2.43	66.6	29.69	2.29	0.421
14	28.65	2.57	70.7	22.14	1.45	0.551

Tab. 10.12 – Dati necessari per il calcolo dell’indice di qualità per i punti di ricezione considerati

In Fig. 10.26 è riportato l’andamento dell’indice di preferenza del Livello sonoro. Si nota una discreta uniformità di giudizio, con la sola eccezione dei punti di ricezione 3 e 4, che presentano dei livelli di pressione sonora troppo alti rispetto ai preferiti attesi. Questo è spiegabile con la vicinanza della parete laterale, molto riflettente, che contribuisce in maniera forse eccessiva al rinforzo dell’onda diretta. In generale, comunque, i valori dell’indice parziale sono abbastanza alti, a parte qualche piccola eccezione, il che significa un buon gradimento da parte degli ascoltatori.

L’indice di preferenza della IACC (Fig. 10.27) mostra dei valori eccessivamente bassi in quasi tutti i punti della sala, il che indica una percezione binaurale di scarsa qualità.

Considerando un brano con $\tau_e = 43$ ms, si nota che l'indice di preferenza della prima riflessione, riportato in Fig. 10.28, ha dei molto buoni per quanto riguarda i punti di ricezione situati al centro della platea e sui palchi, mentre ancora una volta risultano sfavoriti gli ascoltatori seduti nelle zone laterali della platea. Ciò è spiegabile analizzando le prime riflessioni: queste provengono sempre dalle pareti laterali e quindi il percorso che devono compiere per raggiungere la zona centrale della sala è fin troppo breve.

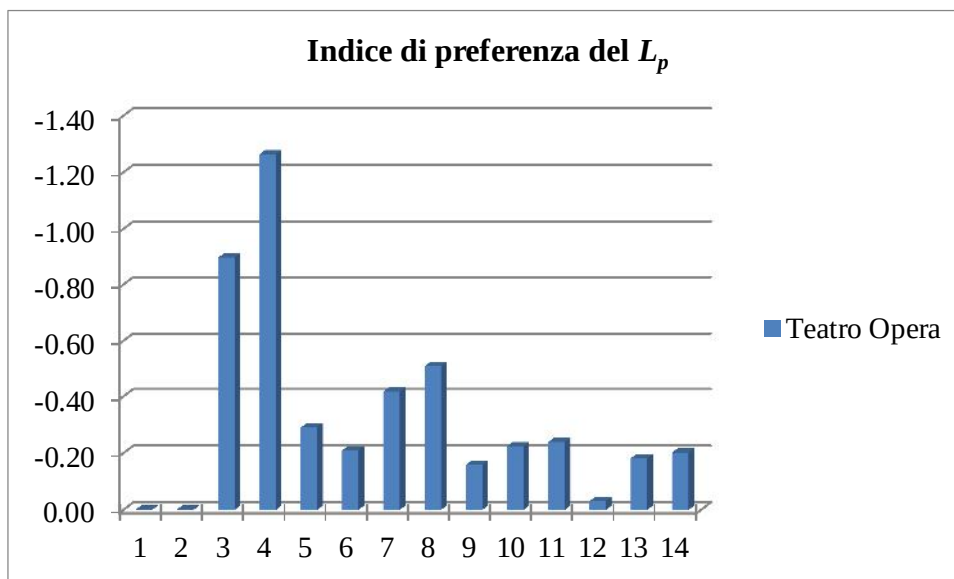
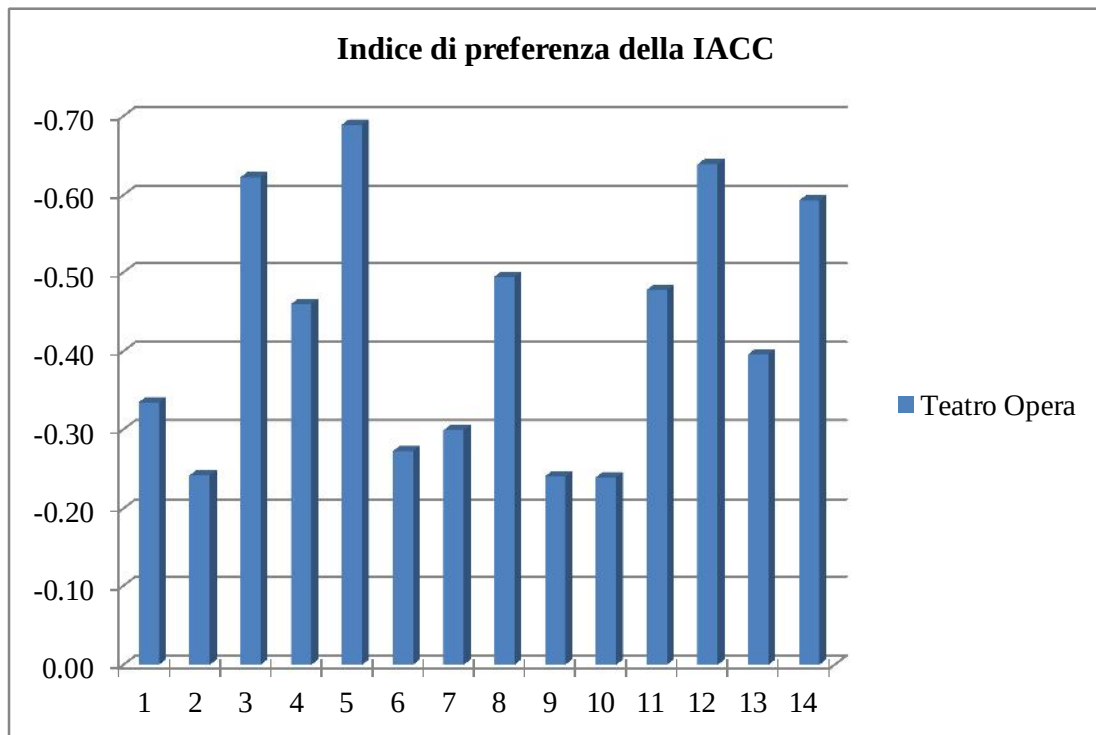
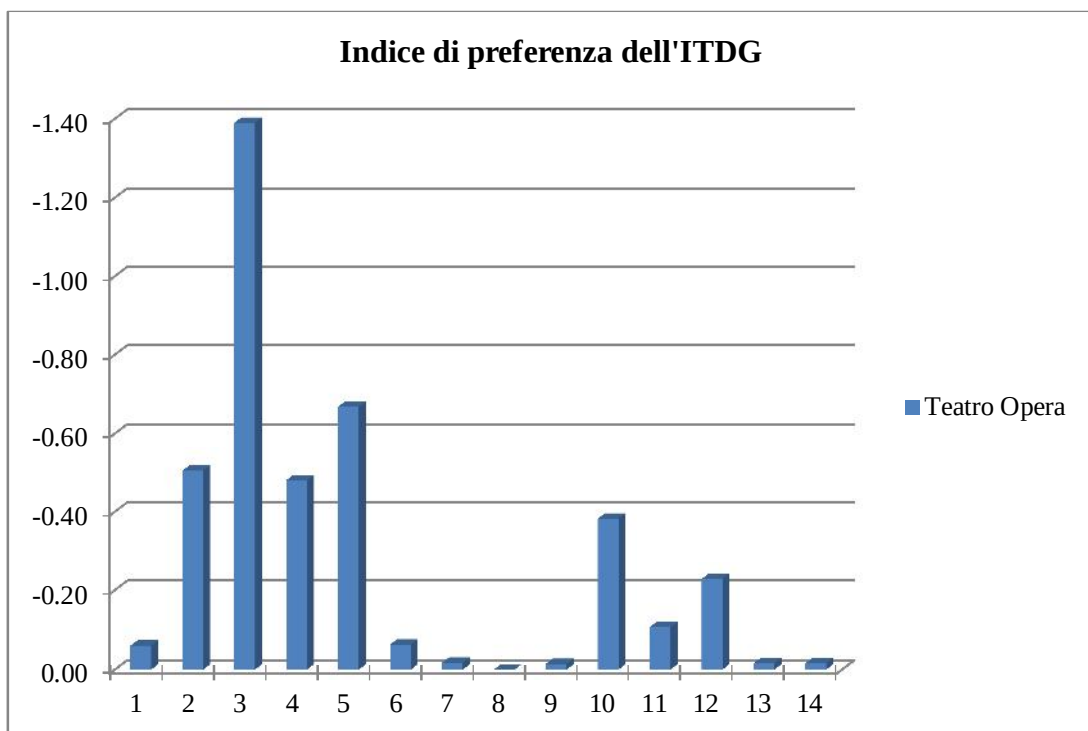


Fig. 10.26 – Indice di preferenza del livello sonoro

Il tempo di riverberazione della sala ha valori molto prossimi all'ottimale. Ciò è evidente nei valori dell'indice di preferenza parziali (Fig. 10.29), che sono discreti praticamente in tutti i punti di ricezione.

Considerando, infine, l'indice di preferenza totale (Fig. 10.30), esso è molto buono in tutti i punti analizzati, con la sola eccezione dei ricettori 3, 4 e 5 in cui il valore si abbassa leggermente pur rimanendo accettabile. Il valore medio dell'indice di qualità, riferito sempre ad un brano con $\tau_e = 43$ ms, è di - 1.31, il che significa un giudizio complessivo buono.

Fig. 10.27 – Indice di preferenza della *IACC*Fig. 10.28 – Indice di preferenza dell'*ITDG*

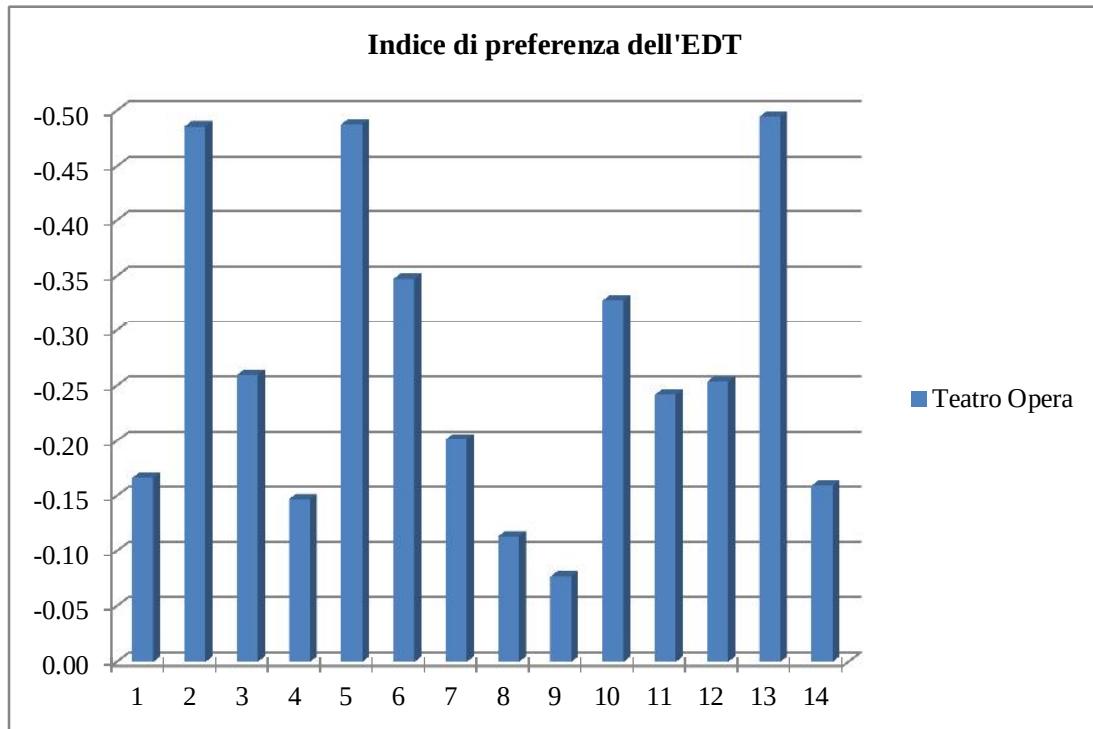


Fig. 10.29 – Indice di preferenza dell'EDT

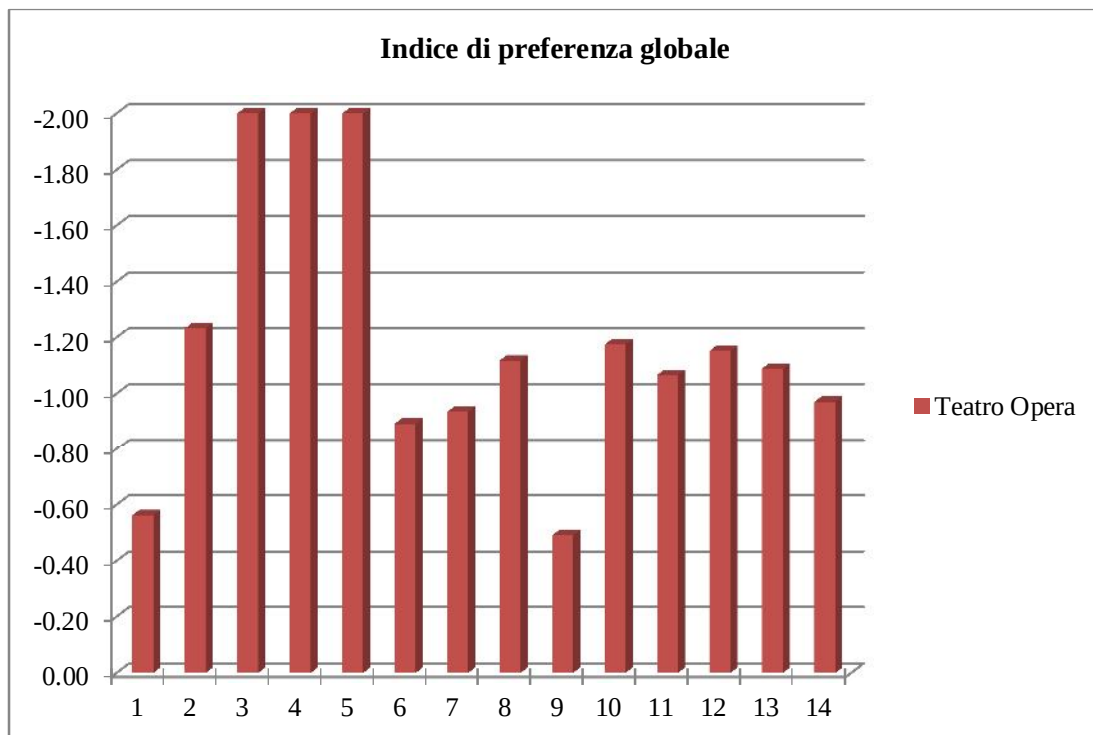


Fig. 10.30 – Indice di preferenza globale

10.6. Conclusioni

Nelle sale di maggiori dimensioni (Teatro Olimpico di Roma, Aula Magna del Rettorato della “Sapienza”, Teatro di Budrio e Teatro dell’Opera) l’indice di preferenza è stato penalizzato dalla grande dimensione degli edifici: questo ha significato un valore inferiore dell’indice preferenza livello sonoro. Nel caso particolare dell’Aula Magna, inoltre, si evidenzia anche lo scarso gradimento legato al tempo di riverberazione, eccessivo per una sala destinata prevalentemente a conferenze.

Le sale più piccole, al contrario (Nuovo Teatro di Ateneo, in entrambe le configurazioni), presentano difficoltà dovute al riverbero eccessivo dell’ambiente e all’eccessivo tempo di ritardo delle prime riflessioni.

In generale, in base ai calcoli effettuati, è possibile stilare una “classifica” di qualità acustica delle sale analizzate (Fig. 10.31, 10.32). Partendo dal teatro che ha ottenuto un giudizio complessivo medio migliore, si avrà (Tab. 10.13):

Teatro	S_{tot} medio
Teatro Olimpico di Roma	- 1.00
Teatro dell’Opera di Roma	-1.31
Teatro di Budrio	-1.46
NTA, configurazione per teatro	-1.51
NTA, configurazione per sala da concerto	-1.61
Aula Magna	-2.03

Tab. 10.13 – Classifica di qualità acustica delle sale analizzate in base alla teoria di Ando

Come già detto, la teoria di Ando non permette di stilare in maniera semplice una scala di valutazione a punti, perché non esiste un limite inferiore al valore dell’indice globale, che indica solamente quanto il giudizio sia “lontano” dalla condizione ottimale. Nonostante questo, ricordando come lo stesso Ando indentifichi come buone le sale con un punteggio medio fino a - 2 ed accettabili quelle con indici di qualità entro il valore di - 4, si può concludere che in tutte le sale analizzate il giudizio finale sulla qualità acustica è sufficientemente buono.

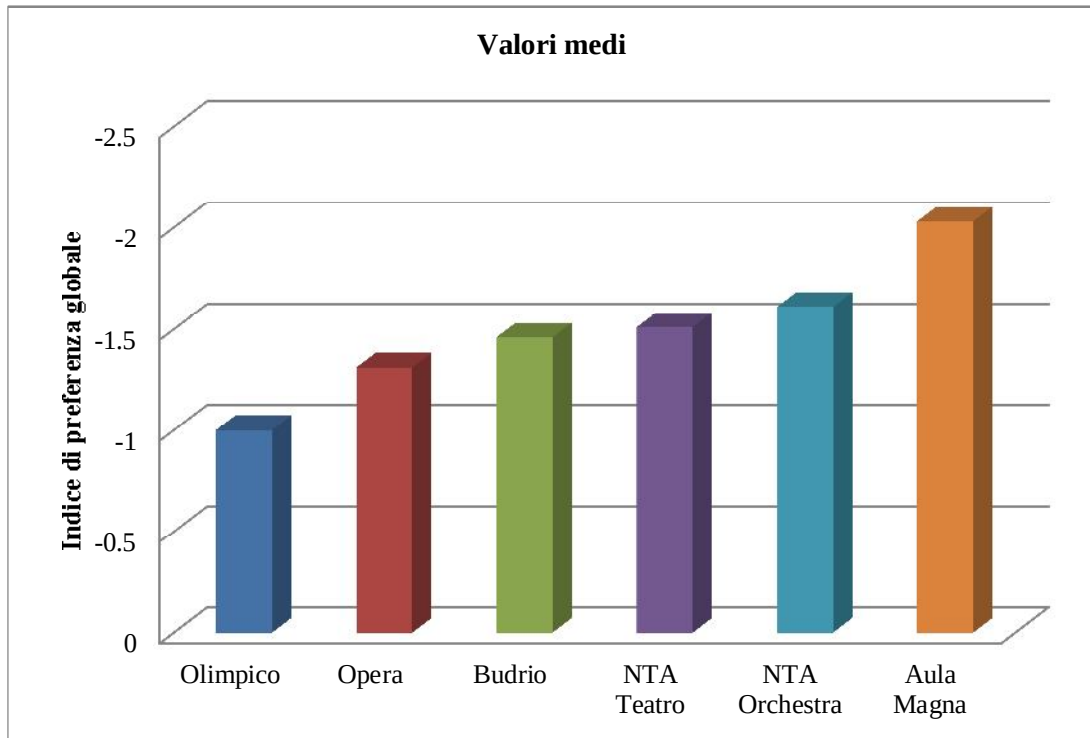


Fig. 10.31 – Istogramma dei valori medi dell'indice di preferenza per le sale analizzate

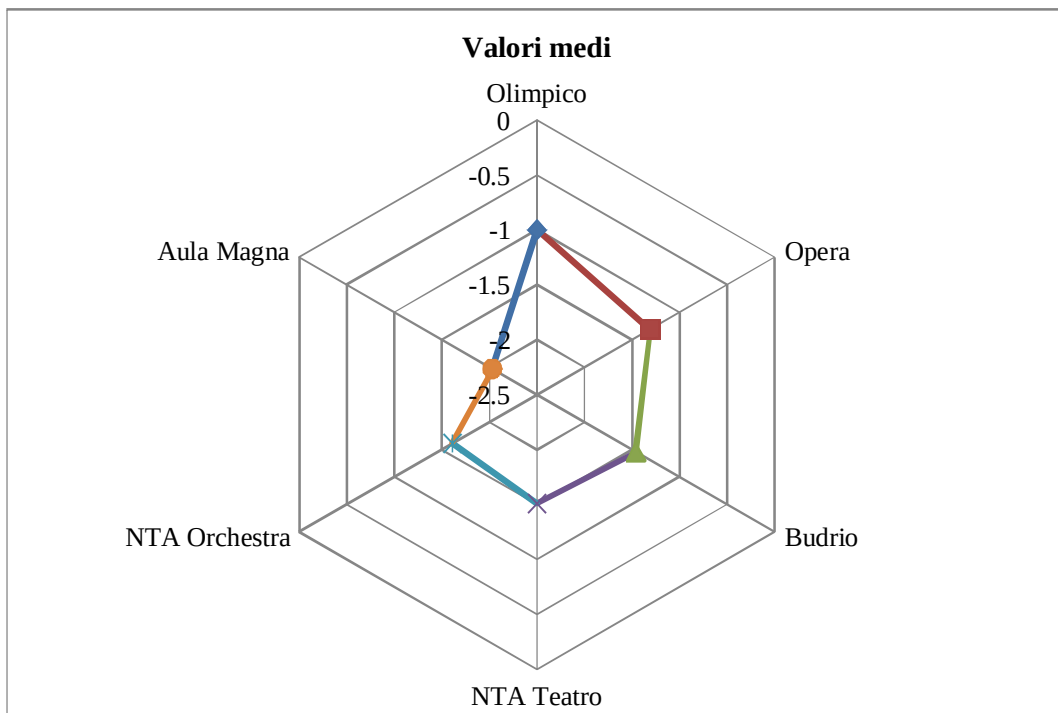


Fig. 10.32 – Grafico radar dei valori medi dell'indice di preferenza per le sale analizzate

CAPITOLO 11 – APPLICAZIONE DELLA TEORIA DEL VETTORE QUALITÀ'

Analogamente a quanto fatto nel Capitolo 10, partendo dai dati dei parametri oggettivi ottenuti dalle misure, è stato calcolato in ciascun punto delle sale analizzate un descrittore numerico della qualità acustica, in base allo schema di valutazione proposto nel presente lavoro, basato sulla teoria del bonum.

Si considerano come parametri indipendenti il Livello di pressione sonora in dB(A), il Lateral Fraction medio alle medie frequenze, l'*ITDG* e l'*EDT* a 500 Hz. Per ciascuno di essi viene calcolata la grandezza fisica oggettiva che provoca la sensazione descritta dal parametro e vengono determinati i limiti, superiore ed inferiore, del campo della qualità acustica per ciascuna grandezza. Infine vengono calcolate le variabili ridotte e l'indice di qualità globale, secondo la procedura descritta nel Capitolo 6.

La valutazione di qualità acustica è stata eseguita considerando in tutte le sale analizzate una sorgente sonora di potenza adeguata, capace di avvicinarsi il più possibile al $L_{p,ott}$ in tutti i punti della sala. In questo capitolo verranno riportati solo i dati di partenza e i risultati finali ottenuti: per il calcolo completo si veda l'Appendice C.

11.1. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni nei tre punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 5 punti. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.10 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 115 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 78 dB.

In Tab. 11.1 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	8269
Potenza sonora della sorgente (dB)	115
Livello di pressione a 20 m (dB)	78
Superficie complessiva della sala (m^2)	3060

Tab. 11.1 – Teatro di Budrio, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. 11.2, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	LF
110	10.2	2.11	84.2	13.29	1.19	0.328
111	10.86	2.09	83	14.65	1.21	0.289
112	10.29	2.14	83.3	12.06	1.23	0.407
Simulazione 1	4.56	2.04	88.5	15.31	1.31	0.261
Simulazione 2	7.85	2.04	85.4	23.71	1.24	0.237
Simulazione 3	7.65	2.24	85	26.81	1.27	0.271
Simulazione 4	13.61	1.41	81.3	30.37	1.21	0.387
Simulazione 5	10.04	1.41	81.3	23.42	1.21	0.389

Tab. 11.2 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. 11.3 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.4	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.76	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	1.90	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. 11.3 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive e si sono calcolate le variabili ridotte di ogni parametro, che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni. Il Vettore qualità è il modulo del vettore che unisce il punto così determinato all'origine del riferimento cartesiano di coordinate (0, 0, 0, 0), corrispondente alla condizione "Ottimale minima". In Tab. 11.4 vengono riportati i valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati, diagrammati in Fig. 11.1.

Punto di misura	Vettore qualità effettivo
110	0.69
111	0.70

112	0.67
Simulazione 1	0.92
Simulazione 2	0.91
Simulazione 3	0.95
Simulazione 4	0.86
Simulazione 5	0.85

Tab. 11.4 – Valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

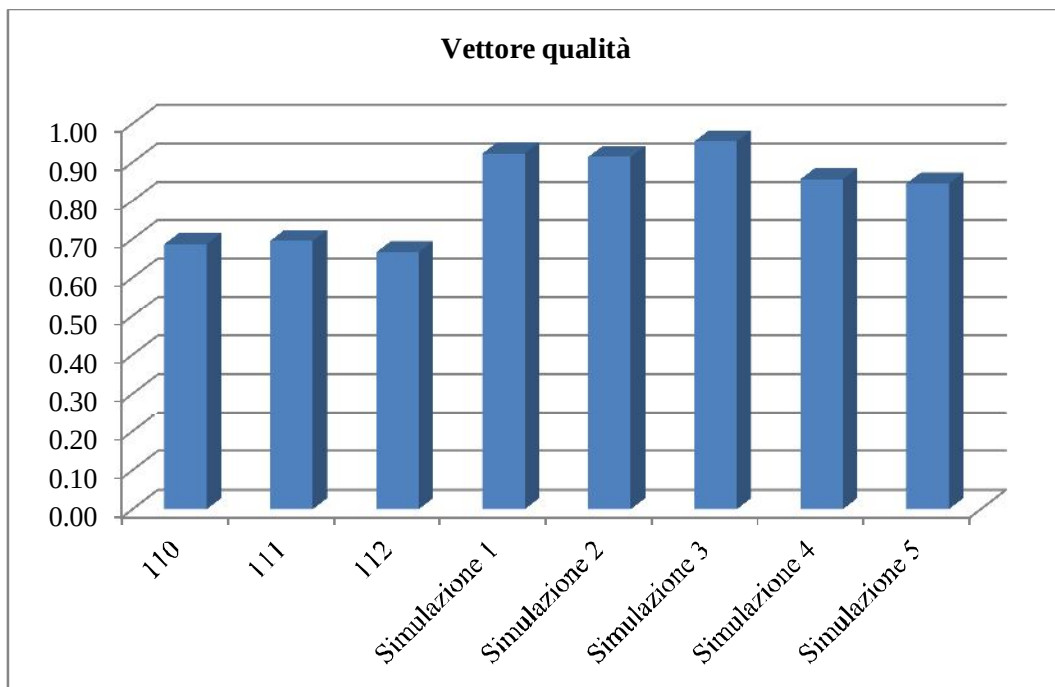


Fig. 11.1 – Istogramma dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

Ricordando che il campo che delimita la qualità acustica, secondo la presente teoria, è compreso tra 0 e 2, dai dati si evince che in tutti i punti di misura la qualità della percezione soggettiva è accettabile, come esplicitato dal grafico a barre in Fig. 11.2. Il valore medio dell'indice è infatti di 0.82.

La Tab. 11.5, graficata in Fig. 11.3, riporta i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale: questo dato dà indicazioni anche sulla “distanza” che intercorre tra la realtà e la situazione teorica ottimale di ogni punto di ricezione.

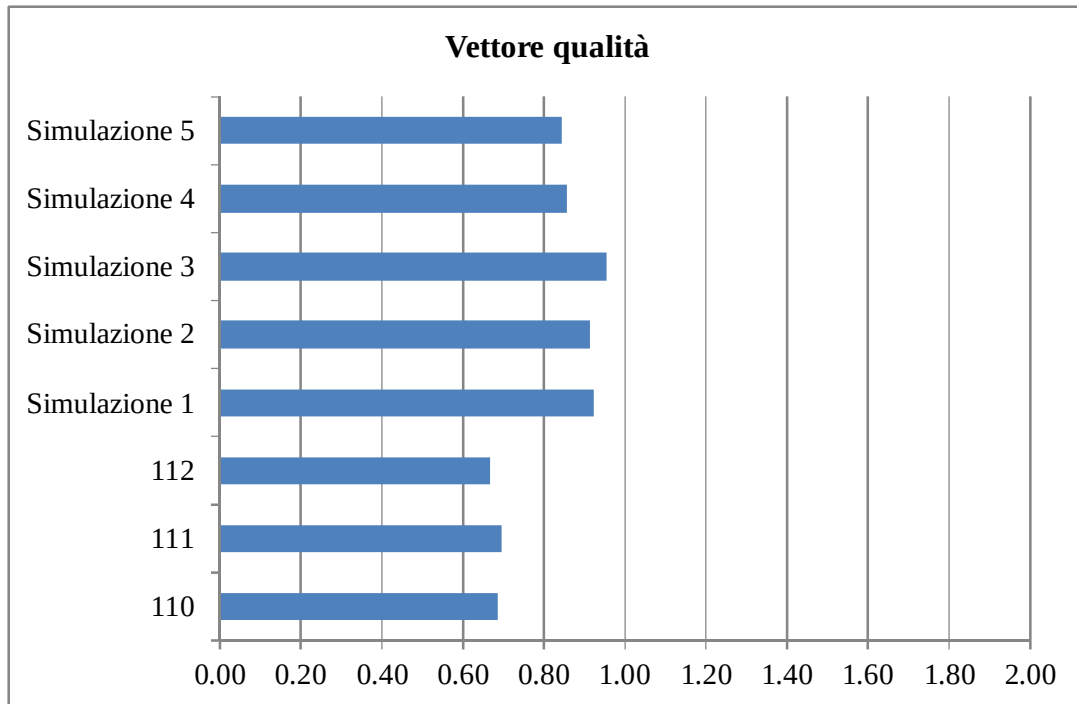


Fig. 11.2 – Grafico a barre dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

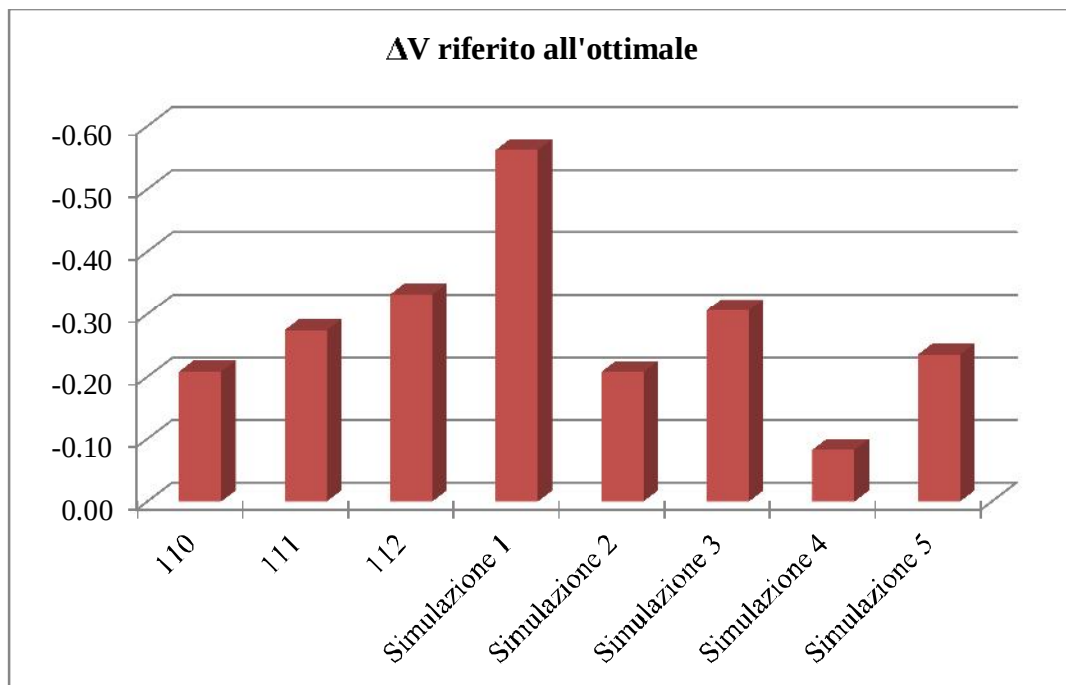


Fig. 11.3 – Istogramma dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Punto di misura	ΔV
110	-0.21
111	-0.27
112	-0.33
Simulazione 1	-0.56
Simulazione 2	-0.21
Simulazione 3	-0.31
Simulazione 4	-0.08
Simulazione 5	-0.24

Tab. 11.5 – Valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Considerando che il valore ottimale del delta è ovviamente zero, si vede come in tutti i punti di ricezione considerati la distanza da tale valore sia molto contenuta: in conclusione la teoria applicata ci indica come la qualità complessiva della sala sia da considerare molto buona.

In Fig. 11.4 viene riportato un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Il suo campo di variabilità, nel caso del Teatro di Budrio, è $[-1 ; 1]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 11.6.

Vettore qualità		
minimo	ottimale	massimo
0	1	2
ΔV		
minimo	ottimale	massimo
-1	0	1

Tab. 11.6 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro di Budrio

Vale la pena di sottolineare una caratteristica della teoria qui proposta, valida non solo per il Teatro di Budrio, ma anche per le altre applicazioni di seguito esposte.

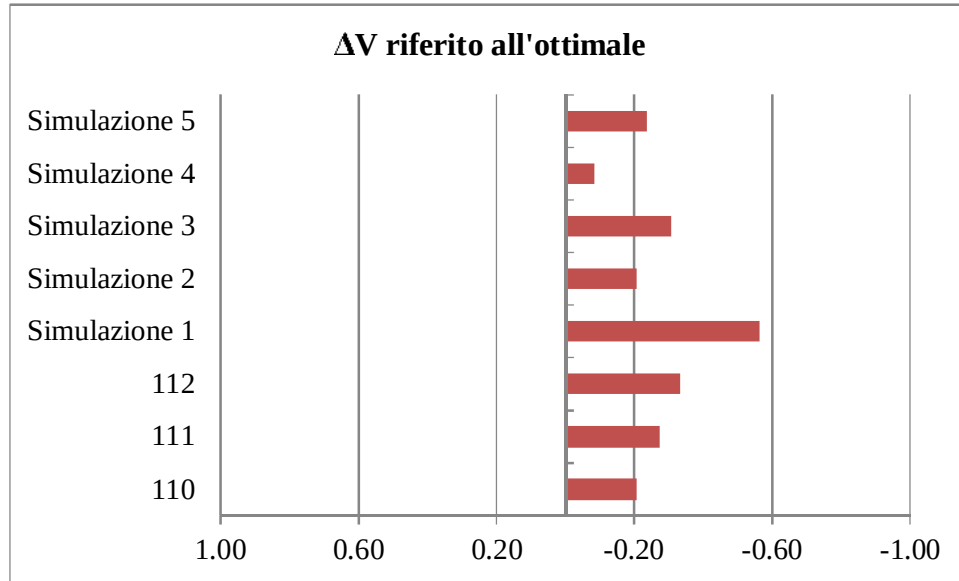


Fig. 11.4 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

Mentre i valori del Vettore qualità che individuano l'intervallo di qualità $[0, 2]$, infatti, sono fissi, il valore del Vettore qualità ottimale cambia non solo da teatro a teatro, ma anche da punto a punto di ricezione. Infatti:

$$\vec{V}_{ott} = \sqrt{\eta(L_{p,ott})^2 + \eta(EDT_{ott})^2 + \eta(ITDG_{ott})^2 + \eta(LF_{ott})^2} \quad (11.1)$$

Bisogna sottolineare come le variabili ridotte ottimali dipendano a loro volta dai valori ottimali delle grandezze fisiche oggettive da esse rappresentati, i quali, in alcuni casi, sono diversi da punto a punto. Infatti:

- $\eta(L_p)_{ott}$ dipende sia dalla distanza del ricettore dalla sorgente, sia dall'ampiezza equivalente delle riflessioni in quel punto (Cap. 6);
- $\eta(ITDG)_{ott}$ varia in funzione del diverso contributo dell'energia della prima riflessione, perché il percorso della prima riflessione, essendo stato calcolato come $d = r + \Delta r$, varia in funzione del fissato percorso r dell'onda diretta;
- $\eta(LF)_{ott}$ dipende dall'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms, la quale è calcolata come il prodotto tra il LF_{ott}

= 0.4 e l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms in quel punto, che quindi varia al variare della posizione considerata.

Il valore del ΔV può anche essere calcolato rispetto al valore del ΔV ottimale medio della sala. Nel caso trattato tale valore è pari a 1.09. La Fig. 11.5 riporta appunto i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale medio del teatro; la Fig. 11.6 riporta un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale media di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

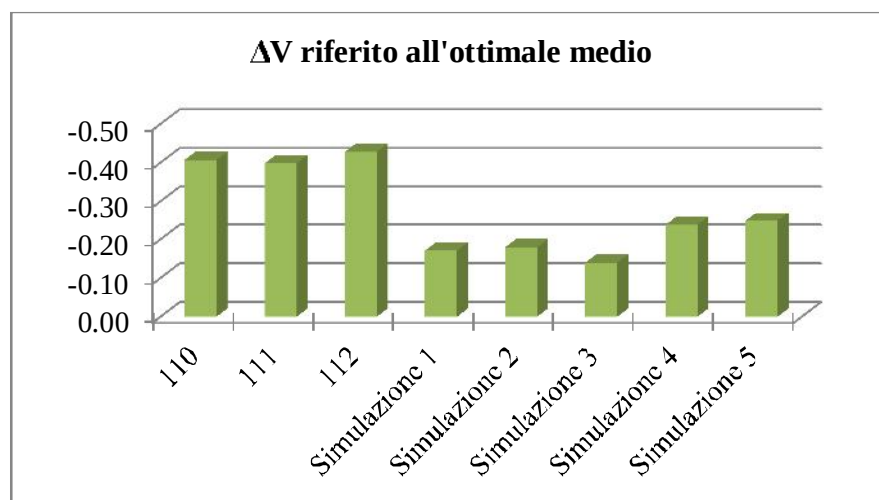


Fig. 11.5 – Istogramma dei valori del ΔV rispetto al valore medio della sala

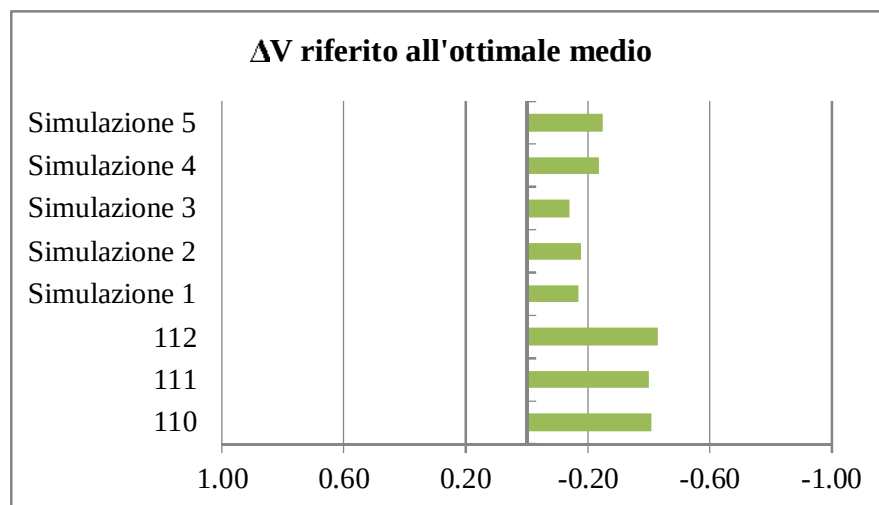


Fig. 11.6 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

11.2. Il Teatro Olimpico di Roma

Anche in questo caso per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 10 punti, di cui 3 in galleria. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.31 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 109 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 73 dB.

In Tab. 11.7 vengono riportati i dati utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	13607
Potenza sonora della sorgente (dB)	109
Livello di pressione a 20 m (dB)	73
Superficie complessiva della sala (m^2))	6771

Tab. 11.7 – Teatro Olimpico, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. 11.8, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica. In Tab. 11.9 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

Punto misura		d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	ITDG (ms)	EDT (s)	LF
B	22	10.2	1.40	78.5	17.64	1.34	0.083
C	12	9.16	1.16	79	18.83	1.29	0.031
F	10	12.51	1.00	77.2	24.19	1.37	0.032
I	22	14.88	2.16	77.2	23.76	1.23	0.165
M	40	17.78	3.47	75.7	11.85	1.35	0.122
V	18	25.75	1.95	74	25.6	1.14	0.274
V	36	25.34	1.22	71.9	2.89	1.42	0.128
Simulazione 1		10.38	1.11	79	17.32	1.25	0.047
Simulazione 2		22.14	1.06	73.4	26.88	1.24	0.100
Simulazione 3		16.58	1.07	75.8	49.75	1.41	0.070
Simulazione 4		26.96	1.50	76.8	34.93	1.26	0.177
Simulazione 5		10.95	1.06	78.3	41.27	1.4	0.158
Simulazione 6		24.46	1.60	72.2	72.26	1.36	0.163

Simulazione 7	14.27	1.45	71.6	43.21	1.27	0.164
Galleria 1	23.07	1.64	73.8	79.19	1.2	0.100
Galleria 2	27.69	1.68	73.9	80.68	1.1	0.268
Galleria 3	19.19	2.00	77.6	61.01	1.06	0.414

Tab. 11.8 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

EDT_{ott} (s)	1.54	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.89	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	2.04	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. 11.9 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive e si sono calcolate le variabili ridotte di ogni parametro, che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni. In Tab. 11.10 vengono riportati i valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati, diagrammati in Fig. 11.7.

Punto misura		Vettore qualità effettivo
B	22	0.85
C	12	0.89
F	10	0.89
I	22	0.86
M	40	0.66
V	18	0.78
V	36	0.62
Simulazione 1		0.84
Simulazione 2		0.82
Simulazione 3		1.07
Simulazione 4		0.89
Simulazione 5		1.06
Simulazione 6		1.17
Simulazione 7		1.04
Galleria 1		1.20
Galleria 2		1.22
Galleria 3		1.12

Tab. 11.10 – Valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

Ricordando che il campo che delimita la qualità acustica, secondo la presente teoria, è compreso tra 0 e 2, dai dati si evince che in tutti i punti di misura la qualità della percezione soggettiva è accettabile, come esplicitato in Fig. 11.8. Il valore medio dell'indice è infatti di 0.94.

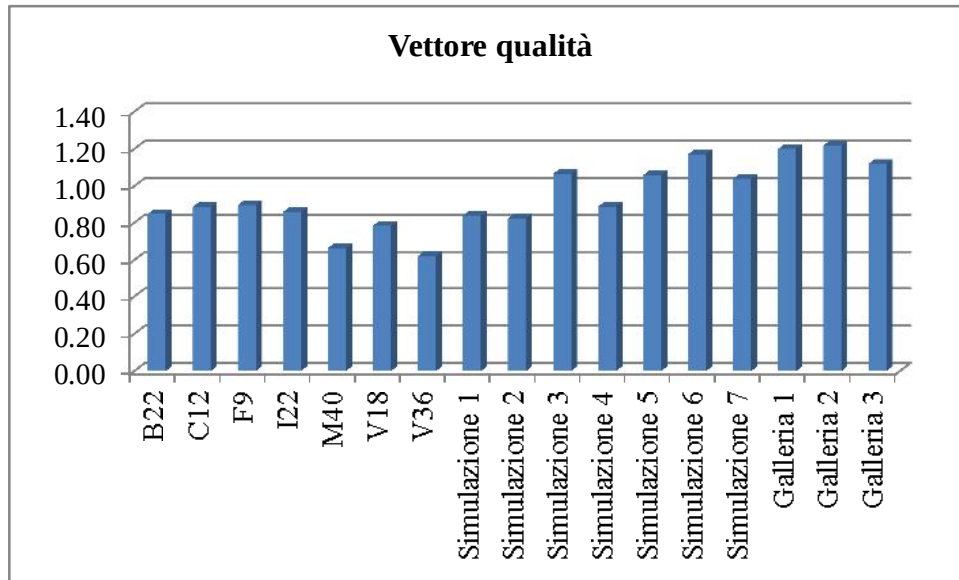


Fig. 11.7 – Istogramma dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

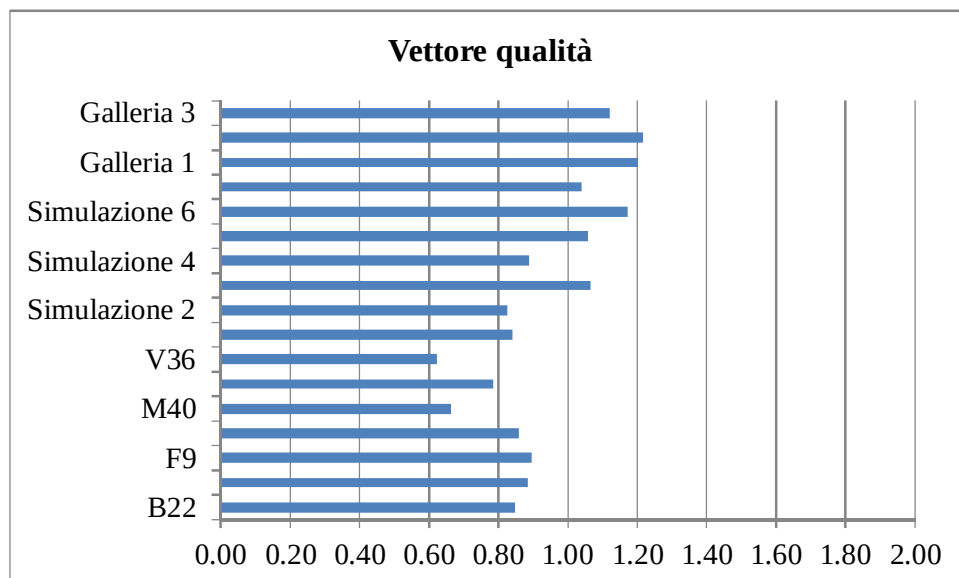


Fig. 11.8 – Grafico a barre dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

La Tab. 11.11, diagrammata in Fig. 11.9, riporta i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale: questo dato dà indicazioni anche sulla “distanza” che intercorre tra la realtà e la situazione teorica ottimale, alla quale corrisponde un Vettore qualità ottimale medio di 0.9.

Punto misura	ΔV
B22	-0.15
C12	-0.13
F9	-0.07
I22	-0.07
M40	-0.23
V18	-0.04
V36	-0.21
Simulazione 1	-0.15
Simulazione 2	-0.03
Simulazione 3	0.16
Simulazione 4	0.07
Simulazione 5	0.07
Simulazione 6	0.33
Simulazione 7	0.10
Galleria 1	0.35
Galleria 2	0.40
Galleria 3	0.24

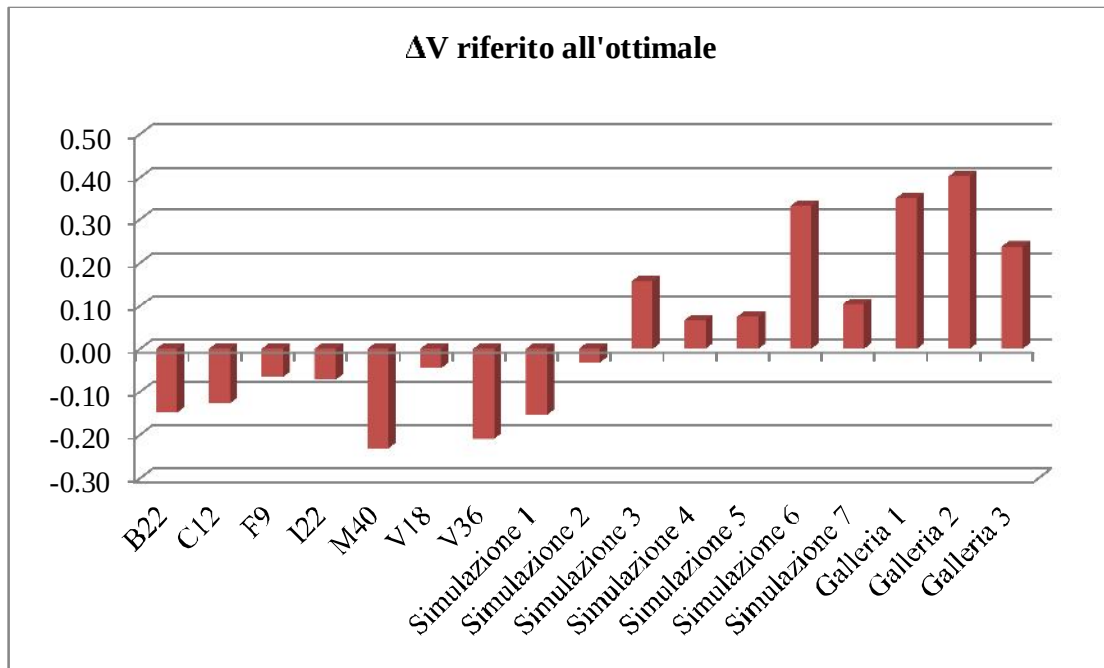
Tab. 11.11 – Valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Considerando che il valore ottimale del delta è ovviamente zero, si vede come in tutti i punti di ricezione considerati la distanza da tale valore sia molto contenuta: in conclusione la teoria applicata ci indica come la qualità complessiva della sala sia da considerare ottima.

In Fig. 11.10 viene riportato un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale di ogni punto di ricezione, in riferimento all’intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Il suo campo di variabilità del ΔV , nel caso del Teatro Olimpico, è [-0.9 ; 1.1]. Tale campo si ottiene sottraendo dall’intervallo del Vettore qualità [0 ; 2], il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 11.12

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	0.9	2	-0.9	0	1.1

Tab. 11.12 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro OlimpicoFig. 11.9 – Istogramma dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Il valore del ΔV può anche essere calcolato rispetto al valore del ΔV ottimale medio della sala. Nel caso trattato tale valore è pari a 0.9. La Fig. 11.11 riporta appunto i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale medio del teatro; la Fig. 11.12 riporta un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale media di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

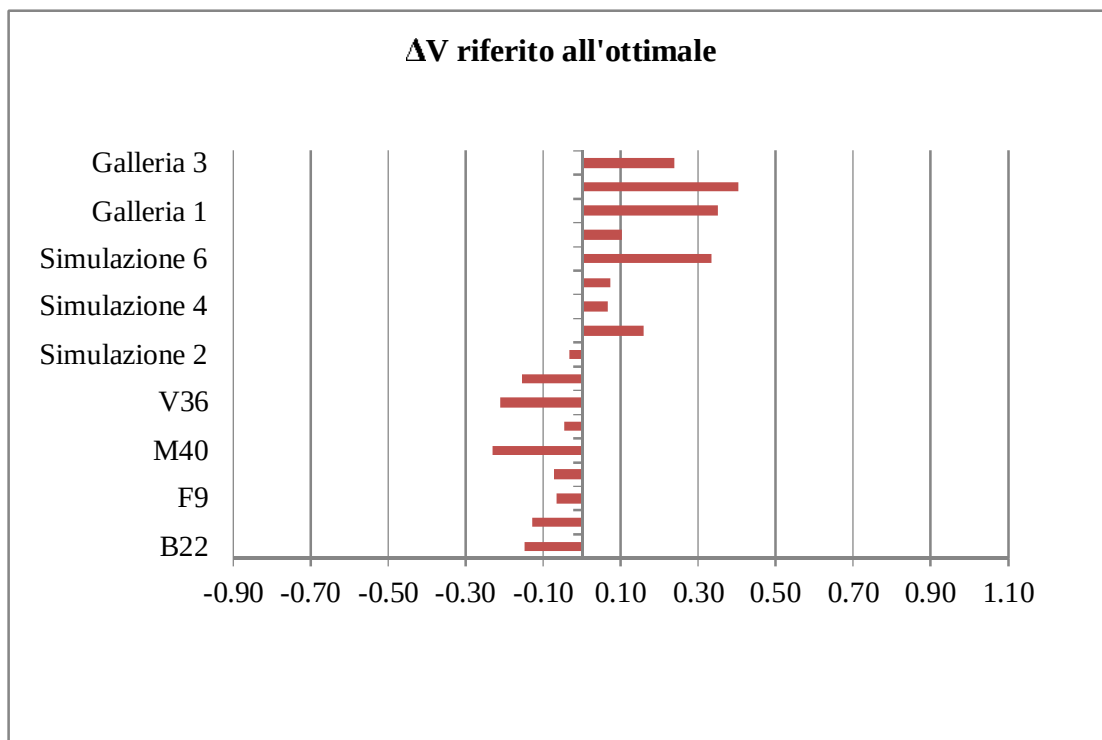


Fig. 11.10 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

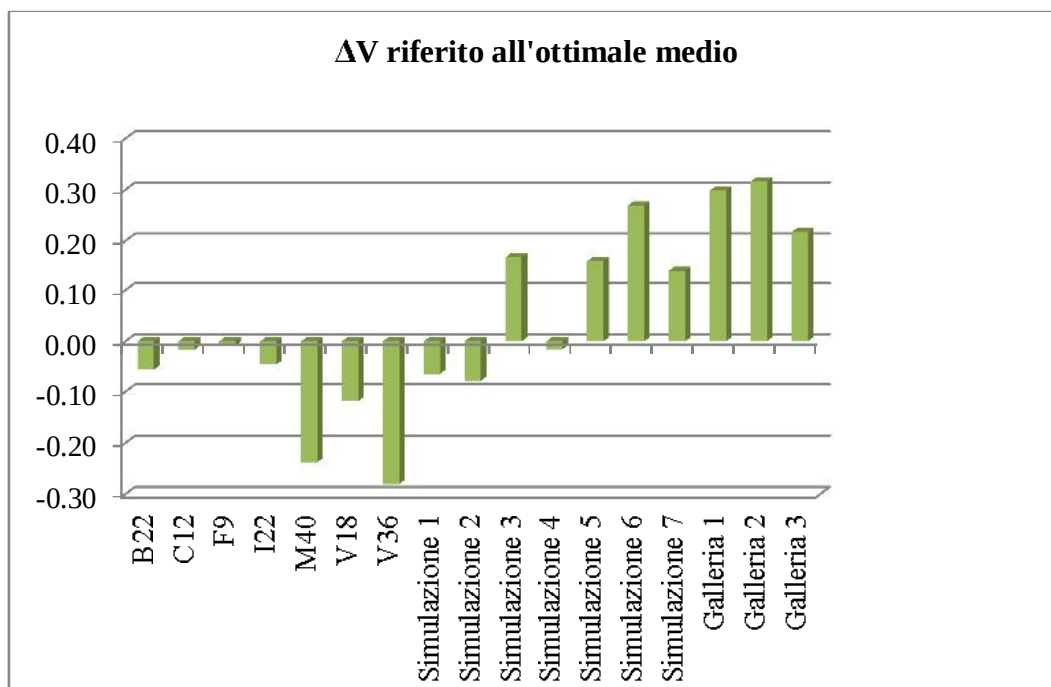


Fig. 11.11 – Istogramma dei valori del ΔV rispetto al valore medio della sala

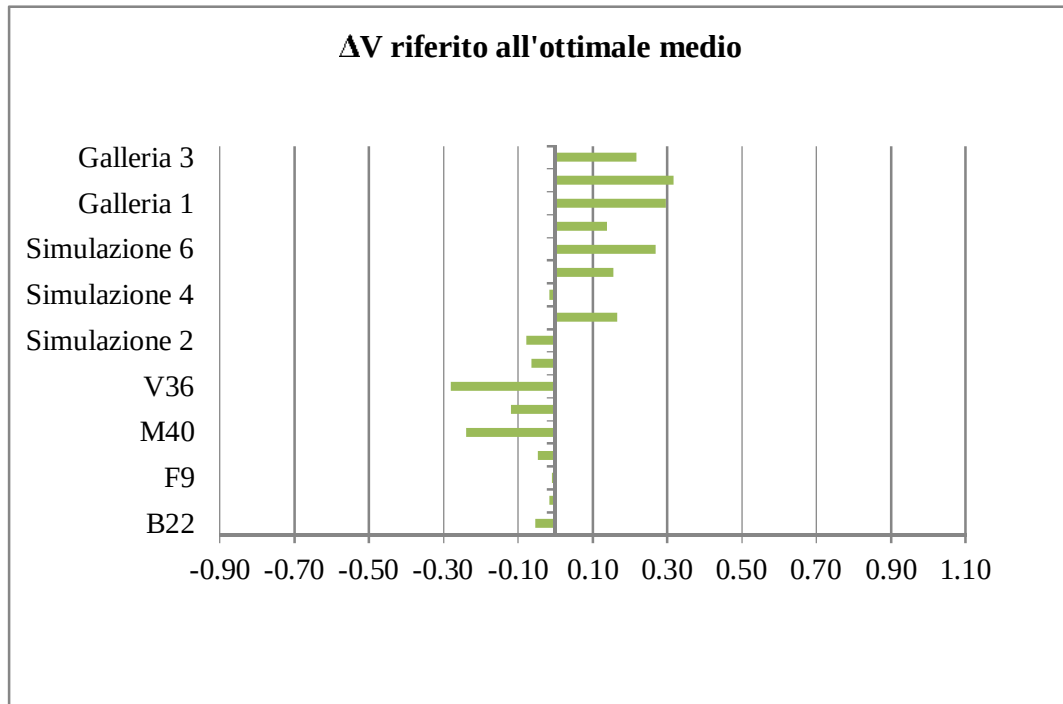


Fig. 11.12 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

11.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 6 punti. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.53 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

In Tab. 11.13 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	15288
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Superficie complessiva della sala (m ²)	4346

Tab. 11.13 – Aula Magna del Rettorato, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. 11.14 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	LF
1	10	3.02	83.3	12.56	2.28	0.396
2	14.87	3.35	82.2	4.67	2.24	0.318
3	13.16	1.70	82.4	32.04	2.18	0.408
4	17.47	3.67	81.4	8.22	2.15	0.456
5	19.45	3.43	81.2	24.23	2.14	0.470
6	21.42	3.94	81.5	2.81	2.17	0.431
7	26.46	3.80	79.2	5.25	2.17	0.543
Simulato 1	10.44	1.05	82.7	35.92	2.29	0.365
Simulato 2	24.57	3.27	79.4	23.95	2.33	0.523
Simulato 3	20.63	4.07	81.4	4.73	2.17	0.412
Galleria 1	24.64	4.47	81.2	13.6	2.07	0.525
Galleria 2	30.11	3.39	80.4	2.48	2.07	0.566
Corridoio 1	17.58	3.80	80.5	3.58	2.06	0.267

Tab. 11.14 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. 11.15 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.49	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	1.60	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	50	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. 11.15 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive e si sono calcolate le variabili ridotte di ogni parametro, che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni. In Tab. 11.16 vengono riportati i valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati, diagrammati in Fig. 11.13.

Punto misura	Vettore qualità effettivo
1	2.70
2	3.36
3	1.82
4	2.91
5	2.08
6	3.10
7	2.70
Simulato 1	1.67
Simulato 2	2.04
Simulato 3	3.01
Galleria 1	2.39
Galleria 2	2.69
Corridoio 1	3.29

Tab. 11.16 – Valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

Ricordando che il campo che delimita la qualità acustica, secondo la presente teoria, è compreso tra 0 e 2, dai dati si evince che in quasi tutti i punti di misura la qualità della percezione soggettiva non è accettabile, come esplicitato in Fig. 11.14. Il valore medio dell'indice è infatti di 2.6.

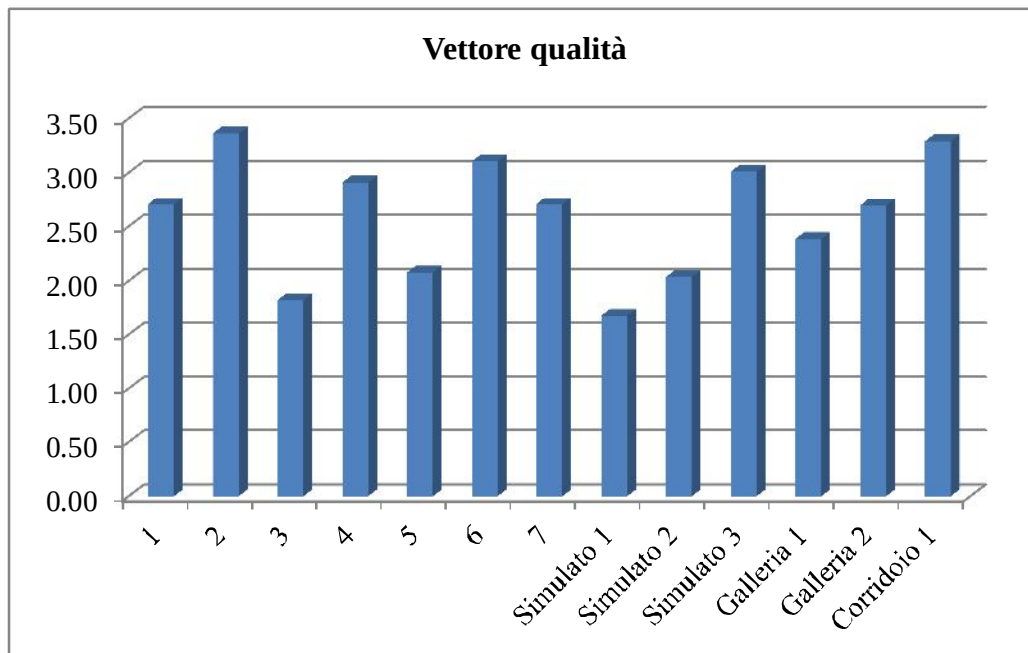


Fig. 11.13 – Istogramma dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

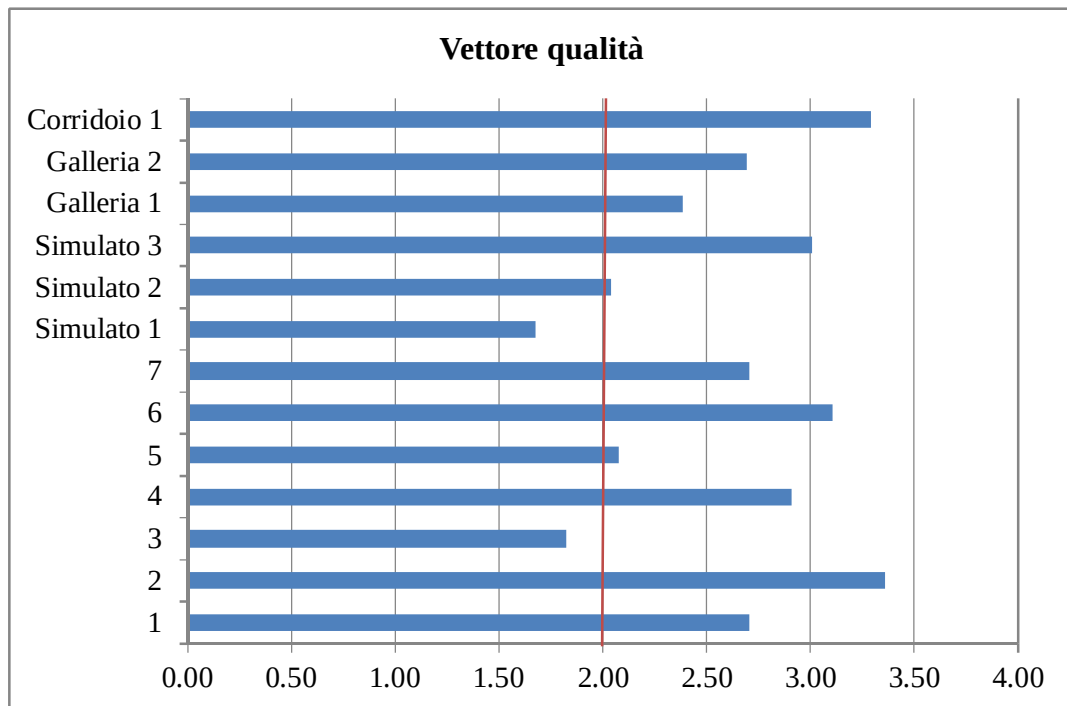


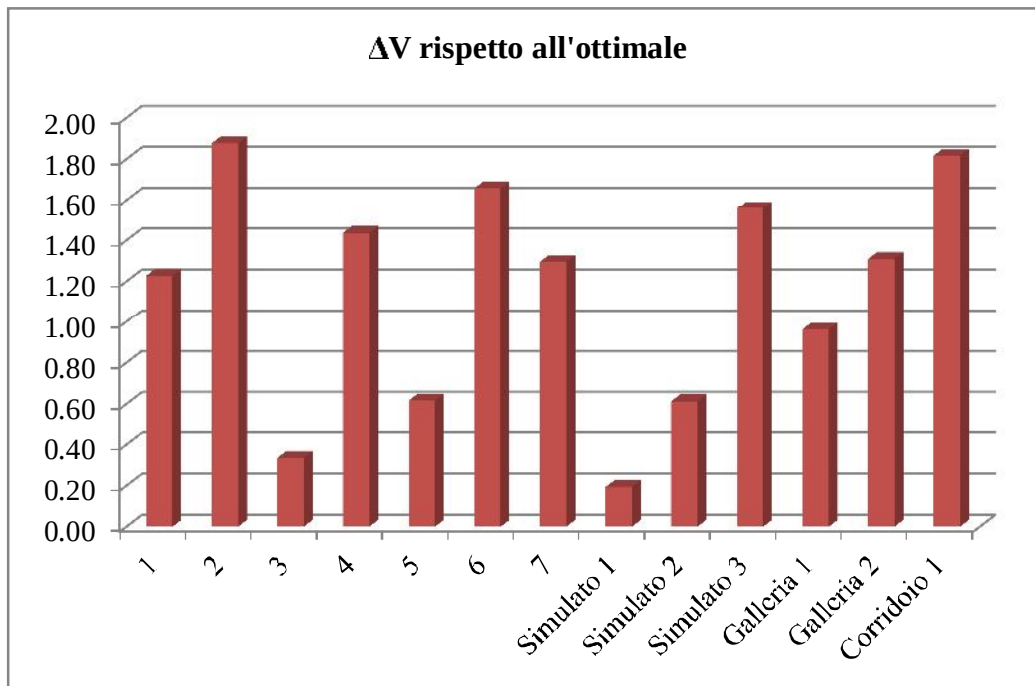
Fig. 11.14 – Grafico a barre dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati rispetto all’intervallo di qualità acustica

Si nota come in molti dei punti di ricezione considerati, il valore del Vettore qualità superi il limite superiore del campo di qualità acustica, sottolineando l’inaccettabilità dell’ascolto per gli ascoltatori che occupano quelle posizioni.

La Tab. 11.15, graficata in Fig. 11.17, riporta i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale: questo dato dà indicazioni anche sulla “distanza” che intercorre tra la realtà e la situazione teorica ottimale, alla quale corrisponde un Vettore qualità ottimale medio di 1.45.

Punto misura	ΔV
1	1.23
2	1.88
3	0.34
4	1.44
5	0.62
6	1.66
7	1.30
Simulato 1	0.19
Simulato 2	0.61

Simulato 3	1.56
Galleria 1	0.96
Galleria 2	1.31
Corridoio 1	1.82

Tab. 11.17 – Valori del ΔV nei punti di ricezione consideratiFig. 11.15 – Istogramma dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

In questo caso particolare, in realtà, non sarebbe strettamente necessario analizzare i valori del ΔV : lo stesso Vettore qualità medio, infatti, evidenzia come la sala abbia un indice eccedente i limiti di accettabilità.

