Indice

Indice delle figure 3

Indice dei grafici 4

Indice delle tabelle 5

Sommario 7

Introduzione 9

CAPITOLO 1 Il Teatro Sociale di Rovigo 11

1.1.Cenni storici 11

1.2.Il teatro oggi 13

1.3.Caratteristiche del teatro 15

CAPITOLO 2 Nozioni di acustica 17

2.1.Definizioni e grandezze 17

2.1.1.Il suono 17

2.1.1.1.La velocità del suono 18

2.1.1.2.Lunghezza d'onda e frequenza 18

2.1.2.Pressione, intensità e potenza sonora 19

2.1.3.Il decibel 20

2.1.4.Oscillogrammi e spettri sonori 22

CAPITOLO 3 L'acustica delle sale 23

3.1.Il rumore di fondo 23

3.1.1.Le curve Noise Criteria 23

3.2.Parametri fisici dell'acustica ambientale 24

3.2.1.Tempo di riverberazione, Reverberation Time (RT_{60}) 25

3.2.1.1.Tempo di riverberazione ottimale per un ambiente chiuso 26

3.3.2.Early Decay Time (EDT): 28

3.2.3.Criteri energetici 29

3.2.3.1.Indice di chiarezza (Clarity - C_{80}) 29

3.2.3.2.Indice di definizione (Definition - D_{50}) 30

3.2.3.3.ST1 Gade 30
3.2.4.Parametri di intelligibilità: STI e RASTI 30
3.3.Regole generali 32
3.4.Classificazione delle sale da concerto 33
3.4.1.Sala con disposizione frontale 33
3.4.2.Sala ad emiciclo 34
3.4.3.Sala con configurazione centrale 35
CAPITOLO 4 Tecniche e strumenti di misura 37
4.1.Stazionarietà interrotta 38
4.2.Risposta dell'impulso 40
4.2.1.Il segnale MLS 43
4.3.Confronti 44
4.4.Strumentazione 46
CAPITOLO 5 Scopo dello studio 47
CAPITOLO 6 Verifica sperimentale 49
6.1.Rumore di fondo del teatro 49
6.2.Stazionarietà interrotta 51
6.3.Risposta dell'impulso 53
6.3.1.Il tempo di riverberazione 53
6.3.2. Early Decay Time (EDT) 54
6.3.3.Indice di chiarezza (Clarity - C_{80}) 54
6.3.4.Indice di definizione (Definition - D_{50}) 55
6.3.5.ST1 Gade 56
6.3.6.Parametri di intelligibilità: STI e RASTI 57
CAPITOLO 7 Conclusione 59
Ringraziamenti 61
Bibliografia 63

Indice delle figure

Figura 1: Wallance Clement Sabine (1869-1919) 9
Figura 2: Il teatro 13
Figura 3: Veduta dalla platea 13
Figura 4: Particolare di una porta 14
Figura 5: Veduta dal loggione 14
Figura 6: I palchetti 14
Figura 7: La piantina del teatro di Rovigo 15
Figura 8: Cilindro aperto 17
Figura 9: Elementi elastici 17
Figura 10: Oscillogramma 22
Figura 11: Sistema acustico 31
Figura 12: Boston Symphony Hall 34
Figura 13: Teatro della Scala 34
Figura 14: Filarmonica di Berlino 35
Figura 15: Black Box 41
Figura 16: Convoluzione 41
Figura 17: Convoluzione 42
Figura 18: MLS 43
Figura 19: a: la sorgente sonora Brüel & Kjœr; b: la sorgente sonora Brüel & Kjœr durante le misurazioni 46
Figura 20: Micofono Brüel & Kjœr durante le misurazioni nella gradinata 46
Figura 21: Soffitto a cupola 49
Figura 22: Posizioni P1, P2 e P3 53
Figura 23: Aula del tribunale di Sommerville 57
Figura 24: Riflessioni 60

Indice dei grafici

Grafico 1: Livello della potenza sonora in funzione di pressione e temperatura 21
Grafico 2: Noise Criterion Contours 24
Grafico 3: RT ottimale in funzione del volume della sala e della funzione 27
Grafico 4: Il segnale MLS..... 44
Grafico 5: Confronto fra decadimento misurato in maniera classica e decadimento calcolato, a partire dallo stesso segnale, con tecnica impulsiva mediante integrazione di Schroeder [6] 45
Grafico 6: Rumore di fondo in platea 50
Grafico 7: Rumore di fondo nella gradinata..... 50
Grafico 8: Confronto fra rumore di fondo nella gradinata e le curve Noise Criterion Contours..... 51
Grafico 9: Confronto fra rumore di fondo in platea e Noise Criterion Contours..... 51
Grafico 10: RT in platea..... 52
Grafico 11: RT nella gradinata 52
Grafico 12: EDT nelle 4 posizioni..... 54
Grafico 13: Confronto fra i valori di Clarity nelle 4 posizioni 55
Grafico 14: Confronto fra i valori di definition nelle 4 posizioni. Valori in percentuale .. 55
Grafico 15: Confronto fra i valori di ST1 Gade nelle 4 posizioni 56

Indice delle tabelle

Tabella 1: Potenza sonora, campo di variabilità 19
Tabella 2: Rumori caratteristici 20
Tabella 3: RT ed EDT di Teatri d'Opera per differenti volumi e numero di posti 28
Tabella 4: STI, AL_{cons} e RASTI 32
Tabella 5: Confronto RT in platea e nella gradinata 52
Tabella 6: Valori medi 52
Tabella 7: RT nelle 4 posizioni 54
Tabella 8: EDT nelle 4 posizioni 54
Tabella 9: Indice di chiarezza nelle 4 posizioni 55
Tabella 10: Indice di definizione nelle 4 posizioni 56
Tabella 11: ST1 Gade nelle 4 posizioni 56
Tabella 12: Valori di STI, RASTI e AL_{cons} misurati nelle 4 posizioni 57

Sommario

Nel presente lavoro di analisi è stata effettuata una valutazione dell'acustica del Teatro Sociale di Rovigo.

L'analisi si è svolta principalmente in tre fasi: l'acquisizione dei valori caratteristici tramite misurazione in sede, l'elaborazione tramite software e, infine, l'analisi degli indici ricavati.

Dopo una breve introduzione all'argomento, nel primo capitolo viene presentato il Teatro Sociale di Rovigo sia dal punto di vista storico che per le sue caratteristiche attuali.

I tre capitoli successivi sono incentrati sulla teoria dell'acustica e presentazione di vari teatri; in particolare nel capitolo 2 vengono illustrate alcune nozioni base dell'acustica, nel capitolo 3 l'acustica delle sale e nel capitolo 4 le tecniche e gli strumenti di misura che sono stati utilizzati per la verifica sperimentale del Teatro di Rovigo.

Gli ultimi tre capitoli fanno riferimento al Teatro di Rovigo: lo scopo dell'analisi, la verifica sperimentale e la conclusione.

Introduzione

Nella formulazione attualmente più diffusa l'analisi acustica delle sale è basata in larga parte sulla misurazione della risposta all'impulso tra una sorgente sonora ed un ricevitore posto successivamente in diverse posizioni dell'ambiente.
Dalla risposta dell'impulso si estraggono poi una vasta gamma di indicatori che descrivono in termini oggettivi le sensazioni soggettive percepite da un ascoltatore quando questi venga a trovarsi in termini nelle posizioni di misura.
L'insieme di questi strumenti di analisi, sia per quanto riguarda i modelli teorici che le procedure sperimentali, è il risultato di circa cento anno di sviluppo della disciplina.
Infatti, solo con i lavori pionieristici di W.C.Sabine tra il 1895 e il 1915 sono state poste solide basi per l'indagine scientifica del comportamento acustico degli ambienti partendo dalla misurazione di quello che è tutt'ora considerato il principale indicatore oggettivo, il tempo di riverberazione.

Figura 1: Wallance Clement Sabine (1869-1919)

Prima di Sabine i fenomeni acustici negli ambienti erano essenzialmente descritti in maniera qualitativa e non misurati secondo un rigoroso metodo sperimentale. L'acustica delle sale era definita in larga misura simulando altre sale preesistenti di caratteristiche note e valutate con favore.
Un simile processo di selezione è senz'altro avvenuto anche per la gran parte delle

sale teatrali storiche italiane, che sono state costruite in un arco di tempo di circa tre secoli dalla fine del XVI alla seconda metà del XIX secolo.
Indubbiamente l'acustica ha avuto, assieme ad altri elementi, un ruolo cruciale nella selezione delle forme architettoniche delle sale teatrali, che si trovano rappresentate in svariate tipologie[1].
Oggi il miglioramento dell'acustica dei teatri incontra maggiori difficoltà a causa dei rumorosi impianti presenti al loro interno. Nella realizzazione dei nuovi teatri non ci si concentra più unicamente alla forma e ai materiali utilizzati ma anche al silenziamento degli impianti meccanici e alla parzializzazione del funzionamento degli stessi a seconda dell'uso effettivo delle diverse aree.

CAPITOLO 1
Il Teatro Sociale di Rovigo

1.1.Cenni storici

Il Teatro Sociale venne eretto fra il 1817 ed il 1819, rispecchiando la convinzione dell'epoca che considerava il melodramma come il genere di spettacolo meritevole della massima considerazione.
All'epoca della costruzione del Teatro Sociale, in questo genere di spettacolo, Rovigo aveva già una tradizione più che secolare. Il primo documento di un melodramma allestito a Rovigo risale al 1683: lo spettacolo fu ospitato nella sala della Loggia dei Notai, visto che il primo teatro in città venne edificato, per iniziativa di Celio Campagnella, nel 1694. A dispetto della relativa scarsità di popolazione e della oggettiva scarsità di ricchezza, il melodramma a Rovigo dovette incontrare un notevole favore, se presto in città divennero normali tre stagioni d'opera all'anno, la più importante delle quali si teneva in autunno, in coincidenza con la fiera. Pochi anni dopo il Campagnella, fu costruito dai Manfredini un altro teatro più grande, passato poi ai Venezze e successivamente ai Roncale, il quale rimase attivo fino all'inizio del XIX sec., quando, risultando ormai insufficiente per il costante incremento di pubblico, fu deciso di costruire un terzo e più grande teatro.
Nel 1816 venne costituita la Società del Teatro che, nel luogo dove fino al 1809 sorgeva il piccolo convento di S. Maria dei Battuti demolito in seguito alla soppressione napoleonica, individuò l'area più adatta alla costruzione di un nuovo teatro. Il teatro si sarebbe trovato ubicato su una piazza, in quanto anche la chiesa di S. Giustina era stata abbattuta. Per il progetto la Società del Teatro si rivolse a Sante Baseggio. L'ingegnere rodigino vantava una certa esperienza nello specifico campo della progettazione teatrale, avendo restaurato il Teatro Roncale e partecipato al concorso per la Fenice di Venezia con un progetto che, pur non risultando vincitore, era stato tra i più apprezzati.
Baseggio elaborò un primo progetto che fra l'altro prevedeva due aperture ad arco ai lati del portico centrale, aperture destinate all'accesso delle carrozze. Ma parve più opportuno recuperare quegli spazi esterni ai servizi interni del teatro: fu quella la variante più significativa del secondo progetto rispetto al primo, ma anche numerosi dettagli vennero rivisti, conferendo all'insieme una maggiore vivacità complessiva. Il Teatro della Società, questo il nome originale, aprì al pubblico, in senso assoluto, la

sera del 3 marzo del 1819 con “L’ombra di Fetonte, ossia l’omaggio della riconoscenza rodigina” di Sante Campioni, in occasione della visita a Rovigo dell’Imperatore Francesco I d’Asburgo. L’inaugurazione ufficiale si tenne il 26 aprile 1819, all’avvio della prima stagione, con la rappresentazione “Adelaide di Borgogna”, appositamente composta da Pietro Generali, il musicista italiano allora considerato secondo solo a Rossini, ed interpretata da tre dei più famosi cantanti del momento, Violante Camporesi, Claudio Bonoldi e Giuseppe Fioravanti.
Il Teatro venne restaurato per la prima volta nel 1858, sotto la presidenza del cav. Antonio Gobbatti; i lavori riguardarono l’intero edificio, il palcoscenico, le decorazioni della sala, il riscaldamento e l’introduzione dell’illuminazione a gas.
Ma quello che vediamo oggi e che, illuminato a giorno, fa bella mostra di sé durante le stagioni liriche e di prosa, nobilitando la già bella Piazza Garibaldi, non è propriamente il Teatro costruito da Sante Baseggio. Un incendio, infatti, distrusse nella notte tra il 21 e 22 gennaio 1902 la bella sala del Baseggio, costruita prevalentemente di legno per le esigenze dell’acustica, e ciò che ne rimane sono solo la facciata ed il ridotto.
Il Teatro venne ricostruito in due anni. Il progetto, fornito dall’ingegnere padovano Daniele Donghi, mantenne la parte anteriore del precedente edificio, rimasta praticamente indenne, con la bella facciata neoclassica ed il fastoso foyer decorato con gradevoli pitture. Per la sala l’architetto sperimentò, fra i primi, l’uso del cemento armato per una destinazione così particolare; il risultato, dal punto di vista dell’acustica, fu senz’altro felice. Grazie alla decorazione del padovano Giovanni Vianello, semplice, elegante ed ottenuta principalmente con mezzi pittorici, il teatro rodigino è tra i primi del Veneto ad adottare i nuovi canoni dello stile liberty.
Il nuovo Teatro Sociale fu inaugurato da Pietro Mascagni, che vi diresse la propria “Iris” il 12 ottobre 1904.
Ripresa dunque l’attività, il Teatro di Rovigo seppe tenere alto il prestigio conquistato, pur affrontando momenti di grave crisi. La scarsità delle risorse finanziarie impedì, in genere, di scritturare interpreti affermati, impegnando gli organizzatori ad individuare giovani sicuramente promettenti; per questi motivi il Sociale può vantare di aver tenuto a battesimo due dei maggiori cantanti del nostro secolo: Beniamino Gigli e Renata Tebaldi. Nel corso degli anni l’evoluzione delle esigenze culturali rese sempre più impegnativo l’allestimento degli spettacoli, cosicché solo l’intervento pubblico poté garantire realizzazioni dignitose. Per questo il Teatro Sociale, inserito nel ristretto novero dei “Teatri lirici di tradizione” nel 1967, fu, alla fine, rilevato dall’Amministrazione Comunale che dal 1964 ad oggi, oltre a curarne il radicale restauro, provvede alla sua gestione diretta affidata all'Assessorato alla Cultura e Spettacolo[2].

1.2.Il teatro oggi

Oggi, oltre alla stagione lirica e di balletto, il Sociale ospita un'affermata e seguitissima stagione di prosa, una stagione concertistica e numerose altre iniziative di spettacolo rivolte anche a favore dei giovani.
La collaborazione con consulenti di provata esperienza e di grande conoscenza dei singoli generi di spettacolo garantisce da sempre la qualità degli spettacoli sotto il profilo artistico.

