

POLITECNICO DI TORINO  
I FACOLTA' DI ARCHITETTURA  
Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città  
**Tesi meritevoli di pubblicazione**

---

**“L’influenza delle balconate sulla qualità acustica delle sale da concerto”**

di Denise Barbaroux

Relatore: Arianna Astolfi

Correlatore: Tomás Méndez Echenagucia

Per valutare le qualità acustiche di una sala da concerto, si fa riferimento ad alcuni indici acustici. Quelli trattati all’interno della tesi sono il tempo di primo decadimento (EDT), la chiarezza (C80), l’intensità soggettiva del suono diretto (G) e la frazione della prima energia laterale (LF). L’obiettivo all’interno della tesi è stato proprio quello di trovare la migliore forma della sala da concerto e in particolar modo la migliore forma delle balconate affinché tali indici potessero essere ottimali.

Innanzitutto è importante introdurre la risposta all’impulso: essa determina tutti i parametri acustici della sala ed è la registrazione sonora nel tempo dell’energia sonora che arriva nel punto di ricezione a seguito dell’emissione di un segnale impulsivo dal palco.

Come già affermato le maggiori misure oggettive trattate nella tesi sono EDT, C80, G e LF.

La riverberazione è il parametro più evidente che si percepisce in un ambiente chiuso. All’interno di un ambiente chiuso, il suono prodotto in un punto raggiunge l’ascoltatore non solamente per via diretta, ma anche dopo riflessioni sulle pareti e sui pavimenti.

Wallace, professore dell’Università di Harvard, nel 1922 definì il tempo di riverberazione come il parametro fisico descrittore della percezione della riverberazione sonora. È la quantificazione della coda sonora. È definito come il tempo necessario affinché il livello sonoro in un punto della sala decada di 60 dB dall’istante di spegnimento di una sorgente sonora che emette un segnale stazionario.

$$T = 0,161 (V/A) \text{ (s)}$$

Questo parametro dipende quindi dal volume del locale V e dalle caratteristiche di assorbimento acustico A delle superfici presenti.

Esistono tempi di riverbero relativi a tempi di decadimento, non solo riferiti a 60 dB, ma a 10 dB (T10), 20 (T20) e 30 dB (T30), etc. Tutti questi valori sono però tra loro equivalenti, in quanto anche se vengono misurati su decadimenti più corti, poiché è difficile in situazioni normali avere un decadimento sonoro di 60 dB, essi sono estrapolati al T60 corrispondente. Il tempo di primo decadimento (*early decay time*, EDT o T10) è il tempo necessario per ottenere un decadimento di 10 dB di un segnale impulsivo.

La chiarezza è il parametro che indica la possibilità di percepire nitidamente i suoni.

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(\tau) d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(\tau) d\tau} \quad [\text{dB}]$$

È il rapporto tra l'energia diretta unita all'energia delle prime riflessioni e l'energia delle riflessioni successive, dove troviamo al numeratore l'energia che giunge all'orecchio nei primi 80 ms e al denominatore quella che giunge negli istanti successivi (quindi tra il suono che giunge da 0 e 80 ms e tra il suono che arriva da 80 ms all'infinito).

*Strength* o intensità soggettiva del suono diretto è il parametro che esprime il livello di suono percepito in relazione alla sua posizione ed alla potenza della sorgente sonora.

$$G = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{+\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{+\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

All'aperto un suono emesso da un'orchestra risulta più debole rispetto allo stesso suono percepito in una sala. L'indice della robustezza  $G$  è il parametro che descrive la percezione dell'intensità di un suono.

La frazione della prima energia laterale (LF) è il rapporto tra l'energia sonora riflessa lateralmente in una stanza e l'energia sonora che arriva da tutte le direzioni compresa l'energia sonora diretta dalla sorgente. Si tratta di una misura per la spazialità di una stanza.

La frazione della prima energia laterale che arriva da una direzione laterale entro 80 ms può essere misurata a partire dalla risposta all'impulso ottenuta da un microfono a forma di  $\infty$ .

È un parametro che può rappresentare oggettivamente l'ampiezza dello spazio sonoro del quale si ha percezione in una sala.