In Fig. 11.16 viene riportato un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Il suo campo di variabilità del ΔV , nel caso dell'Aula Magna, è $[-1.45 ; 0.6]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 11.18.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	1.45	2	-1.45	0	0.6

Tab. 11.18 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro Olimpico di Roma

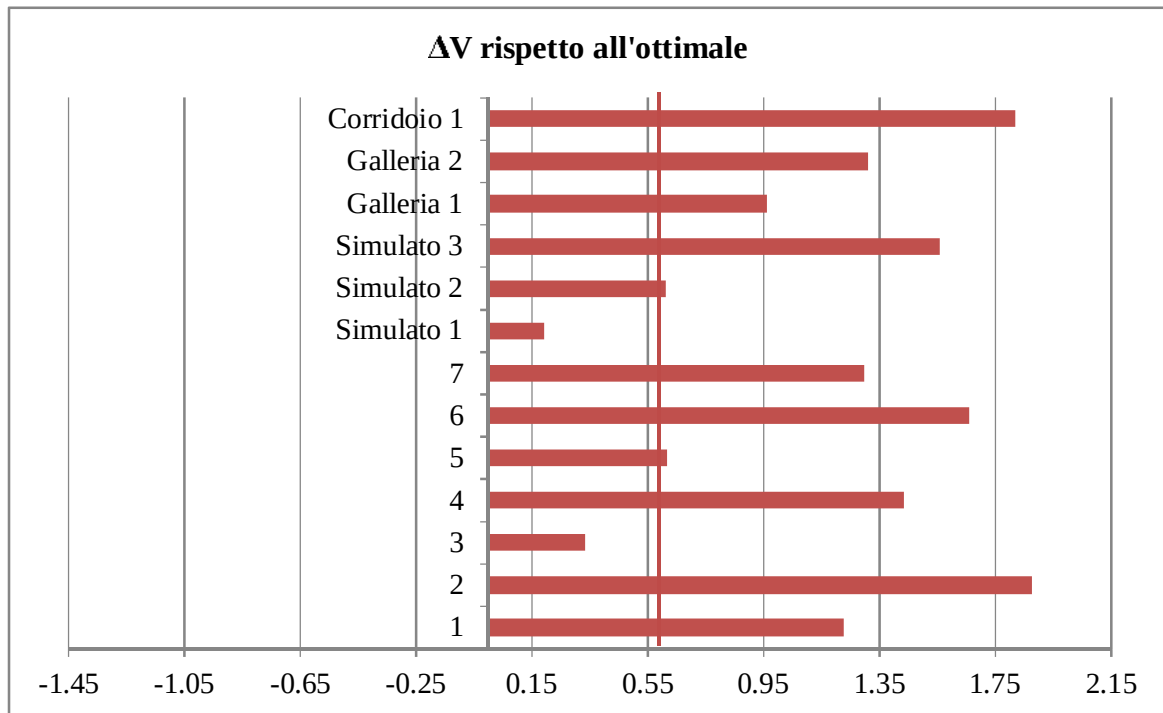
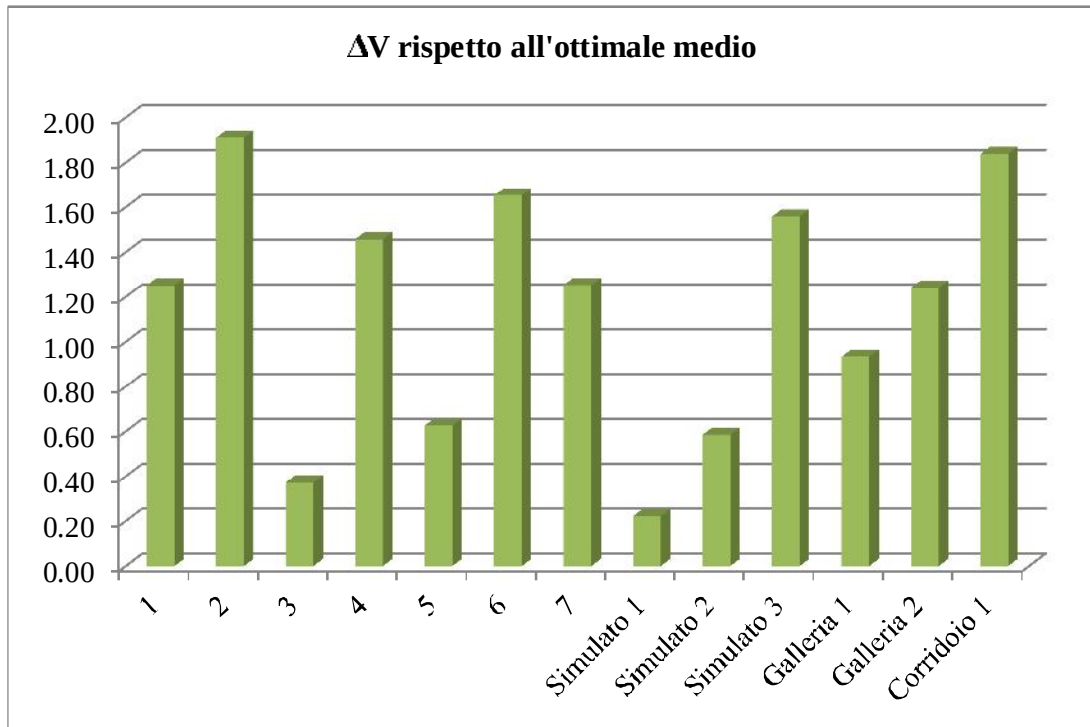
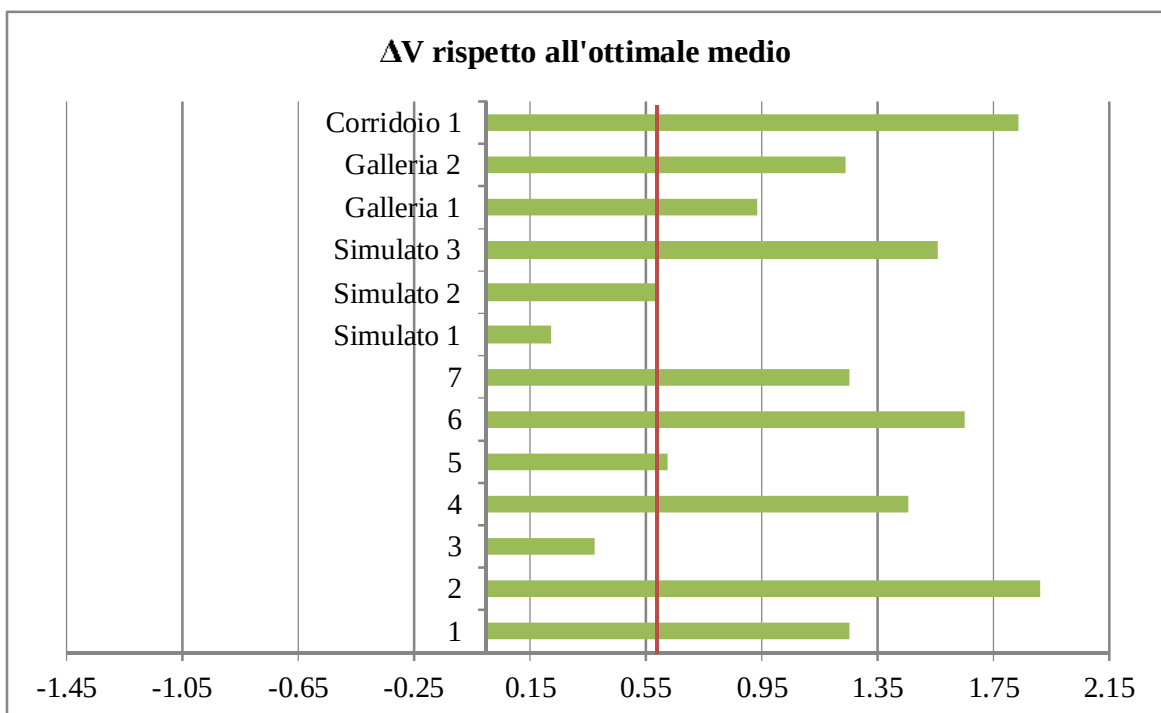


Fig. 11.16 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

Considerando che il valore ottimale del delta è ovviamente zero, si vede come in tutti i punti di ricezione considerati, a parte qualche eccezione, la distanza da tale valore sia molto elevata e in molti casi superiori al limite superiore accettabile: in conclusione la teoria applicata ci indica come la qualità complessiva della sala sia da considerare non accettabile.

Il valore del ΔV può anche essere calcolato rispetto al valore del ΔV ottimale medio della sala. Nel caso trattato tale valore è pari a 1.45. La Fig. 11.17 riporta appunto i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale medio del teatro; la Fig. 11.18 riporta un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale media di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Fig. 11.17 – Istogramma dei valori del ΔV rispetto al valore medio della salaFig. 11.18 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

11.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

11.4.1. Applicazione della teoria per la configurazione sala da concerto

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni negli 11 punti di misura considerati. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.71 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

In Tab. 11.19 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	5605
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Superficie complessiva della sala (m^2)	2181.6

Tab. 11.19 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. 11.20 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	ITDG (ms)	EDT (s)	LF
R1	2.98	2.72	93.9	16.74	0.65	0.209
R2	4.78	1.23	88.6	5.87	0.87	0.428
R3	6.35	1.00	87.1	6.35	0.86	0.310
R4	10.45	2.72	85.2	6.38	0.82	0.267
R5	8.61	2.43	86.5	5.84	0.83	0.425
R6	17.51	2.75	81.4	6.45	0.73	0.171
R7	17.6	3.13	81.3	6.42	0.77	0.322
R8	16.49	2.57	81.8	6.44	0.75	0.342
G1	18.77	4.73	83.1	5.18	0.62	0.325
G2	15.92	3.80	83.1	5.91	0.75	0.290
G3	16.01	3.43	83.2	5.88	0.69	0.321

Tab. 11.20 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. 11.21 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.7	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	1.03	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	2.20	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. 11.21 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive e si sono calcolate le variabili ridotte di ogni parametro, che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni. In Tab. 11.22 vengono riportati i valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati, diagrammati in Fig. 11.19.

Punto di misura	Vettore qualità effettivo
R1	1.61
R2	1.46
R3	1.45
R4	1.41
R5	1.42
R6	1.40
R7	1.40
R8	1.40
G1	1.39
G2	1.39
G3	1.39

Tab. 11.22 – Valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

Ricordando che il campo che delimita la qualità acustica, secondo la presente teoria, è compreso tra 0 e 2, dai dati si evince che in tutti i punti di misura la qualità della percezione soggettiva è accettabile, come esplicitato in Fig. 11.20. Il valore medio dell'indice è infatti di 1.43.

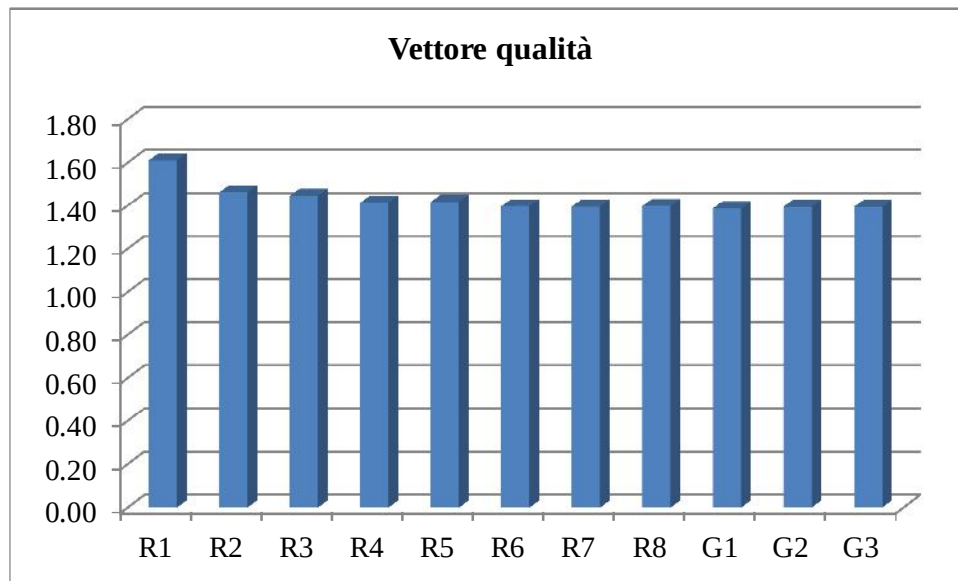


Fig. 11.19 – Istogramma dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

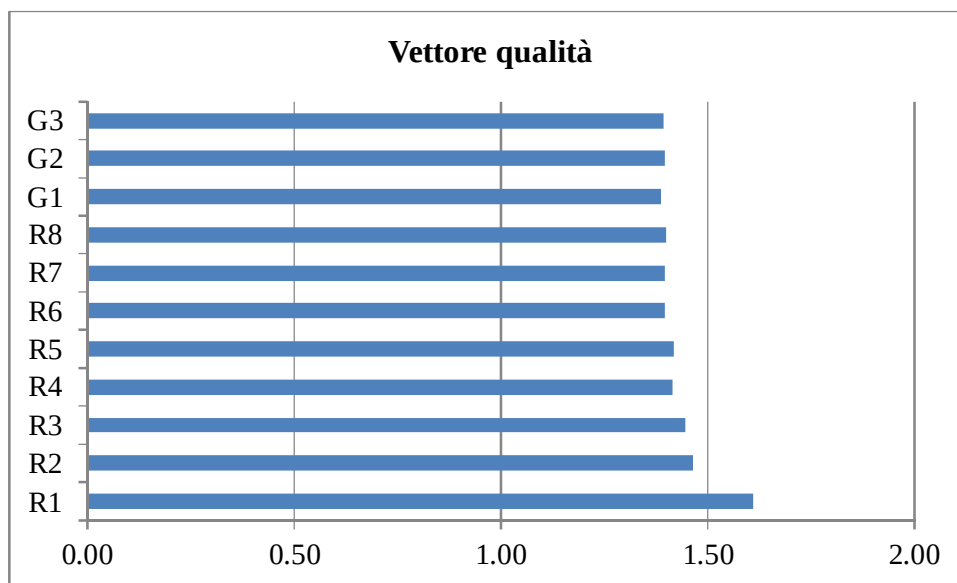
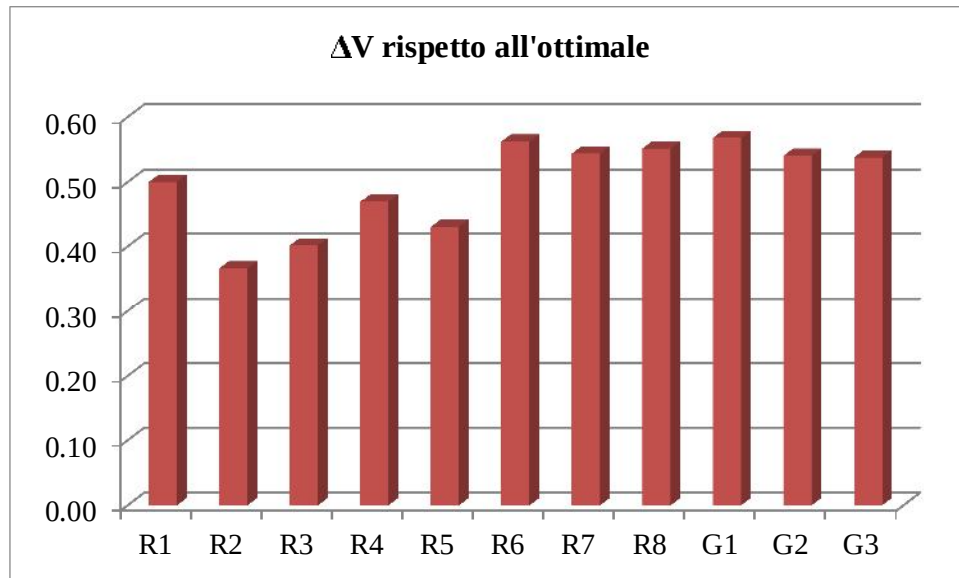


Fig. 11.20 – Grafico a barre dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

La Tab. 11.23, diagrammata in Fig. 11.21, riporta i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale: questo dato dà indicazioni anche sulla “distanza” che intercorre tra la realtà e la situazione teorica ottimale, alla quale corrisponde un Vettore qualità ottimale medio di 0.93.

Punto di misura	ΔV
R1	0.50
R2	0.37
R3	0.40
R4	0.47
R5	0.43
R6	0.56
R7	0.54
R8	0.55
G1	0.57
G2	0.54
G3	0.54

Tab. 11.23 – Valori del ΔV nei punti di ricezione consideratiFig. 11.21 – Istogramma dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

In Fig. 11.22 viene riportato un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Il suo campo di variabilità del ΔV , in questo caso è $[-0.93 ; 1.07]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 11.24.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	0.93	2	-0.93	0	1.07

Tab. 11.24 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Nuovo Teatro di Ateneo in configurazione sala da concerto

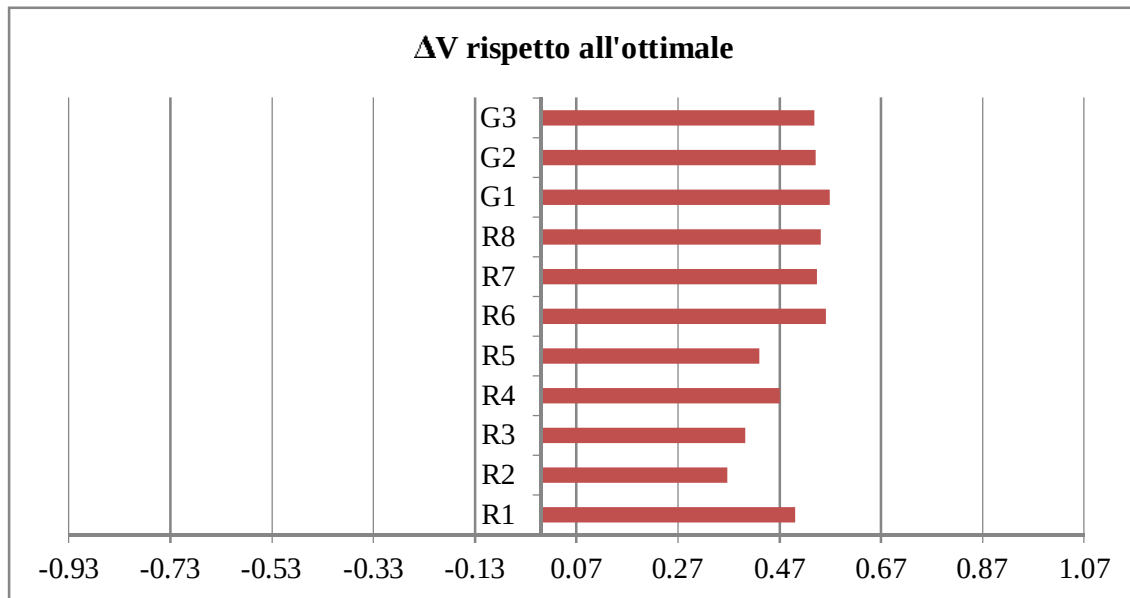
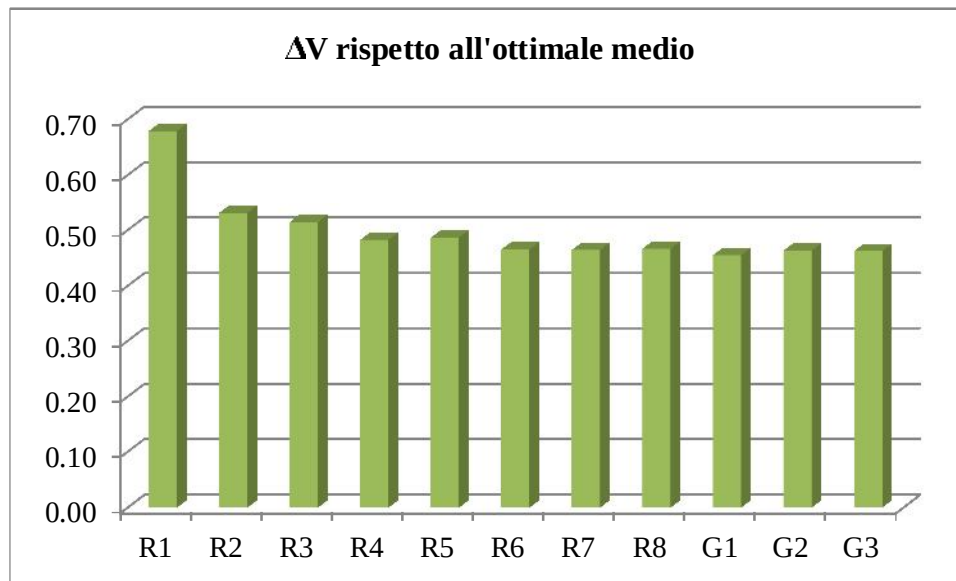
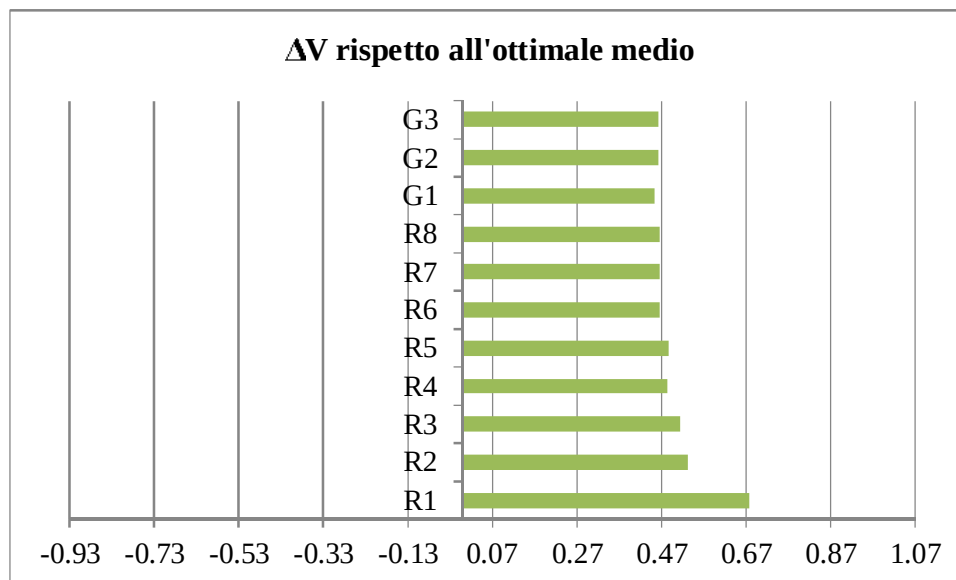


Fig. 11.22 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

Considerando che il valore ottimale del delta è ovviamente zero, si vede come in tutti i punti di ricezione considerati la distanza da tale valore sia considerevole: in conclusione la teoria applicata ci indica come la qualità complessiva della sala sia da considerare accettabile.

Il valore del ΔV può anche essere calcolato rispetto al valore del ΔV ottimale medio della sala. Nel caso trattato tale valore è pari a 0.93. La Fig. 11.23 riporta appunto i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale medio del teatro; la Fig. 11.24 riporta un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale media di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Fig. 11.23 – Istogramma dei valori del ΔV rispetto al valore medio della salaFig. 11.24 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

11.4.2. Applicazione della teoria per la configurazione teatro

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni nei 7 punti di ricezione considerati, di cui 8 in platea e 3 in galleria. I ricettori sono gli stessi della configurazione per sala da concerto, decurtati delle 4 sedute

che devono essere smontate per consentire l'allungamento del palco. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.78 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 99 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 62 dB.

In Tab. 11.25 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	5605
Potenza sonora della sorgente (dB)	99
Livello di pressione a 20 m (dB)	62
Superficie complessiva della sala (m^2)	2139.5

Tab. 11.25 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. 11.26, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	LF
R4	7.07	1.50	71.1	12.51	0.97	0.298
R5	5.39	1.40	72.3	8.25	1.09	0.280
R6	14.11	1.83	64.6	18.19	1.21	0.159
R7	14.22	1.06	65.2	9.78	1.05	0.178
R8	13.1	1.10	65.5	8.93	1.13	0.174
G1	14.99	1.45	67.6	4.71	1.39	0.172
G2	12.08	1.51	68.5	6.83	1.18	0.153
G3	12.2	1.53	68.2	6.77	1.15	0.166

Tab. 11.26 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. 11.27 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.3	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.67	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	1.80	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	50	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. 11.27 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive e si sono calcolate le variabili ridotte di ogni parametro, che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni. In Tab. 11.28 vengono riportati i valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati, diagrammati in Fig. 11.25.

Punto di misura	Vettore qualità effettivo
R4	1.02
R5	0.91
R6	0.88
R7	0.85
R8	0.78
G1	0.52
G2	0.71
G3	0.73

Tab. 11.28 – Valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

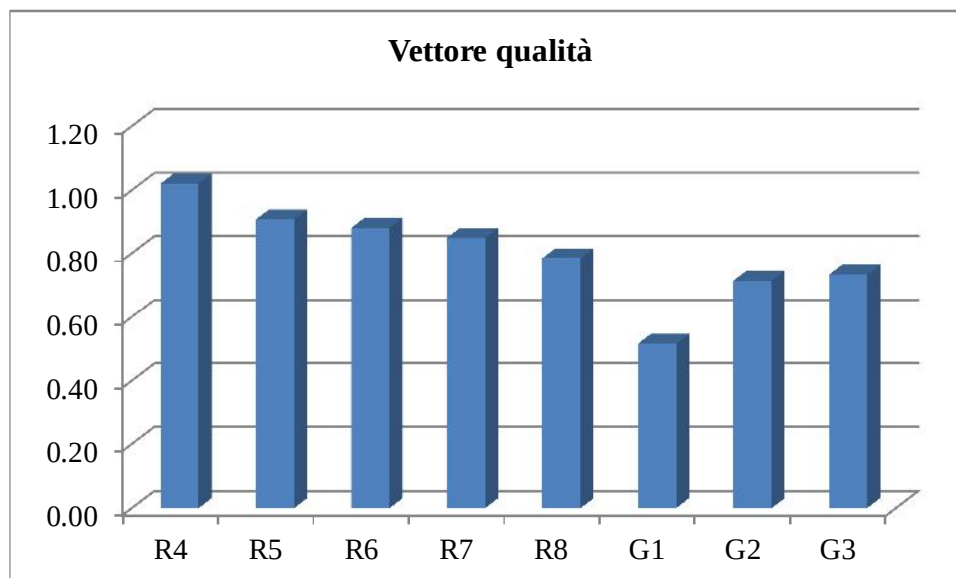


Fig. 11.25 – Istogramma dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

Ricordando che il campo che delimita la qualità acustica, secondo la presente teoria, è compreso tra 0 e 2, dai dati si evince che in tutti i punti di misura la qualità della percezione soggettiva è accettabile, come esplicitato in Fig. 11.26. Il valore medio dell'indice è infatti di 0.8.

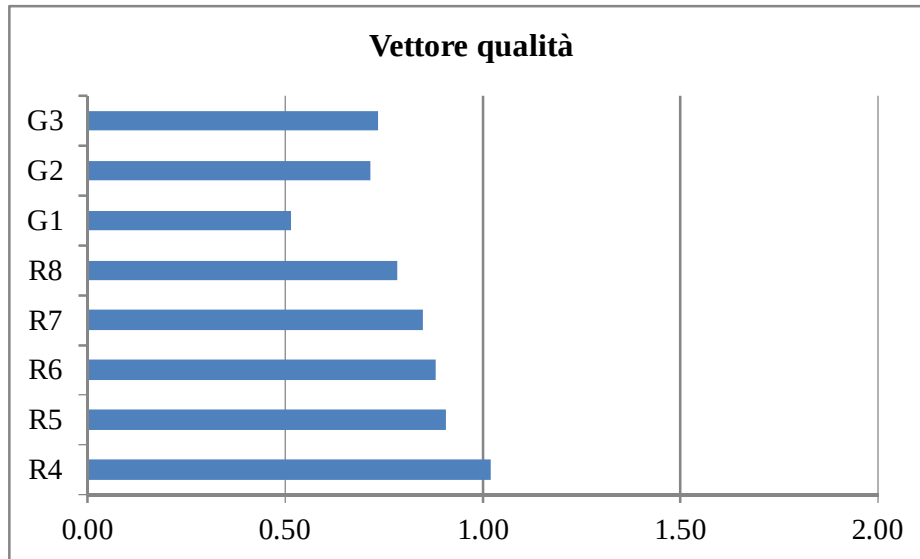
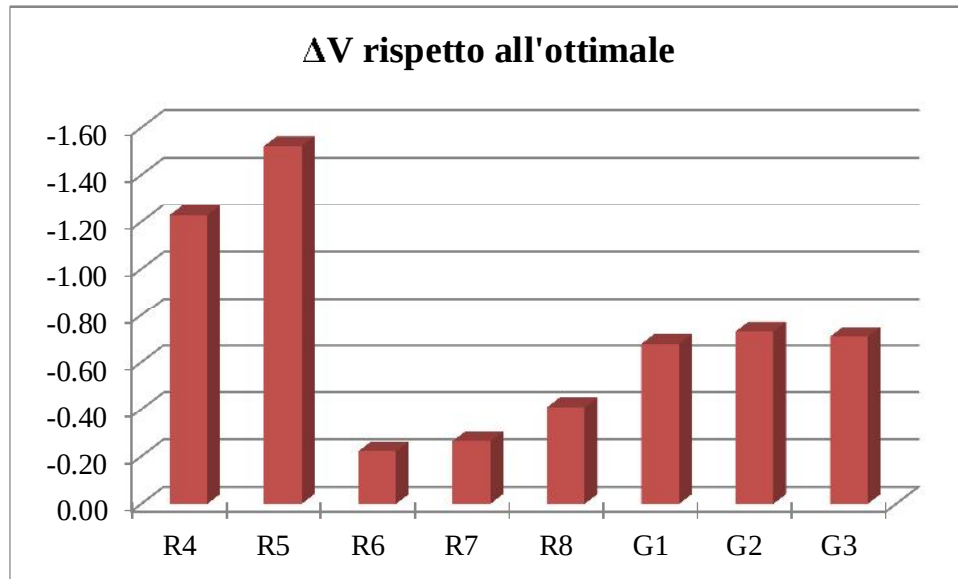


Fig. 11.26 – Grafico a barre dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

La Tab. 11.29, graficata in Fig. 11.27, riporta i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale: questo dato dà indicazioni anche sulla “distanza” che intercorre tra la realtà e la situazione teorica ottimale, alla quale corrisponde un Vettore qualità ottimale medio di 1.52.

Punto di misura	ΔV
R4	-1.23
R5	-1.52
R6	-0.22
R7	-0.26
R8	-0.41
G1	-0.68
G2	-0.73
G3	-0.71

Tab. 11.29 – Valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Fig. 11.27 – Istogramma dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

In Fig. 11.28 viene riportato un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Il suo campo di variabilità del ΔV , in questo caso è $[-1.56 ; 0.44]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 11.30.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	1.56	2	-1.56	0	0.44

Tab. 11.30 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Nuovo Teatro di Ateneo in configurazione teatro

Considerando che il valore ottimale del delta è ovviamente zero, si vede come in tutti i punti di ricezione considerati la distanza da tale valore sia abbastanza contenuta, ad eccezione dei punti di ricezione più vicini alla sorgente (R4, R5) a causa dei tempi di riverberazione eccessivamente bassi (dovuti alla presenza di pareti rivestite da pannelli fonoassorbenti) e dei livelli sonori non congruenti con i valori ottimali.

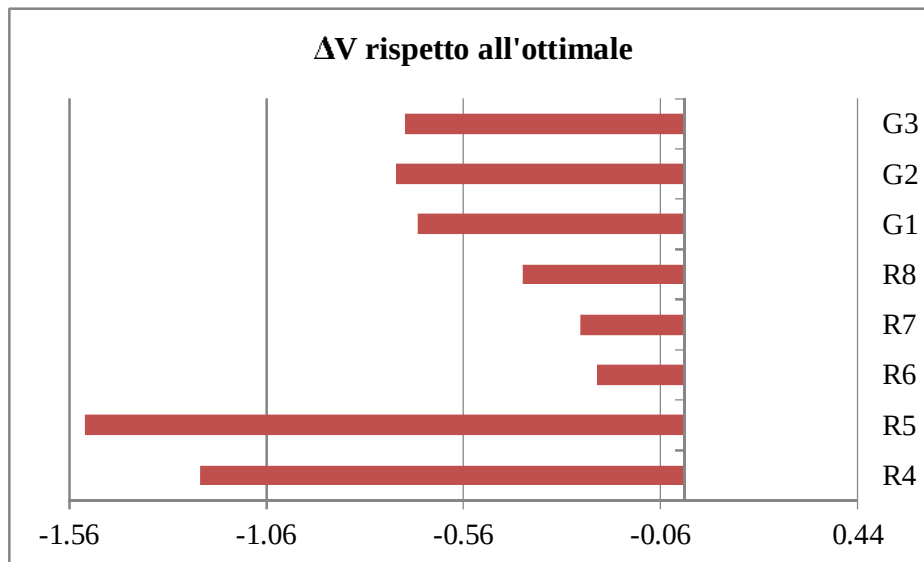


Fig. 11.28 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

Il valore del ΔV può anche essere calcolato rispetto al valore del ΔV ottimale medio della sala. Nel caso trattato tale valore è pari a 1.56. La Fig. 11.29 riporta appunto i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale medio del teatro; la Fig. 11.30 riporta un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale media di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

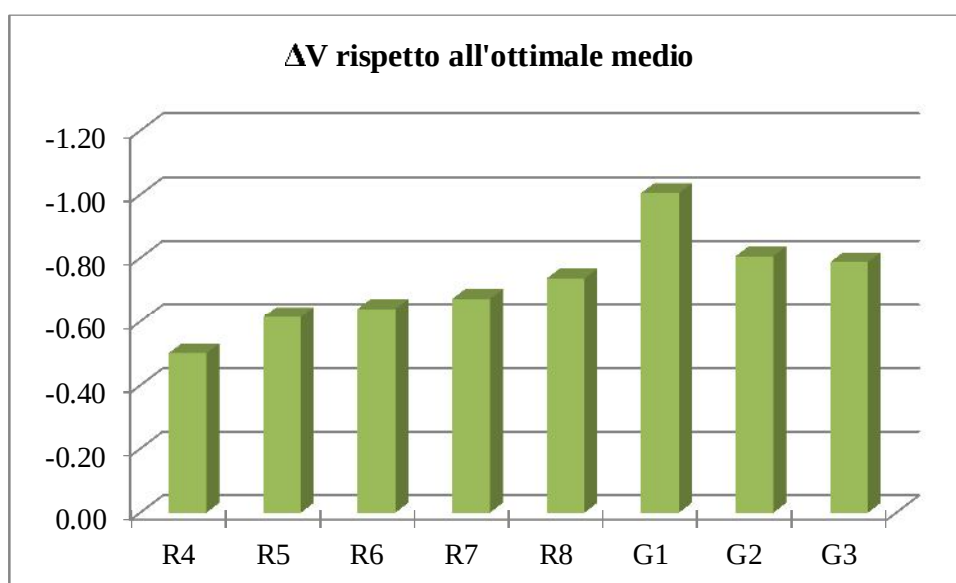


Fig. 11.29 – Istogramma dei valori del ΔV rispetto al valore medio della sala

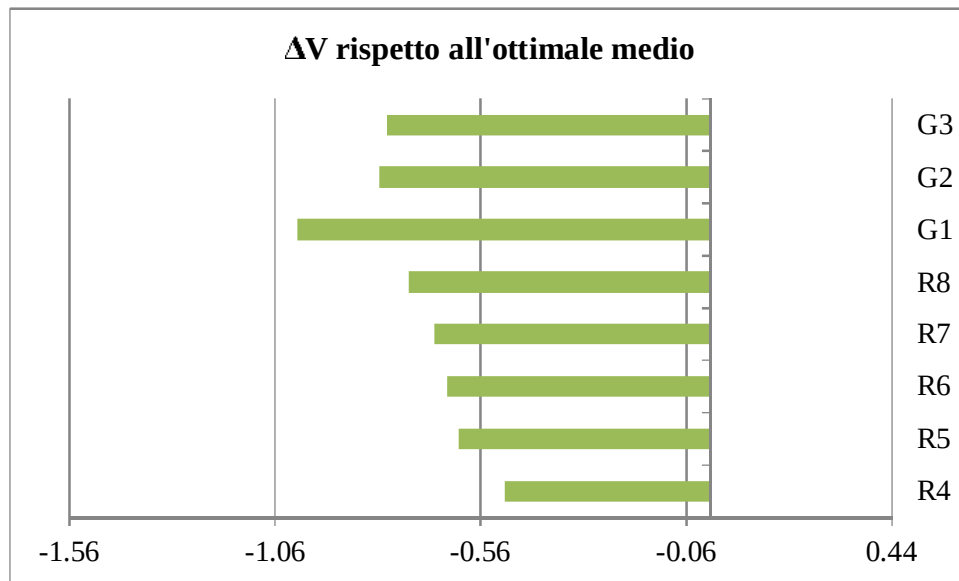


Fig. 11.30 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

11.5. Teatro dell'Opera di Roma

Anche in questo caso per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea e sui palchi del primo ordine nei 12 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 2 punti, posizionati sui palchi di ordine superiore al primo. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.92 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 100 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 63 dB.

In Tab. 11.31 vengono riportati i dati utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	25200
Potenza sonora della sorgente (dB)	100
Livello di pressione a 20 m (dB)	63
Superficie complessiva della sala (m^2)	17819.5

Tab. 11.31 – Teatro dell'Opera, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. 11.32, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	LF
1	10.19	3.35	79.6	27.03	1.39	0.112
2	13.92	3.27	76.9	66.16	2.00	0.054
3	17.68	2.11	76.9	2.00	1.78	0.149
4	17.53	1.70	76.9	8.88	1.55	0.284
5	23.3	3.98	76.5	3.33	1.86	0.198
6	19.46	3.20	75.8	28.42	1.75	0.239
7	21.23	3.02	75.8	25.27	1.49	0.354
8	25.6	3.67	76.2	18.52	1.27	0.429
9	10.19	2.75	79.9	26.83	1.24	0.231
10	13.92	2.60	77.2	65.71	1.83	0.064
11	19.15	2.51	68.7	38.90	1.65	0.221
12	19.3	3.55	75.2	38.20	1.53	0.182
13	25.22	2.43	66.6	29.69	2.29	0.285
14	28.65	2.57	70.7	22.14	1.45	0.118

Tab. 11.32 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. 11.33 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.8	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	1.12	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	2.30	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. 11.33 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive e si sono calcolate le variabili ridotte di ogni parametro, che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni. In Tab. 11.34 vengono riportati i valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati, diagrammati in Fig. 11.31.

Punto misura	Vettore qualità effettivo
1	1.07
2	1.21
3	0.77
4	0.81
5	0.77
6	0.98
7	0.94
8	0.86
9	1.07
10	1.21
11	1.06
12	1.06
13	0.95
14	0.88

Tab. 11.34 – Valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

Ricordando che il campo che delimita la qualità acustica, secondo la presente teoria, è compreso tra 0 e 2, dai dati si evince che in tutti i punti di misura la qualità della percezione soggettiva è accettabile, come esplicitato in Fig. 11.32. Il valore medio dell'indice è infatti di 0.97.

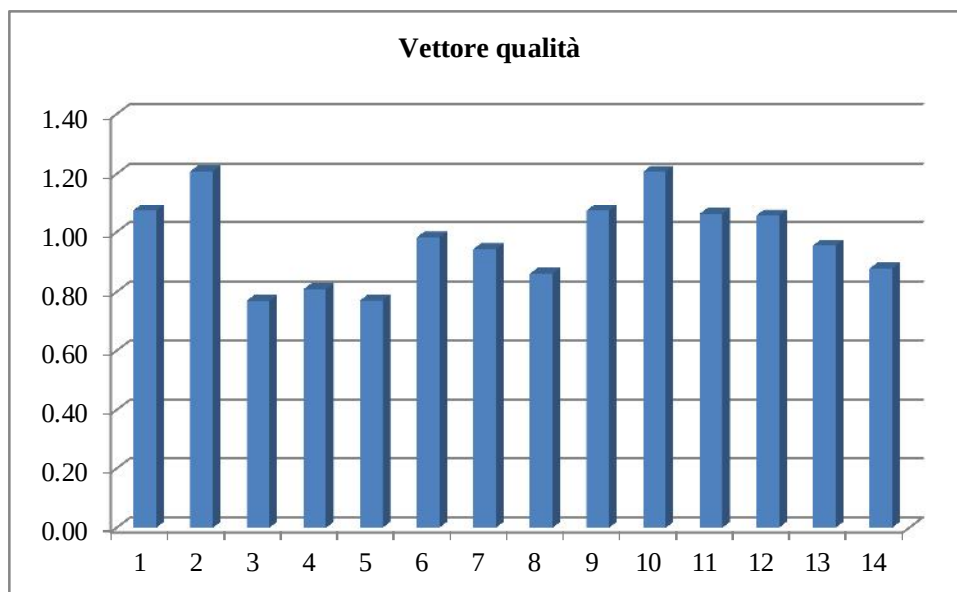


Fig. 11.31 – Istogramma dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati

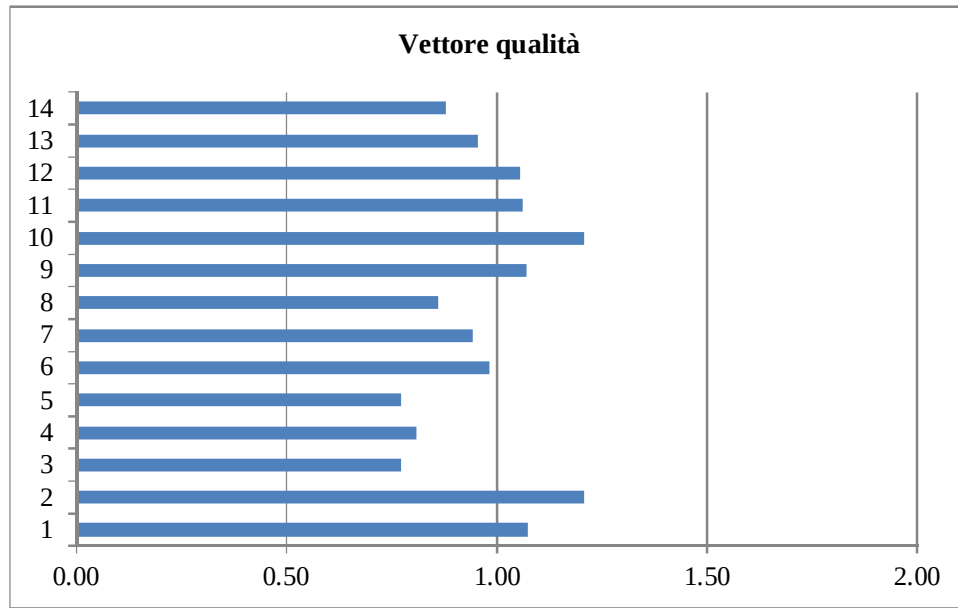


Fig. 11.32 – Grafico a barre dei valori del Vettore qualità nei punti di ricezione considerati rispetto all’intervallo di qualità acustica

La Tab. 11.35, graficata in Fig. 11.33, riporta i valori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale: questo dato dà indicazioni anche sulla “distanza” che intercorre tra la realtà e la situazione teorica ottimale, alla quale corrisponde un Vettore qualità ottimale medio di 0.87.

Punto misura	ΔV
1	0.10
2	0.29
3	-0.10
4	-0.06
5	-0.05
6	0.13
7	0.11
8	0.05
9	0.10
10	0.29
11	0.20
12	0.20
13	0.15
14	0.09

Tab. 11.35 – Valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Considerando che il valore ottimale del delta è ovviamente zero, si vede come in tutti i punti di ricezione considerati la distanza da tale valore sia molto contenuta: in conclusione la teoria applicata ci indica come la qualità complessiva della sala sia da considerare ottima.

In Fig. 11.34 viene riportato un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

Il suo campo di variabilità del ΔV , nel caso del Teatro dell'Opera, è $[-0.87 ; 1.13]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 11.36.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	0.87	2	-0.87	0	1.13

Tab. 11.36 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro dell'Opera di Roma

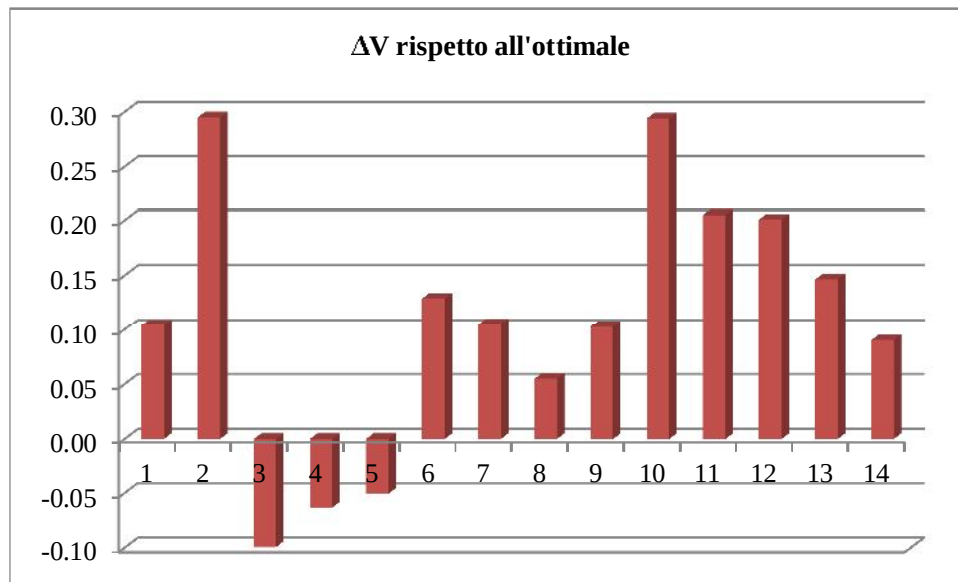


Fig. 11.33 – Istogramma dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati

Il valore del ΔV può anche essere calcolato rispetto al valore del ΔV ottimale medio della sala. Nel caso trattato tale valore è pari a 0.87. La Fig. 11.35 riporta appunto i va-

lori del delta tra il Vettore qualità effettivo calcolato e quello ottimale medio del teatro; la Fig. 11.36 riporta un grafico a barre dal quale si può facilmente dedurre la distanza dalla condizione ottimale media di ogni punto di ricezione, in riferimento all'intervallo di ΔV accettabile in questo caso.

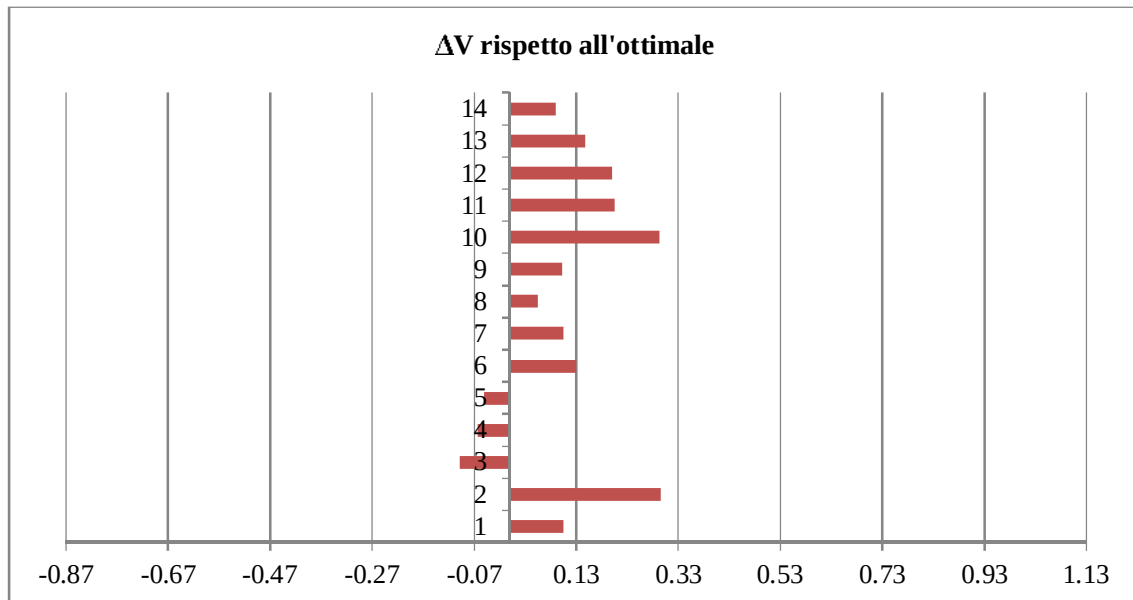


Fig. 11.34 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

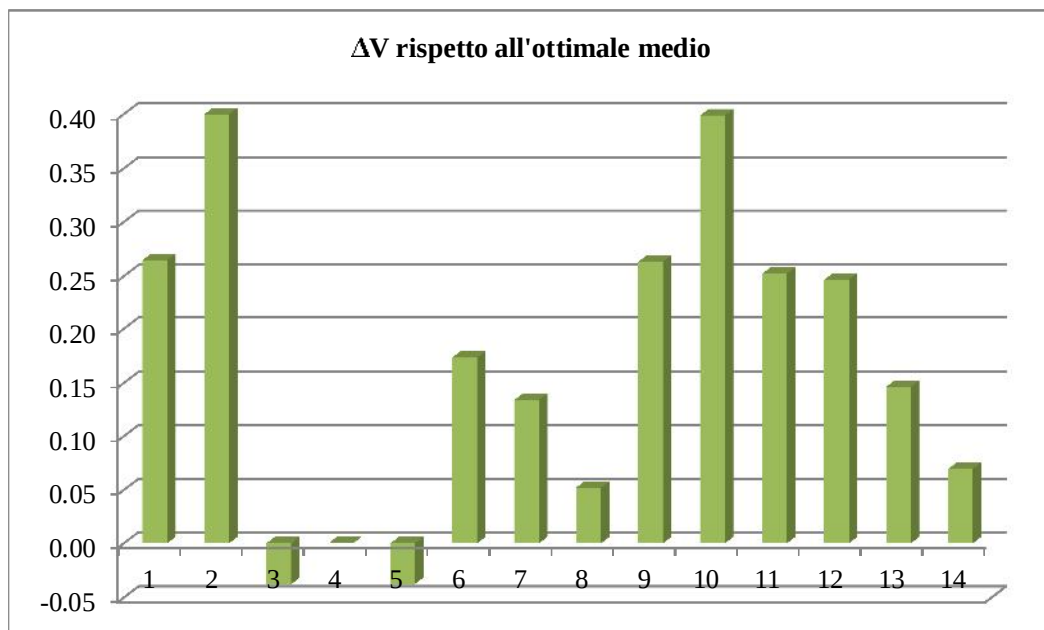


Fig. 11.35 – Istogramma dei valori del ΔV rispetto al valore medio della sala

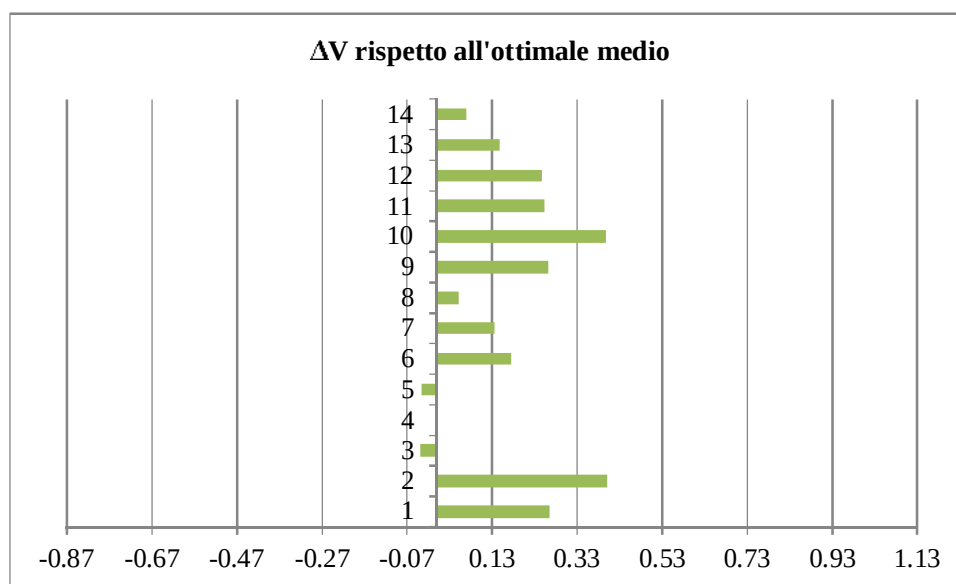


Fig. 11.36 – Grafico a barre dei valori del ΔV nei punti di ricezione considerati rispetto all'intervallo di qualità acustica

11.6. Conclusioni

In conclusione è possibile analizzare i valori del Vettore qualità effettivo medio di ciascuno dei teatri analizzati, i cui valori sono riportati in Tab. 11.37, in relazione all'intervallo di qualità acustica proposto, come esplicitato in Fig. 11.37.

Teatro	Vettore qualità medio
Teatro di Budrio	0.82
Teatro Olimpico di Roma	0.94
Aula Magna	2.60
NTA, configurazione per sala da concerto	1.43
NTA, configurazione per teatro	0.80
Teatro dell'Opera di Roma	0.97

Tab. 11.37 – Valori effettivi del Vettore qualità medio delle sale

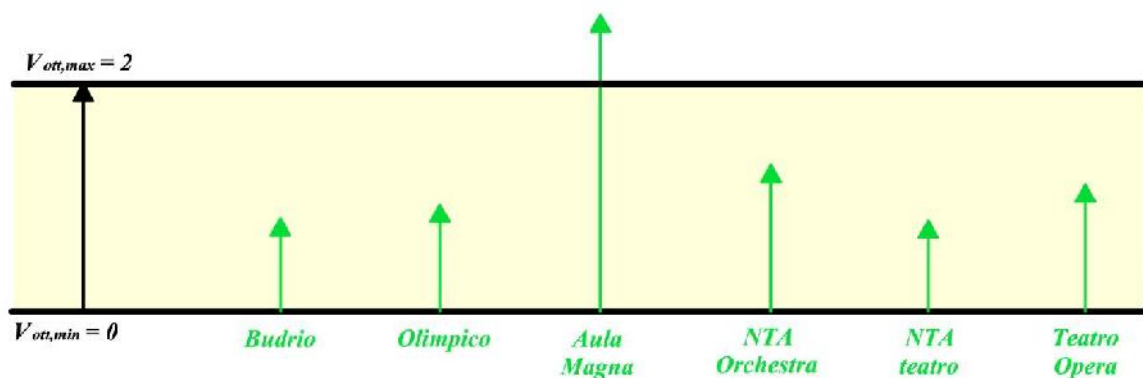


Fig. 11.37 – Valori effettivi del Vettore qualità delle sale analizzate rispetto all'intervallo di qualità [0 ; 2]

E' evidente come l'analisi del valore del Vettore qualità in sé sia poco significativa della reale qualità acustica della sala: il valore effettivo dell'indice, infatti, ci dice solamente se il giudizio complessivo cade nell'intervallo di qualità, ma non a che distanza dalla condizione ottimale. Il grafico in Fig. 11.37, pertanto, ci dice solo che tutti i teatri analizzati ricadono in un giudizio di qualità ottimale, ad eccezione dell'Aula Magna del Rettorato, che ha un valore dell'indice che supera il limite superiore, e quindi ha un giudizio complessivo di qualità non accettabile.

Per avere un'idea più precisa del giudizio di qualità e quindi poter stilare una classifica, è necessario analizzare i valori del ΔV riportati in Tab. 11.38.

Teatro	ΔV medio
Teatro di Budrio	-0.28
Teatro Olimpico di Roma	0.04
Aula Magna	1.15
NTA, configurazione per sala da concerto	0.50
NTA, configurazione per teatro	-0.72
Teatro dell'Opera di Roma	0.11

Tab. 11.38 – Valori effettivi del ΔV medio delle sale

Vengono in seguito riportati i grafici, relativi ad ogni teatro, che rappresentano i valori del Vettore qualità effettivo, ottimale e del ΔV in relazione all'intervallo di qualità acustica proposto (dalla Fig. 11.38 alla 11.43).

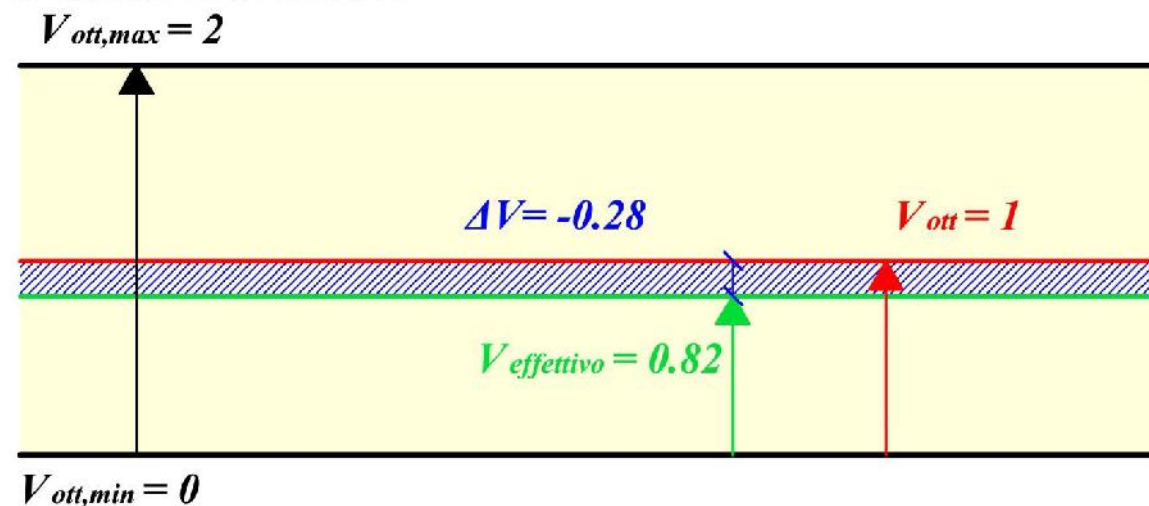
TEATRO DI BUDRIO

Fig. 11.38 – Schema riassuntivo dei valori del Vettore qualità per il Teatro di Budrio

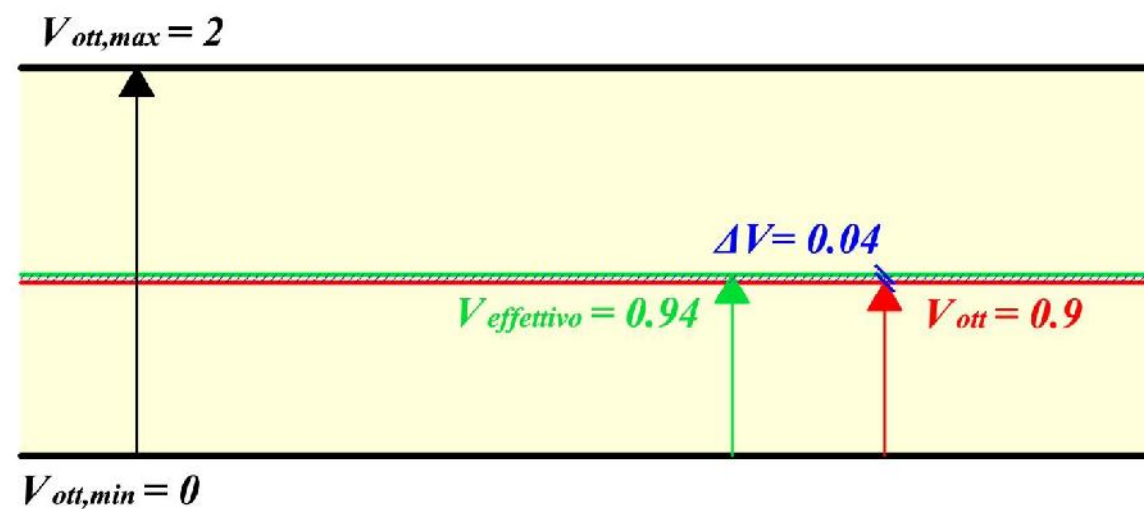
TEATRO OLIMPICO

Fig. 11.39 – Schema riassuntivo dei valori del Vettore qualità per il Teatro Olimpico di Roma

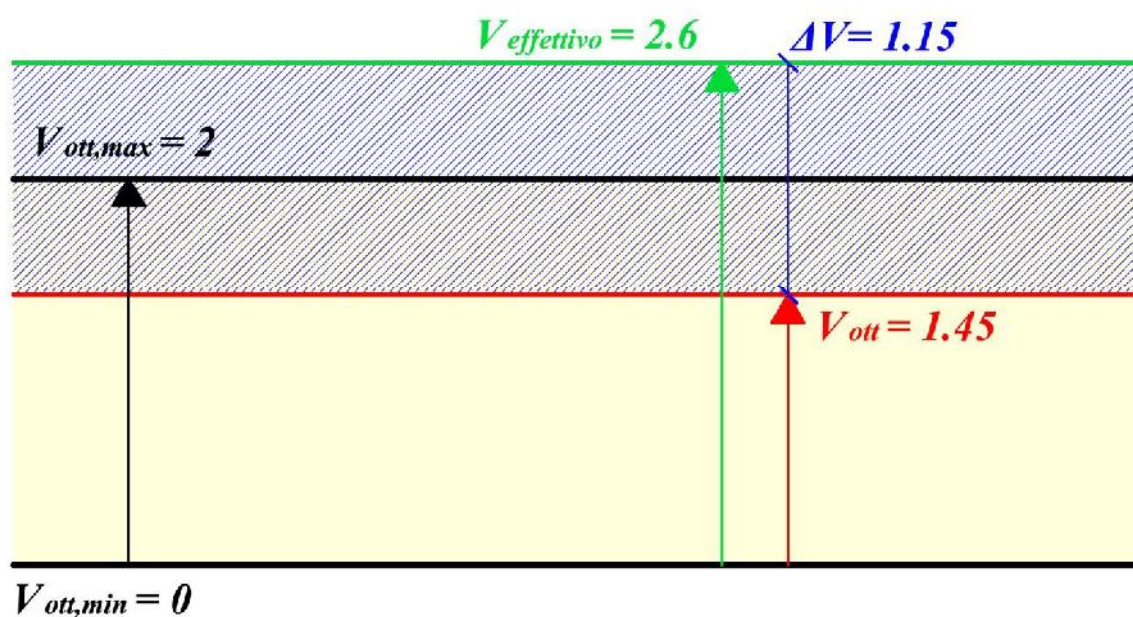
AULA MAGNA DEL RETTORATO

Fig. 11.40 – Schema riassuntivo dei valori del Vettore qualità per l'Aula Magna del Rettorato

NTA_Orchestra

$$V_{ott,max} = 2$$

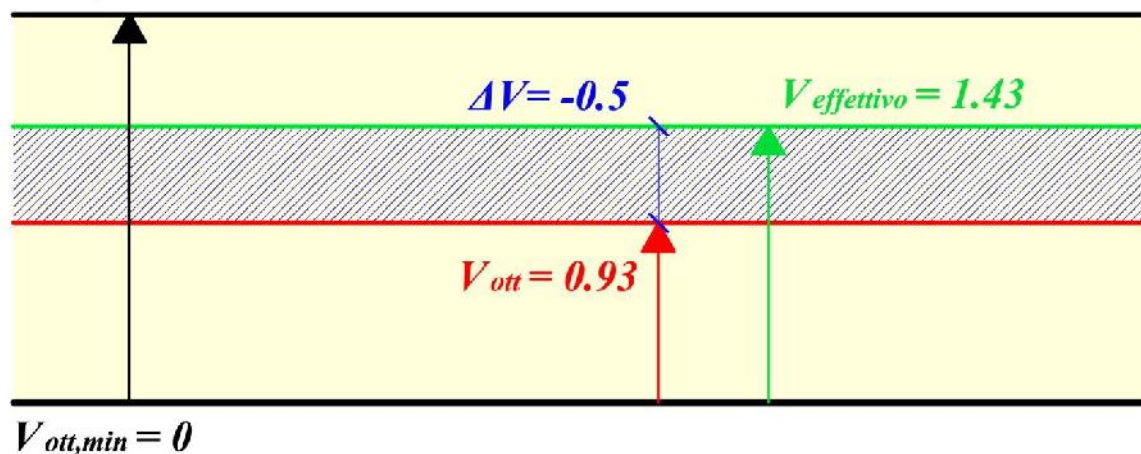


Fig. 11.41 – Schema riassuntivo dei valori del Vettore qualità per il NTA in configurazione sala da concerto

NTA_Teatro

$$V_{ott,max} = 2$$

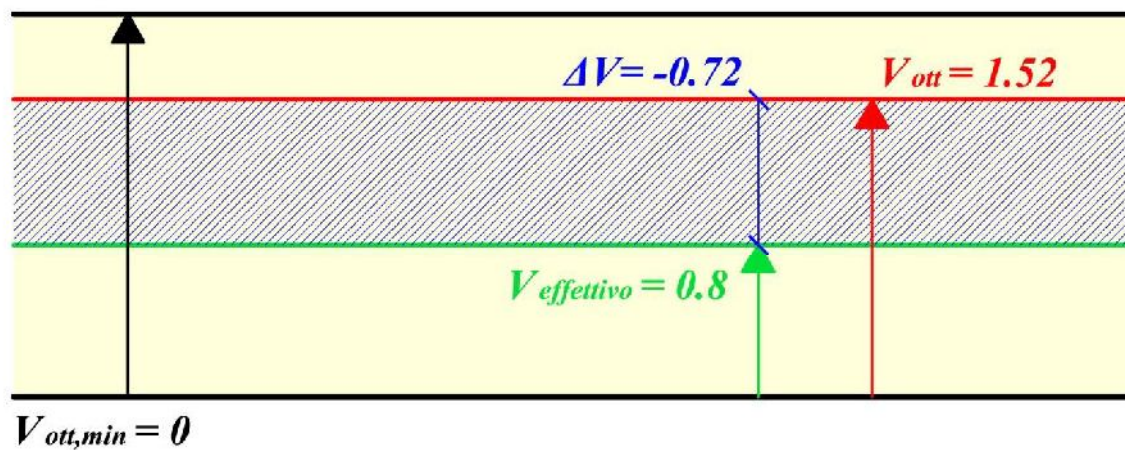


Fig. 11.42 – Schema riassuntivo dei valori del Vettore qualità per il NTA in configurazione teatro

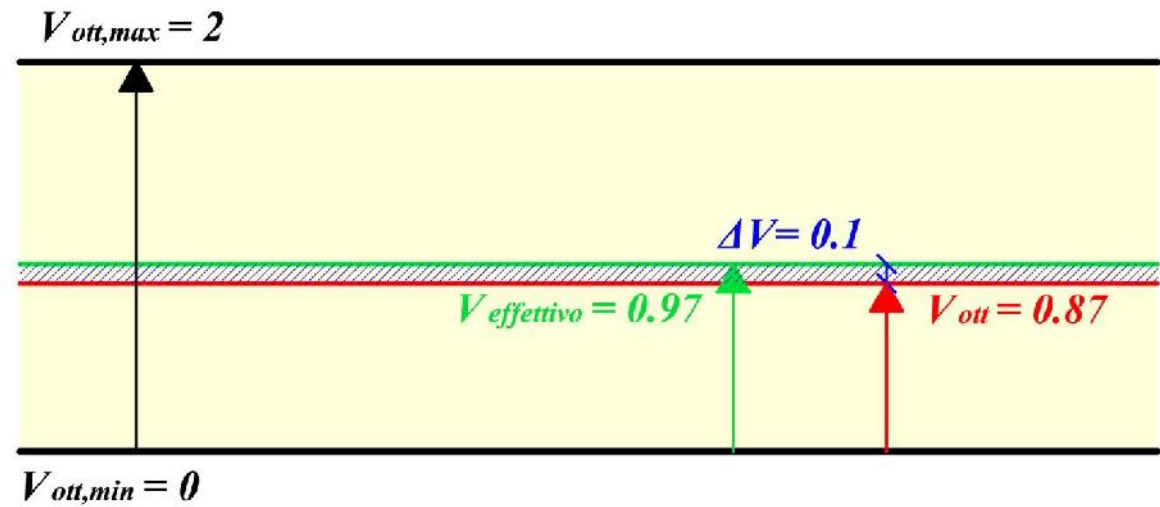
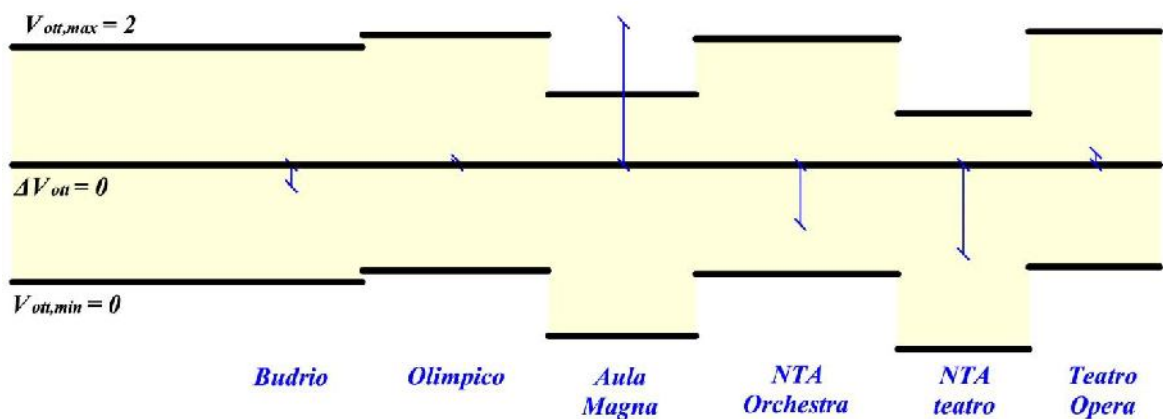
TEATRO OPERA

Fig. 11.43 – Schema riassuntivo dei valori del Vettore qualità per il Teatro dell’Opera di Roma

Dai grafici esposti, è evidente come il vero giudizio di qualità sia rappresentato dall'area tratteggiata in blu, che misura la distanza della condizione reale da quella ottimale prevista per la particolare sala analizzata. Riportando i valori del ΔV di tutti i teatri su un unico grafico (Fig. 11.44), si nota innanzi tutto che l'intervallo di variabilità è diverso per ogni sala, essendo diverso il valore del Vettore qualità ottimale, e che questi valori sono significativi per la costruzione di una classifica di qualità, rispecchiando i veri valori dei teatri studiati.

Fig. 11.44 – Valori del ΔV medio delle sale analizzate rispetto ai relativi intervalli di qualità

Sulla base di queste indicazioni, partendo dal teatro che ha ottenuto un giudizio complessivo medio migliore, si avrà (Tab. 11.39):

Teatro	ΔV medio
Teatro Olimpico di Roma	0.04
Teatro dell'Opera di Roma	0.11
Teatro di Budrio	0.28
NTA, configurazione per teatro	0.34
NTA, configurazione per sala da concerto	0.50
Aula Magna	1.15

Tab. 11.39 – Classifica di qualità acustica delle sale analizzate in base alla teoria del Vettore qualità

Riportando i dati in Fig. 11.45:

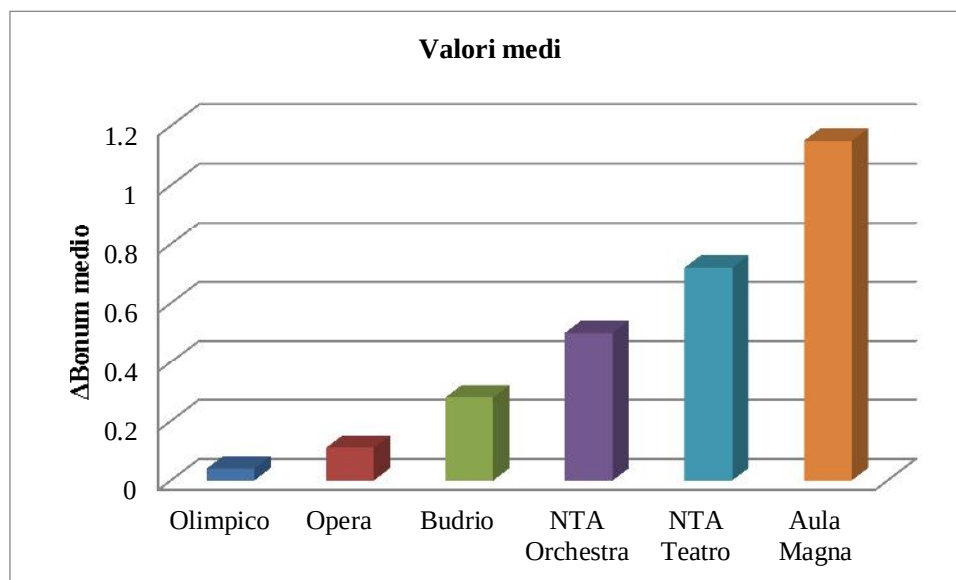


Fig. 11.45 – Istogramma dei valori medi del ΔV per le sale analizzate

Si sottolinea come i valori del ΔV siano riportati in valore assoluto, potendo essi essere sia positivi sia negativi. In conclusione, pertanto, è molto più significativa l'analisi del ΔV che contemporaneamente ci dice se il giudizio cade nell'intervallo di qualità acustica e a che distanza dalla condizione ottimale.

In generale si può concludere che in tutte le sale analizzate il giudizio finale sulla qualità acustica è sufficientemente buono, ad eccezione dell'Aula Magna del Rettorato.

In base a quanto esposto, è possibile rappresentare delle mappe che riportano i valori del ΔV in ciascun punto di ricezione della sala. Tale analisi porta un vantaggio ai fini della progettazione acustica: la sala infatti può essere corretta non solo nel suo complesso, ma in base alle qualità soggettiva dei singoli posti. In tal modo si privilegia maggiormente la percezione dell'ascoltatore ai fini del buon ascolto, che poi dovrebbe essere lo scopo ultimo di un'accurata progettazione acustica. Inoltre, tali mappe si configurano come un supporto "gestionale" per i proprietari delle sale, che potrebbero pensare di vendere i biglietti agli ascoltatori con fasce di prezzo diversificate, a seconda del livello di qualità del posto scelto.

A titolo di esempio viene riportata in Fig. 11.46 la mappa di distribuzione del ΔV relativa all'Aula Magna del Rettorato (si è scelta questa sala perché più esemplificativa, avendo una notevole variabilità dei valori del ΔV nei diversi punti di ricezione).

