



Rivista
Italiana di
Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 49, n. 1/2025
gennaio-giugno

FrancoAngeli 

Direttore responsabile (Editor in Chief)

Eleonora Carletti

Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia
e la Mobilità Sostenibili (STEMS)

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Sede di Ferrara, Via Canal Bianco, 28, 44124 Ferrara

e-mail: eleonora.carletti@stems.cnr.it

Responsabile di redazione (Editorial Manager)

Francesco Pompoli

Dipartimento di Ingegneria

Università degli Studi di Ferrara

Via Saragat, 1, 44121 Ferrara

e-mail: francesco.pompoli@unife.it

Vice-responsabile di redazione (Deputy Editorial Manager)

Louena Shtrepi

Department of Energy, DENERG

Politecnico di Torino

Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino

e-mail: louena.shtrepi@polito.it

Comitato di redazione (Editorial Committee)

Francesco Aletta, f.aletta@ucl.ac.uk

(University College London, United Kingdom)

Umberto Berardi, uberardi@ryerson.ca

(Toronto Metropolitan University, Canada)

Davide Borelli, davide.borelli@unige.it

(Università di Genova, Italia)

Ulf Carlsson, ulfc@kth.se

(KTH Royal Institute of Technology, Sweden)

Luis Cueto, joseluis.cueto@uca.es

(Universidad de Cadiz, Spain)

Papatya Nur Dokmeci Yorukoglu, papatya@cankaya.edu.tr

(Çankaya University, Turkey)

Gianpiero Evola, gevola@unict.it

(Università di Catania, Italia)

Christ Glorieux, christ.glorieux@kuleuven.be

(KU Leuven, Belgium)

Claudia Guattari, claudia.guattari@uniroma3.it

(Università Roma Tre, Italia)

Zühre Sü Gül, zuhre.su@tedu.edu.tr

(TED University, Turkey)

Kirill Horoshenkov, k.horoshenkov@sheffield.ac.uk

(University of Sheffield, United Kingdom)

Kristian Jambrošić, kristian.jambrosic@fer.hr

(University of Zagreb, Croatia)

Cheol-Ho Jeong, chje@dtu.dk

(Technical University of Denmark, Denmark)

Gaetano Licitra, tanosergio0@gmail.com

(Consiglio Nazionale delle Ricerche IPCF, Italia)

Costantino Carlo Mastino, mastino@unica.it

(Università di Cagliari, Italia)

Edoardo Piana, edoardo.piana@unibs.it

(Università di Brescia, Italia)

Francesco Pompoli, francesco.pompoli@unife.it

(Università di Ferrara, Italia)

Chiara Rubino, chiara.rubino@poliba.it

(Politecnico di Bari, Italia)

Monika Rychtarikova, monika.rychtarikova@kuleuven.be

(KU Leuven, Belgium)

Louena Shtrepi, louena.shtrepi@polito.it

(Politecnico di Torino, Italia)

Simone Torresin, simone.torresin@unitn.it

(Università di Trento, Italia)

Konstantinos E. Vogiatzis, kvogiatz@civ.uth.gr

(University of Thessaly, Greece)

Jeremie Voix, jeremie.voix@etsmtl.ca

(École de Technologie Supérieure, Montreal, Canada)

Contatto e-mail della RIA

ria@acustica-aia.it

La rivista utilizza una procedura di referaggio doppiamente cieco (double blind peer review process) in cui i revisori sono scelti in base alla specifica competenza e usa anche la procedura degli articoli su invito.

The journal uses a double blind peer review process in which reviewers are chosen on the basis of specific expertise.

The journal also uses the invited paper procedure.



Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

FrancoAngeli Open Access è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli ne massimizza la visibilità e favorisce la facilità di ricerca per l'utente e la possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più:

http://www.francoangeli.it/come_pubblicare/pubblicare_19.asp

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio "Informatemi" per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.

Rivista
Italiana di
Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 49, n. 1/2025

gennaio-giugno

FrancoAngeli

ISSNe 2385-2615

Autorizzazione n. 17488/1978 del Tribunale di Roma –
Direttore responsabile: Eleonora Carletti – Semestrale
Poste Italiane Spa – Sped. in abb. post. – D.L. 353/2003
(conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB Milano
Copyright © 2025 by FrancoAngeli Srl, Milano.

Pubblicato con licenza Creative Commons Attribuzione -
Non commerciale - Non opere derivate 4.0 Internazionale
(CC BY-NC-ND 4.0).

Sono riservati i diritti per Text and Data Mining (TDM),
AI training e tutte le tecnologie simili.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge
sul diritto d'autore.

L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera
accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste
e comunicate sul sito

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>.

Amministrazione - Distribuzione:
FrancoAngeli Srl, Viale Monza 106, 20127 Milano.
Tel. +39.02.2837141, e-mail: riviste@francoangeli.it.

v. 49, I semestre 2025

Finito di stampare nel mese di settembre 2025

Indice

Editoriale/Editorial

- 7 **Angelo Farina, il suo esempio continuerà ad ispirarci!**
Patrizio Fausti

Articoli scientifici/Scientific papers

- 9 **The effectiveness of an active noise control system with remote microphones technique in a tractor cabin**
Francesco Mori, Andrea Santoni, Patrizio Fausti, Francesco Pompoli, Pietro Nataletti, Paolo Bonfiglio
- 21 **Ecoacustica e struttura forestale: un approccio integrato per l'analisi ecosistemica**
Giorgia Guagliumi, Andrea Potenza, Claudia Canedoli, Roberto Benocci, Giovanni Zambon
- 35 **Realizzazione della "Camera dei Diamanti" e verifica delle prestazioni di spazializzazione del suono**
Jacopo Grassi, Nicola Prodi
- 47 **Miglioramento acustico della Chiesa di Santo Stefano al Ponte Firenze**
Marco Franchini, Carlo Baistocchi, Veronica Amodeo
- 59 **Il rapporto tra i suoni e la città: valutazione della qualità sonora in ambito urbano**
Giulia Valentini, Samantha Di Loreto, Massimo Angrilli, Sergio Montelpare

Note tecniche/Technical notes

- 71 **Analisi delle caratteristiche acustiche di alcuni teatri all'italiana toscani**
Carlo Bartoli, Giacomo Salvadori, Tommaso D'Orazio, Claudia Guattari, Luca Evangelisti, Francesco Asdrubali
- 87 **Riqualficazione acustica in un ambiente ristorativo: un caso di studio**
Alessia Griginis, Laura Giorgia Sorano, Roberto Furlan, Anna Sarcheletti
- 95 **Acoustic comfort and fit-out in open space offices: considerations based on a real case assessment**
Andrea Giglio, Walter Tiano

Vita dell'associazione/Life of the association

- 103 **Resoconto del Simposio internazionale AIA "Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia"**
Gioia Fusaro, Massimo Garai
- 107 **Resoconto del Simposio AIA-UNI "L'evoluzione della normativa tecnica in acustica: ultimi aggiornamenti"**
Chiara Scrosati, Massimo Garai
- 113 **Resoconto del Seminario AIA "Una 'buona' musica dentro e fuori i locali di pubblico spettacolo e all'aperto"**
Lucilla Aiello, Gianpiero Evola, Antonio Gagliano, Gaetano Licitra

Viaggio nei Laboratori di Acustica/Acoustic Laboratory Tour

117 Viaggio nei Laboratori di Acustica: Politecnico di Bari

Ubaldo Ayr, Ettore Cirillo, Francesco Martellotta, Chiara Rubino

Acustica e società/Acoustic and society

125 Il grave impatto acustico della (mala)movida. Mezzi di tutela sotto il profilo giuridico. In particolare l'azione in sede civile

Santo Durelli

Angelo Farina, il suo esempio continuerà ad ispirarci!

Patrizio Fausti*

Nel marzo del 2025 è venuto a mancare il Professor Angelo Farina, una delle figure più note ed influenti nel panorama internazionale dell'acustica applicata e dell'audio spaziale. Questo editoriale è il primo in uscita dopo la sua scomparsa e lo dedichiamo con affetto e riconoscenza alla sua memoria.

Durante la cerimonia di apertura del 51° Convegno dell'Associazione Italiana di Acustica, abbiamo voluto ricordare la figura di Angelo Farina attraverso un dialogo informale, con racconti e testimonianze di alcuni colleghi e amici (Daniele Ponteggia – Presidente AES Italia, Arianna Astolfi, Lamberto Tronchin) e con il prezioso intervento di suo figlio Adriano, che, con passione e competenza, ci ha parlato di alcune ricerche applicate portate avanti da Angelo, mettendo in luce gli aspetti pratici e innovativi del suo lavoro. Ringraziamo di cuore Adriano per aver partecipato a questo momento.

Durante la preparazione dell'incontro, mentre raccoglievamo i materiali e costruivamo una scaletta dei temi da toccare, ci siamo resi conto ancora una volta dell'eccezionale ampiezza e ricchezza del lavoro di Angelo. Riassumere tutto in un dialogo di mezz'ora è apparso subito difficile, quasi impossibile: ogni progetto apriva la porta a nuovi spunti, riflessioni, esperienze condivise. Anche questo ci ha confermato quanto profondo e incisivo sia stato il suo contributo.

Angelo Farina è stato un punto di riferimento scientifico per l'acustica applicata, non solo in Italia, ma a livello internazionale. Professore ordinario all'Università di Parma, ha portato avanti per decenni ricerche pionieristiche in campi che vanno dalla simulazione acustica negli ambienti chiusi con lo sviluppo del software **Ramsete** (basato sul pyramid tracing), al contributo fondante nello sviluppo del metodo **Exponential Sine Sweep (ESS)**, oggi uno standard nella misurazione della risposta impulsiva. I suoi **Aurora Plug-in** e le tecniche di **auralizzazione**, la ricostruzione virtuale di teatri antichi, il progetto **DISIA (con i software CityMap e Disiapyr)**, gli studi su **Ambisonics**, **Ambiophonics**, **SPS (Spatial PCM Sampling)**, l'**acustica subacquea**, l'**audio 3D**, la **Wave Field Synthesis** sono solo alcune delle tappe di un percorso di ricerca straordinariamente vario e approfondito.

Ricordiamo anche le attività per la **Casa del Suono** e **Casa della Musica** di Parma, dove Angelo Farina ha avuto un ruolo fondamentale, contribuendo con visione, competenza e passione allo sviluppo di spazi innovativi per l'ascolto e la spe-

rimentazione sonora (come la **Sala Bianca** e il **Lampadario Sonoro**), coordinando studenti, imprese e ricercatori. Il suo approccio generoso e aperto, unito alla capacità di trasformare la ricerca in esperienza condivisa, ha lasciato un'impronta duratura per la città.

Angelo è stato anche un convinto promotore della **divulgazione e della condivisione libera dei risultati**: molte delle sue soluzioni, strumenti e pubblicazioni sono tuttora accessibili e utilizzati da ricercatori e professionisti in tutto il mondo. La sua generosità nel condividere conoscenza è stata riconosciuta e citata con gratitudine in moltissime testimonianze.

Il riconoscimento della **AES Silver Medal**, conferito dalla Audio Engineering Society nel 2024, ha coronato questo lungo e originale percorso. Si tratta di una delle onorificenze più importanti a livello mondiale nel campo dell'audio engineering, assegnata per contributi scientifici e tecnici di eccezionale rilievo. Nel caso di Angelo, ha voluto premiare in particolare il suo ruolo pionieristico nello sviluppo delle tecniche di misura, simulazione e riproduzione del suono in ambito tridimensionale, così come il suo instancabile impegno per la diffusione della conoscenza e il sostegno concreto alla comunità scientifica internazionale.

Oltre 300 pubblicazioni, centinaia di studenti e collaboratori, progetti internazionali, attività didattiche e divulgative: tutto questo racconta una carriera intensa e appassionata.

Ma sono spesso i ricordi personali a restituire meglio chi era Angelo. Come mi ha scritto Alessandro Cocchi, «Ricordo che Angelo, dottorando a Bologna, chiese di acquistare il primo libro di Yoichi Ando: glielo consegnai nel pomeriggio e il mattino dopo arrivò con il programma informatico già fatto che sviluppava la teoria di Ando sulla preferenza soggettiva». In queste parole c'è la sua curiosità, la rapidità di pensiero, la capacità di trasformare uno stimolo in progetto concreto.

Molti ricercatori nazionali ed internazionali lo ricordano con affetto e riconoscenza: tra le tante testimonianze, citiamo AES Italia che ha sottolineato il contributo scientifico e didattico, la start-up Mach1, che ha evidenziato quanto il suo supporto sia stato determinante per il loro lavoro, l'Istituto Ellenico di Acustica e all'università UNTREF in Argentina, che ne hanno sottolineato competenza, disponibilità e umanità. Particolarmente sentite le testimonianze e i ricordi dei colleghi dell'Università di Parma e del Rettore, del Sindaco di Parma e del personale della Casa della Musica, pubblicati sulla stampa locale.

Molto significativo è stato il **seminario "Acustica e Innovazione: Un Pomeriggio di Studi in Onore del Prof. Angelo Farina"** (disponibile su YouTube) che i colleghi dell'Università

* Presidente Associazione Italiana di Acustica a nome del Consiglio Direttivo AIA e del Comitato Editoriale della RIA

di Parma hanno organizzato il 19 maggio 2025. Durante questo incontro ex allievi e collaboratori hanno presentato ricerche nate grazie al suo insegnamento. È stato un momento di riconoscenza e testimonianza, che ha messo in luce quanto il suo contributo sia stato determinante per tanti percorsi professionali e personali.

Chi ha lavorato con lui sa quanto sapesse unire **rigore scientifico e spirito collaborativo**, con un'ironia intelligente e una dedizione costante alla qualità del lavoro. La sua scomparsa è una grande perdita per tutti noi, ma il suo lascito rappresenta un patrimonio per la comunità acustica. **Il suo esempio continuerà a ispirarci.**

The effectiveness of an active noise control system with remote microphones technique in a tractor cabin¹

Francesco Mori^{a*} | Andrea Santoni^a | Patrizio Fausti^a | Francesco Pompoli^a |
Pietro Nataletti^b | Paolo Bonfiglio^c

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli studi di Ferrara,
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

^b Istituto Nazionale per l'Assicurazione
contro gli Infortuni sul Lavoro,
Via di Fontana Candida, 1, 00078 Roma

^c Materiacustica Srl,
Via C. Ravera, 15/A, 44122 Ferrara

* Corresponding author:
francesco.mori@unife.it

Ricevuto: 19/1/2025

Accettato: 5/3/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19189

ISSNe: 2385-2615

This paper presents a preliminary study of an active noise control (ANC) system implemented on a tractor cabin. This system employs a multi-channel feedforward configuration, with two error microphones and two control loudspeakers positioned in the cabin and an external reference microphone. Furthermore, the system implements the remote microphone technique (RMT), which allows to place the error microphones at a given distance from the region where the quiet zone is to be created, in this case around a head used for binaural measurements. To evaluate the effectiveness of the ANC system, simulated narrowband and broadband disturbance signals are generated through an acoustic source external to the cabin. Despite a reduction in the performance compared to the case without the RMT, caused by internal modelling of the signals, the developed system demonstrates its potentiality for a real application, where the error microphones cannot be left close to the region where noise has to be cancelled.

Keywords: active noise control, tractor, remote microphones technique, multi-channel feedforward, acoustic control, confined space

L'efficacia di un sistema di controllo attivo del rumore con tecnica dei microfoni remoti nella cabina di un trattore

Questo articolo mostra uno studio preliminare di un sistema di controllo attivo del rumore (ANC) implementato sulla cabina di un trattore. Tale sistema sfrutta una configurazione feedforward multi-canale, con due microfoni di errore e due altoparlanti di controllo posizionati in cabina e un microfono di riferimento esterno. Inoltre, il sistema impiega la tecnica dei microfoni remoti (RMT), che consente di posizionare i microfoni di errore a una data distanza dalla zona in cui si vuole creare la zona di quiete, in questo caso attorno alla testa di un manichino utilizzato per misure binaurali. Per la valutazione dell'efficacia del sistema ANC vengono generati segnali di disturbo simulati, a banda stretta e a banda larga, attraverso una sorgente acustica posizionata esternamente alla cabina. I risultati mostrano che, nonostante una riduzione delle prestazioni rispetto al caso senza RMT causata dalla modellazione interna dei segnali, il sistema sviluppato dimostra una potenzialità per un'applicazione reale, dove i microfoni di errore non possono essere lasciati in prossimità della zona in cui si vuole cancellare il rumore.

Parole chiave: controllo attivo del rumore, trattore, tecnica dei microfoni remoti, feedforward multi-canale, controllo acustico, campo confinato

1 | Introduction

Drivers in a tractor cabin are typically exposed to loud noise for prolonged time [1-4]. The noise perceived inside the cabin is typically dominated by low-frequency harmonics [5], mainly in the range between 20 Hz and 1000 Hz, coming from the most relevant noise sources, such as the engine, the exhaust and the cooling fan [6-8]. The attenuation of this low-frequency noise with traditional passive solutions is difficult to be realized [9-11], due to the limited space inside the cabin and the necessity to guarantee visibility to the driver in all the directions through the windowed walls. Furthermore, the acoustic characteristics of the glass walls create additional challenges for noise control,

as they generate multiple reflections that contribute to a complex sound field inside the cabin. The use of hearing protection devices allows for a noise control localized at the driver's ears [12]. However, the prolonged use of these devices represents a constraint causing discomfort for many people. Furthermore, hearing protection devices typically show a limited performance in the frequency range below 500 Hz.