Il rapporto è espresso come:

$$LF_{early} = \frac{\int_5^{80} p_L^2(t) dt}{\int_5^{80} p^2(t) dt}$$

Nella tesi mi sono occupata principalmente delle balconate. Queste sono spesso presenti nelle sale da concerto, e permettono lo sviluppo della sala in verticale e offrono vantaggi soprattutto per quegli ascoltatori che non risiedono direttamente in esse.

Le sedute sotto le sporgenze delle balconate sono spesso svantaggiate sia per quanto riguarda l'acustica che la visuale. Uno dei più grandi problemi di progettazione delle balconate nelle grandi sale è bilanciare i vantaggi e gli svantaggi delle balconate.

Per capire l'effetto acustico di una balconata, è utile considerare le prime riflessioni e, separatamente, quelle successive. Spesso le riflessioni sono influenzate dalla presenza di una sporgenza, quale una balconata. Le riflessioni successive sono modificate in maniera significativa dalla presenza di balconate. In una seduta lontana dalle balconate, il suono riverberato arriva all'ascoltatore da più direzioni. Sotto le balconate l'angolo verticale dal quale il suono arriva alla seduta è molto ridotto. La progettazione delle sale da concerto dipende dalla definizione della forma, dalle dimensioni, dai materiali, e lo scopo è quello di creare le condizioni acustiche migliori sull'intera area della platea, per rispondere al meglio le preferenze personali degli ascoltatori.

Le sale da concerto possono essere classificate, in base alla loro forma, in quattro principali tipologie di camere: *shoe box*, sala a ventaglio, sala esagonale e *vineyards*. Nella seconda parte del XIX secolo si è sviluppata la domanda per le grandi sale da concerto, e soprattutto quelle con piante rettangolari dimostrano di avere un'acustica particolarmente favorevole. Le proporzioni sono all'incirca di un cubo doppio, e vengono chiamate *shoe box*.

Una delle più importanti sale *shoe box* è la Grosser Musik Vereinsaal, a Vienna, costruita tra il 1867 e il 1869, dal danese Theophil Ritter von Hansen (1813-1891) e aperta nel 1870.

Per quanto riguarda le balconate la Grosser Musikvereinsaal presenta una sola fila di balconi che percorre i quattro lati della sala, incluso il lato dell'organo dietro il palco. La balconata è sostenuta anteriormente da 32 alte cariatidi dorate e nella parte posteriore da colonne ioniche. Il controsoffitto delle balconate è riccamente decorato, così come i fronti delle balconate stesse, quindi la diffusione è alta: questo è un segno distintivo della sala. Quando ci si siede nella balconata laterale il livello del suono riflesso è molto elevato, mentre la qualità visiva è molto inferiore al confronto, in quanto si vede solo metà orchestra. Ma questo livello sonoro va a scapito della chiarezza. Una caratteristica di quasi tutte le sale da concerto classiche è la forza, *strength*, delle prime riflessioni laterali. Il suono si diffonde con una sorgente sonora ben oltre la dimensione dell'orchestra; ci sono due caratteristiche che aumentano l'effetto: la larghezza ridotta della sala e la possibilità di riflessioni grazie alla presenza delle balconate.

Un'altra importante sala rettangolare è la Symphony Hall di Boston, progettata dagli architetti McKim, Mead and White, con l'aiuto acustico di Sabine.

Il suono all'interno della sala è chiaro, caldo, brillante e forte. Il tono dell'orchestra è bilanciato e l'effetto d'insieme è eccellente.

Nonostante questo ci sono una serie di caratteristiche negative. I posti che si trovano agli angoli e sotto alle balconate sono raggiunti da un suono innaturale a causa di una zona d'ombra. E' presente inoltre un effetto eco proveniente dalla parete posteriore.

Sono presenti due livelli di balconate che disegnano un profilo a “u”. Le balconate, con la parte anteriore decorata e dorata, sono poco profonde per evitare riflessioni sonore. Nella Symphony Hall di Boston il suono non arriva molto bene agli ascoltatori sotto la balconata più bassa, sebbene i ricevitori sotto la balconata più alta vicino al centro della sala abbiano relativamente delle buone condizioni di ascolto. Tuttavia, il suono riflesso dal soffitto non arriva molto lontano sotto entrambe le balconate, e gli angoli estremi posteriori della sala sotto le balconate hanno meno perfezioni acustiche. Il soffitto a cassettoni e le nicchie alle pareti, contenenti statue classiche. La Symphony Hall ha una diffusione elevata, grazie alla presenza del soffitto a cassettoni, e di numerosi ornamenti, quali statue, nicchie, rientranze e decorazioni sulle pareti laterali, e la presenza di due livelli di balconate, aventi anch’essi il fronte ricco di decori.