LEGENDA

$0 < \Delta V < 0.5$
$0.5 < \Delta V < 1$
$1 < \Delta V < 1.5$
$1.5 < \Delta V < 2$

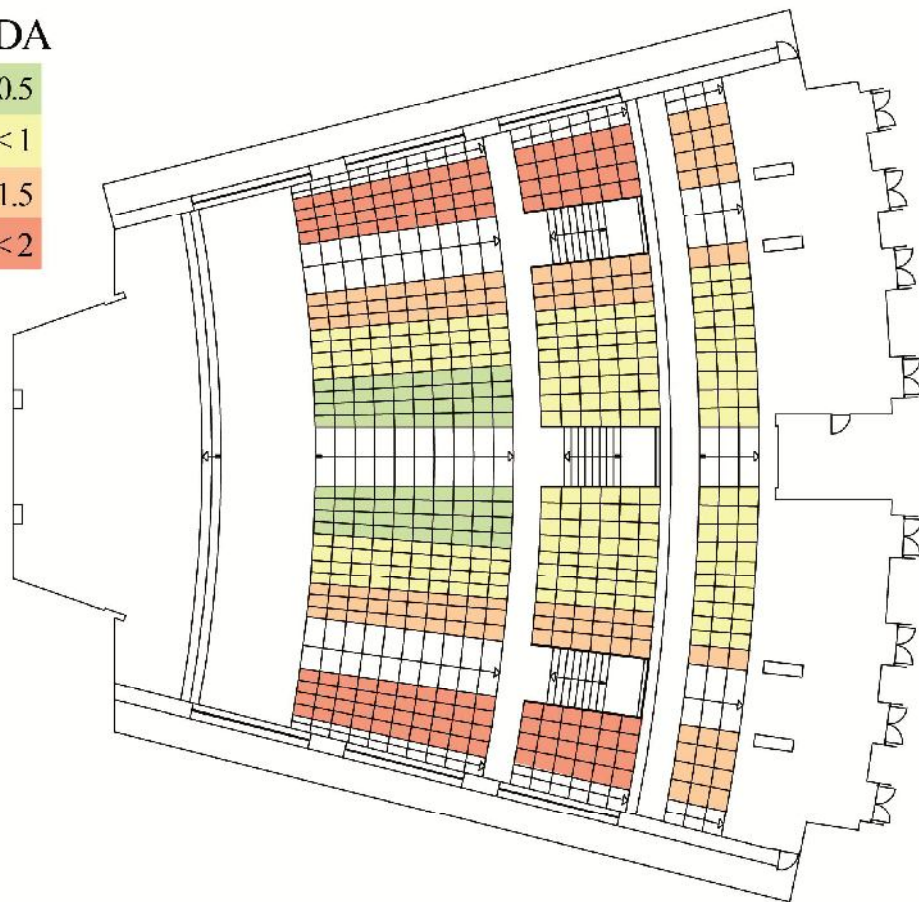


Fig. 11.46 – Mappa di distribuzione del ΔV (Aula Magna del Rettorato)

CAPITOLO 12 – CONFRONTO TRA LE TEORIE ANALIZZATE

Per una completa validazione della teoria proposta, sarebbe necessario attuare una metodologia sperimentale, basata su numerosi questionari proposti ad un campione abbastanza rappresentativo di ascoltatori, volta a verificare l'effettiva corrispondenza del giudizio soggettivo. Non essendo questo possibile per motivi logistici, nel presente capitolo si vuole validare la metodologia proposta attraverso il confronto della stessa con la teoria dell'indice globale di qualità acustica di Ando.

Come detto, il metodo del Vettore qualità si configura come una procedura standardizzata alla portata di tutti, che permette di avere in maniera intuitiva un riscontro immediato sulla bontà acustica della sala analizzata. Data la similitudine alla teoria di Ando, in questa sede è sembrato coerente scegliere quest'ultima quale parametro di confronto per la validazione del metodo.

Nei paragrafi successivi saranno riportati i confronti, per tutte le sale analizzate, dei valori dei due indici di qualità calcolati nei diversi punti di ricezione considerati. Infine verranno confrontati tra loro i valori medi delle sale, al fine di stilare una "classifica" di qualità acustica.

12.1. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

In Tab. 12.1 vengono riportati i valori calcolati nei Capitoli 10 e 11 dei due indici di qualità globale per i punti di ricezione considerati.

Punto di ricezione	S_{tot} (43 ms)	ΔV_{ott}
110	-1.48	-0.21
111	-1.49	-0.27
112	-1.65	-0.33
Simulazione 1	-1.87	-0.56
Simulazione 2	-1.32	-0.21
Simulazione 3	-1.57	-0.31
Simulazione 4	-0.88	-0.08
Simulazione 5	-1.42	-0.24
Valore medio	-1.46	-0.28

Tab. 12.1 – Valori dell'indice di qualità di Ando e del ΔV nei punti di ricezione analizzati e valore medio della sala

La Fig. 12.1 mostra i suddetti valori in un grafico: in ascisse è riportato il ΔV , con $\Delta V=0$ condizione ottimale, in ordinata è riportato l'indice di Ando S_{tot} , con $S_{tot}=0$ condizione ottimale. La linea di tendenza polinomiale mostra un'ottima correlazione tra i due indici.

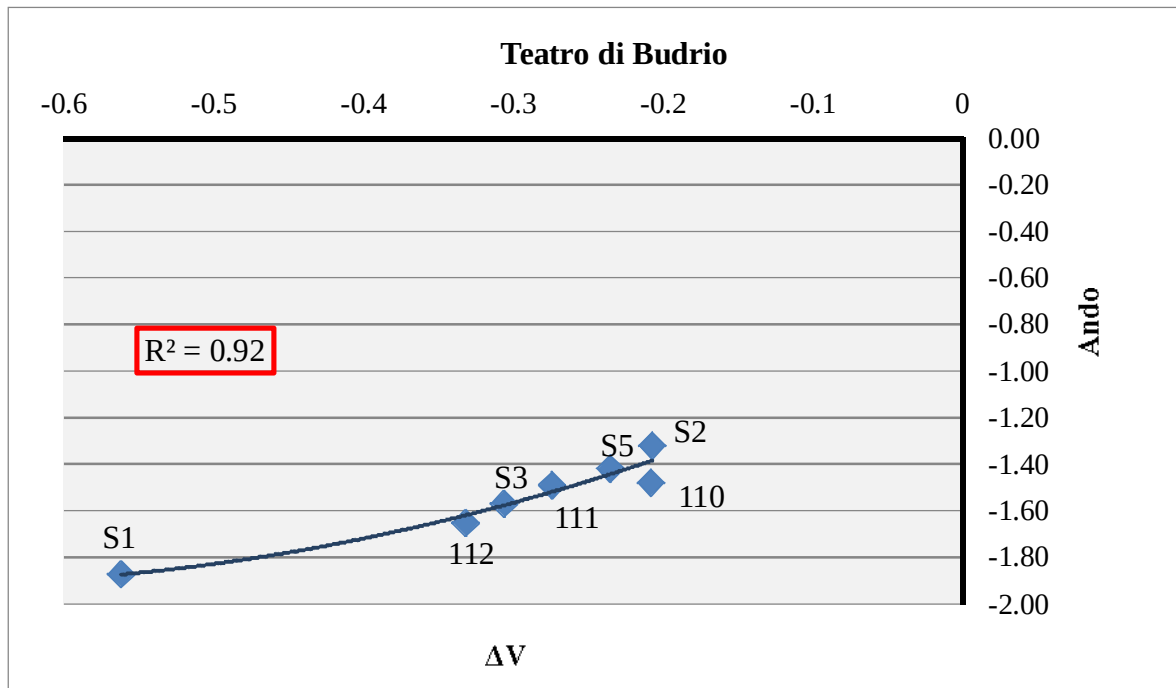


Fig. 12.1 – Confronto tra l'indice globale di Ando e il ΔV

Il coefficiente di determinazione R^2 è un indicatore, compreso tra 0 e 1, che stabilisce il grado di corrispondenza tra i valori stimati per la linea di tendenza e i valori reali. Una linea di tendenza risulta più precisa quando il relativo valore R^2 è uguale o prossimo a 1. Come si evince dal grafico, quindi, la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è ottima ($R^2 = 0.92$).

Si è voluto analizzare anche il significato psicoacustico dei valori calcolati, associando ad essi un giudizio di qualità e confrontando le due scale di valutazione. La difficoltà maggiore, in questo caso, è stata creare una scala di valutazione per gli indici globali determinati secondo la teoria di Ando. Questa infatti, indicando come zero il valore ottimale, misura la distanza del valore reale da questa condizione, ma senza fissare un limite inferiore. Pertanto se l'indice è significativo nel confronto tra due situazioni diverse, il valore assoluto dell'indice di Ando ci dà poche informazioni circa la percezione di qualità di quella particolare sala. Tale problema non si pone invece con il Vettore qualità, che avendo ben definiti un valore ottimale, un minimo, un massimo e un valore effettivo, permette una va-

lutazione completa della sala, indipendente da eventuali confronti. Fatta questa premessa, si vuole specificare che la scala di valutazione qui proposta è stata determinata in riferimento ad intervalli piuttosto ampi di intensità di sensazione soggettiva, da un lato per la mancanza di indicazioni più precise in merito, e dall'altro perché nel campo della psicoacustica, intervenendo la componente soggettiva, è difficile (e forse anche non corretto) fare delle distinzioni nette ed univoche.

Pertanto la scala di valutazione si compone di tre soli grandi campi, corrispondenti ai giudizi:

- Ottimo – molto buono;
- Buono – sufficiente;
- Insufficiente.

Per quanto riguarda l'indice di qualità globale di Ando, egli stesso, in base alle numerose campagne di misure corredate da questionari svolte su numerose sale e in base alle sue esperienze, identifica come inaccettabili le sale che presentano valori globali dell'indice inferiori al - 4 e come buone quelle che hanno indici di preferenza globali superiori a - 2. Pertanto la scala di valutazione relativa è quella mostrata in Tab. 12.2.

INDICE GLOBALE DI ANDO	QUALITA' DELLA SALA
0 / -2	Ottima - Molto buona
-2 / -4	Buona - Sufficiente
> -4	Insufficiente

Tab. 12.2 – Scala di valutazione per l'indice globale di Ando

Per quanto riguarda il ΔV , il suo campo di variabilità, nel caso del Teatro di Budrio, è [- 1 ; 1]. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità [0 ; 2], il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 12.3.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	1	2	-1	0	1

Tab. 12.3 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro di Budrio

In questo caso la relativa scala di valutazione è mostrata in Tab. 12.4.

ΔV	
- 0.5 / 0.5	Ottima - Molto buona
- 1 / - 0.5 e 0.5 / 1	Buona - Sufficiente
< - 1 oppure > 1	Insufficiente

Tab. 12.4 – Scala di valutazione per l'indice globale del ΔV

In base quindi ai valori calcolati dei due indici per ogni punto di misura, è stato predisposto un diagramma che mostra il giudizio soggettivo relativo all'indice di qualità, come mostrato in Tab. 12.5.

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DI ANDO								
Giudizio	Punti di ricezione							
	110	111	112	S1	S2	S3	S4	S5
Ottima - molto buona								
Buona - sufficiente								
Insufficiente								

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DEL VETTORE QUALITÀ								
Giudizio	Punti di ricezione							
	110	111	112	S1	S2	S3	S4	S5
Ottima - molto buona								
Buona - sufficiente								
Insufficiente								

Tab. 12.5 – Giudizi di qualità nei punti di ricezione in base alle due teorie

Si nota una quasi totale concordanza di giudizio tra le due teorie, con la sola eccezione del punto S1, in cui c'è comunque solo un parziale disaccordo (si sottolinea, inoltre che il valore del ΔV in quel punto è di - 0.56, quindi appena fuori dall'intervallo "Ottima – molto buona"). Per rendere più esplicita questa correlazione, si è predisposto il diagramma in Fig. 12.2.

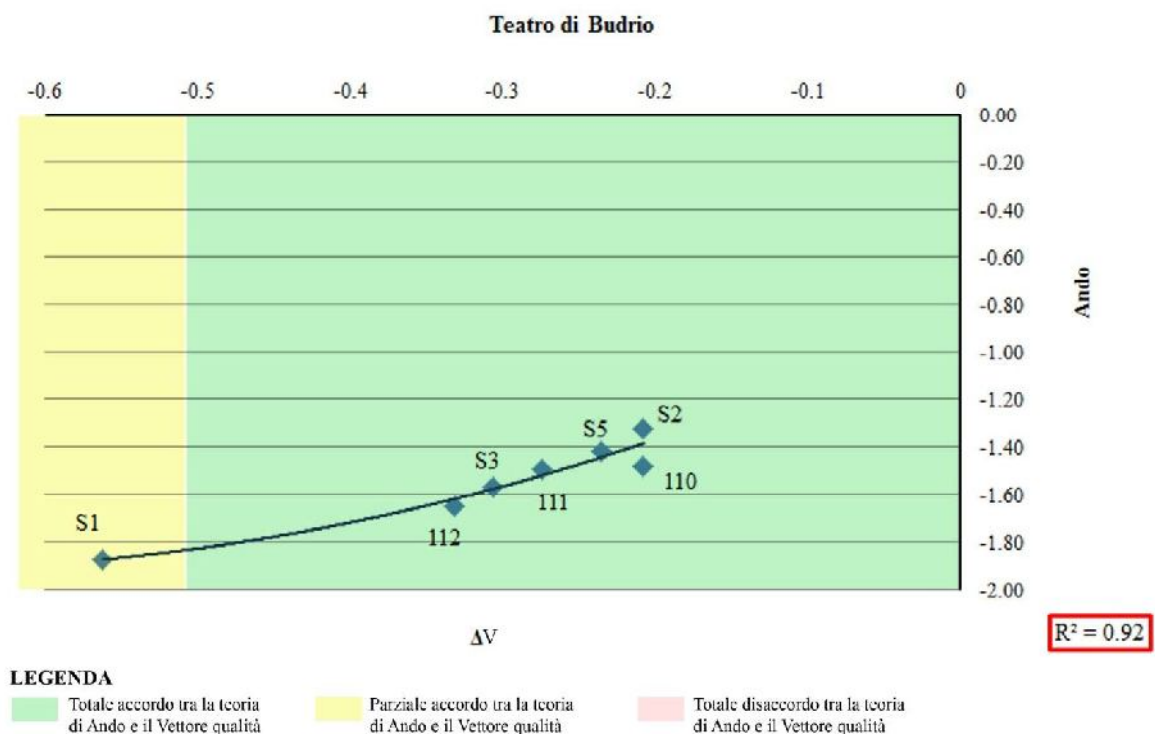


Fig. 12.2 – Campi di corrispondenza di giudizio tra la teoria di Ando e quella del Vettore qualità

12.2. Teatro Olimpico di Roma

In Tab. 12.6 vengono riportati i valori calcolati nei Capitoli 10 e 11 dei due indici di qualità globale per i punti di ricezione considerati.

Punto misura	S_{tot} (43 ms)	ΔV_{ott}
B22	-0.94	-0.15
C12	-0.96	-0.13
F9	-0.93	-0.07
I22	-0.94	-0.07
M40	-1.96	-0.23
V18	-0.69	-0.04
V36	-1.95	-0.21
Simulazione 1	-1.13	-0.15
Simulazione 2	-0.66	-0.03
Simulazione 3	-0.71	0.16
Simulazione 4	-0.65	0.07
Simulazione 5	-0.75	0.07
Simulazione 6	-0.92	0.33

Simulazione 7	-0.82	0.10
Galleria 1	-0.98	0.35
Galleria 2	-1.27	0.40
Galleria 3	-0.66	0.24
Valore medio	-1.00	0.04

Tab. 12.6 – Valori dell'indice di qualità di Ando e del ΔV nei punti di ricezione analizzati e valore medio della sala

La Fig. 12.3 mostra i suddetti valori in un grafico dove in ascisse sono riportati i valori del ΔV , con $\Delta V=0$ condizione ottimale, ed in ordinata sono riportati i valori dell'indice di Ando S_{tot} , con $S_{tot}=0$ condizione ottimale. La linea di tendenza polinomiale mostra un'ottima correlazione tra i due indici.

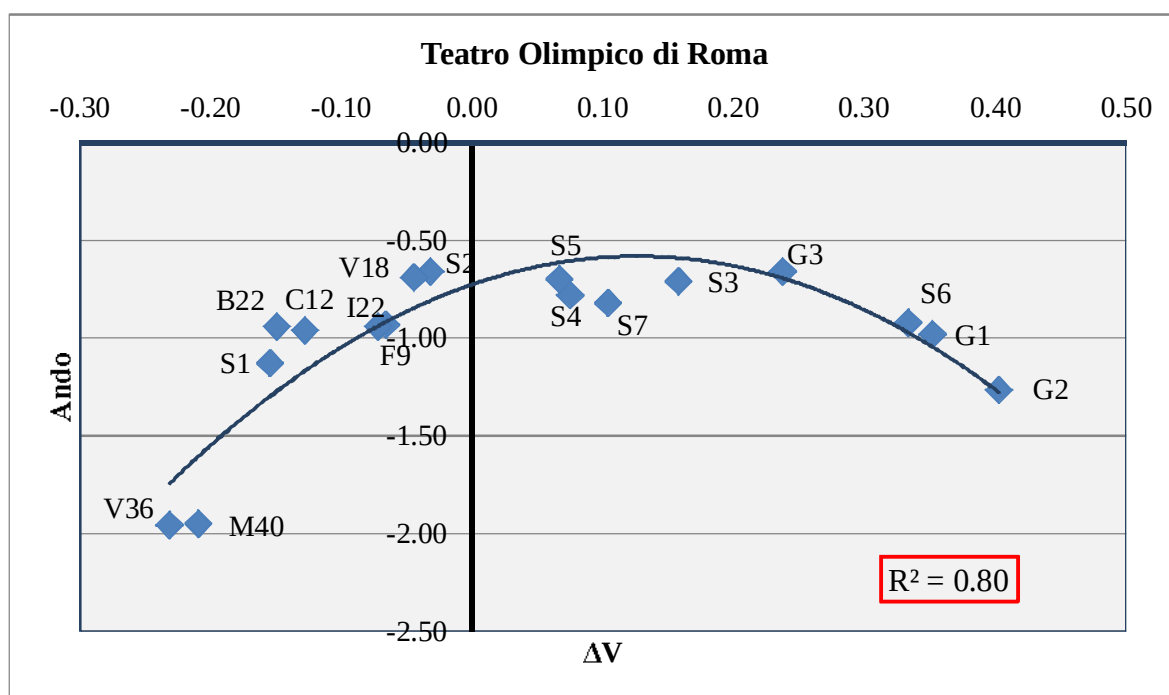


Fig. 12.3 – Confronto tra l'indice globale di Ando e quello proposto

Il coefficiente di determinazione R^2 ha un valore pari a 0.8, quindi la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è molto buona.

Si è voluto analizzare anche il significato psicoacustico dei valori calcolati, associando ad essi un giudizio di qualità e confrontando le due scale di valutazione.

Per quanto riguarda l'indice di qualità globale di Ando, la scala di valutazione è la stessa utilizzata precedentemente (Tab. 12.2).

Per quanto riguarda il ΔV , il suo campo di variabilità, nel caso del Teatro Olimpico, è $[-0.9; 1.1]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 12.7.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	0.9	2	-0.9	0	1.1

Tab. 12.7 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro Olimpico di Roma

In questo caso la relativa scala di valutazione è mostrata in Tab. 12.8.

ΔV	
-0.45 / 0.55	Ottima - Molto buona
-0.9 / -0.45 e 0.54 / 1.1	Buona - Sufficiente
< -0.9 oppure > 1.1	Insufficiente

Tab. 12.8 – Scala di valutazione per l'indice globale del ΔV

In base quindi ai valori calcolati dei due indici per ogni punto di misura, è stato predisposto un diagramma che mostra il giudizio soggettivo relativo all'indice di qualità, come mostrato in Tab. 12.9.

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DI ANDO																
Giudizio	Punti di ricezione															
	B 22	C 12	F 9	I 22	M 40	V 18	V 36	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	G 1	G 3
Ottima - molto																

buona																	
Buona – sufficiente																	
Insufficiente																	

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DEL VETTORE QUALITÀ																	
Giudizio	Punti di ricezione																
	B2 2	C1 2	F 9	I 22	M 40	V1 8	V3 6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	G1 1	G2 2	G3 3
Ottima - molto buona																	
Buona – sufficiente																	
Insufficiente																	

Tab. 12.9 – Giudizi di qualità nei punti di ricezione in base alle due teorie

Si nota una totale concordanza di giudizio tra le due teorie. Per rendere più esplicita questa correlazione, si è predisposto il diagramma in Fig. 12.4.

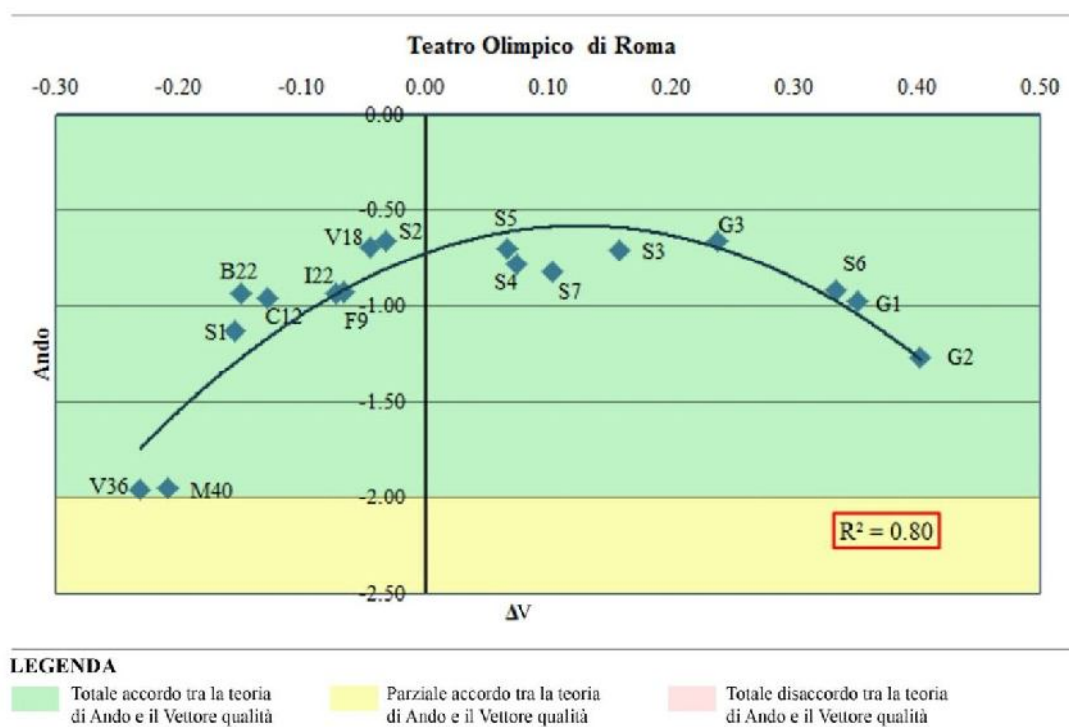


Fig. 12.4 – Campi di corrispondenza di giudizio tra la teoria di Ando e quella del Vettore qualità

12.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma

In Tab. 12.10 vengono riportati i valori calcolati nei Capitoli 10 e 11 dei due indici di qualità globale per i punti di ricezione considerati.

Punto misura	S_{tot} (12 ms)	ΔV_{ott}
1	-2.26	1.23
2	-2.65	1.88
3	-1.11	0.34
4	-2.24	1.44
5	-1.62	0.62
6	-2.49	1.66
7	-2.34	1.30
Simulato 1	-0.90	0.19
Simulato 2	-1.57	0.61
Simulato 3	-2.28	1.56
Galleria 1	-2.06	0.96
Galleria 2	-2.20	1.31
Corridoio 1	-2.66	1.82
Valore medio	-2.03	1.15

Tab. 12.10 – Valori dell'indice di qualità di Ando e del ΔV nei punti di ricezione analizzati e valore medio

La Fig. 12.5 mostra i suddetti valori in un grafico dove in ascisse sono riportati i valori del ΔV , con $\Delta V=0$ condizione ottimale, ed in ordinata sono riportati i valori dell'indice di Ando S_{tot} , con $S_{\text{tot}}=0$ condizione ottimale.

Il coefficiente di determinazione R^2 è un indicatore, compreso tra 0 e 1, che indica il grado di corrispondenza tra i valori stimati per la linea di tendenza e i valori reali. Una linea di tendenza risulta più precisa quando il relativo valore R^2 è uguale o prossimo a 1. Come si evince dal grafico, quindi, la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è ottima ($R^2 = 0.98$).

Si è voluto analizzare anche il significato psicoacustico dei valori calcolati, associando ad essi un giudizio di qualità e confrontando le due scale di valutazione.

Per quanto riguarda l'indice di qualità globale di Ando, la scala di valutazione è la stessa utilizzata precedentemente (Tab. 12.2).

Per quanto riguarda il ΔV , il suo campo di variabilità, nel caso dell'Aula Magna del Rettorato, è $[-1.45; 0.55]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 12.11.

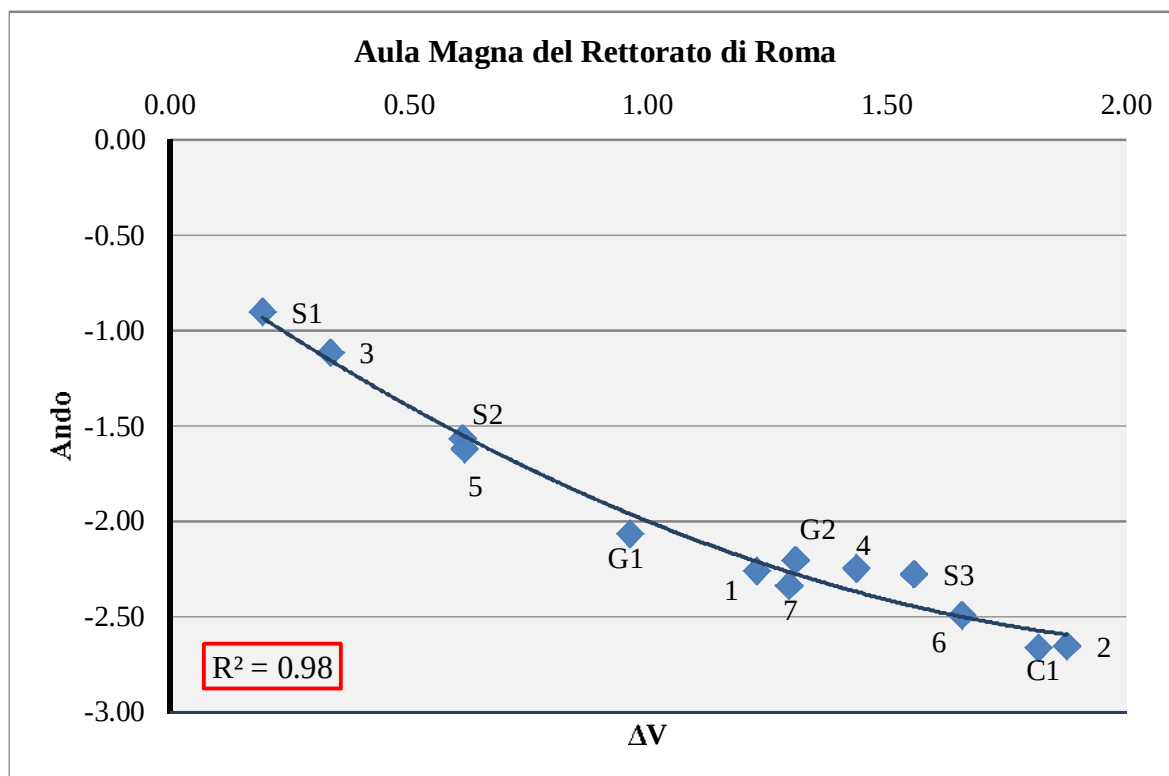


Fig. 12.5 – Confronto tra l'indice globale di Ando e quello proposto

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	1.4	2	- 1.45	0	0.6

Tab. 12.11 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso dell'Aula Magna

In questo caso la relativa scala di valutazione è mostrata in Tab. 12.12.

ΔV	
- 0.71 / 0.3	Ottima - Molto buona
- 1.45 / - 0.71 e 0.3 / 0.6	Buona - Sufficiente
< - 1.45 oppure > 0.6	Insufficiente

Tab. 12.12 – Scala di valutazione per l'indice globale del Vettore qualità

In base quindi ai valori calcolati dei due indici per ogni punto di misura, è stato predisposto un diagramma che mostra il giudizio soggettivo relativo all'indice di qualità, come mostrato in Tab. 12.13.

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DI ANDO													
Giudizio	Punti di ricezione												
	1	2	3	4	5	6	7	S1	S2	S3	G1	G2	C1
Ottima - molto buona													
Buona - sufficiente													
Insufficiente													

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DEL VETTORE QUALITÀ													
Giudizio	Punti di ricezione												
	1	2	3	4	5	6	7	S1	S2	S3	G1	G2	C1
Ottima - molto buona													
Buona - sufficiente													
Insufficiente													

Tab. 12.13 – Giudizi di qualità nei punti di ricezione in base alle due teorie

In questo caso la concordanza di giudizio è meno evidente rispetto ai casi precedenti, ma comunque in nessun punto di ricezione si ha un disaccordo totale tra le due teorie. Per rendere più esplicita questa correlazione, si è predisposto il diagramma in Fig. 12.6.

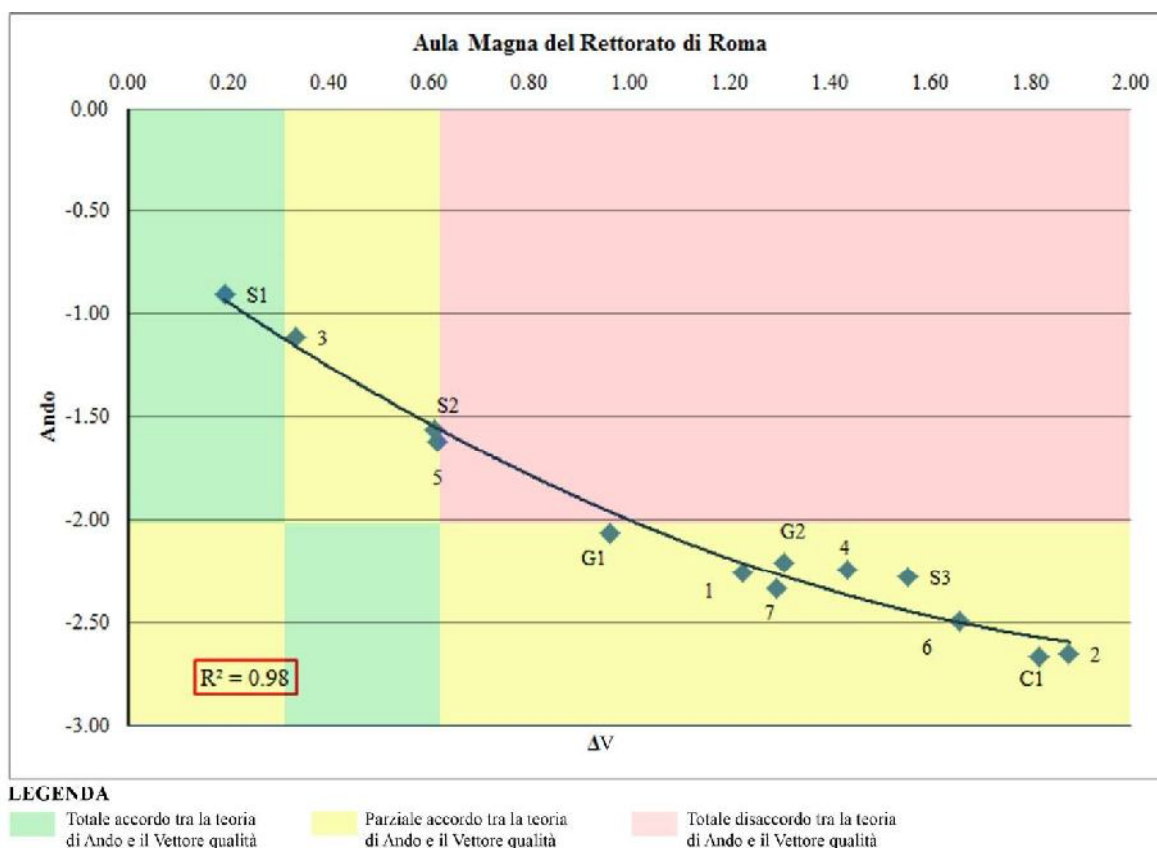


Fig. 12.6 – Campi di corrispondenza di giudizio tra la teoria di Ando e quella del Vettore qualità

12.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

12.4.1. Confronto per la configurazione sala da concerto

In Tab. 12.14 vengono riportati i valori calcolati nei Capitoli 10 e 11 dei due indici di qualità globale per i punti di ricezione considerati.

Punto misura	$S_{\text{tot}} (43 \text{ ms})$	ΔV_{ott}
R1	-1.61	0.50
R2	-1.57	0.37
R3	-1.57	0.40
R4	-1.60	0.47
R5	-1.59	0.43
R6	-1.62	0.56
R7	-1.63	0.54
R8	-1.63	0.55

G1	-1.63	0.57
G2	-1.62	0.54
G3	-1.62	0.54
Valore medio	-1.61	0.50

Tab. 12.14 – Valori dell'indice di qualità di Ando e del ΔV nei punti di ricezione analizzati e valore medio

La Fig. 12.7 mostra i suddetti valori in un grafico dove in ascisse sono riportati i valori del ΔV , con $\Delta V=0$ condizione ottimale, ed in ordinata sono i riportati i valori dell'indice di Ando S_{tot} , con $S_{\text{tot}}=0$ condizione ottimale.

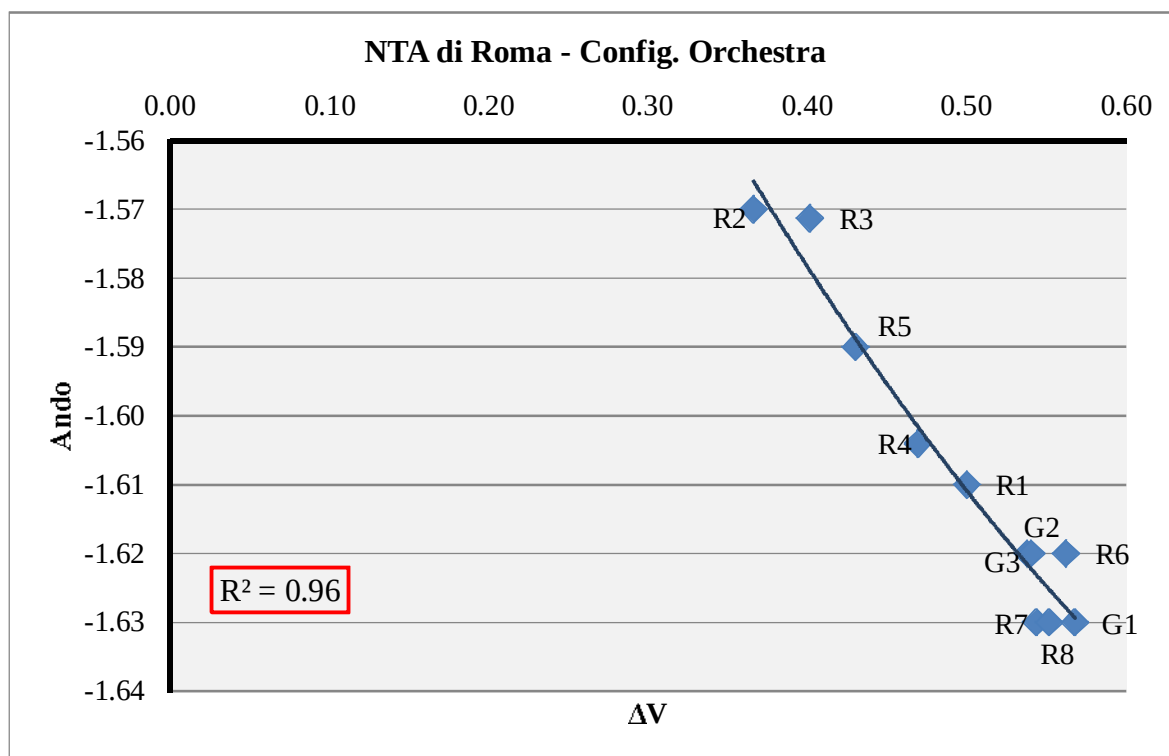


Fig. 12.7 – Confronto tra l'indice globale di Ando e quello proposto

Il coefficiente di determinazione R^2 ha un valore pari a 0.96, quindi la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è ottima.

Si è voluto analizzare anche il significato psicoacustico dei valori calcolati, associando ad essi un giudizio di qualità e confrontando le due scale di valutazione.

Per quanto riguarda l'indice di qualità globale di Ando, la scala di valutazione è la stessa utilizzata precedentemente (Tab. 12.2).

Per quanto riguarda il ΔV , il suo campo di variabilità, nel caso del Nuovo Teatro di Ateneo in configurazione orchestra, è $[-0.93; 1.07]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 12.15.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	0.93	2	- 0.93	0	1.07

Tab. 12.15 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV

In questo caso la relativa scala di valutazione è mostrata in Tab. 12.16.

ΔV	
- 0.46 / 0.57	Ottima - Molto buona
- 0.96 / - 0.46 e 0.57 / 1.07	Buona - Sufficiente
< - 0.96 oppure > 1.07	Insufficiente

Tab. 12.16 – Scala di valutazione per l'indice globale del Vettore qualità

In base quindi ai valori calcolati dei due indici per ogni punto di misura, è stato predisposto un diagramma che mostra il giudizio soggettivo relativo all'indice di qualità, come mostrato in Tab. 12.17.

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DI ANDO											
Giudizio	Punti di ricezione										
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	G1	G2	G3
Ottima - molto buona											
Buona - sufficiente											
Insufficiente											

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DEL VETTORE QUALITÀ												
Giudizio	Punti di ricezione											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	G1	G2	G3	
Ottima - molto buona												
Buona - sufficiente												
Insufficiente												

Tab. 12.17 – Giudizi di qualità nei punti di ricezione in base alle due teorie

Si nota una totale concordanza di giudizio tra le due teorie; per rendere più esplicita questa correlazione, si è predisposto il diagramma in Fig. 12.8.

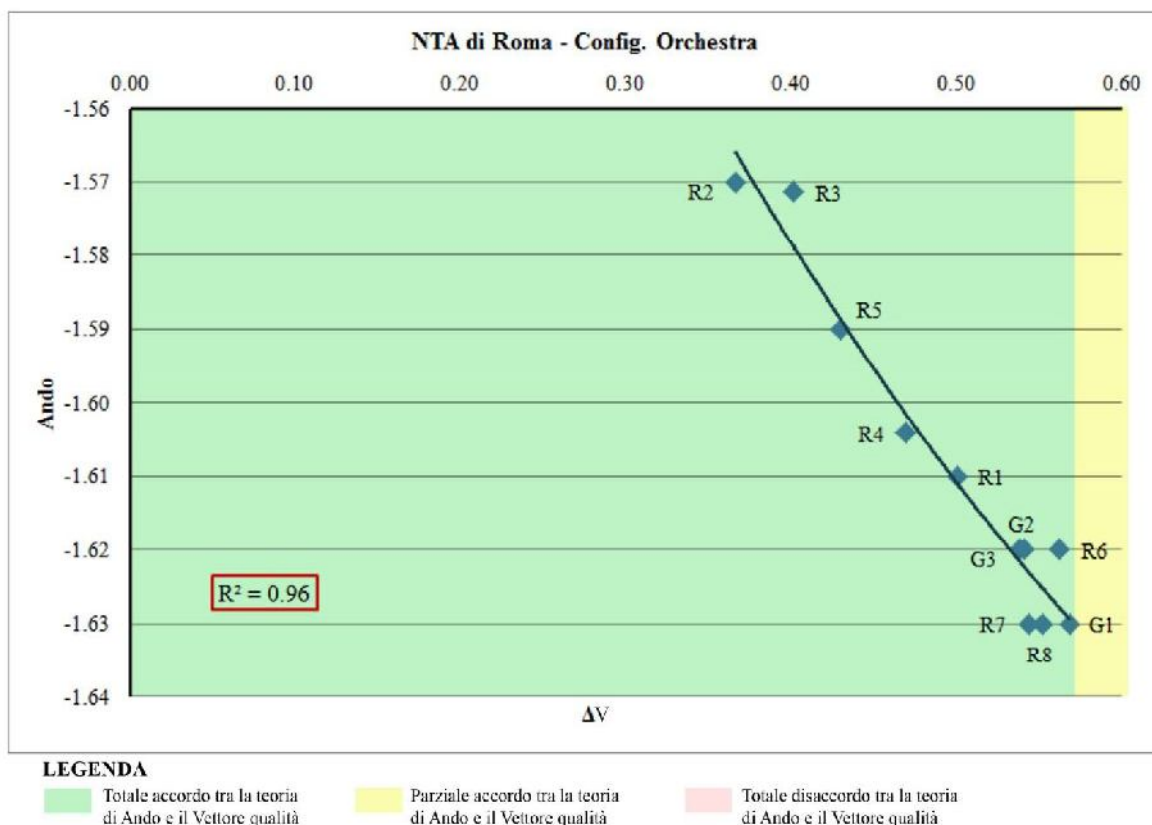


Fig. 12.8 – Campi di corrispondenza di giudizio tra la teoria di Ando e quella del Vettore qualità

12.4.2. Confronto per la configurazione teatro

In Tab. 12.18 vengono riportati i valori calcolati nei Capitoli 10 e 11 dei due indici di qualità globale per i punti di ricezione considerati.

La Fig. 12.9 riporta i suddetti valori in un grafico dove in ascisse sono riportati i valori del ΔV , con $\Delta=0$ condizione ottimale, ed in ordinata sono riportati i valori dell'indice di Ando S_{tot} , con $S_{\text{tot}}=0$ condizione ottimale.

Il coefficiente di determinazione R^2 ha un valore pari a 0.84, quindi la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è molto buona.

Si è voluto analizzare anche il significato psicoacustico dei valori calcolati, associando ad essi un giudizio di qualità e confrontando le due scale di valutazione.

Per quanto riguarda l'indice di qualità globale di Ando, la scala di valutazione è la stessa utilizzata precedentemente (Tab. 12.2).

Punto misura	S_{tot} (12 ms)	ΔV_{ott}
R4	-1.68	-1.23
R5	-1.59	-1.84
R6	-1.36	-0.22
R7	-1.35	-0.26
R8	-1.53	-0.41
G1	-1.49	-0.68
G2	-1.53	-0.73
G3	-1.52	-0.71
Valore medio	-1.51	-0.76

Tab. 12.18 – Valori dell'indice di qualità di Ando e del ΔV nei punti di ricezione analizzati e valore medio

Per quanto riguarda il ΔV , il suo campo di variabilità, nel caso del Nuovo Teatro di Ateneo in configurazione teatro, è $[-1.56 ; 0.44]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 12.19.

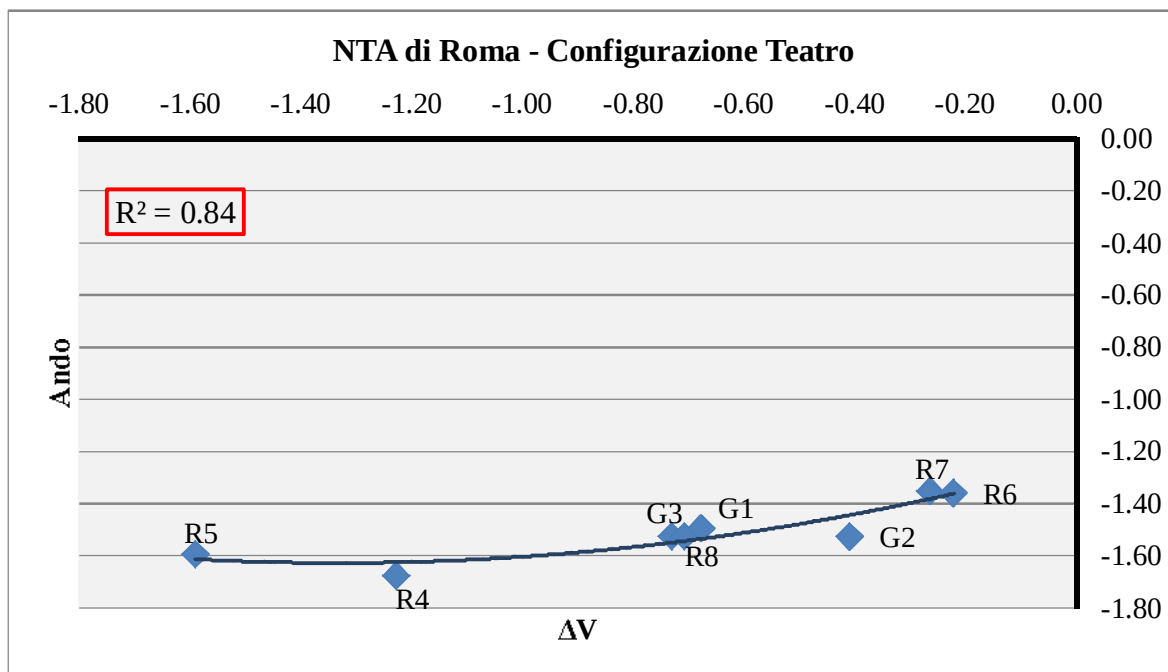


Fig. 12.9 – Confronto tra l'indice globale di Ando e quello proposto

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	1.56	2	-1.56	0	0.44

Tab. 12.19 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV

In questo caso la relativa scala di valutazione è mostrata in Tab. 12.20.

ΔV	
- 0.78 / 0.26	Ottima - Molto buona
- 1.56 / - 0.78 e 0.26 / 0.44	Buona - Sufficiente
< - 1.56 oppure > 0.44	Insufficiente

Tab. 12.20 – Scala di valutazione per l'indice globale del Vettore qualità

In base quindi ai valori calcolati dei due indici per ogni punto di misura, è stato predisposto un diagramma che mostra il giudizio soggettivo relativo all'indice di qualità, come mostrato in Tab. 12.21.

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DI ANDO								
Giudizio	Punti di ricezione							
	R4	R5	R6	R7	R8	G1	G2	G3
Ottima - molto buona								
Buona - sufficiente								
Insufficiente								

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DEL VETTORE QUALITÀ								
Giudizio	Punti di ricezione							
	R4	R5	R6	R7	R8	G1	G2	G3
Ottima - molto buona								
Buona - sufficiente								
Insufficiente								

Tab. 12.21 – Giudizi di qualità nei punti di ricezione in base alle due teorie

Si nota una quasi totale concordanza di giudizio tra le due teorie; per rendere più esplicita questa correlazione, si è predisposto il diagramma in Fig. 12.10.

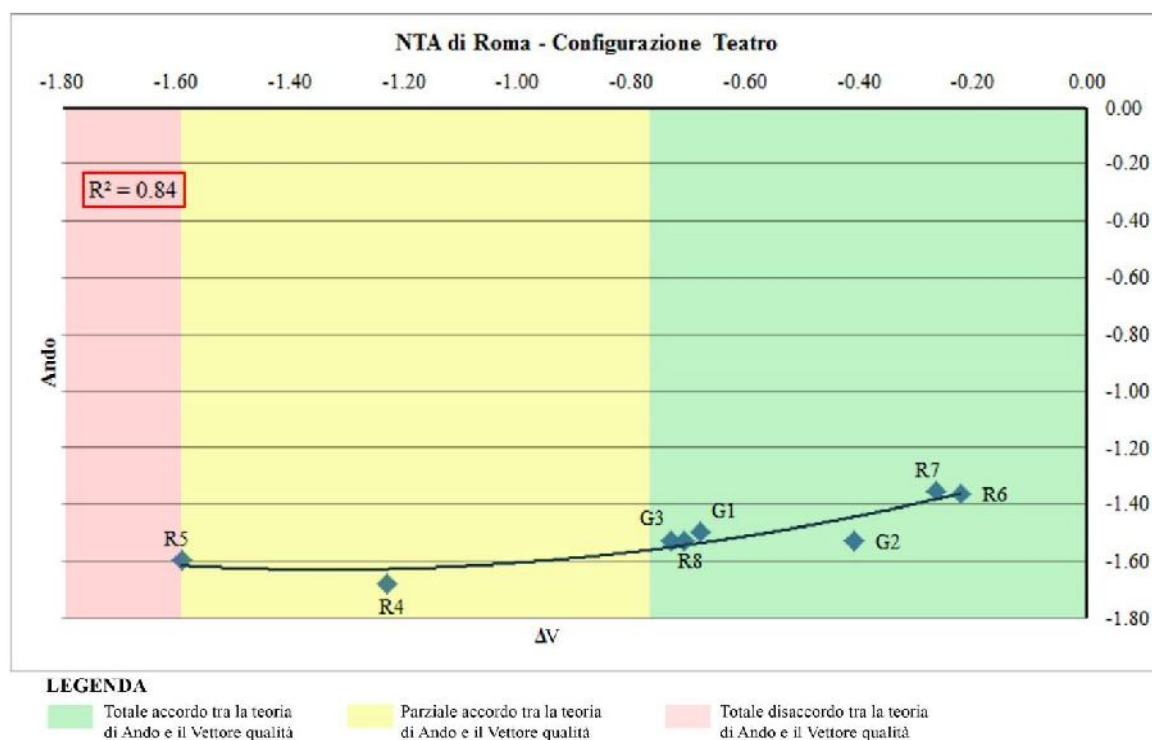


Fig. 12.10 – Campi di corrispondenza di giudizio tra la teoria di Ando e quella del Vettore qualità

12.5. Teatro dell'Opera di Roma

In Tab. 12.22 vengono riportati i valori calcolati nei Capitoli 10 e 11 dei due indici di qualità globale per i punti di ricezione considerati.

Punto misura	S_{tot} (43 ms)	ΔV_{ott}
1	-0.56	0.10
2	-1.23	0.29
3	-3.17	-0.10
4	-2.35	-0.06
5	-2.14	-0.05
6	-0.89	0.13
7	-0.94	0.11
8	-1.12	0.05
9	-0.49	0.10
10	-1.17	0.29
11	-1.07	0.20
12	-1.15	0.20
13	-1.09	0.15
14	-0.97	0.09
Valore medio	-1.31	0.11

Tab. 12.22 – Valori dell'indice di qualità di Ando e del ΔV nei punti di ricezione analizzati e valore medio della sala

La Fig. 12.11 riporta i suddetti valori in un grafico dove in ascisse sono riportati i valori del ΔV , con $\Delta V=0$ condizione ottimale, ed in ordinata sono riportati i valori dell'indice di Ando S_{tot} , con $S_{\text{tot}}=0$ condizione ottimale. La linea di tendenza polinomiale mostra un'ottima correlazione tra i due indici.

Il coefficiente di determinazione R^2 ha un valore pari a 0.91, quindi la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è ottima.

Si è voluto analizzare anche il significato psicoacustico dei valori calcolati, associando ad essi un giudizio di qualità e confrontando le due scale di valutazione.

Per quanto riguarda l'indice di qualità globale di Ando, la scala di valutazione è la stessa utilizzata precedentemente (Tab. 12.2).

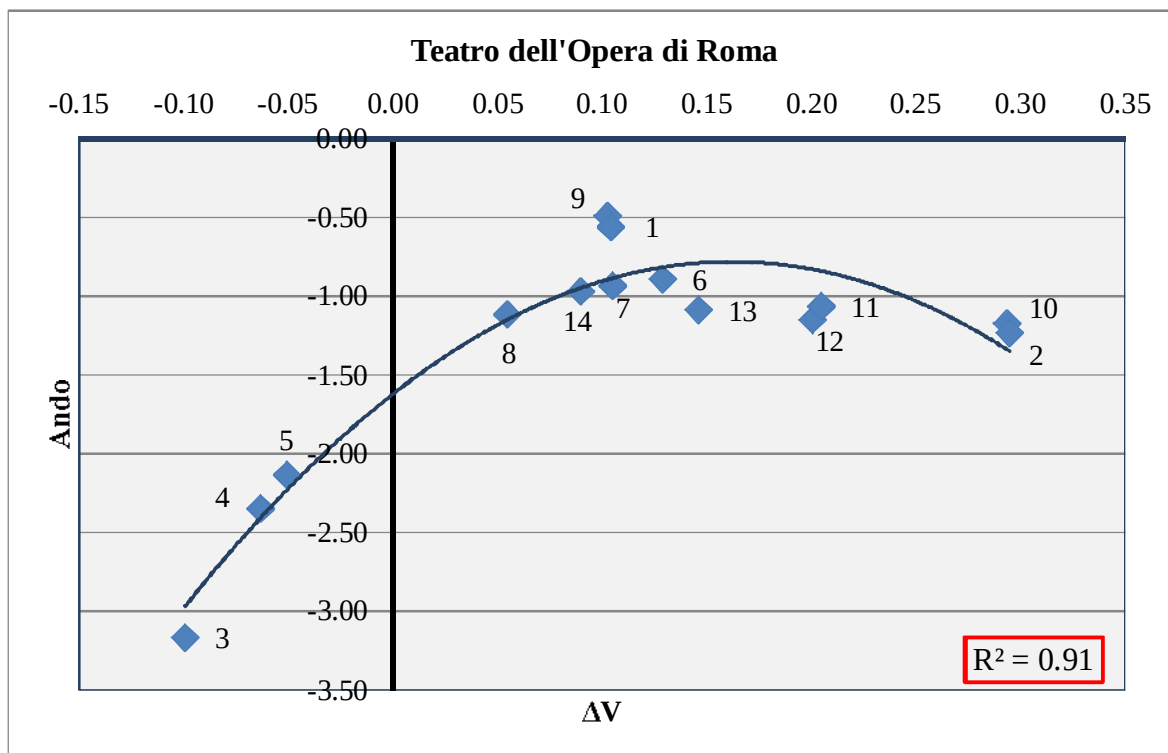


Fig. 12.11 – Confronto tra l'indice globale di Ando e quello proposto

Per quanto riguarda il ΔV , il suo campo di variabilità, nel caso del Teatro dell'Opera, è $[-0.87 ; 1.13]$. Tale campo si ottiene sottraendo dall'intervallo del Vettore qualità $[0 ; 2]$, il valore del Vettore qualità ottimale ottenuto nel caso analizzato, come si evince dalla Tab. 12.23.

Vettore qualità			ΔV		
minimo	ottimale	massimo	minimo	ottimale	massimo
0	0.87	2	-0.87	0	1.13

Tab. 12.23 – Intervalli di qualità del Vettore qualità e del ΔV nel caso del Teatro dell'Opera di Roma

In questo caso la relativa scala di valutazione è mostrata in Tab. 12.24.

ΔV	
- 0.44 / 0.56	Ottima - Molto buona
- 0.87 / - 0.44 e 0.56 / 1.13	Buona - Sufficiente
< - 0.87 oppure > 1.13	Insufficiente

Tab. 12.24 – Scala di valutazione per l'indice globale del ΔV

In base quindi ai valori calcolati dei due indici per ogni punto di misura, è stato predisposto un diagramma che mostra il giudizio soggettivo relativo all'indice di qualità, come mostrato in Tab. 12.25.

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DI ANDO														
Giudizio	Punti di ricezione													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ottima - Molto Buona														
Buona - Sufficiente														
Insufficiente														

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' - TEORIA DEL VETTORE QUALITA'														
Giudizio	Punti di ricezione													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ottima - Molto Buona														
Buona - Sufficiente														
Insufficiente														

Tab. 12.25 – Giudizi di qualità nei punti di ricezione in base alle due teorie

Si nota una quasi totale concordanza di giudizio tra le due teorie. Per rendere più esplicita questa correlazione, si è predisposto il diagramma in Fig. 12.12.

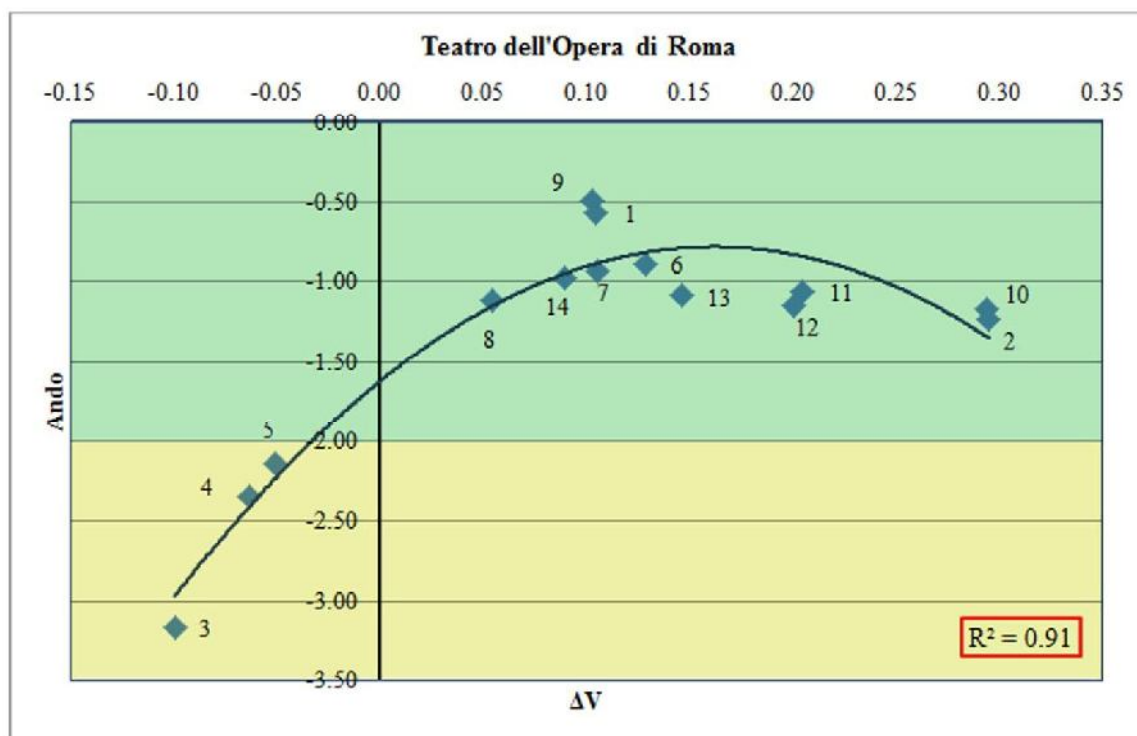


Fig. 12.12 – Campi di corrispondenza di giudizio tra la teoria di Ando e quella del Vettore qualità

12.6. Confronto tra le sale analizzate

In ultima analisi, si è provveduto ad un confronto tra la teoria di Ando e quella in questa sede proposta, tra i valori medi ottenuti per tutti i teatri presi in considerazione. In Tab. 12.26 si riportano i dati conclusivi dello studio.

	S_{tot} medio	ΔV medio
Teatro di Budrio	-1.46	-0.28
Teatro Olimpico	-1.00	0.04
Aula Magna del Rettorato	-2.03	1.15
NTA configurazione orchestra	-1.61	0.50
NTA configurazione teatro	-1.51	-0.34
Teatro dell'Opera	-1.31	0.11

Tab. 12.26 –Valori medi dei due indici ottenuti per tutti i teatri presi in considerazione

La Fig. 12.13 mostra i suddetti valori in un grafico dove in ascisse sono riportati i valori del ΔV , con $\Delta V=0$ condizione ottimale, ed in ordinata sono i riportati i valori dell'indice di Ando S_{tot} , con $S_{tot}=0$ condizione ottimale.

CONFRONTO TRA I DUE INDICI PER I VALORI MEDI DELLE SALE ANALIZZATE

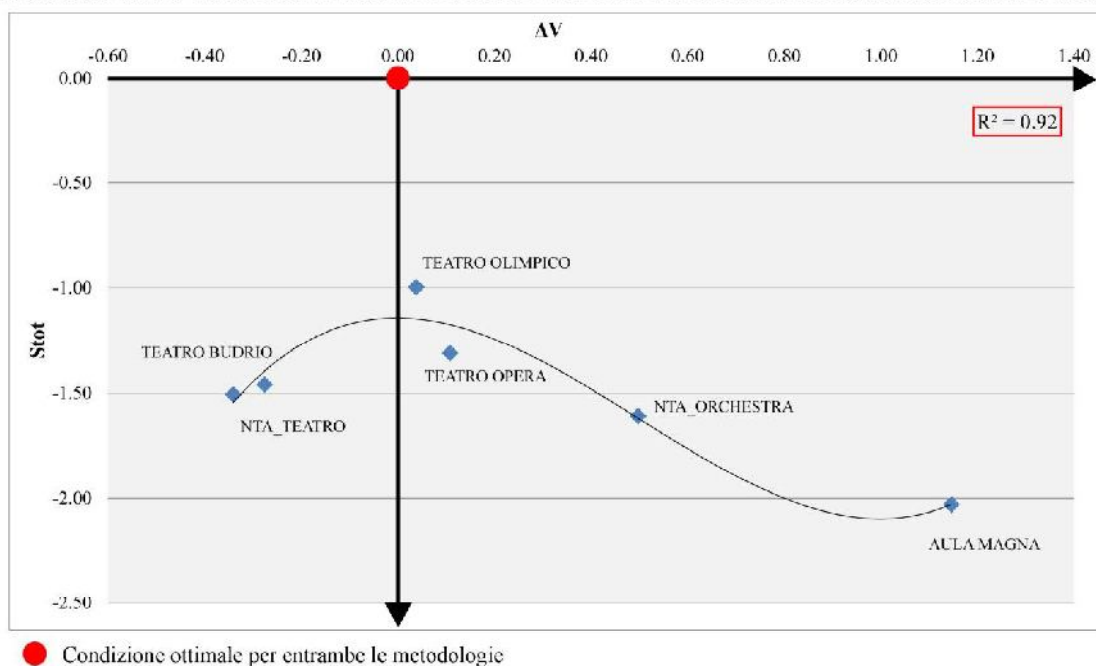


Fig. 12.13 – Confronto cubico tra l'indice di Ando e quello proposto di tutti i teatri analizzati

Il coefficiente di determinazione R^2 per un legame cubico ha un valore pari a 0.92, quindi la corrispondenza con la linea di tendenza polinomiale è ottima.

La Fig. 12.14 mostra lo stesso rapporto, ma con un legame quadratico. In questo caso il coefficiente di determinazione ha un valore pari a 0.75.

CONFRONTO TRA I DUE INDICI PER I VALORI MEDI DELLE SALE ANALIZZATE

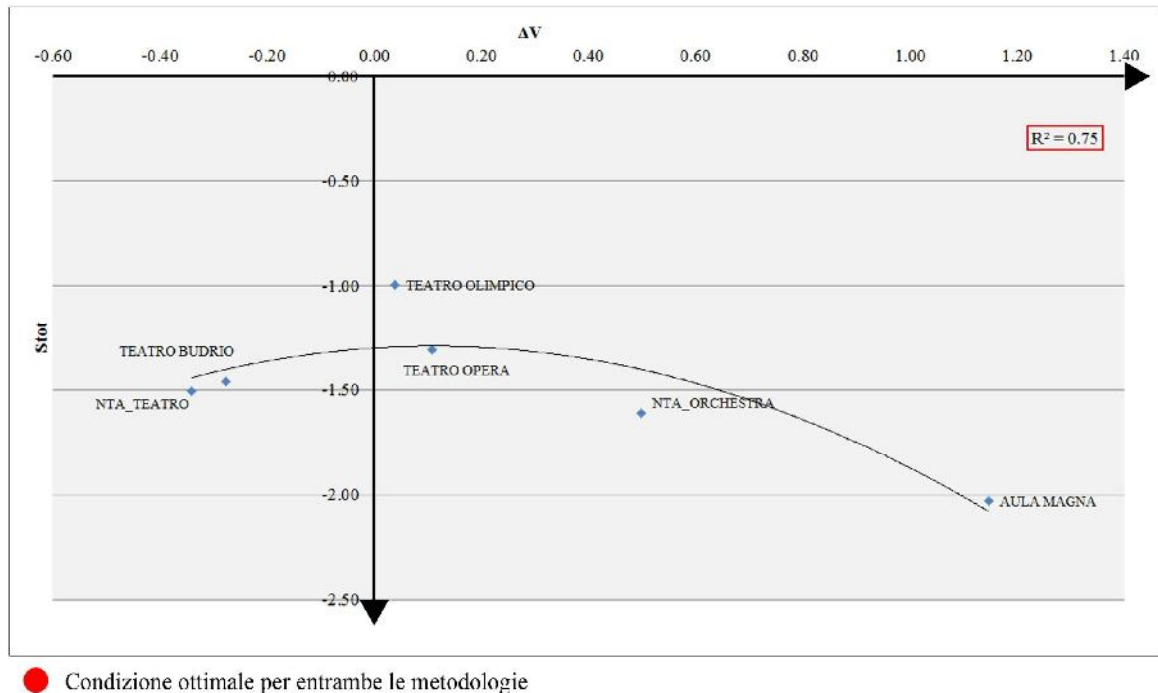


Fig. 12.14 – Confronto quadratico tra l'indice di Ando e quello proposto di tutti i teatri analizzati

L'analisi condotta in questo capitolo valida quindi completamente la teoria proposta, almeno nel confronto con una metodologia ormai scientificamente accettata come quella di Ando: sviluppi futuri saranno orientati alla predisposizione di questionari da proporre ad un campione abbastanza rappresentativo di ascoltatori, volto a verificare l'effettiva corrispondenza del giudizio soggettivo.

CAPITOLO 13 – CONCLUSIONI

13.1. Metodologia di studio

Oggi le condizioni per un ascolto ottimale in una sala da concerto sono abbastanza ben conosciute. Molti studi sulle correlazioni tra parametri misurati in situ e giudizi espressi dal pubblico hanno portato a risultati significativi, pur basandosi principalmente su valutazioni qualitative; sono state, inoltre, approfondite anche importanti correlazioni utili tra gruppi di parametri oggettivi stessi e giudizi di percezione sonora.

L'acustica architettonica è una disciplina a cavallo tra fisica, architettura e musica, ed è una materia in continua evoluzione; questa tesi va ad inserirsi in un contesto di studio (purtroppo non molto sviluppato in Italia) delle sale adibite all'ascolto della musica con lo scopo di fornire una procedura valida e semplice per la caratterizzazione psicoacustica delle sale.

La determinazione dei parametri acustici oggettivi per l'analisi psicoacustica oggetto della presente tesi è stata effettuata attraverso una campagna di rilievi acustici, che ha riguardato 5 sale per lo spettacolo, tra teatri ed auditoria.

I risultati delle campagne di misure, poi, sono stati utilizzati per la taratura di modelli tridimensionali delle sale analizzate, implementati nel software di simulazione Odeon. In questo modo, attraverso le simulazioni, si sono ottenute informazioni sui parametri acustici in tutti i punti della sala, avendo così quindi una casistica molto più ampia di quella che si avrebbe avuto con le sole misure in campo.

Partendo dai dati dei parametri oggettivi ottenuti dalle misure, è stato calcolato, in ciascun punto di ricezione delle sale analizzate, un descrittore numerico della qualità acustica, in base allo schema di valutazione proposto da Ando.

Si sono considerati come parametri indipendenti il Livello di pressione sonora in dB(A), la *IACC* media alle medie frequenze, l'*ITDG* e il Tempo di riverberazione soggettivo, integrato nei primi 10 dB alla frequenza di 500 Hz.

L'indice di preferenza così calcolato è valido solo in relazione alla durata effettiva della funzione di autocorrelazione del brano scelto e del fissato valore della potenza sonora della sorgente. Nonostante questo i dati acquisiti consentono il calcolo dell'indice di preferenza relativo a qualsiasi brano e a sorgenti sonore di potenza diversa da quella utilizzata.

Analogamente, partendo dai dati dei parametri oggettivi ottenuti dalle misure, è stato calcolato in ciascun punto delle sale analizzate un descrittore numerico della quali-

tà acustica, in base allo schema di valutazione proposto nel presente lavoro, denominato Vettore qualità.

Si sono considerati come parametri indipendenti il Livello di pressione sonora in dB(A), il Lateral Fraction medio alle medie frequenze, l'*ITDG* e l'*EDT* a 500 Hz. Per ciascuno di essi viene calcolata la grandezza fisica oggettiva che provoca la sensazione descritta dal parametro e vengono determinati i limiti, superiore ed inferiore, del campo della qualità acustica per ciascuna grandezza. Infine vengono calcolate le variabili ridotte e l'indice di qualità globale.

Infine sono riportati i confronti, per tutte le sale analizzate, dei valori dei due indici di qualità calcolati nei diversi punti di ricezione considerati e vengono confrontati tra loro i valori medi delle sale, al fine di stilare una “classifica” di qualità acustica.

Data l'ottima correlazione tra le due teorie applicate ad una stessa sala in tutti i punti di ricezione, evidenziata dall'analisi svolta, si può considerare la metodologia del Vettore qualità validata, o almeno coerente con teorie riconosciute dalla comunità scientifica a livello internazionale. E' evidente che solo dopo che saranno stati acquisiti dati da un ben maggior numero di teatri sarà possibile validare completamente la teoria qui proposta.

13.2. Discussione dei risultati

Nei capitoli precedenti sono stati illustrati i risultati ottenuti applicando le due procedure di valutazione della qualità acustica delle sale allo studio di 5 teatri italiani, di cui uno (il Nuovo Teatro Ateneo) ancora in sola fase di progettazione.

In Tab. 13.1 sono riportati i valori medi degli indici di preferenza ottenuti nelle sale analizzate: come detto da essi si può stilare una “graduatoria” di qualità, che risulta essere la stessa in entrambi i casi, come esplicitato dalla Tab. 13.2. Da sottolineare che i valori negativi del ΔV (differenza tra la condizione reale e l'ottimale) sono stati riportati in valore assoluto, per facilitare il confronto con l'indice di Ando. Questo non pregiudica la validità della classifica stilata: il valore $\Delta V = 0$ è la condizione ottimale, più ci si allontana da questo valore, sia verso numeri positivi che negativi, più il giudizio risulta essere peggiore. In questo modo si è ritenuto, data anche l'ottima correlazione tra le due teorie applicate ad una stessa sala in tutti i punti di ricezione, di poter considerare la metodologia del Vettore qualità validata, o almeno coerente con teorie già riconosciute dalla comunità scientifica a livello internazionale. E' evidente che solo dopo che saranno

stati acquisiti dati da un ben maggior numero di teatri sarà possibile validare completamente la teoria qui proposta.

	S_{tot} medio	ΔV medio
Teatro di Budrio (Bologna)	-1.46	-0.28
Teatro Olimpico di Roma	-1.00	0.04
Aula Magna del Rettorato della Sapienza di Roma	-2.03	1.15
Nuovo Teatro Ateneo (configurazione sala da concerto)	-1.61	0.50
Nuovo Teatro Ateneo (configurazione teatro)	-1.51	-0.34
Teatro dell'Opera di Roma	-1.31	0.11

Tab. 13.1 – Valori medi degli indici di qualità globale calcolati secondo le due metodologie per le sale analizzate

CLASSIFICA DI QUALITA' ACUSTICA	S_{tot} medio	 ΔV medio
Teatro Olimpico di Roma	-1.00	0.04
Teatro dell'Opera di Roma	-1.31	0.11
Teatro di Budrio (Bologna)	-1.46	0.28
Nuovo Teatro Ateneo (configurazione teatro)	-1.51	0.34
Nuovo Teatro Ateneo (configurazione sala da concerto)	-1.61	0.50
Aula Magna del Rettorato della Sapienza di Roma	-2.03	1.15

Tab. 13.2 – Classifica di qualità acustica delle sale analizzate in base ai due indici

Una volta verificato che le due metodologie offrono dei risultati coerenti tra loro, si sono voluti analizzare i vantaggi e gli svantaggi che ognuna di esse presenta, al fine di dimostrare la maggior snellezza di utilizzo e versatilità della teoria del Vettore qualità.