Figura 2: Il teatro

Figura 3: Veduta dalla platea

Figura 4: Particolare di una porta

Figura 5: Veduta dal loggione

Figura 6: I palchetti

1.3.Caratteristiche del teatro

Il teatro ha un volume di circa 9000 m^3 e 886 posti a sedere.

Il teatro ha una configurazione frontale, in cui domina la contrapposizione tra sala e scena.

Nella figura 7 si può notare la composizione del teatro: al centro la platea e attorno si alzano a livelli sempre più alti: la gradinata, i palchi, la loggia e il loggione.

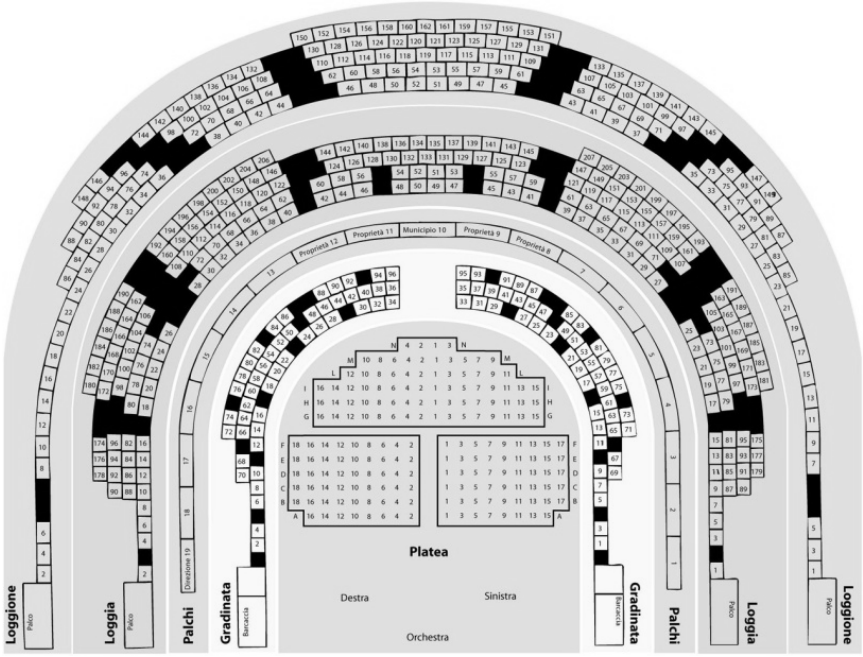

Figura 7: La piantina del teatro di Rovigo

CAPITOLO 2
Nozioni di acustica

2.1.Definizioni e grandezze

2.1.1.Il suono

Il suono si può definire come la propagazione di energia per movimenti vibratori in mezzi elastici. Esso è imputabile al movimento vibratorio di corpi che ne costituiscono la sorgente. Un esempio caratteristico è quello di un pistone che si muove all'interno di un cilindro aperto. L'aria che viene compressa dal pistone influisce sulla regione vicina e la perturbazione si muove ad una velocità che è funzione solo del mezzo: la velocità del suono.

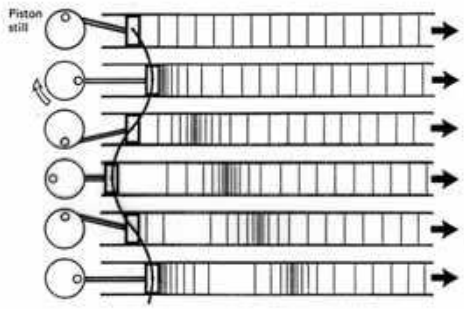

Figura 8: Cilindro aperto

Il mezzo è essenziale per la propagazione della perturbazione di pressione: il suono non si propaga in regioni dello spazio prive di materia.
Le particelle d'aria si comportano come elementi elastici che spostati dalla loro posizione di equilibrio oscillano fino a riprendere la posizione di quiete:

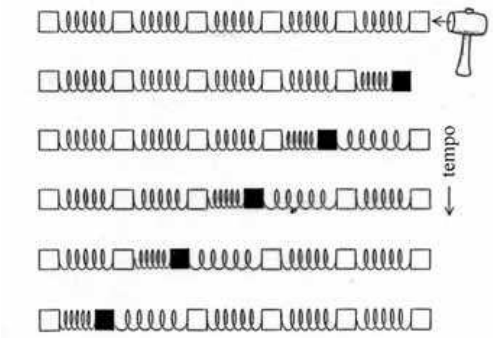

Figura 9: Elementi elastici

Nel fenomeno ciò che si muove non sono le particelle d'aria, bensì la perturbazione di pressione.

Il fenomeno acustico riguarda tre elementi: la sorgente, il mezzo e il ricevitore.
La sorgente produce perturbazioni di pressione nel mezzo: le onde sonore sono evidenziate da variazioni di pressione. L'orecchio è un organo che rende percettibili tali variazioni di pressione, purché esse siano comprese entro certi limiti.
Le particelle del mezzo, investite dalle onde di compressione e di rarefazione eseguono delle oscillazioni attorno alla loro posizione di riposo lungo la direzione di propagazione delle onde sonore: le onde sonore sono onde longitudinali.
Un suono puro è caratterizzato da una frequenza *f* che è il numero di oscillazioni che intervengono nell'unità di tempo; esiste un'immediata relazione fra la frequenza e la lunghezza d'onda λ in funzione della velocità del suono *c*:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

2.1.1.1.La velocità del suono

La velocità del suono varia in base al mezzo.
Per l'aria viene specificata anche la temperatura. Dato che da essa la velocità (m/s) dipende abbastanza fortemente secondo una funzione che si può approssimare con:

$$c = 331{,}4 + 0{,}6t(°C)$$

2.1.1.2.Lunghezza d'onda e frequenza

Il periodo *T* è il tempo necessario ad un giro dell'albero, cioè alla generazione di un'onda completa (compressione + rarefazione). Il periodo è in ovvia relazione con la velocità angolare ω dell'albero:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

L'inverso del periodo è la frequenza, cioè quante onde vengono generate nell'unità di tempo:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

La frequenza si esprime di solito in cicli/s o Hertz (Hz). Ovviamente un intervallo di frequenza si può esprimere in Hz; spesso si fa ricorso alle ottave o a frazioni di esse.

2.1.2.Pressione, intensità e potenza sonora

La pressione sonora *p* è la variazione di pressione prodotta dal fenomeno sonoro rispetto alla pressione di quiete. Essa è funzione del tempo ed assume valori positivi e negativi (compressioni e rarefazioni). Per quantificarla conviene riferirsi al valore efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2 d\tau}$$

La pressione efficace assume un dato valore sempre positivo e soprattutto è di rapida rilevazione strumentale. Per onde sinusoidali si può dimostrare che:

$$p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}$$

La potenza sonora *W* di una sorgente è la totale energia sonora emessa dalla sorgente nell'unità di tempo. Il campo di variabilità della potenza sonora è molto ampio, come evidenziato dalla tabella 1.

Acoustic Power watt	dB re 10^{-12}w	Typical Sources
100 000 000	200	Saturn Booster Rocket
10 000 000		
1 000 000	180	
100 000		
10 000	160	Boeing 707 - full power
1000		
100	140	75 Piece Orchestra
10		
1	120	Chain Saw
0.1		
0.01	100	
0.001		Average Motor Car
0.000 1	80	
0.000 01		Normal Voice
0.000 001	60	
0.000 000 1		
0.000 000 01	40	
0.000 000 001		Whisper
0.000 000 000 1	20	
0.000 000 000 01		
0.000 000 000 001	0	

Tabella 1: Potenza sonora, campo di variabilità

L'intensità sonora I in un punto in una certa direzione è il flusso di energia sonora trasmessa in quella direzione attraverso un'area di sezione unitaria normale alla direzione stessa. La relazione fra le due grandezze in un campo libero dove le onde sonore si propagano indisturbate nasce da semplici considerazioni geometriche:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

In particolare in campo libero è definita da:

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho c}$$

Mentre, in campo perfettamente diffuso, è definito da:

$$I = \frac{p^2}{4\rho c}$$

La densità di energia sonora D è l'energia sonora contenuta in un volume unitario.

Essa è la stessa sia in campo diffuso che in campo riverberante:

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2}$$

2.1.3.Il decibel

L'orecchio umano non giudica le grandezze acustiche in termini assoluti, ma di quante volte una è più grande dell'altra. Tenendo conto dell'ampia variazione delle grandezze, risulta opportuno l'uso di una scala logaritmica. Per questa scala è necessario fornire un livello di riferimento. Per la pressione sonora si sceglie il livello di soglia uditiva a 1000 Hz che è pari a p_o=2x10^{-5} Pa.

Il livello della pressione sonora espresso in dB (*decibel*) è pari a:

$$L_p = 20 log \frac{p}{p_o}$$

L'estremo superiore per la pressione sonora si può porre alla soglia del dolore per l'orecchio che è a circa 200 Pa (notare che è appena lo 0,02% della pressione atmosferica). L'intervallo dei valori per il livello va allora da 0 a 120 dB.

La tabella 2 riporta valori di livello della pressione sonora di rumori caratteristici.

dB(A)	Esempio	Valutazione soggettiva
140	In prossimità di un motore a jet	
130	soglia del dolore	
120	macchina per chiodatura	assordante
110	motociclo in accelerazione a pochi metri di distanza	
100	clacson di automobile a pochi metri	
90	strada urbana rumorosa	molto forte
80	locale pubblico rumoroso	forte
70	locale di dattilografia	
60	traffico automobilistico libero	moderato
50	conversazione normale	
40	radio TV a basso volume	debole
30	ambiente residenziale medio	
20	ticchettio orologio	
10	fruscio foglie	debolissimo
0	soglia	

Tabella 2: Rumori caratteristici

Si può definire similmente il livello per la potenza sonora. Per riferimento si sceglie la potenza W_0=10^{-12} watt.

$$L_W = 10log\frac{W}{W_0}$$

Si può operare la stessa scelta anche per l'intensità sonora con un valore di riferimento convenzionalmente assunto pari a $I_0=10^{-12}$ W/m2:

$$L_I = 10log\frac{I}{I_0}$$

Dal momento che :

$$p^2 = I\rho c => L_p \approx L_I$$

La precedente identità è verificata solo nei limiti per i quali vale:

$$\rho c = 1{,}2 * 340 \approx 400\ {}^{kg}/_{m^2s}$$

Essa risulta sempre meno approssimata quando pressione e temperatura si allontanino sempre di più dai valori correnti.

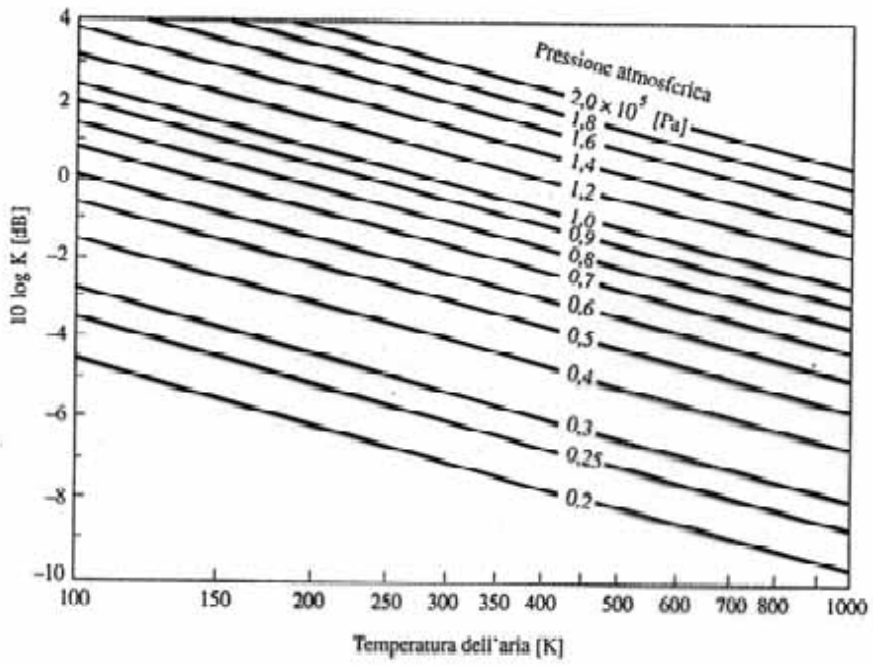

Grafico 1: Livello della potenza sonora in funzione di pressione e temperatura

2.1.4.Oscillogrammi e spettri sonori

L'orecchio coglie tre caratteristiche principali di un suono: l'altezza, l'intensità e il timbro.

L'altezza è legata alla frequenza, l'intensità alla potenza sonora e alla distanza, il timbro alle leggi delle vibrazioni che compongono il suono. Le tre caratteristiche possono essere qualificate dalla funzione temporale della pressione sonora, ottenibile attraverso un oscilloscopio a raggi catodici. Il risultato ottenuto è un oscillogramma.[3 4]

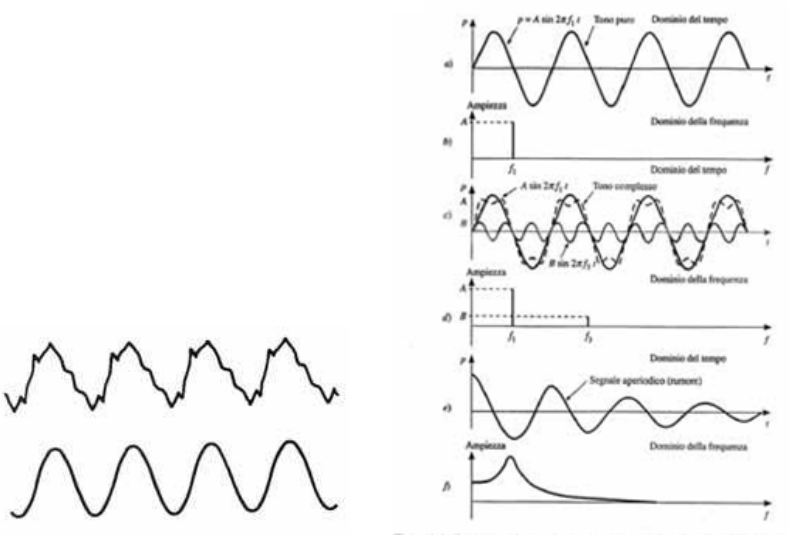

Figura 10: Oscillogramma

CAPITOLO 3
L'acustica delle sale

L'acustica si occupa del suono e, essendo una scienza, lo fa da un punto di vista matematico/quantitativo. La musica, invece, essendo una disciplina ed un'arte che basa tutta la propria attività sul suono ed ha i suoi momenti chiave nella composizione, esecuzione ed ascolto, affianca a degli aspetti necessariamente numerici, degli altri più emotivi ed affettivi; ciò in quanto utilizza il suono come un linguaggio, un mezzo per veicolare emozioni e sentimenti.
Nonostante questa diversità di base, l'arte musicale e la scienza acustica debbono convergere se vogliono individuare dei validi criteri per la progettazione e realizzazione di sale da concerto. Un evento musicale infatti non può mai essere separato dall'ambiente in cui ha luogo e, in tal senso, l'acustica deve occuparsi proprio di quelle caratteristiche della sala che influenzano la produzione, la trasmissione e la percezione della musica e del parlato.