La terza tra le principali sale europee rettangolari è la Concertgebouw, disegnata da A.L. van Gendt. La sala ha un volume di 18700 m<sup>3</sup>, e questo causa una grande riverberazione, e le onde sonore riflesse dalle pareti laterali, data la larghezza, arrivano relativamente tardi al centro della sala. Tutto ciò dà alla musica una tonalità miscelata, calda, priva di chiarezza. Presenta una balconata alta e stretta con un fronte molto ornato, che si estende lungo tre lati della sala, ed è sostenuta da colonne decorate.

Lo scattering nella sala è definito alto, in quanto sono presenti superfici irregolari che portano alla diffusione del suono: il soffitto a cassettoni, la presenza della balconata, le colonne, le ricche decorazioni sulle pareti. Le sale del diciannovesimo secolo presentano in molte questo aspetto, essendo finemente ornate con superfici non regolari.

Degna di nota è anche la Free Trade Hall. Secondo l’esperienza di Beranek il suono dalla prima balconata (dalla parte opposta del palco) era molto riverberante ma mancava di chiarezza, il piano non era al meglio e le percussioni coprivano il suono degli archi. La parte peggiore è rappresentata dalle sedute sotto le balconate laterali; al centro del piano principale gli strumenti si sentono chiaramente. Il maggiore difetto della sala è il riverbero, nonostante sia 1,6, che non è inusuale.

Barron afferma che la sorpresa del Free Trade Hall è che gli svantaggi dei posti non peggiorano il suono; ad esempio nella parte posteriore del piano principale la risposta acustica è migliore rispetto all’insoddisfacente visuale. La grande compensazione può essere l’avvolgimento del suono. Il motivo è la forma a ventaglio inverso nella parte posteriore del piano principale e ognuna della balconate che contribuiscono alle riflessioni laterali verso l’audience.

La sala è composta da due livelli di balconate: il primo livello corre lungo il perimetro dell’area a formare una “u”; il secondo livello si trova solamente nella parete di fondo della sala e in questo punto l’altezza della sala è stata innalzata per accogliere la balconata: sembra quasi che sia stata aggiunta come un’appendice alla sala stessa. La sala è fortemente divisa dalla presenza delle sue balconate, che risultano essere molto sporgenti. Le balconate sono inclinate rispetto al piano verticale, per indirizzare meglio il suono nelle sedute centrali.

Per valutare la migliore forma della sala da concerto e in particolar modo le sue balconate, sono stati utilizzati gli Algoritmi Genetici (AG): questi sono stati proposti per la prima volta nel 1975 da John.H. Holland, e sono ispirati al principio della selezione ed evoluzione naturale darwinista.

In natura, attraverso il processo evolutivo, la sopravvivenza del più forte ha generato specie migliori, che possono sfruttare meglio i loro attributi nei propri particolari habitat. Possiamo guardare l'evoluzione come una ricerca del processo per arrivare a trovare quelle qualità che al meglio permettono agli animali di sopravvivere e di riprodursi. Analogamente, la sopravvivenza in uno specifico ambiente è alla base del problema, la popolazione animale è l'insieme di soluzioni proposte, e la selezione naturale e la riproduzione sono la ricerca del processo che andrà a generare le soluzioni migliori.

Grazie all'uso degli Algoritmi Genetici sono create nuove soluzioni, con l'uso di parti prese dalle migliori soluzioni considerate.

Come funziona: in natura gli individui si riproducono mescolando i propri patrimoni genetici, cioè i loro cromosomi: i nuovi individui generati avranno pertanto un patrimonio genetico derivato in parte dal padre e in parte dalla madre. La selezione naturale (cioè il riutilizzo di buone soluzioni) fa sì che riescano a sopravvivere e quindi a riprodursi solo gli individui più forti, "più adatti", cioè quelli con la *fitness* più elevata (più vicini all'ottimo); la *fitness* è il grado di valutazione associato ad una soluzione. La valutazione avviene in base ad una funzione appositamente progettata detta funzione di *fitness*. La *fitness* media della popolazione tenderà quindi ad aumentare con le generazioni, portando così la specie ad evolversi durante le iterazioni.

