

# APPLICABILITÀ DELL'OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO NELLA PROGETTAZIONE ACUSTICA DELLE AULE SCOLASTICHE

## Lo sviluppo di un algoritmo di simulazione

di

\* Angelo Lombardo, Louena Shtrepi, Giuseppina E. Puglisi, Arianna Astolfi

*L'obiettivo della presente ricerca è quello di esplorare la possibilità di applicare l'ottimizzazione multi-obiettivo al progetto acustico di aule scolastiche al fine di supportare i professionisti nella individuazione delle migliori soluzioni per il suo trattamento acustico. Il perseguimento di questo obiettivo ha richiesto lo sviluppo di un algoritmo di simulazione realizzato in Grasshopper, che traspone le indicazioni della recente norma UNI 11532-2:2020, entrata in vigore a marzo dello scorso anno, e fornisce importanti feedback in fase di progettazione, indirizzando le scelte di rinnovamento acustico dell'ambiente oggetto d'intervento.*

### INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, le condizioni acustiche delle aule scolastiche hanno ricevuto molta attenzione a causa del loro ruolo essenziale a garantire un insegnamento e un apprendimento efficaci, soprattutto ai primi livelli del percorso educativo. La bassa qualità acustica, purtroppo, è comune nel panorama educativo italiano: uno studio condotto da Ecophon Saint-Gobain<sup>1</sup>, su un campione rappresentativo di scuole, ha rivelato che nelle scuole italiane c'è troppo rumore e l'acustica in 9 aule su 10 è fuori norma. Questo rappresenta un grave problema negli ambienti educativi dal momento che la cattiva acustica delle aule determina da un lato fatica vocale e di-

sturbi della voce per gli insegnanti, e dall'altro scarso livello di concentrazione e apprendimento per gli allievi<sup>2</sup>. I requisiti acustici per evitare di incorrere in tali problemi richiedono una progettazione acustica avanzata, che nella maggior parte dei casi deve essere applicata a edifici scolastici esistenti. Inoltre, in molti casi ad architetti e ingegneri che si occupano della progettazione o ristrutturazione di ambienti scolastici, mancano le competenze acustiche necessarie per far fronte a questa problematica.

Da queste considerazioni emerge come lo scopo principale di questo studio sia stato quello di fornire uno strumento-guida in grado di supportare le scelte sia di progettazione che di rinnovamento acustico delle aule, e di studiare gli effetti di diversi trattamenti acustici. Tale strumento consiste in un algoritmo sviluppato in Grasshopper, che traspone le indicazioni della recente norma **UNI 11532-2:2020** "Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Settore scolastico". L'algoritmo, oltre a verificare la conformità con i requisiti acustici fissati dalla normativa, consente anche di ottimizzare tipologia, estensione e posizione dei materiali acustici in funzione di più obiettivi (**tempo di riverberazione**, RT, **indice di intellegibilità del parlato**, STI, e **budget** necessario per il trattamento acustico, contribuendo

1 Ecophon Saint-Gobain, Emergenza 'rumore' nelle scuole italiane, Milano, 2014

2 G. E. Puglisi et al., "Influence of classroom acoustics on the reading speed: A case study on Italian second-graders," J. Ac. Soc. Am. EL 144(2), EL144-EL149 (2018).

G. E. Puglisi et al., "Four-day-follow-up study on the voice monitoring of primary school teachers: Relationships with conversational task and classroom acoustics," J. Ac. Soc. Am. 141(1), 441-452 (2017).

B. M. Shield and J. E. Dockrell, "The effects of noise on children at school: a review", J. Building Acoustics 10(2), 97-106, 2003.

**ANIT**



# ECHO 8.1

- **Requisiti acustici passivi**
- **Classificazione delle unità immobiliari**
- **Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati**

Software ANIT

Sviluppato da TEP s.r.l.

## ECHO 8.1

Requisiti acustici passivi e classificazione acustica delle unità immobiliari.  
Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati.