In this framework, an active noise control (ANC) system can represent a valid alternative solution to attenuate the noise in the low-frequency range [13,14]. In the broadest sense of the term, an ANC system is an electroacoustic device which computes through an algorithm and generates, by means of a control loudspeaker, an "anti-noise" signal with equal amplitude and opposite phase with respect to an undesired noise [15,16]. The superposition of these two signals makes them delete

¹ Vincitore del premio "Gino G. Sacerdote" edizione 2025.

each other in a region of space denominated “zone of quiet”. The zone of quiet is typically created around the position of a microphone, called “error microphone”, which senses the residual noise to be processed and minimized through the algorithm. However, the positioning of the error microphone in the spatial region where the noise must be attenuated is often hindered by physical constraints in real-world situations [17-19]. For instance, on industrial or agricultural vehicles, where the target is the attenuation of the noise perceived by the driver, it is necessary to create a zone of quiet around the head, maintaining the error microphone at a certain distance. To overcome this issue, different techniques, denominated “virtual sensing techniques”, were proposed in the literature, permitting to create a zone of quiet at a given distance from the error microphone [20]. These approaches aim at estimating the real-time acoustic field at the target zone based on the data collected from the error microphone placed at a certain distance.

Two types of techniques exist. The first class of algorithms requires a preliminary modelling of the physical system to process the data sensed from the error microphone in the real-time application [21-24]. The performance of the ANC exploiting this class of algorithms depends heavily on the accuracy of the system model, obtained during the preliminary identification and it is sensitive to the location of the physical error microphones. The second class does not need a preliminary identification of the impulse responses of the physical system, but estimates the acoustic field through the sensed data [25], fitting polynomials [26], applying Kalman's filtering or making some simplified hypothesis for the estimation [27,28]. As can be imagined, even though this class of techniques can be more flexible and can be extended to cases with the need of tracking capability [29-32], these methods require a higher computational demand or introduce some limitations in the applications to reduce the computational cost.

This paper is aimed at investigating the applicability of an ANC system with the Remote Microphone Technique (RMT) inside the cabin of a tractor. This method belongs to the first category of techniques, since it estimates the acoustic field at the virtual location by filtering the data sensed by the error microphone through a preliminary modelled transfer function. This ANC system is developed in a multi-channel feed-forward configuration, with two error microphones, two control loudspeakers and one reference microphone. The zone of quiet is created at the ears of a head & torso simulator used for binaural measurements. The tests for the validation of the system were carried out on a tractor cabin in a hemi-anechoic chamber, with a simulated disturbing noise source placed outside the cabin, generating both narrowband and broadband signals. Section 2 illustrates in detail the developed algorithm with the RMT. Section 3 describes the experimental setup used for the tests, distinguishing the devices involved during the preliminary stage and those ones employed in the final application. Section 4 discusses the results obtained with the implemented ANC system, comparing the cases with the noise directly cancelled at the ears and with the RMT. Furthermore, the extension of the zone of quiet and the acoustic

field in the proximity of the head is analysed. Finally, Section 5 reports the conclusions of this study and discusses the possible future developments of this work.

2 | The ANC algorithm with RMT

The Remote Microphone Technique (RMT) belongs to the first class of methods, requiring a preliminary identification of the physical system. With reference to Fig. 1, the algorithm with the RMT can be structured in three stages: two trainings and the real-time operations. Positions $P_i (i = 1, 2)$ indicate the locations where the error microphones are physically placed during both the training stages and real-time operations, sensing the error signals $e_{p,i}(n)$. Positions $V_l (l = 1, 2)$ indicate the locations where the error microphones are physically placed only during the training stages, defining the position of the zone of quiet. During the real-time operations, the sensors in these positions are removed and the virtual error signals $e_{v,i}(n)$ are estimated starting from the physical error signals $e_{p,i}(n)$.

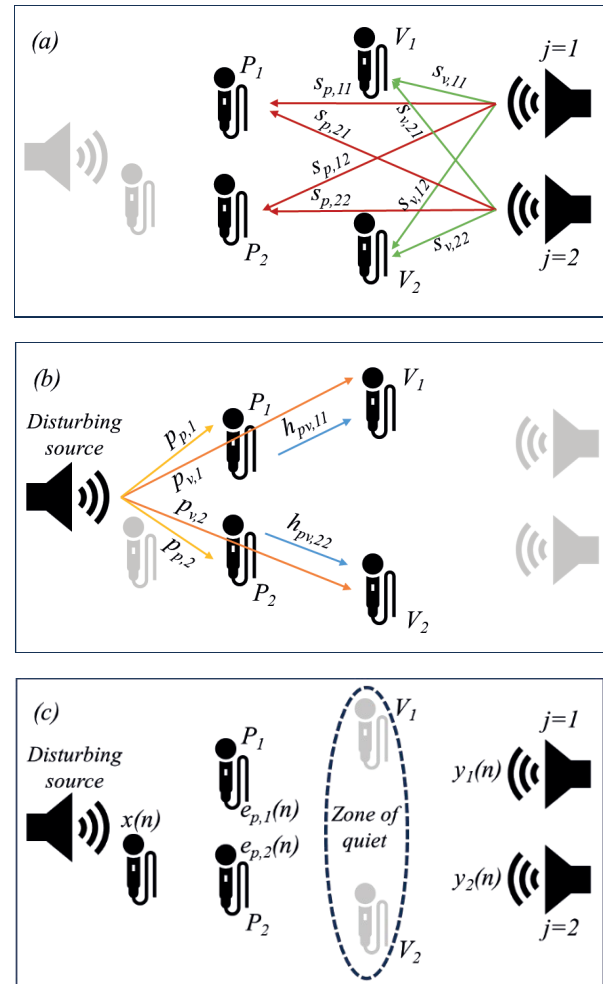


Fig. 1 – Stages of the RMT: (a) secondary paths identification, (b) identification of the physical-virtual impulse responses and (c) final system. The devices not involved in the stage are depicted in grey

Fasi della RMT: (a) identificazione dei percorsi secondari, (b) identificazione delle risposte all'impulso fisico-virtuali e (c) sistema finale. I dispositivi non coinvolti nella fase sono indicati in grigio

Furthermore, during the real-time operations, the $j = th$ control source ($j = 1, 2$) generates the anti-noise signal $y_j(n)$, while the reference microphone measures the reference signal $x(n)$.

In the first stage (Fig. 1(a)), the physical and the virtual secondary paths are estimated. The physical secondary paths s_{pji} (indicated with red arrows) are defined as the impulse responses between the $j = th$ control source and the $i = th$ error microphone in the physical position; the virtual secondary paths s_{vji} (green arrows) as the impulse responses between the $j = th$ control source and the $i = th$ virtual error microphone. For the estimation of these paths several approaches can be used [16,33]. In this paper, the estimation is carried out through the generation of a white noise with the control loudspeaker and modelling a filter through a Least Mean Squares (LMS) approach, such that the difference between the filter output and the signal sensed by the microphone is minimized [15]. In the second stage (Fig. 1(b)), the impulse responses h_{pvil} (blue arrows) between the physical and the virtual positions are estimated. In the developed system, it is assumed that one physical error microphone is used for the estimation of the acoustic field only in the virtual position on the same side, thus considering $i = l$. The estimation of these impulse responses can be determined from the ratio between the spectra of the virtual primary path p_{vi} (orange arrows) and the physical primary path p_{pi} (yellow arrows). The virtual primary path is defined as the impulse response between the disturbing noise source and the virtual error microphone, while the physical primary path represents the impulse response between the disturbing noise source and the physical error microphone. These impulse responses are estimated with the same procedure employed for the secondary paths, but generating the white noise with the disturbing noise source. All these impulse responses are stored in the control unit as finite impulse response (FIR) filters and used for filtering the signals sensed with the error microphones in the physical positions during the real-time operations.

In the third stage (Fig. 1(c)), the microphones in the virtual positions can be removed, since the acoustic field at the virtual positions are estimated through the following real-time operations. An apex' is used to distinguish the estimated quantities from the real ones. The disturbance at the physical positions $d'_{p,i}(n)$ is estimated as:

$$d'_{p,i}(n) = e_{p,i}(n) - \sum_{j=1}^2 s'_{p,ji} * y_j(n), \quad (1)$$

where $*$ denotes a discrete convolutional product. With these data, the disturbance at the virtual locations can be computed as:

$$d'_{v,l}(n) = h'_{pv,il} * d'_{p,i}(n), \quad (2)$$

from which the error signals at the virtual positions are evaluated as:

$$e'_{v,l}(n) = d'_{v,l}(n) - \sum_{j=1}^2 s'_{v,jl} * y_j(n). \quad (3)$$

These virtual signals can be employed as inputs for the ANC algorithm, for computing the adaptive filters necessary

to drive the control sources and generate the zone of quiet at the virtual location. At this scope, any algorithm can be used in combination with the RMT. However, the Filtered-X Least Mean Squares (FXLMS) algorithm was chosen in this paper, for its simplicity of implementation, scalability and possibility of modifications. Considering the virtual error signals $e'_{v,l}(n)$ as inputs, this algorithm aims at minimizing the total energy estimated at the virtual error positions. Thus, defining M the length of the adaptive filters and N the length of the secondary paths, according to the theory of the FXLMS algorithm [34], the adaptive filters are updated as:

$$w_{j,m}(n+1) = w_{j,m}(n) - \mu \sum_{l=1}^2 e'_{v,l}(n) x'_{jl}(n-m) \quad (4)$$

where $m = 0, 1, \dots, M-1$, μ is the step-size parameter, determining the stability and regulating the convergence speed, and x'_{jl} represents the reference signal filtered with the virtual secondary paths:

$$x'_{jl}(n) = s'_{v,jl} * x(n). \quad (5)$$

The output signals $y_j(n)$ emitted by the control sources are computed as:

$$y_j(n) = w_j(n) * x(n). \quad (6)$$

The limit of this technique is the introduction of a causality constraint [35], since only the noise which is firstly sensed at the physical positions can be attenuated at the virtual positions. To overcome this issue, Shi et al. [36] introduced the use of independent virtual and physical paths rather than the related information between the virtual and physical locations to update the control filter, carrying out the computation in the frequency domain. However, the computational demand of this variation in the algorithm is huge.

3 | Experimental setup

Experimental tests were carried out on the cabin of a tractor Case IH Farmall 120U in a hemi-anechoic chamber (Fig. 2). The setup external to the cabin consists of an omnidirectional noise source, emitting both narrowband and broadband noise signals, placed in front of the cabin, about 65 cm far from the reference microphone. Inside the cabin (Fig. 3), the virtual error microphones (EVR and EVL) are allocated at the entrances to the ear canals of a head & torso simulator. They are used for the two training stages of the ANC system and for monitoring the noise cancellation when the ANC is turned on. Two physical error microphones (EPR and EPL), sensing the error signals when the ANC system is turned on, are placed in the anterior part of the cabin. In this scheme, the physical error microphone on the left side (EPL) is used to model the virtual error signal on the left side and the analogue happens for the right side. Two control loudspeakers, endowed with an amplifier, are positioned on a shelf behind the seat, at a height similar to the one of the head. Further-

more, an array of three monitoring microphones with a spacing of 5 cm is placed near the left ear of the manikin to monitor the extension of the zone of quiet.

The hardware driving the whole system is a National Instruments cRio-9063 real-time target with an embedded FPGA (Field Programmable Gate Array) for the deterministic processing of the signals, a 4-channels NI-9234 input module for the acquisition of the data and a 2-channels NI-9260 output module for the generation of the control signals. The real-time target generates and acquires the signals with a sampling frequency of 6.400 Hz, while the operations executed by the adaptive algorithm are scanned by a 40 MHz onboard clock. The tested algorithm was implemented on the hardware within the LabVIEW development environment, by compiling the code directly on the FPGA to have a processing system working in an autonomous way from the PC monitoring the experiments and driving the simulated noise source. During the code compilation, the operations contained in the algorithm are assigned to circuits able to work in parallel to optimize the processing time. All the arrays used to store

signals and filters were implemented on blocks of memory (BRAM), instead of look-up tables (LUT RAM), which would have consumed the more limited resources that the FPGA uses for the logical operations. Moreover, a fixed-point data type was adopted to optimize the usage of resources, rather than floating-point data. The length of the adaptive filters, secondary paths and physical-virtual impulse responses is fixed to 1024 elements. A maximum output voltage of 1 V was imposed inside the implemented algorithm to avoid a large divergence of the control sources in the case of instability. Tests were carried out with both the classical FXLMS algorithm and the version with the RMT, to compare the performance of the two systems.

4 | Results

4.1 | Transfer functions estimation

The secondary and the primary paths, used for the identification of the system impulse responses, are illustrated in Fig. 4 and Fig. 5 respectively, for both the physical and the virtual positions. These functions are shown in terms of transfer functions magnitude in the frequency domain for the sake of interpretation. The magnitude, expressed in dB, is defined as:

$$\text{Magnitude} = 20 \log_{10} (\text{FFT Amplitude}). \quad (7)$$

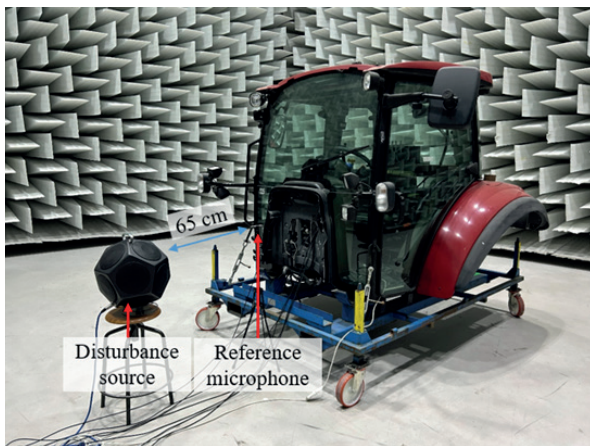


Fig. 2 – Setup sperimentale esterno alla cabina
Experimental setup outside the cabin

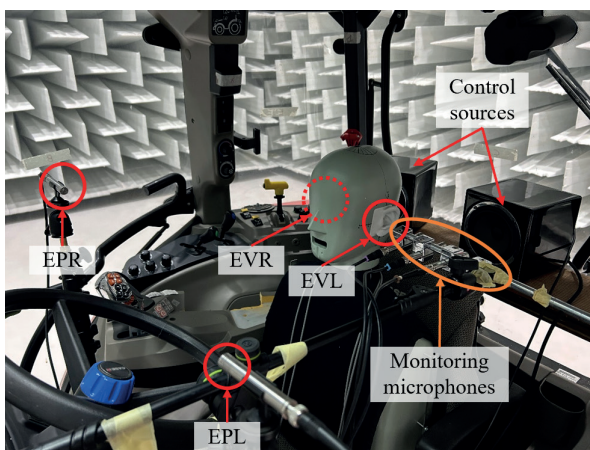


Fig. 3 – Setup sperimentale dentro la cabina (EV = microfoni virtuali, EP = microfoni fisici, L/R = sinistra e destra). L'array di microfoni di monitoraggio non è coinvolto nel sistema ANC
Experimental setup inside the cabin (EV = virtual microphones, EP = physical microphones, L/R = left and right). The array of monitoring microphones is not involved in the ANC system

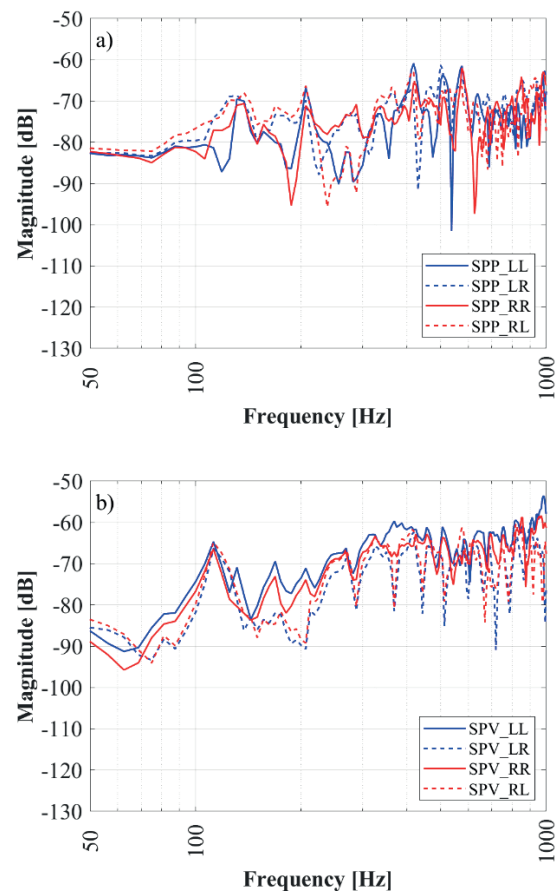


Fig. 4 – Percorsi secondari dei microfoni di errore (a) fisici (SPP) e (b) virtuali (SPV)
Secondary paths of (a) the physical (SPP) and (b) the virtual (SPV) error microphones