3.1.Il rumore di fondo

Il rumore di fondo è un serio disturbo nei teatri. All'ascoltatore non devono giungere rumori provenienti dall'esterno o da rumori interni estranei all'ascolto. Per far questo è necessario un isolamento acustico della sala, in maniera che i rumori provenienti dall'esterno restino a livelli ridotti e si devono controllare attentamente i rumori prodotti dagli impianti tecnici. Il rumore di fondo può derivare dai condizionatori o da vari macchinari in uso durante l'opera oppure da fattori esterni al teatro come il traffico automobilistico. Anche le vibrazioni creano problemi, soprattutto se la sorgente si trova sotto il piano principale o sopra l'attico.

3.1.1.Le curve Noise Criteria

Per una sala da concerto o per un teatro d'opera il rumore di fondo, misurato senza spettatori con strumenti di misura del suono che rispettino gli Standard americani, devono stare sotto le curve del grafico 2.
In particolare il range del rumore di fondo deve stare sotto la curva NCB-10 (balanced noise criteria) che rappresenta i valori raccomandati da non superare.
La curva più in alto, NCB-15 rappresenta il limite sopra il quale il rumore di fondo può

disturbare seriamente.

Per evitare elevati valori di rumore di fondo i macchinari dei condizionatori e dei ventilconvettori devono essere posizionati in stanze remote e separate, con pavimento galleggiante, ovvero un ambiente completamente isolato dalla sala. Una condizione maggiormente desiderabile risulta se l'ampiezza dei condotti è elevata e ci sono discontinuità nei percorsi in cui il rumore e le vibrazioni viaggiano.

Non esistono standard sui valori di vibrazione accettabili. Colui che si occupa del progetto di acustica deve ridurre le vibrazioni del pavimento dove i musicisti e il pubblico sono seduti, stando sotto al valore dell'accelerazione di 1 cm/(s^2). [5]

Per gli altri rumori prodotti all'interno l'unico intervento è limitare che si producano, limitando le parti in movimento, fissando le sedie o ponendo gomma sulle battute, ecc.

La disposizione di tappeti e moquette riduce il disturbo causato dal calpestio. [3]

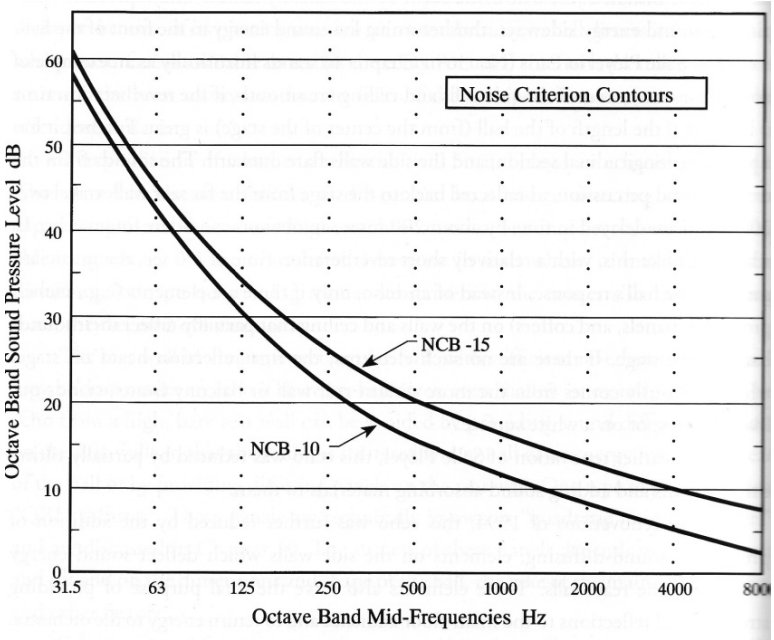

Grafico 2: Noise Criterion Contours

3.2.Parametri fisici dell'acustica ambientale

I parametri di qualità comunemente usati nella progettazione e correzione di ambienti acusticamente efficienti sono legati alla riverberazione (Reverberation Time RT_{60}, Early Decay Time EDT) e a criteri energetici (Clarity C_{50}, C_{80}, Definition D_{50} e, ST1).

A questi si aggiungono i parametri di intelligibilità del parlato: Speech Transmission Index (STI) e RApid Speech Transmission Index (RASTI).

3.2.1.Tempo di riverberazione, Reverberation Time (RT_{60})

Il tempo di riverberazione (RT_{60}-Reverberation Time) ad una data frequenza è il tempo necessario affinché la densità di energia sonora decresca di 60 dB dal valore originario, dopo che la sorgente abbia cessato di emettere suoni.
Nel 1898 il fisico statunitense Wallace C. Sabine, chiamato a correggere l'acustica del Fogg Art Museum che soffriva di eccessiva riverberazione (il parlato era, infatti, incomprensibile a tutti gli ascoltatori tranne a quelli seduti nelle prime file), scoprì una relazione di tipo approssimato che intercorre tra il tempo di riverberazione di una stanza, le sue dimensioni e le sue caratteristiche di assorbimento del suono. Secondo la legge di Sabine, il tempo di riverberazione RT_{60} è direttamente proporzionale al volume e inversamente proporzionale all'assorbimento totale dell'ambiente:

$$RT_{60} = 0{,}16\frac{V}{A}$$

dove V è il volume dell'ambiente in m^3, A l'assorbimento totale del suono (in sabin metrici ossia m^2 equivalenti) e 0.16 è una costante (con dimensioni s=m).
La formula di Sabine è ancora largamente utilizzata per determinare i coefficienti di assorbimento dei materiali e per stimare l'RT_{60} negli ambienti chiusi, tuttavia essa presuppone alcune condizioni:

- Tutti i punti dell'ambiente devono essere caratterizzati dallo stesso tempo di riverberazione, ossia il decremento dell'energia sonora deve essere il medesimo in tutti i punti (densità di energia costante da punto a punto). Questa ipotesi è sostanzialmente corretta solo se le tre dimensioni dell'ambiente non sono molto dissimili tra loro, e può perdere significato in ambienti di forma inusuale.
- Si considera nullo l'assorbimento acustico da parte dell'aria, che invece nella pratica può essere rilevante nei casi di grandi ambienti, specie alle alte frequenze.

Negli anni successivi Sabine perfezionò i suoi studi, affrontando il complesso campo dell'individuazione dei tempi di riverberazione ottimali per i vari eventi acustici: risultò subito chiaro che il parlato richiede meno riverberazione della musica, e che diversi generi musicali vengono valorizzati con ambienti adatti. Per Sabine il tempo di riverberazione era il parametro oggettivo fondamentale atto a caratterizzare acusticamente gli ambienti.
Il più autorevole tra i successivi tentativi di giungere ad una caratterizzazione più approfondita delle sale da concerto è stato fatto da Leo Beranek nel 1962 nell'opera Music, Acoustics and Architecture. In questo testo Beranek analizza dal punto di vista

geometrico, studia la natura delle superfici interne, valuta i tempi di riverberazione e molte altre caratteristiche di cinquantaquattro tra le più importanti sale da concerto, prendendo in considerazione anche le opinioni di famosi direttori d'orchestra e addetti ai lavori (facendo compilare dettagliati questionari). In questo tentativo l'autore classifica le sale in varie categorie di qualità, utilizzando un punteggio che tiene conto di numerosi parametri oggettivi. Il tempo di riverberazione non è considerato l'unico dato fondamentale: ciò risulta dal fatto che le sei sale presenti nella più alta categoria di qualità hanno tempi di riverberazione nell'intervallo 1,7-2,0 s; quelle della successiva invece entro 1,2-2,0 s.
Beranek conclude che altre proprietà positive possono compensare tempi di riverberazione non adeguati, fra queste la più importante è il tempo di ritardo fra il suono diretto e la prima forte riflessione, Initial Time Delay Gap, ITDG.
Il tempo di riverberazione è anche oggi uno dei parametri più importanti per determinare la qualità di un ambiente sonoro: per questo la sua misura è oggetto di standard ISO.

3.2.1.1.Tempo di riverberazione ottimale per un ambiente chiuso

Per la migliore intelligibilità (sia della parola che della musica) si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente. La riverberazione in questo contesto gioca un ruolo duplice: da un lato innalza l'intensità sonora rispetto a quella del solo suono diretto, ma dall'altro aumenta la dispersione temporale, che incide negativamente sulla comprensione dei passaggi musicali e dei fonemi del parlato. Il tempo di riverberazione dovrebbe quindi assumere un valore ottimale, in modo da offrire il miglior compromesso possibile. Inoltre, questo valore cresce leggermente all'aumentare del volume della sala, per una determinata destinazione d'uso: l'organo uditivo umano, per ambienti più grandi, accetta un lieve peggioramento dell'intelligibilità in favore del livello sonoro; inoltre la sensazione soggettiva di maggiore vastità dell'ambiente che viene spontaneamente associata ad una coda sonora più lunga è in generale considerata gradevole dagli ascoltatori, tanto che il riverbero è uno degli “effetti” più comunemente aggiunti ai suoni creati per sintesi elettronica. Sono state proposte delle formule empiriche che forniscono una stima del tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume dell'ambiente, nel caso della musica e del parlato:

$$RT_{60,\ parlato} = 0{,}1V^{1/3}$$

$$RT_{60,\ musica} = 0{,}5 + 10^{-4}V$$

Entrambe le relazioni forniscono il tempo di riverberazione ottimale in secondi se il volume della sala è espresso in m^3.

Dal grafico 3 si nota anche che gli ambienti acustici destinati all'ascolto del parlato hanno valori ottimali di tempo di riverberazione più bassi di quelli della musica.

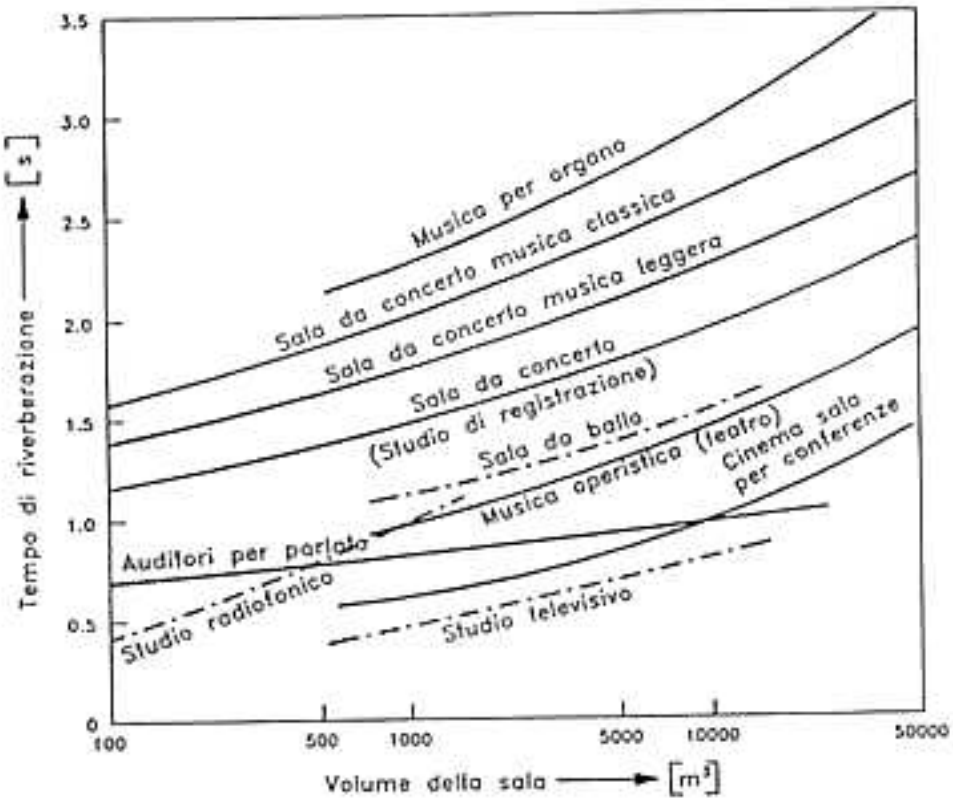

Grafico 3: RT ottimale in funzione del volume della sala e della funzione

Nella tabella seguente sono presenti i valori di RT ed EDT in vari Teatri d'Opera. Da questa tabella e dagli studi presenti in letteratura possiamo affermare che il tempo ottimo di riverberazione è attorno a 1,5 secondi in media, ma dipende fortemente dal volume del Teatro.

OPERA HOUSES	No. of Seats	Cubic Volume cu m	RT Occup. sec	EDT Unoccup. sec
Bayreuth, Festspielhaus	1,800	10,308	1.55	-
Bloomington, Univ. Auditorium	3,718	25,545	1.4	-
Buenos Aires, Teatro Colón	2,487	20,570	1.8*	-
Costa Mesa, Segerstrom Hall	2,994	27,800	1.6	2.15
London, Royal Opera House	2,120	12,250	1.1	1.05
Milan, Teatro Alla Scala	2,289	11,252	1.2	1.2
New York, Met. Opera House	3,816	24,724	1.8	2.25
Paris, Opéra Bastille	2,700	21,000	1.55	1.6
Paris, Opéra Garnier	2,131	10,000	1.15*	1.2
Philadelphia, Academy of Music	2,827	15,100	1.2	1.2
Rochester, Eastman Theatre	3,347	23,970	1.65	-
Salzburg, Festspielhaus	2,158	14,020	1.5	1.9
San Francisco Opera House	3,252	20,900	1.5*	-
Tokyo, Orchard Hall	1,928	17,050	1.8	-
Vienna, Staatsoper	1,709	10,665	1.3	1.4
Washington, Kennedy Opera Hse	2,142	13,027	1.5	-
AVERAGE	**2,603**	**17,446**	**1.5**	**1.55**

*Estimated

Tabella 3: RT ed EDT di Teatri d'Opera per differenti volumi e numero di posti

Fonte: How the Sound Concert and Opera Halls, Leo Beranek

3.3.2.Early Decay Time (EDT)

L'indice EDT misura la prima parte della riverberazione ed è definito come il tempo necessario per un decadimento di 10 dB di un suono interrotto. È un parametro particolarmente sensibile alla posizione relativa fra microfono e sorgente, diminuendo all'aumentare della distanza fra essi; utile nel confronto fra punti diversi di una stessa sala.