L'uso del presente software e dei relativi risultati sono di esclusiva competenza e responsabilità dell'utente.  
Tutti i diritti riservati. Qualsiasi riproduzione non autorizzata è vietata.  
Maggiori informazioni e contatti: [www.anit.it](http://www.anit.it) - [software@anit.it](mailto:software@anit.it)

**Il software  
è compreso  
nella quota  
associativa  
ANIT**

Nuova versione sviluppata per rispondere alle richieste del Decreto Criteri Ambientali Minimi e recepire le indicazioni della **UNI 11532-2** (Caratteristiche acustiche interne delle scuole)



**ANIT**



# LETO 5.0

**Il software per l'analisi del fabbisogno energetico degli edifici e ora anche dell'APE convenzionale**



Software ANIT

Sviluppato da TEP s.r.l.

## LETO 5.0

Analisi del fabbisogno energetico degli edifici secondo UNI/TS 11300 parte 1, 2, 3, 4, 5 e 6

L'uso del presente software e dei relativi risultati sono di esclusiva competenza e responsabilità dell'utente. Tutti i diritti riservati. Qualsiasi riproduzione non autorizzata è vietata.

Maggiori informazioni e contatti: [www.anit.it](http://www.anit.it) - [software@anit.it](mailto:software@anit.it)

**Il software  
è compreso  
nella quota  
associativa  
ANIT**

La versione 5 consente di calcolare l'**APE convenzionale** necessario per l'accesso al **bonus 110%**. Oltre a questo la nuova versione è stata implementata con una serie di grafici per facilitare la lettura dei risultati di calcolo.



PER UNA CASA SEMPRE CONFORTEVOLE,  
IL MIGLIOR ISOLAMENTO TERMICO A CAPPOTTO.



**ECOBONUS E SUPER ECOBONUS: SCEGLI I PRODOTTI MAPEI E USUFRUISCI DELLE DETRAZIONI FISCALI PER GLI INTERVENTI DI ISOLAMENTO TERMICO**



Tutti vorrebbero migliorare l'efficienza energetica della propria casa o di un edificio, ma bisogna individuare i prodotti corretti e sostenibili per garantire durata nel tempo. Il **sistema Mapetherm** è la scelta migliore per creare benessere e risparmio energetico a casa tua: ambienti freschi d'estate e caldi d'inverno.



È TUTTO OK,  
CON MAPEI

Mapetherm Planner  
Guida alla scelta del cappotto termico Mapei



# ANIT

## I NUOVI EVENTI IN STREAMING DI ANIT SONO ORA DISPONIBILI SUL CANALE YOUTUBE



ECHO 8.1 - Incontro di approfondimento per i Soci...



BONUS 110%  
A che punto siamo?



Materiali isolanti: scelta dei  
dati di progetto



Comfort acustico degli  
ambienti chiusi

### Alcuni titoli:

- ECHO 8.1 - Incontro di approfondimento per i Soci ANIT
- BONUS 110% - A che punto siamo?
- Materiali isolanti: scelta dei dati di progetto
- Comfort acustico degli ambienti chiusi
- Diagnosi igrotermica degli edifici esistenti
- Schermature solari e rispetto dei requisiti minimi
- IRIS 5 Approfondimenti per i Soci ANIT
- Ponti termici con il nuovo IRIS



Diagnosi igrotermica degli  
edifici esistenti



0 IRIS Presentazione  
versione 5

[www.anit.it](http://www.anit.it)



nello studio e nella ricerca di soluzioni acustiche idonee ed economiche. A tal proposito, le tecniche di ottimizzazione sono state usate raramente per scopi di progettazione acustica rispetto a quelle strutturali o di form-finding<sup>3</sup>, e questa ricerca tenta di studiare l'utilizzo e l'applicabilità.