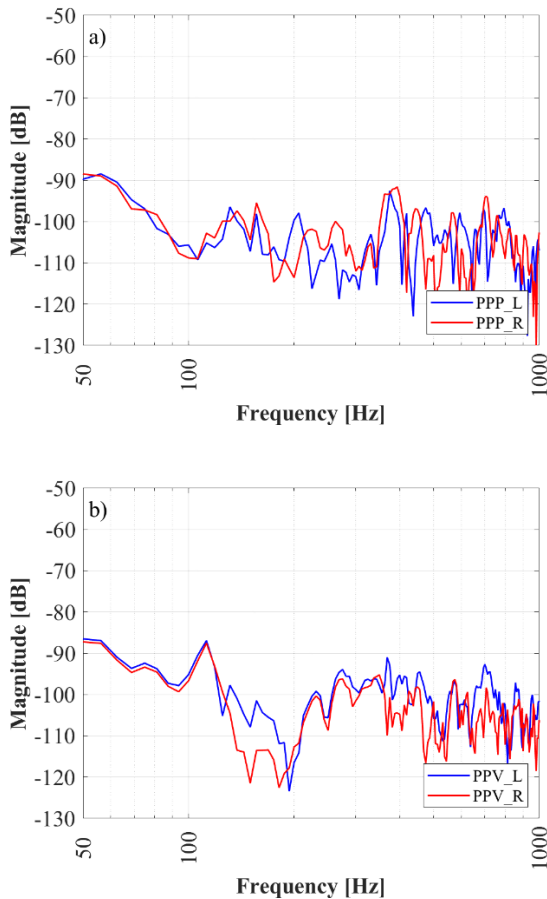


Fig. 5 – Percorsi primari dei microfoni di errore (a) fisici (PPP) e (b) virtuali (PPV)
Primary paths of (a) the physical (PPP) and (b) the virtual (PPV) error microphones

A negative value of the magnitude means that the filter output has a lower amplitude with respect to the filter input, while a positive value means the opposite. The estimation of these filters was carried out through the offline procedure based on the LMS algorithm described in [15], by injecting a white noise into the system (through the control sources for the secondary paths and the disturbing source for the primary paths) and sensing the signal with the error microphones. For this procedure, a filter length of 1024 elements and a step-size of 0.01 were considered. The estimation of the secondary paths is necessary for taking into consideration the latency provided by the control unit (mainly consisting in the analogue-to-digital and digital-to-analogue conversions and the anti-aliasing filter), the modal effects of the cavity and the characteristics of the control sources. On the other hand, the estimation of the primary paths is necessary for the successive computation of the physical-virtual impulse responses.

As can be observed, the secondary paths have an amplitude higher than the primary paths on the whole spectrum. If the disturbing noise source and the control sources were assumed to provide the same output, the previous condition must be considered necessary for avoiding the saturation of the control loudspeakers. However, consider-

ing that the amplitude of the disturbing noise source can differ from the one provided by the control loudspeakers, the previous condition becomes not sufficient and the saturation of the system becomes dependent also on the amplitude of the emitted disturbing signal and on the power limit of the control sources. Moreover, due to the multi-channel configuration, the effectiveness of the ANC system based only on these response functions is difficult to be evaluated, since it depends on the interaction between the four physical and the four virtual secondary paths. In addition, the amplitude of the cross secondary paths (from one control source to the error microphone on the opposite side) is comparable with the one of the direct paths (from one control source to the error microphone on the opposite side). Thus, all these contributions must be considered in the implementation of the algorithm.

The transfer functions employed in the RMT (HPV_L and HPV_R for the left and the right sides respectively), used to model the disturbance signals at the virtual positions starting from the sensing of the error signals at the physical positions, are reported in Fig. 6 for both the sides. These two functions were obtained as the ratio between the spectra of the virtual primary path on one side and the physical primary path on the same side. The positive values in these transfer functions mean that for some frequencies the sound pressure level at the virtual position assumes larger values with respect to the physical position. It can be evinced that the relative position of physical and virtual error microphones is not perfectly symmetric. However, the modelling of these two functions takes into consideration this aspect. It should be noted that these functions model the acoustic field at the virtual position starting from the sensing of the acoustic field in one point of the cabin. However, the noise at the virtual position can be radiated or reflected from all the cabin walls, thus violating the causality constraint for which the noise should propagate from the physical to the virtual microphones.

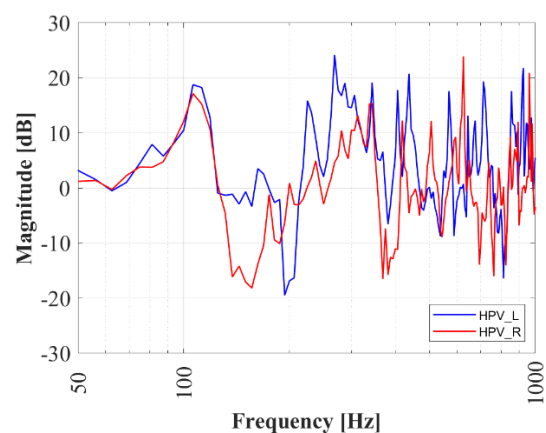


Fig. 6 – Funzioni di trasferimento fisico-virtuali lato sinistro (HPV_L) e lato destro (HPV_R)
Physical-virtual transfer functions of the left side (HPV_L) and the right side (HPV_R)

4.2 | Results for different signals

The results in terms of attenuation obtained in presence of a pure tone at 80 Hz, 100 Hz, 400 Hz and 700 Hz are shown in Fig. 7. The first two frequencies were chosen in the proximity of the cut-off frequency of the control loudspeakers, where the frequency response passes from a rising to a flat slope. The last one represents the maximum frequency considered for the development of the ANC system. The frequency of 400 Hz is a value chosen in the middle of this interval. The attenuation is defined as the difference between the initial noise level, with the ANC turned off, and the final noise level after the achievement of the convergence with the ANC system turned on. The attenuation reached on these frequencies should not be compared between each other, since the initial noise level depends on the position of microphones with respect to the cavity modes. For all the tested tones, the addition of the virtual sensing technique reduces the maximum attenuation reached with the same algorithm without the RMT, since the error signal is estimated and not directly measured at the target zone. The attenuation computed on the right side is lower than the one on the left side, with the exception of the algorithm with the RMT for the tone at 100 Hz, where the effect of the disturbance modelling are prevalent. The reason is that the initial noise level, without the ANC, is higher on the left side than the one on the right side. Thus, the system concentrates its effect on reducing the signal with the highest energy. The algorithm with the RMT is able to attenuate the noise on both sides for the tones at 100 Hz, 400 Hz and 700 Hz. For the tone at 80 Hz, it provides a small attenuation on the left side and a limited amplification on the right side. These results strongly depend on the modelling of the transfer functions HPL_L and HPV_R at each frequency and, thus, on the relative position between the physical and the virtual error microphones. It should be noted that the choice of another position for the physical microphones could provide better results, intercepting the signal coming from other directions.

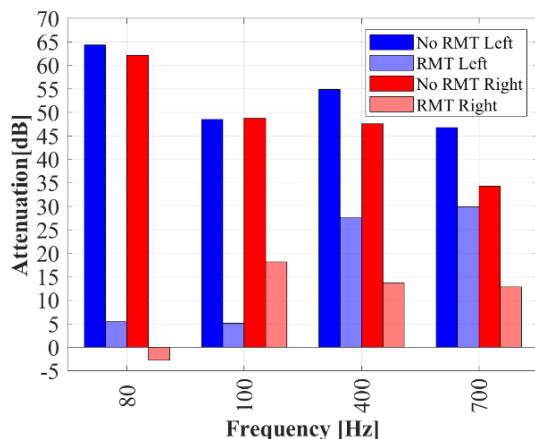


Fig. 7 – Attenuazione raggiunta con diversi toni puri
Attenuation reached with different pure tones

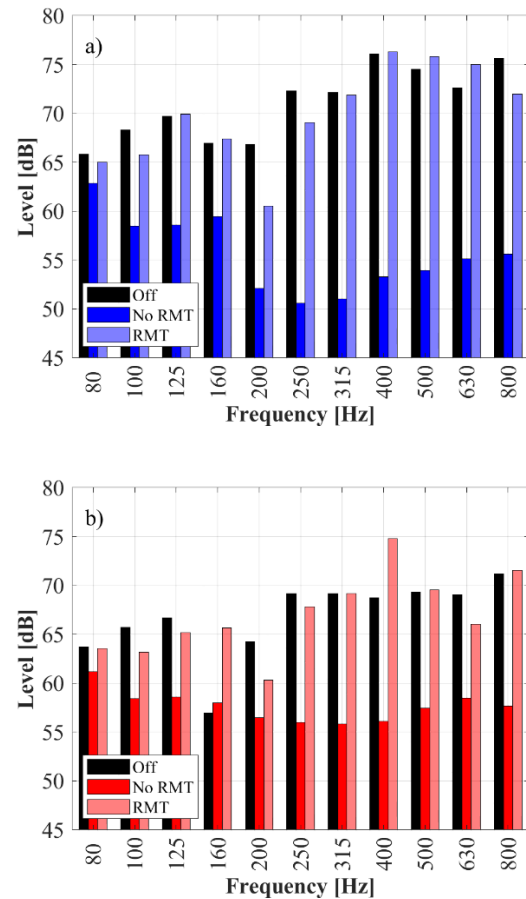


Fig. 8 – Livello di pressione sonora con un segnale di rumore pseudo-random: a) lato sinistro, b) lato destro
Sound pressure level with a pseudo-random noise signal:
a) left side, b) right side

Secondly, a pseudo-random noise signal was used for the evaluation of the performance. This signal combines characteristics of both pure tones and white noise: like white noise, it contains a broad range of frequencies, but like pure tones, it maintains a periodic pattern, repeating every 0.1 s. Thus, it can be seen as an intermediate case between a pure tone and a pure broadband noise. The results in presence of this signal are illustrated in Fig. 8. In this case, the algorithm with a direct cancellation at the ears attenuates the noise in all the bands of interest, concentrating its effect on the bands between 200 Hz and 800 Hz. On the other hand, the algorithm with RMT shows more difficulties in providing a good noise cancellation. The RMT was able to attenuate the noise in some bands, for instance at 200 Hz and 250 Hz, even though without reaching the same good performance of the algorithm without the virtual technique. Furthermore, the RMT generated some amplifications in the bands of 160 Hz and 400 Hz on the right side, bringing the noise to a level similar to the left side.

Finally, the tests were carried out in presence of a pure white noise. This signal can be imagined as the previous pseudo-random noise signal, in which the periodicity is removed. The results are reported in Fig. 9. The performance of the algorithm with the RMT becomes comparable to that

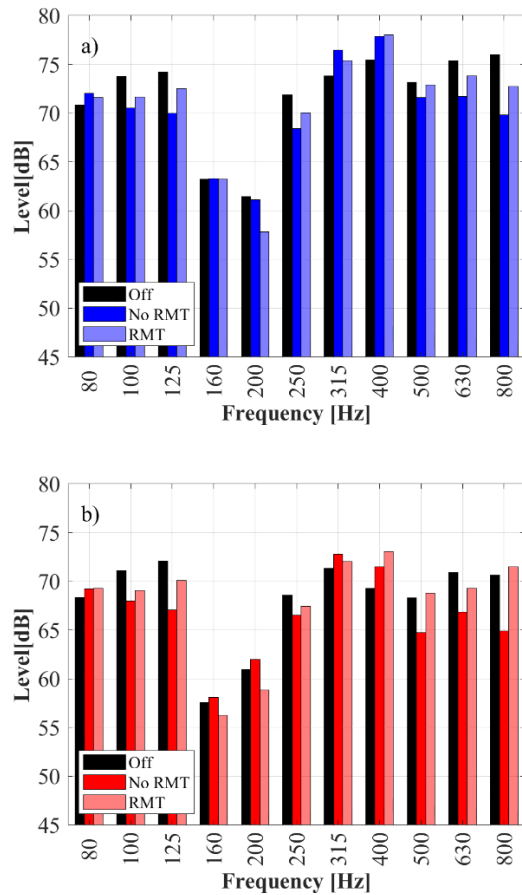


Fig. 9 – Livello di pressione sonora con un segnale di rumore bianco: a) lato sinistro, b) lato destro
Sound pressure level with a white noise signal: a) left side, b) right side

one of the basic algorithm without a virtual technique. The RMT attenuates the noise between the bands of 100 Hz and 250 Hz on both sides, overcoming the performance of the algorithm without a virtual technique in the band of 200 Hz. On the other hand, it generates an amplification similar to the one provided by the basic algorithm in the bands of 315 Hz and 400 Hz and attenuates the noise between 500 Hz and 800 Hz on the left side. The limited capability of attenuation in the presence of a broadband signal for both the algorithms can be related to the LMS procedure: since the updating of the adaptive filters occurs in an iterative way, the lack of periodicity does not allow the coefficients to converge quickly to an optimal value. Furthermore, the radiation and the reflection of noise from all the cabin walls increment the complexity of the problem, in particular for the algorithm with RMT, which is not able to model the noise which propagates without respecting the causality constraint between the physical and the virtual positions.

The results in terms of overall attenuation are reported in Tab. 1 and Tab. 2 for the pseudo-random noise and the white noise signals respectively. Comparing the two tables, it can be observed that the removal of the periodicity affects in particular the algorithm without the RMT. The ANC system with the RMT provides a small overall attenuation on the left

side and an amplification on the right side. However, it should be noted that the initial overall noise level was 3 dB lower on the right side for both the pseudo-random and the white noise signals and, thus, this amplification is considered acceptable if it provides attenuation on the loudest side.

Tab. 1 – Attenuazione globale per rumore pseudo-random
Overall attenuation for a pseudo-random noise signal

Side	No RMT		RMT	
	Left	Right	Left	Right
Attenuation [dB]	15.1	10.0	0.3	-1.0
Attenuation [dB(A)]	19.5	12.1	0.3	-0.9

Tab. 2 – Attenuazione globale per rumore bianco
Overall attenuation for a white noise signal

Side	No RMT		RMT	
	Left	Right	Left	Right
Attenuation [dB]	0.9	1.4	0.3	-0.1
Attenuation [dB(A)]	1.8	2.2	0.8	-0.5

4.3 | Extension of the zone of quiet

In a free field condition, the extension of the zone of quiet where a mean reduction of 10 dB occurs is estimated as one tenth of the acoustic wavelength [37]. The shape of this region can change in a confined space such as in the presence of obstacles, due to the reflections and to diffraction effects. Furthermore, the shape depends on the number of actuators and sensors involved in the ANC system. In this case study, the extension of the part of the zone of quiet on the left side, the loudest one, is monitored through an array of three microphones, not involved in the ANC system and placed in line with a spacing of 5 cm. The results are shown in Fig. 10 for the tones with a frequency of 100 Hz and 400 Hz respectively. In absence of a virtual technique, the zone of quiet created by the ANC system is centred onto the error microphone, where the initial noise level is brought to the background noise level for all the tested tones. For the tone at 100 Hz (Fig. 10(a)), the attenuation obtained without the RMT is concentrated mainly on the first 5 cm. When the RMT is employed, the attenuation is more limited, but is maintained constant with the distance. A similar graph can be obtained with the tone at 80 Hz. In the presence of a tone with a frequency of 400 Hz (Fig. 10(b)), the attenuation is similar to the previous case in the first 10 cm for the algorithm without the RMT. However, the algorithm employing the RMT provides a larger attenuation with respect to the previous case, becoming comparable to the case without the RMT for a distance beyond 5 cm. For a tone at 700 Hz, not reported in these graphs, the attenuation is important strictly in the first 5 cm from the ear for both the algorithms, while it becomes limited for higher distances assuming similar values for the

two algorithms. Since the distance between the two ears was about 15 cm, this fact suggests that two small zones of quiet are created for this frequency, one in the proximity of each ear. In general terms, no amplification was sensed in the analysed acoustic field for all the employed tones. The increment of the disturbing tonal frequency reduces the extension of the zone of quiet. The shape depends on the tonal frequency combined with the modal effects inside the cabin.