Le Tab. 13.3 e 13.4 mostrano, rispettivamente, le procedure di applicazione della teoria di Ando e del Vettore qualità.

Analizzando attentamente le due procedure, si possono evincere i vantaggi e gli svantaggi dell'una rispetto all'altra, riassunti in Tab. 13.5.

La fase preliminare mostra come l'applicazione della teoria del Vettore qualità sia più agevole; infatti alla difficoltà della determinazione del tempo di autocorrelazione

del brano (che richiede uno studio preliminare tutt'altro che snello e presuppone di aver ipotizzato l'esatta performance messa in scena) prevista da Ando, la teoria qui proposta sostituisce il più immediato calcolo della superficie totale della sala.

Anche la campagna di misure prevista dallo studioso giapponese risulta più complessa, prevedendo l'uso della testa artificiale per la determinazione della IACC, strumentazione della quale si può fare meno utilizzando il LF quale parametro di spazialità, come previsto nella metodologia del Vettore qualità.

Il calcolo vero e proprio degli indici risulta abbastanza semplice in entrambi i casi: la procedura per la definizione del Vettore qualità, però, prevede la determinazione delle grandezze fisiche oggettive che inducono le sensazioni soggettive e dei valori limite dei parametri oggettivi cui queste corrispondono; analisi che può risultare particolarmente ostica e complessa.

Nonostante questo, il risultato finale ottenuto con la presente teoria risulta essere più significativo: infatti l'indice di preferenza di Ando, non avendo un campo di variabilità, ma solo un valore ottimale, può essere interpretato solo nel confronto tra diverse sale. Il Vettore qualità, invece, fornisce una doppia informazione finale: se l'acustica della sala cade nell'intervallo di qualità ottimale o meno e anche la distanza della condizione reale da quella ottimale. Avendo un intervallo di qualità definito da limiti precisi, infatti, c'è la possibilità di assegnare ad ogni sala un giudizio di qualità dal valore "assoluto".

Ma la differenza maggiore tra le due procedure sta nel loro "carattere".

La teoria di Ando si può definire "chiusa", in quanto i parametri e i pesi da lui identificati sono imm modificabili: la teoria non può essere applicata con altri parametri acustici oggettivi. La metodologia di calcolo del Vettore qualità è invece una teoria "aperta": si può scegliere un numero teoricamente infinito di parametri per analizzare altri aspetti del campo sonoro senza invalidare la teoria.

PROCEDURA DI APPLICAZIONE DELLA TEORIA DI ANDO	
1. FASE PRELIMINARE	
<i>a) Analisi delle caratteristiche geometriche della sala: determinazione delle distanze e del volume;</i>	
<i>b) Scelta dei ricettori;</i>	
<i>c) Scelta della potenza sonora adeguata della sorgente;</i>	
<i>d) Determinazione del tempo di autocorrelazione del brano scelto.</i>	
2. CAMPAGNA DI MISURE	
Strumentazione necessaria:	
<i>a) Fonometro bicanale o quadricanale per la determinazione del livello di pressione sonora;</i>	
<i>b) Registratore digitale “A-format” o “B-format” a 4 canali;</i>	
<i>c) Sonda antropomorfa (Testa artificiale) per la determinazione della IACC;</i>	
<i>d) Appositi software di elaborazione dati.</i>	
EVENTUALE FASE DI SIMULAZIONE <i>a) Costruzione del modello di simulazione tridimensionale dell’ambiente da analizzare;</i> <i>b) Scelta dei materiali di finitura, posizionamento delle sorgenti sonore e dei ricettori;</i> <i>c) Taratura del modello;</i> <i>d) Simulazioni del campo sonoro.</i>	
3. PROCEDURA DI CALCOLO	
<i>a) Calcolo dei valori di riferimento (preferiti) dei parametri considerati;</i>	
<i>b) Calcolo dei valori normalizzati;</i>	
<i>c) Calcolo degli indici di preferenza parziali;</i>	
<i>d) Calcolo dell’indice di preferenza globale.</i>	

Tab. 13.3 – Procedura di applicazione della teoria di Ando

PROCEDURA DI APPLICAZIONE DELLA TEORIA DEL VETTORE QUALITA'	
1. FASE PRELIMINARE	
a)	<i>Analisi delle caratteristiche geometriche della sala: determinazione delle distanze, della superficie complessiva della sala e del volume;</i>
b)	<i>Scelta dei ricettori;</i>
c)	<i>Scelta della potenza sonora adeguata della sorgente.</i>
2. CAMPAGNA DI MISURE	
Strumentazione necessaria:	
a)	<i>Fonometro bicanale o quadricanale per la determinazione del livello di pressione sonora;</i>
b)	<i>Registratore digitale "A-format" o "B-format" a 4 canali;</i>
c)	<i>Appositi software di elaborazione dati.</i>
EVENTUALE FASE DI SIMULAZIONE a) <i>Costruzione del modello di simulazione tridimensionale dell'ambiente da analizzare;</i> b) <i>Scelta dei materiali di finitura, posizionamento delle sorgenti sonore e dei ricettori;</i> c) <i>Taratura del modello;</i> d) <i>Simulazioni del campo sonoro.</i>	
3. PROCEDURA DI CALCOLO	
a)	<i>Determinazione delle grandezze fisiche oggettive relative ad ogni parametro scelto;</i>
b)	<i>Determinazione dei valori ottimale, minimo e massimo di ogni parametro;</i>
c)	<i>Calcolo dei valori ottimale, minimo e massimo di ogni grandezza fisica oggettiva;</i>
d)	<i>Calcolo delle variabili ridotte (effettiva, ottimale, minima e massima);</i>
e)	<i>Calcolo del Vettore qualità effettivo, ottimale, massimo e minimo;</i>
f)	<i>Calcolo del ΔV.</i>

Tab. 13.4 – Procedura di applicazione della teoria del Vettore qualità

ANDO	VETTORE QUALITA'
Fase preliminare: determinazione del tempo di autocorrelazione	Fase preliminare: determinazione della superficie totale della sala
Utilizzo della testa artificiale per la determinazione della IACC	Catena di misura più snella: non c'è bisogno della testa artificiale
Calcolo dei valori di riferimento	Difficoltà nella determinazione delle grandezze fisiche oggettive e dei valori limite dei parametri
I parametri scelti da Ando sono immutabili: la teoria non può essere applicata con altri parametri acustici oggettivi: teoria "chiusa"	Teoria "aperta": si può scegliere un numero teoricamente infinito di parametri per analizzare altri aspetti del campo sonoro senza invalidare la teoria
Calcolo dell'indice di preferenza globale: valore che può essere interpretato solo nel confronto tra diverse sale	Doppia informazione finale: qualità o meno e distanza dalla condizione ottimale. Avendo un intervallo di qualità definito da limiti precisi, c'è la possibilità di assegnare ad ogni sala un giudizio di qualità dal valore "assoluto".

Tab. 13.5 – Vantaggi (in giallo) e svantaggi delle due procedure

13.2. Possibili sviluppi futuri

L'informazione contenuta nelle misure eseguite non viene sfruttata completamente dalla procedura di valutazione della qualità acustica proposta.

Il primo importante aspetto che dovrebbe essere preso in considerazione è la composizione spettrale della risposta all'impulso della sala. Lo stesso Ando aveva già sottolineato come una qualunque variazione spettrale dell'energia sonora proveniente dalle riflessioni, rispetto a quella del campo diretto, riduca la preferenza soggettiva. Pertanto andrebbe individuato un descrittore fisico della componente spettrale ed andrebbe inserito nel calcolo del Vettore qualità, individuando anche la grandezza fisica che genera lo stimolo associato e i relativi limiti di qualità.

In secondo luogo, la procedura proposta andrebbe validata con analisi statistiche dei giudizi di preferenza ottenuti da un certo numero di soggetti, cui verranno presentati dei test di valutazione della qualità delle sale studiate. In questo modo, infatti, non solo la metodologia risulterebbe compatibile con quella di Ando (il che è stato dimostrato nel presente lavoro), ma risulterebbe coerente con i reali giudizi soggettivi espressi dagli ascoltatori.

Infine c'è la necessità di condurre una ricerca parallela, al fine di determinare in maniera univoca e precisa le grandezze fisiche oggettive che generano le sensazioni soggettive descritte dai diversi parametri soggettivi; analogamente andrebbe condotto uno studio sperimentale accurato per identificare in maniera precisa i limiti del campo di qualità acustica di ciascun parametro.

APPENDICE A – RISULTATI COMPLETI DELLE SIMULAZIONI

Nel Capitolo 9 sono stati presentati i soli risultati delle simulazioni utilizzati per la valutazione psicoacustica delle sale: in questa appendice viene riportata la documentazione completa, con i valori di tutti i parametri acustici in bande d'ottava da 63 a 8000 Hz.

Va sottolineato come tre valori siano stati appositamente implementati nel software di simulazione attraverso i relativi algoritmi. In particolare:

- *SPL80*: rappresenta il livello sonoro calcolato nei primi 80 ms; tale valore si è reso necessario per il calcolo dell'energia l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms (E_{80}), indispensabile nel calcolo della grandezza fisica oggettiva di cui è espressione il Lateral fraction;
- *Sd* e *Sr*, che rappresentano, rispettivamente, l'ampiezza del segnale diretto calcolato nei primi 5 ms e l'ampiezza del segnale riflesso calcolato tra 5 e 50 ms. Tali grandezze sono espresse in dB. Queste si sono rese necessarie per la determinazione dell'Ampiezza equivalente delle riflessioni, valutata secondo quanto esposto dal Prof. Angelo Farina, come:

$$A_{eq} = 10^{(S_d - S_r)/20} \quad (A.1)$$

A.1. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

In Tab. A.1 vengono riportati i dati completi delle simulazioni per tutti i punti di ricezione considerati.

Receiver Number: 1 Posto 110 - Misura 6 (x,y,z) = (2250.50,1066.00,1.63)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	0.78	0.94	1.11	1.19	1.25	1.2	1.11	0.73
T(15)	0.96	1.05	1.17	1.29	1.42	1.38	1.27	0.74
T(20)	0.97	1.04	1.18	1.32	1.46	1.42	1.31	0.76
XI(T(20))	0.2	0.2	0.1	0.5	1	1	1.4	1.1
T(30)	0.97	1.05	1.2	1.37	1.52	1.47	1.36	0.79
XI(T(30))	0.1	0.2	0.2	0.8	0.8	0.8	1	1
Curvature(C)	0.4	1.2	1.7	3.6	3.7	3.5	3.6	4
Ts	48	57	66	71	72	69	63	36
SPL	78	78.6	78.8	78.3	77.8	77.4	77	74.8

D(50)	0.67	0.61	0.56	0.53	0.53	0.54	0.57	0.71
C(7)	-3.4	-4.1	-4.2	-3.7	-3.2	-2.9	-2.6	-0.4
C(50)	3.1	1.9	1	0.6	0.5	0.7	1.1	4
C(80)	6.4	4.9	3.8	3.4	3.3	3.6	4.1	7.6
U(50)	3.1	1.9	1	0.6	0.5	0.7	1.1	4
U(80)	6.4	4.9	3.8	3.4	3.3	3.6	4.1	7.6
LF(80)	0.363	0.363	0.355	0.338	0.322	0.324	0.322	0.28
LFC(80)	0.453	0.457	0.445	0.421	0.395	0.393	0.389	0.34
Diffusivity(ss)	3.5	3.8	2.9	2.1	1.6	1.6	1.6	1.3
Echo(Dietsch)	0.47	0.49	0.47	0.48	0.5	0.5	0.5	0.48
Sd	72.9	73.1	73.2	73	72.9	72.7	72.5	71.5
Sr	76.3	76.5	76.2	75.6	75	74.7	74.5	73.3
SPL80	77.1	77.4	77.3	76.7	76.1	75.8	75.5	74.1
IACCearly	0.280	0.365	0.218	0.430	0.528	0.343	0.084	0.071
IACClate	0.457	0.527	0.348	0.493	0.501	0.207	0.074	0.075
IACCtotal	0.280	0.362	0.215	0.433	0.526	0.330	0.082	0.068
SPL(A)	84.2							
SPL(Lin)	86.8							
SPL(C)	86.4							
STI	0.59							
STI(Female)	0.58							
STI(Male)	0.58							
RASTI	0.56							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrage)	1.4							
LF(80_Avrage)	0.344							
Lj(Avrage)	-0.6							
BR(SPL)	0.7							
SIL	77.6							
AI	1							
Alcons(STI)	7.71							
Density(reflections)	627.58							
Receiver Number: 2 Posto 112 - Misura 8 (x,y,z) = (2251.00,1066.00,1.63)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	0.91	1.04	1.17	1.23	1.28	1.24	1.15	0.78
T(15)	0.95	1.04	1.16	1.3	1.44	1.4	1.29	0.75
T(20)	0.95	1.03	1.17	1.33	1.48	1.44	1.33	0.77
XI(T(20))	0.3	0.4	0.1	0.6	1	0.9	1.1	0.8
T(30)	0.96	1.05	1.19	1.38	1.53	1.49	1.37	0.8
XI(T(30))	0.2	0.4	0.2	0.7	0.8	0.9	0.9	1

Curvature(C)	1.3	1.9	1.9	3.5	3.6	3.6	3.4	4
Ts	59	70	80	84	85	81	75	44
SPL	76.8	77.6	77.9	77.4	76.9	76.6	76.1	73.6
D(50)	0.57	0.5	0.45	0.44	0.44	0.46	0.48	0.64
C(7)	-4.8	-5.8	-6.2	-5.7	-5	-4.6	-4.2	-1.8
C(50)	1.3	-0.1	-0.9	-1.1	-1.1	-0.8	-0.3	2.4
C(80)	4.4	3.2	2.2	2.1	2.1	2.4	2.9	6.2
U(50)	1.3	-0.1	-0.9	-1.1	-1.1	-0.8	-0.3	2.4
U(80)	4.4	3.2	2.2	2.1	2.1	2.4	2.9	6.2
LF(80)	0.397	0.404	0.421	0.417	0.404	0.4	0.393	0.341
LFC(80)	0.484	0.498	0.512	0.5	0.48	0.471	0.462	0.402
Diffusivity(ss)	3.5	3.9	2.9	2	1.5	1.5	1.5	1.2
Echo(Dietsch)	0.54	0.56	0.54	0.54	0.55	0.56	0.56	0.54
Sd	70.8	70.8	70.7	70.7	70.7	70.7	70.4	69.6
Sr	74.3	74.5	74.4	73.9	73.3	73.2	72.9	71.6
SPL80	75.4	75.9	75.8	75.4	74.9	74.6	74.3	72.7
IACCearly	0.081	0.070	0.393	0.403	0.508	0.318	0.122	0.107
IACClate	0.343	0.504	0.280	0.393	0.489	0.194	0.098	0.070
IACCtotal	0.080	0.069	0.389	0.402	0.507	0.306	0.115	0.100
SPL(A)	83.3							
SPL(Lin)	85.8							
SPL(C)	85.4							
STI	0.55							
STI(Female)	0.53							
STI(Male)	0.53							
RASTI	0.52							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrage)	1.5							
LF(80_Avrage)	0.411							
Lj(Avrage)	-0.4							
BR(SPL)	0.5							
SIL	76.8							
AI	1							
Alcons(STI)	9.74							
Density(reflections)	620.71							
Receiver Number: 3 Posto 111 - Misura 7 (x,y,z) = (2245.00,1066.00,1.63)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	0.96	1.09	1.2	1.21	1.26	1.22	1.13	0.78
T(15)	0.96	1.05	1.18	1.32	1.45	1.41	1.3	0.74
T(20)	0.97	1.07	1.19	1.34	1.48	1.44	1.33	0.77

XI(T(20))	0.5	0.4	0.2	0.5	0.6	0.8	0.9	1.5
T(30)	0.99	1.09	1.21	1.36	1.5	1.47	1.36	0.8
XI(T(30))	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	1.2
Curvature(C)	2.3	1.7	1.7	2	1.5	2.3	2.6	4.3
Ts	57	69	79	80	81	77	71	41
SPL	76.6	77.4	77.7	77.2	76.6	76.2	75.7	73.3
D(50)	0.6	0.52	0.47	0.47	0.47	0.49	0.51	0.66
C(7)	-2	-3.3	-3.9	-3.6	-3.2	-2.9	-2.6	0
C(50)	1.8	0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	0.1	2.9
C(80)	4.7	3.4	2.5	2.5	2.5	2.8	3.2	6.7
U(50)	1.8	0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	0.1	2.9
U(80)	4.7	3.4	2.5	2.5	2.5	2.8	3.2	6.7
LF(80)	0.211	0.23	0.259	0.277	0.293	0.298	0.294	0.254
LFC(80)	0.295	0.322	0.35	0.357	0.364	0.368	0.365	0.314
Diffusivity(ss)	2.6	3.1	2.6	2	1.6	1.5	1.5	1.2
Echo(Dietsch)	0.54	0.54	0.56	0.57	0.57	0.56	0.55	0.53
Sd	72.5	72.5	72.3	72	71.7	71.5	71.2	70.3
Sr	74.4	74.6	74.4	73.9	73.3	73.1	72.8	71.5
SPL80	75.4	75.8	75.7	75.3	74.7	74.4	74	72.5
IACCearly	0.321	0.567	0.448	0.486	0.395	0.301	0.110	0.052
IACClate	0.334	0.370	0.299	0.461	0.382	0.154	0.065	0.072
IACCtotal	0.306	0.557	0.439	0.482	0.394	0.289	0.102	0.052
SPL(A)	83							
SPL(Lin)	85.5							
SPL(C)	85.2							
STI	0.56							
STI(Female)	0.55							
STI(Male)	0.55							
RASTI	0.53							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrage)	1.4							
LF(80_Avrage)	0.265							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	0.6							
SIL	76.4							
AI	1							
Alcons(STI)	9.02							
Density(reflections)	558.15							
Receiver Number: 4 Simulato 1 (x,y,z) = (2247.00,1072.00,2.12)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

EDT	0.96	1.04	1.2	1.3	1.37	1.33	1.24	0.79
T(15)	0.91	1.01	1.19	1.35	1.47	1.43	1.33	0.78
T(20)	0.93	1.02	1.19	1.37	1.51	1.47	1.36	0.8
XI(T(20))	0.3	0.1	0	0.4	0.7	0.7	0.8	0.4
T(30)	0.94	1.04	1.21	1.39	1.53	1.5	1.39	0.81
XI(T(30))	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	0.5	0.3
Curvature(C)	1.8	1.9	1.4	1.6	1	1.7	2.3	2.1
Ts	35	44	59	68	72	68	62	32
SPL	80.4	81.1	81.8	82	82	81.8	81.5	79.9
D(50)	0.75	0.69	0.61	0.56	0.55	0.57	0.59	0.75
C(7)	0.9	-0.4	-1.8	-2.2	-2.1	-1.8	-1.4	1
C(50)	4.7	3.5	1.9	1.1	0.9	1.2	1.6	4.8
C(80)	7	5.7	4.2	3.5	3.3	3.7	4.1	8
U(50)	4.7	3.5	1.9	1.1	0.9	1.2	1.6	4.8
U(80)	7	5.7	4.2	3.5	3.3	3.7	4.1	8
LF(80)	0.136	0.159	0.193	0.207	0.204	0.191	0.184	0.146
LFC(80)	0.194	0.226	0.267	0.279	0.274	0.26	0.252	0.204
Diffusivity(ss)	1.6	1.8	1.7	1.5	1.3	1.3	1.2	0.9
Echo(Dietsch)	0.49	0.5	0.51	0.53	0.53	0.52	0.52	0.49
Sd	77.8	77.8	77.8	77.8	77.8	77.8	77.7	77.3
Sr	79.2	79.5	79.7	79.5	79.4	79.3	79.2	78.6
SPL80	79.6	80	80.4	80.4	80.3	80.2	80	79.2
IACCearly	0.252	0.261	0.432	0.580	0.255	0.404	0.268	0.218
IACClate	0.171	0.387	0.264	0.519	0.367	0.117	0.085	0.055
IACCtotal	0.247	0.262	0.426	0.576	0.261	0.379	0.251	0.214
SPL(A)	88.5							
SPL(Lin)	90.4							
SPL(C)	90							
STI	0.61							
STI(Female)	0.59							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.58							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrage)	1.5							
LF(80_Avrage)	0.191							
Lj(Avrage)	-0.8							
BR(SPL)	-0.6							
SIL	81.8							
AI	1							
Alcons(STI)	6.97							
Density(reflections)	674.04							
Receiver Number: 5 Simulato 2					(x,y,z) = (2254.00,1070.00,2.22)			

Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.02	1.09	1.2	1.25	1.32	1.29	1.21	0.83
T(15)	0.94	1.03	1.17	1.32	1.46	1.41	1.3	0.76
T(20)	0.95	1.04	1.19	1.36	1.5	1.46	1.34	0.77
XI(T(20))	0.6	0.4	0.4	1.1	1.1	1.2	1.2	0.7
T(30)	0.98	1.07	1.21	1.38	1.51	1.48	1.38	0.8
XI(T(30))	0.7	0.6	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9
Curvature(C)	2.9	2.7	1.4	1.3	0.9	1.8	2.5	3.8
Ts	49	56	68	72	75	73	67	36
SPL	78.6	79.5	79.9	79.4	79	78.7	78.2	76.2
D(50)	0.61	0.57	0.52	0.51	0.51	0.51	0.54	0.7
C(7)	0.3	-0.6	-1.9	-2.2	-2.1	-2	-1.7	0.9
C(50)	2	1.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	3.7
C(80)	5.2	4.3	3.2	2.9	2.8	2.9	3.4	7
U(50)	2	1.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	3.7
U(80)	5.2	4.3	3.2	2.9	2.8	2.9	3.4	7
LF(80)	0.189	0.205	0.23	0.24	0.241	0.236	0.229	0.191
LFC(80)	0.247	0.275	0.303	0.311	0.311	0.307	0.299	0.252
Diffusivity(ss)	3.2	3.5	3	2.3	1.9	2	1.9	1.7
Echo(Dietsch)	0.55	0.54	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.48
Sd	75.7	76.1	75.8	75.2	74.8	74.5	74.3	73.6
Sr	76.4	77	77	76.5	76	75.8	75.5	74.6
SPL80	77.4	78.1	78.2	77.7	77.2	76.9	76.6	75.4
IACCearly	0.509	0.393	0.167	0.268	0.280	0.471	0.317	0.120
IACClate	0.201	0.341	0.264	0.276	0.167	0.280	0.128	0.078
IACCtotal	0.508	0.391	0.165	0.266	0.272	0.460	0.304	0.117
SPL(A)	85.4							
SPL(Lin)	87.8							
SPL(C)	87.4							
STI	0.59							
STI(Female)	0.58							
STI(Male)	0.57							
RASTI	0.56							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrerage)	1.4							
LF(80_Avrerage)	0.229							
Lj(Avrerage)	-0.7							
BR(SPL)	0.5							
SIL	78.8							
AI	1							
Alcons(STI)	7.72							

Density(reflections)	600.23							
Receiver Number: 6 Simulato 3 (x,y,z) = (2246.00,1069.00,2.27)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	0.98	1.08	1.21	1.27	1.32	1.29	1.21	0.83
T(15)	0.94	1.04	1.19	1.32	1.45	1.41	1.3	0.76
T(20)	0.97	1.06	1.2	1.36	1.5	1.45	1.34	0.78
XI(T(20))	0.6	0.4	0.2	0.7	0.7	0.7	0.9	0.8
T(30)	0.98	1.07	1.22	1.38	1.52	1.49	1.38	0.8
XI(T(30))	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7
Curvature(C)	1.8	1.1	1.4	2	1.9	2.4	3.1	3.1
Ts	53	62	74	77	79	75	69	37
SPL	77.6	78.5	79.1	78.9	78.6	78.3	77.8	75.8
D(50)	0.59	0.54	0.49	0.49	0.5	0.51	0.53	0.69
C(7)	-1.4	-2.1	-3.1	-3	-2.8	-2.4	-2	0.6
C(50)	1.6	0.6	-0.2	-0.2	-0.1	0.2	0.6	3.5
C(80)	4.7	3.7	2.7	2.5	2.5	2.8	3.3	6.9
U(50)	1.6	0.6	-0.2	-0.2	-0.1	0.2	0.6	3.5
U(80)	4.7	3.7	2.7	2.5	2.5	2.8	3.3	6.9
LF(80)	0.197	0.212	0.26	0.274	0.275	0.265	0.255	0.208
LFC(80)	0.267	0.284	0.33	0.341	0.338	0.327	0.316	0.26
Diffusivity(ss)	2.3	2.6	2.1	1.7	1.4	1.4	1.4	1.1
Echo(Dietsch)	0.58	0.58	0.58	0.56	0.55	0.54	0.54	0.51
Sd	73.9	74.3	74.3	74.2	74	73.9	73.7	73.1
Sr	75.4	75.8	76	75.8	75.6	75.4	75.1	74.2
SPL80	76.4	77	77.2	77	76.7	76.5	76.2	75
IACCearly	0.387	0.243	0.5	0.344	0.463	0.294	0.186	0.084
IACClate	0.328	0.587	0.147	0.388	0.388	0.174	0.086	0.083
IACCtotal	0.384	0.245	0.489	0.346	0.457	0.269	0.173	0.082
SPL(A)	85							
SPL(Lin)	87.2							
SPL(C)	86.8							
STI	0.57							
STI(Female)	0.56							
STI(Male)	0.56							
RASTI	0.54							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrerage)	1.5							
LF(80_Avrerage)	0.255							
Lj(Avrerage)	-0.5							
BR(SPL)	0							
SIL	78.4							

AI	1							
Alcons(STI)	8.42							
Density(reflections)	618.36							
Receiver Number: 7 Simulato 4 (x,y,z) = (2253.00,1063.00,2.59)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	0.98	1.07	1.18	1.21	1.26	1.22	1.13	0.77
T(15)	0.96	1.05	1.18	1.3	1.43	1.39	1.28	0.75
T(20)	0.97	1.06	1.18	1.32	1.47	1.43	1.31	0.76
XI(T(20))	0.4	0	0	0.6	0.7	0.9	1	0.9
T(30)	0.97	1.07	1.22	1.38	1.51	1.47	1.37	0.79
XI(T(30))	0.3	0.4	0.8	0.9	0.6	0.7	1	0.9
Curvature(C)	-0.6	0.9	3.5	4.2	2.8	3.1	4	3.7
Ts	72	82	92	92	92	88	81	50
SPL	74.9	76	76.3	75.7	75	74.6	74	71.1
D(50)	0.46	0.4	0.36	0.38	0.39	0.41	0.43	0.59
C(7)	-5.5	-6.8	-7.3	-6.5	-5.7	-5.3	-4.9	-2.3
C(50)	-0.7	-1.8	-2.5	-2.2	-1.9	-1.6	-1.2	1.5
C(80)	3.3	2.3	1.4	1.4	1.5	1.8	2.3	5.5
U(50)	-0.7	-1.8	-2.5	-2.2	-1.9	-1.6	-1.2	1.5
U(80)	3.3	2.3	1.4	1.4	1.5	1.8	2.3	5.5
LF(80)	0.317	0.333	0.366	0.385	0.388	0.386	0.381	0.33
LFC(80)	0.416	0.44	0.469	0.475	0.466	0.46	0.453	0.392
Diffusivity(ss)	3.9	4.6	3.8	2.8	2	2	2	1.6
Echo(Dietsch)	0.58	0.58	0.59	0.58	0.6	0.59	0.59	0.58
Sd	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.2	67.9	66.8
Sr	71.5	72	71.9	71.4	70.9	70.7	70.4	68.8
SPL80	73.3	73.9	74	73.3	72.7	72.4	72	70
IACCearly	0.840	0.852	0.269	0.389	0.581	0.177	0.102	0.086
IACClate	0.289	0.269	0.315	0.423	0.409	0.207	0.106	0.070
IACCtotal	0.837	0.845	0.269	0.390	0.564	0.172	0.098	0.083
SPL(A)	81.3							
SPL(Lin)	84							
SPL(C)	83.6							
STI	0.53							
STI(Female)	0.52							
STI(Male)	0.52							
RASTI	0.5							
STI(expected)	0.54							
T(30_Avrage)	1.4							
LF(80_Avrage)	0.368							

Lj(Avrerage)	-0.3							
BR(SPL)	0.8							
SIL	74.8							
AI	1							
Alcons(STI)	10.65							
Density(reflections)	561.69							
Receiver Number: 8 Simulato 5 (x,y,z) = (2248.00,1062.00,2.64)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	0.91	1.04	1.17	1.21	1.25	1.22	1.13	0.75
T(15)	0.98	1.06	1.18	1.31	1.44	1.41	1.29	0.75
T(20)	0.98	1.06	1.18	1.33	1.47	1.43	1.32	0.77
XI(T(20))	0.2	0.2	0	0.3	0.5	0.5	0.8	1
T(30)	0.97	1.06	1.23	1.39	1.52	1.47	1.36	0.8
XI(T(30))	0.4	0.2	0.9	0.9	0.7	0.4	0.6	0.9
Curvature(C)	-1.5	-0.2	3.8	4.3	3.2	2.6	2.7	3.6
Ts	63	73	84	87	88	85	79	48
SPL	75.4	76.3	76.6	75.8	75	74.5	74	71.1
D(50)	0.59	0.51	0.45	0.43	0.42	0.44	0.46	0.61
C(7)	-6.4	-7.5	-7.9	-7	-6.1	-5.6	-5.2	-2.8
C(50)	1.5	0.2	-0.9	-1.2	-1.3	-1.1	-0.8	1.9
C(80)	4.7	3.4	2.3	2.1	2	2.2	2.7	6.1
U(50)	1.5	0.2	-0.9	-1.2	-1.3	-1.1	-0.8	1.9
U(80)	4.7	3.4	2.3	2.1	2	2.2	2.7	6.1
LF(80)	0.392	0.399	0.411	0.403	0.397	0.392	0.388	0.341
LFC(80)	0.495	0.509	0.517	0.498	0.478	0.467	0.461	0.406
Diffusivity(ss)	4.8	5.3	4.3	3.1	2.3	2.2	2.2	2
Echo(Dietsch)	0.51	0.52	0.54	0.56	0.57	0.56	0.56	0.53
Sd	68.1	68.1	68	68	68	67.9	67.6	66.5
Sr	73.1	73.4	73.1	72.1	71.3	70.9	70.6	69
SPL80	74.1	74.7	74.6	73.7	72.9	72.5	72.1	70.2
IACCearly	0.638	0.142	0.299	0.339	0.621	0.340	0.099	0.067
IACClate	0.337	0.245	0.206	0.361	0.499	0.275	0.088	0.086
IACCtotal	0.637	0.141	0.292	0.340	0.611	0.334	0.092	0.066
SPL(A)	81.3							
SPL(Lin)	84.1							
SPL(C)	83.8							
STI	0.54							
STI(Female)	0.53							
STI(Male)	0.53							
RASTI	0.52							

STI(expected)	0.54							
T(30_Avrerage)	1.5							
LF(80_Avrerage)	0.402							
Lj(Avrerage)	-0.4							
BR(SPL)	1							
SIL	74.8							
AI	1							
Alcons(STI)	9.96							
Density(reflections)	573.75							

Tab. A.1 –Dati completi delle simulazione per tutti i punti di ricezione considerati

A.2. Il Teatro Olimpico di Roma

In Tab. A.2 vengono riportati i dati completi delle simulazioni.

Receiver Number: 1 C12		(x,y,z) = (24.00,-4.00,2.01)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.06	2.18	1.52	1.29	1.31	1.3	1.18	0.89
T(15)	1.98	2.08	1.39	1.1	0.99	0.99	0.92	0.7
T(20)	1.98	2.06	1.38	1.09	0.97	0.97	0.91	0.68
XI(T(20))	0.1	0.1	0.2	0.4	4.2	3	2.7	10.9
T(30)	*	*	1.37	1.09	0.97	0.97	0.9	0.65
XI(T(30))	*	*	0.1	0.2	1.4	1	1	3.7
Curvature(C)	*	*	-0.9	-0.6	-0.8	-0.5	-1.2	-3.5
Ts	136	146	87	53	41	42	39	21
SPL	77	77.4	74.9	72.7	72.1	72.1	71.9	70.4
D(50)	0.34	0.32	0.49	0.66	0.71	0.71	0.72	0.84
C(7)	-6.4	-6.8	-3.6	0.1	1.4	1.3	1.2	3.3
C(50)	-2.9	-3.3	-0.3	2.8	4	3.9	4.2	7.3
C(80)	-1.1	-1.6	1.4	3.8	4.6	4.6	5.2	8.6
U(50)	-2.9	-3.3	-0.3	2.8	4	3.9	4.2	7.3
U(80)	-1.1	-1.6	1.4	3.8	4.6	4.6	5.2	8.6
LF(80)	0.109	0.109	0.079	0.036	0.026	0.032	0.039	0.033
LFC(80)	0.205	0.207	0.161	0.085	0.065	0.072	0.085	0.072
Diffusivity(ss)	2.2	2.6	2.1	1.8	1.7	1.6	1.5	0.9
Echo(Dietsch)	0.59	0.59	0.62	0.75	0.85	0.8	0.72	0.66
Sd	69.8	69.8	69.8	69.7	69.7	69.7	69.5	68.7
Sr	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1	7

SPL80	73.4	73.5	72.6	71.2	70.8	70.8	70.8	69.8
IACCearly	0.251	0.214	0.200	0.302	0.228	0.426	0.395	0.510
IACClate	0.288	0.473	0.161	0.358	0.186	0.119	0.111	0.084
IACCtotal	0.251	0.216	0.198	0.303	0.223	0.413	0.377	0.501
SPL(A)	79							
SPL(Lin)	83.3							
SPL(C)	82.9							
STI	0.63							
STI(Female)	0.67							
STI(Male)	0.66							
RASTI	0.65							
RASTI	0.65							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.063							
Lj(Avrage)	-0.6							
BR(SPL)	3.8							
SIL	72.2							
AI	1							
Alcons(STI)	6.43							
Density(reflections)	1002.39							
Receiver Number: 2 B22 (x,y,z) = (26.00,-8.00,2.01)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.06	2.18	1.5	1.34	1.42	1.39	1.29	0.78
T(15)	1.99	2.08	1.39	1.06	0.97	0.98	0.93	0.74
T(20)	1.98	2.06	1.38	1.08	0.95	0.96	0.91	0.69
XI(T(20))	0.1	0.1	0.1	1.2	6.3	5.8	6.4	17
T(30)	*	*	1.38	1.08	0.96	0.96	0.9	0.65
XI(T(30))	*	*	0.1	0.4	2.1	1.9	2.1	6.4
Curvature(C)	*	*	-0.4	-0.2	0.4	0	-0.5	-4.9
Ts	140	149	90	57	45	45	42	23
SPL	77	77.3	74.7	72.3	71.5	71.5	71.4	69.7
D(50)	0.34	0.32	0.48	0.65	0.71	0.71	0.72	0.85
C(7)	-7.4	-7.8	-4.6	-0.9	0.5	0.5	0.3	2.4
C(50)	-3	-3.3	-0.3	2.6	4	3.9	4.2	7.4
C(80)	-1.3	-1.6	1.3	3.6	4.6	4.6	5.2	8.8
U(50)	-3	-3.3	-0.3	2.6	4	3.9	4.2	7.4
U(80)	-1.3	-1.6	1.3	3.6	4.6	4.6	5.2	8.8
LF(80)	0.205	0.203	0.167	0.097	0.074	0.08	0.093	0.079
LFC(80)	0.328	0.33	0.278	0.175	0.137	0.142	0.162	0.139
Diffusivity(ss)	2.5	2.9	2.2	1.8	1.5	1.5	1.4	0.8

Echo(Dietsch)	0.6	0.59	0.56	0.59	0.63	0.6	0.56	0.51
Sd	68.8	68.8	68.8	68.8	68.8	68.7	68.5	67.7
Sr	7.2	7.2	7.2	7	7	7	7	6.9
SPL80	73.3	73.4	72.3	70.7	70.2	70.2	70.2	69.1
IACCearly	0.184	0.299	0.504	0.505	0.343	0.340	0.178	0.283
IACClate	0.335	0.258	0.103	0.173	0.252	0.158	0.113	0.084
IACCtotal	0.183	0.291	0.456	0.479	0.338	0.330	0.169	0.274
SPL(A)	78.5							
SPL(Lin)	83							
SPL(C)	82.6							
STI	0.62							
STI(Female)	0.66							
STI(Male)	0.64							
RASTI	0.63							
RASTI	0.63							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.135							
Lj(Avrage)	-0.6							
BR(SPL)	4.1							
SIL	71.7							
AI	1							
Alcons(STI)	6.77							
Density(reflections)	965.25							
Receiver Number: 3 F9 (x,y,z) = (20.00,-3.00,2.15)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.13	2.25	1.6	1.37	1.28	1.31	1.25	1.2
T(15)	1.96	2.05	1.38	1.09	0.96	0.97	0.89	0.76
T(20)	1.94	2.02	1.38	1.08	0.95	0.96	0.89	0.71
XI(T(20))	0.2	0.1	0.1	0.2	0.9	0.7	0.6	18.5
T(30)	*	*	1.35	1.08	0.97	0.97	0.89	0.67
XI(T(30))	*	*	0.3	0.1	0.5	0.4	0.3	7.9
Curvature(C)	*	*	-1.8	-0.6	1.8	1.4	0.5	-5.5
Ts	159	168	106	69	54	54	51	27
SPL	75.4	75.9	73.2	71.1	70.4	70.3	70	67.9
D(50)	0.24	0.22	0.37	0.54	0.62	0.61	0.62	0.77
C(7)	-7.4	-7.6	-4.4	-0.9	0.7	0.8	0.9	3.7
C(50)	-5.1	-5.4	-2.3	0.8	2.1	2	2.2	5.3
C(80)	-3.1	-3.3	-0.5	1.9	2.9	2.9	3.4	6.8
U(50)	-5.1	-5.4	-2.3	0.8	2.1	2	2.2	5.3
U(80)	-3.1	-3.3	-0.5	1.9	2.9	2.9	3.4	6.8

LF(80)	0.085	0.094	0.068	0.04	0.028	0.029	0.033	0.026
LFC(80)	0.168	0.179	0.135	0.081	0.057	0.057	0.065	0.052
Diffusivity(ss)	3.3	3.7	3.2	2.7	2.5	2.4	2.2	1.3
Echo(Dietsch)	0.66	0.65	0.65	0.73	0.78	0.76	0.7	0.66
Sd	67.3	67.6	67.5	67.6	67.7	67.7	67.4	66.3
Sr	6.9	6.9	6.9	6.8	6.8	6.8	6.8	6.7
SPL80	70.6	70.9	70	68.9	68.6	68.5	68.3	67.1
IACCearly	0.542	0.464	0.520	0.543	0.490	0.573	0.585	0.251
IACClate	0.269	0.256	0.292	0.406	0.345	0.139	0.114	0.068
IACCtotal	0.532	0.454	0.492	0.528	0.487	0.561	0.566	0.239
SPL(A)	77.2							
SPL(Lin)	81.6							
SPL(C)	81.2							
STI	0.59							
STI(Female)	0.63							
STI(Male)	0.62							
RASTI	0.6							
RASTI	0.6							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.057							
Lj(Avrage)	-0.4							
BR(SPL)	3.9							
SIL	70.4							
AI	1							
Alcons(STI)	7.82							
Density(reflections)	981.11							
Receiver Number: 4 I22 (x,y,z) = (19.00,-7.00,2.19)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.11	2.23	1.57	1.23	1.07	1.05	0.98	0.79
T(15)	1.93	2.02	1.38	1.11	0.95	0.95	0.88	0.62
T(20)	1.92	2.01	1.37	1.1	0.99	0.98	0.89	0.63
XI(T(20))	0.1	0.1	0.1	0.9	2	1.4	0.7	2.2
T(30)	*	*	1.35	1.07	0.97	0.97	0.89	0.63
XI(T(30))	*	*	0.2	0.9	1.2	0.7	0.4	0.7
Curvature(C)	*	*	-1.1	-3.1	-2.3	-1	0.4	0.1
Ts	156	169	110	74	61	60	55	34
SPL	75.1	75.4	72.9	70.9	70.3	70.4	70	67.8
D(50)	0.24	0.2	0.33	0.48	0.53	0.54	0.56	0.7
C(7)	-7.7	-8.9	-6	-3.4	-2.2	-2.2	-1.9	0.5
C(50)	-5	-5.9	-3.1	-0.4	0.6	0.6	1	3.8

C(80)	-2.7	-3.4	-0.6	2	3.1	3.2	3.9	7.1
U(50)	-5	-5.9	-3.1	-0.4	0.6	0.6	1	3.8
U(80)	-2.7	-3.4	-0.6	2	3.1	3.2	3.9	7.1
LF(80)	0.16	0.179	0.165	0.16	0.165	0.17	0.163	0.131
LFC(80)	0.262	0.287	0.259	0.236	0.23	0.236	0.231	0.192
Diffusivity(ss)	3.7	4.1	3.8	3.6	3.3	3.3	3.1	2.1
Echo(Dietsch)	0.73	0.73	0.73	0.76	0.76	0.73	0.71	0.67
Sd	66.7	66	65.9	65.9	66.1	66.2	66	65
Sr	6.9	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.6
SPL80	70.5	70.4	69.6	68.8	68.6	68.7	68.5	67
IACCearly	0.162	0.195	0.321	0.389	0.314	0.425	0.404	0.262
IACClate	0.404	0.251	0.207	0.278	0.246	0.117	0.095	0.112
IACCtotal	0.162	0.195	0.315	0.383	0.314	3421	0.395	0.257
SPL(A)	77.1							
SPL(Lin)	81.4							
SPL(C)	81							
STI	0.56							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.58							
RASTI	0.58							
T(30_Avrerage)	1							
LF(80_Avrerage)	0.167							
Lj(Avrerage)	-0.3							
BR(SPL)	3.5							
SIL	70.4							
AI	1							
Alcons(STI)	8.93							
Density(reflections)	935.09							
Receiver Number: 5 M40				(x,y,z) = (19.00,-12.00,2.19)				
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.14	2.25	1.63	1.35	1.24	1.22	1.14	0.82
T(15)	1.95	2.03	1.37	1.09	0.93	0.94	0.9	0.71
T(20)	1.93	2.01	1.37	1.07	0.93	0.93	0.89	0.69
XI(T(20))	0.1	0.3	0	0.6	0.7	0.7	1	6.6
T(30)	*	*	1.35	1.07	0.95	0.95	0.89	0.65
XI(T(30))	*	*	0.2	0.9	1	0.6	0.5	3.4
Curvature(C)	*	*	-1.6	-0.3	2.8	1.6	-0.1	-4.7
Ts	156	167	109	74	63	62	56	33
SPL	74.1	74.6	71.9	69.8	68.8	68.9	68.4	65.8

D(50)	0.27	0.25	0.39	0.55	0.6	0.6	0.63	0.78
C(7)	-9.7	-10.2	-7.1	-4.5	-3.2	-3.4	-3.3	-1.4
C(50)	-4.3	-4.8	-2	0.9	1.7	1.8	2.3	5.4
C(80)	-2.5	-3	-0.3	2.2	2.9	3.1	3.9	7.3
U(50)	-4.3	-4.8	-2	0.9	1.7	1.8	2.3	5.4
U(80)	-2.5	-3	-0.3	2.2	2.9	3.1	3.9	7.3
LF(80)	0.154	0.162	0.145	0.125	0.119	0.123	0.123	0.107
LFC(80)	0.276	0.286	0.261	0.226	0.212	0.214	0.214	0.188
Diffusivity(ss)	2.8	3.2	2.6	2.2	2.1	2.1	2	1.4
Echo(Dietsch)	0.57	0.56	0.57	0.61	0.66	0.64	0.61	0.56
Sd	64	64	64	64	63.9	63.8	63.4	62
Sr	6.8	6.9	6.8	6.7	6.7	6.7	6.6	6.5
SPL80	69.6	69.9	68.7	67.7	67.1	67.1	66.9	65
IACCearly	0.165	0.356	0.450	0.582	0.675	0.388	0.413	0.303
IACClate	0.167	0.175	0.230	0.241	0.213	0.165	0.072	0.077
IACCtotal	0.161	0.334	0.420	0.545	0.658	0.374	0.389	0.288
SPL(A)	75.7							
SPL(Lin)	80.2							
SPL(C)	79.9							
STI	0.58							
STI(Female)	0.61							
STI(Male)	0.6							
RASTI	0.59							
RASTI	0.59							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.138							
Lj(Avrage)	-0.3							
BR(SPL)	4							
SIL	69							
AI	1							
Alcons(STI)	8.34							
Density(reflections)	858.82							
Receiver Number: 6 V18				(x,y,z) = (7.00,-6.00,2.60)				
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.92	2.03	1.5	1.14	0.81	0.84	0.73	0.46
T(15)	1.77	1.87	1.19	0.99	0.91	0.92	0.9	0.69
T(20)	1.78	1.87	1.24	0.92	0.85	0.86	0.83	0.66
XI(T(20))	1	0.6	2.8	11.8	6.3	7	8.7	6.7
T(30)	*	*	1.27	0.95	0.84	0.84	0.79	0.6
XI(T(30))	*	*	1.6	5	3.5	3.2	4.2	6

Curvature(C)	*	*	2.5	3	-1.6	-2.7	-4.5	-8
Ts	126	137	89	61	47	48	45	31
SPL	70.8	71.6	69.2	67.7	67.1	67.2	66.8	63.7
D(50)	0.4	0.36	0.49	0.62	0.7	0.7	0.72	0.82
C(7)	-8	-8.1	-5.6	-4	-3.2	-3.7	-3.9	-2.5
C(50)	-1.8	-2.5	-0.1	2	3.7	3.7	4.1	6.6
C(80)	-0.1	-0.7	2.1	4.7	6.5	6.5	7.1	10.4
U(50)	-1.8	-2.5	-0.1	2	3.7	3.7	4.1	6.6
U(80)	-0.1	-0.7	2.1	4.7	6.5	6.5	7.1	10.4
LF(80)	0.252	0.249	0.256	0.273	0.277	0.273	0.264	0.237
LFC(80)	0.347	0.344	0.336	0.345	0.35	0.355	0.356	0.325
Diffusivity(ss)	5.5	5.4	6.2	6.9	8	9.4	10.4	8.5
Echo(Dietsch)	0.59	0.58	0.57	0.58	0.6	0.58	0.54	0.5
Sd	62.1	62.8	62.6	62.2	62.2	62	61.4	59.2
Sr	6.7	6.7	6.6	6.6	6.6	6.6	6.5	6.3
SPL80	67.8	68.2	67.2	66.4	66.2	66.3	66	63.3
IACCearly	0.329	0.194	0.104	0.298	0.511	0.464	0.349	0.253
IACClate	0.265	0.240	0.091	0.222	0.277	0.169	0.091	0.085
IACCtotal	0.319	0.195	0.100	0.286	0.502	0.452	0.338	0.250
SPL(A)	73.8							
SPL(Lin)	77.6							
SPL(C)	77.3							
STI	0.62							
STI(Female)	0.66							
STI(Male)	0.65							
RASTI	0.63							
RASTI	0.63							
T(30_Avrage)	0.9							
LF(80_Avrage)	0.264							
Lj(Avrage)	-0.9							
BR(SPL)	3							
SIL	67.2							
AI	1							
Alcons(STI)	6.65							
Density(reflections)	482.93							
Receiver Number: 7 V36 (x,y,z) = (8.00,-8.00,2.57)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.05	2.13	1.68	1.42	1.23	1.22	1.13	0.77
T(15)	1.76	1.85	1.25	1.03	0.92	0.92	0.9	0.73
T(20)	1.76	1.87	1.26	1.02	0.88	0.9	0.86	0.68

XI(T(20))	0.5	0.3	0.6	3.1	4.8	3.8	5.1	5.5
T(30)	*	*	1.25	1.01	0.93	0.92	0.85	0.63
XI(T(30))	*	*	0.4	1.3	3.3	1.9	1.6	5.1
Curvature(C)	*	*	-0.9	-1.3	5.5	3.2	-0.8	-7.3
Ts	148	155	100	65	49	51	48	27
SPL	69.7	70.7	67.9	66	65.1	65.1	64.6	61.5
D(50)	0.3	0.28	0.44	0.59	0.66	0.65	0.66	0.79
C(7)	-6.7	-7	-3.9	-1.3	0.2	-0.4	-0.5	1.5
C(50)	-3.7	-4	-1.1	1.5	2.9	2.6	2.9	5.8
C(80)	-2.1	-2.5	0.5	3.2	4.7	4.4	4.9	8.3
U(50)	-3.7	-4	-1.1	1.5	2.9	2.6	2.9	5.8
U(80)	-2.1	-2.5	0.5	3.2	4.7	4.4	4.9	8.3
LF(80)	0.141	0.155	0.13	0.123	0.123	0.139	0.145	0.131
LFC(80)	0.231	0.247	0.205	0.185	0.175	0.196	0.207	0.186
Diffusivity(ss)	3	3.3	3.2	3.1	2.9	3.2	3	2.2
Echo(Dietsch)	0.55	0.53	0.54	0.54	0.55	0.54	0.52	0.49
Sd	62.2	62.8	62.6	62.3	62.2	61.9	61.3	59.2
Sr	6.4	6.5	6.4	6.4	6.3	6.3	6.3	6.1
SPL80	65.5	66.2	65.2	64.3	63.8	63.8	63.4	60.9
IACCearly	0.318	0.497	0.262	0.253	0.484	0.433	0.349	0.150
IACClate	0.374	0.132	0.133	0.284	0.215	0.138	0.096	0.092
IACCtotal	0.233	0.443	0.219	0.218	0.440	0.394	0.322	0.143
SPL(A)	71.8							
SPL(Lin)	76.2							
SPL(C)	75.9							
STI	0.59							
STI(Female)	0.63							
STI(Male)	0.62							
RASTI	0.61							
RASTI	0.61							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.133							
Lj(Avrage)	-0.6							
BR(SPL)	3.8							
SIL	65.2							
AI	1							
Alcons(STI)	7.68							
Density(reflections)	507.38							
Receiver Number: 8 S3 (x,y,z) = (16.00,4.00,2.29)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

EDT	2.14	2.24	1.64	1.41	1.23	1.24	1.16	0.81
T(15)	1.92	2.01	1.36	1.08	1	1	0.94	0.72
T(20)	1.91	1.99	1.36	1.07	0.96	0.96	0.91	0.69
XI(T(20))	0	0.1	0	0.8	2.2	2	2.3	3.1
T(30)	*	*	1.35	1.08	0.96	0.97	0.9	0.66
XI(T(30))	*	*	0.1	0.4	0.9	0.8	0.9	2.5
Curvature(C)	*	*	-1.2	0.7	0	0.5	-0.7	-5.1
Ts	165	173	112	73	57	59	55	32
SPL	74.4	74.9	72.1	69.8	69	68.9	68.5	65.9
D(50)	0.24	0.23	0.38	0.55	0.63	0.61	0.62	0.76
C(7)	-8.5	-8.8	-5.5	-2.1	-0.7	-0.8	-0.7	1.8
C(50)	-5	-5.3	-2.2	1	2.2	2	2.1	5
C(80)	-3.2	-3.5	-0.4	2.6	4	3.8	4.2	7.6
U(50)	-5	-5.3	-2.2	1	2.2	2	2.1	5
U(80)	-3.2	-3.5	-0.4	2.6	4	3.8	4.2	7.6
LF(80)	0.095	0.103	0.083	0.068	0.069	0.075	0.079	0.068
LFC(80)	0.185	0.194	0.16	0.126	0.123	0.131	0.136	0.117
Diffusivity(ss)	3.7	4.1	3.7	3.6	3.5	3.6	3.4	2.5
Echo(Dietsch)	0.55	0.54	0.54	0.53	0.54	0.54	0.55	0.52
Sd	65.3	65.6	65.6	65.6	65.6	65.5	65.1	63.7
Sr	6.8	6.8	6.8	6.7	6.7	6.7	6.6	6.5
SPL80	69.5	69.8	68.9	67.9	67.5	67.4	67.1	65.2
IACCearly	0.347	35.000	0.221	0.253	0.604	0.643	0.440	0.107
IACClate	0.361	0.364	0.139	0.235	0.180	0.123	0.085	0.092
IACCtotal	0.337	0.348	0.206	0.215	0.563	0.615	0.420	0.104
SPL(A)	75.7							
SPL(Lin)	80.4							
SPL(C)	80.1							
STI	0.56							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.58							
RASTI	0.58							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.08							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	4.1							
SIL	69.1							
AI	1							
Alcons(STI)	9							
Density(reflections)	923.25							
Receiver Number: 9 S2 (x,y,z) = (10.00,2.00,2.50)								

Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.98	2.09	1.5	1.24	1.06	1.06	0.98	0.62
T(15)	1.81	1.89	1.29	1.06	1.03	1	0.94	0.71
T(20)	1.79	1.88	1.3	1	1.01	0.98	0.91	0.67
XI(T(20))	0.3	0.3	0.5	4.5	5.1	4.7	2.7	4.2
T(30)	*	*	1.27	0.99	0.9	0.9	0.85	0.65
XI(T(30))	*	*	0.4	1.8	7.2	4.5	3.5	1.9
Curvature(C)	*	*	-2.3	-1.2	-11.4	-8.4	-6.6	-3.6
Ts	150	160	104	71	54	55	53	33
SPL	71.8	72.5	69.6	67.5	66.4	66.5	66.1	63.2
D(50)	0.28	0.26	0.41	0.57	0.65	0.64	0.65	0.77
C(7)	-8.9	-9.5	-6.2	-3.3	-1.4	-1.6	-1.9	0.1
C(50)	-4.1	-4.6	-1.6	1.2	2.7	2.5	2.7	5.2
C(80)	-2.3	-2.8	0.2	3	5	4.8	5.2	8.5
U(50)	-4.1	-4.6	-1.6	1.2	2.7	2.5	2.7	5.2
U(80)	-2.3	-2.8	0.2	3	5	4.8	5.2	8.5
LF(80)	0.123	0.134	0.116	0.102	0.094	0.103	0.107	0.091
LFC(80)	0.221	0.236	0.202	0.174	0.156	0.17	0.18	0.154
Diffusivity(ss)	3.4	3.8	3.9	4.4	4.5	4.5	4	3
Echo(Dietsch)	0.62	0.61	0.6	0.6	0.46	0.46	0.47	0.44
Sd	62.3	62.5	62.5	62.6	62.7	62.6	62	60.2
Sr	6.6	6.7	6.6	6.5	6.5	6.5	6.4	6.2
SPL80	67.5	67.9	66.7	65.8	65.2	65.2	64.9	62.6
IACCearly	0.490	0.298	0.358	0.234	0.589	0.547	0.508	0.193
IACClate	0.100	0.279	0.353	0.145	0.272	0.171	0.125	0.091
IACCtotal	0.449	0.293	0.336	0.200	0.557	0.525	0.488	0.186
SPL(A)	73.3							
SPL(Lin)	78							
SPL(C)	77.6							
STI	0.56							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.58							
RASTI	0.58							
T(30_Avrerage)	0.9							
LF(80_Avrerage)	0.111							
Lj(Avrerage)	-0.8							
BR(SPL)	4.1							
SIL	66.6							
AI	1							
Alcons(STI)	8.99							

Density(reflections)	623.83							
Receiver Number: 10 S1 (x,y,z) = (22.00,2.00,2.08)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.01	2.13	1.45	1.25	1.17	1.15	1.11	0.92
T(15)	1.97	2.06	1.38	1.07	0.92	0.93	0.86	0.65
T(20)	1.97	2.04	1.38	1.08	0.93	0.94	0.88	0.64
XI(T(20))	0.1	0.1	0.1	1.1	3.8	3.3	2.7	11.6
T(30)	*	*	1.38	1.08	0.96	0.97	0.89	0.64
XI(T(30))	*	*	0	0.5	1.7	1.7	1.1	3.7
Curvature(C)	*	*	-0.2	-0.3	3	3	1.8	-0.5
Ts	138	146	91	60	47	48	45	26
SPL	76.8	77.2	74.9	72.6	72.2	72.1	71.9	70.1
D(50)	0.33	0.31	0.47	0.61	0.67	0.67	0.68	0.8
C(7)	-7.1	-7.3	-4.5	-1	0.1	0	0	2
C(50)	-3.2	-3.4	-0.6	1.9	3.2	3	3.3	6.1
C(80)	-1.3	-1.6	1.1	3	4	4	4.5	7.7
U(50)	-3.2	-3.4	-0.6	1.9	3.2	3	3.3	6.1
U(80)	-1.3	-1.6	1.1	3	4	4	4.5	7.7
LF(80)	0.119	0.116	0.09	0.049	0.045	0.049	0.055	0.047
LFC(80)	0.216	0.214	0.172	0.098	0.088	0.095	0.106	0.091
Diffusivity(ss)	2.7	3.1	2.7	2.4	2.2	2.2	2	1.3
Echo(Dietsch)	0.54	0.54	0.54	0.62	0.65	0.64	0.6	0.56
Sd	68.9	69.1	69.1	69.1	69.2	69.1	68.9	68
Sr	7.2	7.2	7.2	7	7	7	7	6.9
SPL80	73.1	73.3	72.4	70.9	70.7	70.7	70.6	69.4
IACCearly	0.744	0.451	0.148	0.413	0.623	0.706	0.661	0.262
IACClate	0.097	0.299	0.264	0.217	0.271	0.153	0.121	0.081
IACCtotal	0.743	0.449	0.126	0.387	0.609	0.697	0.648	0.257
SPL(A)	79							
SPL(Lin)	83.2							
SPL(C)	82.8							
STI	0.61							
STI(Female)	0.65							
STI(Male)	0.64							
RASTI	0.63							
RASTI	0.63							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.075							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	3.6							

SIL	72.2							
AI	1							
Alcons(STI)	6.94							
Density(reflections)	1002.37							
Receiver Number: 11 S4								
(x,y,z) = (22.00,10.00,2.08)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.09	2.2	1.52	1.26	1.14	1.13	1.06	0.85
T(15)	1.98	2.06	1.38	1.1	0.96	0.97	0.9	0.63
T(20)	1.97	2.05	1.38	1.1	0.95	0.96	0.9	0.64
XI(T(20))	0.1	0.3	0	0.3	0.5	0.5	0.5	1.5
T(30)	*	*	1.38	1.09	0.96	0.97	0.9	0.64
XI(T(30))	*	*	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
Curvature(C)	*	*	-0.3	-0.8	0.1	0.7	0.3	0.1
Ts	156	165	106	71	58	58	54	32
SPL	75.1	75.5	72.9	70.6	70	70	69.6	67.3
D(50)	0.24	0.23	0.36	0.51	0.55	0.54	0.56	0.7
C(7)	-8.2	-8.5	-5.4	-2.1	-0.8	-0.9	-0.9	1.5
C(50)	-5	-5.3	-2.6	0.1	0.9	0.7	1	3.7
C(80)	-2.8	-3.1	-0.3	2.5	3.6	3.7	4.2	7.5
U(50)	-5	-5.3	-2.6	0.1	0.9	0.7	1	3.7
U(80)	-2.8	-3.1	-0.3	2.5	3.6	3.7	4.2	7.5
LF(80)	0.21	0.209	0.191	0.173	0.175	0.184	0.184	0.148
LFC(80)	0.327	0.325	0.289	0.237	0.222	0.232	0.237	0.192
Diffusivity(ss)	3.6	4	3.6	3.6	3.6	3.6	3.3	2.3
Echo(Dietsch)	0.58	0.58	0.59	0.62	0.62	0.61	0.59	0.57
Sd	66.2	66.5	66.4	66.5	66.6	66.5	66.2	65
Sr	6.9	6.9	6.8	6.8	6.7	6.7	6.7	6.6
SPL80	70.4	70.7	69.8	68.7	68.4	68.4	68.2	66.6
IACCearly	0.166	0.391	0.404	0.337	0.571	0.475	0.423	0.173
IACClate	0.109	0.131	0.107	0.108	0.184	0.200	0.106	0.059
IACCtotal	0.136	0.339	0.295	0.270	0.520	0.423	0.385	0.160
SPL(A)	76.8							
SPL(Lin)	81.3							
SPL(C)	80.9							
STI	0.56							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.58							
RASTI	0.58							
T(30_Avrage)	1							

LF(80_Avrerage)	0.187							
Lj(Avrerage)	-0.4							
BR(SPL)	3.9							
SIL	70.1							
AI	1							
Alcons(STI)	8.98							
Density(reflections)	933.75							
Receiver Number: 12 S5 (x,y,z) = (28.00,10.00,2.01)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.09	2.19	1.54	1.4	1.44	1.44	1.33	0.92
T(15)	2	2.07	1.4	1.07	0.92	0.94	0.91	0.74
T(20)	1.98	2.05	1.4	1.08	0.96	0.97	0.91	0.69
XI(T(20))	0.3	0.2	0.3	1.9	4.4	3.7	6.1	25.4
T(30)	*	*	1.38	1.12	0.98	0.99	0.91	0.66
XI(T(30))	*	*	0.4	1.7	2.1	1.8	2.1	8.3
Curvature(C)	*	*	-1.3	2.9	2	2.2	0.2	-4.8
Ts	142	151	94	60	49	49	45	24
SPL	76.8	77.1	74.6	72.1	71.4	71.3	71.2	69.4
D(50)	0.32	0.3	0.45	0.62	0.68	0.68	0.7	0.84
C(7)	-7.9	-8.3	-5.3	-1.7	-0.3	-0.4	-0.6	1.3
C(50)	-3.3	-3.8	-0.9	2.1	3.2	3.3	3.7	7.1
C(80)	-1.6	-2.1	0.6	3.1	3.9	4	4.7	8.4
U(50)	-3.3	-3.8	-0.9	2.1	3.2	3.3	3.7	7.1
U(80)	-1.6	-2.1	0.6	3.1	3.9	4	4.7	8.4
LF(80)	0.347	0.347	0.294	0.195	0.136	0.143	0.165	0.145
LFC(80)	0.456	0.457	0.395	0.271	0.203	0.211	0.24	0.213
Diffusivity(ss)	4	4.3	3.4	2.8	1.8	1.9	2	1.5
Echo(Dietsch)	0.6	0.6	0.57	0.64	0.63	0.61	0.57	0.5
Sd	68.2	68.2	68.2	68.2	68.2	68.1	67.9	67
Sr	7.2	7.2	7.1	7	7	7	7	6.9
SPL80	72.9	72.9	71.9	70.4	69.9	69.9	69.9	68.8
IACCearly	0.428	0.299	0.356	0.565	0.592	0.297	0.165	0.116
IACClate	0.272	0.385	0.243	0.185	0.213	0.092	0.085	0.080
IACCtotal	0.423	0.298	0.346	0.548	0.579	0.284	0.150	0.115
SPL(A)	78.3							
SPL(Lin)	82.9							
SPL(C)	82.5							
STI	0.62							
STI(Female)	0.65							
STI(Male)	0.64							

RASTI	0.63							
RASTI	0.63							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.243							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	4.1							
SIL	71.5							
AI	1							
Alcons(STI)	6.84							
Density(reflections)	887.07							
Receiver Number: 13 S6 (x,y,z) = (12.00,14.00,2.43)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.04	2.15	1.58	1.36	1.27	1.25	1.16	0.74
T(15)	1.78	1.88	1.37	1.09	0.93	0.93	0.89	0.73
T(20)	1.76	1.88	1.32	1.08	0.95	0.95	0.88	0.69
XI(T(20))	0.8	0.5	1.5	1.6	4.4	4.1	4.7	6.7
T(30)	*	*	1.28	1.05	1.07	1.05	0.9	0.64
XI(T(30))	*	*	1.2	1.7	13.8	11.6	1.7	5.1
Curvature(C)	*	*	-3.5	-3.4	12.5	11.2	1.8	-7.1
Ts	152	161	106	71	55	56	52	30
SPL	70.3	71.1	68.4	66.3	65.3	65.4	64.9	61.8
D(50)	0.26	0.24	0.38	0.55	0.64	0.64	0.65	0.79
C(7)	-8.3	-9	-5.8	-3	-1.2	-1.3	-1.3	0.8
C(50)	-4.6	-5	-2.1	0.9	2.6	2.4	2.7	5.6
C(80)	-2.1	-2.5	0.3	3.1	4.2	4.2	4.8	8.3
U(50)	-4.6	-5	-2.1	0.9	2.6	2.4	2.7	5.6
U(80)	-2.1	-2.5	0.3	3.1	4.2	4.2	4.8	8.3
LF(80)	0.221	0.225	0.199	0.182	0.157	0.152	0.15	0.123
LFC(80)	0.344	0.351	0.308	0.268	0.221	0.218	0.222	0.184
Diffusivity(ss)	3.7	4.1	3.8	3.5	3.2	3.3	3.1	2.3
Echo(Dietsch)	0.64	0.62	0.58	0.55	0.53	0.51	0.49	0.43
Sd	61.5	61.6	61.6	61.6	61.6	61.7	61.1	59.1
Sr	6.4	6.5	6.4	6.4	6.3	6.3	6.3	6.1
SPL80	66.2	66.7	65.6	64.6	63.9	64	63.6	61.2
IACCearly	0.505	0.422	0.154	0.304	0.397	0.175	0.150	0.274
IACClate	0.259	0.226	0.399	0.233	0.226	0.144	0.102	0.086
IACCtotal	0.431	0.367	0.180	0.286	0.370	0.165	0.142	0.264
SPL(A)	72.1							
SPL(Lin)	76.7							
SPL(C)	76.3							

STI	0.57							
STI(Female)	0.61							
STI(Male)	0.6							
RASTI	0.59							
RASTI	0.59							
T(30_Avrerage)	1.1							
LF(80_Avrerage)	0.191							
Lj(Avrerage)	-0.5							
BR(SPL)	4							
SIL	65.5							
AI	1							
Alcons(STI)	8.47							
Density(reflections)	517.76							
Receiver Number: 14 S7 (x,y,z) = (7.00,10.00,2.60)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.03	2.11	1.64	1.27	1.17	1.18	1.06	0.7
T(15)	1.8	1.93	1.39	1.13	1.01	0.98	0.92	0.72
T(20)	1.76	1.89	1.43	1.18	1.04	0.98	0.9	0.69
XI(T(20))	0.8	0.6	1.5	4	8.5	8.5	6.8	4.4
T(30)	*	*	1.31	1.24	1.25	1.16	1.02	0.63
XI(T(30))	*	*	6.5	6.6	35.8	26.3	15	4.5
Curvature(C)	*	*	-7.8	5.5	20.6	18.5	14	-7.8
Ts	145	151	99	65	51	53	50	29
SPL	69.2	70	67.6	65.7	64.7	64.9	64.3	61
D(50)	0.29	0.28	0.43	0.57	0.66	0.64	0.65	0.78
C(7)	-7.1	-7.1	-4.3	-2	-0.5	-1.1	-1.2	0.7
C(50)	-3.9	-4	-1.3	1.3	2.9	2.6	2.8	5.5
C(80)	-1.8	-2	0.8	3.7	5.2	4.8	5.2	8.7
U(50)	-3.9	-4	-1.3	1.3	2.9	2.6	2.8	5.5
U(80)	-1.8	-2	0.8	3.7	5.2	4.8	5.2	8.7
LF(80)	0.17	0.179	0.157	0.16	0.16	0.173	0.179	0.161
LFC(80)	0.277	0.284	0.247	0.238	0.223	0.241	0.252	0.225
Diffusivity(ss)	3.2	3.4	3.4	3.3	3	3.3	3.1	2.3
Echo(Dietsch)	0.66	0.63	0.62	0.59	0.52	0.51	0.52	0.48
Sd	61.3	62.2	61.9	61.6	61.5	61.3	60.6	58.3
Sr	6.4	6.5	6.4	6.3	6.3	6.3	6.2	6
SPL80	65.2	65.9	65	64.2	63.6	63.6	63.1	60.5
IACCearly	0.656	0.298	0.377	0.453	0.476	0.186	0.115	0.255
IACClate	0.195	0.145	0.222	0.354	0.271	0.110	0.093	0.078
IACCtotal	0.645	0.287	0.335	0.438	0.453	0.181	0.108	0.250

SPL(A)	71.5							
SPL(Lin)	75.8							
SPL(C)	75.4							
STI	0.59							
STI(Female)	0.63							
STI(Male)	0.62							
RASTI	0.6							
RASTI	0.6							
T(30_Avrage)	1.2							
LF(80_Avrage)	0.164							
Lj(Avrage)	-0.7							
BR(SPL)	3.6							
SIL	64.9							
AI	1							
Alcons(STI)	7.72							
Density(reflections)	467.15							
Receiver Number: 15 S_Galleria1				(x,y,z) = (10.00,-6.00,7.50)				
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.12	2.22	1.56	1.2	1.06	1.09	1.03	0.74
T(15)	1.94	2.01	1.42	1.05	0.96	0.95	0.91	0.69
T(20)	1.9	1.97	1.42	1.06	0.95	0.95	0.9	0.67
XI(T(20))	0.7	0.7	0.4	0.8	1	1	1.2	2.1
T(30)	*	*	1.4	1.11	1.03	1.02	0.94	0.64
XI(T(30))	*	*	0.5	2	4.3	3.5	1.8	1.6
Curvature(C)	*	*	-1.2	5.4	8.9	7.3	4.3	-4.6
Ts	154	163	104	70	58	61	57	35
SPL	72.2	72.9	70.3	68.2	67.2	67	66.3	63.1
D(50)	0.29	0.27	0.42	0.57	0.61	0.59	0.61	0.74
C(7)	-10	-10.8	-7.9	-5.4	-4.1	-4	-3.8	-1.8
C(50)	-3.8	-4.3	-1.4	1.2	1.9	1.6	1.9	4.6
C(80)	-2.2	-2.6	0.4	3.1	4.1	3.7	4.2	7.4
U(50)	-3.8	-4.3	-1.4	1.2	1.9	1.6	1.9	4.6
U(80)	-2.2	-2.6	0.4	3.1	4.1	3.7	4.2	7.4
LF(80)	0.112	0.125	0.108	0.096	0.097	0.101	0.1	0.084
LFC(80)	0.231	0.249	0.224	0.201	0.194	0.195	0.194	0.169
Diffusivity(ss)	3.1	3.5	3.4	3.6	3.5	3.4	3.1	2.3
Echo(Dietsch)	0.51	0.51	0.49	0.48	0.49	0.5	0.49	0.46
Sd	61.7	61.7	61.7	61.7	61.6	61.5	61	59.2
Sr	6.7	6.7	6.7	6.6	6.5	6.5	6.4	6.2
SPL80	68	68.4	67.5	66.5	65.7	65.4	64.9	62.4

IACCearly	0.188	0.285	0.229	0.178	0.600	0.456	0.295	0.220
IACClate	0.195	0.176	0.168	0.177	0.131	0.118	0.078	0.095
IACCtotal	0.186	0.268	0.207	0.150	0.551	0.421	0.275	0.209
SPL(A)	73.8							
SPL(Lin)	78.4							
SPL(C)	78.1							
STI	0.57							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.59							
RASTI	0.59							
T(30_Avrage)	1.1							
LF(80_Avrage)	0.106							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	3.9							
SIL	67.2							
AI	1							
Alcons(STI)	8.55							
Density(reflections)	578.85							
Receiver Number: 16 S_Galleria2 (x,y,z) = (10.00,8.00,7.50)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.02	2.13	1.43	1.1	0.98	0.99	0.96	0.73
T(15)	1.94	2.04	1.39	1.06	0.92	0.93	0.89	0.64
T(20)	1.94	2.03	1.38	1.05	0.91	0.92	0.88	0.64
XI(T(20))	0.4	0.3	0.6	0.4	0.8	0.6	0.5	0.6
T(30)	*	*	1.38	1.04	0.91	0.91	0.88	0.63
XI(T(30))	*	*	0.8	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4
Curvature(C)	*	*	-0.2	-0.1	0.5	-0.2	-0.7	-0.8
Ts	146	156	101	71	61	63	59	38
SPL	72.2	72.9	70.5	68.6	67.6	67.4	66.6	63.3
D(50)	0.29	0.27	0.41	0.54	0.58	0.57	0.59	0.73
C(7)	-10.3	-11.1	-8.4	-6.1	-5	-4.9	-4.6	-2.4
C(50)	-3.8	-4.2	-1.6	0.6	1.4	1.2	1.6	4.2
C(80)	-1.9	-2.3	0.5	2.9	3.8	3.6	4	7.1
U(50)	-3.8	-4.2	-1.6	0.6	1.4	1.2	1.6	4.2
U(80)	-1.9	-2.3	0.5	2.9	3.8	3.6	4	7.1
LF(80)	0.24	0.242	0.247	0.259	0.274	0.271	0.254	0.207
LFC(80)	0.366	0.373	0.37	0.371	0.377	0.372	0.353	0.297
Diffusivity(ss)	2.9	3.4	3.1	2.8	2.5	2.6	2.4	1.7
Echo(Dietsch)	0.55	0.54	0.52	0.5	0.5	0.5	0.49	0.45

Sd	61.5	61.5	61.5	61.5	61.4	61.3	60.8	58.9
Sr	6.7	6.7	6.7	6.6	6.5	6.5	6.4	6.2
SPL80	68.1	68.6	67.7	66.8	66.1	65.9	65.2	62.5
IACCearly	0.435	0.622	0.746	0.822	0.544	0.683	0.398	0.325
IACClate	0.228	0.288	0.214	0.338	0.241	0.127	0.113	0.091
IACCtotal	0.410	0.602	0.718	0.809	0.536	0.674	0.387	0.318
SPL(A)	74.1							
SPL(Lin)	78.6							
SPL(C)	78.2							
STI	0.56							
STI(Female)	0.59							
STI(Male)	0.58							
RASTI	0.57							
RASTI	0.57							
T(30_Avrage)	1							
LF(80_Avrage)	0.255							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	3.6							
SIL	67.6							
AI	1							
Alcons(STI)	9.18							
Density(reflections)	552.95							
Receiver Number: 17 S_Galleria3 (x,y,z) = (22.00,16.00,7.50)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.93	2.06	1.37	1.06	0.9	0.91	0.85	0.59
T(15)	1.92	2.02	1.39	1.1	0.94	0.95	0.88	0.61
T(20)	1.92	2.02	1.38	1.08	0.97	0.97	0.9	0.62
XI(T(20))	0.1	0.1	0	0.6	1.1	0.9	0.6	0.5
T(30)	*	*	1.37	1.07	0.97	0.98	0.91	0.63
XI(T(30))	*	*	0.1	0.5	0.9	0.7	0.6	0.5
Curvature(C)	*	*	-1.2	-0.9	-0.1	0.2	1.1	2.3
Ts	141	150	98	68	55	56	53	36
SPL	75.3	75.7	73.5	71.5	70.9	70.8	70.3	67.5
D(50)	0.26	0.24	0.37	0.5	0.58	0.59	0.6	0.72
C(7)	-9	-9.4	-7.2	-5.2	-4.6	-4.8	-4.7	-3.1
C(50)	-4.5	-4.9	-2.4	0	1.5	1.5	1.8	4.2
C(80)	-1.6	-2	0.8	3.5	5.1	4.9	5.2	8.3
U(50)	-4.5	-4.9	-2.4	0	1.5	1.5	1.8	4.2
U(80)	-1.6	-2	0.8	3.5	5.1	4.9	5.2	8.3
LF(80)	0.447	0.442	0.435	0.405	0.419	0.418	0.419	0.405

LFC(80)	0.581	0.576	0.565	0.53	0.542	0.539	0.539	0.519
Diffusivity(ss)	5.9	6.2	6.3	6.3	6.4	6.6	6.2	4.9
Echo(Dietsch)	0.57	0.57	0.56	0.51	0.49	0.49	0.49	0.46
Sd	65.8	65.8	65.5	65.1	65	64.8	64.3	62.6
Sr	7	7	6.9	6.8	6.9	6.8	6.8	6.6
SPL80	71.5	71.5	70.9	69.9	69.8	69.6	69.1	66.9
IACCearly	0.362	0.153	0.202	0.335	0.231	0.383	0.160	0.060
IACClate	0.274	0.243	0.160	0.284	0.149	0.136	0.072	0.082
IACCtotal	0.359	0.152	0.195	0.328	0.225	0.364	0.151	0.059
SPL(A)	77.5							
SPL(Lin)	81.7							
SPL(C)	81.3							
STI	0.58							
STI(Female)	0.61							
STI(Male)	0.61							
RASTI	0.6							
RASTI	0.6							
T(30_Avrerage)	1							
LF(80_Avrerage)	0.425							
Lj(Avrerage)	-0.5							
BR(SPL)	3.4							
SIL	70.9							
AI	1							
Alcons(STI)	8.1							
Density(reflections)	771.38							

Tab. A.2 –Dati completi delle simulazione per tutti i punti di ricezione considerati

A.3. Aula Magna del Rettorato della Sapienza – Roma

In Tab. A.3 vengono riportati i dati completi delle simulazioni.