### APPROCCIO GENERALE

Qualsiasi strumento di valutazione è utile ma diventa efficace se applicabile a più casi studio. Per poter applicare l'algoritmo a un gran numero di aule scolastiche, era necessario identificare un'aula tipo e le sue caratteristiche; una sorta di archetipo con variabili e vincoli. I dati dimensionali su aule di 326 edifici scolastici, rintracciati tramite i documenti cartacei conservati negli archivi del Comune di Torino e la loro elaborazione tramite i criteri statistici di Chauvenet e il test Q di Dixon<sup>4</sup>, ha permesso di **generalizzare il modello parametrico** il più possibile e tararlo sulla tipologia di aula più comune, ovvero caratterizzata da ampie superfici vetrate e da un alto soffitto e di rilevare i possibili valori anomali. I dati dimensionali degli elementi architettonici dell'aula sono stati individuati entro valori massimi e minimi di possibile variazione.

### Modello geometrico-parametrico

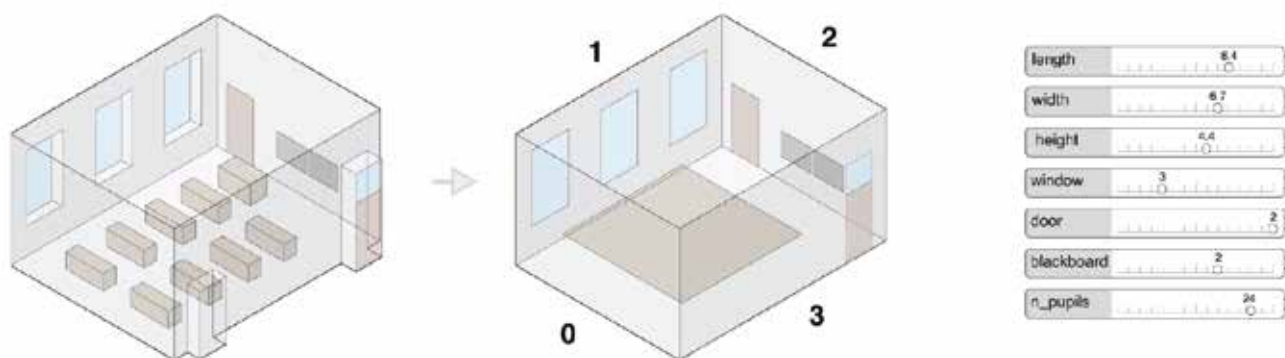
Al fine di valutare ed ottimizzare l'acustica dell'aula è stato necessario creare un modello virtuale. A tal fine, è stato utilizzato il software di modellazione

parametrica Grasshopper che mette a disposizione un'area di lavoro, il *GH canvas*, e tutta una serie di componenti tra cui gli *sliders*, che se opportunamente definiti, permettono di replicare un'aula esistente in maniera piuttosto semplice (Figura 1). Attraverso questi cursori è possibile impostare le diverse variabili spaziali ed aggiungere gli elementi architettonici che la caratterizzano: variare le dimensioni dell'aula, aggiungere porte, finestre, moduli-lavagna e regolarne posizione e dimensioni, definire una posizione per l'insegnante, un numero di alunni con relativa area di occupazione ed infine, posizionare gli impianti.

### Materiali acustici-parametrici

Realizzato il modello virtuale, l'algoritmo applica, a ciascuna superficie, dei materiali che sono stati suddivisi in due categorie: materiali "fissi" e materiali "parametrici". Il primo include materiali che possiamo trovare in genere in qualsiasi aula (ad es. l'intonaco per pareti laterali e soffitto non trattato, piastrelle di marmo o ceramica per il pavimento, finestre, ecc.) con i rispettivi coefficienti di assorbimento desunti dalla norma **UNI11532-2:2020**.