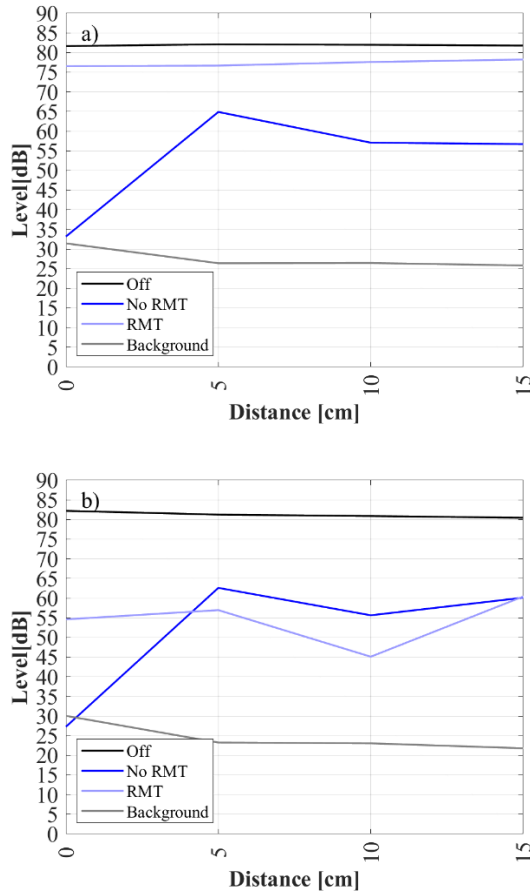


Fig. 10 – Estensione della zona di quiete per i toni a
a) 100 Hz e b) 400 Hz
Extension of the zone of quiet for the tones at
a) 100 Hz and b) 400 Hz

The same analysis was conducted with the pseudo-random noise signal. Since this type of noise excites a broad range of frequencies, the results were analysed as spectrograms as a function of the distance from the ear and of the frequency. The results are reported in Fig. 11 for the cases without and with the RMT respectively. Observing the case without the virtual sensing technique in Fig. 11(a), the zone of quiet extends beyond 15 cm for the frequency bands from 160 Hz to 500 Hz, with a higher performance at 250 Hz and 500 Hz. In the first 5 cm, all the bands are interested by a significant attenuation. The bands between 160 Hz and 200 Hz show a lower attenuation with respect to the range between 200 Hz and 500 Hz. However, it should be noted that the virtual error microphones fall into a nodal position for the cavity modes, making these contributions less relevant for

the overall noise level. For high frequencies and for a distance larger than 10 cm, the ANC system provides an amplification larger than 1 dB. When the RMT is employed (Fig. 11(b)), the values of the attenuation are more limited and the zone of quiet extends up to 15 cm only for the bands between 160 Hz and 250 Hz. The area with an amplification larger than 1 dB is more extended with respect to the previous case. In particular, this amplification reaches the error microphone for the band of 630 Hz. This aspect is strongly related to the preliminary modelling stages, in particular to the one of the physical-virtual impulse response, which is not able to consider the noise coming from different directions inside the cabin. Furthermore, the influence of the cavity modes combined with the modelling error of the acoustic field in the algorithm, can provide different shapes of the zone of quiet, with the highest attenuation not centred on the target zone.

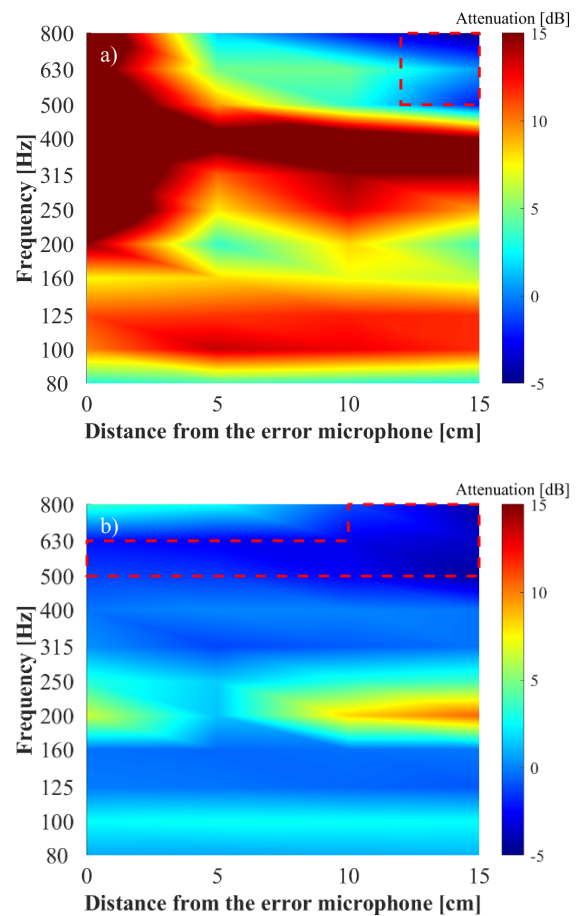


Fig. 11 – Estensione della zona di quiete per segnale di rumore pseudo-random: a) senza RMT, b) con RMT (la linea tratteggiata evidenzia l'area con amplificazione maggiore di 1 dB)
Extension of the zone of quiet for the pseudo-random noise signal: a) without the RMT, b) with the RMT (the dashed line highlights the area with amplification larger than 1 dB)

Finally, to demonstrate that the performance of the ANC system with the RMT is dependent on the type of environment, a comparison with the attenuation reached in a free field condition, assuming same distances between microphones and loudspeakers, is shown in Fig. 12 for the tones

at 100 Hz and 400 Hz. As it can be observed, in absence of reflections causing non-causal noise propagation, the attenuation reaches higher values, overcoming the performance obtained inside the enclosure.

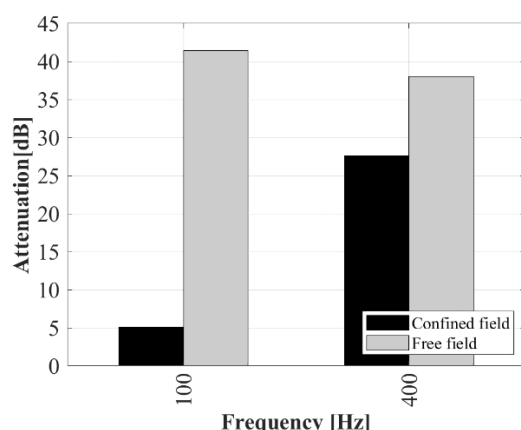


Fig. 12 – Confronto dell'attenuazione raggiunta con RMT per due toni puri in condizioni di campo libero e in campo confinato
Comparison of the attenuation reached with the RMT for two pure tones in a free field and confined field conditions

5 | Conclusions

In this paper, an evaluation of the effectiveness of an ANC system with the RMT applied to a tractor cabin was carried out. This system was analysed in a multi-channel configuration considering different typologies of disturbing signals. The results show that the ANC system produces a lower attenuation with respect to the algorithm with a direct cancellation of the noise at the ears. However, it should be noted that in a real-world application, the error microphones cannot be positioned near the target zone, but need to be placed far away. Moreover, the performance of the ANC system decreases with the complexity of the disturbing signal, passing from a periodic narrowband signal to a non-periodic broadband one. This happens both with and without the RMT. However, the internal modelling of the disturbance signals at the virtual positions provides a higher degradation of the performance, passing from a tonal noise to a pseudo-random noise. On the other hand, the results for a pure broadband noise are comparable for systems with and without the virtual sensing technique. Finally, the extension of the zone of quiet on the loudest side was monitored through an array of microphones. It emerged that the extension of this zone is dependent on the disturbing frequency and on the type of signal. Furthermore, the shape of the zone of quiet is strongly affected by the cavity modes, which could determine attenuation or amplification regions. In none of the cases with a tonal noise an amplification was sensed far from the target zone. However, for a pseudo-random noise signal, amplification of the noise can occur for high frequencies, in particular for a high distance from the ear. The general conclusions can be extended to any type of ANC system applied to an enclosure.

For a further development of this application, the number of physical error microphones could be incremented for a better estimation of the acoustic field at the virtual position. In particular, the placement of these microphones all around the cabin could prevent the violation of the causality constraint between the physical and the virtual positions, improving the modelling of the disturbance. However, the length of the filters and the usage of the resources of the control unit should be revised, due to a higher complexity of the system. After the improvement of this ANC system in lab, a validation of the performance on a real tractor should be carried out. In fact, the mechanism of excitation provided by the acoustic noise source, investing and putting in vibration primarily the frontal window of the cabin, can be different from the excitation provided by a real engine, making the whole structure radiating noise.

Conclusioni

In questo articolo è stata effettuata una valutazione dell'efficacia di un sistema ANC con RMT applicato alla cabina di un trattore. Questo sistema è stato analizzato in una configurazione multi-canale considerando diverse tipologie di segnali di disturbo. I risultati mostrano che il sistema ANC produce un'attenuazione inferiore rispetto all'algoritmo con una cancellazione diretta del rumore alle orecchie. Tuttavia, va notato che in un'applicazione reale i microfoni di errore non possono essere posizionati vicino alla zona target, ma devono essere collocati a una certa distanza. Inoltre, le prestazioni del sistema ANC diminuiscono con la complessità del segnale di disturbo, passando da un segnale periodico a banda stretta a uno non periodico a banda larga. Ciò avviene sia con sia senza RMT. Tuttavia, la modellazione interna dei segnali di disturbo nelle posizioni virtuali determina un maggior degrado delle prestazioni, passando da un rumore tonale a un rumore pseudo-random. D'altra parte, i risultati per un rumore puramente casuale sono comparabili per i sistemi con e senza la tecnica di rilevamento virtuale. Infine, l'estensione della zona di quiete sul lato più rumoroso è stata monitorata attraverso un array di microfoni. È emerso che l'estensione di questa zona dipende dalla frequenza del disturbo e dal tipo di segnale. Inoltre, la forma della zona di quiete è fortemente influenzata dai modi di cavità, che possono determinare regioni di attenuazione o amplificazione. In nessuno dei casi con rumore tonale è stata rilevata un'amplificazione lontano dalla zona target. Tuttavia, per un segnale di rumore pseudo-random, l'amplificazione del rumore può verificarsi per alte frequenze, in particolare a distanza dall'orecchio. Le conclusioni generali possono essere estese a qualsiasi tipo di sistema ANC applicato a un ambiente chiuso.

Per un ulteriore sviluppo di questa applicazione, il numero di microfoni di errore fisici potrebbe essere aumentato per una migliore stima del campo acustico nella posizione virtuale. In particolare, il posizionamento di questi microfoni attorno alla cabina potrebbe prevenire la violazione del vincolo di causalità tra le posizioni fisiche e virtuali, migliorando la modellazione del disturbo. Tuttavia, la lunghezza dei filtri e l'utilizzo delle risorse dell'unità di controllo dovrebbero essere rivisti a causa della maggiore complessità del sistema. A seguito del miglioramento di questo sistema ANC in laboratorio, dovrebbe essere effettuata una validazione delle prestazioni su un trattore reale. Infatti, il meccanismo di eccitazione fornito dalla

sorgente di rumore acustico, che investe e mette in vibrazione principalmente il vetro anteriore della cabina, potrebbe essere diverso dall'eccitazione fornita da un motore reale, che fa irradiare rumore all'intera struttura.

6 | Acknowledgement

This work was supported by the BRIC 2022 ID-11 project from INAIL (National Institute for Insurance against Accidents at Work).

References

- [1] A. Pizzuti, A. Papale, L. A., P. Nataletti, I. Pinto, G. Campo, Sistema di sorveglianza delle malattie professionali: Ipoacusia da rumore un problema di salute ancora attuale sul lavoro, Inail, 2018.
- [2] Relazione annuale 2021 del Presidente - Appendice statistica, Inail, 2022.
- [3] G. Santoro, G. Vassalini, L. Ragni, G. Casini Ropa, La misura dell'esposizione al rumore in agricoltura, (1999).
- [4] K.N. Dewangan, G.V.P. Kumar, V.K. Tewari, Noise characteristics of tractors and health effect on farmers, *Appl. Acoust.* 66 (2005) 1049–1062. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.01.002>.
- [5] J.D.C. Talamo, Effects of cab noise environment on the hearing perception of agricultural tractor drivers, *Appl. Acoust.* 12 (1979) 125–137. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(79\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0003-682X(79)90030-6).
- [6] V. Ravindran, B. Prakash, Agricultural tractor noise control, in: *SAE 2013 Commer. Veh. Eng. Congr.*, 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2342>.
- [7] S. Velioglu, A. Yildiz, M. Doganli, O. Tandogan, Interior noise analysis and prediction of a tractor cabin with emphasis on correlations with experimental data, in: *SAE 2013 Noise Vib. Conf. Exhib.*, 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1964>.
- [8] P.S. Yadav, A.A. Gaikwad, S.Y. Badgujar, Y.V. Surkutwar, N.V. Karanth, Noise reduction on agricultural tractor, in: *Symp. Int. Automot. Technol.* 2013, 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-26-0103>.
- [9] A.M. Abd-El-Tawwab, S.A. Abouel-Seoud, F.M. El-Sayed, T.A. Abd-El-Hakim, Characteristics of agriculture tractor interior noise, *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control* 19 (2000) 73–81. <https://doi.org/10.1260/0263092001492822>.
- [10] J.P. Evans, R.T. Whyte, J.S. Price, J.M. Bacon, D.A. Semple, A.J. Scarlett, R.M. Stayner, Practical solutions to noise problems in agriculture, Health and Safety Executive, 2004.
- [11] H.-W. Han, W.-H. Im, H.-J. Choi, S.-J. Cho, S.-D. Lee, Y.-J. Park, Effect of sound insulation on noise reduction in an agricultural tractor cab, *Sci. Rep.* 12 (2022) 22038. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26408-3>.
- [12] D. Pessina, M. Guerretti, Effectiveness of hearing protection devices in the hazard reduction of noise from used tractors, *J. Agric. Eng. Res.* 75 (2000) 73–80. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0489>.
- [13] J. Jiang, Y. Li, Review of active noise control techniques with emphasis on sound quality enhancement, *Appl. Acoust.* 136 (2018) 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.02.021>.
- [14] S.J. Elliott, P.A. Nelson, Active noise control, *IEEE Signal Process. Mag.* 10 (1993) 12–35. <https://doi.org/10.1109/79.248551>.
- [15] S.M. Kuo, D.R. Morgan, Active noise control: a tutorial review, *Proc. IEEE* 87 (1999) 943–975. <https://doi.org/10.1109/5.763310>.
- [16] S.M. Kuo, I. Panahi, K.M. Chung, T. Horner, M. Nadeski, J. Chyan, Design of active noise control systems with the TMS320 family, (1996).
- [17] Z. Zhang, C. Shi, X. Lv, Z. Ling, Active control of interior road noise using the remote microphone technique, *INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc.* 265 (2023) 916–920. https://doi.org/10.3397/IN_2022_0130.
- [18] W. Jung, S.J. Elliott, J. Cheer, Local active control of road noise inside a vehicle, *Mech. Syst. Signal Process.* 121 (2019) 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.003>.
- [19] S. Elliott, C.K. Lai, T. Vergez, J. Cheer, Robust stability and performance of local active control systems using virtual sensing, in: *23rd Int. Congr. Acoust.*, 2019.
- [20] D. Moreau, B. Cazzolato, A. Zander, C. Petersen, A review of virtual sensing algorithms for active noise control, *Algorithms* 1 (2008) 69–99. <https://doi.org/10.3390/a1020069>.
- [21] N. Jiang, C. Shi, H. Li, Y. Kajikawa, Near-field error sensing of multi-channel active noise control using virtual sensing technique, in: *25th Int. Congr. Sound Vib.*, 2018.
- [22] P.S.S. Ahamed, P. Duraiswamy, Virtual sensing active noise control system with 2D microphone array for automotive applications, in: *2019 6th Int. Conf. Signal Process. Integr. Netw. SPIN, IEEE, Noida, India, 2019*: pp. 151–155. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2019.8711608>.
- [23] R. Maeda, Y. Kajikawa, Comparisons of two virtual sensing methods for broadband noise, in: *23rd Int. Congr. Acoust.*, 2019.
- [24] S. Turpati, V. Moram, Implementation of robust virtual sensing algorithm in active noise control to improve silence zone, *Int. J. Speech Technol.* 26 (2023) 51–62. <https://doi.org/10.1007/s10772-021-09845-9>.
- [25] E. Sasaki, M. Kamata, A. Sano, Virtual error approach to direct multi-channel adaptive active noise control, in: *13th Int. Congr. Sound Vib.*, 2006.
- [26] M. Pawelczyk, Polynomial approach to design of feedback virtual-microphone active noise control system, in: *13th Int. Congr. Sound Vib.*, 2006.
- [27] I.T. Ardekani, W.H. Abdulla, An adaptive signal processing system for active control of sound in remote locations, in: *2013 Asia-Pac. Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf.*, IEEE, Kaohsiung, Taiwan, 2013: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/AP-SIPA.2013.6694322>.
- [28] I.T. Ardekani, W.H. Abdullah, S.U. Rehman, Remote FxLMS algorithm for active control of sound in remote locations, in: *Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf. APSIPA 2014 Asia-Pac.*, IEEE, Chiang Mai, Thailand, 2014: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/APSIPA.2014.7041553>.
- [29] D.J. Moreau, B.S. Cazzolato, A.C. Zander, Active noise control at a moving virtual microphone using the SOTDF moving virtual sensing method, in: *Proc. Acoust.* 2009, 2009.
- [30] S. Höber, C. Pape, E. Reithmeier, Generating a position-adaptive quiet zone in enclosed spaces, in: *Internoise 2017*, 2017.
- [31] Y. Kajikawa, Y. Kajikawa, A Study on Improving the Robustness of Virtual Sensing Methods in ANC Systems, *INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc.* 265 (2023) 5451–5458. https://doi.org/10.3397/IN_2022_0801.
- [32] C.K. Lai, B. Lam, D. Shi, W.-S. Gan, Real-time modelling of observation filter in the remote microphone technique for an active noise control application, in: *ICASSP 2023 - 2023 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.* ICASSP, IEEE, Rhodes Island, Greece, 2023: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICASSP49357.2023.10095752>.