Receiver Number: 1 Misurato 1				(x,y,z) = (12189.00,6662.00,1.61)				
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.33	2.77	2.41	2.28	2.2	1.98	1.4	0.57
T(15)	2.07	2.36	2.14	2.1	2.1	1.97	1.55	0.96
T(20)	2.02	2.26	2.1	2.1	2.1	1.97	1.53	0.94
XI(T(20))	1.5	2.4	1.3	0.4	0.3	0.4	1.3	4.5
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.53	0.9

XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.4	1.7
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-0.1	-3.2
Ts	128	158	130	124	118	106	76	41
SPL	77.8	78.6	77.7	77.4	77.1	76.8	75.8	73.4
D(50)	0.46	0.41	0.47	0.48	0.49	0.51	0.59	0.74
C(7)	-6.6	-7.1	-6.5	-6.6	-6.4	-6.1	-5.1	-3
C(50)	-0.7	-1.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.2	1.6	4.5
C(80)	1.4	0.2	1.4	1.7	2	2.4	4.3	8.4
U(50)	-0.7	-1.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.2	1.6	4.5
U(80)	1.4	0.2	1.4	1.7	2	2.4	4.3	8.4
LF(80)	0.378	0.367	0.384	0.403	0.398	0.386	0.377	0.347
LFC(80)	0.485	0.471	0.488	0.506	0.502	0.491	0.479	0.44
Diffusivity(ss)	3.4	4	3.3	3.4	3.3	3.2	2.8	2
Echo(Dietsch)	0.53	0.55	0.52	0.49	0.48	0.48	0.48	0.46
Sd	70.3	70.7	70.3	69.9	69.8	69.8	69.5	68.7
Sr	74.4	74.7	74.4	74.1	74	73.9	73.5	72.1
SPL80	75.4	75.7	75.3	75.1	75	74.9	74.4	72.9
IACCearly	0.208	0.543	0.722	0.739	0.531	0.141	0.102	0.058
IACClate	0.273	0.297	0.113	0.222	0.207	0.123	0.083	0.078
IACCtotal	0.182	0.490	0.604	0.636	0.475	0.134	0.091	0.055
SPL(A)	83.3							
SPL(Lin)	86.1							
SPL(C)	85.7							
STI	0.51							
STI(Female)	0.52							
STI(Male)	0.51							
RASTI	0.49							
RASTI	0.49							
RASTI	0.49							
LF(80_Avrerage)	0.388							
Lj(Avrerage)	-0.5							
BR(SPL)	0.9							
SIL	76.8							
AI	1							
Alcons(STI)	11.69							
Density(reflections)	343.28							
Receiver Number: 2 Misurato 2 (x,y,z) = (12194.00,6664.00,1.96)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.23	2.66	2.31	2.24	2.19	2	1.48	0.73
T(15)	2.21	2.5	2.29	2.23	2.22	2.04	1.55	0.93

T(20)	2.15	*	2.23	2.17	2.15	2	1.54	0.91
XI(T(20))	1	*	1	1.1	1.5	2	0.5	1.8
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.52	0.9
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.9	0.6
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-1.4	-0.3
Ts	142	167	144	142	137	124	90	49
SPL	76.8	77.8	76.8	76.5	76.2	75.7	74.4	71.4
D(50)	0.36	0.32	0.36	0.37	0.38	0.4	0.49	0.67
C(7)	-7.3	-8.1	-7.3	-7.2	-7	-6.6	-5.4	-2.9
C(50)	-2.6	-3.3	-2.5	-2.4	-2.2	-1.7	-0.1	3
C(80)	-0.2	-1.1	-0.2	-0.1	0.1	0.6	2.5	6.4
U(50)	-2.6	-3.3	-2.5	-2.4	-2.2	-1.7	-0.1	3
U(80)	-0.2	-1.1	-0.2	-0.1	0.1	0.6	2.5	6.4
LF(80)	0.291	0.295	0.302	0.316	0.319	0.32	0.322	0.303
LFC(80)	0.411	0.417	0.421	0.433	0.435	0.436	0.433	0.402
Diffusivity(ss)	4.2	4.9	4.2	4	3.9	3.8	3.3	2.6
Echo(Dietsch)	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56	0.55	0.54	0.5
Sd	68.8	69	68.8	68.5	68.4	68.2	67.9	66.7
Sr	72.4	72.8	72.4	72.1	71.9	71.7	71.3	69.6
SPL80	73.7	74.2	73.7	73.4	73.2	73	72.5	70.5
IACCearly	0.140	0.285	0.351	0.444	0.199	0.304	0.116	0.104
IACClate	0.199	0.270	0.216	0.336	0.228	0.151	0.079	0.070
IACCtotal	0.128	0.266	0.319	0.401	0.194	0.271	0.103	0.096
SPL(A)	82.2							
SPL(Lin)	85.1							
SPL(C)	84.7							
STI	0.47							
STI(Female)	0.48							
STI(Male)	0.47							
RASTI	0.44							
RASTI	0.44							
RASTI	0.44							
LF(80_Avrerage)	0.308							
Lj(Avrerage)	-0.3							
BR(SPL)	1							
SIL	75.7							
AI	1							
Alcons(STI)	14.14							
Density(reflections)	325.8							
Receiver Number: 3 Misurato 3 (x,y,z) = (12185.00,6667.00,2.28)								

Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.16	2.54	2.22	2.18	2.12	1.92	1.38	0.72
T(15)	2.2	2.51	2.26	2.17	2.14	1.97	1.53	0.9
T(20)	2.13	*	2.19	2.12	2.1	1.96	1.51	0.9
XI(T(20))	1.4	*	0.9	0.8	0.7	0.3	0.4	1.1
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.5	0.89
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.3	0.4
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-0.4	-0.4
Ts	144	171	146	143	137	124	92	54
SPL	77.2	78.2	77	76.6	76.3	75.9	74.6	71.7
D(50)	0.35	0.3	0.35	0.36	0.38	0.4	0.48	0.64
C(7)	-8.6	-9.3	-8.5	-8.5	-8.2	-7.8	-6.6	-4.2
C(50)	-2.8	-3.8	-2.6	-2.4	-2.2	-1.7	-0.3	2.5
C(80)	-0.6	-1.7	-0.6	-0.3	0	0.5	2.3	5.8
U(50)	-2.8	-3.8	-2.6	-2.4	-2.2	-1.7	-0.3	2.5
U(80)	-0.6	-1.7	-0.6	-0.3	0	0.5	2.3	5.8
LF(80)	0.376	0.369	0.388	0.406	0.41	0.407	0.399	0.368
LFC(80)	0.497	0.49	0.505	0.524	0.528	0.523	0.513	0.471
Diffusivity(ss)	4.4	5.3	4.3	3.9	3.6	3.5	2.9	2
Echo(Dietsch)	0.53	0.53	0.52	0.52	0.51	0.5	0.5	0.47
Sd	68	68.4	68	67.6	67.5	67.4	67.2	66.1
Sr	72.6	72.9	72.5	72.2	72.1	71.9	71.5	69.7
SPL80	73.9	74.2	73.7	73.5	73.3	73.1	72.6	70.7
IACCearly	0.552	0.392	0.502	0.508	0.356	0.403	0.129	0.052
IACClate	0.250	0.242	0.183	0.306	0.247	0.092	0.076	0.057
IACCtotal	0.531	0.374	0.421	0.446	0.328	0.356	0.112	0.048
SPL(A)	82.4							
SPL(Lin)	85.3							
SPL(C)	85							
STI	0.48							
STI(Female)	0.49							
STI(Male)	0.48							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
LF(80_Avrerage)	0.393							
Lj(Avrerage)	-0.3							
BR(SPL)	1.1							
SIL	75.9							
AI	1							
Alcons(STI)	13.62							

Density(reflections)	329.24							
Receiver Number: 4 Misurato 4 (x,y,z) = (12190.00,6670.00,2.60)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.18	2.58	2.25	2.15	2.11	1.93	1.42	0.79
T(15)	2.12	2.42	2.19	2.16	2.16	2.01	1.51	0.9
T(20)	2.06	*	2.12	2.08	2.06	1.95	1.53	0.89
XI(T(20))	1.7	*	1.2	1.8	2.3	1.3	0.5	0.7
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.5	0.88
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.8	0.3
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-2.2	-1
Ts	152	179	155	149	146	135	102	61
SPL	76.2	77.2	76.1	75.9	75.6	75	73.5	69.9
D(50)	0.3	0.26	0.3	0.3	0.31	0.33	0.41	0.57
C(7)	-11.7	-12.8	-11.7	-11.5	-11.2	-10.7	-9.4	-6.9
C(50)	-3.6	-4.7	-3.7	-3.6	-3.4	-3	-1.6	1.3
C(80)	-0.9	-2	-1.1	-1	-0.9	-0.5	1.2	4.6
U(50)	-3.6	-4.7	-3.7	-3.6	-3.4	-3	-1.6	1.3
U(80)	-0.9	-2	-1.1	-1	-0.9	-0.5	1.2	4.6
LF(80)	0.443	0.437	0.456	0.464	0.458	0.446	0.442	0.421
LFC(80)	0.573	0.569	0.584	0.59	0.585	0.572	0.565	0.536
Diffusivity(ss)	4.8	5.9	4.7	4.5	4.4	4.3	3.8	2.9
Echo(Dietsch)	0.6	0.59	0.58	0.54	0.53	0.52	0.5	0.47
Sd	64.2	64.2	64.1	64.1	64.1	64	63.6	62.2
Sr	71	71.3	70.9	70.7	70.5	70.3	69.6	67.5
SPL80	72.7	73.1	72.5	72.4	72.1	71.8	71	68.6
IACCearly	0.308	0.380	0.447	0.547	0.479	0.173	0.140	0.054
IACClate	0.293	0.076	0.221	0.210	0.289	0.086	0.102	0.057
IACCtotal	0.280	0.335	0.384	0.465	0.434	0.147	0.115	0.051
SPL(A)	81.4							
SPL(Lin)	84.4							
SPL(C)	84.1							
STI	0.46							
STI(Female)	0.46							
STI(Male)	0.45							
RASTI	0.43							
RASTI	0.43							
RASTI	0.43							
LF(80_Avrerage)	0.454							
Lj(Avrerage)	-0.2							
BR(SPL)	0.9							

SIL	75							
AI	1							
Alcons(STI)	15.04							
Density(reflections)	308.4							
Receiver Number: 5 Misurato 5 (x,y,z) = (12187.00,6673.00,3.10)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.15	2.51	2.21	2.14	2.11	1.95	1.43	0.8
T(15)	2.05	2.29	2.11	2.04	2.03	1.93	1.57	0.91
T(20)	1.97	*	2.03	1.97	1.94	1.84	1.52	0.9
XI(T(20))	2	*	1.7	2.2	2.7	2.5	1.6	1.7
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.44	0.91
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	1.9	0.8
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-5	0.9
Ts	152	177	155	152	150	139	106	64
SPL	76.3	77.4	76.2	75.8	75.4	74.8	73.1	69.3
D(50)	0.26	0.22	0.26	0.26	0.27	0.3	0.37	0.53
C(7)	-11.5	-12.3	-11.4	-11.4	-11.1	-10.5	-9.1	-6.4
C(50)	-4.6	-5.6	-4.5	-4.5	-4.3	-3.7	-2.3	0.5
C(80)	-1.7	-2.7	-1.7	-1.6	-1.5	-1.1	0.6	3.9
U(50)	-4.6	-5.6	-4.5	-4.5	-4.3	-3.7	-2.3	0.5
U(80)	-1.7	-2.7	-1.7	-1.6	-1.5	-1.1	0.6	3.9
LF(80)	0.449	0.443	0.458	0.472	0.472	0.466	0.454	0.426
LFC(80)	0.579	0.573	0.584	0.597	0.595	0.587	0.573	0.536
Diffusivity(ss)	4.8	5.6	4.6	4.4	4.2	4	3.5	2.6
Echo(Dietsch)	0.58	0.58	0.57	0.57	0.56	0.54	0.52	0.49
Sd	64.5	64.9	64.5	64.1	64	63.9	63.5	62
Sr	70.4	70.8	70.3	70	69.8	69.5	68.8	66.5
SPL80	72.4	72.9	72.2	71.9	71.6	71.2	70.4	67.8
IACCearly	0.628	0.224	0.321	0.309	0.218	0.283	0.115	0.053
IACClate	0.064	0.234	0.167	0.260	0.224	0.086	0.062	0.056
IACCtotal	0.581	0.218	0.287	0.292	0.215	0.241	0.096	0.049
SPL(A)	81.2							
SPL(Lin)	84.3							
SPL(C)	84							
STI	0.46							
STI(Female)	0.46							
STI(Male)	0.45							
RASTI	0.43							
RASTI	0.43							
RASTI	0.43							

LF(80_Avrage)	0.461							
Lj(Avrage)	-0.2							
BR(SPL)	1.2							
SIL	74.8							
AI	1							
Alcons(STI)	15.15							
Density(reflections)	301.64							
Receiver Number: 6 Misurato 6 (x,y,z) = (12196.00,6671.00,2.85)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.19	2.54	2.24	2.17	2.12	1.9	1.4	0.76
T(15)	2.1	2.34	2.15	2.09	2.08	1.99	1.54	0.89
T(20)	2	*	2.06	1.99	1.99	1.89	1.56	0.9
XI(T(20))	3.1	*	2.5	3.2	3.4	2.5	0.7	1.7
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.47	0.9
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	1.8	0.7
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-5.6	-0.4
Ts	151	173	152	148	145	132	100	59
SPL	76.1	77.2	76.3	76	75.7	75.1	73.5	69.6
D(50)	0.27	0.25	0.28	0.29	0.29	0.31	0.39	0.55
C(7)	-9.9	-10.8	-10.1	-10.1	-9.9	-9.4	-8	-5.4
C(50)	-4.4	-4.8	-4	-4	-3.9	-3.5	-2	0.8
C(80)	-1.4	-2.2	-1.3	-1.1	-0.9	-0.4	1.3	4.8
U(50)	-4.4	-4.8	-4	-4	-3.9	-3.5	-2	0.8
U(80)	-1.4	-2.2	-1.3	-1.1	-0.9	-0.4	1.3	4.8
LF(80)	0.401	0.427	0.439	0.443	0.432	0.418	0.407	0.377
LFC(80)	0.528	0.551	0.558	0.563	0.554	0.54	0.527	0.488
Diffusivity(ss)	3.8	4.4	3.7	3.7	3.7	3.6	3.2	2.6
Echo(Dietsch)	0.62	0.62	0.61	0.6	0.59	0.57	0.56	0.53
Sd	65.8	66	65.8	65.5	65.4	65.2	64.8	63.1
Sr	70.3	71.1	70.8	70.6	70.3	70	69.3	67
SPL80	72.3	72.9	72.6	72.4	72.2	71.8	71	68.3
IACCearly	0.457	0.421	0.426	0.359	0.371	0.175	0.112	0.054
IACClate	0.210	0.376	0.200	0.269	0.283	0.196	0.077	0.055
IACCtotal	0.414	0.401	0.380	0.329	0.342	0.154	0.093	0.049
SPL(A)	81.5							
SPL(Lin)	84.4							
SPL(C)	84.1							
STI	0.45							
STI(Female)	0.46							
STI(Male)	0.45							

RASTI	0.42							
RASTI	0.42							
RASTI	0.42							
LF(80_Avrerage)	0.435							
Lj(Avrerage)	-0.2							
BR(SPL)	0.9							
SIL	75.1							
AI	1							
Alcons(STI)	15.72							
Density(reflections)	288.28							
Receiver Number: 7 Misurato 7		(x,y,z) = (12196.00,6677.00,3.52)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.17	2.53	2.22	2.17	2.16	1.97	1.44	0.8
T(15)	2.28	2.57	2.38	2.23	2.18	2.02	1.58	0.9
T(20)	*	*	*	*	2.07	1.94	1.56	0.93
XI(T(20))	*	*	*	*	3.3	3.2	0.6	1.7
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.48	0.91
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	2.7	0.8
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-5	-1.4
Ts	152	174	154	153	152	140	107	64
SPL	73.6	74.9	74	73.8	73.6	72.9	71	66.6
D(50)	0.26	0.23	0.27	0.27	0.27	0.29	0.37	0.53
C(7)	-9.9	-11.4	-10.4	-10.2	-10.1	-9.6	-8.2	-5.5
C(50)	-4.5	-5.3	-4.3	-4.4	-4.3	-3.9	-2.3	0.5
C(80)	-1.8	-2.6	-1.8	-1.7	-1.6	-1.1	0.6	4
U(50)	-4.5	-5.3	-4.3	-4.4	-4.3	-3.9	-2.3	0.5
U(80)	-1.8	-2.6	-1.8	-1.7	-1.6	-1.1	0.6	4
LF(80)	0.538	0.531	0.558	0.554	0.545	0.531	0.531	0.525
LFC(80)	0.652	0.651	0.668	0.66	0.653	0.641	0.638	0.623
Diffusivity(ss)	4.7	5.3	4.5	4.3	4.2	4.1	3.5	2.6
Echo(Dietsch)	0.55	0.56	0.55	0.54	0.55	0.55	0.53	0.5
Sd	63.3	63.3	63.2	63.2	63.1	62.8	62.2	60
Sr	67.8	68.5	68.3	68.1	67.9	67.5	66.7	63.8
SPL80	69.6	70.4	70	69.8	69.7	69.3	68.3	65.1
IACCearly	0.322	0.530	0.529	0.570	0.528	0.217	0.084	0.089
IACClate	0.263	0.256	0.124	0.243	0.251	0.181	0.061	0.072
IACCtotal	0.292	0.477	0.439	0.468	0.453	0.196	0.065	0.079
SPL(A)	79.2							
SPL(Lin)	82.1							
SPL(C)	81.8							

STI	0.44							
STI(Female)	0.45							
STI(Male)	0.44							
RASTI	0.41							
RASTI	0.41							
RASTI	0.41							
LF(80_Avrerage)	0.547							
Lj(Avrerage)	0							
BR(SPL)	0.8							
SIL	72.8							
AI	1							
Alcons(STI)	16.42							
Density(reflections)	207.99							
Receiver Number: 8 Simulato 1 (x,y,z) = (12180.00,6664.00,1.88)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.47	2.84	2.5	2.29	2.21	2.01	1.49	0.69
T(15)	2.22	2.54	2.28	2.1	2.06	1.9	1.52	0.96
T(20)	2.25	*	2.3	2.11	2.07	1.92	1.49	0.92
XI(T(20))	1	*	0.9	0.2	0.2	0.3	1.2	2.7
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.49	0.9
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.4	1
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	0.3	-1.9
Ts	148	178	148	139	133	119	86	47
SPL	77.3	78.2	77.1	76.8	76.6	76.2	75.1	72.5
D(50)	0.39	0.34	0.4	0.4	0.41	0.44	0.53	0.69
C(7)	-6.3	-7	-6.2	-6.4	-6.3	-5.9	-4.8	-2.4
C(50)	-1.9	-2.8	-1.7	-1.8	-1.5	-1.1	0.4	3.5
C(80)	0	-1.2	0.1	0.3	0.6	1.1	3	6.9
U(50)	-1.9	-2.8	-1.7	-1.8	-1.5	-1.1	0.4	3.5
U(80)	0	-1.2	0.1	0.3	0.6	1.1	3	6.9
LF(80)	0.349	0.343	0.355	0.367	0.367	0.362	0.356	0.32
LFC(80)	0.441	0.435	0.445	0.461	0.461	0.457	0.449	0.402
Diffusivity(ss)	4	4.9	3.8	3.8	3.6	3.5	2.9	1.9
Echo(Dietsch)	0.65	0.64	0.61	0.6	0.59	0.58	0.57	0.55
Sd	70	70.4	70	69.5	69.4	69.3	69	68.1
Sr	73.2	73.5	73.2	72.9	72.7	72.6	72.3	70.9
SPL80	74.3	74.6	74.2	74	73.8	73.7	73.3	71.7
IACCearly	0.272	0.486	0.632	0.589	0.424	0.164	0.073	0.089
IACClate	0.310	0.250	0.176	0.293	0.197	0.124	0.079	0.061
IACCtotal	0.260	0.460	0.533	0.484	0.356	0.138	0.062	0.079

SPL(A)	82.7							
SPL(Lin)	85.5							
SPL(C)	85.2							
STI	0.47							
STI(Female)	0.48							
STI(Male)	0.47							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
LF(80_Avrerage)	0.358							
Lj(Avrerage)	-0.3							
BR(SPL)	1							
SIL	76.2							
AI	1							
Alcons(STI)	13.95							
Density(reflections)	336.34							
Receiver Number: 9 Simulato 2		(x,y,z) = (12178.00,6678.00,3.56)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.32	2.66	2.31	2.33	2.33	2.15	1.66	0.89
T(15)	2.06	2.34	2.08	2.01	2.02	1.93	1.59	0.97
T(20)	2	*	2.02	1.96	1.97	1.88	1.54	0.93
XI(T(20))	4.1	*	2.7	2.6	2.6	2	2.5	2.9
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.51	0.93
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	1.6	1.1
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-2.3	0.1
Ts	165	187	166	170	170	157	120	71
SPL	74.1	75.4	74.4	74.1	73.8	73	71	66.5
D(50)	0.22	0.19	0.22	0.21	0.21	0.24	0.31	0.48
C(7)	-12.7	-14.1	-13	-12.7	-12.5	-11.8	-10.2	-7.3
C(50)	-5.5	-6.3	-5.6	-5.9	-5.7	-5.1	-3.5	-0.4
C(80)	-1.8	-2.7	-2	-2.3	-2.3	-1.8	-0.1	3.5
U(50)	-5.5	-6.3	-5.6	-5.9	-5.7	-5.1	-3.5	-0.4
U(80)	-1.8	-2.7	-2	-2.3	-2.3	-1.8	-0.1	3.5
LF(80)	0.51	0.49	0.511	0.525	0.526	0.518	0.503	0.478
LFC(80)	0.622	0.609	0.624	0.632	0.631	0.621	0.604	0.572
Diffusivity(ss)	6.2	6.7	6	6.1	6	5.7	4.5	3.2
Echo(Dietsch)	0.66	0.65	0.64	0.65	0.64	0.62	0.6	0.57
Sd	61.2	61.2	61.2	61.1	61.1	60.9	60.4	58.4
Sr	67.5	68.2	67.7	67.2	67.1	66.8	65.9	63.3
SPL80	70.1	70.9	70.2	69.8	69.5	69.1	68	64.9

IACCearly	0.670	0.482	0.437	0.298	0.308	0.161	0.071	0.084
IACClate	0.457	0.344	0.193	0.226	0.197	0.138	0.067	0.052
IACCtotal	0.666	0.470	0.356	0.264	0.270	0.138	0.043	0.072
SPL(A)	79.4							
SPL(Lin)	82.4							
SPL(C)	82.2							
STI	0.43							
STI(Female)	0.43							
STI(Male)	0.43							
RASTI	0.4							
RASTI	0.4							
RASTI	0.4							
LF(80_Avrerage)	0.513							
Lj(Avrerage)	0							
BR(SPL)	1							
SIL	73							
AI	1							
Alcons(STI)	17.05							
Density(reflections)	217							
Receiver Number: 10 Simulato 3 (x,y,z) = (12170.00,6670.00,2.67)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.18	2.55	2.26	2.17	2.13	1.93	1.37	0.72
T(15)	2.16	2.47	2.22	2.16	2.17	2.04	1.53	0.91
T(20)	2.14	*	2.21	2.15	2.17	2	1.56	0.91
XI(T(20))	1.4	*	1	0.9	0.9	0.8	1	1.4
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.55	0.89
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.9	0.6
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-0.5	-2.1
Ts	149	174	152	147	143	132	99	60
SPL	76.1	77.2	76.2	75.9	75.6	75	73.4	69.6
D(50)	0.28	0.26	0.29	0.3	0.3	0.32	0.39	0.54
C(7)	-10.3	-11.5	-10.5	-10.3	-10.1	-9.8	-8.6	-6.1
C(50)	-4	-4.6	-3.8	-3.7	-3.7	-3.3	-2	0.8
C(80)	-0.8	-1.7	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	1.6	5
U(50)	-4	-4.6	-3.8	-3.7	-3.7	-3.3	-2	0.8
U(80)	-0.8	-1.7	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	1.6	5
LF(80)	0.38	0.4	0.406	0.412	0.413	0.411	0.408	0.394
LFC(80)	0.516	0.534	0.537	0.543	0.544	0.542	0.536	0.511
Diffusivity(ss)	4.2	5	4.2	4.1	4	3.9	3.5	2.7
Echo(Dietsch)	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57	0.56	0.53

Sd	65.4	65.4	65.4	65.3	65.1	64.8	64.3	62.5
Sr	70.6	71.3	70.9	70.7	70.4	70	69.3	66.9
SPL80	72.6	73.2	72.8	72.6	72.4	72	71.1	68.4
IACCearly	0.147	0.522	0.495	0.481	0.272	0.092	0.061	0.095
IACClate	0.385	0.133	0.215	0.309	0.281	0.105	0.075	0.058
IACCtotal	0.135	0.479	0.440	0.423	0.272	0.086	0.051	0.089
SPL(A)	81.4							
SPL(Lin)	84.4							
SPL(C)	84.1							
STI	0.47							
STI(Female)	0.48							
STI(Male)	0.47							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
LF(80_Avrerage)	0.408							
Lj(Avrerage)	-0.3							
BR(SPL)	0.9							
SIL	75							
AI	1							
Alcons(STI)	14.12							
Density(reflections)	299.03							
Receiver Number: 11 Galleria 1 (x,y,z) = (12174.00,6676.00,8.49)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.1	2.45	2.18	2.07	2.04	1.87	1.4	0.8
T(15)	2.03	2.29	2.11	2.08	2.04	1.9	1.5	0.89
T(20)	1.96	*	2.05	2	1.97	1.84	1.48	0.9
XI(T(20))	1.7	*	1.2	1.7	1.7	1.4	0.5	0.8
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.42	0.89
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	1.2	0.3
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-4.2	-1
Ts	152	177	157	149	147	138	108	68
SPL	76.2	77.2	76.3	75.9	75.6	74.9	72.9	68.5
D(50)	0.24	0.2	0.24	0.26	0.26	0.27	0.34	0.49
C(7)	-14.9	-15.9	-15	-14.7	-14.4	-13.8	-12.2	-9.6
C(50)	-5	-5.9	-5	-4.6	-4.5	-4.3	-2.9	-0.2
C(80)	-1.7	-2.7	-1.9	-1.5	-1.5	-1.3	0.3	3.6
U(50)	-5	-5.9	-5	-4.6	-4.5	-4.3	-2.9	-0.2
U(80)	-1.7	-2.7	-1.9	-1.5	-1.5	-1.3	0.3	3.6
LF(80)	0.523	0.512	0.524	0.532	0.528	0.516	0.515	0.502

LFC(80)	0.659	0.648	0.656	0.665	0.66	0.647	0.642	0.624
Diffusivity(ss)	5.7	6.8	5.5	4.7	4.6	4.5	3.9	3
Echo(Dietsch)	0.52	0.53	0.52	0.52	0.52	0.51	0.5	0.48
Sd	61.2	61.2	61.1	61.1	61.1	60.9	60.4	58.4
Sr	70	70.3	70	70	69.7	69.2	68.2	65.4
SPL80	72.2	72.6	72.2	72.1	71.8	71.2	70	66.9
IACCearly	0.359	0.403	0.341	0.509	0.243	0.120	0.073	0.057
IACClate	0.370	0.276	0.079	0.209	0.158	0.094	0.072	0.048
IACCtotal	0.329	0.353	0.267	0.422	0.221	0.100	0.067	0.050
SPL(A)	81.2							
SPL(Lin)	84.3							
SPL(C)	84							
STI	0.47							
STI(Female)	0.48							
STI(Male)	0.47							
RASTI	0.44							
RASTI	0.44							
RASTI	0.44							
LF(80_Avrerage)	0.524							
Lj(Avrerage)	-0.2							
BR(SPL)	1							
SIL	74.8							
AI	1							
Alcons(STI)	14.23							
Density(reflections)	265.55							
Receiver Number: 12 Galleria 2 (x,y,z) = (12192.00,6677.00,8.50)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.1	2.45	2.15	2.07	2.04	1.88	1.4	0.79
T(15)	2.07	2.38	2.14	2.08	2.05	1.91	1.49	0.91
T(20)	2.05	*	2.12	2.07	2.05	1.91	1.49	0.9
XI(T(20))	0.4	*	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	1
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.49	0.88
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	0.2	0.5
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	0.2	-2.1
Ts	158	180	159	154	151	142	112	73
SPL	75.9	76.9	75.7	75.2	74.7	74	71.9	67.3
D(50)	0.2	0.18	0.21	0.22	0.22	0.23	0.3	0.44
C(7)	-19.7	-21.4	-20.8	-20.9	-21.2	-21.3	-20.4	-17.3
C(50)	-6.1	-6.7	-5.8	-5.5	-5.4	-5.2	-3.7	-1.1
C(80)	-2.3	-3.1	-2.2	-1.9	-1.8	-1.5	0	3.2

U(50)	-6.1	-6.7	-5.8	-5.5	-5.4	-5.2	-3.7	-1.1
U(80)	-2.3	-3.1	-2.2	-1.9	-1.8	-1.5	0	3.2
LF(80)	0.519	0.506	0.539	0.566	0.571	0.563	0.571	0.572
LFC(80)	0.665	0.655	0.684	0.706	0.711	0.704	0.71	0.709
Diffusivity(ss)	6.7	7.6	6.3	5.3	5	4.9	4.5	3.7
Echo(Dietsch)	0.56	0.58	0.56	0.54	0.53	0.53	0.51	0.48
Sd	56.1	55.5	54.9	54.2	53.5	52.6	51.5	50
Sr	68.9	69.4	68.9	68.6	68.3	67.7	66.7	63.7
SPL80	71.6	72.1	71.5	71.1	70.8	70.2	68.9	65.6
IACCearly	0.300	0.311	0.278	0.514	0.365	0.275	0.133	0.057
IACClate	0.578	0.434	0.211	0.255	0.217	0.089	0.075	0.060
IACCtotal	0.284	0.283	0.249	0.422	0.325	0.235	0.108	0.049
SPL(A)	80.4							
SPL(Lin)	83.7							
SPL(C)	83.4							
STI	0.47							
STI(Female)	0.48							
STI(Male)	0.47							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
RASTI	0.45							
LF(80_Avrerage)	0.546							
Lj(Avrerage)	-0.1							
BR(SPL)	1.3							
SIL	74							
AI	1							
Alcons(STI)	14.01							
Density(reflections)	244.34							
Receiver Number: 13 Corridoio 1 (x,y,z) = (12169.00,6664.00,5.59)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.1	2.49	2.14	2.06	2.01	1.82	1.29	0.72
T(15)	2.12	2.56	2.2	2.08	2.04	1.91	1.53	0.86
T(20)	2.16	*	2.2	2.05	1.98	1.84	1.49	0.88
XI(T(20))	1.1	*	0.7	0.9	1.7	2.3	1.3	2.4
T(30)	*	*	*	*	*	*	1.43	0.88
XI(T(30))	*	*	*	*	*	*	1.5	1.7
Curvature(C)	*	*	*	*	*	*	-4.4	0.5
Ts	124	147	124	121	118	109	81	46
SPL	75	75.8	75	74.9	74.6	74.1	72.8	69.6
D(50)	0.34	0.3	0.35	0.35	0.36	0.38	0.45	0.6

C(7)	-6.2	-7	-6.1	-5.9	-5.7	-5.5	-4.5	-2.2
C(50)	-2.9	-3.6	-2.8	-2.7	-2.4	-2.1	-0.9	1.8
C(80)	1.1	0	1.2	1.2	1.3	1.5	3.1	6.7
U(50)	-2.9	-3.6	-2.8	-2.7	-2.4	-2.1	-0.9	1.8
U(80)	1.1	0	1.2	1.2	1.3	1.5	3.1	6.7
LF(80)	0.272	0.273	0.266	0.267	0.267	0.267	0.258	0.236
LFC(80)	0.385	0.389	0.38	0.381	0.378	0.376	0.365	0.33
Diffusivity(ss)	4.1	4.7	3.9	4	4	4.1	3.5	2.7
Echo(Dietsch)	0.57	0.57	0.56	0.55	0.55	0.54	0.53	0.51
Sd	67.9	68	68	67.9	67.8	67.5	67	65.4
Sr	70.3	70.7	70.4	70.3	70.2	69.9	69.3	67.4
SPL80	72.5	72.8	72.5	72.4	72.2	71.8	71.1	68.8
IACCearly	0.426	0.490	0.228	0.403	0.202	0.181	0.102	0.118
IACClate	0.315	0.310	0.265	0.349	0.219	0.162	0.087	0.062
IACCtotal	0.403	0.465	0.202	0.368	0.167	0.147	0.088	0.113
SPL(A)	80.5							
SPL(Lin)	83.3							
SPL(C)	83							
STI	0.51							
STI(Female)	0.51							
STI(Male)	0.5							
RASTI	0.48							
RASTI	0.48							
RASTI	0.48							
LF(80_Avrerage)	0.268							
Lj(Avrerage)	-0.4							
BR(SPL)	0.7							
SIL	74.1							
AI	1							
Alcons(STI)	11.89							
Density(reflections)	312.27							

Tab. A.3 –Dati completi delle simulazione per tutti i punti di ricezione considerati

A.4. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

A.4.1. Risultati simulazioni per la configurazione sala da concerto

In Tab. A.4 vengono riportati i dati completi delle simulazioni per tutti i punti di ricezione considerati.

Receiver Number: 1 R1		(x,y,z) = (2222.00,1230.00,2.81)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.36	1.27	0.79	0.63	0.64	0.82	0.68	0.38
T(15)	1.61	1.51	1.28	1.4	1.43	1.54	1.24	0.66
T(20)	1.62	1.52	1.33	1.5	1.55	1.66	1.33	0.72
XI(T(20))	0.1	0.1	2.4	6.4	8.6	6.5	5.3	7.7
T(30)	1.64	1.55	1.41	1.62	1.7	1.8	1.44	0.79
XI(T(30))	0.1	0.1	1.9	3.7	5.2	4	4	4.9
Curvature(C)	1.3	1.4	5.6	8	9.7	8	8.9	9.1
Ts	54	50	35	32	33	39	33	19
SPL	-14.7	-14.8	-15	-15	-15	-14.9	-15.3	-16.2
D(50)	0.72	0.73	0.81	0.83	0.83	0.79	0.81	0.89
C(7)	-1	-0.8	-0.2	-0.2	-0.3	-0.8	-0.3	1
C(50)	4	4.3	6.2	7	6.8	5.8	6.4	9.1
C(80)	5.4	5.8	8.2	9.1	9.1	7.9	8.7	12.3
U(50)	4	4.3	6.2	7	6.8	5.8	6.4	9.1
U(80)	5.4	5.8	8.2	9.1	9.1	7.9	8.7	12.3
LF(80)	0.207	0.207	0.208	0.208	0.209	0.21	0.201	0.181
LFC(80)	0.279	0.279	0.282	0.285	0.288	0.291	0.28	0.256
Diffusivity(ss)	2.3	2.2	1.6	1.4	1.4	1.7	1.6	1.3
Echo(Dietsch)	0.44	0.44	0.41	0.39	0.39	0.4	0.4	0.37
Sd	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2	-18.3	-18.4	-18.7
Sr	-16.1	-16.1	-16	-15.8	-15.9	-16	-16.2	-16.7
SPL80	-15.8	-15.8	-15.7	-15.5	-15.6	-15.6	-15.8	-16.4
IACCearly	0.619	0.241	0.247	0.300	0.450	0.334	0.256	0.159
IACClate	0.189	0.209	0.124	0.164	0.192	0.085	0.096	0.082
IACCtotal	0.619	0.241	0.246	0.293	0.446	0.330	0.252	0.158
SPL(A)	-8.3							
SPL(Lin)	-6.1							
SPL(C)	-6.5							
STI	0.72							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.71							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrerage)	1.7							
LF(80_Avrerage)	0.208							
Lj(Avrerage)	-1.8							
BR(SPL)	0.1							
SIL	-15.1							
AI	1							

Alcons(STI)	4.01							
Density(reflections)	561.66							
Receiver Number: 2 R2		(x,y,z) = (2220.00,1227.00,3.20)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.51	1.41	0.97	0.86	0.85	1.01	0.85	0.5
T(15)	1.63	1.53	1.34	1.47	1.49	1.62	1.3	0.71
T(20)	1.64	1.54	1.37	1.54	1.59	1.7	1.37	0.75
XI(T(20))	0.1	0.1	1.2	3	4.4	3.3	3.5	4.5
T(30)	1.67	1.57	1.42	1.62	1.69	1.81	1.45	0.8
XI(T(30))	0.2	0.2	1	1.9	3	2.5	2.5	2.9
Curvature(C)	2.1	2	3.8	5	6.8	6.3	6.4	6.5
Ts	82	76	52	47	47	56	48	29
SPL	-17.2	-17.3	-18.1	-18.2	-18.2	-17.9	-18.3	-19.7
D(50)	0.54	0.56	0.69	0.74	0.74	0.68	0.71	0.81
C(7)	-4.5	-4.3	-3.3	-3	-3.2	-3.9	-3.5	-2.1
C(50)	0.7	1.1	3.4	4.6	4.6	3.4	3.8	6.3
C(80)	2.8	3.2	5.9	7	7.1	5.9	6.7	10.1
U(50)	0.7	1.1	3.4	4.6	4.6	3.4	3.8	6.3
U(80)	2.8	3.2	5.9	7	7.1	5.9	6.7	10.1
LF(80)	0.325	0.325	0.325	0.321	0.318	0.316	0.305	0.287
LFC(80)	0.433	0.433	0.432	0.429	0.427	0.428	0.415	0.392
Diffusivity(ss)	3.9	3.8	2.6	2.2	2.2	2.7	2.6	2.1
Echo(Dietsch)	0.47	0.47	0.43	0.4	0.4	0.42	0.42	0.4
Sd	-23	-23.1	-23	-23	-23.1	-23.3	-23.4	-23.9
Sr	-19.9	-19.9	-19.7	-19.5	-19.5	-19.5	-19.8	-20.6
SPL80	-19	-19.1	-19	-19	-19	-18.9	-19.2	-20.1
IACCearly	0.199	0.207	0.280	0.138	0.219	0.323	0.346	0.164
IACClate	0.137	0.201	0.159	0.151	0.195	0.142	0.095	0.079
IACCtotal	0.198	0.200	0.261	0.134	0.213	0.287	0.308	0.158
SPL(A)	-11.4							
SPL(Lin)	-9							
SPL(C)	-9.5							
STI	0.66							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.65							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrerage)	1.7							
LF(80_Avrerage)	0.322							
Lj(Avrerage)	-1.3							

BR(SPL)	0.5							
SIL	-18.2							
AI	1							
Alcons(STI)	5.55							
Density(reflections)	550							
Receiver Number: 3 R3		(x,y,z) = (2218.00,1229.00,3.58)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.51	1.41	0.96	0.86	0.83	1	0.85	0.53
T(15)	1.63	1.54	1.34	1.46	1.48	1.6	1.3	0.7
T(20)	1.63	1.54	1.37	1.52	1.56	1.68	1.36	0.75
XI(T(20))	0	0	1.3	3.1	4.2	3.1	3.2	5.8
T(30)	1.66	1.56	1.41	1.6	1.68	1.8	1.45	0.8
XI(T(30))	0.1	0.1	0.8	2	3.1	2.9	2.4	3.4
Curvature(C)	1.3	1.3	2.8	5.5	7.4	7.4	6.4	6.8
Ts	92	86	57	50	50	60	52	33
SPL	-18.2	-18.4	-19.4	-19.8	-19.8	-19.3	-19.8	-21.4
D(50)	0.47	0.49	0.64	0.72	0.72	0.65	0.67	0.78
C(7)	-6.2	-6	-4.6	-4.1	-4.3	-5.1	-4.8	-3.4
C(50)	-0.5	-0.2	2.5	4	4.1	2.7	3.1	5.5
C(80)	1.9	2.3	5.2	6.4	6.5	5.3	6	9.2
U(50)	-0.5	-0.2	2.5	4	4.1	2.7	3.1	5.5
U(80)	1.9	2.3	5.2	6.4	6.5	5.3	6	9.2
LF(80)	0.322	0.321	0.317	0.31	0.309	0.313	0.303	0.288
LFC(80)	0.427	0.425	0.417	0.407	0.409	0.418	0.408	0.388
Diffusivity(ss)	4.1	4	2.7	2.2	2.2	2.7	2.7	2.2
Echo(Dietsch)	0.5	0.5	0.45	0.41	0.41	0.43	0.43	0.41
Sd	-25.4	-25.4	-25.3	-25.3	-25.4	-25.6	-25.8	-26.4
Sr	-21.5	-21.5	-21.3	-21.2	-21.2	-21.2	-21.5	-22.5
SPL80	-20.3	-20.4	-20.5	-20.7	-20.6	-20.4	-20.8	-21.9
IACCearly	0.712	0.268	0.291	0.070	0.331	0.255	0.266	0.149
IACClate	0.249	0.383	0.159	0.186	0.307	0.110	0.090	0.090
IACCtotal	0.709	0.254	0.277	0.075	0.324	0.223	0.234	0.145
SPL(A)	-12.9							
SPL(Lin)	-10.4							
SPL(C)	-10.8							
STI	0.64							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.64							
STI(expected)	0.17							

T(30_Avrage)	1.6							
LF(80_Avrage)	0.314							
Lj(Avrage)	-1.2							
BR(SPL)	0.9							
SIL	-19.7							
AI	1							
Alcons(STI)	5.91							
Density(reflections)	550.24							
Receiver Number: 4 R4 (x,y,z) = (2214.00,1228.00,4.35)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.46	1.36	0.91	0.81	0.81	0.98	0.85	0.57
T(15)	1.66	1.57	1.32	1.42	1.43	1.55	1.27	0.67
T(20)	1.66	1.57	1.36	1.49	1.51	1.63	1.33	0.73
XI(T(20))	0.1	0.2	2.2	4.7	5.6	3.8	3.9	6.3
T(30)	1.66	1.57	1.41	1.57	1.63	1.76	1.42	0.79
XI(T(30))	0.1	0.1	1.1	2.5	3.7	3.5	2.8	3.9
Curvature(C)	0	0.4	3.5	5.5	7.9	8	6.9	7.5
Ts	94	85	56	50	50	62	55	36
SPL	-19.7	-19.7	-21.1	-21.8	-21.9	-21.2	-21.7	-23.7
D(50)	0.45	0.49	0.64	0.71	0.71	0.62	0.64	0.75
C(7)	-8.4	-7.6	-5.8	-5.3	-5.4	-6.4	-6.2	-4.9
C(50)	-0.9	-0.3	2.5	3.8	3.8	2.1	2.5	4.7
C(80)	1.7	2.4	5.3	6.5	6.5	4.9	5.5	8.5
U(50)	-0.9	-0.3	2.5	3.8	3.8	2.1	2.5	4.7
U(80)	1.7	2.4	5.3	6.5	6.5	4.9	5.5	8.5
LF(80)	0.31	0.299	0.279	0.268	0.264	0.272	0.265	0.253
LFC(80)	0.46	0.446	0.423	0.41	0.405	0.416	0.408	0.391
Diffusivity(ss)	4	3.8	2.7	2.2	2.3	3	3	2.4
Echo(Dietsch)	0.48	0.48	0.44	0.42	0.42	0.44	0.44	0.42
Sd	-28.6	-28	-27.9	-28.2	-28.4	-28.5	-28.8	-29.8
Sr	-23.1	-22.9	-23	-23.3	-23.4	-23.3	-23.7	-25
SPL80	-21.9	-21.7	-22.2	-22.7	-22.7	-22.4	-22.8	-24.3
IACCearly	0.783	0.525	0.392	0.213	0.314	0.277	0.259	0.156
IACClate	0.141	0.359	0.118	0.148	0.436	0.226	0.072	0.071
IACCtotal	0.779	0.503	0.366	0.180	0.321	0.271	0.240	0.150
SPL(A)	-14.9							
SPL(Lin)	-12.2							
SPL(C)	-12.6							
STI	0.64							
STI(Female)	0							

STI(Male)	0							
RASTI	0.64							
STI(expected)	0.17							
T(30_Avrerage)	1.6							
LF(80_Avrerage)	0.277							
Lj(Avrerage)	-1.3							
BR(SPL)	1.4							
SIL	-21.7							
AI	1							
Alcons(STI)	6.04							
Density(reflections)	541.73							
Receiver Number: 5 R5 (x,y,z) = (2216.00,1231.00,3.97)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.47	1.36	0.91	0.83	0.81	0.99	0.85	0.55
T(15)	1.64	1.55	1.32	1.41	1.41	1.53	1.29	0.7
T(20)	1.63	1.54	1.34	1.46	1.47	1.6	1.32	0.76
XI(T(20))	0.1	0.1	1.3	2.8	3.4	2.6	2.1	7.5
T(30)	1.65	1.56	1.39	1.55	1.6	1.76	1.41	0.8
XI(T(30))	0.1	0.1	1	2.5	3.7	4.5	2.7	3.1
Curvature(C)	1.2	1.3	3.6	6.3	8.5	10.2	7.4	4.8
Ts	91	82	56	50	50	62	55	35
SPL	-18.5	-18.6	-19.8	-20.4	-20.4	-19.9	-20.4	-22.3
D(50)	0.47	0.51	0.65	0.71	0.7	0.62	0.64	0.75
C(7)	-5.6	-4.7	-3.5	-3.3	-3.6	-4.8	-4.6	-3.3
C(50)	-0.5	0.2	2.7	3.8	3.8	2.2	2.5	4.8
C(80)	2.1	2.7	5.5	6.5	6.5	5.1	5.7	8.8
U(50)	-0.5	0.2	2.7	3.8	3.8	2.2	2.5	4.8
U(80)	2.1	2.7	5.5	6.5	6.5	5.1	5.7	8.8
LF(80)	0.301	0.289	0.286	0.283	0.284	0.29	0.284	0.273
LFC(80)	0.448	0.433	0.427	0.422	0.422	0.431	0.424	0.408
Diffusivity(ss)	4	3.7	2.7	2.4	2.4	3.1	3.1	2.5
Echo(Dietsch)	0.48	0.47	0.43	0.41	0.4	0.43	0.43	0.42
Sd	-25.2	-24.5	-24.8	-25.3	-25.6	-25.9	-26.3	-27.2
Sr	-21.8	-21.5	-21.6	-21.9	-21.9	-21.9	-22.3	-23.5
SPL80	-20.6	-20.4	-20.8	-21.2	-21.3	-21.1	-21.5	-22.8
IACCearly	0.731	0.288	0.208	0.147	0.318	0.216	0.233	0.093
IACClate	0.394	0.207	0.229	0.182	0.332	0.168	0.119	0.07
IACCtotal	0.728	0.285	0.195	0.147	0.315	0.206	0.207	0.089
SPL(A)	-13.5							
SPL(Lin)	-10.9							

SPL(C)	-11.3							
STI	0.64							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.63							
STI(expected)	0.17							
T(30_Avrerage)	1.6							
LF(80_Avrerage)	0.285							
Lj(Avrerage)	-1.3							
BR(SPL)	1.2							
SIL	-20.3							
AI	1							
Alcons(STI)	6.15							
Density(reflections)	520.64							
Receiver Number: 6 R6 (x,y,z) = (2207.00,1230.00,5.58)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.23	1.15	0.79	0.72	0.7	0.89	0.75	0.52
T(15)	1.59	1.5	1.23	1.32	1.28	1.43	1.15	0.62
T(20)	1.63	1.52	1.29	1.38	1.38	1.56	1.25	0.67
XI(T(20))	0.9	0.8	5.4	7.3	9.9	8.9	9	5
T(30)	1.66	1.56	1.38	1.65	1.73	1.87	1.4	0.76
XI(T(30))	0.6	0.6	3.8	14.4	21.2	12.7	7.9	6.7
Curvature(C)	2.1	2.7	6.8	19.5	25.4	19.4	12.1	12.6
Ts	82	76	54	48	48	62	54	37
SPL	-23.8	-23.8	-25	-25.6	-25.7	-24.8	-25.5	-28
D(50)	0.5	0.53	0.65	0.71	0.71	0.61	0.64	0.74
C(7)	-9	-8.9	-7.3	-6.7	-6.7	-8.2	-7.7	-6.3
C(50)	0.1	0.4	2.7	3.8	3.9	1.9	2.6	4.7
C(80)	2.9	3.3	5.9	6.9	7	4.9	5.9	8.7
U(50)	0.1	0.4	2.7	3.8	3.9	1.9	2.6	4.7
U(80)	2.9	3.3	5.9	6.9	7	4.9	5.9	8.7
LF(80)	0.223	0.217	0.186	0.158	0.158	0.197	0.201	0.19
LFC(80)	0.372	0.368	0.332	0.301	0.301	0.343	0.344	0.329
Diffusivity(ss)	4.5	4.4	4.1	3.9	4.1	5	4.7	4.1
Echo(Dietsch)	0.45	0.44	0.42	0.4	0.4	0.42	0.42	0.4
Sd	-33.3	-33.2	-33.1	-33.1	-33.3	-33.6	-33.9	-35.2
Sr	-26.8	-26.6	-26.9	-27.1	-27.2	-26.9	-27.4	-29.3
SPL80	-25.6	-25.4	-26	-26.4	-26.5	-26	-26.5	-28.6
IACCearly	0.541	0.503	0.254	0.161	0.468	0.341	0.216	0.125
IACClate	0.377	0.170	0.206	0.224	0.599	0.438	0.249	0.057

IACCtotal	0.521	0.475	0.235	0.169	0.488	0.351	0.217	0.121
SPL(A)	-18.6							
SPL(Lin)	-16.1							
SPL(C)	-16.5							
STI	0.66							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.65							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrerage)	1.7							
LF(80_Avrerage)	0.18							
Lj(Avrerage)	-1.6							
BR(SPL)	1.3							
SIL	-25.4							
AI	1							
Alcons(STI)	5.59							
Density(reflections)	338.28							
Receiver Number: 7 R7 (x,y,z) = (2207.00,1227.00,5.58)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.22	1.15	0.8	0.77	0.74	0.94	0.76	0.52
T(15)	1.6	1.5	1.26	1.34	1.32	1.45	1.17	0.62
T(20)	1.63	1.52	1.31	1.4	1.4	1.56	1.27	0.68
XI(T(20))	1	0.7	5.1	6.2	7.3	6.3	8.3	5.4
T(30)	1.68	1.57	1.4	1.6	1.66	1.77	1.42	0.76
XI(T(30))	0.9	0.6	3.7	9.7	13.8	7.8	7.9	6.6
Curvature(C)	3.1	2.7	6.9	14.8	18.7	13.6	12.1	12.2
Ts	82	77	55	50	50	64	54	37
SPL	-23.9	-23.9	-25.2	-25.8	-25.8	-24.8	-25.5	-28
D(50)	0.51	0.52	0.65	0.7	0.7	0.6	0.64	0.75
C(7)	-9	-8.8	-7.2	-6.5	-6.6	-8.2	-7.7	-6.3
C(50)	0.1	0.4	2.6	3.6	3.7	1.8	2.6	4.7
C(80)	3	3.3	5.9	6.7	6.9	4.9	6	8.8
U(50)	0.1	0.4	2.6	3.6	3.7	1.8	2.6	4.7
U(80)	3	3.3	5.9	6.7	6.9	4.9	6	8.8
LF(80)	0.225	0.22	0.191	0.161	0.161	0.201	0.205	0.193
LFC(80)	0.378	0.374	0.339	0.307	0.307	0.352	0.353	0.338
Diffusivity(ss)	5.2	5	4.6	4.3	4.5	5.7	5.3	4.6
Echo(Dietsch)	0.45	0.45	0.42	0.41	0.41	0.43	0.43	0.4
Sd	-33.4	-33.2	-33.1	-33.2	-33.3	-33.6	-33.9	-35.3
Sr	-26.8	-26.7	-27.1	-27.4	-27.4	-27	-27.4	-29.3

SPL80	-25.6	-25.5	-26.2	-26.6	-26.6	-26	-26.5	-28.6
IACCearly	0.280	0.399	0.146	0.290	0.517	0.401	0.217	0.096
IACClate	0.273	0.189	0.252	0.177	0.606	0.460	0.238	0.061
IACCtotal	0.275	0.377	0.136	0.261	0.528	0.408	0.214	0.093
SPL(A)	-18.7							
SPL(Lin)	-16.2							
SPL(C)	-16.6							
STI	0.65							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.64							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrerage)	1.6							
LF(80_Avrerage)	0.183							
Lj(Avrerage)	-1.6							
BR(SPL)	1.3							
SIL	-25.5							
AI	1							
Alcons(STI)	5.73							
Density(reflections)	336.86							
Receiver Number: 8 R8 (x,y,z) = (2208.00,1228.00,5.38)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.24	1.15	0.8	0.75	0.72	0.9	0.76	0.53
T(15)	1.61	1.5	1.25	1.32	1.31	1.44	1.17	0.62
T(20)	1.63	1.53	1.3	1.38	1.39	1.54	1.27	0.69
XI(T(20))	0.7	0.7	3.8	5.5	6.7	5.5	7.5	7.2
T(30)	1.68	1.58	1.38	1.55	1.6	1.74	1.4	0.76
XI(T(30))	0.6	0.6	3	6.6	9.5	7.1	6.1	5.8
Curvature(C)	2.8	3.1	6.7	12.3	15.6	13.3	10.6	10.2
Ts	80	75	52	47	47	61	52	35
SPL	-23.3	-23.2	-24.5	-25.1	-25.2	-24.4	-25.1	-27.5
D(50)	0.51	0.53	0.66	0.72	0.72	0.62	0.65	0.76
C(7)	-7.2	-7.2	-5.5	-4.8	-5	-6.5	-6.1	-4.8
C(50)	0.2	0.5	2.9	4.1	4.1	2.1	2.7	4.9
C(80)	3	3.4	6	7	7.2	5.2	6.1	9
U(50)	0.2	0.5	2.9	4.1	4.1	2.1	2.7	4.9
U(80)	3	3.4	6	7	7.2	5.2	6.1	9
LF(80)	0.253	0.241	0.207	0.174	0.173	0.207	0.209	0.195
LFC(80)	0.418	0.404	0.367	0.333	0.33	0.364	0.362	0.345
Diffusivity(ss)	3.3	3.4	2.9	2.6	2.7	3.6	3.4	2.8

Echo(Dietsch)	0.48	0.47	0.44	0.42	0.41	0.44	0.44	0.42
Sd	-31.3	-31.2	-31.1	-31.2	-31.4	-31.8	-32.2	-33.6
Sr	-26.2	-26	-26.3	-26.6	-26.7	-26.5	-27	-28.8
SPL80	-25.1	-24.9	-25.5	-25.9	-26	-25.6	-26.1	-28.1
IACCearly	0.616	0.320	0.316	0.113	0.495	0.358	0.231	0.097
IACClate	0.209	0.177	0.162	0.233	0.615	0.395	0.174	0.057
IACCtotal	0.611	0.308	0.284	0.107	0.511	0.360	0.222	0.094
SPL(A)	-18.2							
SPL(Lin)	-15.6							
SPL(C)	-16							
STI	0.65							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.65							
STI(expected)	0.17							
T(30_Avrage)	1.6							
LF(80_Avrage)	0.199							
Lj(Avrage)	-1.6							
BR(SPL)	1.3							
SIL	-25							
AI	1							
Alcons(STI)	5.67							
Density(reflections)	358.38							
Receiver Number: 9 G1 (x,y,z) = (2207.00,1230.00,9.40)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.39	1.27	0.7	0.6	0.62	0.81	0.7	0.44
T(15)	1.68	1.61	1.31	1.39	1.38	1.47	1.2	0.68
T(20)	1.64	1.56	1.34	1.44	1.44	1.52	1.24	0.71
XI(T(20))	0.9	0.9	2.6	4.8	5.8	3.7	3.3	4.1
T(30)	1.62	1.56	1.41	1.62	1.69	1.83	1.42	0.77
XI(T(30))	0.5	0.4	2.5	10.1	16.5	12.8	10.2	3.7
Curvature(C)	-1.2	0	4.8	12.3	17.5	20	14.5	8.1
Ts	89	81	52	46	46	57	53	38
SPL	-21.2	-21.5	-23.3	-24.3	-24.3	-23.1	-23.5	-26.1
D(50)	0.52	0.55	0.72	0.79	0.78	0.7	0.7	0.78
C(7)	-11.1	-10.8	-8.7	-7.5	-7.8	-9.6	-9.7	-8.7
C(50)	0.3	0.9	4.1	5.7	5.6	3.7	3.7	5.6
C(80)	2.7	3.3	7	8.2	8.2	6.5	6.7	9.6
U(50)	0.3	0.9	4.1	5.7	5.6	3.7	3.7	5.6
U(80)	2.7	3.3	7	8.2	8.2	6.5	6.7	9.6

LF(80)	0.237	0.23	0.201	0.169	0.174	0.215	0.222	0.214
LFC(80)	0.39	0.382	0.344	0.302	0.31	0.364	0.373	0.363
Diffusivity(ss)	7	6.9	7.2	7.9	8.3	8.6	8.5	7.8
Echo(Dietsch)	0.43	0.42	0.39	0.4	0.42	0.4	0.4	0.38
Sd	-32.6	-32.7	-32.6	-32.6	-32.8	-33.2	-33.7	-35.4
Sr	-24.1	-24.1	-24.7	-25.4	-25.4	-24.6	-25	-27.2
SPL80	-23.1	-23.2	-24.1	-24.9	-25	-24	-24.3	-26.6
IACCearly	0.474	0.447	0.292	0.211	0.423	0.372	0.186	0.092
IACClate	0.243	0.284	0.175	0.243	0.469	0.358	0.178	0.084
IACCtotal	0.454	0.432	0.269	0.199	0.426	0.365	0.183	0.088
SPL(A)	-16.9							
SPL(Lin)	-14.1							
SPL(C)	-14.6							
STI	0.68							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.69							
STI(expected)	0.15							
T(30_Avrage)	1.7							
LF(80_Avrage)	0.193							
Lj(Avrage)	-1.7							
BR(SPL)	1.9							
SIL	-23.8							
AI	1							
Alcons(STI)	4.88							
Density(reflections)	354.06							
Receiver Number: 10 G2 (x,y,z) = (2210.00,1228.00,9.01)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.36	1.26	0.78	0.75	0.74	0.88	0.75	0.5
T(15)	1.63	1.55	1.33	1.48	1.48	1.51	1.23	0.67
T(20)	1.62	1.53	1.35	1.5	1.51	1.58	1.28	0.72
XI(T(20))	0.2	0.2	2	2.7	3.1	2.9	3.2	5.6
T(30)	1.63	1.55	1.39	1.59	1.65	1.75	1.39	0.78
XI(T(30))	0.1	0.2	1.1	2.2	4	4.6	4	3.5
Curvature(C)	0.9	1.3	3.2	6.1	9.4	10.7	8.9	7.4
Ts	88	83	56	53	53	62	55	38
SPL	-20.6	-20.9	-23	-24.4	-24.5	-23.1	-23.4	-25.8
D(50)	0.49	0.51	0.66	0.7	0.7	0.64	0.65	0.75
C(7)	-10.3	-10.1	-8.6	-7.5	-7.5	-8.6	-8.5	-7.3
C(50)	-0.2	0.2	2.8	3.8	3.7	2.4	2.7	4.7

C(80)	2.5	3	6.1	6.9	6.9	5.6	6.1	9
U(50)	-0.2	0.2	2.8	3.8	3.7	2.4	2.7	4.7
U(80)	2.5	3	6.1	6.9	6.9	5.6	6.1	9
LF(80)	0.238	0.23	0.185	0.135	0.137	0.191	0.208	0.204
LFC(80)	0.398	0.389	0.333	0.264	0.268	0.341	0.361	0.356
Diffusivity(ss)	4.8	5	4.2	3.9	3.9	4.5	4.5	3.9
Echo(Dietsch)	0.46	0.46	0.43	0.41	0.41	0.43	0.43	0.41
Sd	-31.3	-31.4	-32.1	-32.6	-32.7	-32.3	-32.4	-33.8
Sr	-23.7	-23.8	-24.8	-25.9	-26.1	-25.1	-25.2	-27
SPL80	-22.6	-22.6	-23.9	-25.2	-25.3	-24.2	-24.3	-26.3
IACCearly	0.551	0.412	0.302	0.302	0.660	0.467	0.272	0.107
IACClate	0.367	0.404	0.160	0.195	0.560	0.373	0.149	0.064
IACCtotal	0.547	0.397	0.269	0.291	0.648	0.455	0.259	0.101
SPL(A)	-16.9							
SPL(Lin)	-13.9							
SPL(C)	-14.3							
STI	0.65							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.65							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrerage)	1.6							
LF(80_Avrerage)	0.172							
Lj(Avrerage)	-1.6							
BR(SPL)	2.6							
SIL	-23.9							
AI	1							
Alcons(STI)	5.79							
Density(reflections)	409.3							
Receiver Number: 11 G3 (x,y,z) = (2210.00,1231.00,9.01)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.37	1.26	0.78	0.69	0.69	0.86	0.75	0.5
T(15)	1.62	1.54	1.31	1.43	1.43	1.49	1.21	0.68
T(20)	1.62	1.54	1.35	1.46	1.47	1.55	1.26	0.73
XI(T(20))	0.1	0.2	2	3.1	3.3	2.9	2.9	5.8
T(30)	1.63	1.55	1.38	1.56	1.6	1.71	1.37	0.77
XI(T(30))	0.1	0.1	0.9	2.5	4.3	4.5	3.5	3.3
Curvature(C)	0.5	0.9	2.7	6.3	9.3	10.2	8.5	6.5
Ts	92	86	56	50	50	61	56	40
SPL	-20.7	-21	-23.1	-24.2	-24.3	-23.1	-23.4	-25.9

D(50)	0.47	0.49	0.66	0.72	0.72	0.64	0.64	0.74
C(7)	-11.8	-11.5	-9.2	-7.9	-8	-9.7	-9.8	-8.6
C(50)	-0.6	-0.1	2.8	4.1	4.1	2.4	2.6	4.5
C(80)	2.1	2.7	6.1	7.4	7.4	5.7	6.1	8.8
U(50)	-0.6	-0.1	2.8	4.1	4.1	2.4	2.6	4.5
U(80)	2.1	2.7	6.1	7.4	7.4	5.7	6.1	8.8
LF(80)	0.263	0.256	0.203	0.155	0.157	0.204	0.221	0.219
LFC(80)	0.419	0.411	0.355	0.301	0.304	0.358	0.376	0.372
Diffusivity(ss)	5.2	5.3	4.1	3.6	3.7	4.5	4.6	4.1
Echo(Dietsch)	0.46	0.45	0.43	0.41	0.41	0.43	0.43	0.42
Sd	-32.8	-32.8	-32.8	-32.8	-32.9	-33.2	-33.6	-35
Sr	-24.1	-24.1	-24.9	-25.6	-25.7	-25	-25.3	-27.2
SPL80	-22.8	-22.9	-24	-24.9	-25	-24.1	-24.4	-26.4
IACCearly	0.449	0.204	0.281	0.288	0.466	0.446	0.324	0.093
IACClate	0.224	0.457	0.188	0.152	0.450	0.371	0.152	0.072
IACCtotal	0.446	0.206	0.274	0.280	0.464	0.441	0.316	0.092
SPL(A)	-16.9							
SPL(Lin)	-13.9							
SPL(C)	-14.3							
STI	0.65							
STI(Female)	0							
STI(Male)	0							
RASTI	0.65							
STI(expected)	0.15							
T(30_Avrerage)	1.6							
LF(80_Avrerage)	0.193							
Lj(Avrerage)	-1.6							
BR(SPL)	2.2							
SIL	-23.7							
AI	1							
Alcons(STI)	5.68							
Density(reflections)	401.67							

Tab. A.4 –Dati completi delle simulazione per tutti i punti di ricezione considerati

A.4.2. Risultati simulazioni per la configurazione teatro

In Tab. A.5 vengono riportati i dati completi delle simulazioni per tutti i punti di ricezione considerati.