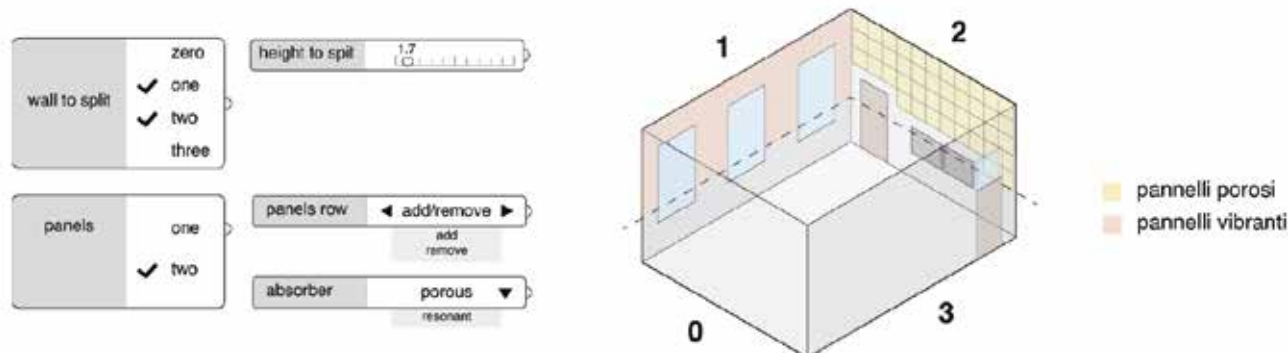
I materiali parametrici includono tutti quelli che generalmente vengono utilizzati in fase di progettazione, ed in particolare i pannelli porosi, i pannelli forati risonanti, i pannelli vibranti e il sistema di *baffles*. I coefficienti di assorbimento di



**Figura 1** - Confronto tra il modello ad-hoc e quello generato dall'algoritmo.

3 Badino, E.; Shtrepi, L.; Astolfi, A. Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice. *Acoustics* 2020, 2, 246-278

4 W. Chauvenet, *A Manual of Spherical and Practical Astronomy*, Dover, New York, 1891.  
W.J. Dixon, *Processing data for outliers*, Biometrics, 1953.



**Figura 2** - Componenti GH disponibili per il trattamento acustico delle pareti.

questi ultimi, sono stati calcolati implementando in linguaggio Python le formule presenti in letteratura per definire i coefficienti di assorbimento in frequenza per i materiali assorbenti porosi, risuonatori multipli e pannelli vibranti; mentre per il sistema di *baffles* è stato implementato il metodo di Wolfgang Probst<sup>5</sup>. L'intera fase di set-up viene gestita tramite specifici cursori; tutte le possibilità che il modello parametrico offre sono state calibrate su intervalli dinamici in modo da non generare errori (sovrapposizioni di pannelli lungo le aperture ad esempio), semplificare ed automatizzare delle operazioni come l'applicazione di pannelli acustici a parete e soffitto (Figura 2).

## MODELLI ACUSTICI ANALITICI E GEOMETRICI

Finora l'attenzione si è concentrata sulle possibilità e sui vincoli offerti dall'algoritmo nella fase di *set-up* del modello. All'algoritmo non resta che calcolare i descrittori acustici scelti per caratterizzare l'acustica delle aule scolastiche: il tempo di riverberazione RT, la chiarezza del parlato C50, l'indice di intellegibilità del parlato STI. Questi parametri sono stati determinati da calcoli analitici (UNI EN 12354-6:2006 "Acustica in edilizia - Assorbimento acustico in ambienti chiusi", teorie di Sabine, Hopkins-Stryker, Eyring e Barron & Lee<sup>6</sup>), e simulazioni acustiche basate su modelli che assumono le **approssimazioni dell'acustica geometrica (GA)**. I modelli analitici hanno richiesto l'implementazione attra-

verso algoritmi ad-hoc e script in linguaggio Python delle formule per il calcolo dei parametri acustici. Il modello acustico geometrico ha utilizzato il plug-in gratuito di simulazione acustica *Pachyderm*. Quest'ultimo si basa su una simulazione ray-tracing e consente di tenere conto anche delle proprietà fonodiffondenti delle superfici, definite da coefficienti di scattering che sono stati in parte desunti da letteratura, e in parte ottenuti da una ricerca che ha confrontato risultati simulati con quelli misurati<sup>7</sup>.

## OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO

L'ottimizzazione multi-obiettivo, effettuata con il plug-in Octopus, ha restituito una gamma di soluzioni indicata dal fronte di Pareto, che rappresentano l'ottimo tra gli estremi di ciascun obiettivo. In Tabella 1 sono riportate le variabili di ottimizzazione utilizzate nei modelli teorici ed in quello geometrico. Tutti i processi di ottimizzazione sono stati eseguiti utilizzando la stessa configurazione sperimentale. Una singola sorgente e un totale di quattro ricevitori sono stati posizionati nel modello dell'aula in posizioni fisse come indicato dalla UNI 11532-2:2020 (Figura 3). Sono state valutate oltre 750 soluzioni per ciascun modello con l'obiettivo specifico di massimizzare le prestazioni acustiche, in termini di tempo di riverberazione (RT) ed indice di trasmissione del parlato (STI), soddisfacendo al contempo i criteri contrastanti di mantenimento dei costi di progettazione/rinnovamento acustico.

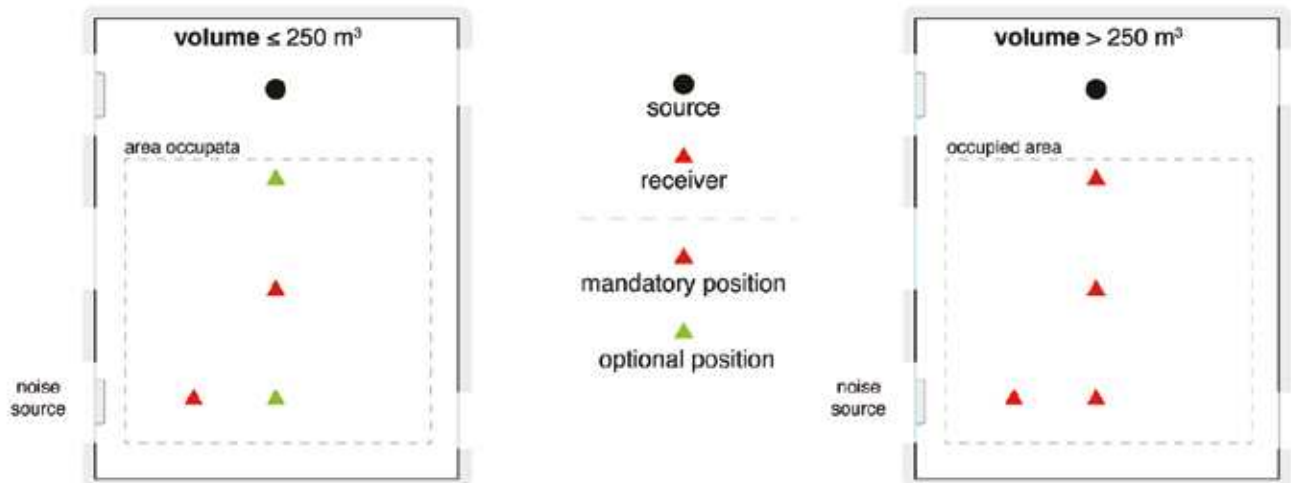
5 W. Probst, Sound Absorption of Baffle Systems, Greifenberg, 2007.

6 A. Astolfi, V. Corrado, and A. Griginis, "Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms.," *Appl. Acoust.*, 2008.  
R. Spagnolo, *Manuale di acustica applicata*. Utet Libreria, 2001

7 T.J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers: theory, design and application.*, Second ed. New York, 2009.  
Y.J. Choi, "Effects of periodic type diffusers on classroom acoustics.," *Appl. Acoust.*, 2013

| Trattamenti acustici        |                              | Modelli analitici | Modello geometrico |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|
| Tipologia, estensione       |                              | ✓                 | ✓                  |
| Posizione                   |                              | X                 | ✓                  |
| Pannello poroso             | Spessore                     | ✓                 | X                  |
|                             | Air-gap                      | ✓                 | ✓                  |
| Pannello vibrante           | Densità                      | X                 | X                  |
|                             | Spessore, air-gap            | ✓                 | ✓                  |
| Risuonatore multiplo        | Spessore                     | X                 | X                  |
|                             | % di foratura, air-gap       | ✓                 | ✓                  |
| Sistema di baffles          | Altezza, numero ed interasse | ✓                 | ✓                  |
| Trattamento fonodiffondente |                              | X                 | ✓                  |

