



POLITECNICO DI TORINO  
Repository ISTITUZIONALE

L'ottimizzazione multi-obiettivo nella progettazione acustica delle aule scolastiche

*Original*

L'ottimizzazione multi-obiettivo nella progettazione acustica delle aule scolastiche / Lombardo, Angelo; Shtrepi, Louena; Puglisi, Giuseppina Emma; Astolfi, Arianna. - In: INGENIO. - ISSN 2307-891X. - ELETTRONICO. - (2020).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2837509 since: 2020-06-27T15:38:11Z

*Publisher:*

Galazzano : Imready arl

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# L'ottimizzazione multi-obiettivo nella progettazione acustica delle aule scolastiche

## *Lo sviluppo di un algoritmo di simulazione*

---

AUTORI: Angelo Lombardo, Louena Shtrepi, Giuseppina E. Puglisi, Arianna Astolfi, Dipartimento di Energia (DENERG), Politecnico di Torino

*L'obiettivo della presente ricerca è quello di sviluppare uno strumento a supporto dei professionisti nella individuazione delle migliori soluzioni per il trattamento acustico di un'aula scolastica, promuovendo la consapevolezza sulle conseguenze delle varie scelte sin dalle prime fasi di progettazione. Si tratta di un algoritmo sviluppato in Grasshopper, che traspone le indicazioni della recente norma UNI 11532-2:2020, entrata in vigore a marzo dell'anno corrente, ed è stato utilizzato per studiare l'applicabilità dell'ottimizzazione multi-obiettivo al progetto acustico delle aule scolastiche.*

## INTRODUZIONE

Le condizioni acustiche delle aule scolastiche hanno ricevuto molta attenzione negli ultimi decenni 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: nelle scuole italiane c'è troppo rumore e l'acustica è fuori norma in 9 aule su 10. Questo è quanto ha rivelato uno studio condotto da Ecophon Saint-Gobain<sup>1</sup>, su un campione rappresentativo di scuole e rappresenta un grave problema negli ambienti educativi a causa dei suoi effetti negativi. La cattiva acustica delle aule determina da un lato fatica vocale e disturbi 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 mancano le competenze acustiche ad architetti e ingegneri che si occupano della progettazione o ristrutturazione di ambienti scolastici.

Partendo da queste considerazioni, lo scopo principale di questo studio è 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

---

<sup>1</sup> Ecophon Saint-Gobain, Emergenza 'rumore' nelle scuole italiane, Milano, 2014

<sup>2</sup> 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.

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”. Le tecniche di ottimizzazione sono state usate raramente per scopi di progettazione acustica rispetto a quelle strutturali o di *form-finding*<sup>3</sup>; a tal proposito, 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 intelligibilità del parlato, STI, e budget necessario per il trattamento acustico, contribuendo nello studio e nella ricerca di soluzioni acustiche idonee ed economiche.

## 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

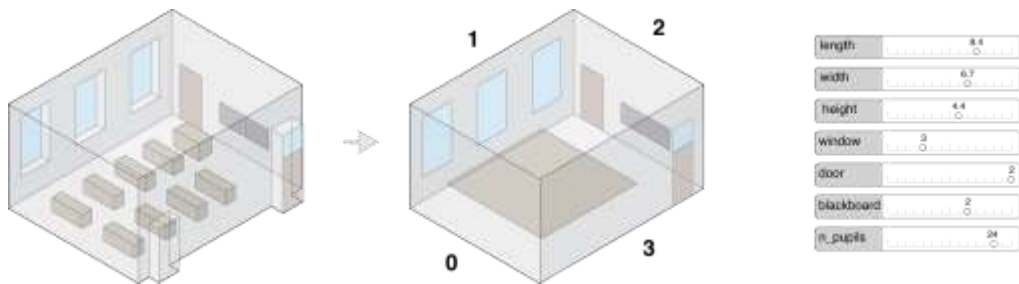
Al fine di valutare ed ottimizzare l'acustica dell'aula è stato necessario creare un modello virtuale. Il software di modellazione parametrica Grasshopper è stato utilizzato a questo fine. Il GH canvas è stato popolato di componenti chiamati “sliders”, che permettono di replicare un'aula esistente in maniera piuttosto semplice (Figura 1). Attraverso questi cursori è possibile impostare le diverse variabili spaziali: le dimensioni dell'aula, aggiungere porte, finestre, moduli-lavagna e regolarne posizione e dimensioni, aggiungere posizione di insegnante e numero di allievi e gli impianti.