Receiver Number: 4 R4		(x,y,z) = (2214.00,1228.00,4.35)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.63	1.47	1.08	0.97	0.97	1.22	1.08	0.68
T(15)	1.77	1.58	1.25	1.34	1.34	1.58	1.29	0.75
T(20)	1.81	1.61	1.3	1.38	1.37	1.59	1.32	0.76
XI(T(20))	0.7	0.8	2.4	4.4	5.4	3.9	4.1	0.6
T(30)	*	1.64	1.36	1.47	1.49	1.64	1.4	0.81
XI(T(30))	*	0.5	1.6	3.8	5.2	2	3.1	3.1
Curvature(C)	*	1.7	4.5	6.9	8.5	3.6	6.1	7.2
Ts	94	83	53	44	44	60	54	31
SPL	66.6	66.4	65.1	64.5	64.2	64.6	64.1	62.4
D(50)	0.48	0.51	0.67	0.74	0.74	0.65	0.66	0.78
C(7)	-5.7	-5.2	-3.5	-2.7	-2.6	-3.5	-3.2	-1.6
C(50)	-0.4	0.2	3	4.5	4.6	2.8	2.9	5.5
C(80)	1.8	2.3	5.1	6.2	6.2	4.6	5	8.3
U(50)	-0.4	0.2	3	4.5	4.6	2.8	2.9	5.5
U(80)	1.8	2.3	5.1	6.2	6.2	4.6	5	8.3
LF(80)	0.319	0.311	0.307	0.303	0.299	0.293	0.284	0.268
LFC(80)	0.418	0.408	0.398	0.393	0.39	0.388	0.379	0.357
Diffusivity(ss)	3.3	3.3	2.3	1.9	2	2.5	2.5	2.1
Echo(Dietsch)	0.56	0.54	0.52	0.49	0.49	0.49	0.49	0.46
Sd	59.8	60.1	60	59.9	59.7	59.5	59.1	58.4
Sr	63.4	63.5	63.4	63.2	62.9	62.8	62.3	61.3
SPL80	64.4	64.5	64	63.6	63.3	63.3	62.9	61.7
IACCearly	0.873	0.883	0.448	0.213	0.661	0.682	0.572	0.218
IACClate	0.268	0.391	0.215	0.176	0.385	0.284	0.134	0.087
IACCtotal	0.871	0.877	0.434	0.204	0.652	0.667	0.554	0.215
SPL(A)	71.1							
SPL(Lin)	73.9							
SPL(C)	73.5							
STI	0.65							
STI(Female)	0.66							
STI(Male)	0.65							
RASTI	0.65							
STI(expected)	0.19							
T(30_Avrage)	1.5							
LF(80_Avrage)	0.305							
Lj(Avrage)	-1.5							
BR(SPL)	1.4							
SIL	64.3							
AI	1							
Alcons(STI)	5.87							

Density(reflections)	33.78							
Receiver Number: 5 R5 (x,y,z) = (2216.00,1231.00,3.97)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.68	1.53	1.14	1.09	1.08	1.26	1.1	0.71
T(15)	1.88	1.66	1.28	1.3	1.27	1.56	1.25	0.76
T(20)	1.89	1.67	1.35	1.36	1.34	1.66	1.35	0.75
XI(T(20))	0.6	0.6	3.8	5.4	7.3	6.8	6.1	1.3
T(30)	*	1.66	1.38	1.46	1.47	1.67	1.41	0.8
XI(T(30))	*	0.3	1.9	4.5	6.2	3.1	3.2	3.3
Curvature(C)	*	-0.5	2.1	7.3	9.7	0.3	4.7	7
Ts	95	85	53	45	45	59	52	30
SPL	67.6	67.3	66.1	65.6	65.3	65.8	65.3	63.8
D(50)	0.48	0.51	0.67	0.74	0.74	0.65	0.66	0.78
C(7)	-4.9	-4.5	-2.7	-1.7	-1.6	-2.6	-2.3	-0.6
C(50)	-0.4	0.1	3	4.6	4.5	2.6	2.8	5.4
C(80)	1.8	2.3	5.1	6	5.9	4.6	5.1	8.4
U(50)	-0.4	0.1	3	4.6	4.5	2.6	2.8	5.4
U(80)	1.8	2.3	5.1	6	5.9	4.6	5.1	8.4
LF(80)	0.3	0.298	0.294	0.288	0.28	0.273	0.263	0.245
LFC(80)	0.389	0.385	0.37	0.356	0.348	0.35	0.339	0.315
Diffusivity(ss)	3.5	3.4	2.4	2	2	2.4	2.4	2
Echo(Dietsch)	0.53	0.52	0.48	0.51	0.51	0.48	0.47	0.44
Sd	61.5	61.5	61.6	61.6	61.4	61.3	61	60.5
Sr	64.4	64.4	64.3	64.3	64	63.9	63.5	62.7
SPL80	65.4	65.3	64.9	64.6	64.3	64.5	64.1	63.2
IACCearly	0.385	0.059	0.234	0.231	0.353	0.495	0.421	0.129
IACClate	0.247	0.167	0.263	0.179	0.297	0.273	0.165	0.084
IACCtotal	0.384	0.059	0.230	0.227	0.346	0.472	0.406	0.126
SPL(A)	72.3							
SPL(Lin)	75							
SPL(C)	74.6							
STI	0.64							
STI(Female)	0.65							
STI(Male)	0.65							
RASTI	0.64							
STI(expected)	0.19							
T(30_Avrerage)	1.5							
LF(80_Avrerage)	0.29							
Lj(Avrerage)	-1.3							
BR(SPL)	1.3							

SIL	65.5							
AI	1							
Alcons(STI)	6.04							
Density(reflections)	32.45							
Receiver Number: 6 R6 (x,y,z) = (2207.00,1230.00,5.58)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.44	1.36	1.17	1.21	1.2	1.23	1.15	0.83
T(15)	1.81	1.57	1.23	1.18	1.21	1.41	1.21	0.71
T(20)	1.86	1.63	1.24	1.22	1.18	1.32	1.19	0.71
XI(T(20))	3.5	3.2	5.7	12.7	17.7	9.3	10.8	2.2
T(30)	*	1.58	1.24	1.31	1.31	1.38	1.22	0.78
XI(T(30))	*	2.2	2.1	7.5	10.9	3.9	4	7.8
Curvature(C)	*	-3.6	0.7	7.6	11	4.6	2.6	11
Ts	108	100	75	66	62	81	71	43
SPL	60.6	60.6	58.6	57.5	57.3	58.6	57.8	55.3
D(50)	0.37	0.39	0.5	0.57	0.6	0.49	0.54	0.7
C(7)	-7.3	-6.7	-4.6	-3.6	-3.4	-5.3	-4.7	-2.8
C(50)	-2.3	-1.9	0.1	1.3	1.7	-0.1	0.8	3.6
C(80)	-0.1	0.3	1.8	2.5	2.8	1.4	2.4	5.5
U(50)	-2.3	-1.9	0.1	1.3	1.7	-0.1	0.8	3.6
U(80)	-0.1	0.3	1.8	2.5	2.8	1.4	2.4	5.5
LF(80)	0.218	0.204	0.161	0.135	0.143	0.199	0.199	0.183
LFC(80)	0.324	0.306	0.244	0.207	0.216	0.29	0.291	0.269
Diffusivity(ss)	4.8	4.6	4.4	4.3	4.5	5.8	5.5	4.9
Echo(Dietsch)	0.51	0.5	0.52	0.55	0.56	0.53	0.51	0.48
Sd	52.5	53.1	52.7	52.3	52.3	52.2	51.8	50.7
Sr	56.3	56.5	55.7	55.1	55.1	55.6	55.2	53.7
SPL80	57.5	57.7	56.4	55.5	55.5	56.3	55.8	54.2
IACCearly	0.519	0.369	0.320	0.297	0.653	0.614	0.358	0.124
IACClate	0.170	0.137	0.305	0.230	0.423	0.371	0.196	0.066
IACCtotal	0.515	0.359	0.288	0.266	0.641	0.598	0.347	0.122
SPL(A)	64.6							
SPL(Lin)	67.6							
SPL(C)	67.2							
STI	0.57							
STI(Female)	0.59							
STI(Male)	0.58							
RASTI	0.56							
STI(expected)	0.17							
T(30_Avrerage)	1.3							

LF(80_Avrerage)	0.16							
Lj(Avrerage)	-1.2							
BR(SPL)	2.2							
SIL	57.8							
AI	1							
Alcons(STI)	8.41							
Density(reflections)	19.54							
Receiver Number: 7 R7 (x,y,z) = (2207.00,1227.00,5.58)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.44	1.34	1.09	1.05	1.04	1.23	1.03	0.68
T(15)	1.77	1.61	1.35	1.4	1.39	1.53	1.27	0.76
T(20)	1.86	1.58	1.33	1.35	1.31	1.37	1.23	0.76
XI(T(20))	2.9	2.6	4.6	16.8	21.3	13.6	4.9	2.7
T(30)	*	1.6	1.25	1.32	1.32	1.4	1.23	0.8
XI(T(30))	*	1.2	3.3	6.7	9.3	5	2.7	3.4
Curvature(C)	*	1.1	-6.7	-2.3	0.9	1.9	-0.4	5.7
Ts	95	87	64	54	51	69	59	35
SPL	60.8	60.9	59.1	58.2	58.1	59	58.3	56.1
D(50)	0.45	0.47	0.6	0.68	0.7	0.6	0.64	0.77
C(7)	-8	-7.6	-5.7	-4.8	-4.6	-6	-5.6	-4.2
C(50)	-0.9	-0.5	1.8	3.2	3.7	1.8	2.4	5.2
C(80)	1.4	1.8	3.4	4	4.4	3.2	4.1	7.4
U(50)	-0.9	-0.5	1.8	3.2	3.7	1.8	2.4	5.2
U(80)	1.4	1.8	3.4	4	4.4	3.2	4.1	7.4
LF(80)	0.232	0.222	0.194	0.167	0.165	0.203	0.202	0.19
LFC(80)	0.362	0.353	0.315	0.281	0.278	0.322	0.319	0.302
Diffusivity(ss)	4.5	4.2	3.7	3.4	3.4	4.3	4.2	3.9
Echo(Dietsch)	0.5	0.5	0.5	0.55	0.56	0.52	0.49	0.45
Sd	52.1	52.6	52.4	52.1	52.2	52.1	51.7	50.5
Sr	57.3	57.7	56.9	56.5	56.5	56.9	56.4	54.9
SPL80	58.4	58.7	57.5	56.8	56.7	57.3	56.9	55.3
IACCearly	0.256	0.078	0.242	0.352	0.658	0.590	0.354	0.082
IACClate	0.247	0.237	0.189	0.148	0.590	0.436	0.234	0.063
IACCtotal	0.251	0.078	0.255	0.335	0.653	0.576	0.341	0.081
SPL(A)	65.2							
SPL(Lin)	68.1							
SPL(C)	67.7							
STI	0.62							
STI(Female)	0.64							
STI(Male)	0.63							

RASTI	0.61							
STI(expected)	0.19							
T(30_Avrage)	1.3							
LF(80_Avrage)	0.187							
Lj(Avrage)	-1.4							
BR(SPL)	1.9							
SIL	58.4							
AI	1							
Alcons(STI)	6.57							
Density(reflections)	19.61							
Receiver Number: 8 R8 (x,y,z) = (2208.00,1228.00,5.38)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.48	1.4	1.15	1.13	1.09	1.22	1.06	0.67
T(15)	1.77	1.61	1.33	1.38	1.38	1.48	1.25	0.76
T(20)	1.84	1.59	1.33	1.34	1.3	1.42	1.25	0.75
XI(T(20))	2.6	2.6	4.5	10.2	14.9	5.1	2.9	1.2
T(30)	*	1.61	1.27	1.35	1.36	1.46	1.28	0.79
XI(T(30))	*	1	2.3	4.1	7.2	2.1	1.7	2.3
Curvature(C)	*	1.5	-4	0.9	4.2	2.9	2.1	5.3
Ts	99	92	67	57	54	70	60	36
SPL	61.3	61.4	59.5	58.4	58.3	59.3	58.7	56.4
D(50)	0.44	0.46	0.58	0.66	0.69	0.6	0.63	0.77
C(7)	-7.8	-7.4	-5.3	-4.2	-4	-5.5	-5.1	-3.5
C(50)	-1.1	-0.8	1.4	2.9	3.4	1.8	2.3	5.1
C(80)	1.1	1.4	3.2	3.9	4.3	3.2	4	7.3
U(50)	-1.1	-0.8	1.4	2.9	3.4	1.8	2.3	5.1
U(80)	1.1	1.4	3.2	3.9	4.3	3.2	4	7.3
LF(80)	0.217	0.21	0.185	0.164	0.16	0.198	0.201	0.19
LFC(80)	0.343	0.336	0.3	0.272	0.267	0.313	0.315	0.298
Diffusivity(ss)	4	3.9	3.2	2.9	3.2	4.1	4	3.8
Echo(Dietsch)	0.49	0.49	0.53	0.59	0.58	0.52	0.51	0.47
Sd	52.8	53.3	53	52.9	52.9	52.8	52.4	51.3
Sr	57.7	57.9	57.1	56.6	56.7	57.1	56.7	55.3
SPL80	58.8	59	57.8	57	57	57.6	57.2	55.7
IACCearly	0.208	0.600	0.306	0.383	0.660	0.622	0.430	0.121
IACClate	0.272	0.458	0.261	0.180	0.462	0.332	0.117	0.103
IACCtotal	0.208	0.592	0.303	0.365	0.648	0.604	0.413	0.120
SPL(A)	65.5							
SPL(Lin)	68.5							
SPL(C)	68							

STI	0.61							
STI(Female)	0.62							
STI(Male)	0.62							
RASTI	0.6							
STI(expected)	0.19							
T(30_Avrerage)	1.4							
LF(80_Avrerage)	0.18							
Lj(Avrerage)	-1.4							
BR(SPL)	2							
SIL	58.7							
AI	1							
Alcons(STI)	7.08							
Density(reflections)	21.51							
Receiver Number: 9 G1		(x,y,z) = (2207.00,1230.00,9.40)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.57	1.44	1.38	1.39	1.38	1.4	1.33	0.88
T(15)	1.75	1.65	1.26	0.99	0.86	1.34	1.02	0.68
T(20)	1.76	1.6	1.41	1.29	1.1	1.58	1.28	0.68
XI(T(20))	3.8	4.4	48.3	63.2	46	42.3	37	22.9
T(30)	*	1.67	1.4	1.32	1.38	1.66	1.42	0.74
XI(T(30))	*	2.8	15.2	24.3	36.2	17.9	18.1	14.3
Curvature(C)	*	3.9	-0.5	2.3	25	4.8	10.7	9.2
Ts	115	105	76	68	67	81	75	47
SPL	63.3	62.9	61.2	60.7	60.6	61.4	60.8	58
D(50)	0.37	0.4	0.53	0.58	0.58	0.52	0.54	0.69
C(7)	-8.5	-8	-5.9	-5.2	-5.3	-6.7	-6.4	-4.7
C(50)	-2.2	-1.8	0.5	1.4	1.4	0.3	0.7	3.4
C(80)	-0.4	0.1	2	2.7	2.7	1.7	2.3	5.5
U(50)	-2.2	-1.8	0.5	1.4	1.4	0.3	0.7	3.4
U(80)	-0.4	0.1	2	2.7	2.7	1.7	2.3	5.5
LF(80)	0.226	0.227	0.173	0.146	0.16	0.212	0.226	0.223
LFC(80)	0.338	0.338	0.268	0.236	0.255	0.319	0.336	0.331
Diffusivity(ss)	7.2	7	8.2	8.6	8.7	9.4	9.1	9.6
Echo(Dietsch)	0.57	0.58	0.69	0.8	0.79	0.71	0.67	0.56
Sd	54.3	54.2	54.3	54.4	54.2	53.8	53.4	52
Sr	59.1	58.9	58.4	58.4	58.2	58.5	58.1	56.4
SPL80	60.1	59.9	59.1	58.9	58.7	59.1	58.7	56.9
IACCearly	0.563	0.167	0.227	0.164	0.408	0.449	0.245	0.079
IACClate	0.491	0.344	0.294	0.356	0.397	0.448	0.228	0.085
IACCtotal	0.558	0.159	0.221	0.166	0.406	0.440	0.240	0.077

SPL(A)	67.6							
SPL(Lin)	70.4							
SPL(C)	70							
STI	0.58							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.58							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrage)	1.3							
LF(80_Avrage)	0.177							
Lj(Avrage)	-1							
BR(SPL)	1.4							
SIL	60.9							
AI	1							
Alcons(STI)	8							
Density(reflections)	20.03							
Receiver Number: 10 G2		(x,y,z) = (2210.00,1228.00,9.01)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.58	1.44	1.16	1.18	1.2	1.32	1.18	0.72
T(15)	1.68	1.53	1.22	1.25	1.22	1.46	1.19	0.78
T(20)	1.72	1.57	1.32	1.32	1.27	1.51	1.27	0.79
XI(T(20))	0.9	0.9	5.7	4.3	3.9	3.9	5.6	1.5
T(30)	*	1.6	1.39	1.38	1.42	1.62	1.39	0.77
XI(T(30))	*	0.6	4.1	3.7	8.6	4.5	6.5	1.6
Curvature(C)	*	2.2	4.9	4.5	11.6	7.1	8.8	-2.6
Ts	107	96	67	61	62	77	68	42
SPL	64.9	64.6	62.5	61.4	61.1	62.2	61.9	59.5
D(50)	0.4	0.43	0.58	0.63	0.62	0.55	0.58	0.71
C(7)	-7.9	-7.5	-4.8	-3.6	-3.6	-5.5	-5.7	-4.2
C(50)	-1.7	-1.1	1.4	2.2	2.1	0.9	1.3	4
C(80)	0.4	1	3.4	4	3.9	2.8	3.4	6.7
U(50)	-1.7	-1.1	1.4	2.2	2.1	0.9	1.3	4
U(80)	0.4	1	3.4	4	3.9	2.8	3.4	6.7
LF(80)	0.221	0.211	0.166	0.133	0.137	0.189	0.209	0.206
LFC(80)	0.357	0.345	0.286	0.24	0.244	0.313	0.338	0.33
Diffusivity(ss)	4.6	4.7	3.8	3.7	3.9	4.3	4.3	3.7
Echo(Dietsch)	0.5	0.5	0.51	0.53	0.53	0.5	0.49	0.45
Sd	56.3	56.5	56.4	56.3	55.9	55.6	55.1	53.9
Sr	60.9	61	60.2	59.4	59	59.6	59.5	58.1
SPL80	62.1	62.1	60.9	59.9	59.6	60.4	60.2	58.7

IACCearly	0.159	0.170	0.113	0.242	0.577	0.552	0.343	0.091
IACClate	0.188	0.299	0.342	0.141	0.437	0.305	0.128	0.068
IACCtotal	0.159	0.169	0.114	0.224	0.567	0.536	0.328	0.089
SPL(A)	68.5							
SPL(Lin)	71.6							
SPL(C)	71.2							
STI	0.6							
STI(Female)	0.61							
STI(Male)	0.6							
RASTI	0.59							
STI(expected)	0.18							
T(30_Avrage)	1.4							
LF(80_Avrage)	0.162							
Lj(Avrage)	-1.3							
BR(SPL)	2.3							
SIL	61.7							
AI	1							
Alcons(STI)	7.42							
Density(reflections)	25.5							
Receiver Number: 11 G3 (x,y,z) = (2210.00,1231.00,9.01)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.59	1.47	1.17	1.15	1.18	1.33	1.19	0.71
T(15)	1.66	1.54	1.38	1.63	1.62	1.63	1.31	0.77
T(20)	1.71	1.56	1.38	1.45	1.42	1.67	1.33	0.79
XI(T(20))	1	0.5	5.6	29.1	28.4	5.6	3.2	2.1
T(30)	*	1.62	1.46	1.5	*	*	1.5	0.81
XI(T(30))	*	0.8	6.1	13.7	*	*	8.7	2
Curvature(C)	*	4	6.1	3.6	*	*	13.1	2.8
Ts	105	95	66	61	62	77	68	41
SPL	64.8	64.5	62.3	61.1	60.8	62	61.6	59.3
D(50)	0.43	0.46	0.6	0.65	0.64	0.57	0.59	0.73
C(7)	-7.9	-7.4	-4.6	-3.2	-3.3	-5.3	-5.4	-4
C(50)	-1.3	-0.7	1.8	2.6	2.6	1.2	1.6	4.3
C(80)	0.6	1.1	3.6	4.2	4.2	3	3.6	6.9
U(50)	-1.3	-0.7	1.8	2.6	2.6	1.2	1.6	4.3
U(80)	0.6	1.1	3.6	4.2	4.2	3	3.6	6.9
LF(80)	0.266	0.255	0.196	0.144	0.148	0.208	0.231	0.231
LFC(80)	0.405	0.393	0.321	0.258	0.263	0.336	0.361	0.358
Diffusivity(ss)	4.2	4.2	3.4	3.3	3.4	3.8	3.8	3.3
Echo(Dietsch)	0.51	0.51	0.51	0.58	0.58	0.52	0.48	0.44

Sd	56.2	56.4	56.3	56.2	55.8	55.5	55	53.8
Sr	61.1	61.1	60.1	59.2	58.9	59.5	59.3	57.9
SPL80	62.1	62	60.7	59.7	59.4	60.2	60	58.5
IACCearly	0.310	0.367	0.252	0.237	0.578	0.522	0.341	0.135
IACClate	0.184	0.093	0.134	0.129	0.346	0.297	0.163	0.109
IACCtotal	0.303	0.362	0.243	0.229	0.569	0.511	0.330	0.132
SPL(A)	68.2							
SPL(Lin)	71.4							
SPL(C)	71							
STI	0.6							
STI(Female)	0.61							
STI(Male)	0.61							
RASTI	0.59							
RASTI	0.59							
RASTI	0.59							
LF(80_Avrerage)	0.186							
Lj(Avrerage)	-1.3							
BR(SPL)	2.4							
SIL	61.4							
AI	1							
Alcons(STI)	7.24							
Density(reflections)	23.88							

Tab. A.5–Dati completi delle simulazione per tutti i punti di ricezione considerati

A.5. Teatro dell’Opera di Roma

In Tab. A.6 vengono riportati i dati completi delle simulazioni per tutti i punti di ricezione considerati.

Receiver Number: 1 1		(x,y,z) = (-3.00,-4.00,0.56)						
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.57	1.73	1.32	1.39	1.59	2.31	1.64	0.59
XI(EDT)	51.4	48.9	90.5	83.8	77.7	35.3	52.1	92.7
T(15)	2.09	2.22	2.19	2.22	2.26	2.66	2.02	1.01
T(20)	2.28	2.4	2.36	2.38	2.39	2.69	2.03	1.03
XI(T(20))	5.3	4.7	5	4.1	2.5	0.2	0.3	4.1
T(30)	2.63	2.71	2.68	2.67	2.59	2.74	2.06	1.04
XI(T(30))	8.6	6.7	6.8	5.9	3.3	0.2	0.2	1.2

Curvature(C)	15.4	12.8	13.2	12	8.2	1.9	1.5	1
Ts	67	73	60	63	70	102	72	30
SPL	72.2	72.4	72.3	72.5	72.9	73.4	72.6	70.5
D(50)	0.68	0.67	0.73	0.73	0.7	0.61	0.67	0.83
C(7)	-0.7	-1	-0.9	-1.3	-1.9	-2.9	-1.9	0.5
C(50)	3.2	3	4.4	4.2	3.7	1.9	3.2	6.9
C(80)	5.5	5.2	6.7	6.3	5.6	3.3	4.9	9.5
U(50)	3.2	3	4.4	4.2	3.7	1.9	3.2	6.9
U(80)	5.5	5.2	6.7	6.3	5.6	3.3	4.9	9.5
LF(80)	0.078	0.085	0.104	0.112	0.114	0.11	0.105	0.092
LFC(80)	0.17	0.18	0.206	0.219	0.226	0.222	0.212	0.185
Diffusivity(ss)	1.7	1.8	1.5	1.7	1.9	2.4	2.2	1.5
Echo(Dietsch)	0.76	0.75	0.72	0.69	0.65	0.63	0.62	0.58
Sd	68.8	68.8	68.8	68.8	68.8	68.7	68.5	67.7
Sr	70.5	70.6	71	71.2	71.3	71.2	70.9	69.7
SPL80	71.1	71.3	71.5	71.6	71.8	71.8	71.4	70
IACCearly	0.307	0.226	0.326	0.469	0.385	0.274	0.257	0.132
IACClate	0.346	0.386	0.360	0.338	0.314	0.134	0.079	0.077
IACCtotal	0.307	0.229	0.324	0.454	0.360	0.258	0.236	0.123
SPL(A)	79.6							
SPL(Lin)	81.4							
SPL(C)	81							
STI	0.6							
STI(Female)	0.6							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.57							
STI(expected)	0.13							
T(30_Avrerage)	2.6							
LF(80_Avrerage)	0.104							
Lj(Avrerage)	-1.2							
BR(SPL)	-0.3							
SIL	72.8							
AI	1							
Alcons(STI)	7.28							
Density(reflections)	1221.95							
Receiver Number: 2 2 (x,y,z) = (-5.00,-7.50,0.69)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.95	2.1	1.94	2	2.15	2.7	2.1	1.19
XI(EDT)	19.3	15.8	27.9	24.1	16.2	6.2	13.4	128.5
T(15)	2.12	2.24	2.23	2.26	2.3	2.67	2.04	1.05

T(20)	2.28	2.39	2.36	2.4	2.41	2.7	2.05	1.05
XI(T(20))	4.6	3.6	3.1	3	1.8	0.1	0.1	1.4
T(30)	2.73	2.83	2.7	2.71	2.62	2.74	2.07	1.05
XI(T(30))	13.7	12.4	7.7	6.3	3.5	0.2	0.1	0.4
Curvature(C)	19.7	18.5	14.5	13	8.9	1.6	1.1	-0.1
Ts	97	103	86	91	102	144	102	38
SPL	70	70.5	70.1	70.1	70.2	71	69.8	67
D(50)	0.47	0.47	0.54	0.52	0.49	0.4	0.48	0.7
C(7)	-0.8	-0.9	0.4	0.1	-0.6	-2.2	-0.9	2.8
C(50)	-0.5	-0.5	0.6	0.4	-0.1	-1.7	-0.3	3.8
C(80)	1.9	1.8	2.8	2.2	1.4	-0.2	1.3	5.9
U(50)	-0.5	-0.5	0.6	0.4	-0.1	-1.7	-0.3	3.8
U(80)	1.9	1.8	2.8	2.2	1.4	-0.2	1.3	5.9
LF(80)	0.059	0.058	0.045	0.047	0.052	0.064	0.063	0.051
LFC(80)	0.12	0.116	0.092	0.091	0.096	0.115	0.112	0.089
Diffusivity(ss)	2.2	2.3	1.9	2.2	2.6	3.1	2.8	1.8
Echo(Dietsch)	1.19	1.12	1.18	1.08	0.97	0.88	0.87	0.82
Sd	66.6	67	67.2	67.1	66.9	66.7	66.3	65.2
Sr	66.8	67.2	67.4	67.3	67.1	67.1	66.7	65.5
SPL80	67.9	68.3	68.2	68	67.9	67.9	67.4	66
IACCearly	0.251	0.431	0.267	0.269	0.347	0.292	0.154	0.045
IACClate	0.262	0.353	0.238	0.370	0.297	0.115	0.071	0.055
IACCtotal	0.248	0.430	0.266	0.270	0.307	0.257	0.133	0.040
SPL(A)	76.9							
SPL(Lin)	79							
SPL(C)	78.6							
STI	0.55							
STI(Female)	0.55							
STI(Male)	0.54							
RASTI	0.51							
STI(expected)	0.15							
T(30_Avrerage)	2.7							
LF(80_Avrerage)	0.051							
Lj(Avrerage)	-0.1							
BR(SPL)	0.1							
SIL	70.3							
AI	1							
Alcons(STI)	9.33							
Density(reflections)	1361.83							
Receiver Number: 3 3 (x,y,z) = (-12.00,-8.50,0.73)								

Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.03	2.15	1.78	1.78	1.92	2.57	1.95	0.95
XI(EDT)	20.6	17.3	28.3	24.9	16.3	5.6	13.7	102.1
T(15)	2.26	2.38	2.41	2.34	2.32	2.66	2.04	1.05
T(20)	2.33	2.44	2.33	2.42	2.41	2.67	2.05	1.05
XI(T(20))	1.8	2	2.3	2.5	1.7	0.1	0.3	1.8
T(30)	2.58	2.65	2.55	2.58	2.53	2.73	2.05	1.04
XI(T(30))	4.7	4.5	4.3	2.8	2.2	0.4	0.1	0.6
Curvature(C)	10.7	8.9	9.2	6.3	5.2	2.1	0	-0.8
Ts	88	97	86	87	94	130	90	35
SPL	68.9	69.5	69.4	69.7	70.4	71	69.9	66.9
D(50)	0.6	0.57	0.58	0.58	0.57	0.49	0.59	0.79
C(7)	-0.2	-0.6	-0.6	-1	-1.6	-2.6	-1.1	2.1
C(50)	1.8	1.2	1.4	1.5	1.3	-0.1	1.6	5.8
C(80)	2.4	2	2.5	2.4	2.1	0.6	2.3	6.8
U(50)	1.8	1.2	1.4	1.5	1.3	-0.1	1.6	5.8
U(80)	2.4	2	2.5	2.4	2.1	0.6	2.3	6.8
LF(80)	0.099	0.092	0.094	0.131	0.165	0.152	0.129	0.111
LFC(80)	0.151	0.147	0.157	0.196	0.231	0.217	0.188	0.161
Diffusivity(ss)	1.8	2.1	2.1	2.3	2.6	3	2.6	1.7
Echo(Dietsch)	0.82	0.77	0.82	0.74	0.67	0.64	0.62	0.56
Sd	65.7	66.1	66.1	66.2	66.5	66.5	66.3	64.8
Sr	66.7	67	67.1	67.4	68	67.9	67.6	65.9
SPL80	66.9	67.3	67.5	67.8	68.3	68.3	67.9	66.1
IACCearly	0.783	0.410	0.343	0.713	0.701	0.292	0.135	0.121
IACClate	0.240	0.448	0.340	0.342	0.302	0.136	0.069	0.066
IACCtotal	0.764	0.402	0.343	0.694	0.673	0.271	0.106	0.111
SPL(A)	76.9							
SPL(Lin)	78.6							
SPL(C)	78.2							
STI	0.57							
STI(Female)	0.56							
STI(Male)	0.55							
RASTI	0.52							
STI(expected)	0.15							
T(30_Avrerage)	2.6							
LF(80_Avrerage)	0.12							
Lj(Avrerage)	-0.6							
BR(SPL)	-0.6							
SIL	70.3							
AI	1							
Alcons(STI)	8.82							

Density(reflections)	1114.79							
Receiver Number: 4 4 (x,y,z) = (-9.00,-10.00,0.78)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.61	1.75	1.51	1.55	1.76	2.44	1.82	0.94
XI(EDT)	24.9	19.4	34.3	29	17.4	6.5	11.5	93
T(15)	2.08	2.19	2.15	2.21	2.24	2.66	2.01	0.98
T(20)	2.24	2.36	2.32	2.38	2.36	2.69	2.03	1.01
XI(T(20))	4.3	4.4	4.3	4.6	2.5	0.2	0.1	3.2
T(30)	2.59	2.69	2.64	2.66	2.58	2.73	2.06	1.03
XI(T(30))	8.7	7.7	6.9	5.6	3.8	0.2	0.1	1.1
Curvature(C)	15.6	13.8	14	11.7	9.3	1.6	1.2	1.9
Ts	90	98	83	83	92	131	95	40
SPL	69.7	70.1	69.7	69.8	70.2	70.9	69.8	66.7
D(50)	0.46	0.44	0.49	0.51	0.49	0.41	0.48	0.69
C(7)	-3.6	-3.8	-3.1	-3.2	-3.7	-4.9	-4	-1.4
C(50)	-0.8	-1.1	-0.2	0.1	-0.1	-1.6	-0.3	3.4
C(80)	1.8	1.5	2.4	2.5	2	0.4	1.8	6.1
U(50)	-0.8	-1.1	-0.2	0.1	-0.1	-1.6	-0.3	3.4
U(80)	1.8	1.5	2.4	2.5	2	0.4	1.8	6.1
LF(80)	0.253	0.246	0.253	0.272	0.288	0.291	0.293	0.287
LFC(80)	0.335	0.328	0.331	0.347	0.365	0.371	0.37	0.351
Diffusivity(ss)	1.8	2	1.8	1.8	2.2	2.7	2.5	1.7
Echo(Dietsch)	0.89	0.86	0.87	0.82	0.76	0.72	0.71	0.67
Sd	64.5	64.8	64.9	64.9	65	64.8	64.4	62.9
Sr	66.3	66.5	66.6	66.9	67.1	67.1	66.6	65
SPL80	67.5	67.8	67.8	67.9	68.1	68.1	67.6	65.7
IACCearly	0.551	0.403	0.499	0.681	0.542	0.171	0.115	0.092
IACClate	0.232	0.230	0.395	0.453	0.294	0.136	0.070	0.068
IACCtotal	0.544	0.400	0.497	0.672	0.516	0.143	0.100	0.087
SPL(A)	76.9							
SPL(Lin)	78.8							
SPL(C)	78.4							
STI	0.56							
STI(Female)	0.55							
STI(Male)	0.55							
RASTI	0.52							
STI(expected)	0.15							
T(30_Avrerage)	2.6							
LF(80_Avrerage)	0.265							
Lj(Avrerage)	-0.5							

BR(SPL)	-0.1							
SIL	70.2							
AI	1							
Alcons(STI)	9.05							
Density(reflections)	1242.16							
Receiver Number: 5 5 (x,y,z) = (-12.00,-15.00,0.97)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.87	2.04	1.88	1.86	2.01	2.61	2.07	1.08
XI(EDT)	53.2	35.3	48.1	45.6	34	13.7	31.6	235.1
T(15)	2.03	2.2	2.13	2.2	2.27	2.66	2	1.12
T(20)	2.22	2.36	2.34	2.35	2.36	2.66	2.03	1.08
XI(T(20))	7.2	6.2	8.5	5.5	3.5	0.1	0.5	5
T(30)	2.42	2.54	2.43	2.41	2.38	2.64	2.04	1.06
XI(T(30))	5.6	3.8	3.4	2.3	1.4	0.2	0.3	1.8
Curvature(C)	9.3	7.4	3.8	2.6	0.8	-0.8	0.5	-2.4
Ts	78	89	76	76	85	123	85	30
SPL	68.6	68.9	68.8	69.3	70	70.7	69.4	66.2
D(50)	0.62	0.58	0.63	0.63	0.6	0.5	0.59	0.8
C(7)	0.3	-0.2	0.6	0.5	0.2	-1.1	0.4	4.1
C(50)	2.2	1.5	2.3	2.2	1.7	0.1	1.6	6
C(80)	3.4	2.7	3.8	3.9	3.3	1.4	3.1	8.2
U(50)	2.2	1.5	2.3	2.2	1.7	0.1	1.6	6
U(80)	3.4	2.7	3.8	3.9	3.3	1.4	3.1	8.2
LF(80)	0.189	0.177	0.172	0.21	0.205	0.18	0.156	0.125
LFC(80)	0.236	0.225	0.218	0.255	0.246	0.219	0.192	0.155
Diffusivity(ss)	2.1	2.4	2.3	2.5	2.7	3.3	2.8	1.9
Echo(Dietsch)	0.73	0.72	0.71	0.69	0.67	0.66	0.65	0.6
Sd	65.7	65.8	66.1	66.5	67.1	67.1	66.6	64.8
Sr	66.5	66.5	66.8	67.3	67.7	67.7	67.2	65.2
SPL80	67	67	67.3	67.9	68.3	68.3	67.7	65.6
IACCearly	0.806	0.754	0.755	0.785	0.599	0.443	0.207	0.103
IACClate	0.225	0.512	0.238	0.294	0.279	0.166	0.065	0.075
IACCtotal	0.798	0.749	0.746	0.766	0.571	0.405	0.184	0.087
SPL(A)	76.5							
SPL(Lin)	78.2							
SPL(C)	77.8							
STI	0.6							
STI(Female)	0.59							
STI(Male)	0.59							
RASTI	0.55							

STI(expected)	0.2							
T(30_Avrage)	2.4							
LF(80_Avrage)	0.191							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	-0.8							
SIL	69.8							
AI	1							
Alcons(STI)	7.48							
Density(reflections)	1116.5							
Receiver Number: 6 6 (x,y,z) = (-6.00,-13.00,0.89)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.85	1.98	1.74	1.75	1.86	2.5	1.91	0.98
XI(EDT)	13.1	10.2	17.1	15.7	12.3	3.9	7.5	42.4
T(15)	2.1	2.26	2.14	2.22	2.3	2.7	2.01	1.04
T(20)	2.28	2.47	2.36	2.42	2.48	2.71	2.05	1.04
XI(T(20))	5.7	6.6	7.7	6.6	5.4	0.2	0.5	2.2
T(30)	2.56	2.64	2.61	2.65	2.56	2.71	2.07	1.04
XI(T(30))	7	3.8	6	4.8	2.2	0.1	0.2	0.7
Curvature(C)	12.2	6.8	10.5	9.4	3.2	0.1	0.7	-0.4
Ts	105	114	96	98	106	148	109	48
SPL	68.4	68.8	68.5	68.6	69.1	70	68.7	65.1
D(50)	0.42	0.4	0.45	0.45	0.42	0.35	0.42	0.62
C(7)	-3.2	-3.5	-2.9	-3.1	-3.6	-5	-3.9	-0.8
C(50)	-1.5	-1.7	-0.9	-0.9	-1.3	-2.8	-1.4	2.1
C(80)	2	1.5	2.8	2.8	2.3	0.3	1.8	6.3
U(50)	-1.5	-1.7	-0.9	-0.9	-1.3	-2.8	-1.4	2.1
U(80)	2	1.5	2.8	2.8	2.3	0.3	1.8	6.3
LF(80)	0.22	0.219	0.223	0.23	0.24	0.246	0.238	0.206
LFC(80)	0.316	0.314	0.32	0.33	0.342	0.35	0.338	0.291
Diffusivity(ss)	2.5	2.7	2.4	2.6	3	3.6	3.3	2.5
Echo(Dietsch)	1.15	1.08	1.13	1.12	1.06	0.97	0.93	0.88
Sd	63.5	63.7	63.8	63.8	64	63.8	63.3	61.7
Sr	64.6	64.9	65	65.2	65.4	65.4	64.9	63.1
SPL80	66.3	66.5	66.6	66.8	67.1	67.1	66.5	64.2
IACCearly	0.134	0.258	0.146	0.308	0.467	0.209	0.144	0.051
IACClate	0.193	0.257	0.306	0.407	0.299	0.114	0.066	0.055
IACCtotal	0.133	0.257	0.143	0.315	0.427	0.175	0.117	0.049
SPL(A)	75.8							
SPL(Lin)	77.6							
SPL(C)	77.2							

STI	0.51							
STI(Female)	0.5							
STI(Male)	0.5							
RASTI	0.47							
STI(expected)	0.14							
T(30_Avrage)	2.6							
LF(80_Avrage)	0.228							
Lj(Avrage)	-0.2							
BR(SPL)	-0.2							
SIL	69.1							
AI	1							
Alcons(STI)	11.72							
Density(reflections)	1278.06							
Receiver Number: 7 7 (x,y,z) = (-4.00,-15.00,0.97)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.68	1.86	1.54	1.49	1.66	2.38	1.79	0.85
XI(EDT)	23.2	17.5	28.9	29.4	26.1	10.8	16.8	58.6
T(15)	1.92	2.06	2.02	2.09	2.18	2.64	1.99	1.05
T(20)	2.1	2.23	2.25	2.29	2.32	2.67	2.02	1.05
XI(T(20))	6.9	5.8	10.5	8.4	4	0.3	0.3	1.7
T(30)	2.65	2.92	2.71	2.59	2.53	2.7	2.05	1.04
XI(T(30))	20.5	25.4	15.6	7.7	4.1	0.2	0.2	0.5
Curvature(C)	26.3	30.7	20.9	13	9.2	1.3	1.6	-0.8
Ts	100	111	94	93	101	142	106	51
SPL	68.7	69	68.7	68.8	69.2	70	68.6	65
D(50)	0.45	0.42	0.47	0.48	0.45	0.36	0.43	0.61
C(7)	-5	-5.4	-5	-5.2	-5.8	-6.9	-5.8	-3.1
C(50)	-0.9	-1.4	-0.5	-0.4	-0.8	-2.4	-1.2	1.9
C(80)	2.3	1.7	3	3.2	2.8	0.8	2.3	6.7
U(50)	-0.9	-1.4	-0.5	-0.4	-0.8	-2.4	-1.2	1.9
U(80)	2.3	1.7	3	3.2	2.8	0.8	2.3	6.7
LF(80)	0.33	0.331	0.341	0.35	0.359	0.352	0.344	0.313
LFC(80)	0.438	0.44	0.452	0.462	0.476	0.47	0.458	0.415
Diffusivity(ss)	4.1	4.3	4.1	4.3	4.8	5.3	5.2	4.5
Echo(Dietsch)	0.71	0.71	0.67	0.62	0.58	0.54	0.53	0.51
Sd	62.5	62.5	62.5	62.5	62.4	62.3	61.8	60.1
Sr	65.2	65.3	65.4	65.6	65.8	65.6	65	62.8
SPL80	66.7	66.8	66.9	67.1	67.4	67.4	66.6	64.1
IACCearly	0.416	0.226	0.136	0.337	0.427	0.282	0.188	0.077
IACClate	0.395	0.280	0.338	0.318	0.418	0.153	0.087	0.071

IACCtotal	0.406	0.222	0.135	0.333	0.410	0.251	0.163	0.072
SPL(A)	75.8							
SPL(Lin)	77.7							
SPL(C)	77.3							
STI	0.52							
STI(Female)	0.52							
STI(Male)	0.51							
RASTI	0.49							
STI(expected)	0.14							
T(30_Avrage)	2.6							
LF(80_Avrage)	0.345							
Lj(Avrage)	-0.3							
BR(SPL)	-0.1							
SIL	69.2							
AI	1							
Alcons(STI)	11.03							
Density(reflections)	1272.19							
Receiver Number: 8 8 (x,y,z) = (-4.00,-19.50,1.13)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.3	1.49	1.23	1.27	1.46	2.2	1.54	0.74
XI(EDT)	52.9	38.7	53.9	40.5	29.4	20.2	22.2	58.1
T(15)	1.81	1.98	1.82	1.96	2.09	2.61	1.95	0.96
T(20)	2.01	2.17	2.04	2.17	2.23	2.66	1.99	0.99
XI(T(20))	8	6.8	10.4	9.6	5	0.4	0.9	3.7
T(30)	2.41	2.55	2.44	2.51	2.48	2.71	2.04	1.01
XI(T(30))	14.4	11.2	14.5	10.6	5.7	0.4	0.5	1.3
Curvature(C)	20	17.2	19.7	15.8	11.1	2	2.6	1.8
Ts	74	83	72	76	86	123	90	44
SPL	68.9	69.1	68.9	69	69.6	70.4	69.3	65.6
D(50)	0.67	0.63	0.67	0.65	0.61	0.5	0.57	0.75
C(7)	-7.1	-7.3	-7.1	-7.2	-7.9	-9	-8.1	-6
C(50)	3.1	2.4	3.2	2.7	1.9	0	1.2	4.7
C(80)	3.6	2.9	3.7	3.4	2.8	1.1	2.7	6.9
U(50)	3.1	2.4	3.2	2.7	1.9	0	1.2	4.7
U(80)	3.6	2.9	3.7	3.4	2.8	1.1	2.7	6.9
LF(80)	0.285	0.285	0.289	0.292	0.312	0.316	0.315	0.305
LFC(80)	0.415	0.413	0.416	0.414	0.432	0.44	0.439	0.424
Diffusivity(ss)	7.1	7.1	7.2	6.9	7.1	7	7.2	7.8
Echo(Dietsch)	0.62	0.61	0.6	0.58	0.55	0.52	0.51	0.46
Sd	61	61.1	61	61	61	61	60.5	58.6

Sr	67.1	67.1	67.2	67.1	67.4	67.4	66.8	64.3
SPL80	67.3	67.3	67.4	67.4	67.7	68	67.4	64.8
IACCearly	0.357	0.391	0.392	0.215	0.622	0.627	0.283	0.053
IACClate	0.289	0.396	0.303	0.474	0.367	0.150	0.053	0.061
IACCtotal	0.355	0.389	0.385	0.191	0.586	0.584	0.261	0.049
SPL(A)	76.2							
SPL(Lin)	78							
SPL(C)	77.7							
STI	0.59							
STI(Female)	0.58							
STI(Male)	0.58							
RASTI	0.56							
STI(expected)	0.16							
T(30_Avrage)	2.5							
LF(80_Avrage)	0.295							
Lj(Avrage)	-0.5							
BR(SPL)	-0.3							
SIL	69.6							
AI	1							
Alcons(STI)	7.67							
Density(reflections)	1165.12							
Receiver Number: 9 9 (x,y,z) = (-1.00,-4.00,0.56)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.31	1.46	1.15	1.24	1.43	2.09	1.49	0.64
XI(EDT)	50.6	47	69.3	62.6	56.2	27.7	36.4	70.7
T(15)	2.13	2.24	2.2	2.2	2.24	2.64	1.98	0.94
T(20)	2.26	2.37	2.35	2.38	2.39	2.68	2.02	0.97
XI(T(20))	4.2	3.3	5.7	5.7	3.8	0.6	0.7	4
T(30)	2.64	2.74	2.7	2.68	2.61	2.73	2.05	1.01
XI(T(30))	9.8	8.5	7.5	6.2	3.9	0.3	0.4	1.7
Curvature(C)	17.2	15.6	14.5	12.6	9.2	2	1.7	3.8
Ts	68	73	60	64	71	102	73	33
SPL	72.7	72.8	72.7	72.8	73.1	73.7	72.9	70.7
D(50)	0.61	0.6	0.68	0.68	0.66	0.57	0.63	0.78
C(7)	-1.5	-1.8	-1.5	-1.8	-2.4	-3.3	-2.4	0
C(50)	2	1.8	3.3	3.3	2.9	1.1	2.3	5.6
C(80)	5.9	5.5	6.9	6.3	5.5	3.3	4.7	9.1
U(50)	2	1.8	3.3	3.3	2.9	1.1	2.3	5.6
U(80)	5.9	5.5	6.9	6.3	5.5	3.3	4.7	9.1
LF(80)	0.086	0.092	0.107	0.114	0.116	0.112	0.107	0.096

LFC(80)	0.191	0.198	0.217	0.228	0.235	0.23	0.221	0.194
Diffusivity(ss)	1.9	2.1	1.7	1.8	2.1	2.7	2.4	1.7
Echo(Dietsch)	0.8	0.8	0.81	0.78	0.73	0.71	0.7	0.67
Sd	68.8	68.8	68.8	68.8	68.8	68.7	68.5	67.7
Sr	70.5	70.7	71	71.2	71.3	71.2	70.9	69.7
SPL80	71.7	71.8	71.9	71.9	72.1	72.1	71.6	70.2
IACCearly	0.075	0.185	0.240	0.317	0.288	0.300	0.157	0.067
IACClate	0.286	0.293	0.156	0.311	0.202	0.142	0.082	0.081
IACCtotal	0.073	0.185	0.235	0.316	0.284	0.288	0.147	0.064
SPL(A)	79.9							
SPL(Lin)	81.8							
SPL(C)	81.4							
STI	0.59							
STI(Female)	0.59							
STI(Male)	0.58							
RASTI	0.56							
STI(expected)	0.14							
T(30_Avrage)	2.6							
LF(80_Avrage)	0.107							
Lj(Avrage)	-1.2							
BR(SPL)	-0.2							
SIL	73.2							
AI	1							
Alcons(STI)	7.63							
Density(reflections)	1222.51							
Receiver Number: 10 10 (x,y,z) = (1.00,-7.50,0.69)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	1.87	1.99	1.76	1.83	1.97	2.58	1.97	1.12
XI(EDT)	21.1	17.9	34.2	26.8	17.9	6.3	13.4	130.2
T(15)	2.18	2.36	2.24	2.3	2.34	2.7	2.04	1.01
T(20)	2.38	2.5	2.42	2.47	2.46	2.71	2.06	1.03
XI(T(20))	6.2	4.9	5.5	4.6	2.5	0.2	0.1	1.9
T(30)	2.61	2.71	2.7	2.73	2.66	2.75	2.08	1.04
XI(T(30))	5.6	4.3	5.7	5.2	3.3	0.2	0.1	0.7
Curvature(C)	9.8	8.2	11.3	10.6	8.1	1.2	0.8	1.6
Ts	95	101	83	89	100	140	100	39
SPL	70.2	70.6	70.2	70.3	70.5	71.2	70.1	67.2
D(50)	0.46	0.46	0.52	0.5	0.47	0.39	0.46	0.67
C(7)	-0.9	-1	0.2	-0.2	-0.9	-2.4	-1.2	2.5
C(50)	-0.7	-0.7	0.3	0	-0.6	-2	-0.7	3.2

C(80)	2.1	1.9	3	2.5	1.7	0.1	1.6	6
U(50)	-0.7	-0.7	0.3	0	-0.6	-2	-0.7	3.2
U(80)	2.1	1.9	3	2.5	1.7	0.1	1.6	6
LF(80)	0.065	0.065	0.053	0.056	0.063	0.074	0.073	0.059
LFC(80)	0.127	0.126	0.107	0.11	0.12	0.135	0.132	0.103
Diffusivity(ss)	2.4	2.4	2	2.3	2.7	3.2	3	2
Echo(Dietsch)	1.26	1.19	1.24	1.12	1.01	0.93	0.91	0.86
Sd	66.7	67.1	67.3	67.2	67	66.9	66.5	65.3
Sr	66.8	67.2	67.4	67.3	67.2	67.1	66.7	65.5
SPL80	68.1	68.5	68.4	68.3	68.3	68.3	67.8	66.3
IACCearly	0.091	0.182	0.127	0.243	0.289	0.372	0.237	0.076
IACClate	0.203	0.505	0.408	0.404	0.275	0.179	0.083	0.063
IACCtotal	0.090	0.183	0.122	0.242	0.272	0.342	0.210	0.071
SPL(A)	77.2							
SPL(Lin)	79.2							
SPL(C)	78.8							
STI	0.55							
STI(Female)	0.54							
STI(Male)	0.54							
RASTI	0.51							
STI(expected)	0.17							
T(30_Avrerage)	2.7							
LF(80_Avrerage)	0.059							
Lj(Avrerage)	-0.1							
BR(SPL)	0							
SIL	70.5							
AI	1							
Alcons(STI)	9.4							
Density(reflections)	1356.07							
Receiver Number: 11 11 (x,y,z) = (-13.50,-9.00,2.00)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	3.26	3.07	2.52	1.65	1.7	1.64	1.31	0.67
XI(EDT)	3.2	3.7	14.1	58.4	43.7	39.7	41.3	83.1
T(15)	3.2	3.01	2.84	2.23	2.28	2.04	1.62	0.96
T(20)	3.2	3.05	2.89	2.35	2.32	2.1	1.65	0.99
XI(T(20))	0.9	0.9	1.6	3.9	2.8	2.5	2.2	9.7
T(30)	3.23	3.07	3.12	2.6	2.55	2.22	1.69	0.93
XI(T(30))	0.7	0.5	2.9	5.2	4.4	2.2	1.4	4.8
Curvature(C)	0.8	0.7	7.7	10.8	9.7	5.5	2.6	-6.1
Ts	212	199	147	101	113	114	100	66

SPL	68.5	67.8	64.3	62.4	62.6	62.3	61.1	57.4
SPL(Af)	42.3	51.6	55.6	59.1	62.6	63.5	62.1	56.3
D(50)	0.3	0.32	0.45	0.55	0.5	0.48	0.51	0.66
C(7)	-7.9	-8.6	-6.4	-6.5	-9.3	-11.5	-13	-12
C(50)	-3.7	-3.3	-1	0.9	-0.1	-0.3	0.2	2.8
C(80)	-2.6	-2.3	-0.6	1	0.1	-0.1	0.5	3.3
U(50)	-3.7	-3.3	-1	0.9	-0.1	-0.3	0.2	2.8
U(80)	-2.6	-2.3	-0.6	1	0.1	-0.1	0.5	3.3
LF(80)	0.197	0.246	0.182	0.194	0.226	0.244	0.255	0.255
LFC(80)	0.325	0.385	0.324	0.358	0.42	0.456	0.476	0.476
Diffusivity(ss)	4.5	4.3	1.6	0.9	1.1	1.2	1.2	1.1
Echo(Dietsch)	0.71	0.73	1.05	1.44	1.29	1.23	1.15	1.04
IACCearly	0.268	0.402	0.411	0.550	0.557	0.326	0.199	0.185
IACClate	0.437	0.186	0.141	0.229	0.253	0.139	0.122	0.097
IACCtotal	0.291	0.383	0.390	0.518	0.515	0.299	0.183	0.177
SPL(A)	68.7							
SPL(Lin)	73.6							
SPL(C)	73.2							
STI	0.53							
STI(Female)	0.56							
STI(Male)	0.54							
RASTI	0.53							
STI(expected)	0.14							
T(30_Average)	2.6							
LF(80_Average)	0.212							
Lj(Average)	-0.3							
BR(SPL)	3.6							
SIL	62.1							
AI	1							
Alcons(STI)	10.54							
Density(reflections)	623.7							
Receiver Number: 12 12				(x,y,z) = (-13.50,-9.50,2.00)				
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	3.29	3.1	1.97	0.53	0.44	0.44	0.55	0.59
XI(EDT)	17.1	23.9	178.8	315.3	193.9	198.4	346.9	389.5
T(15)	3.2	3.04	2.84	2.26	2.22	2.1	1.78	0.71
T(20)	3.25	3.07	2.85	2.19	2.25	2.04	1.67	0.83
XI(T(20))	0.6	0.7	1.8	14.8	10.9	10.8	19.6	91.7
T(30)	3.25	3.09	3.02	2.4	2.37	2.13	1.67	0.93
XI(T(30))	0.4	0.3	2.3	6.6	4.5	3.9	5.4	37.9

Curvature(C)	-0.2	0.4	5.9	9.2	5.4	4.6	0.4	12.4
Ts	144	128	66	35	37	36	30	16
SPL	70.7	70.4	69.1	68.6	69	68.7	67.9	65.6
SPL(Af)	44.5	54.2	60.4	65.4	69	69.9	68.9	64.4
D(50)	0.56	0.6	0.8	0.91	0.9	0.9	0.91	0.96
C(7)	-2.6	-2.1	0.6	1.8	1.4	1.5	2	3.7
C(50)	1.1	1.8	6.1	10	9.4	9.4	10.1	13.8
C(80)	1.7	2.3	6.4	10.4	9.9	9.8	10.6	14.9
U(50)	1.1	1.8	6.1	10	9.4	9.4	10.1	13.8
U(80)	1.7	2.3	6.4	10.4	9.9	9.8	10.6	14.9
LF(80)	0.131	0.127	0.105	0.104	0.11	0.104	0.091	0.075
LFC(80)	0.214	0.207	0.177	0.178	0.187	0.181	0.164	0.137
Diffusivity(ss)	4	3.7	2.6	2.6	2.7	2.7	2.6	2.7
Echo(Dietsch)	0.58	0.58	0.56	0.58	0.53	0.52	0.5	0.46
IACCearly	0.767	0.537	0.328	0.587	0.649	0.501	0.478	0.392
IACClate	0.190	0.285	0.131	0.272	0.261	0.230	0.144	0.056
IACCtotal	0.756	0.535	0.326	0.585	0.648	0.491	0.470	0.391
SPL(A)	75.2							
SPL(Lin)	78							
SPL(C)	77.6							
STI	0.69							
STI(Female)	0.72							
STI(Male)	0.71							
RASTI	0.72							
STI(expected)	0.15							
T(30_Average)	2.4							
LF(80_Average)	0.111							
Lj(Average)	-1.3							
BR(SPL)	0.9							
SIL	68.6							
AI	1							
Alcons(STI)	4.64							
Density(reflections)	791.16							
Receiver Number: 14 13 (x,y,z) = (10.00,-12.50,5.18)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	2.99	2.86	2.43	2.29	2.23	2.09	1.8	1.13
XI(EDT)	5.8	6.5	18.2	88.4	32.7	24.6	27.1	74
T(15)	3.35	3.12	2.91	2.26	2.3	2.08	1.5	1.02
T(20)	3.71	3.36	3.31	2.41	2.52	2.08	1.61	0.95
XI(T(20))	8.6	4.7	11.3	8.8	11.4	4.5	6.1	15.6

T(30)	*	*	*	3.43	*	3.14	1.64	0.91
XI(T(30))	*	*	*	51.9	*	63.4	3.1	5.3
Curvature(C)	*	*	*	42.3	*	51.3	1.6	-3.6
Ts	207	196	151	116	140	140	119	68
SPL	69.4	68.5	63.6	60	60.3	60	59	55
SPL(Af)	43.1	52.4	54.9	56.8	60.3	61.2	59.9	53.8
D(50)	0.31	0.33	0.49	0.63	0.51	0.46	0.49	0.66
C(7)	-11	-11.6	-8.2	-6.5	-9.7	-12.3	-14.2	-13.1
C(50)	-3.5	-3.1	-0.2	2.4	0.1	-0.7	-0.3	3
C(80)	-2.7	-2.3	0.2	2.6	0.7	0.1	0.8	4.6
U(50)	-3.5	-3.1	-0.2	2.4	0.1	-0.7	-0.3	3
U(80)	-2.7	-2.3	0.2	2.6	0.7	0.1	0.8	4.6
LF(80)	0.294	0.327	0.276	0.256	0.289	0.31	0.323	0.323
LFC(80)	0.445	0.491	0.438	0.427	0.48	0.513	0.533	0.53
Diffusivity(ss)	10.6	12.1	4.2	0.7	1.6	2.1	2.6	3.6
Echo(Dietsch)	0.64	0.64	0.65	0.71	0.7	0.62	0.6	0.52
IACCearly	0.371	0.363	0.409	0.340	0.376	0.547	0.236	0.096
IACClate	0.560	0.240	0.376	0.262	0.300	0.328	0.289	0.122
IACCtotal	0.026	0.329	0.368	0.287	0.315	0.460	0.217	0.074
SPL(A)	66.6							
SPL(Lin)	73.5							
SPL(C)	73							
STI	0.51							
STI(Female)	0.53							
STI(Male)	0.52							
RASTI	0.52							
RASTI	0.52							
RASTI	0.52							
LF(80_Average)	0.287							
Lj(Average)	-0.3							
BR(SPL)	5.9							
SIL	59.8							
AI	1							
Alcons(STI)	11.73							
Density(reflections)	558.47							
Receiver Number: 15 14-Palco reale (x,y,z) = (-2.00,-22.50,5.18)								
Parameter	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	3	2.78	2.14	1.45	1.43	1.32	1.16	0.82
XI(EDT)	1.6	2.3	9.2	44.7	19.1	15.7	21.9	45
T(15)	3.33	3.12	2.67	1.86	1.9	1.73	1.37	0.75

T(20)	3.41	3.18	2.76	2.04	2.06	1.86	1.45	0.8
XI(T(20))	0.7	0.6	1.7	7	6.7	5.8	4.8	8.9
T(30)	3.39	3.22	2.92	2.35	2.31	2.05	1.6	0.82
XI(T(30))	0.4	0.3	1.9	8.8	6.6	5	4.9	3.2
Curvature(C)	-0.5	1.3	5.8	14.8	11.9	10.2	9.8	2.9
Ts	197	181	129	85	85	80	67	38
SPL	69.8	69.2	65.7	63.3	64.3	64.5	63.7	60.2
SPL(Af)	43.6	53	57	60	64.3	65.7	64.7	59.1
D(50)	0.28	0.31	0.4	0.46	0.5	0.53	0.57	0.71
C(7)	-9.5	-8.8	-4.5	-0.9	-2.6	-3.2	-3	-1.1
C(50)	-4.1	-3.5	-1.7	-0.7	0	0.5	1.2	3.9
C(80)	-2.3	-1.8	-0.1	1.5	2	2.5	3.5	7
U(50)	-4.1	-3.5	-1.7	-0.7	0	0.5	1.2	3.9
U(80)	-2.3	-1.8	-0.1	1.5	2	2.5	3.5	7
LF(80)	0.244	0.235	0.154	0.062	0.132	0.159	0.171	0.167
LFC(80)	0.391	0.381	0.26	0.119	0.231	0.271	0.286	0.271
Diffusivity(ss)	4.1	3.6	1.6	0.7	1.1	1.2	1.3	1.2
Echo(Dietsch)	0.63	0.65	0.84	1.24	0.81	0.74	0.69	0.62
IACCearly	0.454	0.393	0.456	0.547	0.270	0.836	0.464	0.279
IACClate	0.488	0.638	0.671	0.810	0.678	0.316	0.111	0.086
IACCtotal	0.394	0.390	0.461	0.563	0.265	0.828	0.461	0.275
SPL(A)	70.7							
SPL(Lin)	75.1							
SPL(C)	74.7							
STI	0.55							
STI(Female)	0.57							
STI(Male)	0.56							
RASTI	0.55							
STI(expected)	0.14							
T(30_Average)	2.3							
LF(80_Average)	0.146							
Lj(Average)	0.1							
BR(SPL)	3.6							
SIL	63.9							
AI	1							
Alcons(STI)	9.58							
Density(reflections)	1057.62							

Tab. A.6 –Dati completi delle simulazione per tutti i punti di ricezione considerati

APPENDICE B – METODOLOGIA COMPLETA DI CALCOLO DELL'INDICE DI PREFERENZA

B.1. Richiami di teoria

Partendo dai dati dei parametri oggettivi ottenuti dalle misure, è stato calcolato in ciascun punto di ricezione delle sale analizzate un descrittore numerico della qualità acustica, in base allo schema di valutazione proposto da Ando, come già esplicitato nel Capitolo 10.

Questa appendice è finalizzata a mostrare tutti i passaggi del calcolo completo eseguito per la determinazione dell'Indice di preferenza, sulla base della teoria esposta nel Capitolo 5.

Secondo Ando, la qualità acustica degli ambienti chiusi può essere sufficientemente descritta attraverso quattro parametri significativi:

- il livello di ascolto;
- il tempo di ritardo della prima riflessione (*ITDG*);
- il tempo di riverberazione;
- la coerenza mutua inter-aurale (*IACC*).

Attraverso l'applicazione dell'analisi dei fattori, egli riuscì ad ottenere una scala di preferenza per ogni i -esimo parametro avente come valore massimo 0: sommando i valori numerici delle varie scale si ha l'indice di preferenza complessivo.

In base all'ipotesi di linearità, l'indice di preferenza ottenuto è un indicatore della distanza del campo acustico dalle condizioni ideali per il brano adottato.

Le scale di valutazione della preferenza dei singoli parametri indipendenti assumono tutte la forma generale:

$$S_i = -w_i |x_i|^{3/2} \quad (\text{B.1})$$

dove x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) rappresenta il valore del parametro normalizzato ossia espresso in termini di scostamento dal valore preferito e w_i è il coefficiente di peso che garantisce la corretta importanza relativa del parametro considerato.

La scala di valutazione è stata definita in modo che quando $x_i = 0$ (ossia quando il valore del parametro considerato ha uno scostamento nullo dal valore ottimale) l'indice di

valutazione della preferenza i -esima si annulla ($S_i = 0$), mentre per ogni altro valore del parametro si ha un valore della preferenza negativo ($S_i < 0$).

In particolare:

- per il Livello d'ascolto:

$$S_1 = -w_1 |x_1|^{3/2} \quad (B.2)$$

Con

$$x_1 = 20 \log \left(\frac{P}{P_p} \right) = L_p - L_{p,pref} \quad (B.3)$$

$$\begin{aligned} \text{dove } w_1 &= 0.07 & \text{se } x_1 > 0 \\ w_1 &= 0.04 & \text{se } x_1 < 0 \end{aligned}$$

Il livello di ascolto preferito, per ogni punto di ricezione è:

$$L_{p,pref} = L_w + 10 \log(1 + A^2) - 20 \log(d_0) - 11 \quad (B.4)$$

dove

A = ampiezza totale delle riflessioni nel punto considerato;

d_0 = distanza tra la sorgente e l'ascoltatore.

- per l'*ITDG*:

$$S_2 = -w_2 |x_2|^{3/2} \quad (B.5)$$

Con

$$x_2 = 20 \log \left(\frac{ITDG}{ITDG_p} \right) \quad ITDG_p = (1 - \log A) \tau_e \quad (B.6)$$

$$\begin{aligned} w_2 &= 1.42 & \text{se } x_2 > 0 \\ w_2 &= 1.11 & \text{se } x_2 < 0 \end{aligned}$$

- per il Tempo di riverberazione susseguente:

$$S_3 = -w_3|x_3|^{3/2} \quad (B.7)$$

con

$$x_3 = 20 \log \left(\frac{T_{sub}}{T_{sub,p}} \right) \quad (B.8)$$

dove:

$$w_3 = 0.45 + 0.74A \quad \text{se} \quad x_3 > 0$$

$$w_3 = 2.36 - 0.42A \quad \text{se} \quad x_3 < 0$$

e

$$T_{sub,p} = 23\tau_e \quad (B.9)$$

dove

A = ampiezza totale delle riflessioni: è il rapporto tra l'energia riflessa e la diretta; rappresenta l'importanza del campo riflesso rispetto al diretto.

$$A = \sqrt{\frac{\int_5^\infty p(t)^2 dt}{\int_0^5 p(t)^2 dt}} \quad (B.10)$$

- la $IACC$ è l'unico parametro con andamento lineare: c'è un costante incremento della preferenza al calare del valore di $IACC$.

$$S_4 = -w_4|x_4|^{3/2} \quad \text{con} \quad w_4 = 1.45 \quad (B.11)$$

I valori preferiti dipendono dalla durata effettiva della funzione di autocorrelazione del segnale musicale τ_e , che rappresenta il tempo in cui si annulla l'involuppo della funzione di autocorrelazione.

Si può così concludere che gli indici di valutazione della preferenza rappresentano la diminuzione di preferenza per uno scostamento del parametro dal valore ottimale.

Ando definì poi l'indice di preferenza totale come somma degli indici di preferenza dei quattro parametri indipendenti, ossia da:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (\text{B.12})$$

Tale indice esprime il grado complessivo di qualità acustica in un determinato punto della sala e dipende dai valori dei quattro parametri indipendenti visti precedentemente, misurati nel punto di prova, che a loro volta dipendono dalla durata effettiva del tempo di autocorrelazione del segnale musicale τ_e .

B.2. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni nei tre punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 5 punti. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.10 del Capitolo 9. E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 115 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 78 dB.

In Tab. B.1 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	8269
Potenza sonora della sorgente (dB)	115
Livello di pressione a 20 m (dB)	78
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. B.1 – Teatro di Budrio, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. B.2 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
110	10.2	2.11	84.2	13.29	1.19	0.434
111	10.86	2.09	83	14.65	1.21	0.394
112	10.29	2.14	83.3	12.06	1.23	0.410
Simulazione 1	4.56	2.04	88.5	15.31	1.31	0.413
Simulazione 2	7.85	2.04	85.4	23.71	1.24	0.339
Simulazione 3	7.65	2.24	85	26.81	1.27	0.367
Simulazione 4	13.61	1.41	81.3	30.37	1.21	0.382
Simulazione 5	10.04	1.41	81.3	23.42	1.21	0.433

Tab. B.2 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In base a quanto esposto, il primo passo è il calcolo dei valori preferiti di ciascun parametro oggettivo, secondo le (B.4), (B.6) e (B.9). In Tab. B.3 sono riportati i valori ottenuti.

Punto di ricezione	$L_{p,p}$	$ITDG_{p, \tau_e = 43 \text{ ms}}$	$T_{sub,p} (s) = 23 * \tau_e$
110	91.5	29.03	0.989
111	90.9	29.24	
112	91.5	28.81	
Simulazione 1	98.3	29.67	
Simulazione 2	93.6	29.67	
Simulazione 3	94.4	27.95	
Simulazione 4	86.4	36.55	
Simulazione 5	89.1	36.55	

Tab. B.3 – Valori preferiti dei parametri acustici oggettivi

Si vuole come sottolineare come la $IACC$, in accordo con la teoria, non abbia un valore preferito.

Successivamente vengono calcolati i valori normalizzati (x_1, x_2, x_3, x_4) secondo quanto descritto dalle (B.3), (B.6) e (B.8), riportati in Tab. B.4. Per quanto riguarda la $IACC$, non essendo presente un valore preferito, il valore normalizzato è quello misurato.

Punto di ricezione	$X_1 (L_p)$	$X_2 (ITDG)$	$X_3 (T_{sub})$	$X_4 (IACC)$
110	-7.38	-0.34	0.08	0.433
111	-7.95	-0.30	0.09	0.394
112	-8.28	-0.38	0.09	0.409
Simulazione 1	-9.83	-0.29	0.12	0.413
Simulazione 2	-8.21	-0.10	0.10	0.339
Simulazione 3	-9.49	-0.02	0.11	0.367
Simulazione 4	-5.16	-0.08	0.09	0.382
Simulazione 5	-7.80	-0.19	0.09	0.433

Tab. B.4 – Valori normalizzati dei parametri acustici oggettivi

Assegnando gli opportuni pesi, applicando le (B.2), (B.5), (B.7) e (B.11), si determinano gli indici di preferenza parziale, riportati in Tab. B.5.

Punto di ricezione	$S_1 (L_p)$	$S_2 (ITDG)$	$S_3 (T_{sub})$	$S_4 (IACC)$
110	-0.80	-0.22	-0.05	-0.41
111	-0.90	-0.18	-0.05	-0.36
112	-0.95	-0.26	-0.06	-0.38
Simulazione 1	-1.23	-0.17	-0.08	-0.38
Simulazione 2	-0.94	-0.03	-0.06	-0.29
Simulazione 3	-1.17	0.00	-0.08	-0.32
Simulazione 4	-0.47	-0.03	-0.04	-0.34
Simulazione 5	-0.87	-0.09	-0.04	-0.41

Tab. B.5 – Valori degli Indici di preferenza parziali

Infine, l'indice di preferenza totale, secondo la (B.12) è riportato in Tab. B.6.

Punto di ricezione	S_{tot}
110	-1.48
111	-1.49
112	-1.65
Simulazione 1	-1.87
Simulazione 2	-1.32
Simulazione 3	-1.57
Simulazione 4	-0.88
Simulazione 5	-1.42

S_{medio}	-1.46
-------------	-------

Tab. B.6 – Valori dell'Indice di preferenza globale nei punti di ricezione analizzati

B.3. Il Teatro Olimpico di Roma

Anche in questo caso per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 10 punti, di cui 3 posizionati in galleria. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.31 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 109 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 73 dB.

In Tab. B.7 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	13607
Potenza sonora della sorgente (dB)	109
Livello di pressione a 20 m (dB)	73
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. 10.7 – Teatro Olimpico, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. B.8 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura		d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
B	22	10.2	1.40	78.5	17.64	1.34	0.318
C	12	9.16	1.16	79	18.83	1.29	0.396
F	10	12.51	1.00	77.2	24.19	1.37	0.535
I	22	14.88	2.16	77.2	23.76	1.23	0.376
M	40	17.78	3.47	75.7	11.85	1.35	0.548
V	18	25.75	1.95	74	25.6	1.14	0.424
V	36	25.34	1.22	71.9	2.89	1.42	0.390
Simulazione 1		10.38	1.11	79	17.32	1.25	0.580
Simulazione 2		22.14	1.06	73.4	26.88	1.24	0.456
Simulazione 3		16.58	1.07	75.8	49.75	1.41	0.500

Simulazione 4	26.96	1.50	76.8	34.93	1.26	0.461
Simulazione 5	10.95	1.06	78.3	41.27	1.4	0.484
Simulazione 6	24.46	1.60	72.2	72.26	1.36	0.292
Simulazione 7	14.27	1.45	71.6	43.21	1.27	0.371
Galleria 1	23.07	1.64	73.8	79.19	1.2	0.411
Galleria 2	27.69	1.68	73.9	80.68	1.1	0.683
Galleria 3	19.19	2.00	77.6	61.01	1.06	0.316

Tab. B.8 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In base a quanto esposto, il primo passo è il calcolo dei valori preferiti di ciascun parametro oggettivo, secondo le (B.4), (B.6) e (B.9). In Tab. B.9 sono riportati i valori ottenuti.