Il valore EDT è paragonato al valore RT_{60}: i due parametri dovrebbero essere identici in uno spazio in cui il campo di pressione acustica è fortemente diffuso, dove il decadimento è completamente lineare[8]. Nella maggior parte dei casi i valori di EDT sono inferiori a quelli dell'RT_{60} e l'entità della discrepanza costituisce un buon giudizio dell'imperfetta diffusione locale.

Un'altra differenza tra i due parametri è che in generale l'EDT varia più velocemente con lo spostarsi del punto di misura. L'idea di limitare la dinamica della misura di RT a 10 dB viene dal fatto che, durante una performance musicale, l'orecchio umano riesce raramente a sentire un decadimento sonoro di una dinamica superiore; l'EDT viene quindi utilizzato perché prende in considerazione l'effetto dei primi riflessi sonori e, soprattutto, è più vicino alla percezione soggettiva della riverberazione. Inoltre l'EDT è

collegato ad altre sensazioni come, ad esempio, la chiarezza degli attacchi e la loro intensità: questo parametro ha dimostrato di essere meglio correlato con le sensazioni psicoacustiche soggettive.

3.2.3.Criteri energetici

L'organo uditivo umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo (circa 50 ms per il parlato; 80 ms per la musica) e considera le riflessioni come parte del suono diretto: le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 50-80 ms dal suono diretto, oltre a non essere percepite singolarmente, sono effettivamente fuse con il suono diretto stesso.
L'energia che arriva prima dei 80ms si chiama energia utile perché i contributi delle riflessioni che giungono entro questo tempo si aggiungono (e così enfatizzano) il suono diretto, mentre l'energia che arriva dopo prende il nome di energia inutile o dannosa perché, oltre a non enfatizzare, può creare disturbi alla percezione sonora.

3.2.3.1.Indice di chiarezza (Clarity - C_{80})

La chiarezza è il grado in cui spicca un suono rispetto ad un altro in un'esecuzione musicale: dipende da fattori musicali, obiettivi e intenzioni dell'esecutore, ma è determinata anche dall'acustica della sala. [6]
Il suo indice ha il fine di valutare la possibilità, per un ascoltatore, di percepire nitidamente note musicali suonate in rapida successione, nonché di distinguere chiaramente più note suonate simultaneamente da uno o più strumenti.
Clarity è definito come il rapporto tra l'energia sonora ricevuta nei primi 80 ms dal suono diretto e quella che giunge successivamente, quindi è positivo quando l'energia utile è superiore all'energia inutile:

$$C_{80} = 10log\frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{+\infty} p^2(t)dt}$$

espresso in dB.
C_{80} è principalmente usato per la musica: interpreta sensazioni soggettive che riguardano la percezione della chiarezza degli attacchi, differenza tra le varie voci, trasparenza, localizzazione della sorgente e definizione del suono. Valori di C_{80} attorno a 0 dB sono relativi ad ambienti acustici adatti per l'esecuzione della musica sinfonica, mentre per l'opera lirica deve essere compreso tra 1 e 4 dB. I valori limite per la musica strumentale sono -2 e +2 dB.

3.2.3.2.Indice di definizione (Definition - D_{50})

L'indice di definizione costituisce una misura di chiarezza con la quale l'ascoltatore recepisce il messaggio parlato: è un parametro di qualità ma è anche significativo per l'intelligibilità del parlato: rappresenta il rapporto tra energia utile ed energia totale:

$$D_{50} = \text{Energia Utile/Energia Totale}$$

e si può calcolare con la seguente formula:

$$D_{50} = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t)dt}{\int_{50ms}^{+\infty} p^2(t)dt}$$

dove t = 0 è l'istante in cui giunge l'impulso diretto. Gli ambienti acustici adatti per il parlato richiedono D_{50}>0,5, mentre quelle adatte per l'esecuzione musicale D_{50}<0,5. [7]

3.2.3.3.ST1 Gade

L'indice di supporto (*St o ST1)* è così definito:

$$ST1 = 10log\frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t)}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t)}$$

ST1 quantifica quanto le prime riflessioni del palcoscenico aiutino il musicista nella sua prestazione, ovvero quantifica la facilità di un orchestrale di percepire il proprio strumento in relazione agli altri strumenti dell'orchestra.

I valori ottimali di ST1 cui sono associati giudizi favorevoli sulle condizioni di esecuzione si collocano secondo Gade (1989) tra i –7,5 dB e i –11 dB con valore medio pari a -9,5.

3.2.4.Parametri di intelligibilità: STI e RASTI

L'intelligibilità della parola all'interno di un teatro o auditorium rappresenta un parametro considerevole per gli spettacoli di prosa, dove è prevista la partecipazione di cantanti e attori.

Alcuni dei parametri di qualità illustrati nei paragrafi precedenti possono essere anche buoni indici di riferimento per l'intelligibilità del parlato (speech intelligibility): se il tempo di riverberazione fa sì che le riflessioni acustiche e la riverberazione di una sillaba raggiungano quella successiva, risulterà più complessa l'identificazione della parola. Inoltre, se il livello sonoro della parola è troppo debole rispetto al rumore di fondo, l'intelligibilità risulterà troppo bassa a causa di questo difetto di mascheramento.

I coefficienti di chiarezza e definizione possono essere utilizzati per stimare

l'intelligibilità della parola ma non prendono in considerazione il livello di rumore di fondo.

Se l'ambiente acustico da esaminare ha una funzione strettamente legata all'utilizzo del parlato piuttosto che della musica, è essenziale analizzare la situazione con dei criteri specifici di intelligibilità come STI (Speech Transmission Index) e la sua versione approssimata RASTI (RApid Speech Transmission Index).

I valori di STI e RASTI variano da 0 a 1, dove il valore 0 indica nessuna intelligibilità ed il valore 1 dà un'intelligibilità totale.

STI viene calcolato a partire dalla funzione di trasferimento della modulazione, Modulation Transfer Function, MFT. Essa è definita dal rapporto tra l'ampiezza della modulazione pervenuta al ricevitore e la corrispondente modulazione generata dalla sorgente con rumore rosa filtrato per bande d'ottava nel campo di frequenza compresa tra 125 Hz e 8 kHz, avente una ampiezza modulata ad una frequenza f molto bassa.

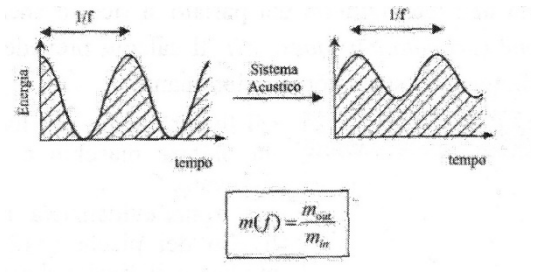

Figura 11: Sistema acustico

Un altro parametro utile per definire l'intelligibilità del parlato legato all'indice STI è la perdita di articolazione delle consonanti (AL_{cons}, Articulation Losses of Consonant) che viene ricavato mediante la seguente formula:

$$AL_{cons} = 10^{\frac{1-STI}{0,44}}$$

Una perfetta trasmissione della parola impone che il tempo necessario all'oratore per emettere un suono sia pari a quello impiegato dall'ascoltatore per percepire lo stesso suono. Questo fenomeno non si verifica mai nella realtà perché le caratteristiche acustiche dell'ambiente intervengono negativamente sul segnale trasmesso.

La qualità della intelligibilità è valutata analizzando la modulazione subita dall'onda sonora emessa dalla sorgente, che viene ridotta a causa del rumore di fondo, del tempo di riverberazione e dell'assorbimento differenziato dei materiali che compongono l'ambiente.

Al variare della frequenza modulante tra i valori di 0,63 Hz e 12,5 Hz si ottiene un sistema di 98 valori di MTF, corrispondenti a 14 dati per ciascuna delle 7 bande di ottava.

Successivamente i valori vengono mediati in un unico valore, l'STI.

Qualora i calcoli vengano svolti solo con riferimento ai valori ottenuti nella bande di ottava a 500 Hz e 2 kHz, la media risultante viene denominata RASTI (Rapid STI).
I livelli sonori prodotti da questo tipo di segnale nelle due bande di frequenza citate sono uguali ai livelli medi trovati nel parlato: 59 dB nella banda d'ottava di 500 Hz e 50 dB nella banda d'ottava di 2000 Hz alla distanza di 1 m dalla sorgente.
La misura dell'indice viene eseguita analizzando nella posizione di ascolto il segnale emesso da un altoparlante che riproduce le proprietà viste sopra e che è collocato nel posto dell'oratore.
Il metodo di misurazione RASTI si avvale di un segnale test che viene applicato ad una sorgente sonora e da questa immesso nell'ambiente di interesse.
Tale segnale possiede delle caratteristiche ben precise che ricalcano quelle possedute dalla voce umana.
Il metodo RASTI è valido solo se la trasmissione sonora avviene in modo lineare, il rumore di fondo non subisce sbalzi di livello e se il tempo di riverberazione non varia in base alla frequenza (alle frequenze intermedie).

Per valutare le prestazioni di un teatro in letteratura viene riconosciuta la tabella 4 di Steeneken e Houtgast 1980: [9]

STI	AL_{cons}	RASTI	Giudizio
da 0,75 a 1	da 0 a 5	da 0,78 a 1	intelligibilità eccellente
da 0,6 a 0,75	da 2,8 a 6,6	da 0,60 a 0,76	intelligibilità buona
da 0,45 a 0,60	da 7,4 a 15,7	da 0,42 a 0,58	intelligibilità discreta
da 0,32 a 0,45	da 17,5 a 33,6	da 0,20 a 0,42	intelligibilità povera
da 0 a 0,32	da 37,4 a 75,7	da 0,20 a 0,28	intelligibilità cattiva

Tabella 4: STI, AL_{cons} e RASTI

3.3.Regole generali

È possibile individuare alcune semplici regole di carattere generale, da applicare durante la progettazione di un teatro:

- dimensione: minimizzare il volume della sala quando è richiesto un tempo di riverberazione basso (auditorium per conferenze) e determinare volumi maggiori quando è richiesto un tempo di riverberazione più elevato (sale per la musica);

- fonoassorbimento: aggiungere materiale fonoassorbente per ridurre la riverberazione e viceversa aggiungere riflettori e diffusori per aumentarla;
- fonoassorbimento alle basse frequenze: utilizzare risuonatori, assorbitori a diaframma o plenum nelle grandi sale con superfici riflettenti;
- intelligibilità del linguaggio: per grandi sale utilizzare sistemi di amplificazione con appropriati ritardi;
- amplificazione: se è presente (musica moderna), solitamente presenta livelli sonori tali da negare qualsiasi effetto naturale della sala: in tal caso è meglio avere più fonoassorbimento possibile.

3.4.Classificazione delle sale da concerto

È possibile classificare le sale da concerto in funzione della forma geometrica; indipendentemente dalla natura dello spettacolo, la scena, spesso chiamata podio o palcoscenico, distingue una sala da concerti da quella da opera o da un teatro.
Nelle sale da concerto l'assenza di scenografia consente di fare a meno di ogni dispositivo scenico (scatola scenica, sottopalco, quinte): pertanto la separazione tra la sala e la scena, rappresentata dal quadro scenico, scompare e l'una e l'altra vengono contenute in un medesimo spazio che consente di raggiungere l'obiettivo della maggior parte dei progettisti, quello di avvicinare il pubblico all'orchestra.
A questo scopo si sono prodotte tre tipologie principali:

- frontale*,*
- ad emiciclo*,*
- centrale.

che combinate producono a loro volta variazioni multiple.

3.4.1.Sala con disposizione frontale

Nella disposizione frontale o rettangolare domina la contrapposizione tra sala e scena. Ha origini diverse: forse nata per il gioco della pallacorda, di certo come luogo di culto, o semplicemente come sala vuota per riunioni o per sentire musica. L'evoluzione di tale tipologia sono la sala a gradoni, la sala bifrontale e quella con gradinate laterali.
Esempi tipici sono: l'Altes Gewandhaus di Lipsia (1781), Boston Symphony Hall (1900).

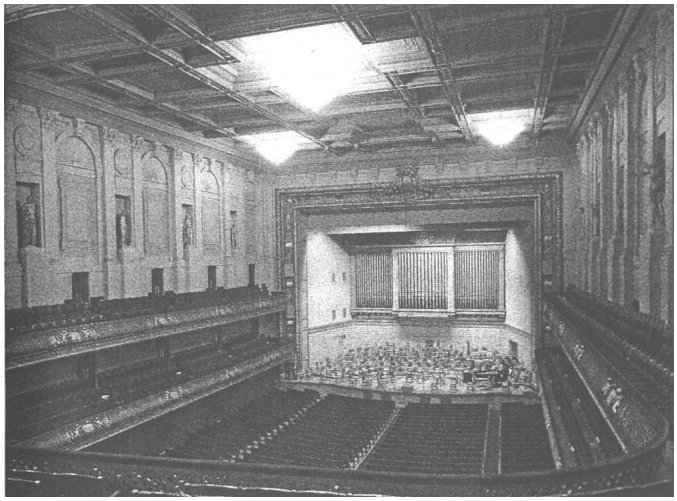

Figura 12: Boston Symphony Hall

3.4.2.Sala ad emiciclo

La sala ad emiciclo risale dall'emiciclo tipico dei teatri greci e romani; tali sale sono caratterizzate da un'ambiguità fondamentale: concepiti per l'opera accolgono occasionalmente anche concerti. Offre solitamente migliore visibilità per un numero maggiore di spettatori e la platea circonda in parte la scena; per contro soffre di evidenti debolezze sonore legate alle limitate riflessioni sonore che si generano nell'ambiente.
Esempi tipici sono: Teatro olimpico del Palladio a Vicenza, Teatro della Scala a Milano (1778 - Piermarini), Odeon di Parigi (1782 - M.J. Peyre), Sala Beethoven di Bonn (1989).