**Tabella 1** - Variabili di ottimizzazione.



**Figura 3** - Identificazione delle posizioni utente e di misura in relazione al volume e alla sorgente di rumore.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

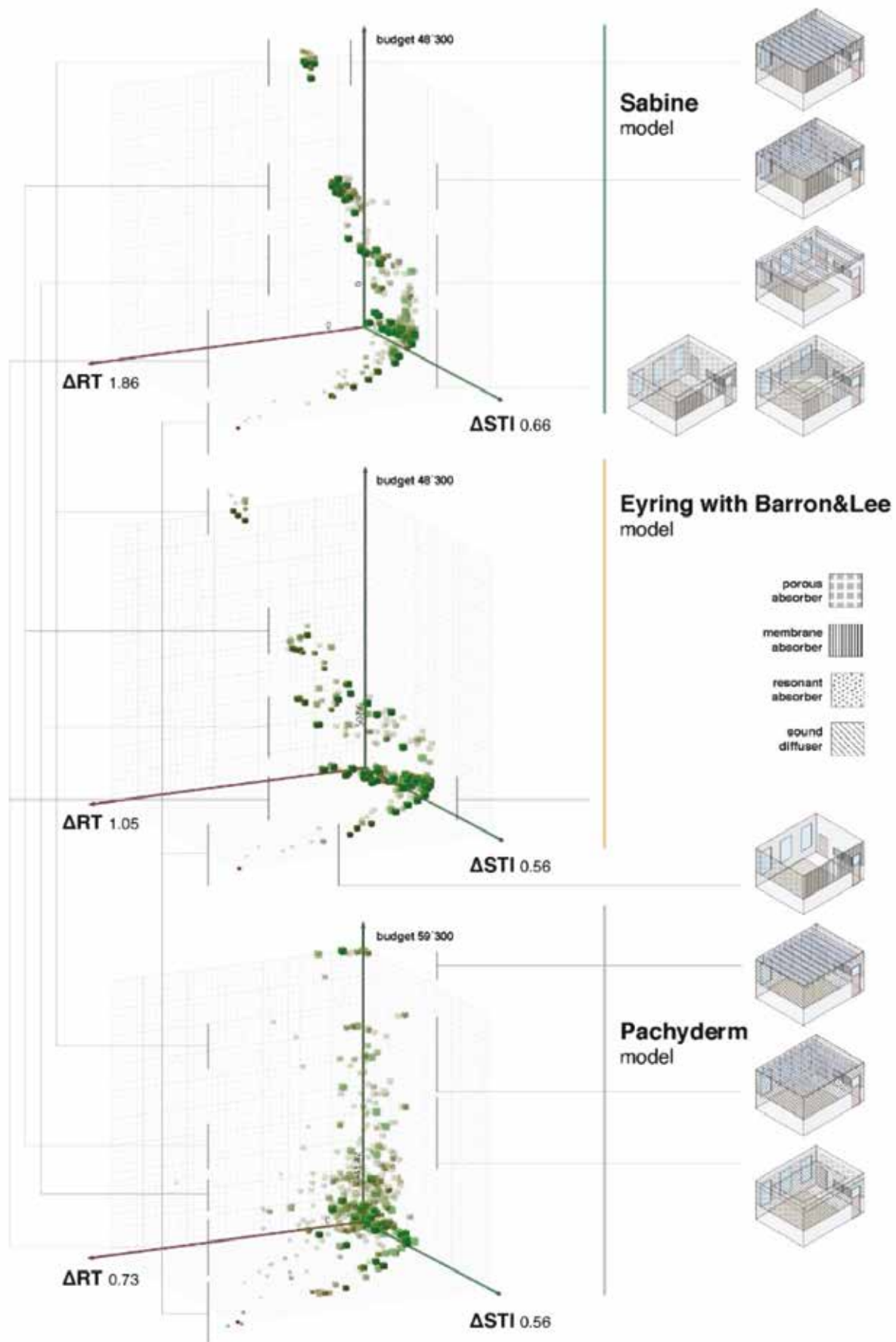
I risultati validano il metodo di ottimizzazione e mostrano una compatibilità fra i parametri acustici dei modelli analitici e geometrici per le soluzioni senza superfici fonodiffondenti. Tuttavia, sono state rilevate differenze significative nel tempo di calcolo: per i modelli teorici sono state eseguite 1500 valutazioni in circa 2 ore, mentre per la simulazione GA sono state eseguite 750 valutazioni in circa 20 ore (Tabella 2).