- [33] S.J. Elliott, J. Garcia-Bonito, Active cancellation of pressure and pressure gradient in a diffuse sound field, *J. Sound Vib.* 186 (1995) 696–704. <https://doi.org/10.1006/js-vi.1995.0482>.
- [34] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, P. Nataletti, The effectiveness of least mean squared-based adaptive algorithms for active noise control system in a small confined space, *Appl. Sci.* 13 (2023) 11173. <https://doi.org/10.3390/app132011173>.
- [35] S.J. Elliott, W. Jung, J. Cheer, Causality and robustness in the remote sensing of acoustic pressure, with application to local active sound control, in: *ICASSP 2019 - 2019 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. ICASSP, IEEE, Brighton, United Kingdom, 2019*: pp. 8484–8488. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682474>.
- [36] D. Shi, B. Lam, W. Gan, Analysis of multichannel virtual sensing active noise control to overcome spatial correlation and causality constraints, in: *ICASSP 2019 - 2019 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. ICASSP, IEEE, Brighton, United Kingdom, 2019*: pp. 8499–8503. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682344>.
- [37] A. David, S.J. Elliott, Numerical studies of actively generated quiet zones, *Appl. Acoust.* 41 (1994) 63–79. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0003-682X(94)90085-X).

Ecoacustica e struttura forestale: un approccio integrato per l'analisi ecosistemica¹

Giorgia Guagliumi^{a*} | Andrea Potenza^a | Claudia Canedoli^a | Roberto Benocci^a | Giovanni Zambon^a

^a Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra,
Università degli Studi Milano-Bicocca,
Piazza dell'Ateneo Nuovo, 1, 20126 Milano

* Autore di riferimento:
g.guagliumi@campus.unimib.it

Ricevuto: 27/2/2025

Accettato: 6/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19517

ISSN: 2385-2615

L'ecoacustica rappresenta un approccio innovativo per lo studio delle interazioni tra struttura ecosistemica e paesaggio sonoro, fornendo metriche quantitative per l'analisi della biodiversità e degli impatti antropici. Questo studio, condotto in un Sito di Interesse Comunitario (SIC) nel Parco Regionale della Valle del Ticino, integra il monitoraggio acustico passivo con dettagliati rilievi vegetazionali per indagare le relazioni tra soundscape e complessità forestale. L'analisi delle componenti principali e la modellizzazione statistica degli indici ecoacustici e dei parametri vegetazionali rivelano una chiara associazione tra l'eterogeneità della copertura arborea e la diversità acustica, evidenziando il ruolo degli alberi maturi e della biomassa nel modulare le proprietà sonore dell'ambiente. Questi risultati confermano il valore dell'ecoacustica come strumento per la ricerca ecologica, dimostrando l'importanza di un approccio interdisciplinare nella comprensione delle dinamiche ambientali e nella definizione di strategie efficaci per la conservazione degli ecosistemi dall'inquinamento acustico.

Parole chiave: ecoacustica, rilievi vegetazionali, comunità ornitiche, rumore stradale, paesaggio sonoro

Ecoacoustics and forest structure: an integrated approach for ecosystem analysis

Ecoacoustics is an innovative approach to study the interactions between ecosystem structure and soundscape, providing quantitative metrics for the analysis of biodiversity and human impacts. This study, conducted in a Site of Community Interest (SCI) in the Ticino Valley Regional Park, integrates passive acoustic monitoring with detailed vegetation surveys to investigate the relationships between soundscape and forest complexity. Principal component analysis and statistical modelling of ecoacoustic indices and vegetation parameters reveal a clear relationship between tree cover heterogeneity and acoustic diversity, highlighting the role of mature trees and biomass in modulating the acoustic properties of the environment. These results confirm the value of ecoacoustics as a tool for ecological research and demonstrate the importance of an interdisciplinary approach in understanding environmental dynamics and defining effective strategies for protecting ecosystems from noise pollution.

Keywords: ecoacoustics, vegetation assessment, bird community, traffic noise, soundscape

1 | Introduzione

Negli ultimi decenni, il monitoraggio acustico ha acquisito un ruolo sempre più centrale nelle scienze ecologiche, grazie alla sua capacità di acquisire dati continui, non invasivi e altamente risolutivi sulla struttura e funzionalità degli ecosistemi [1]. In particolare, l'eco-acustica, disciplina che studia le componenti sonore degli ambienti naturali e antropizzati, offre una prospettiva innovativa per l'analisi delle interazioni tra processi biotici e abiotici. Il paesaggio sonoro di un'area può essere concettualmente scomposto in tre categorie fondamentali:

1. la biofonia, che comprende i segnali acustici emessi da organismi viventi;
2. la geofonia, che include i suoni di origine non biologica generati da fenomeni atmosferici e geofisici, come vento, pioggia e frane;

3. l'antropofonia, che raccoglie le emissioni sonore derivanti dalle attività umane [2, 3, 4].

Lo studio di queste componenti consente di caratterizzare la biodiversità acustica e di valutare le pressioni antropiche sull'ambiente, fornendo parametri oggettivi per la diagnosi dello stato ecologico degli habitat e per lo sviluppo di strategie di conservazione basate su evidenze acustiche [5].

L'inquinamento acustico rappresenta una delle minacce emergenti per gli ecosistemi, con effetti che possono alterare i comportamenti di molte specie, ridurre la capacità di comunicazione tra gli individui e modificare le dinamiche ecologiche su larga scala [6]. Il rumore di origine antropica, infatti, non solo si sovrappone ai segnali naturali, ma può anche determinare variazioni nei pattern di vocalizzazione di alcune specie, influenzandone la distribuzione e le interazioni all'interno degli habitat. L'ecoacustica offre strumenti innovativi per studiare tali impatti, permettendo di valutare la qualità sonora degli ambienti e di identificare eventuali segnali di stress ecologico [3, 7].

¹ Vincitrice del premio "Amedeo Giacomini" edizione 2025.

Un aspetto chiave dell'ecoacustica è l'uso di registratori automatici per il monitoraggio acustico passivo (PAM) [8, 9], una tecnica che consente di raccogliere dati in differenti aree e per lunghi periodi, senza interferire con il comportamento della fauna [10]. Il suddetto approccio rende possibile il confronto dei paesaggi sonori in diversi contesti ambientali, fornendo indicazioni sullo stato di conservazione degli habitat e sulle variazioni temporali nella presenza delle specie. Per analizzare i dati raccolti, sono stati sviluppati numerosi indici eco-acustici, che sintetizzano la complessità del soundscape e possono essere impiegati come indicatori della biodiversità e della qualità ambientale [10, 11, 12].

In questo quadro metodologico, l'obiettivo principale dello studio è quello di esaminare il paesaggio sonoro di un'area di rilevante valore ecologico, ovvero un Sito di Interesse Comunitario (SIC), e analizzare la relazione tra le caratteristiche acustiche e la struttura vegetazionale dell'area. Sebbene l'area di studio non si estenda su dimensioni particolarmente ampie, essa presenta una notevole eterogeneità ambientale, con habitat distinti che offrono un'opportunità unica per esplorare come le variabili ecologiche possano interagire all'interno di un paesaggio complesso e dinamico. L'obiettivo di tale analisi è dunque quello di verificare la presenza di correlazioni tra diversi aspetti interdisciplinari, riflettendo sulla necessità di adottare un approccio integrato, in cui la complessità dell'ambiente e le sue interazioni devono essere considerate nel loro insieme, piuttosto che isolando singoli fattori.

2 | Materiali e metodi

2.1 | Area di studio

L'area di studio si colloca presso la Lanca del Moriano, all'interno del Parco Naturale Lombardo della Valle del Ticino, nelle immediate vicinanze del comune di Bereguardo (PV). Essa si estende per circa 39 ettari lungo la sponda sinistra del fiume Ticino, in corrispondenza dell'estremità meridionale del Naviglio di Bereguardo (Fig. 1a). Il contesto geomorfologico è caratterizzato dalla presenza della depressione valliva ticinese e dalla transizione verso la bassa pianura, una zona in cui il reticolo fluviale ha inciso il paesaggio, determinando la formazione di ambienti eterogenei di elevato valore ecologico.

Un elemento di forte antropizzazione che incide sul contesto acustico e ambientale dell'area è rappresentato dall'autostrada A7, denominata "Autostrada dei Giovi", asse viario strategico che connette la conurbazione milanese con il porto di Genova. Questa infrastruttura rappresenta una fonte rilevante di pressione ambientale, associata a un gradiente di disturbo acustico crescente in funzione della densità del traffico veicolare. Oltre alle implicazioni sonore, la presenza dell'arteria stradale genera un effetto di barriera ecologica, frammentando la continuità degli ecosistemi e alterando la connettività biologica su scala paesaggistica [13].

Dal punto di vista della conservazione, il sito è incluso all'interno del Sito di Interesse Comunitario (SIC) IT2080014

"Basso Corso e Sponde del Ticino", un'area sottoposta a tutela nell'ambito della Rete Natura 2000. Tale designazione testimonia la rilevanza della zona per la salvaguardia di habitat di pregio e di specie di interesse comunitario, conformemente agli obiettivi della Direttiva Habitat (92/43/CEE).

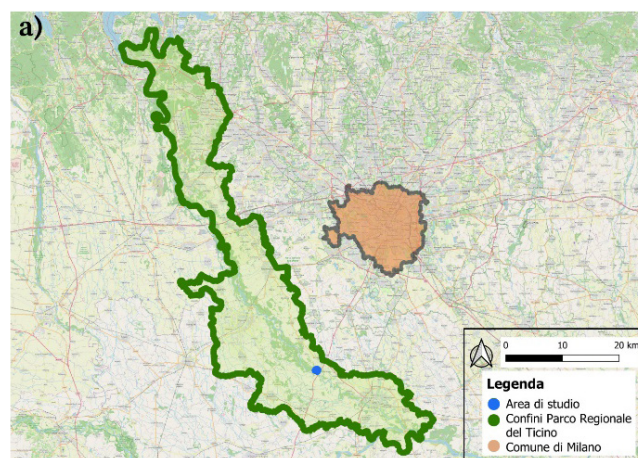


Fig. 1 – Inquadramento geografico dell'area di studio: i suoi confini, i limiti del Parco Regionale e un riferimento al comune di Milano (a); i siti di misura ed esempi degli habitat circostanti (b)
Geographic framework of the study area: its boundaries, the limits of the Regional Park, and a reference to the municipality of Milan (a); the monitoring sites and examples of the surrounding habitats (b)

2.2 | Strategia di campionamento e acquisizione dati

L'indagine acustica è stata condotta mediante una rete di nove stazioni di monitoraggio, dislocate lungo una griglia spaziale regolare, al fine di garantire una copertura rappresentativa delle diverse condizioni ambientali. La suddetta disposizione è stata concepita per esaminare la variabilità spaziale dell'impatto acustico derivante dal traffico autostradale e, contestualmente, per caratterizzare le peculiarità ecoacustiche degli ambienti ripariali rispetto a quelli più distanti dal corso d'acqua. I punti di rilevamento sono stati stratificati in tre categorie principali (Fig. 1b), definite in base alla distanza progressiva sia dal corso d'acqua sia dalla principale sorgente di disturbo antropogenico (l'autostrada A7). Tale classificazione risponde all'esigenza di rappresentare un gradiente ambientale e acustico, potenzialmente associato a variazioni nella copertura vegetale e nell'esposizione al rumore. Le fasce presentano le seguenti distanze medie dall'autostrada: 762 m per la Fascia A, 516 m per la Fascia B e 284 m per la Fascia C. Tali valori sono stati calcolati tramite la funzione "v.distance" del software QGIS, che consente di misurare la distanza minima tra ciascun punto di monitoraggio e il poligono corrispondente all'infrastruttura stradale.

Fascia A (siti 1, 2, 3): ubicata nella porzione più interna della lanca, caratterizzata da una densa copertura arborea e da una schermatura naturale più efficace rispetto alle fonti sonore esterne.

Fascia B (siti 4, 5, 6): situata nella zona di transizione, in cui la struttura forestale si presenta più rada, determinando un graduale incremento dell'esposizione alle emissioni sonore.

Fascia C (siti 7, 8, 9): collocata oltre il perimetro della landa, in prossimità dell'autostrada A7, in un'area caratterizzata da una limitata copertura vegetale e da un'elevata incidenza del rumore antropico.

Il monitoraggio è stato eseguito nel corso della campagna primaverile 2023, svoltasi dal 13 aprile al 3 maggio, mediante sistemi di registrazione passiva. Il protocollo di acquisizione ha seguito una scansione temporale ciclica, con sessioni di registrazione della durata di 1 minuto, intervallate da 5 minuti di pausa, al fine di ottimizzare la capacità di raccolta dati nel lungo periodo senza compromettere la qualità del campionamento.

Il sistema di acquisizione era composto da sette Song Meter Micro (SMM, siti 1-7) della Wildlife Acoustics e due Soundscape Explorer Terrestrial (SET, siti 8-9) sviluppato dalla Luniletronik. Le unità SMM, dotate di un singolo microfono omnidirezionale, raggiungono una frequenza di campionamento di 96 kHz, mentre il dispositivo SET, configurato con un sistema a doppio microfono, è in grado di operare con una risoluzione massima di 192 kHz. Quest'ultimo strumento integra, inoltre, una serie di sensori ambientali per la misurazione di parametri meteorologici, tra cui temperatura, umidità, illuminazione e pressione atmosferica, fornendo un quadro più completo delle condizioni ambientali durante il monitoraggio.

Parallelamente al rilievo acustico, sono state condotte analisi in situ per caratterizzare la struttura vegetazionale e la copertura forestale, al fine di valutare il ruolo della componente arborea nei processi di modulazione del paesaggio sonoro e attenuazione delle emissioni di origine antropogenica.

Per quantificare la copertura vegetale nei siti di monitoraggio, è stata utilizzata una fotocamera Canon EOS M50 Mark II dotata di un obiettivo fisheye, che ha consentito di stimare l'indice di copertura fogliare. Quest'ultimo rappresenta la frazione della superficie del suolo coperta dal fogliame quando osservata da una prospettiva zenitale. Tale parametro è di particolare interesse per l'analisi dell'interazione tra vegetazione e propagazione sonora, fornendo indicazioni sulla capacità del contesto forestale di attenuare specifiche componenti spettrali del paesaggio acustico.

2.3 | Il paesaggio sonoro

2.3.1 | Calcolo e ottimizzazione degli indici eco-acustici

Nel presente studio, l'analisi e il calcolo degli indici eco-acustici sono stati eseguiti tramite l'utilizzo dell'ambiente di calcolo "R" [14], supportato dai pacchetti "tuneR", "seewave" [15] e "soundecology" [16]. La trasformata di Fourier veloce (FFT) è stata configurata con una risoluzione spettrale di 1024 punti, corrispondente a una risoluzione di 46,87 Hz, che ha consentito una precisa analisi delle caratteristiche acustiche in esame. In linea con le più recenti indicazioni metodologiche, si è scelto di non impiegare un singolo indice eco-

acustico, poiché un approccio basato su un unico parametro risulterebbe insufficiente per rappresentare la complessità intrinseca del paesaggio sonoro, limitando la comprensione complessiva dell'ambiente acustico [17]. L'adozione di un insieme diversificato di indici, invece, ha permesso di ottenere informazioni dettagliate su varie caratteristiche del suono, garantendo una maggiore flessibilità dell'analisi, e riducendo interpretazioni parziali o distorte dei dati acustici [1].

Gli indici eco-acustici considerati nel presente studio sono stati selezionati con l'obiettivo di garantire una valutazione esaustiva e approfondita delle caratteristiche del paesaggio sonoro. Tra questi, si annoverano l'Acoustic Complexity Index (ACI) [18], l'Acoustic Diversity Index (ADI) [19], l'Acoustic Evenness Index (AEI) [19], il Bioacoustic Index (BI) [20], il Normalized Difference Soundscape Index (NDSI) [21], l'Acoustic Entropy (H) [23], il Dynamic Spectral Centroid (DSC) [19] e la Zero Crossing Rate (ZCR) [23].

L'utilizzo di registratori acustici di modelli differenti ha reso necessario l'impiego di un processo di equalizzazione delle registrazioni, volto a garantire che le risposte in frequenza dei dispositivi fossero omogenee e confrontabili. È risultata quindi imprescindibile l'allineamento della risposta in frequenza dei registratori a quella di un fonometro, con l'intento di assicurare la comparabilità diretta tra i livelli sonori registrati e gli indici eco-acustici derivanti dalle registrazioni. Tale procedura è esposta nel seguente articolo [24]. La procedura di equalizzazione è stata condotta in condizioni controllate, esponendo i dispositivi a un segnale acustico standard (rumore bianco) e confrontando la risposta dei registratori con quella del fonometro. Le differenze rilevate sono state corrette mediante un filtro digitale (FIR), applicato a ciascuna registrazione per uniformarne la risposta in frequenza [25].