Gli Algoritmi Genetici finora trattati sono stati analizzati con un metodo di ricerca a obiettivo singolo, ma esistono anche AG multi-obiettivo. La differenza maggiore tra i due consiste nel numero di obiettivi.

Importante è anche il *pareto front*, che può essere spiegato partendo dal concetto di non dominanza di un individuo. Un individuo non dominato non è dominato da nessun altro individuo nella popolazione. Un individuo non dominato solitamente domina molti degli altri individui nella popolazione e non è mai dominato da altri.

Per poter realizzare il modello parametrico della sala da concerto, è stato utilizzato uno *Script*. Lo *Script* è stato creato con il *plug-in* di Python per Rhinoceros: in questo modo è stato immediatamente possibile servirsi di *rhinoscript syntax*. Infatti i comandi del software di modellazione hanno permesso la costruzione geometrica delle sale da concerto, con le sue relative variabili.

Dopo aver definito la funzione *HallGenerator*, necessaria per costruire il modello geometrico, è stato definito un *range* appropriato di valori entro i quali far variare la forma della sale per ottenere casi reali.

Le variabili scelte affinché i calcoli portino alla miglior ottimizzazione della sala sono:

*Balcony Depth*: larghezza della balconata

*Delta balcony H*: convessità/concavità della soletta della balconata

*Delta balcony depth*: convessità/concavità del fronte della balconata

*Balcony H*: altezza del fronte della balconata

*Alpha*: angolo di rotazione del fronte della balconata

Sono stati analizzati tre casi studio:

- 1) Il primo caso studio è stato eseguito su una *shoe box*, chiamata Sala A, avente una fila di balconate, con larghezza  $X=25$  e altezza  $Z=16$ , con le variabili *Balcony Depht*, *Delta balcony H*, *Delta balcony depht*, *Front H*, *Alpha*.
- 2) Il secondo è stato svolto sulla sala B, con larghezza  $X=35$  metri e altezza  $Z=25$  metri, con le variabili *Balcony Depht*, *Delta balcony H*, *Delta balcony depht*, *Front H*, *Alpha*.
- 3) Il terzo studio è stato svolto al fine di trovare la miglior sala in assoluto, infatti oltre alle variabili delle sale precedenti, sono considerate anche le variabili della larghezza e dell'altezza.

Dopo aver definito i *range* delle sale e delle variabili è necessario trovare una combinazione di variabili, che possano definire la soluzione ottimale: ossia trovare quali dimensioni rispondano in modo migliore alla ricerca in questione. Si parla proprio di Funzione di *Fitness*, trovandoci nel campo degli Algoritmi Genetici: ad ogni individuo della popolazione viene assegnato un valore, in modo da valutare la sua adeguatezza. Un valore alto di *fitness* corrisponde ad una maggiore probabilità di scelta dell'individuo per la formazione della generazione successiva. L'Algoritmo Genetico riesce a selezionare in modo casuale gli individui più forti (elevato valore di *fitness*) e scartare quelli più deboli (basso valore di *fitness*). In quest'ottica si procede verso l'ottimizzazione della popolazione e, quindi, della soluzione. La funzione di *fitness* è la funzione "obiettivo" che l'Algoritmo Genetico deve massimizzare o minimizzare. Ad ogni individuo avrà una propria funzione di *fitness* attraverso la quale sarà valutata la sua "bontà".

Gli AG quindi risolvono un determinato problema ricorrendo a una popolazione di soluzioni che, inizialmente casuali e quindi con *fitness* bassa, vengono poi fatte evolvere per un certo numero di generazioni successive, sino all'apparizione di almeno una soluzione con *fitness* elevata. Lo studio cerca soluzioni performanti per tutti i diversi individui.