Va sottolineato come i risultati di Pareto siano abbastanza simili per le due ipotesi di modelli teorici, mentre per il modello geometrico mostrano una dispersione maggiore per via del numero minore di esecuzioni, della natura stessa della simulazione (*ray-tracing*) e dell'inclusione di un ulteriore trattamento, i diffusori acustici (Figura 4). In generale, ogni soluzione presenta un qualche tipo di compromesso, che non può essere deciso a priori (cioè combinato in un singolo valore obiettivo) ma deve essere esplorato a

| Ottimizzazioni di Octopus                    | Sabine e Hopkins-Stryker | Eyring, Hopkins-Stryker e Barron and Lee | Pachyderm Acoustic |
|--|--------------------------|--|--------------------|
| Numero di variabili o genomi                 | 28                       | 28                                       | 32                 |
| Numero di obiettivi                          | 8                        | 8  | 8                  |
| Numero totale di soluzioni valutate          | 1500                     | 1500                                     | 750                |
| Numero di generazioni completate             | 30                       | 30                                       | 15                 |
| Tempo di esecuzione totale [h]               | 1.4                      | 1.8                                      | 20.8               |
| Media del tempo per singola soluzione [s]    | 3.4                      | 4.3                                      | 100.1              |
| n. soluzioni di Pareto nella gen. finale [%] | 78                       | 89                                       | 33                 |

**Tabella 2** - Statistiche di ottimizzazione da Octopus.






**Figura 4** - Generazione finale di soluzioni del fronte di Pareto per le ottimizzazioni: a) Sabine e Hopkins-Stryker b) Eyring Hopkins-Stryker e Barron and Lee, c) Pachyderm.

posteriori. Questo ha richiesto la raccolta di dati in un foglio elettronico: è stata definita una *routine* che collezionasse tutte le informazioni necessarie per “ricostruire” la configurazione analizzata dall’algoritmo.