Punto di ricezione	$L_{p,p}$	$ITDG_p (\tau_e = 43 \text{ ms})$	$T_{sub,p} (s) = 23 * \tau_e$
B22	83.2	36.77	0.989
C12	83.1	40.21	
F10	79.7	43.00	
I22	82.7	28.60	
M40	84.8	19.78	
V18	77.2	30.53	
V36	74.5	39.35	
Simulazione 1	81.8	41.07	
Simulazione 2	75.0	41.93	
Simulazione 3	77.6	41.71	
Simulazione 4	75.1	35.48	
Simulazione 5	81.1	41.93	
Simulazione 6	76.4	34.19	
Simulazione 7	76.3	58.05	
Galleria 1	77.0	33.76	
Galleria 2	75.6	33.33	
Galleria 3	79.9	30.10	

Tab. B.9 – Valori preferiti dei parametri acustici oggettivi

Si vuole come sottolineare come la *IACC*, in accordo con la teoria, non abbia un valore preferito.

Successivamente vengono calcolati i valori normalizzati (x_1 , x_2 , x_3 , x_4) secondo quanto descritto dalle (B.3), (B.6) e (B.8), riportati in Tab. B.10. Per quanto riguarda la *IACC*, non essendo presente un valore preferito, il valore normalizzato è quello misurato.

Assegnando gli opportuni pesi, applicando le (B.2), (B.5), (B.7) e (B.11), si determinano gli indici di preferenza parziale, riportati in Tab. B.11.

Punto di ricezione	$X_1 (L_p)$	$X_2 (ITDG)$	$X_3 (T_{sub})$	$X_4 (IACC)$
B22	-4.70	-0.32	0.13	0.318
C12	-4.14	-0.33	0.12	0.396
F10	-2.54	-0.25	0.14	0.535
I22	-5.56	-0.08	0.09	0.376
M40	-9.12	-0.22	0.14	0.548
V18	-3.27	-0.08	0.06	0.424
V36	-2.64	-1.13	0.16	0.390
Simulazione 1	-2.83	-0.37	0.10	0.580
Simulazione 2	-1.64	-0.19	0.10	0.456
Simulazione 3	-1.80	0.08	0.15	0.50
Simulazione 4	1.64	-0.01	0.11	0.461
Simulazione 5	-2.85	-0.01	0.15	0.484
Simulazione 6	-4.23	0.33	0.14	0.292
Simulazione 7	-4.77	-0.13	0.11	0.371
Galleria 1	-3.28	0.37	0.08	0.411
Galleria 2	-1.74	0.38	0.05	0.683
Galleria 3	-2.38	0.31	0.03	0.316

Tab. B.10 – Valori normalizzati dei parametri acustici oggettivi

Punto di ricezione	$S_1 (L_p)$	$S_2 (ITDG)$	$S_3 (T_{sub})$	$S_4 (IACC)$
B22	-0.41	-0.20	-0.07	-0.26
C12	-0.34	-0.21	-0.05	-0.36
F10	-0.16	-0.14	-0.06	-0.57
I22	-0.52	-0.03	-0.06	-0.33
M40	-1.10	-0.12	-0.15	-0.59
V18	-0.24	-0.02	-0.03	-0.40
V36	-0.17	-1.34	-0.08	-0.35
Simulazione 1	-0.19	-0.25	-0.04	-0.64
Simulazione 2	-0.08	-0.09	-0.04	-0.45
Simulazione 3	-0.10	-0.03	-0.08	-0.51
Simulazione 4	-0.15	0.00	-0.05	-0.45
Simulazione 5	-0.19	0.00	-0.07	-0.49
Simulazione 6	-0.35	-0.26	-0.08	-0.23
Simulazione 7	-0.42	-0.05	-0.03	-0.33

Galleria 1	-0.24	-0.32	-0.04	-0.38
Galleria 2	-0.09	-0.34	-0.02	-0.82
Galleria 3	-0.15	-0.24	-0.01	-0.26

Tab. B.11 – Valori degli Indici di preferenza parziali

Infine, l'indice di preferenza totale, secondo la (B.12) è riportato in Tab. B.12.

Punto di ricezione	S_{tot}
B22	-0.94
C12	-0.96
F10	-0.93
I22	-0.94
M40	-1.96
V18	-0.69
V36	-1.95
Simulazione 1	-1.13
Simulazione 2	-0.66
Simulazione 3	-0.71
Simulazione 4	-0.65
Simulazione 5	-0.75
Simulazione 6	-0.92
Simulazione 7	-0.82
Galleria 1	-0.98
Galleria 2	-1.27
Galleria 3	-0.66
S_{medio}	-1.00

Tab. B.12 – Valori dell'Indice di preferenza globale nei punti di ricezione analizzati

B.4. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 6 punti, di cui 2 posizionati nella galleria frontale e 1 nella galleria laterale. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.53 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

In questo caso, essendo la sala destinata prevalentemente a conferenze, si è considerato per l'applicazione della teoria, un brano con tempo di autocorrelazione di 12 ms.

In Tab. B.13 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	15288
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	12

Tab. B.13 – Aula Magna del Rettorato, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. B.14 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	<i>d</i> (m)	<i>A_{eq}</i>	<i>L_p</i> (dBA)	<i>ITDG</i> (ms)	<i>EDT</i> (s)	<i>IACC</i>
1	10	3.02	83.3	12.56	2.28	0.316
2	14.87	3.35	82.2	4.67	2.24	0.470
3	13.16	1.70	82.4	32.04	2.18	0.422
4	17.47	3.67	81.4	8.22	2.15	0.400
5	19.45	3.43	81.2	24.23	2.14	0.270
6	21.42	3.94	81.5	2.81	2.17	0.302
7	26.46	3.80	79.2	5.25	2.17	0.438
Simulato 1	10.44	1.05	82.7	35.92	2.29	0.392
Simulato 2	24.57	3.27	79.4	23.95	2.33	0.255
Simulato 3	20.63	4.07	81.4	4.73	2.17	0.281
Galleria 1	24.64	4.47	81.2	13.6	2.07	0.525
Galleria 2	30.11	3.39	80.4	2.48	2.07	0.384
Corridoio 1	17.58	3.80	80.5	3.58	2.06	0.262

Tab. B.14 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In base a quanto esposto, il primo passo è il calcolo dei valori preferiti di ciascun parametro oggettivo, secondo le (B.4), (B.6) e (B.9). In Tab. B.15 sono riportato i valori ottenuti.

Punto di ricezione	$L_{p,p}$	$ITDG_p (\tau_e = 12 \text{ ms})$	$T_{sub,p} (s) = 23 * \tau_e$
1	93.3	22.36	0.276
2	90.7	20.43	
3	86.8	33.11	
4	90.0	18.71	
5	88.5	20.00	
6	88.8	17.42	
7	86.7	18.06	
Simulato 1	86.1	42.14	
Simulato 2	86.1	20.86	
Simulato 3	89.4	16.77	
Galleria 1	88.6	15.05	
Galleria 2	84.6	20.21	
Corridoio 1	90.2	18.06	

Tab. B.15 – Valori preferiti dei parametri acustici oggettivi

Si vuole come sottolineare come la *IACC*, in accordo con la teoria, non abbia un valore preferito.

Successivamente vengono calcolati i valori normalizzati (x_1 , x_2 , x_3 , x_4) secondo quanto descritto dalle (B.3), (B.6) e (B.8), riportati in Tab. B.16. Per quanto riguarda la *IACC*, non essendo presente un valore preferito, il valore normalizzato è quello misurato.

Punto di ricezione	$X_1 (L_p)$	$X_2 (ITDG)$	$X_3 (T_{sub})$	$X_4 (IACC)$
1	-10.05	-0.25	0.36	0.36
2	-8.52	-0.64	0.36	0.36
3	-4.41	-0.01	0.34	0.34
4	-8.66	-0.36	0.34	0.34
5	-7.38	0.08	0.34	0.34
6	-7.36	-0.79	0.34	0.34
7	-7.54	-0.54	0.34	0.34
Simulato 1	-3.44	-0.07	0.36	0.36
Simulato 2	-6.78	0.06	0.37	0.37
Simulato 3	-8.06	-0.55	0.34	0.34
Galleria 1	-7.48	-0.04	0.32	0.32
Galleria 2	-4.29	-0.91	0.32	0.32
Corridoio 1	-9.79	-0.70	0.32	0.32

Tab. B.16 – Valori normalizzati dei parametri acustici oggettivi

Assegnando gli opportuni pesi, applicando le (B.2), (B.5), (B.7) e (B.11), si determinano gli indici di preferenza parziale, riportati in Tab. B.17.

Punto di ricezione	$S_1 (L_p)$	$S_2 (ITDG)$	$S_3 (T_{sub})$	$S_4 (IACC)$
1	-1.27	-0.14	-0.59	-0.26
2	-1.00	-0.57	-0.62	-0.47
3	-0.37	0.00	-0.34	-0.40
4	-1.02	-0.24	-0.62	-0.37
5	-0.80	-0.03	-0.58	-0.20
6	-0.80	-0.78	-0.67	-0.24
7	-0.83	-0.44	-0.65	-0.42
Simulato 1	-0.26	-0.02	-0.27	-0.36
Simulato 2	-0.71	-0.02	-0.65	-0.19
Simulato 3	-0.92	-0.45	-0.69	-0.22
Galleria 1	-0.82	-0.01	-0.68	-0.55
Galleria 2	-0.36	-0.97	-0.54	-0.35
Corridoio 1	-1.23	-0.65	-0.59	-0.19

Tab. B.17 – Valori degli Indici di preferenza parziali

Infine, l'indice di preferenza totale, secondo la (B.12) è riportato in Tab. B.18.

Punto di ricezione	S_{tot}
1	-2.26
2	-2.65
3	-1.11
4	-2.24
5	-1.62
6	-2.49
7	-2.34
Simulato 1	-0.90
Simulato 2	-1.57
Simulato 3	-2.28
Galleria 1	-2.06
Galleria 2	-2.20
Corridoio 1	-2.66
S_{medio}	-2.03

Tab. B.18 – Valori dell'Indice di preferenza globale nei punti di ricezione analizzati

B.5. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

B.5.1. Applicazione della teoria per la configurazione sala da concerto

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni negli 11 punti di ricezione considerati, di cui 8 in platea e 3 in galleria. Ricordo che in questo caso non è stato possibile effettuare una campagna di misure, essendo il teatro ancora in fase di progettazione. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.71 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

Essendo in questa configurazione (con il palco più corto e la fossa orchestrale) la sala destinata a musica orchestrale, si è considerato, per l'applicazione della teoria, un brano con tempo di autocorrelazione di 43 ms.

In Tab. B.19 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	5603
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. B.19 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando nella configurazione per sala da concerto

La Tab. B.20 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
R1	2.98	2.72	93.9	16.74	0.65	0.362
R2	4.78	1.23	88.6	5.87	0.87	0.304
R3	6.35	1.00	87.1	6.35	0.86	0.471
R4	10.45	2.72	85.2	6.38	0.82	0.377
R5	8.61	2.43	86.5	5.84	0.83	0.349
R6	17.51	2.75	81.4	6.45	0.73	0.439
R7	17.6	3.13	81.3	6.42	0.77	0.385

R8	16.49	2.57	81.8	6.44	0.75	0.471
G1	18.77	4.73	83.1	5.18	0.62	0.338
G2	15.92	3.80	83.1	5.91	0.75	0.341
G3	16.01	3.43	83.2	5.88	0.69	0.402

Tab. B.20 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In base a quanto esposto, il primo passo è il calcolo dei valori preferiti di ciascun parametro oggettivo, secondo le (B.4), (B.6) e (B.9). In Tab. B.21 sono riportati i valori ottenuti.

Punto di ricezione	$L_{p,p}$	$ITDG_p (\tau_e = 43 \text{ ms})$	$T_{sub,p} (s) = 23 * \tau_e$
R1	103.1	24.30	0.989
R2	93.8	39.13	
R3	90.3	43.00	
R4	92.2	24.30	
R5	93.0	26.45	
R6	87.8	24.08	
R7	88.8	21.72	
R8	87.8	25.37	
G1	91.6	13.98	
G2	91.2	18.06	
G3	90.3	20.00	

Tab. B.21 – Valori preferiti dei parametri acustici oggettivi

Si vuole come sottolineare come la *IACC*, in accordo con la teoria, non abbia un valore preferito.

Successivamente vengono calcolati i valori normalizzati (x_1, x_2, x_3, x_4) secondo quanto descritto dalle (B.3), (B.6) e (B.8), riportati in Tab. B.22. Per quanto riguarda la *IACC*, non essendo presente un valore preferito, il valore normalizzato è quello misurato.

Punto di ricezione	$X_1 (L_p)$	$X_2 (ITDG)$	$X_3 (T_{sub})$	$X_4 (IACC)$
R1	-9.25	-0.16	-0.18	0.362
R2	-5.20	-0.82	-0.06	0.304

R3	-3.24	-0.83	-0.06	0.471
R4	-7.05	-0.58	-0.08	0.377
R5	-6.57	-0.66	-0.08	0.349
R6	-6.46	-0.57	-0.13	0.439
R7	-7.50	-0.53	-0.11	0.385
R8	-6.05	-0.60	-0.12	0.471
G1	-8.50	-0.43	-0.20	0.338
G2	-8.14	-0.49	-0.12	0.341
G3	-7.15	-0.53	-0.16	0.402

Tab. B.22 – Valori normalizzati dei parametri acustici oggettivi

Assegnando gli opportuni pesi, applicando le (B.2), (B.5), (B.7) e (B.11), si determinano gli indici di preferenza parziale, riportati in Tab. B.23.

Punto di ricezione	$S_1 (L_p)$	$S_2 (ITDG)$	$S_3 (T_{sub})$	$S_4 (IACC)$
R1	-1.13	-0.07	-0.09	-0.32
R2	-0.47	-0.83	-0.02	-0.24
R3	-0.23	-0.84	-0.03	-0.47
R4	-0.75	-0.49	-0.03	-0.34
R5	-0.67	-0.59	-0.03	-0.30
R6	-0.66	-0.48	-0.06	-0.42
R7	-0.82	-0.43	-0.04	-0.35
R8	-0.60	-0.51	-0.05	-0.47
G1	-0.99	-0.31	-0.03	-0.28
G2	-0.93	-0.38	-0.03	-0.29
G3	-0.76	-0.43	-0.06	-0.37

Tab. B.23 – Valori degli Indici di preferenza parziali

Infine, l'indice di preferenza totale, secondo la (B.12) è riportato in Tab. B.24.

Punto di ricezione	S_{tot}
R1	-1.61
R2	-1.57
R3	-1.57
R4	-1.60
R5	-1.59
R6	-1.62

R7	-1.63
R8	-1.63
G1	-1.63
G2	-1.62
G3	-1.62
S_{medio}	-1.61

Tab. B.24 – Valori dell'Indice di preferenza globale nei punti di ricezione analizzati

B.5.2. Applicazione della teoria per la configurazione teatro

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni nei 7 punti di ricezione considerati, di cui 8 in platea e 3 in galleria. I ricettori sono gli stessi della configurazione per sala da concerto, decurtati delle 4 sedute che da progetto devono essere smontate per consentire l'allungamento del palco. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.78 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 99 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 62 dB.

Essendo in questa configurazione (con il palco più lungo e senza la fossa orchestrale) la sala destinata prevalentemente al parlato, si è considerato per l'applicazione della teoria, un brano con tempo di autocorrelazione di 12 ms.

In Tab. B.25 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	5603
Potenza sonora della sorgente (dB)	99
Livello di pressione a 20 m (dB)	62
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	12

Tab. B.25 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando nella configurazione per teatro

La Tab. B.26, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	$IACC$
R4	7.07	1.50	71.1	12.51	0.97	0.518
R5	5.39	1.40	72.3	8.25	1.09	0.359
R6	14.11	1.83	64.6	18.19	1.21	0.521
R7	14.22	1.06	65.2	9.78	1.05	0.533
R8	13.1	1.10	65.5	8.93	1.13	0.555
G1	14.99	1.45	67.6	4.71	1.39	0.34
G2	12.08	1.51	68.5	6.83	1.18	0.457
G3	12.2	1.53	68.2	6.77	1.15	0.445

Tab. B.26 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In base a quanto esposto, il primo passo è il calcolo dei valori preferiti di ciascun parametro oggettivo, secondo le (B.4), (B.6) e (B.9). In Tab. B.27 sono riportati i valori ottenuti.

Punto di ricezione	$L_{p,p}$	$ITDG_{p} (\tau_e = 12 \text{ ms})$	$T_{sub,p} (s) = 23 * \tau_e$
R4	76.20	9.90	0.276
R5	78.15	10.26	
R6	67.38	12.96	
R7	68.30	11.70	
R8	69.17	11.52	
G1	69.47	10.08	
G2	71.62	9.84	
G3	71.60	9.78	

Tab. B.27 – Valori preferiti dei parametri acustici oggettivi

Si vuole come sottolineare come la $IACC$, in accordo con la teoria, non abbia un valore preferito.

Successivamente vengono calcolati i valori normalizzati (x_1, x_2, x_3, x_4) secondo quanto descritto dalle (B.3), (B.6) e (B.8), riportati in Tab. B.28. Per quanto riguarda la $IACC$, non essendo presente un valore preferito, il valore normalizzato è quello misurato.

Assegnando gli opportuni pesi, applicando le (B.2), (B.5), (B.7) e (B.11), si determinano gli indici di preferenza parziale, riportati in Tab. B.29.

Punto di ricezione	$X_1 (L_p)$	$X_2 (ITDG)$	$X_3 (T_{sub})$	$X_4 (IACC)$
R4	-5.10	0.10	0.55	0.518
R5	-5.85	-0.09	0.60	0.359
R6	-2.78	0.15	0.64	0.521
R7	-3.10	-0.08	0.58	0.533
R8	-3.67	-0.11	0.61	0.555
G1	-1.87	-0.33	0.70	0.34
G2	-3.12	-0.16	0.63	0.457
G3	-3.40	-0.16	0.62	0.445

Tab. B.28 – Valori normalizzati dei parametri acustici oggettivi

Punto di ricezione	$S_1 (L_p)$	$S_2 (ITDG)$	$S_3 (T_{sub})$	$S_4 (IACC)$
R4	-0.46	-0.05	-0.63	-0.54
R5	-0.57	-0.03	-0.68	-0.31
R6	-0.19	-0.08	-0.55	-0.55
R7	-0.22	-0.02	-0.55	-0.56
R8	-0.28	-0.04	-0.60	-0.60
G1	-0.10	-0.21	-0.89	-0.29
G2	-0.22	-0.07	-0.79	-0.45
G3	-0.25	-0.07	-0.77	-0.43

Tab. B.29 – Valori degli Indici di preferenza parziali

Infine, l'indice di preferenza totale, secondo la (B.12) è riportato in Tab. B.30.

Punto di ricezione	S_{tot}
R4	-1.68
R5	-1.59
R6	-1.36
R7	-1.35
R8	-1.53
G1	-1.49
G2	-1.53
G3	-1.52
S_{medio}	-1.51

Tab. B.30 – Valori dell'Indice di preferenza globale nei punti di ricezione analizzati

B.6. Teatro dell'Opera di Roma

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea e sui palchi del primo ordine nei 12 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 2 punti, posizionati sui palchi di ordine superiore al primo. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.92 del Capitolo 9. È stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 100 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 63 dB.

In Tab. B.31 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	25200
Potenza sonora della sorgente (dB)	100
Livello di pressione a 20 m (dB)	63
Tempo di autocorrelazione del brano (ms)	43

Tab. B.31 – Teatro dell'Opera, dati fondamentali per l'applicazione della teoria di Ando

La Tab. B.32 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	<i>d</i> (m)	<i>A_{eq}</i>	<i>L_p</i> (dBA)	<i>ITDG</i> (ms)	<i>EDT</i> (s)	<i>IACC</i>
1	10.19	3.35	79.6	27.03	1.39	0.376
2	13.92	3.27	76.9	66.16	2.00	0.303
3	17.68	2.11	76.9	2.00	1.78	0.569
4	17.53	1.70	76.9	8.88	1.55	0.465
5	23.3	3.98	76.5	3.33	1.86	0.609
6	19.46	3.20	75.8	28.42	1.75	0.328
7	21.23	3.02	75.8	25.27	1.49	0.349
8	25.6	3.67	76.2	18.52	1.27	0.488
9	10.19	2.75	79.9	26.83	1.24	0.302
10	13.92	2.60	77.2	65.71	1.83	0.301
11	19.15	2.51	68.7	38.90	1.65	0.477
12	19.3	3.55	75.2	38.20	1.53	0.579
13	25.22	2.43	66.6	29.69	2.29	0.421
14	28.65	2.57	70.7	22.14	1.45	0.551

Tab. B.32 – Dati necessari per il calcolo dell'indice di qualità per i punti di ricezione considerati

In base a quanto esposto, il primo passo è il calcolo dei valori preferiti di ciascun parametro oggettivo, secondo le (B.4), (B.6) e (B.9). In Tab. B.33 sono riportati i valori ottenuti.

Punto di ricezione	$L_{p,p}$	$ITDG_p (\tau_e = 43 \text{ ms})$	$T_{sub,p} (s) = 23 * \tau_e$
1	79.7	20.43	0.989
2	76.8	20.86	
3	71.4	29.03	
4	70.0	33.11	
5	73.9	17.20	
6	73.7	21.29	
7	72.5	22.36	
8	72.4	18.71	
9	78.1	24.08	
10	75.0	25.16	
11	72.0	25.80	
12	74.6	19.35	
13	69.3	26.45	
14	68.6	25.37	

Tab. B.33 – Valori preferiti dei parametri acustici oggettivi

Si vuole come sottolineare come la *IACC*, in accordo con la teoria, non abbia un valore preferito.

Successivamente vengono calcolati i valori normalizzati (x_1, x_2, x_3, x_4) secondo quanto descritto dalle (B.3), (B.6) e (B.8), riportati in Tab. B.34. Per quanto riguarda la *IACC*, non essendo presente un valore preferito, il valore normalizzato è quello misurato.

Punto di ricezione	$X_1 (L_p)$	$X_2 (ITDG)$	$X_3 (T_{sub})$	$X_4 (IACC)$
1	-0.11	0.12	0.15	0.376
2	0.09	0.50	0.31	0.303
3	5.47	-1.16	0.26	0.569
4	6.88	-0.57	0.20	0.465
5	2.58	-0.71	0.27	0.609
6	2.08	0.13	0.25	0.328
7	3.29	0.05	0.18	0.349
8	3.75	0.00	0.11	0.488
9	1.73	0.05	0.10	0.302

10	2.17	0.42	0.27	0.301
11	-3.30	0.18	0.22	0.477
12	0.58	0.30	0.19	0.579
13	-2.75	0.05	0.36	0.421
14	2.03	-0.06	0.17	0.551

Tab. B.34 – Valori normalizzati dei parametri acustici oggettivi

Assegnando gli opportuni pesi, applicando le (B.2), (B.5), (B.7) e (B.11), si determinano gli indici di preferenza parziale, riportati in Tab. B.35.

Punto di ricezione	$S_1 (L_p)$	$S_2 (ITDG)$	$S_3 (T_{sub})$	$S_4 (IACC)$
1	0.00	-0.06	-0.17	-0.33
2	0.00	-0.50	-0.49	-0.24
3	-0.90	-1.39	-0.26	-0.62
4	-1.26	-0.48	-0.15	-0.46
5	-0.29	-0.67	-0.49	-0.69
6	-0.21	-0.06	-0.35	-0.27
7	-0.42	-0.02	-0.20	-0.30
8	-0.51	0.00	-0.11	-0.49
9	-0.16	-0.01	-0.08	-0.24
10	-0.22	-0.38	-0.33	-0.24
11	-0.24	-0.11	-0.24	-0.48
12	-0.03	-0.23	-0.25	-0.64
13	-0.18	-0.02	-0.49	-0.40
14	-0.20	-0.02	-0.16	-0.59

Tab. B.35 – Valori degli Indici di preferenza parziali

Infine, l'indice di preferenza totale, secondo la (B.12) è riportato in Tab. B.36.

Punto di ricezione	S_{tot}
1	-0.56
2	-1.23
3	-3.17
4	-2.35
5	-2.14
6	-0.89
7	-0.94

8	-1.12
9	-0.49
10	-1.17
11	-1.07
12	-1.15
13	-1.09
14	-0.97
S_{medio}	-1.31

Tab. B.36 – Valori dell'Indice di preferenza globale nei punti di ricezione analizzati

APPENDICE C – METODOLOGIA COMPLETA DI CALCOLO DEL VETTORE QUALITÀ'

C.1. Richiami di teoria

Le grandezze ambientali, per rientrare nel campo di qualità acustica, possono variare in un intervallo ben definito, costituito da una soglia inferiore (in corrispondenza della quale, a seconda della variabile ambientale che si considera, si hanno valori ottimali minimi) e da una soglia superiore (cui corrisponderà un valore ottimale massimo).

Pertanto sarà necessario individuare un insieme che rappresenti il benessere acustico, delimitato dai valori delle grandezze ambientali che corrispondono a valori ottimali, minimo e massimo, delle grandezze oggettive che li rappresentano.

In pratica si è dovuto procedere all'identificazione di :

- un intervallo di benessere, delimitato superiormente da un valore corrispondente alla condizione ottimale massima ($V_{ott,max}$), ed inferiormente da un valore corrispondente alla condizione ottimale minima ($V_{ott,min}$);
- un valore effettivo del vettore di qualità, rappresentativo della situazione reale (V_{eff});
- un valore ottimale del vettore, rappresentativo delle condizioni ottimali per la particolare situazione analizzata (V_{ott});
- un ΔV che rappresenti la distanza della condizione reale dall'ottimale,

$$\Delta V = V_{effettivo} - V_{ottimale} \quad (C.1)$$

in modo da avere un immediato riscontro sulla qualità acustica complessiva della sala analizzata.

I parametri acustici oggettivi scelti per descrivere il più possibile le caratteristiche del campo sonoro in un ambiente chiuso sono:

- il livello di pressione sonora L_p ;
- l' EDT ;
- l'Initial Time Delay Gap ($ITDG$);
- il Lateral Fraction (LF_{80}).

Per applicare la teoria esposta si è individuata, per ciascun parametro oggettivo scelto, la grandezza fisica oggettiva che descrive la sollecitazione che genera nell'ascoltatore la particolare sensazione soggettiva che il parametro descrive.

In particolare per il livello di pressione sonora si è assunto come stimolo il valore efficace della pressione acustica. Dalla definizione di livello di pressione sonora:

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (C.2)$$

Relativamente al campo di benessere acustico, questo è stato individuato facendo riferimento alla letteratura e alla normativa. Quale limite inferiore si è scelto un valore minimo del livello di pressione capace di superare il rumore di fondo pari a 55 dB(A). Quale limite superiore si è considerato il valore di 95 dB(A); il valore ottimale del Livello di pressione si è presunto come media tra i due, quindi pari a 75 dB(A). Tali valori sono stati considerati ottimali ad una distanza di 20 m dalla sorgente. Per calcolare il livello di pressione ottimale in tutti i punti della sala, si è ricorso all'espressione già adottata da Ando:

$$L_{p,ott} = L_{w,ott} + 10 \log(1 + A^2) - 20 \log(d_0) - 11 \quad (C.3)$$

dove:

$$L_{w,ott} = L_{p,ott(20m)} + 20 \log(20) + 11 \quad (C.4)$$

Cioè il livello di potenza sonora ottimale da attribuire alla sorgente è stato determinato a ritroso, considerando il livello di pressione sonora ottimale di 75 dB(A) a 20 m dalla sorgente ed applicando la formula inversa della divergenza geometrica. Analogamente si sono calcolati il $L_{p,ott,min}$ e il $L_{p,ott,max}$.

Si sono calcolati quindi i valori delle pressioni sonore efficaci per le 4 condizioni citate (effettiva, ottimale, ottimale minima e ottimale massima):

$$p_{effettiva} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,effettiva}}{20}} \quad (C.5)$$

$$p_{ott} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,ott}}{20}}$$

$$p_{ott,min} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,ott,min}}{20}}$$

$$p_{ott,max} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{p,ott,max}}{20}}$$

Si è proceduto, infine, al calcolo delle relative variabili ridotte:

$$\begin{aligned}\eta(L_{p,effettivo}) &= \frac{p_{effettiva} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}} \\ \eta(L_{p,ott}) &= \frac{p_{ott} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}} \\ \eta(L_{p,ott,min}) &= \frac{p_{ott,min} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}} = 0 \\ \eta(L_{p,ott,max}) &= \frac{p_{ott,max} - p_{ott,min}}{p_{ott,max} - p_{ott,min}} = 1\end{aligned}\tag{C.6}$$

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si è scelto di considerare quale grandezza fisica stimolante l'energia del decadimento.

$$E_{dec} = \frac{4V}{cA} \left(1 - e^{\frac{-cA}{4V}RT} \right)\tag{C.7}$$

dove:

V = volume della sala (m^3);

c = velocità di propagazione del suono (m/s);

A = unità assorbenti della sala:

$$A = 0.16 \frac{V}{RT}\tag{C.8}$$

EDT = tempo di riverberazione (s).

Per determinare i valori ottimali si è attinto alla letteratura, utilizzando il diagramma per la determinazione del tempo di riverberazione ottimale, considerando che i valori ottimali dell' EDT dovrebbero essere superiori del 10% rispetto a quelli del T_{60} .

I limiti superiore ed inferiore del campo di qualità acustica sono invece stati dedotti in funzione del tempo di riverberazione ottimale, sulla base delle relazioni indicate da Arau:

$$EDT_{ott,min} = (0.9 * EDT_{ott}) - 0.5 \quad (C.9)$$

$$EDT_{ott,max} = EDT_{ott} + 0.5 \quad (C.10)$$

Analogamente a quanto visto per il livello di pressione si sono calcolati i valori delle energie del decadimento nei 4 casi.

I valori delle grandezze fisiche oggettive considerate sono:

$$\begin{aligned} E_{dec,effettiva} &= \frac{4V}{cA_{effettiva}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{effettiva}}{4V} EDT_{effettiva}} \right) \\ E_{dec,ott} &= \frac{4V}{cA_{ott}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{ott}}{4V} EDT_{ott}} \right) \\ E_{dec,ott,min} &= \frac{4V}{cA_{ott,min}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{ott,min}}{4V} EDT_{ott,min}} \right) \\ E_{dec,ott,max} &= \frac{4V}{cA_{ott,max}} \left(1 - e^{\frac{-cA_{ott,max}}{4V} EDT_{ott,max}} \right) \end{aligned} \quad (C.11)$$

Le variabili ridotte, allora, saranno:

$$\eta(EDT_{effettiva}) = \frac{E_{dec,effettiva} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}}$$

$$\eta(EDT) = \frac{E_{dec,ott} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} \quad (C.12)$$

$$\eta(EDT_{ott,min}) = \frac{E_{dec,ott,min} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} = 0$$

$$\eta(EDT_{ott,max}) = \frac{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}}{E_{dec,ott,max} - E_{dec,ott,min}} = 1$$

L'*ITDG* rappresenta, come detto, il tempo di ritardo della prima riflessione rispetto all'onda diretta. La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva cercata è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le riflesse. In particolare, l'intensità sonora dovuta all'onda diretta è data da:

$$I_d = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (C.13)$$

dove W = potenza sonora della sorgente (W);

r = distanza del punto di ricezione considerato dalla sorgente (m).

Analogamente l'intensità sonora dovuta alla prima riflessione sarà:

$$I_r = \frac{Wa}{4\pi d^2} \quad (C.14)$$

dove a = coefficiente di riflessione del materiale che riveste la superficie che genera la riflessione;

d = percorso compiuto dal raggio riflesso (m).

Allora la differenza di intensità sarà:

$$\Delta I = I_d - I_r = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d^2)} \quad (C.15)$$

L'incognita, che in questo caso è il percorso compiuto dall'onda riflessa, è deducibile proprio dal valore dell'*ITDG*. Essendo infatti:

$$\Delta r = ITDG \cdot c \quad (C.16)$$

ed essendo r noto a priori, allora:

$$d = r + \Delta r \quad (C.17)$$

I valori di riferimento dell'*ITDG* vengono, ancora una volta, dalla letteratura:

- $ITDG_{ott,min} = 0$ ms;
- $ITDG_{ott,max} = 80$ ms per la musica e 50 ms per il parlato;
- $ITDG_{ott} = 30$ ms, come indicato da Beranek.

I valori delle 4 grandezze considerate, allora:

$$\begin{aligned} \Delta I_{effettivo} &= I_d - I_{r,effettivo} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{effettivo}^2)} \\ \Delta I_{ott} &= I_d - I_{r,ott} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{ott}^2)} \\ \Delta I_{ott,min} &= I_d - I_{r,ott,min} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{ott,min}^2)} = 0 \\ \Delta I_{ott,max} &= I_d - I_{r,ott,max} = \frac{Wa}{4\pi(r^2 - d_{ott,max}^2)} \end{aligned} \quad (C.18)$$

Le variabili ridotte, allora, saranno:

$$\begin{aligned}\eta(ITDG_{effettivo}) &= \frac{\Delta I_{effettiva} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} \\ \eta(ITDG_{ott}) &= \frac{\Delta I_{ott} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} \\ \eta(ITDG_{ott,min}) &= \frac{\Delta I_{ott,min} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} = 0 \\ \eta(ITDG_{ott,max}) &= \frac{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}}{\Delta I_{ott,max} - \Delta I_{ott,min}} = 1\end{aligned}\tag{C.19}$$

Il Lateral Fraction è un parametro energetico che rappresenta il rapporto tra l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms, e l'energia omnidirezionale nei primi 80 ms. Poiché è il termine al numeratore a determinare la sensazione di spazialità, si è scelta questa quantità di energia come grandezza oggettiva stimolante. Allora:

$$E_{5-80} = LF \cdot E_{80}\tag{C.20}$$

dove E_{5-80} = energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms;

E_{80} = l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms.

Il campo di benessere acustico è stato individuato facendo riferimento alla letteratura, in particolare:

- $LF_{ott,min} = 0$;
- $LF_{ott,max} = 1$;
- $LF_{ott} = 0.4$, come indicato da Beranek.

E:

$$E_{(5-80),effettiva} = LF_{effettiva} \cdot E_{80}$$

$$E_{(5-80),ott} = LF_{ott} \cdot E_{80}$$

(C.21)

$$E_{(5-80),ott,min} = LF_{ott,min} \cdot E_{80} = 0$$

$$E_{(5-80),ott,max} = LF_{ott,max} \cdot E_{80} = E_{80}$$

Le variabili ridotte, allora, saranno:

$$\eta(LF_{effettivo}) = \frac{E_{(5-80)effettiva} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}}$$

$$\eta(LF_{ott}) = \frac{E_{(5-80)ott} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}}$$

(C.22)

$$\eta(LF_{ott,min}) = \frac{E_{(5-80)ott,min} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}} = 0$$

$$\eta(LF_{ott,max}) = \frac{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}}{E_{(5-80)ott,max} - E_{(5-80)ott,min}} = 1$$

Una volta effettuata la trasformazione di coordinate, ci si è quindi ricondotti ad uno spazio ridotto R^n_r a quattro dimensioni, in cui un generico punto è individuato dalla relazione $P(\eta(L_{p,i}), \eta(EDT_i), \eta(ITDG_i), \eta(LF_i))$ dove con i si intendono le situazioni analizzate (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima). Pertanto, in base ai calcoli effettuati, si individueranno nello spazio 4 punti, ciascuno rappresentativo di una specifica relazione uomo – ambiente.

Il modulo del vettore che unisce l'origine del sistema cartesiano a quattro dimensioni e i punti P_i rappresenta il valore cercato del Vettore qualità. Quindi:

$$\begin{aligned}
 \vec{V}_{effettivo} &= \sqrt{\eta(L_{p,eff})^2 + \eta(EDT_{eff})^2 + \eta(ITDG_{eff})^2 + \eta(LF_{eff})^2} \\
 \vec{V}_{ott} &= \sqrt{\eta(L_{p,ott})^2 + \eta(EDT_{ott})^2 + \eta(ITDG_{ott})^2 + \eta(LF_{ott})^2} \\
 \vec{V}_{ott,min} &= \sqrt{\eta(L_{p,ott,min})^2 + \eta(EDT_{ott,min})^2 + \eta(ITDG_{ott,min})^2 + \eta(LF_{ott,min})^2} \\
 \vec{V}_{ott,max} &= \sqrt{\eta(L_{p,ott,max})^2 + \eta(EDT_{ott,max})^2 + \eta(ITDG_{ott,max})^2 + \eta(LF_{ott,max})^2}
 \end{aligned} \tag{C.23}$$

L'intervallo di qualità acustica cercato è [0 ; 2]: tutti i punti rappresentativi dell'interazione uomo – ambiente che ricadono all'interno di questo intervallo, rappresentano condizioni di benessere acustico, e quindi il loro valore del Vettore qualità è una misura della qualità acustica della sala analizzata.

$$0 < V_{ottimale} < 2 \tag{C.24}$$

C.2. Teatro Consorziale di Budrio (Bologna)

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni nei tre punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 5 punti. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.10 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 115 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 78 dB.

In Tab. C.1 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	8269
Potenza sonora della sorgente (dB)	115
Livello di pressione a 20 m (dB)	78

Superficie complessiva della sala (m ²)	3060
---	------

Tab. C.1 – Teatro di Budrio, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. C.2, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto di ricezione	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	LF
110	10.2	2.11	84.2	13.29	1.19	0.328
111	10.86	2.09	83	14.65	1.21	0.289
112	10.29	2.14	83.3	12.06	1.23	0.407
Simulazione 1	4.56	2.04	88.5	15.31	1.31	0.261
Simulazione 2	7.85	2.04	85.4	23.71	1.24	0.237
Simulazione 3	7.65	2.24	85	26.81	1.27	0.271
Simulazione 4	13.61	1.41	81.3	30.37	1.21	0.387
Simulazione 5	10.04	1.41	81.3	23.42	1.21	0.389

Tab. C.2 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. C.3 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.4	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.76	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	1.90	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. C.3 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima) di ogni parametro oggettivo scelto.

Per il livello di pressione, si è dovuto preliminarmente calcolare il valore dei livelli di pressione ottimale, ottimale minimo e massimo nei punti di ricezione (Tab. C4), secondo la (C.3). Per far questo, dalla (C.4) si sono dovuti calcolare i relativi valori del livello di potenza sonora:

- $L_{W,ott} = 114 \text{ dB(A)}$;
- $L_{W,ott \min} = 89 \text{ dB(A)}$;
- $L_{W,ott \max} = 129 \text{ dB(A)}$.

Le relative grandezze fisiche oggettive, ricavate dalla (C.5), sono riportate in Tab. C.5.

Punto di misura	$L_{p,ott}$	$L_{p,ott \min}$	$L_{p,ott \max}$
110	89.2	64.1	104.1
111	88.0	63.0	103.0
112	88.7	63.6	103.6
Simulazione 1	95.4	70.4	110.4
Simulazione 2	90.7	65.7	105.7
Simulazione 3	93.4	68.3	108.3
Simulazione 4	88.9	63.8	103.8
Simulazione 5	90.9	65.9	105.9

Tab. C.4 – Valori limite del campo di qualità acustica del livello di pressione

Punto di misura	P_{eff}	P_{ott}	$P_{ott \min}$	$P_{ott \max}$
110	3.24E-01	5.76E-01	3.24E-02	3.24E+00
111	2.83E-01	5.05E-01	2.84E-02	2.84E+00
112	2.92E-01	5.42E-01	3.05E-02	3.05E+00
Simulazione 1	5.32E-01	1.18E+00	6.65E-02	6.65E+00
Simulazione 2	3.72E-01	6.87E-01	3.87E-02	3.87E+00
Simulazione 3	3.56E-01	9.34E-01	5.25E-02	5.25E+00
Simulazione 4	2.32E-01	5.57E-01	3.13E-02	3.13E+00
Simulazione 5	2.32E-01	7.05E-01	3.96E-02	3.96E+00

Tab. C.5 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai livelli di pressione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.6).

Punto di misura	$\eta(L_p)_{eff}$	$\eta(L_p)_{ott}$	$\eta(L_p)_{ott\ min}$	$\eta(L_p)_{ott\ max}$
110	9.10E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
111	9.03E-02	4.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
112	8.68E-02	4.77E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	7.07E-02	1.05E+00	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	8.72E-02	6.07E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	5.83E-02	8.29E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	6.48E-02	4.90E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	4.91E-02	6.23E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.6 – Variabili ridotte della pressione sonora

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si sono innanzi determinanti i valori ottimali, secondo le (C.9) e (C.10), successivamente si è calcolata l'energia del decadimento secondo la (C.11), avendo precedentemente determinato i diversi valori delle unità assorbenti secondo la (C.8). I valori ottenuti sono riportati in Tab. C.7. Le unità assorbenti, nei casi considerati, valgono:

- $A_{eff} = 1121.4\ m^2$;
- $A_{ott} = 987.4\ m^2$;
- $A_{ott\ min} = 727.5\ m^2$;
- $A_{ott\ max} = 1818.9\ m^2$.

Le unità assorbenti effettive sono state calcolate considerando un tempo di riverberazione medio tra quelli misurati.

Punto di misura	$E_{dec,eff}$	$E_{dec,ott}$	$E_{dec,ott\ min}$	$E_{dec,ott\ max}$
110	8.66E-02	1.02E-01	1.38E-01	5.53E-02
111	8.66E-02			
112	8.66E-02			
Simulazione 1	8.66E-02			
Simulazione 2	8.66E-02			
Simulazione 3	8.66E-02			
Simulazione 4	8.66E-02			
Simulazione 5	8.66E-02			

Tab. C.7 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai tempi di riverberazione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.8).

Punto di misura	$\eta(E_{dec})_{eff}$	$\eta(E_{dec})_{ott}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ min}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ max}$
110	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
111	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
112	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	6.20E-01	4.35E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.8 – Variabili ridotte dell'energia del decadimento

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva legata all'*ITDG* è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le onde riflesse. Preliminarmente è stato necessario calcolare i valori dei coefficienti di assorbimento, conoscendo i diversi tempi di riverberazione e le relative unità assorbenti:

- $a_{eff} = 0.37$;
- $a_{ott} = 0.32$;
- $a_{ott\ min} = 0.23$;
- $a_{ott\ max} = 0.59$.

In base alle formule dalla (C.13) alla (C.17) sono stati calcolati, per le diverse condizioni analizzate: l'intensità dell'onda diretta, il Δr tra il percorso del suono diretto e riflesso, il percorso di prima riflessione e l'intensità sonora riflessa (Tab. C.9).

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,eff}$
110	8.83E-02	4.56E+00	1.48E+01	2.68E-02
111	7.79E-02	5.03E+00	1.59E+01	2.31E-02
112	8.68E-02	4.14E+00	1.44E+01	2.80E-02
Simulazione 1	4.42E-01	5.26E+00	9.82E+00	6.05E-02
Simulazione 2	1.49E-01	8.14E+00	1.60E+01	2.28E-02
Simulazione 3	1.57E-01	9.21E+00	1.69E+01	2.05E-02
Simulazione 4	4.96E-02	1.04E+01	2.40E+01	1.01E-02
Simulazione 5	9.11E-02	8.04E+00	1.81E+01	1.78E-02

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott}$
110	8.83E-02	1.03E+01	2.05E+01	1.48E-02
111	7.79E-02		2.12E+01	1.39E-02
112	8.68E-02		2.06E+01	1.47E-02
Simulazione 1	4.42E-01		1.49E+01	2.82E-02
Simulazione 2	1.49E-01		1.82E+01	1.89E-02
Simulazione 3	1.57E-01		1.80E+01	1.93E-02
Simulazione 4	4.96E-02		2.39E+01	1.09E-02
Simulazione 5	9.11E-02		2.03E+01	1.50E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott min}$
110	8.83E-02	0.00E+00	1.02E+01	3.58E-02
111	7.79E-02		1.09E+01	3.16E-02
112	8.68E-02		1.03E+01	3.52E-02
Simulazione 1	4.42E-01		4.56E+00	1.79E-01
Simulazione 2	1.49E-01		7.85E+00	6.05E-02
Simulazione 3	1.57E-01		7.65E+00	6.37E-02
Simulazione 4	4.96E-02		1.36E+01	2.01E-02
Simulazione 5	9.11E-02		1.00E+01	3.70E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott max}$
110	8.83E-02	3.43E+01	4.45E+01	3.53E-03
111	7.79E-02		4.52E+01	3.43E-03
112	8.68E-02		4.46E+01	3.52E-03
Simulazione 1	4.42E-01		3.89E+01	4.63E-03
Simulazione 2	1.49E-01		4.22E+01	3.93E-03
Simulazione 3	1.57E-01		4.20E+01	3.97E-03
Simulazione 4	4.96E-02		4.80E+01	3.05E-03
Simulazione 5	9.11E-02		4.44E+01	3.55E-03

Tab. C.9 – Calcoli intermedi per determinare la differenza di energia tra onde

A questo punto si è potuta calcolare la differenza di energia come descritto dalla (C.18): i valori ottenuti sono riportati in Tab. C.10.

Punto di misura	ΔE_{eff}	ΔE_{ott}	$\Delta E_{ott min}$	$\Delta E_{ott max}$
110	6.15E-02	7.35E-02	5.25E-02	8.48E-02
111	5.48E-02	6.40E-02	4.63E-02	7.45E-02
112	5.88E-02	7.21E-02	5.16E-02	8.32E-02
Simulazione 1	3.81E-01	4.14E-01	2.63E-01	4.37E-01
Simulazione 2	1.26E-01	1.30E-01	8.86E-02	1.45E-01

Simulazione 3	1.36E-01	1.38E-01	9.33E-02	1.53E-01
Simulazione 4	3.95E-02	3.87E-02	2.95E-02	4.65E-02
Simulazione 5	7.33E-02	7.61E-02	5.42E-02	8.76E-02

Tab. C.10 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative all'ITDG

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.19), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.11).

Punto di misura	$\eta(\Delta E)_{eff}$	$\eta(\Delta E)_{ott}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ min}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ max}$
110	2.81E-01	6.51E-01	0.00E+00	1.00E+00
111	3.02E-01	6.28E-01	0.00E+00	1.00E+00
112	2.27E-01	6.48E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	6.80E-01	8.65E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	6.66E-01	7.36E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	7.23E-01	7.43E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	5.87E-01	5.41E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	5.73E-01	6.56E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.11 – Variabili ridotte della differenza di energia

Infine per il Lateral Fraction, si è scelta l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms come grandezza oggettiva stimolante, calcolata secondo la (C.21), in cui l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms è un dato ottenuto dalle simulazione con il software Odeon (Tab. C.12).

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.22), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.13).

Si è proceduto, in ultima analisi al calcolo dei Vettori qualità secondo la (C.23) e del ΔV secondo la (C.1), i cui valori sono riportati in Tab. C.14. Come già esplicitato nel Capitolo 6, il $V_{ott\ min} = 0$ e il $V_{ott\ max} = 2$ in ogni caso.

Punto di misura	E_{0-80}	$E_{5-80\ eff}$	$E_{5-80\ ott}$	$E_{5-80\ ott\ min}$	$E_{5-80\ ott\ max}$
110	1.91E-04	6.25E-05	1.31E-01	0.00E+00	3.28E-01
111	1.32E-04	3.81E-05	1.16E-01	0.00E+00	2.89E-01
112	1.32E-04	5.37E-05	1.63E-01	0.00E+00	4.07E-01
Simulazione 1	4.47E-04	1.17E-04	1.04E-01	0.00E+00	2.61E-01
Simulazione 2	2.34E-04	5.56E-05	9.48E-02	0.00E+00	2.37E-01
Simulazione 3	2.00E-04	5.41E-05	1.08E-01	0.00E+00	2.71E-01
Simulazione 4	8.51E-05	3.29E-05	1.55E-01	0.00E+00	3.87E-01
Simulazione 5	9.33E-05	3.63E-05	1.56E-01	0.00E+00	3.89E-01

Tab. C.12 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative al LF

Punto di misura	$\eta(E_{5-80})_{eff}$	$\eta(E_{5-80})_{ott}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ min}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ max}$
110	1.91E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
111	1.32E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
112	1.32E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	4.47E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	2.34E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	2.00E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	8.51E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	9.33E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.13 – Variabili ridotte della E_{5-80}

Punto di misura	V_{eff}	V_{ott}	ΔV
110	0.69	0.90	-0.21
111	0.70	0.97	-0.27
112	0.67	1.00	-0.33
Simulazione 1	0.92	1.49	-0.56
Simulazione 2	0.91	1.12	-0.21
Simulazione 3	0.95	1.26	-0.31
Simulazione 4	0.86	0.94	-0.08
Simulazione 5	0.85	1.08	-0.24

Tab. C.14 – Variabili dei Vettori qualità e del ΔV

C.3. Il Teatro Olimpico di Roma

Anche in questo caso per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 10 punti, di cui 3 in galleria. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.31 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 109 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 73 dB.

In Tab. C.15 vengono riportati i dati utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	13607
Potenza sonora della sorgente (dB)	109
Livello di pressione a 20 m (dB)	73
Superficie complessiva della sala (m^2))	6771

Tab. C.15 – Teatro Olimpico, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. C.16, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura		d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	$ITDG$ (ms)	EDT (s)	LF
B	22	10.2	1.40	78.5	17.64	1.34	0.083
C	12	9.16	1.16	79	18.83	1.29	0.031
F	10	12.51	1.00	77.2	24.19	1.37	0.032
I	22	14.88	2.16	77.2	23.76	1.23	0.165
M	40	17.78	3.47	75.7	11.85	1.35	0.122
V	18	25.75	1.95	74	25.6	1.14	0.274
V	36	25.34	1.22	71.9	2.89	1.42	0.128
Simulazione 1		10.38	1.11	79	17.32	1.25	0.047
Simulazione 2		22.14	1.06	73.4	26.88	1.24	0.100
Simulazione 3		16.58	1.07	75.8	49.75	1.41	0.070
Simulazione 4		26.96	1.50	76.8	34.93	1.26	0.177
Simulazione 5		10.95	1.06	78.3	41.27	1.4	0.158
Simulazione 6		24.46	1.60	72.2	72.26	1.36	0.163
Simulazione 7		14.27	1.45	71.6	43.21	1.27	0.164
Galleria 1		23.07	1.64	73.8	79.19	1.2	0.100
Galleria 2		27.69	1.68	73.9	80.68	1.1	0.268

Galleria 3	19.19	2.00	77.6	61.01	1.06	0.414
------------	-------	------	------	-------	------	-------

Tab. C.16 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. C.17 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.54	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.89	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	2.04	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. C.17 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima) di ogni parametro oggettivo scelto.

Per il livello di pressione, si è dovuto preliminarmente calcolare il valore dei livelli di pressione ottimale, ottimale minimo e massimo nei punti di ricezione (Tab. C18), secondo la (C.3). Per far questo, dalla (C.4) si sono dovuti calcolare i relativi valori del livello di potenza sonora:

- $L_{W,ott} = 117$ dB(A);
- $L_{W,ott min} = 92$ dB(A);
- $L_{W,ott max} = 132$ dB(A).

Punto di misura	$L_{p,ott}$	$L_{p,ott min}$	$L_{p,ott max}$
B22	92.5	64.5	104.5
C12	93.5	65.5	105.5
F10	90.3	62.3	102.3
I22	89.8	61.8	101.8
M40	88.8	60.8	100.8
V18	86.1	58.1	98.1
V36	84.9	56.9	96.9
Simulazione 1	92.2	64.2	104.2
Simulazione 2	86.5	58.5	98.5
Simulazione 3	88.4	60.4	100.4

Simulazione 4	84.2	56.2	96.2
Simulazione 5	92.2	64.2	104.2
Simulazione 6	85.6	57.6	97.6
Simulazione 7	89.7	61.7	101.7
Galleria 1	87.4	59.4	99.4
Galleria 2	86.0	58.0	98.0
Galleria 3	88.1	60.1	100.1

Tab. C.18 – Valori limite del campo di qualità acustica del livello di pressione

Le relative grandezze fisiche oggettive, ricavate dalla (C.5), sono riportate in Tab. C.19.

Punto di misura	p_{eff}	p_{ott}	$p_{ott\ min}$	$p_{ott\ max}$
B22	1.68E-01	8.43E-01	3.36E-02	3.36E+00
C12	1.78E-01	9.45E-01	3.76E-02	3.76E+00
F10	1.45E-01	6.54E-01	2.60E-02	2.60E+00
I22	1.45E-01	6.15E-01	2.45E-02	2.45E+00
M40	1.22E-01	5.50E-01	2.19E-02	2.19E+00
V18	1.00E-01	4.05E-01	1.61E-02	1.61E+00
V36	7.87E-02	3.51E-01	1.40E-02	1.40E+00
Simulazione 1	1.78E-01	8.13E-01	3.24E-02	3.24E+00
Simulazione 2	9.35E-02	4.22E-01	1.68E-02	1.68E+00
Simulazione 3	1.23E-01	5.26E-01	2.09E-02	2.09E+00
Simulazione 4	1.38E-01	3.26E-01	1.30E-02	1.30E+00
Simulazione 5	1.64E-01	8.18E-01	3.26E-02	3.26E+00
Simulazione 6	8.15E-02	3.82E-01	1.52E-02	1.52E+00
Simulazione 7	7.60E-02	6.11E-01	2.43E-02	2.43E+00
Galleria 1	9.80E-02	4.71E-01	1.87E-02	1.87E+00
Galleria 2	9.91E-02	3.99E-01	1.59E-02	1.59E+00
Galleria 3	1.52E-01	5.06E-01	2.01E-02	2.01E+00

Tab. C.19 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai livelli di pressione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.20).

Punto di misura	$\eta(L_p)_{eff}$	$\eta(L_p)_{ott}$	$\eta(L_p)_{ott\ min}$	$\eta(L_p)_{ott\ max}$
B22	4.05E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
C12	3.77E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
F10	4.61E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
I22	4.97E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
M40	4.61E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
V18	5.28E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
V36	4.68E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	4.55E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	4.61E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	4.94E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	9.77E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	4.09E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 6	4.40E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 7	2.15E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	4.27E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	5.30E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 3	6.60E-02	2.44E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.20 – Variabili ridotte della pressione sonora

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si sono innanzi determinanti i valori ottimali, secondo le (C.9) e (C.10), successivamente si è calcolata l'energia del decadimento secondo la (C.11), avendo precedentemente determinato i diversi valori delle unità assorbenti secondo la (C.8). I valori ottenuti sono riportati in Tab. C.21. Le unità assorbenti, nei casi considerati, valgono:

- $A_{eff} = 1718.4\ m^2$;
- $A_{ott} = 1413.7\ m^2$;
- $A_{ott\ min} = 1067.2\ m^2$;
- $A_{ott\ max} = 2457.2\ m^2$.

Le unità assorbenti effettive sono state calcolate considerando un tempo di riverberazione medio tra quelli misurati.

Punto di misura	$E_{dec,eff}$	$E_{dec,ott}$	$E_{dec,ott\ min}$	$E_{dec,ott\ max}$
B22	9.76E-02	1.12E-01	1.48E-01	6.45E-02
C12	9.76E-02			
F10	9.76E-02			
I22	9.76E-02			

M40	9.76E-02			
V18	9.76E-02			
V36	9.76E-02			
Simulazione 1	9.76E-02			
Simulazione 2	9.76E-02			
Simulazione 3	9.76E-02			
Simulazione 4	9.76E-02			
Simulazione 5	9.76E-02			
Simulazione 6	9.76E-02			
Simulazione 7	9.76E-02			
Galleria 1	9.76E-02			
Galleria 2	9.76E-02			
Galleria 3	9.76E-02			

Tab. C.21 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai tempi di riverberazione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.22).

Punto di misura	$\eta(E_{dec})_{eff}$	$\eta(E_{dec})_{ott}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ min}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ max}$
B22	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
C12	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
F10	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
I22	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
M40	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
V18	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
V36	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 6	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 7	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 3	6.05E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.22 – Variabili ridotte dell'energia del decadimento

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva legata all'*ITDG* è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le riflesse. Preliminarmente è stato necessario calcolare i valori dei coefficienti di assorbimento, conoscendo i diversi tempi di riverberazione e le relative unità assorbenti:

- $a_{eff} = 0.25$;
- $a_{ott} = 0.20$;
- $a_{ott\ min} = 0.15$;
- $a_{ott\ max} = 0.36$.

In base alle formule dalla (C.13) alla (C.17) sono stati calcolati, per le diverse condizioni analizzate: l'intensità dell'onda diretta, il Δr tra il percorso del suono diretto e riflesso, il percorso di prima riflessione e l'intensità sonora riflessa (Tab. C.23).

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,eff}$
B22	8.39E-02	6.06E+00	1.63E+01	2.49E-02
C12	1.04E-01	6.47E+00	1.56E+01	2.70E-02
F10	5.58E-02	8.31E+00	2.08E+01	1.52E-02
I22	3.94E-02	8.16E+00	2.30E+01	1.24E-02
M40	2.76E-02	4.07E+00	2.18E+01	1.38E-02
V18	1.32E-02	8.79E+00	3.45E+01	5.52E-03
V36	1.36E-02	9.92E-01	2.63E+01	9.49E-03
Simulazione 1	8.10E-02	5.95E+00	1.63E+01	2.47E-02
Simulazione 2	1.78E-02	9.23E+00	3.14E+01	6.69E-03
Simulazione 3	3.18E-02	1.71E+01	3.37E+01	5.81E-03
Simulazione 4	1.20E-02	1.20E+01	3.90E+01	4.34E-03
Simulazione 5	7.28E-02	1.42E+01	2.51E+01	1.04E-02
Simulazione 6	1.46E-02	2.48E+01	4.93E+01	2.71E-03
Simulazione 7	4.29E-02	1.48E+01	2.91E+01	7.77E-03
Galleria 1	1.64E-02	2.72E+01	5.03E+01	2.61E-03
Galleria 2	1.14E-02	2.77E+01	5.54E+01	2.14E-03
Galleria 3	2.37E-02	2.10E+01	4.01E+01	4.08E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott}$
B22	8.39E-02	1.03E+01	2.05E+01	1.64E-02
C12	1.04E-01		1.95E+01	1.82E-02
F10	5.58E-02		2.28E+01	1.33E-02
I22	3.94E-02		2.52E+01	1.09E-02
M40	2.76E-02		2.81E+01	8.76E-03
V18	1.32E-02		3.61E+01	5.32E-03
V36	1.36E-02		3.56E+01	5.44E-03
Simulazione 1	8.10E-02		2.07E+01	1.62E-02
Simulazione 2	1.78E-02		3.24E+01	6.56E-03
Simulazione 3	3.18E-02		2.69E+01	9.56E-03
Simulazione 4	1.20E-02		3.73E+01	4.98E-03

Simulazione 5	7.28E-02		2.13E+01	1.53E-02
Simulazione 6	1.46E-02		3.48E+01	5.72E-03
Simulazione 7	4.29E-02		2.46E+01	1.14E-02
Galleria 1	1.64E-02		3.34E+01	6.20E-03
Galleria 2	1.14E-02		3.80E+01	4.79E-03
Galleria 3	2.37E-02		2.95E+01	7.94E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott\ min}$
B22	8.39E-02	0.00E+00	1.02E+01	5.35E-02
C12	1.04E-01		9.16E+00	6.63E-02
F10	5.58E-02		1.25E+01	3.55E-02
I22	3.94E-02		1.49E+01	2.51E-02
M40	2.76E-02		1.78E+01	1.76E-02
V18	1.32E-02		2.58E+01	8.39E-03
V36	1.36E-02		2.53E+01	8.66E-03
Simulazione 1	8.10E-02		1.04E+01	5.16E-02
Simulazione 2	1.78E-02		2.21E+01	1.13E-02
Simulazione 3	3.18E-02		1.66E+01	2.02E-02
Simulazione 4	1.20E-02		2.70E+01	7.65E-03
Simulazione 5	7.28E-02		1.10E+01	4.64E-02
Simulazione 6	1.46E-02		2.45E+01	9.30E-03
Simulazione 7	4.29E-02		1.43E+01	2.73E-02
Galleria 1	1.64E-02		2.31E+01	1.05E-02
Galleria 2	1.14E-02		2.77E+01	7.26E-03
Galleria 3	2.37E-02		1.92E+01	1.51E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott\ max}$
B22	8.39E-02	2.75E+01	3.77E+01	5.18E-03
C12	1.04E-01		3.66E+01	5.48E-03
F10	5.58E-02		4.00E+01	4.60E-03
I22	3.94E-02		4.24E+01	4.10E-03
M40	2.76E-02		4.53E+01	3.59E-03
V18	1.32E-02		5.32E+01	2.60E-03
V36	1.36E-02		5.28E+01	2.64E-03
Simulazione 1	8.10E-02		3.79E+01	5.13E-03
Simulazione 2	1.78E-02		4.96E+01	2.99E-03
Simulazione 3	3.18E-02		4.41E+01	3.79E-03
Simulazione 4	1.20E-02		5.44E+01	2.48E-03
Simulazione 5	7.28E-02		3.84E+01	4.98E-03
Simulazione 6	1.46E-02		5.19E+01	2.73E-03
Simulazione 7	4.29E-02		4.17E+01	4.22E-03
Galleria 1	1.64E-02		5.05E+01	2.88E-03
Galleria 2	1.14E-02		5.52E+01	2.42E-03
Galleria 3	2.37E-02		4.67E+01	3.38E-03

Tab. C.23 – Calcoli intermedi per determinare la differenza di energia tra onde

A questo punto si è potuta calcolare la differenza di energia come descritto dalla (C.18); i valori ottenuti sono riportati in Tab. C.24.

Punto di misura	ΔE_{eff}	ΔE_{ott}	$\Delta E_{ott\ min}$	$\Delta E_{ott\ max}$
B22	5.90E-02	6.75E-02	3.05E-02	7.87E-02
C12	7.71E-02	8.58E-02	3.78E-02	9.86E-02
F10	4.06E-02	4.25E-02	2.02E-02	5.12E-02
I22	2.70E-02	2.85E-02	1.43E-02	3.53E-02
M40	1.38E-02	1.89E-02	1.00E-02	2.40E-02
V18	7.65E-03	7.85E-03	4.78E-03	1.06E-02
V36	4.11E-03	8.16E-03	4.93E-03	1.10E-02
Simulazione 1	5.64E-02	6.49E-02	2.94E-02	7.59E-02
Simulazione 2	1.11E-02	1.12E-02	6.46E-03	1.48E-02
Simulazione 3	2.60E-02	2.22E-02	1.15E-02	2.80E-02
Simulazione 4	7.68E-03	7.04E-03	4.36E-03	9.53E-03
Simulazione 5	6.24E-02	5.75E-02	2.64E-02	6.78E-02
Simulazione 6	1.19E-02	8.88E-03	5.30E-03	1.19E-02
Simulazione 7	3.51E-02	3.14E-02	1.56E-02	3.87E-02
Galleria 1	1.38E-02	1.02E-02	5.95E-03	1.35E-02
Galleria 2	9.24E-03	6.60E-03	4.13E-03	8.97E-03
Galleria 3	1.96E-02	1.58E-02	8.60E-03	2.03E-02

Tab. C.24 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative all'ITDG

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.19), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.25).

Punto di misura	$\eta(\Delta E)_{eff}$	$\eta(\Delta E)_{ott}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ min}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ max}$
B22	5.92E-01	7.67E-01	0.00E+00	1.00E+00
C12	6.47E-01	7.90E-01	0.00E+00	1.00E+00
F10	6.58E-01	7.20E-01	0.00E+00	1.00E+00
I22	6.05E-01	6.77E-01	0.00E+00	1.00E+00
M40	2.72E-01	6.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
V18	4.96E-01	5.31E-01	0.00E+00	1.00E+00
V36	-1.37E-01	5.35E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	5.79E-01	7.63E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	5.58E-01	5.72E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	8.77E-01	6.49E-01	0.00E+00	1.00E+00

Simulazione 4	6.41E-01	5.18E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	8.69E-01	7.51E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 6	1.00E+00	5.45E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 7	8.46E-01	6.87E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	1.04E+00	5.61E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	1.06E+00	5.10E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 3	9.40E-01	6.11E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.25 – Variabili ridotte della differenza di energia

Infine per il Lateral Fraction, si è scelta l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms come grandezza oggettiva stimolante, calcolata secondo la (C.21), in cui l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms è un dato ottenuto dalle simulazione con il software Odeon (Tab. C.26).

Punto di misura	E_{0-80}	$E_{5-80\ eff}$	$E_{5-80\ ott}$	$E_{5-80\ ott\ min}$	$E_{5-80\ ott\ max}$
B22	6.17E-05	5.16E-06	3.35E-02	0.00E+00	8.37E-02
C12	6.76E-05	2.12E-06	1.25E-02	0.00E+00	3.13E-02
F10	3.80E-05	1.23E-06	1.29E-02	0.00E+00	3.23E-02
I22	3.63E-05	5.99E-06	6.60E-02	0.00E+00	1.65E-01
M40	2.82E-05	3.45E-06	4.89E-02	0.00E+00	1.22E-01
V18	2.04E-05	5.60E-06	1.10E-01	0.00E+00	2.74E-01
V36	1.23E-05	1.58E-06	5.13E-02	0.00E+00	1.28E-01
Simulazione 1	6.46E-05	3.03E-06	1.88E-02	0.00E+00	4.70E-02
Simulazione 2	1.78E-05	1.78E-06	4.00E-02	0.00E+00	1.00E-01
Simulazione 3	2.88E-05	2.02E-06	2.80E-02	0.00E+00	7.00E-02
Simulazione 4	3.63E-05	6.43E-06	7.08E-02	0.00E+00	1.77E-01
Simulazione 5	5.75E-05	9.09E-06	6.32E-02	0.00E+00	1.58E-01
Simulazione 6	1.32E-05	2.15E-06	6.52E-02	0.00E+00	1.63E-01
Simulazione 7	1.15E-05	1.88E-06	6.56E-02	0.00E+00	1.64E-01
Galleria 1	1.95E-05	1.95E-06	4.00E-02	0.00E+00	1.00E-01
Galleria 2	2.09E-05	5.60E-06	1.07E-01	0.00E+00	2.68E-01
Galleria 3	4.57E-05	1.89E-05	1.66E-01	0.00E+00	4.14E-01

Tab. C.26 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative al LF

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.22), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.27).

Punto di misura	$\eta(E_{5-80})_{eff}$	$\eta(E_{5-80})_{ott}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ min}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ max}$
B22	6.16E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
C12	6.76E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
F10	3.80E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
I22	3.63E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
M40	2.81E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
V18	2.04E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
V36	1.23E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 1	6.45E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 2	1.77E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 3	2.88E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 4	3.63E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 5	5.75E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 6	1.31E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulazione 7	1.14E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	1.94E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	2.08E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 3	4.57E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.27 – Variabili ridotte della E_{5-80}

Si è proceduto, in ultima analisi, al calcolo dei Vettori qualità secondo la (C.23) e del ΔV secondo la (C.1), i cui valori sono riportati in Tab. C.28. Come già esplicitato nel Capitolo 6, il $V_{ott\ min} = 0$ e il $V_{ott\ max} = 2$ in ogni caso.

Punto di misura	V_{eff}	V_{ott}	ΔV
B22	0.85	1.00	-0.15
C12	0.89	1.01	-0.13
F10	0.89	0.96	-0.07
I22	0.86	0.93	-0.07
M40	0.66	0.90	-0.23
V18	0.78	0.83	-0.04
V36	0.62	0.83	-0.21
Simulazione 1	0.84	0.99	-0.15
Simulazione 2	0.82	0.86	-0.03
Simulazione 3	1.07	0.91	0.16
Simulazione 4	0.89	0.82	0.07
Simulazione 5	1.06	0.98	0.07
Simulazione 6	1.17	0.84	0.33
Simulazione 7	1.04	0.94	0.10

Galleria 1	1.20	0.85	0.35
Galleria 2	1.22	0.82	0.40
Galleria 3	1.12	0.88	0.24

Tab. C.28 – Variabili dei Vettori qualità e del ΔV

C.4. Aula Magna del Rettorato della Sapienza - Roma

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni nei 7 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 6 punti. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.53 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

In Tab. C.29 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	15288
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Superficie complessiva della sala (m ²)	4346

Tab. C.29 – Aula Magna del Rettorato, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. C.30 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	<i>d</i> (m)	<i>A_{eq}</i>	<i>L_p</i> (dBA)	<i>ITDG</i> (ms)	<i>EDT</i> (s)	<i>LF</i>
1	10	3.02	83.3	12.56	2.28	0.396
2	14.87	3.35	82.2	4.67	2.24	0.318
3	13.16	1.70	82.4	32.04	2.18	0.408
4	17.47	3.67	81.4	8.22	2.15	0.456
5	19.45	3.43	81.2	24.23	2.14	0.470
6	21.42	3.94	81.5	2.81	2.17	0.431
7	26.46	3.80	79.2	5.25	2.17	0.543

Simulato 1	10.44	1.05	82.7	35.92	2.29	0.365
Simulato 2	24.57	3.27	79.4	23.95	2.33	0.523
Simulato 3	20.63	4.07	81.4	4.73	2.17	0.412
Galleria 1	24.64	4.47	81.2	13.6	2.07	0.525
Galleria 2	30.11	3.39	80.4	2.48	2.07	0.566
Corridoio 1	17.58	3.80	80.5	3.58	2.06	0.267

Tab. C.30 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. C.31 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.49	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	1.60	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	50	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. C.31 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima) di ogni parametro oggettivo scelto.

Per il livello di pressione, si è dovuto preliminarmente calcolare il valore dei livelli di pressione ottimale, ottimale minimo e massimo nei punti di ricezione (Tab. C.32), secondo la (C.3). Per far questo, dalla (C.4) si sono dovuti calcolare i relativi valori del livello di potenza sonora:

- $L_{W,ott} = 117$ dB(A);
- $L_{W,ott min} = 92$ dB(A);
- $L_{W,ott max} = 132$ dB(A).

Punto di misura	$L_{p,ott}$	$L_{p,ott min}$	$L_{p,ott max}$
1	96.1	71.1	111.1
2	93.4	68.4	108.4
3	89.5	64.5	104.5
4	92.8	67.8	107.8
5	91.3	66.3	106.3
6	91.6	66.6	106.6

7	89.5	64.5	104.5
Simulato 1	88.9	63.9	103.9
Simulato 2	88.9	63.9	103.9
Simulato 3	92.2	67.2	107.2
Galleria 1	91.4	66.4	106.4
Galleria 2	91.0	66.0	106.0
Corridoio 1	93.0	68.0	108.0

Tab. C.32 – Valori limite del campo di qualità acustica del livello di pressione

Le relative grandezze fisiche oggettive, ricavate dalla (C.5), sono riportate in Tab. C.33. Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.34).