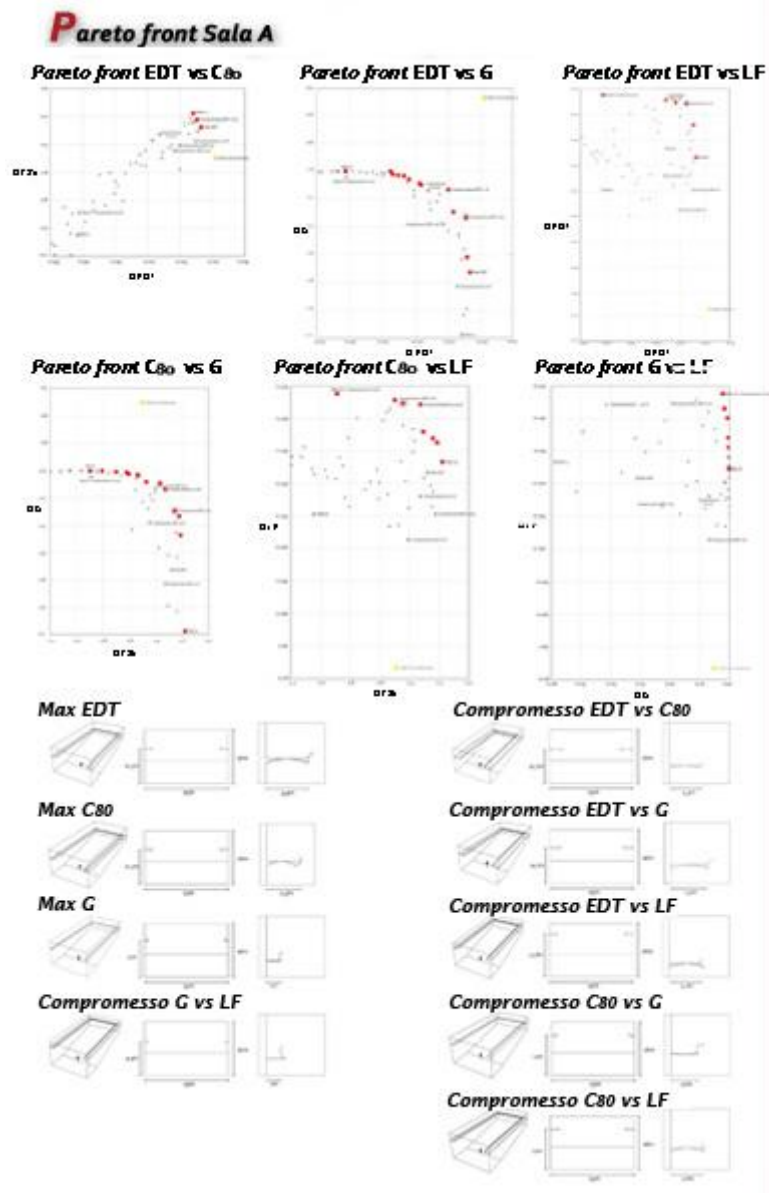
Come già accennato una soluzione si chiama *non-dominated*, o *pareto* ottimale, se nessuna delle funzioni obiettivo può essere migliorata in termini di valore senza degradare alcuni degli altri valori oggettivi.

Giungiamo così ai risultati dell'Algoritmo Genetico all'interno del dominio di soluzioni prese in considerazione: di generazione in generazione si arriva a tali risultati che mostrano quindi quali sono le sale migliori tra quelle analizzate, e in particolare quali sono le balconate migliori e se tali sale possono essere considerate migliori o meno rispetto alle rispettive *shoe box* senza le balconate.