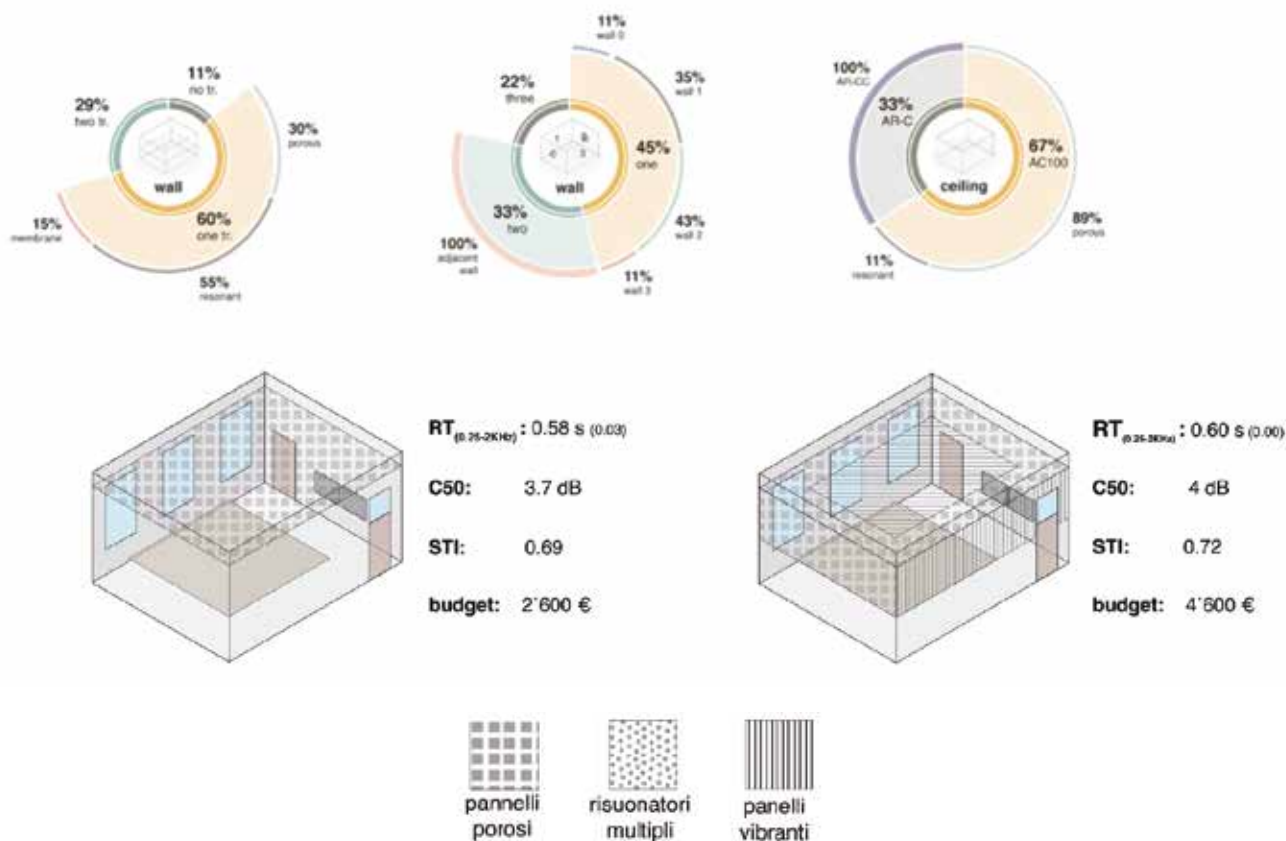
I dati raccolti, prima filtrati da istanze simili, poi ordinati in base a livelli di priorità, hanno restituito utili indicazioni circa configurazioni “migliori” (Figura 5).

I risultati di tutte le prove hanno indicato che, indipendentemente dal trattamento delle pareti, la soluzione con un controsoffitto totalmente assorbente si conferma essere più economica e compatibile con i valori target da raggiungere in un’aula scolastica. Si è altresì osservato che in presenza di vincoli imposti che rendano impossibile trattare il soffitto, gli obiettivi acustici possono essere raggiunti soltanto combinando materiali fono-assorbenti e fono-diffondenti in diversi punti delle pareti oppure risuonatori multipli e pannelli vibranti con una spesa economica inferiore.

## CONCLUSIONI

L’algoritmo sviluppato (per modelli analitici e geometrici) e il metodo di ottimizzazione scelto forniscono informazioni essenziali su un approccio valido che potrebbe essere utile per valutare la qualità acustica delle classi e fornire indicazioni su come migliorarla al fine di favorire le attività di insegnamento-apprendimento. Si è dimostrato come i calcoli analitici e le simulazioni GA siano compatibili per le soluzioni senza proprietà di scattering: i risultati mostrano che alcune soluzioni a basso costo sono comparabili tra i tre modelli, anche se la simulazione GA dovrebbe essere considerata la più accurata. Sebbene vi sia un grande interesse per i potenziali dell’analisi parametrica, la difficoltà nel corretto uso di Grasshopper o a programmi simili, rende necessari ulteriori sviluppi al fine di consentire un approccio ancora più intuitivo e semplice per i professionisti non esperti. 

*\* Angelo Lombardo, Louena Shtrepi, Giuseppina E. Puglisi, Arianna Astolfi, Dipartimento di Energia, Politecnico di Torino*



**Figura 5** - Esempio di statistiche derivate dall’analisi delle esecuzioni di ottimizzazione su foglio elettronico e soluzioni ottenute.