Nel processo di selezione dei parametri per il calcolo degli indici eco-acustici, è stata adottata una metodologia definita [26], con il fine di ottimizzare le variabili in oggetto. In particolare, la soglia antropofonica è stata stabilita a 1750 Hz, come frequenza minima per il calcolo degli indici, al fine di garantire una corretta discriminazione tra suoni di origine antropogenica e suoni naturali. La frequenza massima biofonica è stata fissata a 9 kHz, sulla base delle frequenze emesse dalle principali specie aviarie presenti nell'area di studio. Infine, per quanto concerne gli indici ADI e AEI, sono stati implementati specifici adattamenti al codice sorgente originario degli indici, come delineato nel pacchetto R soundecology, tra cui l'integrazione del valore della dB threshold pari a -73 dB, al fine di migliorare l'elaborazione e l'accuratezza dei dati. Tali parametri ottimizzati permettono un confronto diretto con altre indagini nell'ambito dell'eco-acustica, assicurando l'affidabilità e la precisione delle analisi.

2.3.2 | Analisi statistica

Nell'ambito dell'elaborazione dei dati, è stata impiegata l'Analisi delle Componenti Principali (PCA), una metodologia statistica che consente di ridurre la complessità dei dataset ad

alta dimensionalità. L'approccio della PCA è particolarmente vantaggioso in contesti acustici, in cui molteplici variabili possono essere fortemente correlate tra loro. La sua applicazione consente di estrarre le informazioni essenziali (dette Componenti Principali), semplificando l'interpretazione senza sacrificare il valore informativo del dataset [27, 28].

Successivamente, le componenti principali estratte dalla PCA sono state impiegate per eseguire un'analisi di clustering, con l'obiettivo di individuare la presenza di gruppi distinti in base alle caratteristiche ecoacustiche. A tal fine, è stata implementata la funzione `clValid` [29, 30] che consente una valutazione comparativa di diversi algoritmi di clustering, tra cui k-means, hierarchical clustering, DIANA e PAM, fornendo criteri oggettivi per l'identificazione della soluzione ottimale.

La selezione del metodo di clustering più appropriato è stata effettuata sulla base di tre metriche di validazione interna:

1. il Connectivity Index, il cui valore minimo indica una migliore separazione tra cluster, riducendo il fenomeno dell'effetto chaining;
2. il Dunn Index, il cui valore massimo riflette una maggiore compattezza intracluster e separazione intercluster, migliorando la robustezza della classificazione;
3. il Silhouette Index, che misura il grado di coesione interna e distinzione tra i cluster, con valori più elevati indicativi di una struttura ben definita nel dominio dei dati [31].

Gli indici eco-acustici che hanno contribuito in misura predominante alla varianza complessiva, identificati dalle componenti principali estratte, sono stati oggetto di analisi approfondite. La suddetta selezione ha permesso di focalizzarsi sugli indici che presentano un maggiore impatto nel descrivere i fenomeni acustici rilevanti, escludendo quelli che non apportano valore significativo alla comprensione del fenomeno studiato [32].

2.4 | La struttura forestale

Per esaminare la struttura forestale, sono stati condotti rilievi di campo in nove aree (plot) campione, ciascuna delle quali è stata associata a un punto di registrazione del paesaggio sonoro. La delimitazione di ciascun plot è stata eseguita seguendo un protocollo standard, che prevede di partire dall'albero centrale, su cui è stato posizionato lo strumento di registrazione, e di definire un quadrato di lato 30 metri. L'accuratezza delle misurazioni è stata garantita mediante l'uso di un filo di misura e di una bussola e, per ogni plot, sono stati raccolti dati inerenti alle informazioni sul sito (ubicazione, data del rilievo, operatori coinvolti), alla tipologia di habitat, nonché alla presenza di alberi vivi o morti. Per ciascun albero all'interno dei plot, sono stati registrati parametri specifici, quali l'altezza, misurata tramite telemetro laser, e la circonferenza del tronco, rilevata a 1,30 metri dal suolo con un metro a nastro.

Tali misurazioni hanno permesso di calcolare differenti parametri strutturali essenziali per la descrizione della vegetazione. In particolare, il diametro a petto d'uomo (DBH) è stato calcolato sulla base della circonferenza rilevata, appli-

cando la formula del diametro (rapporto della circonferenza con il valore di π). La densità del fusto (SD), indicativa della biomassa legnosa per unità di superficie, è stata calcolata dividendo il numero totale di alberi per l'area del plot per permettere il confronto con dati provenienti dalla letteratura (risultati espressi in alberi per ettaro [alberi/ha]). Infine, l'area basale (BA), che misura la sezione trasversale del tronco a 1,30 metri dal suolo, ha fornito un'indicazione del volume della biomassa arborea, essenziale per comprendere la struttura della vegetazione e per fare previsioni sulla sua evoluzione. A partire da questi parametri, sono stati calcolati ulteriori indici descrittivi della struttura forestale, tra cui la dominanza relativa (RD), che misura la prevalenza di una specie arborea in base alla sua area basale ed è calcolata come il rapporto tra l'area basale della specie in questione e l'area basale totale del plot.

Al fine di caratterizzare in maniera più esaustiva la diversità ecologica delle comunità vegetali esaminate, sono stati calcolati due indici comunemente impiegati nella valutazione della biodiversità: la ricchezza specifica (SR), indicativa del numero complessivo di specie censite all'interno di ciascun plot, e l'indice di diversità di Shannon (HS), che integra l'informazione relativa alla numerosità delle specie (ricchezza) con quella concernente la loro distribuzione (equità), restituendo così una stima complessiva della complessità e dell'eterogeneità compositiva della comunità.

Successivamente, è stata effettuata la stima della biomassa arborea epigea attraverso l'applicazione di modelli allometrici specie-specifici, derivanti da parametri dendrometrici essenziali, quali il DBH e l'altezza degli individui. Nei casi in cui quest'ultima non fosse impiegata all'interno del modello, la stima è stata condotta impiegando esclusivamente il diametro. La selezione delle equazioni allometriche è stata eseguita mediante GlobAllomeTree [33], una piattaforma scientifica di riferimento per l'accesso e la condivisione di equazioni allometriche a livello globale. Tale strumento, sviluppato grazie alla collaborazione tra la Food and Agriculture Organization (FAO), il Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CI-RAD) e il Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali (DIBAF) dell'Università della Tuscia (UNITUS), fornisce un quadro metodologico standardizzato per la quantificazione della biomassa arborea. La selezione dell'equazione più idonea per ciascuna specie rilevata è stata condotta sulla base di criteri dettagliati, volti a minimizzare le incertezze nella stima, privilegiando (Fig. 2):

- a) affinità geografica del modello allometrico con l'area di studio, prediligendo equazioni sviluppate in contesti ecologicamente affini o nello stesso Paese;
- b) integrazione di variabili dendrometriche chiave, con preferenza per equazioni che considerano sia il diametro sia l'altezza, al fine di migliorare la precisione della stima;
- c) esaustività nella caratterizzazione delle frazioni biometriche, includendo componenti quali corteccia, rami morti, rami grossolani ($D > 7$ cm), rami fini ($D < 7$ cm), foglie, radici principali e secondarie, radici fini, ceppi ed organi riproduttivi (frutti/semi).

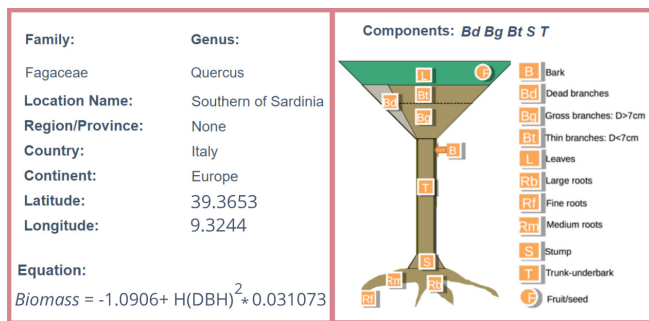


Fig. 2 – Esempio di selezione dell'equazione allometrica più idonea per la specie *Quercus robur*, adottando criteri dettagliati per minimizzare le incertezze nella stima [33]

Example of selecting the most suitable allometric equation for the species *Quercus robur*, adopting rigorous criteria to minimize estimation uncertainties [33]

L'adozione di questo approccio metodologico ha consentito di ottenere una caratterizzazione quantitativa dettagliata della biomassa epigea, fornendo una base solida per l'analisi della struttura e della funzionalità degli ecosistemi forestali.

Con il fine di ampliare il database analitico, sono stati esaminati ulteriori parametri ecologici: l'Indice di Area Fogliare (PAI) e la Frazione di Copertura Vegetale (FCover). Il PAI risulta cruciale per descrivere la struttura e la produttività vegetale di un determinato sito [34], e rappresenta una misura quantitativa della densità e distribuzione del fogliame all'interno dell'ecosistema, esprimendo la proporzione tra la superficie vegetale e quella terrestre sottostante. La Frazione di Copertura Vegetale (FCover), invece, quantifica la porzione di suolo coperta da vegetazione, rivelandosi particolarmente utile nel monitoraggio dei mutamenti della copertura vegetale nel tempo.

Per la stima di tali indici (PAI e FCover), sono state acquisite immagini emisferiche tramite una fotocamera Canon EOS M50 MARK II, equipaggiata con un obiettivo fisheye. In ciascun sito d'indagine sono state scattate cinque fotografie: una direttamente sotto l'albero ospitante lo strumento di registrazione acustica e le altre quattro, disposte lungo i vertici di un quadrato immaginario a cinque metri di distanza dal punto centrale. Le immagini sono successivamente state analizzate con il software CAN-EYE [35], che ha consentito di eseguire una classificazione delle immagini, sia automatica che manuale, finalizzata alla distinzione tra i pixel relativi alla copertura del cielo e quelli associati alla vegetazione [36].

Infine, per una caratterizzazione complessiva della struttura forestale, le specie arboree sono state classificate in base al diametro a petto d'uomo (DBH), suddividendole in classi diametriche con intervalli di 10 cm. In ogni area di indagine, sono stati conteggiati gli individui appartenenti a ciascuna classe diametrica e suddivisi in funzione della specie. I dati raccolti sono stati successivamente espressi in unità per ettaro, al fine di consentire un confronto omogeneo tra le diverse aree di studio. Per ciascuna area, sono stati registrati diversi parametri: I. il numero di individui per ciascuna classe diametrica e per specie; II. il totale degli individui per ciascuna specie; e III. la somma complessiva degli individui presenti

nell'area, ottenuta aggregando tutte le specie individuate. Tali risultati hanno permesso di analizzare la composizione specifica della vegetazione e la distribuzione dimensionale della popolazione arborea.

2.5 | Correlazioni tra paesaggio sonoro e struttura forestale

L'analisi delle correlazioni è stata eseguita considerando gli indici ecoacustici più rilevanti, selezionati mediante la PCA, le variabili vegetazionali non correlate e la distanza di ciascun sito dall'autostrada (calcolata tramite il software QGIS []). Al fine di garantire la correttezza dell'approccio statistico, è stata preliminarmente verificata la distribuzione dei dati attraverso il test di Shapiro-Wilk, il quale ha permesso di valutare l'assunzione di normalità delle variabili analizzate. In base ai risultati ottenuti, le variabili sono state distinte in distribuite normalmente e non normalmente, adottando conseguentemente il coefficiente di correlazione di Pearson per le prime e il coefficiente di Spearman per le seconde.

Un aspetto centrale dell'indagine ha riguardato la relazione tra la struttura forestale e la ricchezza in specie aviaria, con particolare attenzione al ruolo ecologico degli alberi di grandi dimensioni [38]. Quest'ultimi rappresentano elementi chiave per la biodiversità, offrendo siti di nidificazione e risorse trofiche, in particolare per le specie insettivore che dipendono dagli artropodi presenti nella corteccia, nei tessuti legnosi e negli strati epifiti delle chiome più alte. L'analisi ha considerato sia le specie nidificanti primarie (cavity nester primari), come i Picidi, che scavano autonomamente le proprie cavità, sia le specie nidificanti secondarie (cavity nester secondari), che utilizzano cavità preesistenti [39]. Tra queste ultime rientrano *Cyanistes caeruleus* (cinciarella), *Poecile palustris* (cincia bigia) e *Certhia brachydactyla* (rampichino): la prima, probabilmente a causa delle sue ridotte dimensioni, predilige boschi di transizione, mentre *Poecile palustris* e *Certhia brachydactyla* mostrano una preferenza per foreste mature, rendendoli indicatori di ambienti boschivi consolidati e di lunga data.

Per una caratterizzazione dettagliata della comunità aviaria, è stata identificata la specie arborea dominante in ciascun sito. I dati acustici sono stati elaborati mediante il software Raven Pro [40], che ha permesso l'identificazione delle specie attraverso l'analisi delle vocalizzazioni registrate nelle ore di maggiore attività acustica, ovvero tra le prime ore del mattino e il sorgere del sole (5:00-8:00). L'attribuzione tassonomica è stata successivamente validata mediante confronto con la libreria BirdNET [40], verificando la corrispondenza tra le specie rilevate e quelle documentate nel Parco. Questa procedura ha consentito di escludere eventuali identificazioni errate e di confermare la presenza effettiva delle specie target nell'area di studio.

La relazione tra la ricchezza specifica aviaria e la struttura della comunità arborea è stata analizzata utilizzando la media ponderata degli individui di *Quercus robur* nelle diverse classi diametriche. Questo approccio consente di valutare l'influenza degli alberi di grandi dimensioni sulla composizio-

ne della comunità ornitica, poiché tiene conto non solo della presenza della specie dominante, ma anche della sua distribuzione strutturale. Al fine di consolidare l'interpretazione dei risultati, la medesima analisi è stata estesa a *Carpinus betulus*, una specie arborea più giovane e caratterizzata da un minor sviluppo in termini di dimensioni, per verificare se l'associazione tra struttura forestale e diversità aviaria fosse principalmente guidata dalla presenza di alberi di grandi dimensioni piuttosto che dalla semplice abbondanza di individui arborei.

3 | Risultati

3.1 | Gli indici ecoacustici

L'analisi delle componenti principali applicata agli indici ecoacustici ha permesso di individuare tre componenti principali, le quali complessivamente spiegano il 78.3% della varianza totale osservata. Nello specifico, la prima componente principale (PC1) contribuisce per il 44.9%, la seconda (PC2) per il 19.9% e la terza (PC3) per il 13.5% (Fig. 3). L'analisi dei coefficienti di correlazione ha evidenziato che PC1 è fortemente influenzata dagli indici H, ADI e ZCR, delineando un asse informativo strettamente correlato alla diversità acustica e alla distribuzione energetica del segnale. PC2 è dominata dall'ACI, dal NDSI e dal DSC, descrivendo principalmente la complessità strutturale del segnale acustico, il rapporto tra componenti biofoniche e antropiche e la variabilità spettrale nel tempo. Infine, PC3 risulta caratterizzata principalmente dal BI, rappresentativo della ricchezza delle componenti biofoniche del paesaggio sonoro.