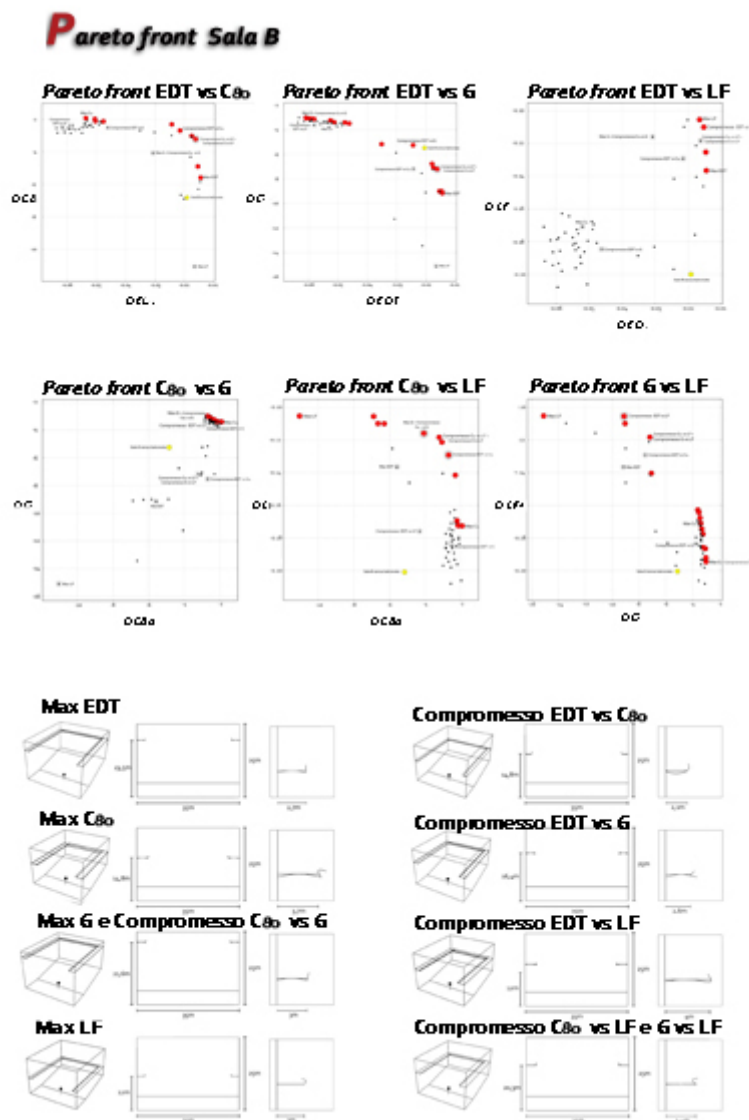
Nei risultati del primo caso studio (Sala A), viene analizzato il *pareto front* della generazione numero 50 della sala A. Sull'asse delle ascisse è indicata la prima *fitness*, D EDT, sull'asse delle ordinate è indicata la seconda, D C80. I punti rossi sono non-dominati, mentre quelli neri sono dominati. Il diagramma è lo spazio obiettivo, e racconta tutta la storia del *pareto front*, fino ad arrivare alle soluzioni migliori (punti rossi). Ogni punto rappresenta quindi una determinata sala, con relativa forma della balconata, e del fronte della balconata. La forma migliore della sala per D EDT sarà quella rappresentata dal punto "Max EDT", mentre la forma migliore per D C80 sarà quella del punto "Max C80".

I compromessi tra i due possono essere tanti, ma noi ne consideriamo uno solo, e viene chiamato "compromesso EDT vs C80". D EDT ha un valore maggiore quando le sale sono corte, larghe e non troppo alte. C80 e G hanno valori alti per sale lunghe, non molto larghe e alte. D LF, al contrario, ha un valore basso in quanto la sala non è così stretta e inoltre EDT è inversamente proporzionale a LF.

La sala A corrispondente, senza la balconata, risulta migliore per D EDT rispetto alla medesima sala con le balconate, ma peggiore per D C80. Migliore per D EDT in quanto l'aggiunta delle balconate implica l'aggiunta di sedute e quindi un maggior assorbimento acustico delle superfici presenti. Peggiore per D C80 perché la sala con le balconate permette un migliore distribuzione delle riflessioni laterali, essendo C80 il rapporto tra l'energia diretta unita all'energia delle prime riflessioni che giungono all'orecchio nei primi 80 millesimi di secondo, e l'energia delle riflessioni successive, che giungono dopo gli 80 ms. Quindi per migliorare la chiarezza di uno spazio di deve aumentare la prima energia, quella che arriva entro 80 ms.



Questo ragionamento viene applicato per ogni *pareto front* analizzato, e per ogni caso studio (anche per la Sala B e per la Sala Tutte le Variabili), giungendo così al confronto tra i diversi risultati.