Punto di misura	P_{eff}	P_{ott}	$P_{ott\ min}$	$P_{ott\ max}$
1	2.92E-01	1.27E+00	7.16E-02	7.16E+00
2	2.58E-01	9.40E-01	5.29E-02	5.29E+00
3	2.64E-01	5.99E-01	3.37E-02	3.37E+00
4	2.35E-01	8.72E-01	4.90E-02	4.90E+00
5	2.30E-01	7.34E-01	4.13E-02	4.13E+00
6	2.38E-01	7.58E-01	4.26E-02	4.26E+00
7	1.82E-01	5.94E-01	3.34E-02	3.34E+00
Simulato 1	2.73E-01	5.55E-01	3.12E-02	3.12E+00
Simulato 2	1.87E-01	5.57E-01	3.13E-02	3.13E+00
Simulato 3	2.35E-01	8.13E-01	4.57E-02	4.57E+00
Galleria 1	2.30E-01	7.43E-01	4.18E-02	4.18E+00
Galleria 2	2.09E-01	7.10E-01	3.99E-02	3.99E+00
Corridoio 1	2.12E-01	8.94E-01	5.03E-02	5.03E+00

Tab. C.33 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai livelli di pressione

Punto di misura	$\eta(L_p)_{eff}$	$\eta(L_p)_{ott}$	$\eta(L_p)_{ott\ min}$	$\eta(L_p)_{ott\ max}$
1	3.12E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
2	3.91E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
3	6.90E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
4	3.83E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
5	4.61E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
6	4.62E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
7	4.50E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 1	7.83E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 2	5.01E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00

Simulato 3	4.18E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	4.54E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	4.29E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
Corridoio 1	3.24E-02	1.70E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.34 – Variabili ridotte della pressione sonora

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si sono innanzi determinanti i valori ottimali, secondo le (C.9) e (C.10), successivamente si è calcolata l'energia del decadimento secondo la (C.11), avendo precedentemente determinato i diversi valori delle unità assorbenti secondo la (C.8). I valori ottenuti sono riportati in Tab. C.35. Le unità assorbenti, nei casi considerati, valgono:

- $A_{eff} = 1224.4 \text{ m}^2$;
- $A_{ott} = 2446 \text{ m}^2$;
- $A_{ott \min} = 1528.8 \text{ m}^2$;
- $A_{ott \max} = 4942 \text{ m}^2$.

Le unità assorbenti effettive sono state calcolate considerando un tempo di riverberazione medio tra quelli misurati.

Punto di misura	$E_{dec,eff}$	$E_{dec,ott}$	$E_{dec,ott \min}$	$E_{dec,ott \max}$
1	1.66E-01	7.28E-02	1.15E-01	3.57E-02
2	1.66E-01			
3	1.66E-01			
4	1.66E-01			
5	1.66E-01			
6	1.66E-01			
7	1.66E-01			
Simulato 1	1.66E-01			
Simulato 2	1.66E-01			
Simulato 3	1.66E-01			
Galleria 1	1.66E-01			
Galleria 2	1.66E-01			
Corridoio 1	1.66E-01			

Tab. C.35 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai tempi di riverberazione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.36).

Punto di misura	$\eta(E_{dec})_{eff}$	$\eta(E_{dec})_{ott}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ min}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ max}$
1	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
2	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
3	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
4	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
5	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
6	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
7	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 1	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 2	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 3	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00
Corridoio 1	-6.48E-01	5.30E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.36 – Variabili ridotte dell'energia del decadimento

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva legata all'*ITDG* è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le riflesse. Preliminarmente è stato necessario calcolare i valori dei coefficienti di assorbimento, conoscendo i diversi tempi di riverberazione e le relative unità assorbenti:

- $a_{eff} = 0.26$;
- $a_{ott} = 0.56$;
- $a_{ott\ min} = 0.35$;
- $a_{ott\ max} = 1$.

In base alle formule dalla (C.13) alla (C.17) sono stati calcolati, per le diverse condizioni analizzate: l'intensità dell'onda diretta, il Δr tra il percorso del suono diretto e riflesso, il percorso di prima riflessione e l'intensità sonora riflessa (Tab. C.37).

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,eff}$
1	9.10E-02	4.31E+00	1.43E+01	3.30E-02
2	4.12E-02	1.60E+00	1.65E+01	2.49E-02
3	5.25E-02	1.10E+01	2.42E+01	1.16E-02
4	2.98E-02	2.82E+00	2.03E+01	1.64E-02
5	2.41E-02	8.32E+00	2.78E+01	8.77E-03
6	1.98E-02	9.65E-01	2.24E+01	1.35E-02

7	1.30E-02	1.80E+00	2.83E+01	8.46E-03
Simulato 1	8.35E-02	1.23E+01	2.28E+01	1.30E-02
Simulato 2	1.51E-02	8.22E+00	3.28E+01	6.29E-03
Simulato 3	2.14E-02	1.62E+00	2.23E+01	1.37E-02
Galleria 1	1.50E-02	4.67E+00	2.93E+01	7.87E-03
Galleria 2	1.00E-02	8.52E-01	3.10E+01	7.05E-03
Corridoio 1	2.94E-02	1.23E+00	1.88E+01	1.91E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott}$
1	9.10E-02	1.03E+01	2.03E+01	9.65E-03
2	4.12E-02		2.52E+01	6.28E-03
3	5.25E-02		2.35E+01	7.23E-03
4	2.98E-02		2.78E+01	5.16E-03
5	2.41E-02		2.98E+01	4.49E-03
6	1.98E-02		3.17E+01	3.95E-03
7	1.30E-02		3.68E+01	2.94E-03
Simulato 1	8.35E-02		2.07E+01	9.25E-03
Simulato 2	1.51E-02		3.49E+01	3.27E-03
Simulato 3	2.14E-02		3.09E+01	4.16E-03
Galleria 1	1.50E-02		3.49E+01	3.26E-03
Galleria 2	1.00E-02		4.04E+01	2.44E-03
Corridoio 1	2.94E-02		2.79E+01	5.12E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott min}$
1	9.10E-02	0.00E+00	1.00E+01	-1.35E-02
2	4.12E-02		1.49E+01	-6.12E-03
3	5.25E-02		1.32E+01	-7.81E-03
4	2.98E-02		1.75E+01	-4.43E-03
5	2.41E-02		1.95E+01	-3.58E-03
6	1.98E-02		2.14E+01	-2.95E-03
7	1.30E-02		2.65E+01	-1.93E-03
Simulato 1	8.35E-02		1.04E+01	-1.24E-02
Simulato 2	1.51E-02		2.46E+01	-2.24E-03
Simulato 3	2.14E-02		2.06E+01	-3.18E-03
Galleria 1	1.50E-02		2.46E+01	-2.23E-03
Galleria 2	1.00E-02		3.01E+01	-1.49E-03
Corridoio 1	2.94E-02		1.76E+01	-4.38E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott max}$
1	9.10E-02	2.75E+01	3.75E+01	4.20E-03
2	4.12E-02		4.23E+01	3.29E-03
3	5.25E-02		4.06E+01	3.57E-03
4	2.98E-02		4.49E+01	2.92E-03
5	2.41E-02		4.69E+01	2.68E-03
6	1.98E-02		4.89E+01	2.47E-03
7	1.30E-02		5.39E+01	2.03E-03
Simulato 1	8.35E-02		3.79E+01	4.10E-03
Simulato 2	1.51E-02		5.20E+01	2.18E-03
Simulato 3	2.14E-02		4.81E+01	2.55E-03

Galleria 1	1.50E-02		5.21E+01	2.17E-03
Galleria 2	1.00E-02		5.76E+01	1.78E-03
Corridoio 1	2.94E-02		4.51E+01	2.91E-03

Tab. C.37 – Calcoli intermedi per determinare la differenza di energia tra onde

A questo punto si è potuta calcolare la differenza di energia come descritto dalla (C.18): i valori ottenuti sono riportati in Tab. C.38.

Punto di misura	ΔE_{eff}	ΔE_{ott}	$\Delta E_{ott\ min}$	$\Delta E_{ott\ max}$
1	5.80E-02	8.14E-02	1.05E-01	8.68E-02
2	1.62E-02	3.49E-02	4.73E-02	3.79E-02
3	4.10E-02	4.53E-02	6.04E-02	4.90E-02
4	1.34E-02	2.47E-02	3.42E-02	2.69E-02
5	1.53E-02	1.96E-02	2.76E-02	2.14E-02
6	6.34E-03	1.59E-02	2.28E-02	1.74E-02
7	4.53E-03	1.01E-02	1.49E-02	1.10E-02
Simulato 1	7.05E-02	7.42E-02	9.59E-02	7.94E-02
Simulato 2	8.79E-03	1.18E-02	1.73E-02	1.29E-02
Simulato 3	7.73E-03	1.72E-02	2.46E-02	1.88E-02
Galleria 1	7.12E-03	1.17E-02	1.72E-02	1.28E-02
Galleria 2	2.98E-03	7.60E-03	1.15E-02	8.26E-03
Corridoio 1	1.03E-02	2.43E-02	3.38E-02	2.65E-02

Tab. C.38 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative all'ITDG

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.19), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.39).

Punto di misura	$\eta(\Delta E)_{eff}$	$\eta(\Delta E)_{ott}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ min}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ max}$
1	2.62E+00	1.31E+00	0.00E+00	1.00E+00
2	3.30E+00	1.32E+00	0.00E+00	1.00E+00
3	1.70E+00	1.32E+00	0.00E+00	1.00E+00
4	2.84E+00	1.30E+00	0.00E+00	1.00E+00
5	1.97E+00	1.29E+00	0.00E+00	1.00E+00
6	3.04E+00	1.27E+00	0.00E+00	1.00E+00

7	2.63E+00	1.23E+00	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 1	1.54E+00	1.31E+00	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 2	1.93E+00	1.25E+00	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 3	2.94E+00	1.28E+00	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	2.30E+00	1.25E+00	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	2.61E+00	1.20E+00	0.00E+00	1.00E+00
Corridoio 1	3.23E+00	1.30E+00	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.39 – Variabili ridotte della differenza di energia

Infine per il Lateral Fraction, si è scelta l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms come grandezza oggettiva stimolante, calcolata secondo la (C.21), in cui l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms è un dato ottenuto dalle simulazione con il software Odeon (Tab. C.40).

Punto di misura	E_{0-80}	$E_{5-80\text{ eff}}$	$E_{5-80\text{ ott}}$	$E_{5-80\text{ ott min}}$	$E_{5-80\text{ ott max}}$
1	3.24E-05	1.28E-05	1.58E-01	0.00E+00	3.96E-01
2	2.19E-05	6.96E-06	1.27E-01	0.00E+00	3.18E-01
3	2.24E-05	9.13E-06	1.63E-01	0.00E+00	4.08E-01
4	1.74E-05	7.92E-06	1.82E-01	0.00E+00	4.56E-01
5	1.55E-05	7.28E-06	1.88E-01	0.00E+00	4.70E-01
6	1.74E-05	7.49E-06	1.72E-01	0.00E+00	4.31E-01
7	9.55E-06	5.19E-06	2.17E-01	0.00E+00	5.43E-01
Simulato 1	2.51E-05	9.17E-06	1.46E-01	0.00E+00	3.65E-01
Simulato 2	9.55E-06	4.99E-06	2.09E-01	0.00E+00	5.23E-01
Simulato 3	1.82E-05	7.50E-06	1.65E-01	0.00E+00	4.12E-01
Galleria 1	1.62E-05	8.51E-06	2.10E-01	0.00E+00	5.25E-01
Galleria 2	1.29E-05	7.29E-06	2.26E-01	0.00E+00	5.66E-01
Corridoio 1	1.74E-05	4.64E-06	1.07E-01	0.00E+00	2.67E-01

Tab. C.40 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative al LF

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.22), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.41).

Punto di misura	$\eta(E_{5-80})_{\text{eff}}$	$\eta(E_{5-80})_{\text{ott}}$	$\eta(E_{5-80})_{\text{ott min}}$	$\eta(E_{5-80})_{\text{ott max}}$
1	3.24E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
2	2.19E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00

3	2.24E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
4	1.74E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
5	1.55E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
6	1.74E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
7	9.55E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 1	2.51E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 2	9.55E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Simulato 3	1.82E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 1	1.62E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Galleria 2	1.29E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
Corridoio 1	1.74E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.41 – Variabili ridotte della E_{5-80}

Si è proceduto, in ultima analisi, al calcolo dei Vettori qualità secondo la (C.23) e del ΔV secondo la (C.1), i cui valori sono riportati in Tab. C.42. Come già esplicitato nel Capitolo 6, il $V_{ott\ min} = 0$ e il $V_{ott\ max} = 2$ in ogni caso.

Punto di misura	V_{eff}	V_{ott}	ΔV
1	2.70	1.48	1.23
2	3.36	1.49	1.88
3	1.82	1.49	0.34
4	2.91	1.47	1.44
5	2.08	1.46	0.62
6	3.10	1.45	1.66
7	2.70	1.41	1.30
Simulato 1	1.67	1.48	0.19
Simulato 2	2.04	1.42	0.61
Simulato 3	3.01	1.45	1.56
Galleria 1	2.39	1.42	0.96
Galleria 2	2.69	1.38	1.31
Corridoio 1	3.29	1.47	1.82

Tab. C.42 – Variabili dei Vettori qualità e del ΔV

C.5. Nuovo Teatro di Ateneo della Sapienza – Roma

C.5.1. Applicazione della teoria per la configurazione sala da concerto

In base a quanto esposto, per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni negli 11 punti di misura considerati. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.71 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 114 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 77 dB.

In Tab. C.43 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	5605
Potenza sonora della sorgente (dB)	114
Livello di pressione a 20 m (dB)	77
Superficie complessiva della sala (m ²)	2181.6

Tab. C.43 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. C.44 riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	<i>d</i> (m)	<i>A_{eq}</i>	<i>L_p</i> (dBA)	<i>ITDG</i> (ms)	<i>EDT</i> (s)	<i>LF</i>
R1	2.98	2.72	93.9	16.74	0.65	0.209
R2	4.78	1.23	88.6	5.87	0.87	0.428
R3	6.35	1.00	87.1	6.35	0.86	0.310
R4	10.45	2.72	85.2	6.38	0.82	0.267
R5	8.61	2.43	86.5	5.84	0.83	0.425
R6	17.51	2.75	81.4	6.45	0.73	0.171
R7	17.6	3.13	81.3	6.42	0.77	0.322
R8	16.49	2.57	81.8	6.44	0.75	0.342
G1	18.77	4.73	83.1	5.18	0.62	0.325
G2	15.92	3.80	83.1	5.91	0.75	0.290
G3	16.01	3.43	83.2	5.88	0.69	0.321

Tab. C.44 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. C.45 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.7	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	1.03	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	2.20	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. C.45 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima) di ogni parametro oggettivo scelto.

Per il livello di pressione, si è dovuto preliminarmente calcolare il valore dei livelli di pressione ottimale, ottimale minimo e massimo nei punti di ricezione (Tab. C.46), secondo la (C.3). Per far questo, dalla (C.4) si sono dovuti calcolare i relativi valori del livello di potenza sonora:

- $L_{W,ott} = 95$ dB(A);
- $L_{W,ott,min} = 89$ dB(A);
- $L_{W,ott,max} = 129$ dB(A).

Punto di misura	$L_{p,ott}$	$L_{p,ott,min}$	$L_{p,ott,max}$
R1	94.9	88.9	128.9
R2	83.5	77.5	117.5
R3	81.0	75.0	115.0
R4	76.7	70.7	110.7
R5	79.4	73.4	113.4
R6	73.8	67.8	107.8
R7	81.1	75.1	115.1
R8	73.2	67.2	107.2
G1	72.0	66.0	106.0
G2	73.5	67.5	107.5
G3	76.1	70.1	110.1

Tab. C.46 – Valori limite del campo di qualità acustica del livello di pressione

Le relative grandezze fisiche oggettive, ricavate dalla (C.5), sono riportate in Tab. C.47.

Punto di misura	P_{eff}	P_{ott}	$P_{ott\ min}$	$P_{ott\ max}$
R1	9.91E-01	1.11E+00	5.55E-01	5.55E+01
R2	5.38E-01	2.99E-01	1.50E-01	1.50E+01
R3	4.53E-01	2.25E-01	1.13E-01	1.13E+01
R4	3.64E-01	1.37E-01	6.85E-02	6.85E+00
R5	4.23E-01	1.88E-01	9.40E-02	9.40E+00
R6	2.35E-01	9.78E-02	4.90E-02	4.90E+00
R7	2.32E-01	2.27E-01	1.14E-01	1.14E+01
R8	2.46E-01	9.10E-02	4.56E-02	4.56E+00
G1	2.86E-01	7.94E-02	3.98E-02	3.98E+00
G2	2.86E-01	9.49E-02	4.75E-02	4.75E+00
G3	2.89E-01	1.27E-01	6.36E-02	6.36E+00

Tab. C.47 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai livelli di pressione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.48).

Punto di misura	$\eta(L_p)_{eff}$	$\eta(L_p)_{ott}$	$\eta(L_p)_{ott\ min}$	$\eta(L_p)_{ott\ max}$
R1	7.95E-03	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
R2	2.62E-02	2.58E-01	0.00E+00	1.00E+00
R3	3.05E-02	1.92E-01	0.00E+00	1.00E+00
R4	4.35E-02	1.13E-01	0.00E+00	1.00E+00
R5	3.53E-02	1.58E-01	0.00E+00	1.00E+00
R6	3.83E-02	7.77E-02	0.00E+00	1.00E+00
R7	1.05E-02	1.94E-01	0.00E+00	1.00E+00
R8	4.44E-02	7.16E-02	0.00E+00	1.00E+00
G1	6.24E-02	6.12E-02	0.00E+00	1.00E+00
G2	5.06E-02	7.51E-02	0.00E+00	1.00E+00
G3	3.58E-02	1.04E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.48 – Variabili ridotte della pressione sonora

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si sono innanzi determinanti i valori ottimali, secondo le (C.9) e (C.10), successivamente si è calcolata l'energia del decadimento secondo la (C.11), avendo precedentemente determinato i diversi valori delle unità assorbenti secondo la (C.8). I valori ottenuti sono riportati in Tab. C.49. Le unità assorbenti, nei casi considerati, valgono:

- $A_{eff} = 1196.2 \text{ m}^2$;
- $A_{ott} = 527.5 \text{ m}^2$;
- $A_{ott \min} = 407.6 \text{ m}^2$;
- $A_{ott \max} = 870.7 \text{ m}^2$.

Le unità assorbenti effettive sono state calcolate considerando un tempo di riverberazione medio tra quelli misurati.

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.50).

Punto di misura	$E_{dec,eff}$	$E_{dec,ott}$	$E_{dec,ott \min}$	$E_{dec,ott \max}$
R1	4.73E-02	1.24E-01	1.60E-01	7.50E-02
R2	4.73E-02			
R3	4.73E-02			
R4	4.73E-02			
R5	4.73E-02			
R6	4.73E-02			
R7	4.73E-02			
R8	4.73E-02			
G1	4.73E-02			
G2	4.73E-02			
G3	4.73E-02			

Tab. C.49 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai tempi di riverberazione

Punto di misura	$\eta(E_{dec})_{eff}$	$\eta(E_{dec})_{ott}$	$\eta(E_{dec})_{ott \min}$	$\eta(E_{dec})_{ott \max}$
R1	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R2	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R3	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R4	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R5	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R6	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R7	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
R8	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
G1	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
G2	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
G3	1.33E+00	4.26E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.50 – Variabili ridotte dell'energia del decadimento

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva legata all'*ITDG* è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le riflesse. Preliminarmente è stato necessario calcolare i valori dei coefficienti di assorbimento, conoscendo i diversi tempi di riverberazione e le relative unità assorbenti:

- $a_{eff} = 0.52$;
- $a_{ott} = 0.24$;
- $a_{ott\ min} = 0.18$;
- $a_{ott\ max} = 0.39$.

In base alle formule dalla (C.13) alla (C.17) sono stati calcolati, per le diverse condizioni analizzate: l'intensità dell'onda diretta, il Δr tra il percorso del suono diretto e riflesso, il percorso di prima riflessione e l'intensità sonora riflessa (Tab. C.51).

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,eff}$
R1	1.03E+00	5.75E+00	8.73E+00	5.73E-02
R2	3.99E-01	2.02E+00	6.80E+00	9.46E-02
R3	2.26E-01	2.18E+00	8.53E+00	6.00E-02
R4	8.34E-02	2.19E+00	1.26E+01	2.73E-02
R5	1.23E-01	2.01E+00	1.06E+01	3.88E-02
R6	2.97E-02	2.21E+00	1.97E+01	1.12E-02
R7	2.94E-02	2.20E+00	1.98E+01	1.11E-02
R8	3.35E-02	2.21E+00	1.87E+01	1.25E-02
G1	2.58E-02	1.78E+00	2.05E+01	1.03E-02
G2	3.59E-02	2.03E+00	1.79E+01	1.36E-02
G3	3.55E-02	2.02E+00	1.80E+01	1.34E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott}$
R1	1.03E+00	1.03E+01	1.33E+01	3.91E-02
R2	3.99E-01		1.51E+01	3.04E-02
R3	2.26E-01		1.67E+01	2.49E-02
R4	8.34E-02		2.08E+01	1.60E-02
R5	1.23E-01		1.89E+01	1.93E-02
R6	2.97E-02		2.78E+01	8.93E-03
R7	2.94E-02		2.79E+01	8.87E-03
R8	3.35E-02		2.68E+01	9.62E-03
G1	2.58E-02		2.91E+01	8.17E-03
G2	3.59E-02		2.62E+01	1.00E-02
G3	3.55E-02		2.63E+01	9.97E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott\ min}$
R1	1.03E+00	0.00E+00	2.98E+00	6.16E-01
R2	3.99E-01		4.78E+00	2.40E-01
R3	2.26E-01		6.35E+00	1.36E-01
R4	8.34E-02		1.05E+01	5.01E-02

R5	1.23E-01		8.61E+00	7.38E-02
R6	2.97E-02		1.75E+01	1.78E-02
R7	2.94E-02		1.76E+01	1.77E-02
R8	3.35E-02		1.65E+01	2.01E-02
G1	2.58E-02		1.88E+01	1.55E-02
G2	3.59E-02		1.59E+01	2.16E-02
G3	3.55E-02		1.60E+01	2.13E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott\ max}$
R1	1.03E+00	3.43E+01	3.73E+01	5.32E-03
R2	3.99E-01		3.91E+01	4.84E-03
R3	2.26E-01		4.07E+01	4.47E-03
R4	8.34E-02		4.48E+01	3.69E-03
R5	1.23E-01		4.30E+01	4.01E-03
R6	2.97E-02		5.19E+01	2.75E-03
R7	2.94E-02		5.19E+01	2.75E-03
R8	3.35E-02		5.08E+01	2.87E-03
G1	2.58E-02		5.31E+01	2.63E-03
G2	3.59E-02		5.03E+01	2.93E-03
G3	3.55E-02		5.04E+01	2.92E-03

Tab. C.51 – Calcoli intermedi per determinare la differenza di energia tra onde

A questo punto si è potuta calcolare la differenza di energia come descritto dalla (C.18): i valori ottenuti sono riportati in Tab. C.52.

Punto di misura	ΔE_{eff}	ΔE_{ott}	$\Delta E_{ott\ min}$	$\Delta E_{ott\ max}$
R1	9.68E-01	9.86E-01	4.09E-01	1.02E+00
R2	3.04E-01	3.68E-01	1.59E-01	3.94E-01
R3	1.66E-01	2.01E-01	9.01E-02	2.21E-01
R4	5.61E-02	6.74E-02	3.33E-02	7.97E-02
R5	8.41E-02	1.04E-01	4.90E-02	1.19E-01
R6	1.85E-02	2.08E-02	1.19E-02	2.69E-02
R7	1.83E-02	2.05E-02	1.17E-02	2.67E-02
R8	2.10E-02	2.39E-02	1.34E-02	3.06E-02
G1	1.55E-02	1.77E-02	1.03E-02	2.32E-02
G2	2.24E-02	2.59E-02	1.43E-02	3.30E-02
G3	2.21E-02	2.56E-02	1.42E-02	3.26E-02

Tab. C.52 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative all'ITDG

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.19), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.53).

Punto di misura	$\eta(\Delta E)_{eff}$	$\eta(\Delta E)_{ott}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ min}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ max}$
R1	9.15E-01	9.45E-01	0.00E+00	1.00E+00
R2	6.18E-01	8.91E-01	0.00E+00	1.00E+00
R3	5.77E-01	8.44E-01	0.00E+00	1.00E+00
R4	4.91E-01	7.34E-01	0.00E+00	1.00E+00
R5	5.02E-01	7.81E-01	0.00E+00	1.00E+00
R6	4.39E-01	5.91E-01	0.00E+00	1.00E+00
R7	4.38E-01	5.90E-01	0.00E+00	1.00E+00
R8	4.42E-01	6.09E-01	0.00E+00	1.00E+00
G1	4.02E-01	5.70E-01	0.00E+00	1.00E+00
G2	4.31E-01	6.19E-01	0.00E+00	1.00E+00
G3	4.29E-01	6.17E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.53 – Variabili ridotte della differenza di energia

Infine per il Lateral Fraction, si è scelta l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms come grandezza oggettiva stimolante, calcolata secondo la (C.21), in cui l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms è un dato ottenuto dalle simulazione con il software Odeon (Tab. C.54).

Punto di misura	E_{0-80}	$E_{5-80\ eff}$	$E_{5-80\ ott}$	$E_{5-80\ ott\ min}$	$E_{5-80\ ott\ max}$
R1	2.14E-03	4.47E-04	8.36E-02	0.00E+00	2.09E-01
R2	9.77E-04	4.18E-04	1.71E-01	0.00E+00	4.28E-01
R3	6.92E-04	2.14E-04	1.24E-01	0.00E+00	3.10E-01
R4	4.47E-04	1.19E-04	1.07E-01	0.00E+00	2.67E-01
R5	6.17E-04	2.62E-04	1.70E-01	0.00E+00	4.25E-01
R6	1.91E-04	3.26E-05	6.84E-02	0.00E+00	1.71E-01
R7	1.86E-04	6.00E-05	1.29E-01	0.00E+00	3.22E-01
R8	2.09E-04	7.15E-05	1.37E-01	0.00E+00	3.42E-01
G1	3.02E-04	9.81E-05	1.30E-01	0.00E+00	3.25E-01
G2	3.09E-04	8.96E-05	1.16E-01	0.00E+00	2.90E-01
G3	3.02E-04	9.69E-05	1.28E-01	0.00E+00	3.21E-01

Tab. C.54 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative al LF

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.22), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.55).

Punto di misura	$\eta(E_{5-80})_{eff}$	$\eta(E_{5-80})_{ott}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ min}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ max}$
R1	2.14E-03	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R2	9.77E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R3	6.92E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R4	4.47E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R5	6.17E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R6	1.91E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R7	1.86E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R8	2.09E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
G1	3.02E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
G2	3.09E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00
G3	3.02E-04	0.4	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.55 – Variabili ridotte della E_{5-80}

Si è proceduto, infine, al calcolo dei Vettori qualità secondo la (C.23) e del ΔV secondo la (C.1), i cui valori sono riportati in Tab. C.56. Come già esplicitato nel Capitolo 6, il $V_{ott\ min} = 0$ e il $V_{ott\ max} = 2$ in ogni caso.

Punto di misura	V_{eff}	V_{ott}	ΔV
R1	1.61	1.11	0.50
R2	1.46	1.10	0.37
R3	1.45	1.04	0.40
R4	1.41	0.94	0.47
R5	1.42	0.99	0.43
R6	1.40	0.83	0.56
R7	1.40	0.85	0.54
R8	1.40	0.85	0.55
G1	1.39	0.82	0.57
G2	1.39	0.85	0.54
G3	1.39	0.86	0.54

Tab. C.56 – Variabili dei Vettori qualità e del ΔV

C.5.2. Applicazione della teoria per la configurazione teatro

Per la valutazione del Vettore qualità sono stati considerati i dati ottenuti dalle simulazioni nei 7 punti di ricezione considerati, di cui 8 in platea e 3 in galleria. I ricettori sono gli stessi della configurazione per sala da concerto, decurtati delle 4 sedute che devono essere smontate per consentire l'allungamento del palco. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.78 del Capitolo 9. E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 99 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 62 dB. In Tab. C.57 vengono riportati i dati fondamentali utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m ³)	5605
Potenza sonora della sorgente (dB)	99
Livello di pressione a 20 m (dB)	62
Superficie complessiva della sala (m ²)	2139.5

Tab. C.57 – Nuovo Teatro di Ateneo, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. C.58, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	<i>d</i> (m)	<i>A_{eq}</i>	<i>L_p</i> (dBA)	<i>ITDG</i> (ms)	<i>EDT</i> (s)	<i>LF</i>
R4	7.07	1.50	71.1	12.51	0.97	0.298
R5	5.39	1.40	72.3	8.25	1.09	0.280
R6	14.11	1.83	64.6	18.19	1.21	0.159
R7	14.22	1.06	65.2	9.78	1.05	0.178
R8	13.1	1.10	65.5	8.93	1.13	0.174
G1	14.99	1.45	67.6	4.71	1.39	0.172
G2	12.08	1.51	68.5	6.83	1.18	0.153
G3	12.2	1.53	68.2	6.77	1.15	0.166

Tab. C.58 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. C.59 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.3	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	0.67	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	1.80	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	50	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. C.59 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima) di ogni parametro oggettivo scelto.

Per il livello di pressione, si è dovuto preliminarmente calcolare il valore dei livelli di pressione ottimale, ottimale minimo e massimo nei punti di ricezione (Tab. C.60), secondo la (C.3). Per far questo, dalla (C.4) si sono dovuti calcolare i relativi valori del livello di potenza sonora:

- $L_{W,ott} = 114$ dB(A);
- $L_{W,ott min} = 89$ dB(A);
- $L_{W,ott max} = 129$ dB(A).

Punto di misura	$L_{p,ott}$	$L_{p,ott min}$	$L_{p,ott max}$
R4	101.1	66.1	115.0
R5	101.8	66.8	116.6
R6	93.0	58.0	108.0
R7	93.2	58.2	108.1
R8	94.1	59.1	108.9
G1	94.4	59.4	108.4
G2	96.6	61.6	110.4
G3	96.5	61.5	110.3

Tab. C.60 – Valori limite del campo di qualità acustica del livello di pressione

Le relative grandezze fisiche oggettive, ricavate dalla (C.5), sono riportate in Tab. C.61.

Punto di misura	P_{eff}	P_{ott}	$P_{ott min}$	$P_{ott max}$
R4	7.18E-02	2.28E+00	4.05E-02	1.13E+01
R5	8.24E-02	2.47E+00	4.39E-02	1.35E+01
R6	3.40E-02	8.98E-01	1.60E-02	5.05E+00
R7	3.64E-02	9.17E-01	1.63E-02	5.08E+00

R8	3.77E-02	1.01E+00	1.80E-02	5.57E+00
G1	4.80E-02	1.05E+00	1.87E-02	5.25E+00
G2	5.32E-02	1.34E+00	2.39E-02	6.61E+00
G3	5.14E-02	1.34E+00	2.39E-02	6.57E+00

Tab. C.61 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai livelli di pressione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.62).

Punto di misura	$\eta(L_p)_{eff}$	$\eta(L_p)_{ott}$	$\eta(L_p)_{ott\ min}$	$\eta(L_p)_{ott\ max}$
R4	2.79E-03	1.13E-01	0.00E+00	2.04E+00
R5	2.85E-03	1.58E-01	0.00E+00	2.21E+00
R6	3.58E-03	7.77E-02	0.00E+00	7.96E-01
R7	3.96E-03	1.94E-01	0.00E+00	8.14E-01
R8	3.54E-03	7.16E-02	0.00E+00	9.01E-01
G1	5.60E-03	6.12E-02	0.00E+00	9.33E-01
G2	4.45E-03	7.51E-02	0.00E+00	1.20E+00
G3	4.21E-03	1.04E-01	0.00E+00	1.20E+00

Tab. C.62 – Variabili ridotte della pressione sonora

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si sono innanzi determinanti i valori ottimali, secondo le (C.9) e (C.10), successivamente si è calcolata l'energia del decadimento secondo la (C.11), avendo precedentemente determinato i diversi valori delle unità assorbenti secondo la (C.8). I valori ottenuti sono riportati in Tab. C.63. Le unità assorbenti, nei casi considerati, valgono:

- $A_{eff} = 790.1\ m^2$;
- $A_{ott} = 689.8\ m^2$;
- $A_{ott\ min} = 498.2\ m^2$;
- $A_{ott\ max} = 1338.5\ m^2$.

Le unità assorbenti effettive sono state calcolate considerando un tempo di riverberazione medio tra quelli misurati.

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.64).

Punto di misura	$E_{dec,eff}$	$E_{dec,ott}$	$E_{dec,ott\ min}$	$E_{dec,ott\ max}$
R4	7.06E-02	9.46E-02	1.30E-01	4.88E-02
R5	7.94E-02			
R6	8.81E-02			
R7	7.64E-02			
R8	8.23E-02			
G1	1.01E-01			
G2	8.59E-02			
G3	8.37E-02			

Tab. C.63 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai tempi di riverberazione

Punto di misura	$\eta(E_{dec})_{eff}$	$\eta(E_{dec})_{ott}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ min}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ max}$
R4	7.32E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
R5	6.25E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
R6	5.17E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
R7	6.60E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
R8	5.89E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
G1	3.57E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
G2	5.44E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00
G3	5.71E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.64 – Variabili ridotte dell'energia del decadimento

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva legata all'*ITDG* è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le riflesse. Preliminarmente è stato necessario calcolare i valori dei coefficienti di assorbimento, conoscendo i diversi tempi di riverberazione e le relative unità assorbenti:

- $a_{eff} = 0.68$;
- $a_{ott} = 0.32$;
- $a_{ott\ min} = 0.23$;
- $a_{ott\ max} = 0.62$.

In base alle formule dalla (C.13) alla (C.17) sono stati calcolati, per le diverse condizioni analizzate: l'intensità dell'onda diretta, il Δr tra il percorso del suono diretto e riflesso, il percorso di prima riflessione e l'intensità sonora riflessa (Tab. C.65).

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,eff}$
R4	1.58E-01	4.30E+00	1.14E+01	1.96E-02
R5	2.72E-01	2.83E+00	8.22E+00	3.74E-02
R6	3.96E-02	6.25E+00	2.04E+01	6.11E-03
R7	3.90E-02	3.36E+00	1.76E+01	8.19E-03
R8	4.60E-02	3.07E+00	1.62E+01	9.68E-03
G1	3.51E-02	1.62E+00	1.66E+01	9.18E-03
G2	5.41E-02	2.35E+00	1.44E+01	1.22E-02
G3	5.30E-02	2.32E+00	1.45E+01	1.20E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott}$
R4	1.58E-01	1.03E+01	1.74E+01	1.77E-02
R5	2.72E-01		1.57E+01	2.17E-02
R6	3.96E-02		2.44E+01	8.97E-03
R7	3.90E-02		2.45E+01	8.89E-03
R8	4.60E-02		2.34E+01	9.76E-03
G1	3.51E-02		2.53E+01	8.36E-03
G2	5.41E-02		2.24E+01	1.07E-02
G3	5.30E-02		2.25E+01	1.06E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott min}$
R4	1.58E-01	0.00E+00	7.07E+00	5.91E-02
R5	2.72E-01		5.39E+00	1.02E-01
R6	3.96E-02		1.41E+01	1.48E-02
R7	3.90E-02		1.42E+01	1.46E-02
R8	4.60E-02		1.31E+01	1.72E-02
G1	3.51E-02		1.50E+01	1.31E-02
G2	5.41E-02		1.21E+01	2.02E-02
G3	5.30E-02		1.22E+01	1.98E-02
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott max}$
R4	1.58E-01	3.43E+01	4.14E+01	3.53E-03
R5	2.72E-01		3.97E+01	3.83E-03
R6	3.96E-02		4.85E+01	2.58E-03
R7	3.90E-02		4.86E+01	2.57E-03
R8	4.60E-02		4.74E+01	2.69E-03
G1	3.51E-02		4.93E+01	2.49E-03
G2	5.41E-02		4.64E+01	2.81E-03
G3	5.30E-02		4.65E+01	2.79E-03

Tab. C.65 – Calcoli intermedi per determinare la differenza di energia tra onde

A questo punto si è potuta calcolare la differenza di energia come descritto dalla (C.18); i valori ottenuti sono riportati in Tab. C.66.

Punto di misura	ΔE_{eff}	ΔE_{ott}	$\Delta E_{ott\ min}$	$\Delta E_{ott\ max}$
R4	1.38E-01	1.40E-01	9.87E-02	1.54E-01
R5	2.34E-01	2.50E-01	1.70E-01	2.68E-01
R6	3.35E-02	3.07E-02	2.48E-02	3.70E-02
R7	3.08E-02	3.01E-02	2.44E-02	3.64E-02
R8	3.63E-02	3.62E-02	2.88E-02	4.33E-02
G1	2.59E-02	2.68E-02	2.20E-02	3.26E-02
G2	4.19E-02	4.34E-02	3.38E-02	5.13E-02
G3	4.10E-02	4.24E-02	3.32E-02	5.02E-02

Tab. C.66 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative all'ITDG

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.19), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.67).

Punto di misura	$\eta(\Delta E)_{eff}$	$\eta(\Delta E)_{ott}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ min}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ max}$
R4	7.11E-01	7.45E-01	0.00E+00	1.00E+00
R5	6.57E-01	8.17E-01	0.00E+00	1.00E+00
R6	7.12E-01	4.79E-01	0.00E+00	1.00E+00
R7	5.33E-01	4.75E-01	0.00E+00	1.00E+00
R8	5.18E-01	5.13E-01	0.00E+00	1.00E+00
G1	3.72E-01	4.49E-01	0.00E+00	1.00E+00
G2	4.63E-01	5.49E-01	0.00E+00	1.00E+00
G3	4.60E-01	5.45E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.67 – Variabili ridotte della differenza di energia

Infine per il Lateral Fraction, si è scelta l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms come grandezza oggettiva stimolante, calcolata secondo la (C.21), in cui l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms è un dato ottenuto dalle simulazione con il software Odeon (Tab. C.68).

Punto di misura	E_{0-80}	$E_{5-80\ eff}$	$E_{5-80\ ott}$	$E_{5-80\ ott\ min}$	$E_{5-80\ ott\ max}$
R4	1.82E-05	5.42E-06	1.19E-01	0.00E+00	2.98E-01
R5	2.29E-05	6.41E-06	1.12E-01	0.00E+00	2.80E-01
R6	3.39E-06	5.39E-07	6.36E-02	0.00E+00	1.59E-01
R7	4.37E-06	7.77E-07	7.12E-02	0.00E+00	1.78E-01
R8	4.57E-06	7.95E-07	6.96E-02	0.00E+00	1.74E-01
G1	6.31E-06	1.09E-06	6.88E-02	0.00E+00	1.72E-01
G2	9.33E-06	1.43E-06	6.12E-02	0.00E+00	1.53E-01
G3	8.71E-06	1.45E-06	6.64E-02	0.00E+00	1.66E-01

Tab. C.68 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative al LF

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.22), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.69).

Punto di misura	$\eta(E_{5-80})_{eff}$	$\eta(E_{5-80})_{ott}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ min}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ max}$
R4	1.81E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R5	2.29E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R6	3.38E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R7	4.36E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
R8	4.57E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
G1	6.30E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
G2	9.33E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
G3	8.70E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.69 – Variabili ridotte della E_{5-80}

Si è proceduto, infine, al calcolo dei Vettori qualità secondo la (C.23) e del ΔV secondo la (C.1), i cui valori sono riportati in Tab. C.70. Come già esplicitato nel Capitolo 6, il $V_{ott\ min} = 0$ e il $V_{ott\ max} = 2$ in ogni caso.

Punto di misura	V_{eff}	V_{ott}	ΔV
R4	1.02	2.25	-1.23
R5	0.91	2.43	-1.52
R6	0.88	1.10	-0.22
R7	0.85	1.11	-0.26
R8	0.78	1.19	-0.41

G1	0.52	1.19	-0.68
G2	0.71	1.44	-0.73
G3	0.73	1.44	-0.71

Tab. C.70 – Variabili dei Vettori qualità e del ΔV

C.6. Teatro dell'Opera di Roma

Anche in questo caso per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati considerati sia i dati ottenuti dalle misurazioni in platea e sui palchi del primo ordine nei 12 punti di ricezione considerati, sia i dati ottenuti dalle simulazioni per altri 2 punti, posizionati sui palchi di ordine superiore al primo. Per la posizione dei punti di ricezione vedere la Fig. 9.92 del Capitolo 9.

E' stato fissato un livello di potenza sonora della sorgente pari a 100 dB, a cui corrisponde un livello di riferimento a 20 m dalla sorgente di 63 dB.

In Tab. C.71 vengono riportati i dati utilizzati per il calcolo dell'indice.

Volume della sala (m^3)	25200
Potenza sonora della sorgente (dB)	100
Livello di pressione a 20 m (dB)	63
Superficie complessiva della sala (m^2))	17819.5

Tab. C.71 – Teatro dell'Opera, dati fondamentali per l'applicazione della teoria

La Tab. C.72, invece, riporta, per ciascun punto di ricezione considerato, tutti i dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica.

Punto misura	d (m)	A_{eq}	L_p (dBA)	ITDG (ms)	EDT (s)	LF
1	10.19	3.35	79.6	27.03	1.39	0.112
2	13.92	3.27	76.9	66.16	2.00	0.054
3	17.68	2.11	76.9	2.00	1.78	0.149
4	17.53	1.70	76.9	8.88	1.55	0.284
5	23.3	3.98	76.5	3.33	1.86	0.198

6	19.46	3.20	75.8	28.42	1.75	0.239
7	21.23	3.02	75.8	25.27	1.49	0.354
8	25.6	3.67	76.2	18.52	1.27	0.429
9	10.19	2.75	79.9	26.83	1.24	0.231
10	13.92	2.60	77.2	65.71	1.83	0.064
11	19.15	2.51	68.7	38.90	1.65	0.221
12	19.3	3.55	75.2	38.20	1.53	0.182
13	25.22	2.43	66.6	29.69	2.29	0.285
14	28.65	2.57	70.7	22.14	1.45	0.118

Tab. C.72 – Dati necessari per il corretto calcolo dell'indice di qualità acustica per i punti di ricezione considerati

In Tab. C.73 sono inoltre riportati per ciascun parametro, i valori ottimali considerati e i limiti dell'intervallo di qualità analizzato.

EDT_{ott} (s)	1.8	$ITDG_{ott}$ (ms)	30	Lp_{ott} (dBA)	75.0	LF_{ott}	0.4
$EDT_{ott,min}$ (s)	1.12	$ITDG_{ott,min}$ (ms)	0	$Lp_{ott,min}$ (dBA)	55.0	$LF_{ott,min}$	0
$EDT_{ott,max}$ (s)	2.30	$ITDG_{ott,max}$ (ms)	80	$Lp_{ott,max}$ (dBA)	95.0	$LF_{ott,max}$	1

Tab. C.73 – Valori ottimali e limiti di qualità dei parametri considerati

Da questi si è risaliti, come detto, alle grandezze fisiche oggettive (effettiva, ottimale, ottimale minima e massima) di ogni parametro oggettivo scelto.

Per il livello di pressione, si è dovuto preliminarmente calcolare il valore dei livelli di pressione ottimale, ottimale minimo e massimo nei punti di ricezione (Tab. C.74), secondo la (C.3). Per far questo, dalla (C.4) si sono dovuti calcolare i relativi valori del livello di potenza sonora:

- $L_{W,ott} = 95$ dB(A);
- $L_{W,ott,min} = 89$ dB(A);
- $L_{W,ott,max} = 129$ dB(A).

Punto di misura	$L_{p,ott}$	$L_{p,ott,min}$	$L_{p,ott,max}$
1	81.2	75.2	115.2
2	78.0	72.0	112.0

3	74.2	68.2	108.2
4	75.0	69.0	109.0
5	72.3	66.3	106.3
6	75.5	69.5	109.5
7	71.4	65.4	105.4
8	70.9	64.9	104.9
9	79.9	73.9	113.9
10	76.8	70.8	110.8
11	73.8	67.8	107.8
12	74.3	68.3	108.3
13	71.2	65.2	105.2
14	70.5	64.5	104.5

Tab. C.74 – Valori limite del campo di qualità acustica del livello di pressione

Le relative grandezze fisiche oggettive, ricavate dalla (C.5), sono riportate in Tab. C.75.

Punto di misura	p_{eff}	p_{ott}	$p_{ott\ min}$	$p_{ott\ max}$
1	1.91E-01	2.31E-01	1.16E-01	1.16E+01
2	1.40E-01	1.60E-01	8.00E-02	8.00E+00
3	1.40E-01	1.02E-01	5.13E-02	5.13E+00
4	1.40E-01	1.13E-01	5.66E-02	5.66E+00
5	1.34E-01	8.22E-02	4.12E-02	4.12E+00
6	1.23E-01	1.18E-01	5.94E-02	5.94E+00
7	1.23E-01	7.40E-02	3.71E-02	3.71E+00
8	1.29E-01	7.01E-02	3.51E-02	3.51E+00
9	1.98E-01	1.98E-01	9.91E-02	9.91E+00
10	1.45E-01	1.39E-01	6.95E-02	6.95E+00
11	5.45E-02	9.83E-02	4.93E-02	4.93E+00
12	1.15E-01	1.03E-01	5.19E-02	5.19E+00
13	4.28E-02	7.29E-02	3.65E-02	3.65E+00
14	6.86E-02	6.68E-02	3.35E-02	3.35E+00

Tab. C.75 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai livelli di pressione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.76).

Punto di misura	$\eta(L_p)_{eff}$	$\eta(L_p)_{ott}$	$\eta(L_p)_{ott\ min}$	$\eta(L_p)_{ott\ max}$
1	6.60E-03	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
2	7.57E-03	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
3	1.75E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
4	1.49E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
5	2.27E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
6	1.09E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
7	2.35E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
8	2.70E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
9	1.01E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
10	1.10E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
11	1.06E-03	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
12	1.23E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
13	1.73E-03	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00
14	1.06E-02	1.01E-02	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.76 – Variabili ridotte della pressione sonora

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione, si sono innanzi determinanti i valori ottimali, secondo le (C.9) e (C.10), successivamente si è calcolata l'energia del decadimento secondo la (C.11), avendo precedentemente determinato i diversi valori delle unità assorbenti secondo la (C.8). I valori ottenuti sono riportati in Tab. C.77. Le unità assorbenti, nei casi considerati, valgono:

- $A_{eff} = 2515.1\ m^2$;
- $A_{ott} = 2240\ m^2$;
- $A_{ott\ min} = 17.53\ m^2$;
- $A_{ott\ max} = 3600\ m^2$.

Le unità assorbenti effettive sono state calcolate considerando un tempo di riverberazione medio tra quelli misurati.

Punto di misura	$E_{dec,eff}$	$E_{dec,ott}$	$E_{dec,ott\ min}$	$E_{dec,ott\ max}$
1	1.01E-01	1.31E-01	1.67E-01	8.15E-02
2	1.01E-01			
3	1.01E-01			
4	1.01E-01			
5	1.01E-01			
6	1.01E-01			
7	1.01E-01			

8	1.01E-01			
9	1.01E-01			
10	1.01E-01			
11	1.01E-01			
12	1.01E-01			
13	1.01E-01			
14	1.01E-01			

Tab. C.77 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative ai tempi di riverberazione

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.6), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.78).

Punto di misura	$\eta(E_{dec})_{eff}$	$\eta(E_{dec})_{ott}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ min}$	$\eta(E_{dec})_{ott\ max}$
1	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
2	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
3	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
4	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
5	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
6	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
7	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
8	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
9	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
10	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
11	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
12	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
13	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00
14	7.71E-01	4.22E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.78 – Variabili ridotte dell'energia del decadimento

La grandezza fisica oggettiva che genera la sensazione soggettiva legata all'*ITDG* è la differenza di intensità tra l'onda diretta e le riflesse. Preliminarmente è stato necessario calcolare i valori dei coefficienti di assorbimento, conoscendo i diversi tempi di riverberazione e le relative unità assorbenti:

- $a_{eff} = 0.13$;
- $a_{ott} = 0.12$;
- $a_{ott\ min} = 0.10$;

- $a_{ott\ max} = 0.21$.

In base alle formule dalla (C.13) alla (C.17) sono stati calcolati, per le diverse condizioni analizzate: l'intensità dell'onda diretta, il Δr tra il percorso del suono diretto e riflesso, il percorso di prima riflessione e l'intensità sonora riflessa (Tab. C.79).

Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,eff}$
1	7.67E-02	9.28E+00	1.95E+01	1.82E-02
2	4.11E-02	2.27E+01	3.66E+01	5.14E-03
3	2.55E-02	6.87E-01	1.84E+01	2.04E-02
4	2.59E-02	3.05E+00	2.06E+01	1.63E-02
5	1.47E-02	1.14E+00	2.44E+01	1.15E-02
6	2.10E-02	9.76E+00	2.92E+01	8.08E-03
7	1.77E-02	8.68E+00	2.99E+01	7.71E-03
8	1.21E-02	6.36E+00	3.20E+01	6.75E-03
9	7.67E-02	9.21E+00	1.94E+01	1.83E-02
10	4.11E-02	2.26E+01	3.65E+01	5.18E-03
11	2.17E-02	1.34E+01	3.25E+01	6.52E-03
12	2.14E-02	1.31E+01	3.24E+01	6.56E-03
13	1.25E-02	1.02E+01	3.54E+01	5.50E-03
14	9.70E-03	7.60E+00	3.63E+01	5.25E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott}$
1	7.67E-02	1.03E+01	2.05E+01	1.66E-02
2	4.11E-02		2.42E+01	1.19E-02
3	2.55E-02		2.80E+01	8.89E-03
4	2.59E-02		2.78E+01	8.99E-03
5	1.47E-02		3.36E+01	6.17E-03
6	2.10E-02		2.98E+01	7.86E-03
7	1.77E-02		3.15E+01	7.00E-03
8	1.21E-02		3.59E+01	5.40E-03
9	7.67E-02		2.05E+01	1.66E-02
10	4.11E-02		2.42E+01	1.19E-02
11	2.17E-02		2.95E+01	8.02E-03
12	2.14E-02		2.96E+01	7.94E-03
13	1.25E-02		3.55E+01	5.52E-03
14	9.70E-03		3.90E+01	4.59E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott\ min}$
1	7.67E-02	0.00E+00	1.02E+01	6.12E-02
2	4.11E-02		1.39E+01	3.28E-02
3	2.55E-02		1.77E+01	2.03E-02
4	2.59E-02		1.75E+01	2.07E-02
5	1.47E-02		2.33E+01	1.17E-02
6	2.10E-02		1.95E+01	1.68E-02
7	1.77E-02		2.12E+01	1.41E-02

8	1.21E-02		2.56E+01	9.69E-03
9	7.67E-02		1.02E+01	6.12E-02
10	4.11E-02		1.39E+01	3.28E-02
11	2.17E-02		1.92E+01	1.73E-02
12	2.14E-02		1.93E+01	1.71E-02
13	1.25E-02		2.52E+01	9.99E-03
14	9.70E-03		2.87E+01	7.74E-03
Punto di misura	I_d	Δr	d	$I_{r,ott\ max}$
1	7.67E-02	3.43E+01	4.45E+01	3.62E-03
2	4.11E-02		4.83E+01	3.08E-03
3	2.55E-02		5.20E+01	2.65E-03
4	2.59E-02		5.19E+01	2.67E-03
5	1.47E-02		5.76E+01	2.16E-03
6	2.10E-02		5.38E+01	2.48E-03
7	1.77E-02		5.56E+01	2.32E-03
8	1.21E-02		5.99E+01	2.00E-03
9	7.67E-02		4.45E+01	3.62E-03
10	4.11E-02		4.83E+01	3.08E-03
11	2.17E-02		5.35E+01	2.51E-03
12	2.14E-02		5.36E+01	2.49E-03
13	1.25E-02		5.96E+01	2.02E-03
14	9.70E-03		6.30E+01	1.81E-03

Tab. C.79 – Calcoli intermedi per determinare la differenza di energia tra onde

A questo punto si è potuta calcolare la differenza di energia come descritto dalla (C.18); i valori ottenuti sono riportati in Tab. C.80.

Punto di misura	ΔE_{eff}	ΔE_{ott}	$\Delta E_{ott\ min}$	$\Delta E_{ott\ max}$
1	5.85E-02	6.01E-02	1.55E-02	7.31E-02
2	3.60E-02	2.92E-02	8.30E-03	3.80E-02
3	5.03E-03	1.66E-02	5.15E-03	2.28E-02
4	9.63E-03	1.69E-02	5.23E-03	2.32E-02
5	3.13E-03	8.50E-03	2.96E-03	1.25E-02
6	1.29E-02	1.32E-02	4.25E-03	1.85E-02
7	9.96E-03	1.07E-02	3.57E-03	1.53E-02
8	5.40E-03	6.75E-03	2.45E-03	1.02E-02
9	5.84E-02	6.01E-02	1.55E-02	7.31E-02
10	3.59E-02	2.92E-02	8.30E-03	3.80E-02
11	1.52E-02	1.37E-02	4.39E-03	1.92E-02
12	1.48E-02	1.34E-02	4.32E-03	1.89E-02

13	7.02E-03	7.00E-03	2.53E-03	1.05E-02
14	4.45E-03	5.11E-03	1.96E-03	7.89E-03

Tab. C.80 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative all'ITDG

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.19), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.81).

Punto di misura	$\eta(\Delta E)_{eff}$	$\eta(\Delta E)_{ott}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ min}$	$\eta(\Delta E)_{ott\ max}$
1	7.47E-01	7.75E-01	0.00E+00	1.00E+00
2	9.31E-01	7.04E-01	0.00E+00	1.00E+00
3	-6.44E-03	6.47E-01	0.00E+00	1.00E+00
4	2.44E-01	6.49E-01	0.00E+00	1.00E+00
5	1.71E-02	5.80E-01	0.00E+00	1.00E+00
6	6.09E-01	6.24E-01	0.00E+00	1.00E+00
7	5.43E-01	6.03E-01	0.00E+00	1.00E+00
8	3.83E-01	5.58E-01	0.00E+00	1.00E+00
9	7.45E-01	7.75E-01	0.00E+00	1.00E+00
10	9.29E-01	7.04E-01	0.00E+00	1.00E+00
11	7.29E-01	6.28E-01	0.00E+00	1.00E+00
12	7.21E-01	6.26E-01	0.00E+00	1.00E+00
13	5.64E-01	5.61E-01	0.00E+00	1.00E+00
14	4.21E-01	5.32E-01	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.81 – Variabili ridotte della differenza di energia

Infine per il Lateral Fraction, si è scelta l'energia proveniente lateralmente rispetto all'ascoltatore tra 5 e 80 ms come grandezza oggettiva stimolante, calcolata secondo la (C.21), in cui l'energia omnidirezionale proveniente nei primi 80 ms è un dato ottenuto dalle simulazione con il software Odeon (Tab. C.82).

Punto di misura	E_{0-80}	$E_{5-80\ eff}$	$E_{5-80\ ott}$	$E_{5-80\ ott\ min}$	$E_{5-80\ ott\ max}$
1	7.94E-05	8.90E-06	4.48E-02	0.00E+00	1.12E-01
2	3.72E-05	2.01E-06	2.16E-02	0.00E+00	5.40E-02
3	3.80E-05	5.66E-06	5.96E-02	0.00E+00	1.49E-01
4	3.63E-05	1.03E-05	1.14E-01	0.00E+00	2.84E-01
5	3.72E-05	7.36E-06	7.92E-02	0.00E+00	1.98E-01

6	3.02E-05	7.22E-06	9.56E-02	0.00E+00	2.39E-01
7	3.24E-05	1.15E-05	1.42E-01	0.00E+00	3.54E-01
8	3.02E-05	1.30E-05	1.72E-01	0.00E+00	4.29E-01
9	7.41E-05	1.71E-05	9.24E-02	0.00E+00	2.31E-01
10	3.89E-05	2.49E-06	2.56E-02	0.00E+00	6.40E-02
11	5.01E-06	1.11E-06	8.84E-02	0.00E+00	2.21E-01
12	2.45E-05	4.47E-06	7.28E-02	0.00E+00	1.82E-01
13	3.24E-06	9.22E-07	1.14E-01	0.00E+00	2.85E-01
14	9.77E-06	1.15E-06	4.72E-02	0.00E+00	1.18E-01

Tab. C.82 – Valori delle grandezze fisiche oggettive relative al LF

Si sono poi calcolate le variabili ridotte di ogni parametro secondo la (C.22), che rappresentano le coordinate di un punto nello spazio a 4 dimensioni (Tab. C.83).

Punto di misura	$\eta(E_{5-80})_{eff}$	$\eta(E_{5-80})_{ott}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ min}$	$\eta(E_{5-80})_{ott\ max}$
1	7.94E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
2	3.72E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
3	3.80E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
4	3.63E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
5	3.72E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
6	3.02E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
7	3.24E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
8	3.02E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
9	7.41E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
10	3.89E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
11	5.01E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
12	2.45E-05	0.4	0.00E+00	1.00E+00
13	3.24E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00
14	9.77E-06	0.4	0.00E+00	1.00E+00

Tab. C.83 – Variabili ridotte della E_{5-80}

Si è proceduto, in ultima analisi, al calcolo dei Vettori qualità secondo la (C.23) e del ΔV secondo la (C.1), i cui valori sono riportati in Tab. C.84. Come già esplicitato nel Capitolo 6, il $V_{ott\ min} = 0$ e il $V_{ott\ max} = 2$ in ogni caso.

Punto di misura	V_{eff}	V_{ott}	ΔV
1	1.07	0.97	0.10
2	1.21	0.91	0.29
3	0.77	0.87	-0.10
4	0.81	0.87	-0.06
5	0.77	0.82	-0.05
6	0.98	0.85	0.13
7	0.94	0.84	0.11
8	0.86	0.81	0.05
9	1.07	0.97	0.10
10	1.21	0.91	0.29
11	1.06	0.86	0.20
12	1.06	0.85	0.20
13	0.95	0.81	0.15
14	0.88	0.79	0.09

Tab. C.84 – Variabili dei Vettori qualità e del ΔV

BIBLIOGRAFIA

- Ando Y., “Calculation of subjective preference at each seat of a concert hall”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 74 (3), 1983, pp. 873 – 887
- Ando Y., “Concert Hall Acoustics Based on Subjective Preference Theory, in *Handbook of Acoustics*”, Ed. Thomas Rossing, Springer-Verlag, New York, 2007
- Ando Y., “Concert Hall Acoustics”, Springer-Verlag, Berlin, 1985
- Ando Y., “Correlation factors describing primary and spatial sensations of sound fields”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 258, 2002, pp. 405 – 417
- Ando Y., “Evoked potentials relating to the subjective preference of sound fields”, *Acustica*, vol. 76, 1992, pp. 292 – 296
- Ando Y., “Reviews on the Temporal Design for Three Stages of Human Life. Most unlikely “time is money,” but “time is life””, *J. Temporal Des. Arch. Environ*, vol. 6(1), 2006
- Ando Y., “Theory of Auditory Temporal and Spatial Primary Sensations”, *J. Temporal Des. Arch. Environ.*, vol. 8(1), 2008
- Ando Y., Kurihara Y., “Nonlinear response in evaluating the subjective diffuseness of sound field”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, 1986, pp. 833 – 836
- Ando Y., Sakai H., Sato S., “Formulae describing subjective attributes for sound fields based on a model of the auditory-brain system”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 232(1), 2000, pp.101 – 127
- Ando Y., Sato S., Sakai H., “Fundamental subjective attributes of sound fields based on the model of auditory-brain system”, *Computational Acoustics in Architecture*, 1999
- Ando Y., Yamamoto K., Nagamatsu H., Kang S.H., “Auditory brainstem response (ABR) in relation to the horizontal angle of sound incidence”, *Acoustic Letters*, vol. 15, 1991, pp. 57 – 64

- Astolfi A., Giovannini M., Barbato G., Filippi M., “The interpretation of objective measurements on the stage by means of the correlation with subjective data”, Proc. 19th ICA, Madrid, 2007
- Barron M., “Auditorium acoustics and architectural design”, E & FN Spon - Chapman & Hall, London, 1998
- Barron M., “Interpretation of Early Decay Times in concert auditoria”, *Acustica*, vol. 81, 1995, pp. 320-331
- Barron M., “Late lateral energy fractions and the envelopment question in concert halls”, *Applied Acoustics*, vol. 62, 2001, pp. 185 – 202
- Barron M., “Measured early lateral energy fractions in concert halls and opera houses”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 232(1), 2000, pp. 79 – 100
- Barron M., “Questionnaires for subjective assessment of concert spaces”, 15th ICA, Trondheim, Norway, 1995
- Barron M., “Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results”, *Acoustical Science and Technology*, vol. 26, 2005, pp.162-169
- Barron M., Dammerud J. J., “Early subjective and objective studies of concert hall stage conditions for orchestral performance”, Proc. 19th ICA, Madrid, 2007
- Barron M., Dammerud J. J., “Stage acoustics in concert halls - early investigations”, 6th International Conference on Auditorium Acoustics, Proc. of Institute of Acoustics 28 Part 2, 1-12, 2006
- Barron M., Marshall A.H., “Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of physical measure”, *J. Sound Vibration*, vol. 77, 1981
- Beranek L. L., “Music, acoustics and architecture”, Ed. John Wiley, New York, 1962
- Beranek L.L., “Concert and Opera Halls: how they sound”, Acoustical Society of America, New York, 1996

- Berkout A. J., de Vries D., Boone M.M, “A new method to acquire impulse responses in concert halls”, *Journal of Acoustic Society of America*, vol. 68, 1980, p. 179
- Bizzotto M., “L'acustica dell'Auditorium Cesare Pollini - Descrizione e misurazioni acustiche”, Tesi di diploma accademico di I livello in Tecnico di sala di registrazione, Conservatorio C. Pollini, a.a. 2009-2010
- Blodgett H. C., Wilbanks W. A., Jeffress L. A., “Effect of large interaural time differences upon the judgement of sidedness”, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 28, 1956, pp. 639 – 643
- Bonsi D., “Indicatori oggettivi dell'acustica architettonica”, Laboratorio di Acustica Musicale e Architettonica FSSG-CNR, Isola di San Giorgio Maggiore (VE), Fondazione scuola di San Giorgio
- Boulet M., Moissinac C., Soullignac F., “Sale da Concerto, Tecniche Nuove”, Milano, 1992
- Butera L., “Architettura Acustica”, Görlich, 1975
- Cammarata G., “Acustica delle sale”, Istituto di Fisica Tecnica Facoltà di Ingegneria dell'Università di Catania, 1999
- Christensen C.L., “Odeon Room Acoustic Program, Version 12.0; User Manual, Industrial, Auditorium and Combined Editions”, ODEON A/S, Lyngby, Denmark, 2012
- Chu W.T., “Response and Reverberation – Decay Measurements Made By Using a Periodic Pseudorandom Sequence”, *Applied Acoustics*, vol. 29, 1990, pp. 193 - 205
- Cingolani S., Spagnolo R., “Acustica musicale e architettonica”, UTET, Torino, 2005
- Cocchi A., Farina A., “Il rilevamento sperimentale delle caratteristiche acustiche dei teatri e delle sale da spettacolo”, Proc. AIA Conference, Milano 1988
- Cocchi A., Farina A., “Reliability of scale-model researchers: a concert hall case”, *Applied Acoustic*, vol. 30, 1990, pp. 1 – 13

- Cocchi A., Farina A., Fausti P., Garai M., Semprini G., “New possibilities in room acoustics measurements: real time analyzer, DAT, computer: a comparative approach”, Proc. Of FASE congress, Zurich 1992
- Cremer L., Müller H.A., Schultz T., "Principles and applications of room acoustics", Applied Sciences Publishers, London, 1982
- David E.E., Guttman N., van Bergeijk W.A., “Binaural interaction of high-frequency complex stimuli”, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 31, 1959, pp. 774 – 782
- Deatherage B. H., “Examination of binaural interaction”, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 39, 1966, pp. 232 -249
- Defrance G., Polack J.-D., “Estimating the mixing time of concert halls using the extensible Fourier Transform”, *Applied Acoustics*, vol. 71, 2010, pp. 777–792
- Everest F.A., “Manuale di acustica applicata”, Hoepli Milano, 1996
- Farina A., “Acoustic quality of theatres: correlations between experimental measures and subjective evaluations”, *Applied Acoustics*, vol. 62, 2001, pp. 889 – 890
- Farina A., “Advancements in impulse response measurements by sine sweeps”, AES Convention Vienna, 2007
- Farina A., “An example of adding spatial impression to recorded music: signal convolution with binaural impulse responses”, Proc. of the Conference "Acoustics and Recovery of Spaces for Music", Ferrara, 1993
- Farina A., “Impulse response measurements”, 23rd Nordic Sound Symposium, Bolkesjø, 2007
- Farina A., “La caratterizzazione delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica”, Ph.D. Thesys, University of Bologna, Italy, 1986
- Farina A., “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique”, 108th AES Convention, Parigi, 2002

- Farina A., Avanzini A., “Registrazione della risposta acustica delle sale da concerto per i posteri”, AES Italia - Workshop 2003, Adria
- Farina A., Righini F., “Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering”, Pre-prints of the 103rd AES Convention, New York, 1997
- Fausti P., Farina A., “Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 232 (1), 2000
- Gade A. C., “Investigation of musicians' room acoustic condition in concert halls, part I”, *Acustica*, vol. 69, 1989
- Galaverna P., “Sviluppo di nuove tecniche numeriche di previsione e di riproduzione acustica del campo sonoro”, Tesi di laurea, Facoltà di Ingegneria, Università di Parma, a.a. 1994-95
- Garai M., Rossi M.C., Tronchin L., “La percezione della qualità acustica dei teatri valutata mediante analisi statistica”, *Rivista Italiana di Acustica*, 1997, pp. 3 – 18
- Genta G., Giovannini M., Astolfi A., Barbato G., “The subjective investigation of acoustic perception of musicians: a proposed method for interpretation of results”, Proc. 19th ICA, Madrid, 2007
- Griesinger D., “Design and Performance of Multichannel Time Variant Reverberation Systems”, Proceedings of the Active 95 conference, Newport Beach CA, 1995, pp. 1203-1212
- Griesinger D., “The Psychoacoustics of Apparent Source Width, Spaciousness and Envelopment in Performance Spaces”, *Acta Acustica*, vol. 83, 1997, pp. 721-731
- Harman H. N., “Modern factor analysis”, University of Chicago press, Chicago, 1968
- Hidaka T., Nishihara N., Beranek L.L., “Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a single method for simulating the occupied state”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, 1992, pp. 1028-1042

- Higini Arau-Puchades, “¿Es el criterio acustico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas?”, *Acústica 2008*, Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra
- Hotehama T., Sato S., Ando Y., “Dissimilarity judgments in relation to temporal and spatial factors for the sound fields in an existing hall”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 258, 2002, pp. 429 – 441
- Iannace G., Ianniello C., Maffei L., Romano R., “Objective measurement of the listening condition in the old Italian opera house Teatro di San Carlo”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 232 (1), 2000, pp. 239-249
- Ianniello C., “The acoustics of the Italian-Style Opera House”, *Proc. 17th International Congress on Acoustics*, Rome, 2001
- ISO 3382-1, *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters- Part 1: Performance rooms*
- ISO 3382-2, *Acoustics- Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*
- ISO 354 (1985), *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*
- Izenour G.C., *Theatre design*. Mc Graw-Hill, New York, 1977
- Knudsen V.O., “Acoustics of music rooms”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 2, 1931, p. 434
- Krokstad A., Strom S., Sorsdal S., “Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique”, *J. Sound Vib.*, vol. 8, 1968, pp.118-125
- Kuttruff H., “*Room Acoustics*”, Spon Press, 2009
- Lehnert H., Blauert J., “Principles of binaural room simulation”, *Appl. Acoust.*, vol. 36, 1992, pp. 259-291
- Marshall A.H., Gottlob D., Alrutz H., “Acoustical conditions preferred for Ensemble”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, 1978, pp. 1437 – 1442

- Marshall A.H., Meyer J., “The directivity and auditory impressions of singers”, *Acustica*, vol. 58, 1985, p. 130
- Massaro D., Warner D., “Dividing attention between auditory and visual perception”, *Perception & Psychophysics*, vol. 21, 1977, pp. 569 – 573
- McSayers B.A., “Acoustic-image lateralization judgement with binaural tones”, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 36, 1964, pp. 923 – 926
- Merimaa J., Pullki V., “Spatial impulse response rendering”, *Proc. Of 7th Int. Conference on Digital Audio Effects*, Naples (Italy), 2004
- Mingsian R., Ganyuan B., “Optimal Design and Synthesis of Reverberators with a Fuzzy User Interface for Spatial Audio”, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 53, n° 9, 2005
- Moncada Lo Giudice G., Santoboni S., “Acustica”, Masson, Milano, 1997
- Naylor G.M., “ODEON – Another Hybrid Room Acoustical Model”, *Appl. Acoust.*, vol. 38, 1993, p.131
- ODEON, www.odeon.dk
- Palef S. R., Nickerson R.B., “Representing auditory space”, *Perception & Psychophysics*, vol. 23, 1978, pp. 445 – 450
- Prodi N., Pompoli R., “Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 232 (1), 2000, pp. 281 – 301
- Rife D.D., Vanderkooy J., “Function Measurements with Maximum – Length – Sequences”, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 37, 1989, pp. 419 – 444
- Sabine W. C., “Collected papers on acoustics No 2.”, Harvard University press, Cambridge, 1929
- San Martin R., Arana M., “Predicted and experimental results of acoustic parameters in the new Symphony Hall in Pamplona, Spain”, *Applied Acoustics*, vol. 67, 2006, pp. 1-14

- Sato S., Kitamura T., and Ando Y., “Loudness of sharply (2068 dB/Octave) filtered noises in relation to the factors extracted from the autocorrelation function”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 250, 2002, pp. 47 – 52
- Schröder M.R., “New Method of Measuring Reverberation Time”, *Journal of Acoustic Society of America*, vol. 37, 1965, pp. 409 - 412
- Schroeder M.R., Gottlob D., Siebrasse K.F., “Comparative study of European Concert halls: correlation of subjective preference with geometrical and acoustic Parameters”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, 1974, p. 1195
- Spagnolo R., “Manuale di acustica applicata”, UTET 2004
- Takatsu A., Sakai H., Ando Y., “Blending Architectural and Acoustical Factors in designing a round event hall”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 110 (1), 2001, pp. 27-27
- Theile G., Plenge G., “Localization of lateral phantom sources”, *Audio Eng. Soc.*, vol. 25, 1977, pp. 196 – 200
- Tobias J. V., “Foundation of modern auditory theory”, Academic Press, New York, Bd. 2, pp. 369 - 462
- Tronchin L., “La progettazione acustica e le applicazioni virtuali e multimediali: l’auditorium del conservatorio di Parma”, Seminario A.I.A., Trani, 2000
- Tronchin L., “Qualità acustica dei teatri: analisi sperimentale e confronto con valutazioni soggettive in alcuni esempi italiani”, *Rivista Italiana di Acustica*, XVIII(3), 1994, pp.51-64
- Watson F. R., “Acoustics of auditoriums”, New York, 1927
- Werner Adelman-Larsen N., Thompson E. R., Gade A. C., “Suitable reverberation times for halls for rock and pop musica”, *Acoustical Society of America*, 2010, pp. 247 – 255
- Zwicker E. , Fastl H., “Psycho-Acoustics”, Springer 1999