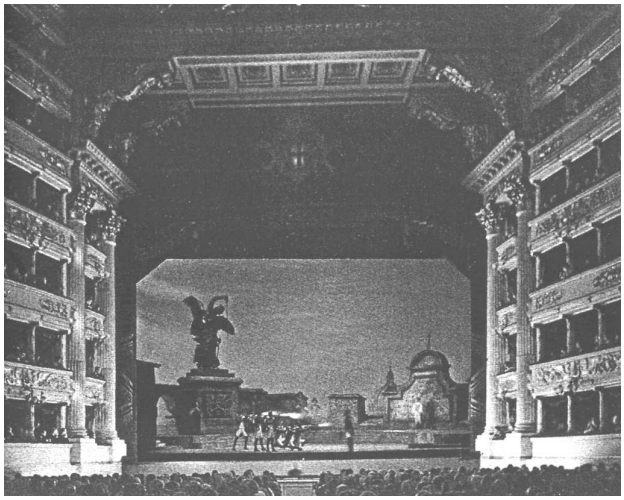

Figura 13: Teatro della Scala

3.4.3.Sala con configurazione centrale

Nella configurazione centrale l'orchestra è circondata dagli spettatori. Uno dei primi progetti di tale tipologia risale a Leonardo da Vinci, anche se la prima sala di questo tipo fu realizzata solo nel 1963. Il concetto fondamentale è quello di ritenere la musica punto focale: il direttore e l'orchestra si trovano spazialmente e visivamente al centro vero e proprio dei fatti: sono accerchiati completamente dal pubblico. Si vuole eliminare la differenziazione tra produttori e consumatori dell'evento musicale puntando ad una continuità di ascoltatori raggruppata intorno all'orchestra nella più naturale delle disposizioni. Questa disposizione presenta uno svantaggio nella distribuzione sonora in sala: il pubblico dietro l'orchestra risente di minore impatto sonoro legato alla direttività tipica degli strumenti musicali. [10]

Esempi tipici: Muziekcentum Vredenburg di Ultrecht (1977), Filarmonica di Berlino (1987).

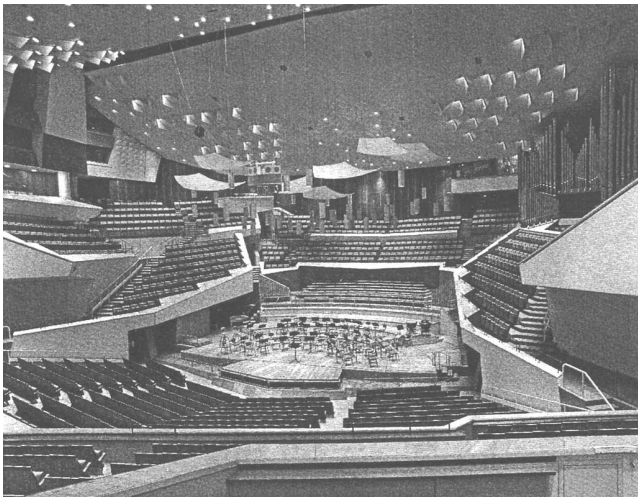

Figura 14: Filarmonica di Berlino

CAPITOLO 4
Tecniche e strumenti di misura

Il tempo di riverberazione è stato storicamente il primo parametro utilizzato per quantificare le caratteristiche acustiche di un ambiente. Può essere effettuata con due modalità: con la tecnica della misura del livello sonoro dopo l'interruzione di un segnale continuo, la stazionarietà interrotta, che può essere un rumore a banda larga o stretta, oppure con tecniche chiamate “impulsive" perché tendono a determinare, generalmente in modo indiretto, la risposta dell'ambiente sotto studio ad un impulso sonoro “istantaneo", come MLS.

La definizione dell'RT_{60} deriva dalle misure di Sabine ed è legata al modo in cui si misurava il decadimento del suono, ossia con il solo organo uditivo umano.

La catena standard per la misura dei parametri dell'acustica ambientale prevede una serie di trasduttori (altoparlanti) per diffondere i segnali acustici di test nell'ambiente sotto esame ed altri per riprenderli (microfoni), nonché le apparecchiature per generare i segnali di test e per registrare l'uscita dei microfoni. Le strumentazioni più vecchie registravano su un nastro di carta la risposta dell'ambiente al segnale di test (solitamente una curva di decadimento): il segnale di trasduzione proveniente dal microfono era posto all'ingresso di un amplificatore differenziale il cui altro ingresso era connesso ad un potenziometro di precisione che era collegato meccanicamente alla penna scrivente. L'uscita dell'amplificatore differenziale controllava la penna scrivente che si muoveva su un rotolo di carta in cui era rappresentata già la scala appropriata su cui poter scrivere. Per stimare la pendenza della curva di decadimento si usava in genere uno speciale goniometro. Questo tipo di registratore ha rappresentato lo standard per le misure in acustica per molti anni ed affianca tuttora le strumentazioni più moderne in molte applicazioni. Con lo sviluppo delle tecnologie e delle strumentazioni digitali i sistemi di registrazione sono cambiati notevolmente, soprattutto negli ultimi dieci anni: i segnali di test in uscita (verso gli altoparlanti), generati in forma digitale, vengono convertiti con un DAC, mentre quelli in ingresso (dai microfoni) sono inviati ad un ADC, per poi essere registrati digitalmente su hard disk. Ciò nonostante, in molti laboratori sono ancora presenti alcuni dei vecchi registratori di livello B&K per la loro robustezza e precisione.

La strumentazione per la misura dei parametri acustici di un ambiente è sempre stata sviluppata da poche aziende estremamente specializzate nel settore. Ciò è dovuto ai trasduttori da taratura che sono tuttora sicuramente gli elementi della catena di misura

più specialistici e, per questo, più costosi. Tuttavia il forte incremento negli ultimi anni della potenza di calcolo dei computer (anche dei portatili laptop) e l'ottima qualità delle interfacce audio portatili (USB2 e FireWire) hanno fatto sì che l'acquisizione di dati audio digitali sia oggi possibile per qualsiasi computer standard, avendo a disposizione i trasduttori necessari per la specifica situazione. Ciò ha influito nello sviluppo di software dedicati a questo tipo di misure, piuttosto che in quello di sistemi hardware completi. I primi programmi emulavano solamente le procedure già implementate nei precedenti sistemi hardware per misurare i parametri standard, come ad esempio il tempo di riverberazione.
Successivamente sono stati sviluppati altri programmi che, basandosi sulla misura diretta di una risposta all'impulso di un ambiente (RIR, Room Impulse Response), possono derivare numerosi parametri ed informazioni. Le più moderne apparecchiature digitali permettono di registrare i dati e di stimare automaticamente i parametri: provvedono ad alimentare la sorgente con un opportuno segnale, interrompono il segnale stesso al momento appropriato, valutano direttamente la pendenza della curva di decadimento e memorizzano il tempo di riverberazione così ottenuto alla frequenza di misura.
Oggi gli algoritmi per il processamento dei segnali, come le tecniche di convoluzione digitale in tempo reale, costituiscono il nucleo di numerose applicazioni che svariano nei diversi settori dell'acustica come quella ambientale ed architettonica, la costruzione e taratura dei trasduttori e la vibroacustica. Persino alcuni plugin audio molto comuni per la simulazione di sistemi, come riverberi a convoluzione, equalizzatori di frequenza e compressori di dinamica si avvalgono di questi algoritmi. Anche per questo ha acquisito molta rilevanza lo sviluppo delle tecniche per l'estrazione delle risposte all'impulso (IR, Impulse Response) dei sistemi. [11]

4.1.Stazionarietà interrotta

Per come è definito il tempo di riverberazione, la sua misura deve consentire di valutare il decadimento del rumore stazionario interrotto, partendo da una condizione di regime.
Il primo metodo utilizzato storicamente fu introdotto da Sabine e deriva direttamente dalla definizione che egli ne diede. Si tratta di misurare il tempo necessario ad ottenere, dallo spegnimento di una sorgente sonora stazionaria in condizioni di regime, un decadimento del livello di energia sonora dell’ambiente pari a 60 dB. Si noti che la definizione di Sabine non esplicita l’istante dal quale si debba iniziare a misurare il

decadimento una volta spenta la sorgente; questo perché l'intensità sonora non diminuisce immediatamente, ma dopo un Δt pari al tempo impiegato dall'onda sonora diretta a raggiungere il punto d'ascolto o di misura.
In molti casi non è possibile ricavare il tempo di riverberazione dalla definizione di Sabine in quanto non si riesce a registrare un decadimento di 60 dB.
Questo può essere dovuto dal rumore di fondo raggiunge facilmente livelli di densità di energia di 20-30 dB, e quindi, dato che la maggior parte delle misure viene fatta con segnali di 85-95 dB, risulta difficile, se non impossibile, stimare il decadimento di 60 dB in quanto la sorgente sonora dovrebbe sovrastare il rumore di fondo per più di 60 dB. Inoltre, il livello sonoro che il sistema amplificatore-altoparlante può produrre è limitato, soprattutto alle basse frequenze, dalla potenza dell'amplificatore e dalla distorsione dell'altoparlante.
Per questi motivi nella maggior parte dei software moderni per il calcolo dei parametri acustici ed anche nelle normative ISO si usa definire operativamente l'RT_{60} come il doppio del tempo misurato in un decadimento da -5 a -35 dB sotto il valore iniziale del livello sonoro di un campo riverberante, questo RT è usualmente indicato come RT_{30}. [12]
In maniera del tutto analoga è possibile ricavare il tempo di riverberazione sulla base di molti altri interventi di decadimento; i più usati sono sicuramente T_{10}, T_{15} e T_{20}, che peraltro risultano essere direttamente collegati alla sensazione di riverberazione prodotta dall'orecchio umano di quanto non lo sia il Tempo di Riverberazione Classico.
Si ricorre quindi ad un'estrapolazione della prima parte della curva di decadimento. In teoria, se il decadimento della densità di energia fosse esattamente esponenziale, come previsto dal modello lineare, la curva sarebbe una retta con pendenza costante e, di conseguenza, l'estrapolazione non porterebbe ad alcun errore. In pratica, invece, le curve di decadimento misurate in molte situazioni non sono rettilinee ma presentano doppie pendenze o curvature non trascurabili, per cui la definizione operativa di RT_{60} attualmente in uso non corrisponde a quella originale di Sabine.
Per poter procedere alla progettazione o alla correzione acustica si richiede generalmente il tempo di riverberazione a diverse frequenze. Questo tipo di misure può essere fatto con due modalità: zona per zona, usando segnali con contributi solo in una fascia ristretta di frequenza, oppure in un'unica operazione, emettendo un segnale a banda larga ed analizzando spettralmente il segnale acquisito. Per questo motivo, alcune delle strumentazioni automatizzate più moderne utilizzano segnali filtrati in terzi d'ottava, in modo da concentrare l'energia sonora in un ristretto campo di frequenza, migliorando così il rapporto segnale-rumore, e, dopo aver analizzato tutte le bande di frequenza, forniscono i dati misurati in forma tabellare. Altre strumentazioni sono in grado invece di processare simultaneamente tutte le bande di frequenza. La sorgente

sonora viene solitamente alimentata con un rumore rosa o bianco: questo penalizza leggermente le condizioni di misura poiché la potenza viene dispersa su tutte le frequenze ed il rapporto segnale-rumore si riduce, tuttavia con questo metodo si riesce ad ottenere una forte riduzione dei tempi di misura.
Si ottiene quindi l'acquisizione di un multispettro, ossia una serie di spettri acquisiti ad intervalli regolari molto brevi: in questo modo, con una sola misura, sono rese disponibili le informazioni sul decadimento sonoro di tutte le bande di frequenza.

4.2.Risposta dell'impulso

Oltre alla stazionarietà interrotta, derivante dall'idea iniziale di Sabine, nella pratica si ricorre spesso a sorgenti sonore quali il colpo di pistola a salve, lo scoppio di un palloncino o con un battito di mano: le tecniche di misura del tempo di riverberazione impiegate in questo caso prendono il nome di tecniche impulsive. Sotto opportune ipotesi esse consentono di ricostruire, dalla misurazione della Risposta dell'Impulso, l'equivalente curva di decadimento propria di una sorgente in funzionamento continuo, impiegando una tecnica numerica sviluppata da Schroeder. Il loro utilizzo trae origine dal fatto che, nonostante il tempo di riverberazione costituisca sicuramente il parametro oggettivo da determinare in un ambiente chiuso, esso da solo non basta a spiegare le diverse sensazioni uditive riscontrabili fra varie sale con un medesimo RT, o fra punti di una stessa sala. Questo perché il tempo di riverberazione descrive solo il decadimento del livello sonoro che si verifica dopo un certo intervallo di tempo dall'arrivo del suono diretto; durante questo pur breve lasso di tempo giungono all'orecchio le prime riflessioni provenienti da pareti laterali, soffitto e pavimento. [13]
Grazie a queste considerazioni si può affermare che il contenuto informativo necessario e sufficiente per una completa caratterizzazione dell'acustica di una sala è racchiuso nella sua risposta all'impulso, che comprende il rilevamento di altri indici.

Se x(t) rappresenta il segnale emesso dalla sorgente e y(t) è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema (considerato in gergo black box), essi sono tra loro correlati dalla risposta all'impulso dell'ambiente, chiamata h(t). Se nell'ambiente è presente un segnale disturbante (per esempio rumore di fondo n(t)), l'uscita y(t) ne subisce la modifica.

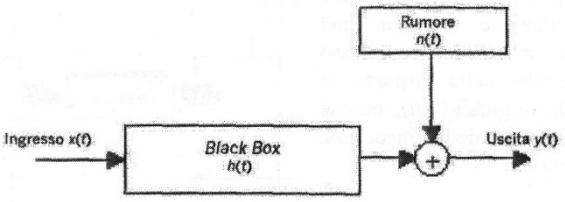

Figura 15: Black Box

La risposta all'impulso h(t) è la risposta del sistema nell'ipotesi che la sorgente sonora generi un segnale x(t) particolare, ossia un solo impulso unitario, preceduto e seguito da una infinità di zeri. Esso è chiamato *funzione delta di Dirac*:

$$\delta(t) = 0 \, per \, t \neq 0 \; e \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

Dato un segnale qualsiasi x(t) generato dalla sorgente, il segnale percepito dal ricevitore in una particolare posizione si ottiene tramite il cosiddetto integrale di convoluzione, dato dall'espressione:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau$$

Quando *x(t)* è la pressione sonora della sorgente, l'uscita *y(t)* è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale si possono calcolare i parametri acustici di interesse.

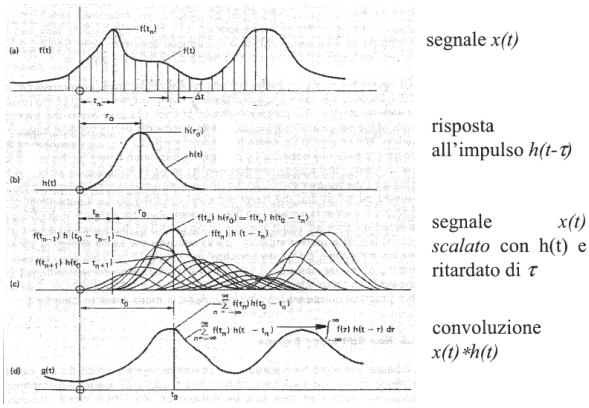

Figura 16: Convoluzione

La tecnica di misura della risposta all'impulso è teoricamente molto semplice: basta immettere nel sistema la funzione impulsiva ideale di Dirac, segnale costituito da un campione avente il valore massimo consentito dalla rappresentazione digitale impiegata, seguito solo da numeri nulli.