---

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> W. Chauvenet, *A Manual of Spherical and Practical Astronomy*, Dover, New York, 1891.

W. J. Dixon, *Processing data for outliers*, Biometrics, 1953.

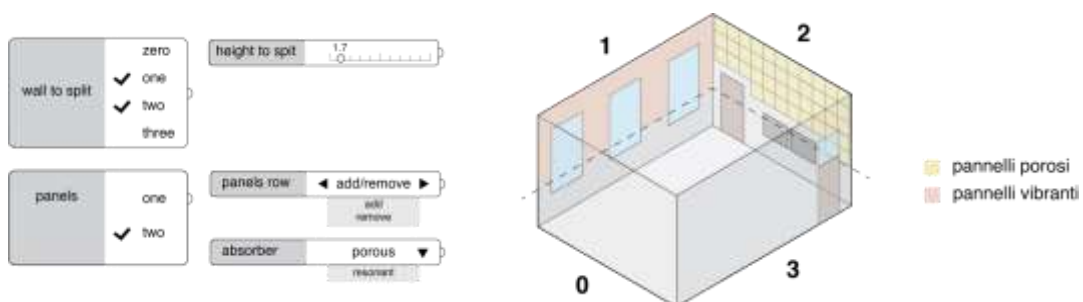


**Figura 1** - Confronto tra il modello ad-hoc e quello generato dall'algoritmo.

## Materiali acustici-parametrici

Ad ogni superficie del modello parametrico l'algoritmo consente di applicare 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 utilizzati nella fase di progettazione acustica, ed in particolare i pannelli porosi, i pannelli forati risonanti, i pannelli vibranti e il sistema di *baffles*. I coefficienti di assorbimento 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. 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 e tutte le possibilità che il modello parametrico offre sono state calibrate su intervalli dinamici in modo da non generare errori, semplificare ed automatizzare delle operazioni come l'applicazione di pannelli acustici a parete e soffitto (Figura 2).



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

## 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

<sup>5</sup> W. Probst, Sound Absorption of Baffle Systems, Greifenberg, 2007.

caratterizzare l'acustica delle aule scolastiche: il tempo di riverberazione RT, la chiarezza del parlato C50, l'indice di intelligibilità 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 basati su modelli che assumono le approssimazioni dell'acustica geometrica (GA). I modelli analitici hanno richiesto l'implementazione attraverso 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. Questa tipologia è caratterizzata acusticamente 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 è stata effettuata con il plug-in Octopus, che ha prodotto una gamma di soluzioni indicata dal fronte di Pareto, che rappresentano l'ottimo tra gli estremi di ciascun obiettivo. Le variabili di ottimizzazione utilizzate nei modelli teorici ed in quello geometrico sono sintetizzate in Tabella 1. 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 [7] (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.

**Tabella 1** - Variabili di ottimizzazione.

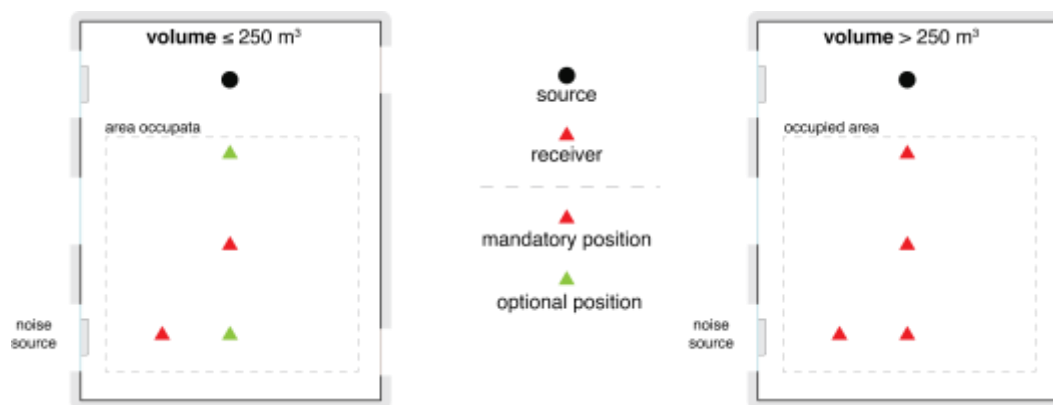
Trattamenti acustici		Modelli analitici	Modello geometrico
Tipologia, estensione		✓	✓
Posizione		X	✓
Pannello poroso	Spessore	✓	X
	<i>Air-gap</i>	✓	✓
Pannello vibrante	Densità	X	X
	Spessore, <i>air-gap</i>	✓	✓
Risuonatore multiplo	Spessore	X	X
	% di foratura, <i>air-gap</i>	✓	✓
Sistema di <i>baffles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