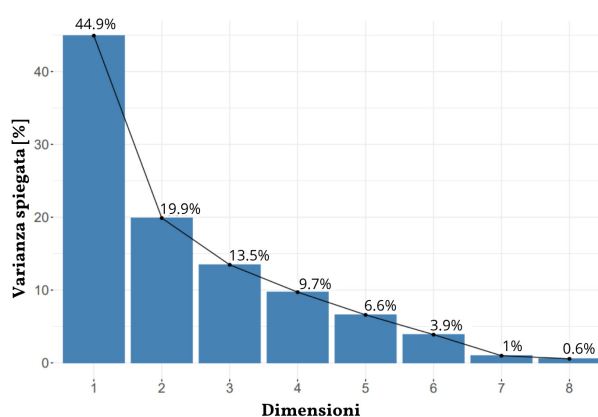


Fig. 3 – Contributo delle componenti principali alla varianza totale osservata nel dataset ecoacustico
Contribution of the principal components to the total variance observed in the ecoacoustic dataset

L'analisi delle variazioni temporali ha rivelato significative differenze spaziali tra i siti di monitoraggio, evidenziando la presenza di un gradiente acustico determinato dalla distanza rispetto alla fonte di disturbo antropico. In generale, le aree situate all'interno della Lanca, corrispondenti alle fasce A e

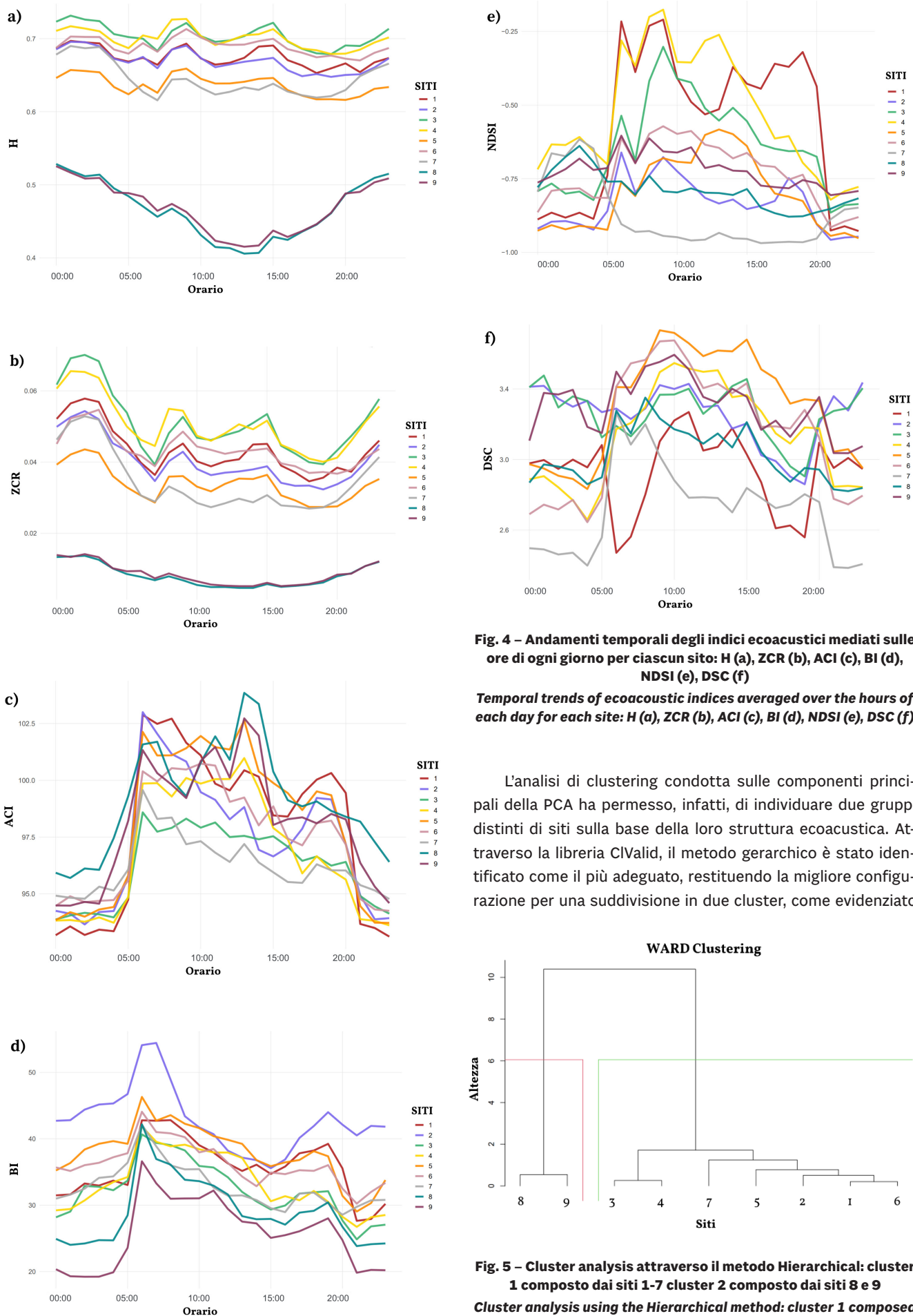
B, mostrano valori sistematicamente più elevati per gli indici associati alla biodiversità acustica, mentre i siti collocati in prossimità dell'infrastruttura autostradale, appartenenti alla fascia C, presentano valori sensibilmente inferiori, unitamente a una ridotta variabilità temporale.

H evidenzia valori più elevati nei siti 3, 4 e 6, caratterizzati da un'elevata diversità sonora, con un andamento relativamente stabile durante le ore diurne e una lieve flessione nelle ore notturne. Al contrario, i valori minimi si registrano nei siti 8 e 9, nei quali si osserva una ridotta entropia e una limitata variabilità nel corso della giornata (Fig. 4a). L'ADI segue un andamento analogo, con livelli più elevati nei siti interni e una riduzione nei siti della fascia C, dove si evidenzia una distribuzione meno uniforme dell'energia acustica nel tempo.

ZCR mostra valori massimi nei siti 1 e 6, con livelli altrettanto elevati nei siti 3 e 4, evidenziando segnali ad alte frequenze spettrali. I picchi più pronunciati si osservano nelle prime ore del mattino (8:00-9:00), seguiti da una progressiva diminuzione nelle ore centrali della giornata. Nei siti 8 e 9, i valori risultano sensibilmente inferiori segnalando la presenza di un rumore continuo, con una variazione giornaliera meno marcata (Fig. 4b). ACI presenta valori massimi nei siti 1, 2, 5 e 8, con variazioni significative tra il periodo diurno e quello notturno, evidenziando un'elevata diversità del paesaggio sonoro in queste aree. Il sito 1 registra un massimo relativo alle 8:00 e alle 18:00, mentre nel sito 8 il picco si manifesta tra le 13:00 e le 14:00, con un'intensità più pronunciata rispetto agli altri siti (Fig. 4c).

BI evidenzia valori più elevati nei siti 2, 5, 1 e 6, con due distinti momenti di massima intensità nelle prime ore del mattino (6:00) e in tarda serata (18:00), mostrando una forte componente biofonica nelle ore crepuscolari. Nelle ore centrali della giornata e durante la notte si osservano decrementi. Al contrario, i siti 7, 8, 9 presentano valori bassi, segnalando una scarsa presenza di attività biologica sonora (Fig. 4d). NDSI mostra valori negativi in tutti i siti, con livelli minimi registrati nel sito 7, indicando una predominanza della componente antropica (Fig. 4e). Nei siti 1, 3 e 4, si osservano valori sensibilmente più elevati, con massimi relativi nelle ore dell'alba e nelle ore centrali della mattinata (12:00 e 18:00). Infine, DSC presenta valori più elevati nel sito 5, mentre nei siti 7 e 8 si osserva una progressiva riduzione, associata a una minore variabilità spettrale. I minimi relativi si collocano nelle ore dell'alba e del tramonto (Fig. 4f).

Nel complesso i risultati delineano un quadro acustico strutturato, in cui la distribuzione spaziale degli indici ecoacustici risulta strettamente associata alla configurazione ambientale e alla distanza dalla principale fonte di disturbo. Gli indici associati alla complessità e alla diversità biofonica (H, ADI, ACI, BI) registrano valori significativamente più elevati nei siti interni alla Lanca, con picchi ricorrenti nelle ore crepuscolari e una marcata variabilità giornaliera. Al contrario, nei siti prossimi all'infrastruttura stradale tali indici risultano sensibilmente inferiori, con una ridotta variabilità giornaliera.



dalle metriche di validazione. In particolare, l'indice di Connectivity ha ottenuto un valore pari a 2.92, l'indice di Dunn ha mostrato un valore di 0.81 e il coefficiente di Silhouette ha raggiunto 0.84, indicando una separazione netta tra i due gruppi. La suddetta analisi ha dunque indicato l'esistenza di due distinti assetti acustici all'interno dell'area di studio, riflettendo la dicotomia tra i siti caratterizzati da una maggiore biodiversità sonora e quelli dominati dal rumore di origine antropica (Fig. 5).

3.2 | La struttura forestale

L'analisi aggregata dei dati evidenzia una marcata predominanza di determinate specie arboree in termini di area basale e densità relativa. In particolare, nei plot P1 e P4, *Quercus robur* ha mostrato una presenza significativamente superiore rispetto ad altre specie, indicando la presenza di individui maturi di grandi dimensioni. Le specie dominanti, determinate dalla BA e dal DBH includono *Carpinus betulus*, *Quercus robur*, *Populus nigra* e *Ulmus minor*, con variazioni nella loro distribuzione tra i diversi plot. In particolare, *Quercus robur* ha registrato i valori di BA più elevati nei plot P2 e P5, rispettivamente con 814.90 cm² e 839.10 cm² (Tab. 1).

Tab. 1 – Indici forestali e di biodiversità: in ogni plot, i valori delle variabili sono stati sommati per ciascuna specie
Forest and biodiversity indices: in each plot, the values of the variables were summed for each species

Plot	SD [ha]	BA [alberi/ha]	SR	HS	Biomass [kg]
1	433.33	19.61	39	1.49	15621.25
2	244.44	8.67	22	1.18	6977.25
3	300	26.97	27	0.22	23791.90
4	288.88	44.06	26	2.15	57477.57
5	311.11	31.33	28	0.86	20170.96
6	233.33	20.83	21	0.96	56464.99
7	577.77	14.87	52	2.02	23968.28
8	611.11	1.64	55	1.12	4316.77
9	1666.66	43.05	150	1.25	45877.19

La SD ha mostrato variazioni sostanziali inter-sito, con un minimo di 233,3 alberi/ha in P6 e un massimo di 1666,6 alberi/ha in P9 (Tab. 2). Quest'ultimo, caratterizzato da un'elevata densità di specie latifoglie, contribuisce in modo significativo alla biomassa complessiva dell'area. L'area basale ha evidenziato variazioni altrettanto marcate, con il valore massimo in P9, pari a 43.1 m²/ha, e il minimo in P8 (1.6 m²/ha), confermando la presenza di alberi di grandi dimensioni nel plot P9.

L'indice relativo alla SR ha registrato il valore più elevato in P9 (150 specie) e il più basso in P6 (28 specie). Parallelamente, l'indice di Shannon ha mostrato forti variazioni, con un minimo di 0.23 in P3 e un massimo di 2.02 in P7, evidenziando differenze significative nella composizione e distribuzione delle specie. L'elevata diversità specifica in P7 indica

un habitat strutturalmente eterogeneo caratterizzato da un mosaico di latifoglie, mentre l'uniformità nella distribuzione delle specie è risultata inferiore nei plot P3 e P6, indicando la predominanza di poche specie.

La biomassa arborea è stata stimata mediante equazioni allometriche specifiche per ciascun individuo campionato. L'aggregazione dei valori per specie ha permesso di ottenere una stima complessiva della biomassa per ciascun plot. I risultati mostrano variazioni significative tra i siti, con valori che vanno da un minimo di 4316.78 kg in P8 a un massimo di 57477.57 kg in P4.

La struttura forestale è stata analizzata attraverso la distribuzione delle specie arboree nelle diverse classi diametriche. In particolare, è stato quantificato il numero di individui per ettaro per ciascuna specie e classe diametrica all'interno di ogni plot. Tale rappresentazione consente di distinguere le diverse configurazioni vegetazionali, offrendo un quadro chiaro della struttura e dello stadio di maturità della foresta nei

Tab. 2 – Sintesi delle principali caratteristiche della struttura forestale nei diversi plot, con indicazione delle specie dominanti e della loro abbondanza relativa (Ind [%])

Summary of the main characteristics of the forest structure in the different plots, with indication of the dominant species and their relative abundance (Ind [%])

Plot	Specie dominante	Ind [%]	Caratteristiche chiave
1	<i>Gleditsia triacanthos</i>	56.4	Struttura disetanea, caratterizzata dalla presenza di specie pioniere. <i>Quercus robur</i> ospita gli esemplari di maggiori dimensioni.
2	<i>Carpinus betulus</i>	43.3	Foresta giovane in fase di rinnovamento (<i>Carpinus betulus</i> e <i>Populus Nigra</i>) post deforestazione.
3	<i>Quercus robur</i>	85.7	Struttura equilibrata tra le differenti classi diametriche. <i>Ostrya carpinifolia</i> è in progressiva affermazione.
4	<i>Populus alba</i>	37	Foresta coetanea con elevata diversità di specie. <i>Gleditsia triacanthos</i> in fase di maturazione.
5	<i>Quercus robur</i>	75	Foresta disetanea. <i>Prunus avium</i> prevale in classe 5 con processi di rigenerazione attivi.
6	<i>Quercus robur</i>	54.2	Struttura disetanea con dinamiche di rinnovamento per <i>Ulmus minor</i> e <i>Populus canescens</i> .
7	<i>Carpinus betulus</i>	42	Foresta disetanea. <i>Quercus robur</i> in classe 55 presenta gli esemplari di maggiori dimensioni.
8	<i>Carpinus betulus</i>	49.5	Foresta in espansione, caratterizzata dalla prevalenza di alberi di piccole dimensioni, tra cui <i>Carpinus betulus</i> , <i>Ostrya carpinifolia</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> e <i>Ulmus minor</i> .
9	<i>Carpinus betulus</i>	41.9	Foresta disetanea. <i>Quercus robur</i> include gli esemplari di maggiori dimensioni (classe diametrica 85). Nuove presenze di <i>Ulmus minor</i> e <i>Populus alba</i> .

vari siti, come visibile negli esempi sotto riportati. I principali risultati emersi dall'analisi sono sintetizzati nella Tabella #, che riporta le specie dominanti, la loro abbondanza relativa e le principali osservazioni sulle caratteristiche strutturali della foresta nei diversi plot. Successivamente vengono riportati due esempi rappresentativi (Plot 3 e Plot 4), scelti per evidenziare differenti configurazioni strutturali.

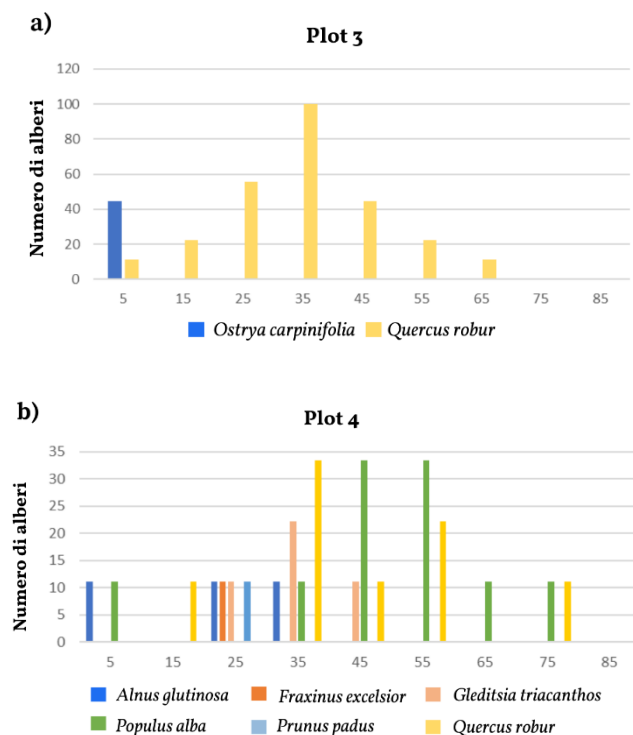


Fig. 6 – Numero di individui per ettaro per ciascuna specie in relazione alla classe diametrica nei plot 3 e 4, selezionati come esempi rappresentativi di differenti configurazioni strutturali
Number of individuals per hectare for each species in relation to the diameter class in plots 3 and 4, selected as representative examples of different structural configurations

La struttura forestale del plot 3 è caratterizzata dalla prevalenza di *Quercus robur*, che rappresenta l'85.7% degli individui rilevati, definendo in modo predominante la fisionomia del popolamento arboreo. La distribuzione diametrica segue un andamento gaussiano con un picco nella classe 35, evidenziando una composizione equilibrata tra individui giovani (classe 5) e maturi (fino alla classe 65). Tale configurazione indica una struttura ben consolidata, in cui la presenza di nuovi individui di *Ostrya carpinifolia* indica dinamiche di rinnovamento e un processo di progressiva diversificazione della componente arborea. Il plot 4, Fig. 6b, si distingue per una maggiore eterogeneità specifica. *Populus alba* risulta la specie dominante, con 111 individui su un totale di 300, e presenta una distribuzione diametrica gaussiana con un picco nella classe 35. La coesistenza di individui maturi di *Populus alba* e *Quercus robur* (classe 75) mostrando una struttura coetanea. La presenza di *Prunus padus* e *Fraxinus excelsior* (classe 25), unitamente all'insediamento di *Alnus glutinosa* (classe 5), evidenzia un'evoluzione della composizione forestale. *Gleditsia triacanthos*,

che rappresenta il 14.8% del totale, mostra una distribuzione tra le classi 25 e 45, segnalando un avanzamento nel processo di maturazione della popolazione arborea.

3.3 | Correlazioni

3.3.1 | Variabili vegetazionali ed indici ecoacustici

L'analisi delle correlazioni ha evidenziato associazioni statisticamente significative tra gli indici ecoacustici e i parametri vegetazionali, delineando una relazione strutturata tra la composizione del soundscape e le caratteristiche forestali dei siti indagati. ADI mostra una correlazione negativa con la SR ($r = -0.75$; $p = 0.0255$), evidenziando valori decrescenti all'aumentare della ricchezza specifica vegetale. Una tendenza simile emerge per l'indice H ($r = -0.77$; $p = 0.0214$) e per ZCR ($r = -0.73$; $p = 0.0311$), rafforzando il legame tra eterogeneità della copertura vegetale e dinamiche acustiche.