Questa misurazione è difficile da mettere in pratica perché, alimentando un altoparlante con il segnale, esso dovrebbe essere in grado di produrre un impulso molto breve e di elevata potenza (almeno 60 dB sopra il rumore di fondo).

La soluzione al problema è la deconvoluzione della risposta all'impulso a partire da una misura effettuata impiegando come segnale di test un segnale casuale, ad esempio un

rumore bianco. Si supponga di trovare due segnali tali che il loro prodotto di convoluzione fornisca la funzione di Dirac:

$$x^{-1} * x = \delta$$

Il prodotto di convoluzione gode della proprietà commutativa, quindi:

$$y * x^{-1} = x * h * x^{-1} = h * x * x^{-1} = h * \delta = h$$

data la proprietà fondamentale della funzione di Dirac di essere neutra rispetto al prodotto di convoluzione.

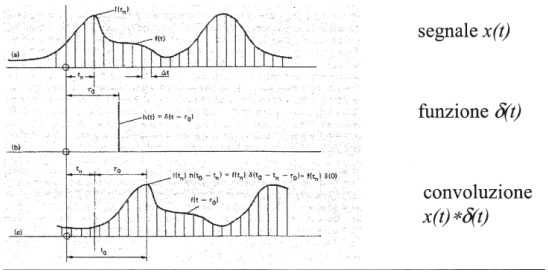

Figura 17: Convoluzione

Il problema consiste nel determinare una coppia di segnali

- *x* utilizzabile come test nell'ambiente di prova;
- x^{-1} (chiamato filtro inverso) da convolvere con l'output del segnale nell'ambiente stesso.

Non è semplice determinare tale coppia di segnali, a meno che il segnale di partenza *x* sia costruito in modo da avere particolari proprietà matematiche, come il segnale MLS.
Con l'introduzione della trasformata di Fourier (Fourier Transform, FT) è possibile passare da una analisi nel dominio del tempo ad una analisi nel dominio della frequenza: convolvere due segnali in ambito temporale è equivalente a fare il prodotto delle trasformate di Fourier dei due segnali nel dominio delle frequenze:

$$x(t) * y(t) = X(f) * Y(f)$$

Il prodotto di convoluzione diventa quindi:

$$y(t) = x(t) * h(t) \xrightarrow{FT} Y(f) = H(F) * X(f)$$

e

$$x(t) \xrightarrow{FT} X(f)$$

$$y(t) \xrightarrow{FT} Y(f) \qquad => \qquad H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \xrightarrow{FT^{-1}} h(t)$$

$$h(t) \xrightarrow{FT} H(f)$$

4.2.1.Il segnale MLS

Si può scegliere il segnale di ingresso per lo studio dell'ambiente in modo opportuno, mantenendo le caratteristiche utili, cioè la presenza di tutte le frequenze con componenti spettrali non nulle e cercando di ottenere ulteriori vantaggi.
Un segnale particolare per la misura della risposta all'impulso è il segnale MLS (Maximum Lenght Sequence): è una sequenza binaria costruita tramite uno shift register, un registro a scorrimento.

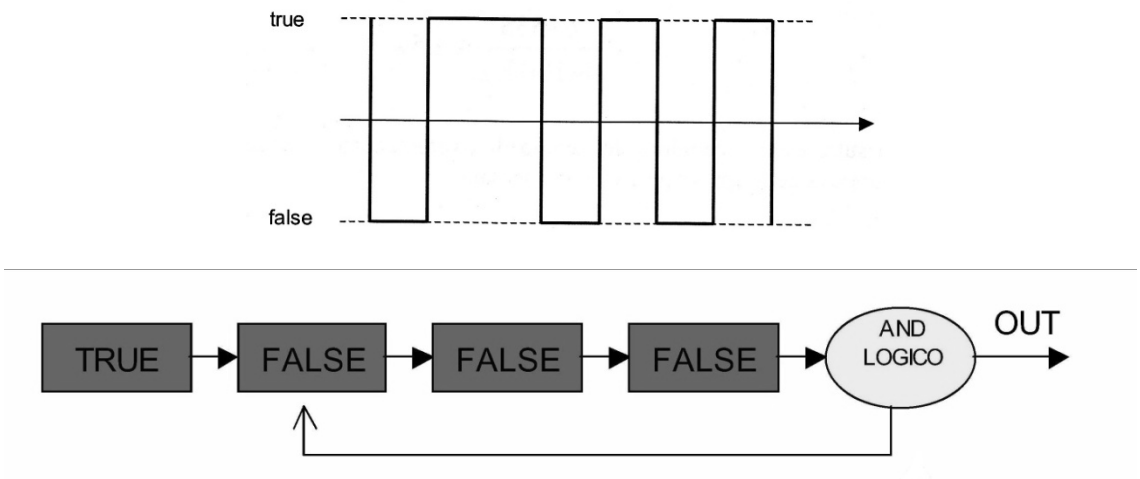

Figura 18: MLS

Uno shift register ha un numero N di celle e la sua lunghezza l, intesa come numero di bit del segnale MLS generato, dipende da N secondo la relazione:

$$l = 2^N - 1$$

La scelta del numero di celle è strettamente dipendente dal tempo di riverberazione T del nostro ambiente oggetto di analisi; in particolare la lunghezza temporale L del nostro segnale, che altro non è che la lunghezza l divisa per la frequenza di campionamento f, deve essere:

$$L > T$$

Le sequenze MLS godono di particolari proprietà:

- poiché la sequenza è nota, si trova matematicamente MLS come inversa nel tempo della sequenza originale;
- MLS è una sequenza binaria fatta solo di 0 e 1 e quindi il prodotto di convoluzione è molto semplice essendo costituito solo da somme;
- essendo lo spettro sonoro dell'MLS piatto come quello del rumore bianco, è possibile anche calcolare l'analisi in frequenza senza il rischio di incontrare componenti nulle.

Il problema principale della misura con tecnica MLS è dovuto alla suscettibilità a

fenomeni di distorsione non lineare presenti nella catena elettroacustica, in particolare nei trasduttori (soprattutto altoparlanti e microfoni): tali effetti non lineari causano, a valle del processo di deconvoluzione, la comparsa di picchi nel segnale misurato che rovinano completamente la risposta all'impulso misurata.

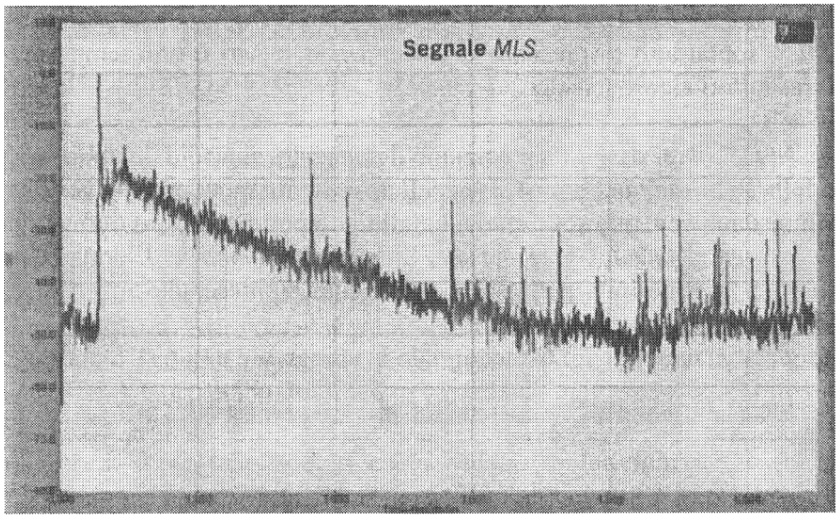

Grafico 4: Il segnale MLS

La tecnica MLS può essere usata solo con riproduttori audio molto fedeli, fatti funzionare ben al di sotto del loro limite di distorsione. [6]

4.3.Confronti

Dopo aver visto come la risposta dell'impulso contenga tutte le informazioni riguardanti il campo acustico caratteristico di un dato ambiente, e dopo aver esaminato le principali tecniche che ne consentono la rilevazione sperimentale, ricorrendo a sorgenti di segnale continuo od impulsivo, si considera ora il legame che intercorre fra la risposta all'impulso ed il tempo di riverberazione. Tale relazione è stata studiata da Schroeder, il quale ha dimostrato come il tradizionale decadimento riverberante rilevabile allo spegnimento di una sorgente di rumore stazionaria sia legato ad un integrale della risposta dell'impulso. Una volta ricavato il tracciato del decadimento sarà possibile ottenere il tempo di riverberazione utilizzando uno dei procedimenti descritti nel paragrafo precedente. Oggi sono disponibili dei software in grado di effettuare automaticamente la misurazione ed integrazione della risposta all'impulso; i risultati così ottenuti sono confrontabili con l'RT misurato classicamente, dal decadimento di 60 dB dal livello della pressione sonora in seguito all'interruzione dell'emissione di una sorgente a regime.

L'integrazione di Schroeder inoltre è molto utile per la misura dei tempi di prima

riverberazione, poiché restituisce una curva di decadimento molto dettagliata nei primi millisecondi.

Tuttavia nel caso di decadimento non esponenziale si riscontrano delle marcate differenze fra i due metodi: la pendenza della curva integrata, all'avvicinarsi al termine della risposta all'impulso, cambia a causa dell'integrazione del rumore di fondo, potendo far pensare ad un caso di decadimento a doppia pendenza.

Le moderne apparecchiature per la misurazione del tempo di riverberazione mediante tecniche impulsive incorporano degli algoritmi per la rimozione degli effetti del rumore di fondo in fase di integrazione, consentendo così di ottenere un decadimento immune da doppie pendenze.

In ogni caso, nonostante le discrepanze appena evidenziate, secondo Schroeder è proprio il valore del tempo di riverberazione misurato della risposta all'impulso integrata ad essere meglio correlato con la sensazione soggettiva. [12]

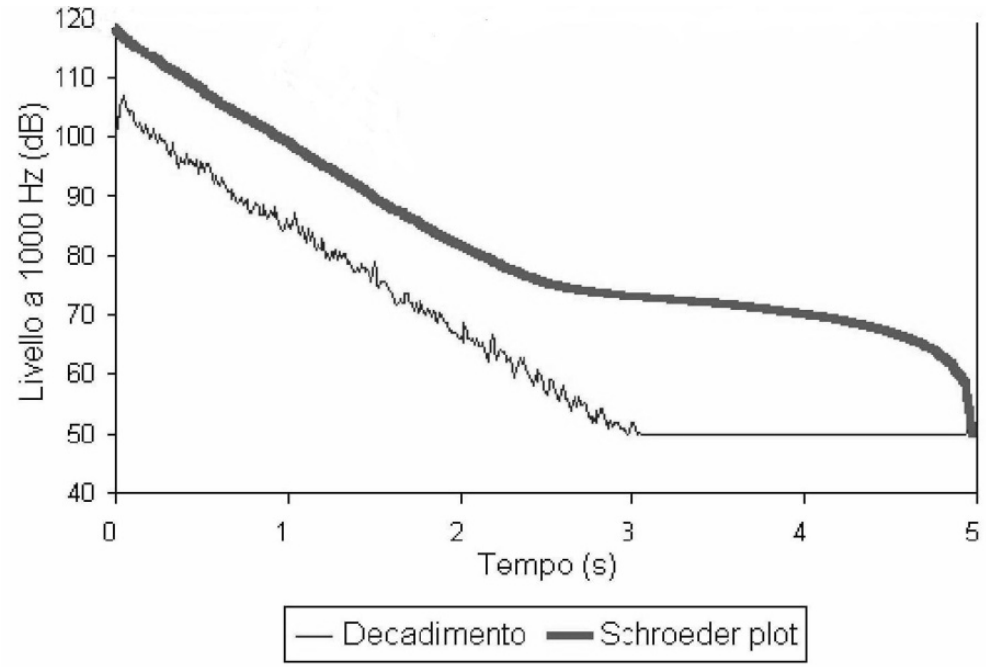

Grafico 5: Confronto fra decadimento misurato in maniera classica e decadimento calcolato, a partire dallo stesso segnale, con tecnica impulsiva mediante integrazione di Schroeder [6]

4.4.Strumentazione

Per le misurazioni è stata impiegata la seguente strumentazione:

- sorgente sonora Brüel & Kjœr 2716 (figura 19)
- microfono Brüel & Kjœr – numero di serie 2143263 – prepolarizzato per campo diffuso – diametro ½" (figura 20)

il microfono è conforme con:
CEI 60651 ('79) Classe 1, emendamento 1
CEI 60804 ('85) Classe 1, emendamento 2
CEI 61260 ('95) bande d'ottava e di 1/3 d'ottava. Classe 0

Per le misurazioni è stato utilizzato un computer portatile, con istallato software dBBATI32.

Figura 19: a: la sorgente sonora Brüel & Kjœr; b: la sorgente sonora Brüel & Kjœr durante le misurazioni

Figura 20: Micofono Brüel & Kjœr durante le misurazioni nella gradinata

CAPITOLO 5
Scopo dello studio

Grazie alle tecniche e agli strumenti di misura illustrati nel precedente capitolo sono state effettuate le misure presso il Teatro Sociale di Rovigo.
L'applicazione di metodi sperimentali sono serviti alla verifica delle condizioni attuali dell'ambiente sonoro, in quanto non erano mai stati effettuati studi sperimentali nel teatro di Rovigo.
La scopo dello studio è stato quindi quello di valutare l'acustica del Teatro elaborando ed analizzando gli indici trovati, confrontandoli con i dati presenti in letteratura su teatri in cui l'acustica è eccellente.

CAPITOLO 6
Verifica sperimentale

6.1.Rumore di fondo del teatro

Sono state operate sei sessioni di misura del rumore di fondo: tre posizionando il microfono in platea, le altre tre nella gradinata, sono stati poi mediati i valori nelle due posizioni. I valori trovati sono stati inseriti nei grafici in terzo d'ottava 6 e 7.
Ponderando i valori con la scala A per la platea il rumore di fondo è di 38 dB(A) mentre per la gradinata è pari a 18 dB(A).
Il rumore di fondo è causato soprattutto dal traffico esterno l'edificio, in quanto durante le misurazioni non erano accessi impianti interni.
Da questi valori si evidenzia che il rumore di fondo è superiore in platea, ciò è dovuto al rinforzo in platea causato dal soffitto a cupola e alla gradinata che assorbe molto. Quest'ultimo aspetto è dovuto dalle pareti e dai pavimenti ricoperti da materiale fonoassorbente e dalla presenza di molti tendaggi.