<sup>6</sup> 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

<sup>7</sup> T. J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers: theory, design and application.*, Second edi. New York, 2009.

Y.J. Choi, "Effects of periodic type diffusers on classroom acoustics.," *Appl. Acoust.*, 2013



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

## RISULTATI E DISCUSSIONE

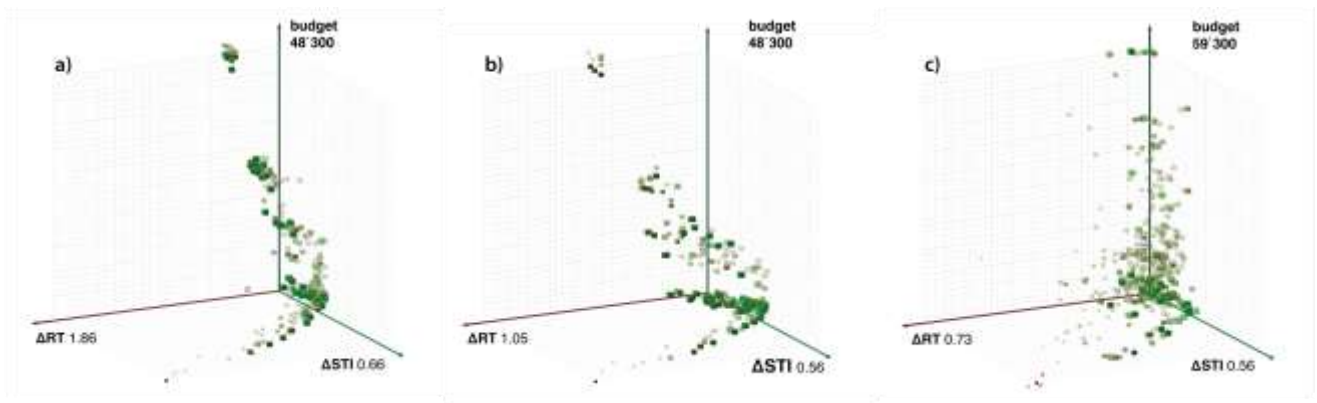
I risultati mostrano che i parametri acustici valutati sono compatibili tra modelli analitici e geometrici per le soluzioni senza superfici fonodiffondenti, validando così il metodo di ottimizzazione. Tuttavia, sono state rilevate differenze significative nel tempo di calcolo: per i modelli teorici sono 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 posteriori (Figura 5).

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

Ottimizzazioni di Octopus	Sabine e Hopkins-Stryker	Eyring, Hopkins-Stryker e Barron and Lee	<i>Pachyderm Acoustic</i>
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

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.



**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.



**Figura 5** - Esempio di soluzioni ottenute dall'ottimizzazione multi-obiettivo.

## CONCLUSIONI

I modelli algoritmici presentati in questo studio 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 superfici fonodiffondenti: i risultati mostrano che alcune soluzioni a basso costo sono comparabili tra i tre modelli. Sebbene vi sia un grande interesse per i potenziali dell'analisi parametrica, la maggior parte dei professionisti in questo campo di lavoro tende a non essere particolarmente portata all'uso Grasshopper o a programmi simili, per questo ulteriori sviluppi sono necessari al fine di consentire un approccio ancora più intuitivo e semplice per i professionisti non esperti.