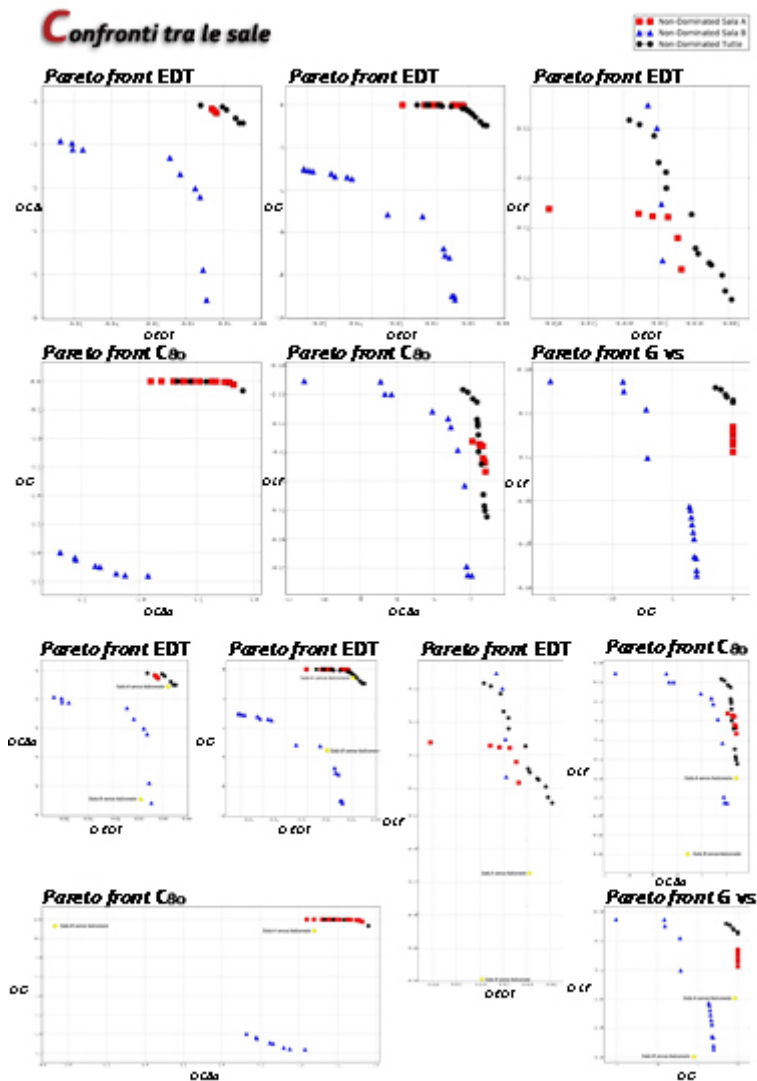


Per esempio, dopo aver studiato tutti i risultati ottenuti, confrontiamo i valori di Riverberazione e Chiarezza per tutti e tre i casi studio: il *pareto front* relativo mostra il confronto tra lo studio della sala A, lo studio della sala B, e lo studio delle sale con più variabili. Possiamo notare che il più alto valore di D EDT lo abbiamo con il terzo studio. Questo perché lo scopo dell'introduzione del terzo calcolo è proprio quello di trovare la migliore sala in assoluto, essendo considerate anche le variabili della larghezza e dell'altezza. Nonostante questo anche la sala A mostra dei valori alti di D EDT e D C80. La sala A non ha contrasto, quindi il valore di D EDT corrisponde anche a un buon valore di D C80. I primi due studi dominano nettamente la sala B, che mostra valori di EDT e di C80 inferiori. La funzione è chiaramente contrastata nella sala B.



La sala B è la più ampia, misura infatti 35 metri in larghezza per 25 metri in altezza. Possiamo affermare che l'ampiezza della sala in questo caso diminuisce l'ottimizzazione della sala.

Nel *pareto front* più piccolo possiamo notare il confronto tra le sale A e B con le balconate e senza le balconate. Le balconate non migliorano il valore EDT nella sala A, ma migliorano la chiarezza. La sala B può migliorare grazie all'aggiunta delle balconate, ma non arriva comunque al livello delle altre.



La tesi ha affrontato il problema di migliorare la qualità acustica delle sale da concerto, tramite l'aggiunta di balconate. Il metodo si è dimostrato efficace ed interessante. I primi due casi studio sono partiti da sale con variabili fisse, cioè sale con dimensioni già studiate. I risultati ottenuti da queste due sale ci permettono di verificare come le balconate possono migliorare o meno le sale stesse.

Il terzo esperimento tratta di una sala a dimensioni variabili, e quindi risulterà sempre la migliore, e dominerà sempre le altre due: come già detto vengono assegnate più variabili, anche per la larghezza e per l'altezza, di conseguenza è logico affermare che il risultato e la forma della sala saranno migliori e più precisi.

Per ulteriori informazioni, e-mail:

Denise Barbaroux: [denise.barbaroux@gmail.com](mailto:denise.barbaroux@gmail.com)