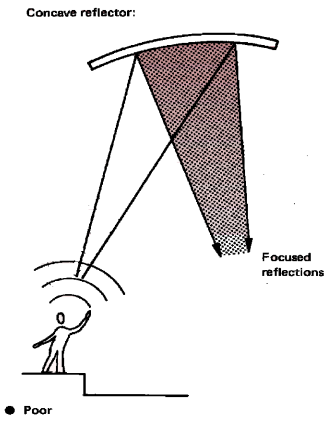

Figura 21: Soffitto a cupola

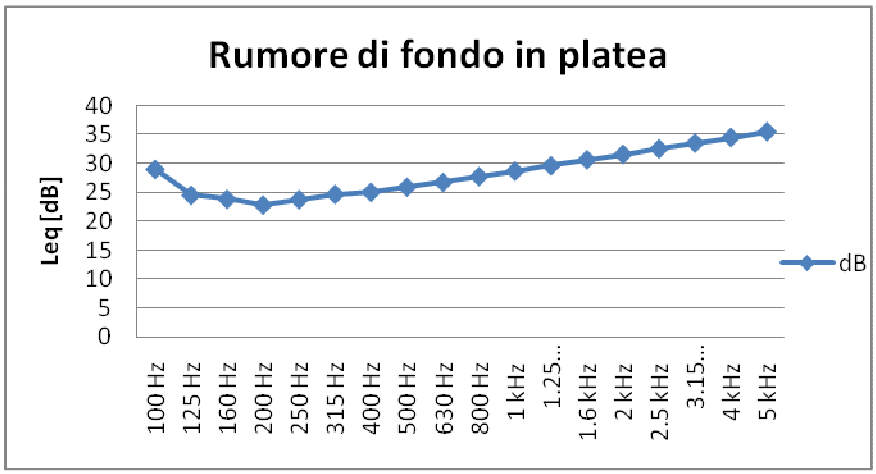

Grafico 6: Rumore di fondo in platea

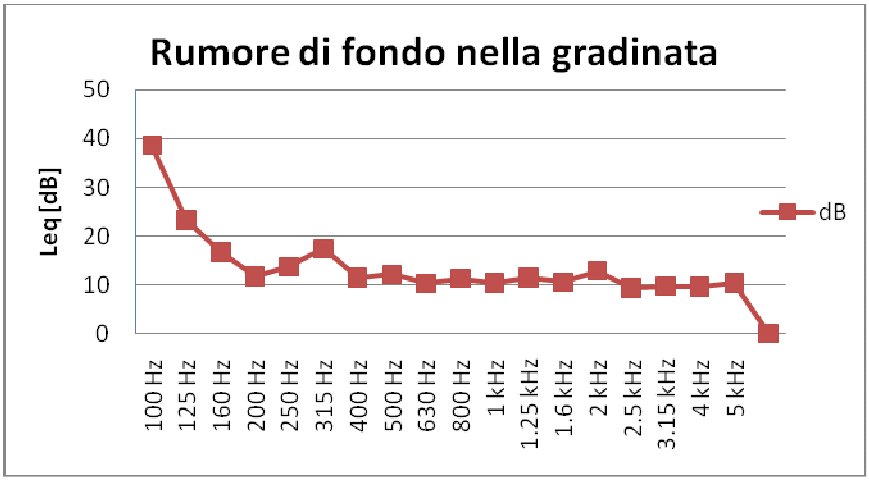

Grafico 7: Rumore di fondo nella gradinata

I valori in terzo d'ottava stati poi confrontati con le curve Noise Criteria.

Come evidenziato nel grafico 8, il rumore di fondo della gradinata è inferiore allo Standard su tutta la banda e quindi i valori sono soddisfacenti, in quanto stanno al di sotto dei valori raccomandati della curva NCB-10.

Per la platea, grafico 9, i valori del rumore di fondo alle alte frequenze superano la curva limite superiore NCB-15 e questo può causare disturbi in quanto possono fungere da suoni mascheranti. I valori alle medie frequenze sono compresi tra le due curve e nemmeno questa è una buona situazione. Fortunatamente vi è maggiore attitudine dei suoni di minore frequenza a mascherare quelli di frequenza più alta.

Un rimedio potrebbe essere quello di aumentare l'assorbimento del soffitto.

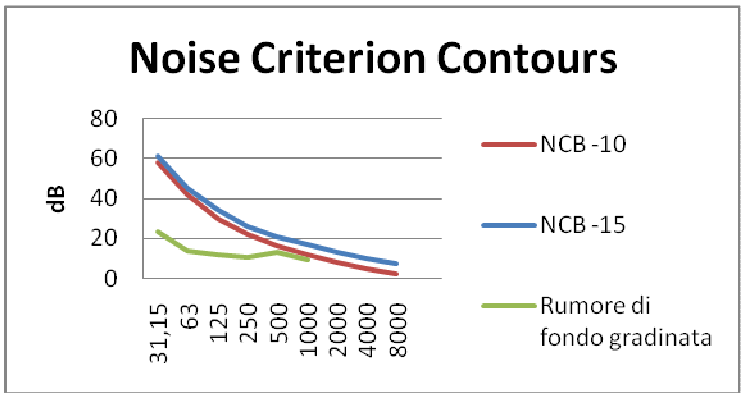

Grafico 8: Confronto fra rumore di fondo nella gradinata e le curve Noise Criterion Contours

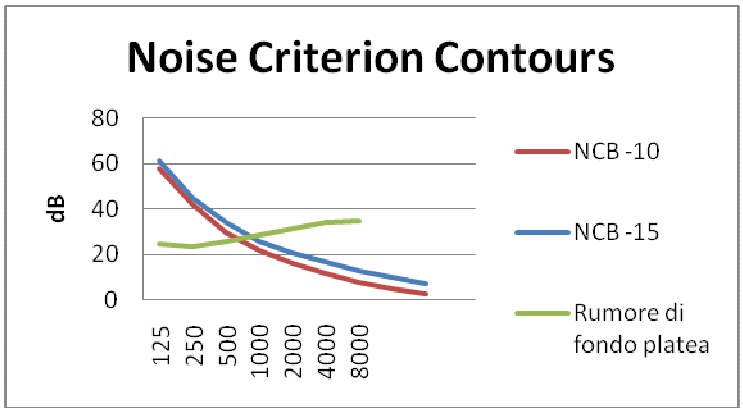

Grafico 9: Confronto fra rumore di fondo in platea e Noise Criterion Contours

6.2.Stazionarietà interrotta

Con il metodo della stazionarietà interrotta è stato misurato il tempo di riverberazione del teatro, in particolare nella gradinata e in platea.

Il tempo di riverberazione è stato misurato a teatro vuoto; questo è stato possibile in quanto nelle misure sperimentali dei teatri più importanti del mondo il valore a teatro vuoto e quello occupato varia di 0,2 secondi soltanto in media. Questo similitudine è possibile dall'elevato assorbimento delle poltrone imbottite utilizzate che non creano elevate differenze tra teatro vuoto, occupato ad 1/3 o a 2/3 e teatro occupato.

I valori di RT in terzo di ottava sono rappresentati nei grafici 10 e 11 e poi confrontati nelle tabelle 5 e 6.

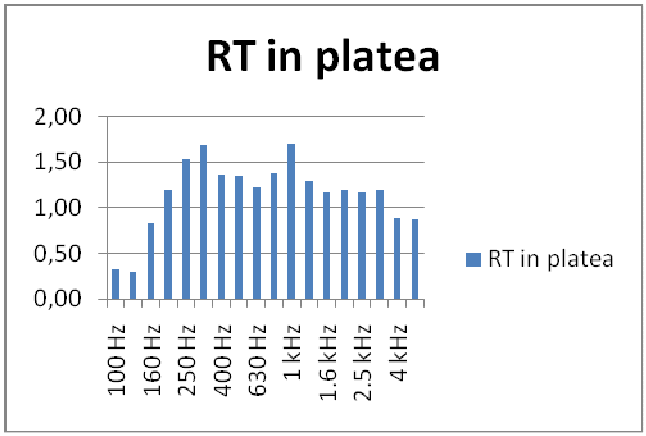

Grafico 10: RT in platea

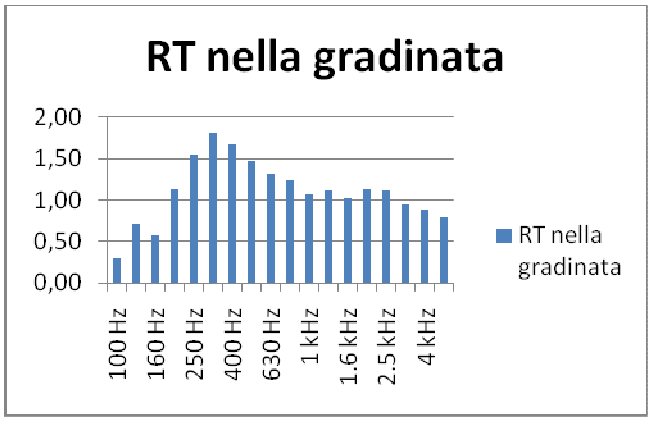

Grafico 11: RT nella gradinata

	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1.25 kHz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz
platea	0,33	0,29	0,82	1,20	1,53	1,69	1,37	1,35	1,22	1,38	1,69	1,30	1,17	1,19	1,17	1,19	0,89	0,87
gradinata	0,29	0,72	0,57	1,12	1,55	1,80	1,67	1,48	1,31	1,23	1,08	1,12	1,02	1,12	1,11	0,95	0,88	0,78

Tabella 5: Confronto RT in platea e nella gradinata

Valori medi per le frequenze 200-500-1000-2000 Hz	
platea	1,37
gradinata	1,32

Tabella 6: Valori medi

Nel complesso vediamo che RT alle medie frequenze è compreso tra 1 e 1,5 secondi; questo è un buon risultato in quanto per i teatri d'opera RT è compreso tra 1,3 e 1,5 secondi.

Dal tempo di riverberazione possiamo anche dedurre che il teatro non è molto adatto per concerti, in quanto questi necessitano di un tempo di riverberazione maggiore; le migliori concert halls hanno infatti RT che arrivano ai 2 secondi.

Possiamo notare che alle alte frequenze i valori di RT sono maggiori in platea, ovvero

c'è un rinforzo in platea. RT è più basso nella gradinata perché questi assorbono molto ed il soffitto a cupola assorbe molto.
È interessante osservare che il teatro presenta una buona omogeneità nelle diverse posizioni analizzate.

6.3.Risposta dell'impulso

Per il Teatro di Rovigo sono stati rilevati i vari indici nelle seguenti 4 posizioni: P1, P2, P3 nella gradinata e al centro della platea. In figura 22 sono segnate le posizioni di P1, P2 e P3:

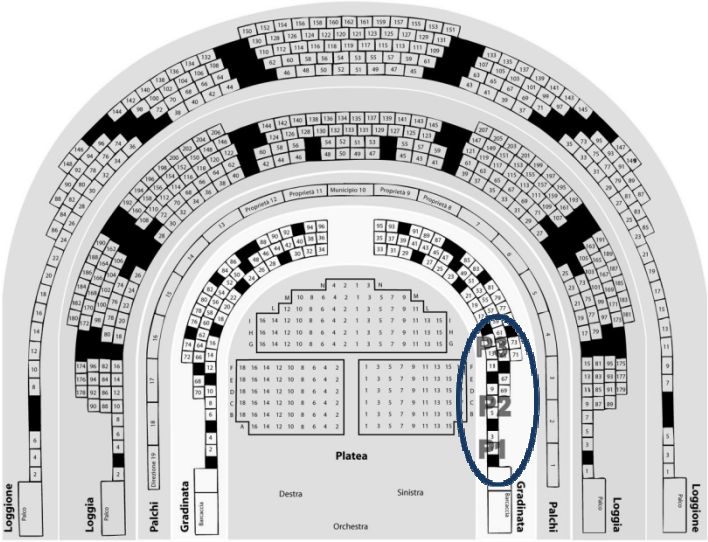

Figura 22: Posizioni P1, P2 e P3

6.3.1.Il tempo di riverberazione

È stato misurato il tempo di riverberazione con il metodo dell'impulso nelle 4 posizioni in cui sono stati ricavati i valori in banda di ottava della tabella 7.
Sono stati poi calcolati i valori medi nelle 4 posizioni P1, P2, P3 e platea che sono rispettivamente 1,14, 1,24, 1,19, 1,26 secondi.
Da questi valori e da quelli trovati con il metodo della stazionarietà interrotta (in platea 1,37 e nella gradinata 1,32) è possibile affermare che il teatro si inserisce bene nel valore che viene assegnato in letteratura per un teatro d'opera avente un volume di circa 9000 m^2.
Infatti, guardando il grafico 3 (paragrafo 3.2.1.1) possiamo ricavare il tempo di riverberazione in base al volume della sala e della funzione a cui è adibita.

Per il teatro di Rovigo il valore perfetto sarebbe pari a 1,4 s.

RT	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
P1	1,0	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,6
P2	0,7	1,6	1,2	1,1	1,0	0,8	0,6
P3	0,9	1,4	1,2	1,2	1,0	0,9	0,6
platea	1,1	1,6	1,3	1,2	1,0	0,9	0,6

Tabella 7: RT nelle 4 posizioni

6.3.2. Early Decay Time (EDT)

I valori medi nelle quattro posizioni sono rispettivamente 1,07, 1,30, 1,18, 1,17.

I valori sono leggermente inferiori rispetto ai tempi di riverberazione ma sempre a conferma delle buone caratteristiche come teatro d'opera.

EDT	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
P1	0,89	1,37	1,35	1,29	1,18	0,82	0,56
P2	1,10	1,52	1,67	1,47	1,44	1,10	0,80
P3	0,74	1,31	1,43	1,41	1,41	1,21	0,73
platea	0,78	1,81	1,41	1,28	1,21	1,02	0,70

Tabella 8: EDT nelle 4 posizioni

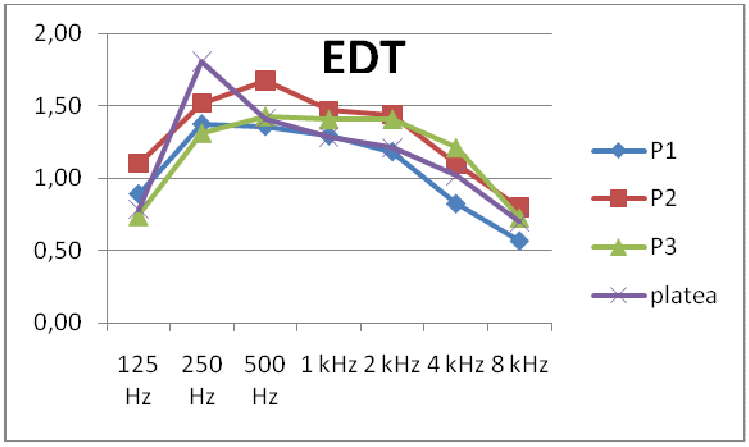

Grafico 12: EDT nelle 4 posizioni

6.3.3.Indice di chiarezza (Clarity - C_{80})

I valori medi per le 4 posizioni sono rispettivamente -0,73, -1,18, -1,13, -0,28.

Tutti e 4 i valori sono all'interno dell'intervallo che va da -2 a 2dB e questo lo rende adatto per la musica strumentale. Inoltre, il teatro è sufficientemente adatto per la musica sinfonica.

Per quanto riguarda l'opera lirica i valori sono bassi, fuori dall'intervallo che va da 1 a 4

dB.

Considerando come riferimento il Teatro della Scala di Milano che ha C_{80}=-0,11dB possiamo affermare che la chiarezza del Teatro è buona.

La chiarezza assume valori maggiori quando la linea visuale tra sorgente e ricevitore è libera e questo si può notare dai valori più elevati della posizione P1 e in platea.

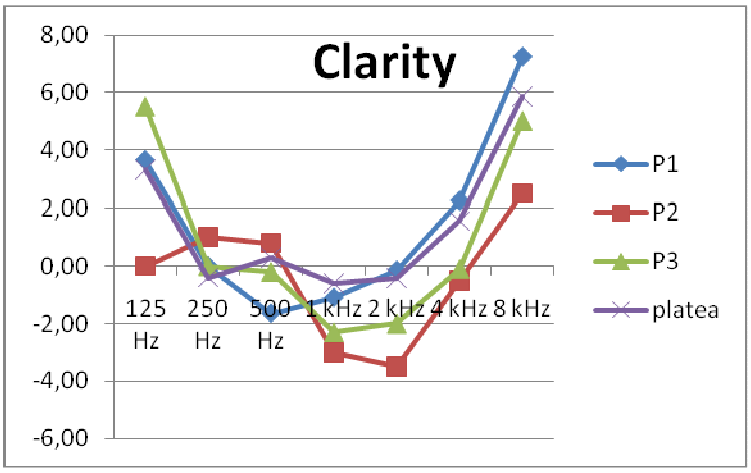

Grafico 13: Confronto fra i valori di Clarity nelle 4 posizioni

C_{80}	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
P1	3,65	0,00	-1,65	-1,10	-0,15	2,25	7,25
P2	0,00	1,00	0,80	-3,00	-3,50	-0,50	2,50
P3	5,50	0,00	-0,20	-2,30	-2,00	-0,10	5,00
Platea	3,33	-0,40	0,30	-0,60	-0,43	1,57	5,87

Tabella 9: Indice di chiarezza nelle 4 posizioni

6.3.4.Indice di definizione (Definition - D_{50})

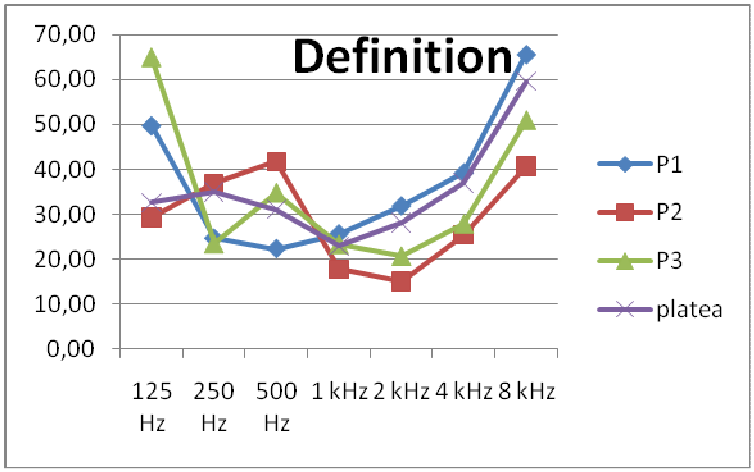

Grafico 14: Confronto fra i valori di definition nelle 4 posizioni. Valori in percentuale

D_{50} [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
P1	49,74	24,61	22,31	25,60	31,85	39,24	65,66
P2	29,25	36,88	41,70	17,80	15,11	25,44	40,65
P3	64,96	23,54	34,84	23,36	20,72	27,93	50,98
platea	32,58	35,01	31,16	22,90	28,23	37,07	59,62

Tabella 10: Indice di definizione nelle 4 posizioni

I valori trovati sono tutti inferiori al 50%: il Teatro è adatto per l'esecuzione musicale.

6.3.5.ST1 Gade

In tabella 11 e nel grafico 15 sono riportati i valori assoluti dell'indice ST1 Gade poiché i valori dell'indice sono negativi.
Considerando quindi i valori negativi vediamo che essi tendono ad essere minori del limite inferiore dell'intervallo, che va da -7,5 a -11 per un teatro d'opera: questo è dovuto all'elevato assorbimento della sala.

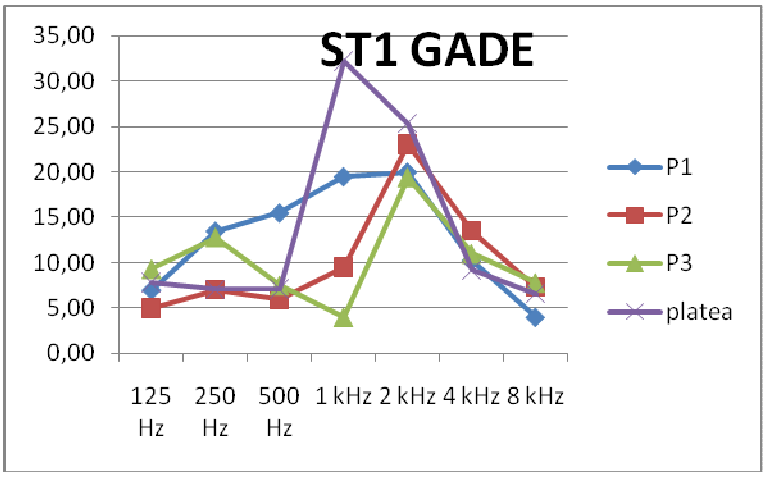

Grafico 15: Confronto fra i valori di ST1 Gade nelle 4 posizioni

ST1 GADE	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
P1	7,00	13,50	15,50	19,50	20,00	10,25	4,00
P2	5,00	7,00	6,00	9,50	23,00	13,50	7,30
P3	9,30	12,80	7,50	4,00	19,40	11,00	7,80
platea	7,83	7,03	7,10	32,20	25,33	9,17	6,60

Tabella 11: ST1 Gade nelle 4 posizioni

6.3.6.Parametri di intelligibilità: STI e RASTI

	STI	RASTI	AL_{cons}
P1	0,56	0,54	9,28
P2	0,49	0,52	12,84
P3	0,52	0,53	11,05
platea	0,52	0,53	10,96

Tabella 12: Valori di STI, RASTI e AL_{cons} misurati nelle 4 posizioni

Confrontando i dati ricavati dal Teatro con quelli presenti in letteratura (tabella 4, paragrafo 3.2.4) la qualità di trasmissione del parlato è discreta in quanto i valori di STI e RASTI si trovano nell'intervallo 0,45-0,60.
Il teatro non ha quindi un'ottima intelligibilità del parlato negli spettacoli di prosa.

Un caso analogo si era verificato per l'aula del tribunale di Sommerville (NJ) che a causa di un soffitto a cupola e balconate presentava un'acustica inaccettabile per l'intelligibilità del linguaggio causata dall'elevato tempo di riverberazione dovuto alla grande volumetria e dalla concentrazione del suono riflesso dalla cupola concava.
La richiesta era quella di migliorare l'intelligibilità, preservando l'estetica dell'aula.
La soluzione migliore fu applicare uno strato fonoassorbente spruzzato sulle pareti perimetrali e sulla cupola:

- riduzione del tempo di riverberazione;
- correzione della concentrazione sonora;
- estetica preservata poiché il trattamento è simile all'intonaco se guardato da distante. [9]

Figura 23: Aula del tribunale di Sommerville

Per il Teatro di Rovigo si potrebbe migliorare l'intelligibilità del parlato andando ad agire allo stesso modo, ovvero applicando uno strato di materiale fonoassorbente sulla cupola.

CAPITOLO 7
Conclusione

Prima di elencare le conclusioni di questo studio si vuole evidenziare che non esiste la sala da concerto perfetta per ogni esecuzione musicale, così come non esiste esecuzione musicale che si adatti alla perfezione a tutti i possibili ambienti. L'acustica della sala, infatti, influenza il modo in cui una composizione deve essere scritta, il modo nel quale deve essere eseguita e come viene recepita dall'ascoltatore; in particolare saranno molto diverse per forma e struttura una sala adatta per la musica e una sala per gli spettacoli di prosa. Peraltro è sempre più comune realizzare delle sale con potere fonoassorbente variabile come la città della musica di Roma e le sale del Pollini di Padova e del Canneti di Vicenza.

Per il Teatro di Rovigo si è giunti ai seguenti punti:

- Il Teatro, esaminando gli indici Clarity e Definition, presenta un'ottima acustica per la musica sinfonica e strumentale. Inoltre, presenta una buona omogeneità all'interno dello stesso in quanto gli indici non sono influenzati dalla posizione dell'osservatore nella sala.

- Per quanto riguarda il rumore di fondo il teatro presenta valori non accettabili alle alte frequenze in platea.

- L'intelligibilità al parlato è discreta e questo va a penalizzare l'acustica durante gli spettacoli in prosa.

- I due problemi sopra riportati sono causati principalmente dal soffitto a cupola che crea concentrazione di suono in platea. Si può agire applicando uno strato di materiale fonoassorbente sulla cupola; questo permette di evitare riflessioni non controllate. Inoltre, l'estetica è preservata, in quanto visto da lontano non si nota la differenza poiché è simile all'intonaco.

- I valori del tempo di riverberazione danno la conferma all'ottimo utilizzo che ne deriva come teatro d'opera. Per quanto riguarda l'utilizzo come sala da concerto i valori di RT sono troppo bassi.

- Il Teatro non presenta tendaggi nella parete dietro la platea, soltanto le porte dell'uscita sono rivestite da materiale assorbente. I tendaggi sono necessari per evitare riflessioni non controllate.

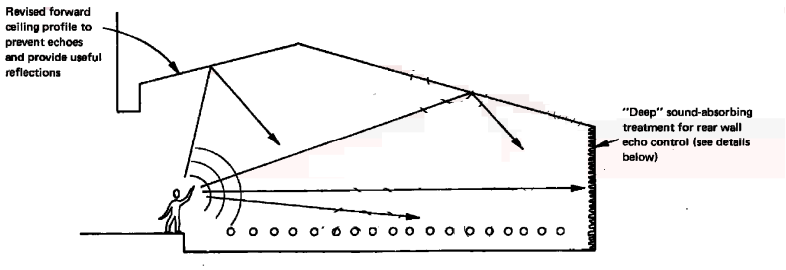

Figura 24: Riflessioni

Ringraziamenti

Sono tante le persone che devo ringraziare, perché da sola non avrei mai potuto raggiungere questo traguardo.
Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Renato Lazzarin, per aver accettato di seguirmi in quella che per me è stata una vera e propria sfida: utilizzare le conoscenze apprese durante il corso di Acustica Applicata per valutare la qualità dell'acustica di un teatro. Senza dimenticare la passione che mi ha trasmesso per questa splendida disciplina.
Un doveroso ringraziamento va all'Ing. Filippo Busato, per avermi seguita in tutta la realizzazione, da quando abbiamo portato a Rovigo tutta la delicata strumentazione, fino alla stesura della tesi.
Vorrei porgere la mia gratitudine al Direttore Artistico Stefano Romani per avermi dato l'autorizzazione per effettuare lo studio del Teatro e all'Ing. Simone Dentello per avermi procurato il materiale necessario inerente il Teatro.
Un grazie speciale va ai miei genitori senza i quali non avrei mai potuto laurearmi, per il sostegno e i sacrifici che hanno fatto in questi anni e per avermi sempre aiutata quando ne avevo bisogno.
Un grazie particolare a Eleonora e Margherita che non sono solo le mie sorelle ma sono delle vere amiche sempre presenti!
Un caloroso ringraziamento va a tutti i miei compagni di Università, con i quali abbiamo condiviso le stesse fatiche, rendendole più leggere grazie al sostegno reciproco e con i quali ho istaurato un bellissimo rapporto di amicizia. Spero di passare con loro anche i prossimi due anni!
Grazie a tutti i miei amici con i quali passando momenti di svago ho dimenticato lo studio.
Per ultimo, ma non per importanza, vorrei ringraziare il mio fidanzato, Luca, per tutto il sostegno che mi ha dato in questi anni, dandomi sempre la forza necessaria e i consigli per affrontare ogni situazione. E per essermi sempre stato accanto, non solo per festeggiare i miei successi ma anche quando anche ero in difficoltà.

Bibliografia

[1] Prodi N., 2000, “Sistemi di analisi e di Sintesi per l’acustica delle sale teatrali”, tesi di dottorato di ricerca in fisica tecnica, Bologna, pp. 7-8.

[2] Teatro di Rovigo (www.comune.rovigo.it/teatrosociale), 18 agosto 2011

[3] Lazzarin R., 2010, dispense del corso di “Acustica Applicata”, Vicenza

[4] Lazzarin R., Strada M, 2000*, Elementi di acustica tecnica*, Padova: Cleup

[5] Beranek L., 1996, *How They Sound concert and opera halls*, USA: Acoustical Society of America

[6] Busato F, Castellotti F., 2010, “Indicatori acustici”, materiale didattico, Vicenza, pp. 8-48

[7] Bradley J. S., Reich R. D., Norcoss S. G., 1999, “On the Combined Effects od Signal to Noise Ratio and Room Acoustics on Speech Intelligibility”, Journal Acoustical Society of America, vol.106, pp.1820-29

[8] Atal D. S., Schroeder M. R., Sessler G. M., West J. E., 1966, “Evaluation of Acoustics Properties of Enclosures by Means of Digital Computers”, Journal Acoustical Society of America, vol.40, pp. 428-433

[9] Houtgast T., Steneeken H.J.M., 1973, “The modulation transfer function in room acoustics as a Predictor of speech Intelligibility”, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 54, p. 557

[10] Busato F, Castellotti F., 2010, “Progettazione acustica delle sale”, materiale didattico, Vicenza, pp. 2, 6-12

[11] Masci D., 2008, “Parametri fisici dell'acustica ambientale”, tesi di laurea, Firenze

[12] Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V., 2000, *Fundamentals of Acoustics*, New York: John Wiley and Sons.

[13] Vettorato M., 2006, “La correzione acustica della palestra del Conservatorio A. Pedrollo di Vicenza”, tesi di laurea, Vicenza