La biomassa totale è positivamente correlata con il numero di specie aviarie ($r = 0.77$; $p = 0.0147$), suggerendo un incremento simultaneo di entrambi i parametri nei siti analizzati. Una relazione positiva emerge anche tra la ricchezza specifica aviaria e l'NDSI ($r = 0.77$; $p = 0.0143$).

Nel complesso, le correlazioni ottenute delineano una relazione quantitativa tra le variabili ecoacustiche e vegetazionali, evidenziando differenze nei valori degli indici acustici in funzione della diversità specifica e della struttura della copertura vegetale.

3.3.2 | Ricchezza in specie aviaria e la struttura vegetazionale

L'analisi della struttura vegetazionale ha rivelato che *Quercus robur* è l'unica specie arborea di grandi dimensioni presente in tutti i siti esaminati, ad eccezione del sito 8. Questa evidenza è stata confermata dallo studio della distribuzione percentuale degli individui nei diversi siti all'interno delle classi diametriche più elevate, comprese tra la classe 45, comune a tutti i plot, e la classe 85, riscontrata esclusivamente nei siti 1 e 9 (Fig. 7).

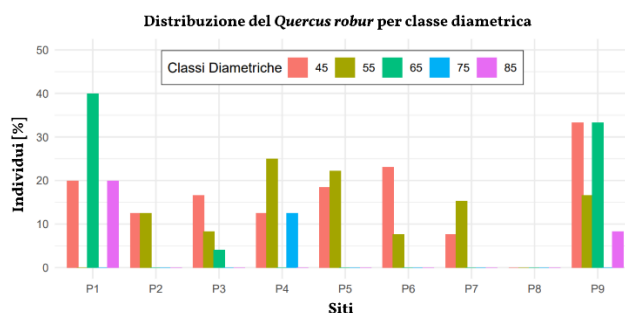


Fig. 7 – Distribuzione percentuale degli individui di *Quercus robur* nei diversi siti all'interno delle classi diametriche più elevate
Percentage distribution of the *Quercus robur* individuals at the different sites within the higher diametric classes

L'analisi bioacustica condotta tramite il software Raven ha permesso di identificare le specie aviarie presenti in ciascun sito. A seguito di un processo di validazione, è stata quantificata la ricchezza specifica per ogni plot. La rappresentazione della ricchezza aviaria per sito (Fig. 8) evidenzia un numero significativamente maggiore di specie nei siti 1, 4, 6 e 9. All'interno di tale rappresentazione, sono stati distintamente segnalati i siti caratterizzati dalla presenza di:

- cavity nester primari (CNp), indicati sopra le colonne dell'istogramma;
- cavity nester secondari (★);
- indicatori di diversità, quali *Poecile palustris* e *Certhia brachydactyla*, evidenziati in verde.

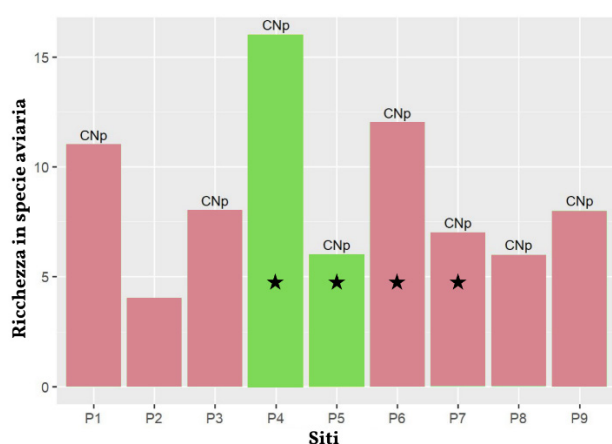


Fig. 8 – Ricchezza in specie aviaria per sito
Richness in avian species by site

L'analisi di correlazione tra la media ponderata delle percentuali degli individui arborei nelle diverse classi diametriche di *Quercus robur* e la ricchezza in specie aviaria ha restituito un coefficiente di correlazione di Spearman pari a $\rho = 0.71$ ($p\text{-value} = 0.030$). Il valore del coefficiente, prossimo a 1, indica una forte correlazione positiva tra le variabili considerate, mentre il p-value conferma la significatività statistica della relazione osservata (Fig. 9).

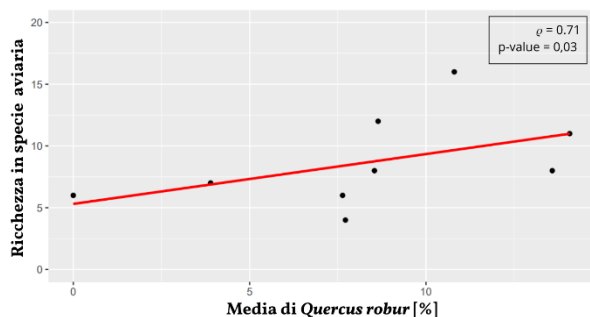


Fig. 9 – Correlazione tra la media ponderata delle percentuali degli individui arborei nelle diverse classi diametriche di *Quercus robur* e la ricchezza in specie aviaria
*Correlation between weighted average percentages of tree individuals in different diametric classes of *Quercus robur* and avian species richness*

Al fine di approfondire l'analisi statistica, la stessa metodologia è stata applicata a *Carpinus betulus*, la specie arborea più giovane e diffusa nell'area di studio. In questo caso, la correlazione tra la media ponderata delle percentuali degli individui arborei nelle diverse classi diametriche e la ricchezza in specie aviaria ha evidenziato l'assenza di una relazione significativa tra le variabili ($\rho = 0.26$, $p\text{-value} = 0.6$), indicando che la presenza di questa specie non influenza in modo determinante la diversità aviaria.

4 | Discussione

I risultati ottenuti evidenziano una correlazione robusta tra la struttura del paesaggio sonoro nell'area oggetto di studio e la configurazione ambientale, confermando l'importanza delle variabili vegetazionali e della distanza dalle fonti di disturbo antropico nel modellare la composizione del soundscape. L'analisi delle componenti principali (PCA) ha consentito di individuare tre assi informativi principali, i quali riflettono differenti aspetti della complessità acustica. In particolare, la prima componente (PC1) si è rivelata strettamente legata alla diversità e alla distribuzione energetica del segnale, mentre la seconda componente (PC2) ha evidenziato la variabilità strutturale del paesaggio sonoro, nonché la relazione tra le componenti biofoniche e antropofoniche. Infine, la terza componente (PC3) ha messo in risalto il contributo della ricchezza biofonica, suggerendo che gli indici ecoacustici possano costituire uno strumento utile per distinguere habitat caratterizzati da diversi livelli di biodiversità sonora [41] e che l'utilizzo di molteplici indici è necessario per rappresentare l'ambiente sonoro nella sua totalità [42].

L'analisi spaziale ha rivelato la presenza di un gradiente ecoacustico ben definito, con indici di diversità (H, ADI, BI) significativamente più elevati nelle aree interne della Lanca rispetto ai siti situati nelle vicinanze dell'infrastruttura stradale. I suddetti sono in perfetta consonanza con studi precedenti che hanno documentato un decremento della complessità bioacustica in ambienti sottoposti a intensi disturbi antropici [3]. In particolare, indagini condotte in un'area urbana settentrionale della città di Milano, presso il Parco Nord, confermano l'esistenza di una relazione inversa tra i valori di ADI e H e la distanza dalla sede autostradale della A4 [43, 44]. Analogamente, lo studio condotto da M.G. Khanaposhtani et al. [45] in una foresta di pianura alluvionale del Wisconsin (USA) – ecosistema assimilabile a quello della Lanca del Moriano – sottoposta all'impatto di due arterie autostradali, ha evidenziato una correlazione significativa tra ADI, NDSI e AOI (Acoustic Occupancy Index) e la distanza dall'infrastruttura viaria. In tale studio, ADI è stato calcolato escludendo le frequenze inferiori ai 2 kHz per minimizzare l'influenza del rumore veicolare, mostrando un incremento dell'indice con l'aumentare della distanza dalle autostrade. Per quanto concerne NDSI, invece, lo studio ha evidenziato un potenziale bias nell'applicazione di tale indice in contesti caratterizzati da attenuazione del rumore per divergenza geometrica [45],

un fenomeno già documentato da R. B. Machado et al. presso una area protetta di categoria V definita dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura [46], e riscontrato da R. Benocci et al. presso una struttura semi-naturale, con strati erbacei di flora nemorale e strati arbustivi caratteristica del Parco Nord di Milano [43]. Tuttavia, l'accuratezza dell'NDSI è stata incrementata mediante un'ottimizzazione metodologica dei parametri di input per il calcolo degli indici ecoacustici [26], come proposto nel presente studio. In modo analogo, l'analisi di cluster ha corroborato l'esistenza di due distinti tipi di configurazioni acustiche, suggerendo una netta divisione tra siti dominati da un soundscape ricco di segnali biofonici e siti caratterizzati da rumore antropico [47].

Le correlazioni tra indici ecoacustici e parametri vegetazionali confermano ulteriormente il legame intrinseco tra la struttura della copertura vegetale e la composizione del paesaggio sonoro [48]. Le correlazioni tra gli indici ecoacustici e i parametri vegetazionali rafforzano ulteriormente il legame intrinseco tra la struttura della copertura vegetale e la composizione del paesaggio sonoro [48]. Studi precedenti hanno documentato tale relazione: B. K. Pekin et al. hanno evidenziato come l'altezza degli alberi e la copertura della chioma siano correlati con l'Indice di Diversità Acustica in una foresta neotropica, mentre L. Rankin et al. hanno osservato che, in una struttura forestale secca tropicale del Madagascar meridionale, la copertura della chioma correla con BI [50]. In particolare, la correlazione negativa tra ADI e la ricchezza specifica vegetale suggerisce che una maggiore eterogeneità vegetazionale possa essere associata a una distribuzione più frammentata delle fonti sonore [51]. Inoltre, elevati valori di biomassa arborea epigea osservati nei siti con maggiore ricchezza in specie aviaria sottolineano come la struttura vegetazionale influenzi direttamente la composizione della comunità acustica, offrendo habitat idonei per specie con specifiche esigenze ecologiche [52].

Un aspetto particolarmente rilevante riguarda la correlazione negativa di H e ZCR con SR. In particolare, nei siti 8 e 9 situati nella fascia C, si osservano valori inferiori di tali indici, nonostante l'elevata ricchezza di specie vegetali. Poiché ZCR quantifica il tasso di variazione del segnale nel dominio temporale, i valori osservati suggeriscono un soundscape dominato da componenti più uniformi e meno irregolari [53]. Ciò indica che, in assenza di foreste mature e con una predominanza di specie vegetali giovani, l'eterogeneità della struttura forestale possa determinare una distribuzione più discontinua delle fonti sonore, con conseguente riduzione dell'entropia acustica e della variabilità strutturale del segnale [54].

Nei siti caratterizzati da una maggiore biomassa sono stati rilevati valori più elevati di NDSI, suggerendo che la struttura vegetazionale eserciti un'influenza determinante sulla diversità acustica. In questa prospettiva, si ipotizza che siano la complessità e la densità della copertura vegetale – e non viceversa – a configurare condizioni ambientali idonee a sostenere la presenza e l'attività vocale della fauna selvatica. Tale interpretazione trova fondamento nell'assunto ecologico secondo cui una struttura vegetazionale più articolata incre-

menta la disponibilità di microhabitat e di nicchie acustiche, favorendo l'insediamento di comunità bioacustiche più ricche e stratificate. Questo risultato supporta l'idea che ambienti più ricchi in biomassa, con una vegetazione più sviluppata, possano sostenere una maggiore varietà di suoni biofonici [55, 56]. In parallelo, la correlazione positiva tra biomassa e la ricchezza di specie aviarie evidenzia come la disponibilità di risorse ecologiche, legate alla struttura e alla produttività vegetazionale, favorisca la presenza di un numero maggiore di specie aviarie. La presenza di valori elevati di biomassa, infatti, fornisce risorse alimentari e habitat adeguati alle specie insettivore e altre specie legate alla vegetazione forestale, supportando così una ricca comunità aviaria. I suddetti risultati sono in linea con l'analisi della struttura forestale, che pone in evidenza il ruolo cruciale degli alberi di grandi dimensioni, come *Quercus robur*, nella determinazione della biodiversità aviaria [57]. Gli alberi maturi, con la loro complessità strutturale, favoriscono la presenza di specie aviarie che dipendono da habitat forestali consolidati, aumentando così la ricchezza ornitica e la diversità acustica dell'area [58, 59].

Al contrario, l'analisi ha mostrato che la specie più giovane, il *Carpinus betulus*, pur essendo una specie arborea presente in alcuni siti, non ha avuto una correlazione significativa con la ricchezza di specie aviarie. Questo risultato potrebbe essere dovuto alla minore capacità di questa specie di offrire risorse ecologiche comparabili a quelle di *Quercus robur*, in particolare per quanto riguarda le cavità per la nidificazione e l'abbondanza di risorse trofiche [60]. Il *Carpinus betulus* potrebbe infatti non fornire lo stesso livello di habitat favorevole per le specie specializzate in ambienti forestali maturi, che invece preferiscono la presenza di alberi di grandi dimensioni come *Quercus robur*.

5 | Conclusioni

Il presente studio ha confermato l'efficacia dell'ecoacustica quale strumento avanzato per la caratterizzazione degli ecosistemi forestali, evidenziando il valore di un approccio integrato basato sulla sinergia tra indicatori acustici, strutturali e di biodiversità. L'analisi del paesaggio sonoro ha evidenziato la presenza di due distinti regimi acustici: da un lato, ambienti caratterizzati da una vegetazione strutturalmente complessa presentano una più elevata diversità biofonica; dall'altro, i siti prossimi all'infrastruttura stradale mostrano una semplificazione del soundscape, con ridotta variabilità spettrale e prevalenza della componente antropofonica. Tale approccio ha permesso di approfondire la comprensione della complessità ecologica degli ambienti periurbani, portando in luce aspetti sistemici e relazionali finora marginalizzati nelle analisi convenzionali.

L'affidabilità delle osservazioni è stata assicurata mediante un processo di equalizzazione delle registrazioni, che ha ridotto le distorsioni strumentali e incrementato la comparabilità dei dati. Contestualmente, l'ottimizzazione dei parametri in input di calcolo ha migliorato la capacità discriminante degli

indici ecoacustici, affinando l'analisi delle dinamiche sonore e consolidando la robustezza interpretativa dei risultati.

L'analisi della struttura forestale ha evidenziato una significativa eterogeneità spaziale nella composizione floristica. In particolare, la biomassa arborea e la presenza di individui di grandi dimensioni di *Quercus robur* sono emerse come variabili chiave nella definizione della complessità ecosistemica, esercitando un'influenza diretta sulla qualità acustica dell'ambiente e sulla diversità specifica aviaria. Le correlazioni tra il soundscape e i parametri vegetazionali confermano il ruolo determinante della struttura forestale nella modulazione della biodiversità acustica. L'eterogeneità della copertura arborea e la presenza di alberi di grandi dimensioni si configurano come fattori cruciali per il mantenimento di una elevata ricchezza in specie ornitica mentre la pressione antropica risulta associata a una contrazione della qualità del paesaggio acustico, con possibili implicazioni sulle dinamiche ecologiche e sulle reti trofiche.

I risultati evidenziano l'importanza di adottare approcci integrati e multidisciplinari per l'analisi del paesaggio sonoro e della struttura ecosistemica, al fine di cogliere con maggiore precisione la complessità delle interazioni tra componenti biotiche e abiotiche. L'integrazione di metodologie ecoacustiche con dati strutturali e ambientali consente di affinare la comprensione dei processi ecologici e di fornire strumenti analitici più robusti per la gestione e la conservazione degli ecosistemi forestali.

Conclusions

This study confirmed the effectiveness of ecoacoustics as an advanced tool for the characterisation of forest ecosystems, highlighting the value of an integrated approach based on the synergy between acoustic, structural and biodiversity indicators. The analysis of the soundscape revealed the presence of two distinct acoustic regimes: on the one hand, environments characterised by structurally complex vegetation show a higher biophonic diversity; on the other hand, sites close to road infrastructure show a simplification of the soundscape, with reduced spectral variability and prevalence of the anthropophonic component. This approach allowed a deeper understanding of the ecological complexity of peri-urban environments, bringing to light systemic and relational aspects previously marginalised in conventional analyses. The reliability of the observations was ensured by an equalization process of the recordings, which reduced instrumental biases and increased the comparability of the data. At the same time, the optimisation of the input parameters improved the discriminatory capacity of the ecoacoustic indices, refining the analysis of the sound dynamics and consolidating the interpretative robustness of the results.

The analysis of the forest structure revealed a significant spatial heterogeneity in the floristic composition. In particular, tree biomass and the presence of large individuals of *Quercus robur* emerged as key variables in the definition of ecosystem complexity, with a direct influence on the acoustic quality of the environment and the specific bird diversity. The correlations between soundscape and vegetation parameters confirm the crucial role of forest structure in modulating acoustic biodiversity. The heterogeneity of the tree cover and the

presence of large trees are crucial factors for maintaining high bird species richness, while human pressure is associated with a decrease in the quality of the acoustic landscape, with possible implications for ecological dynamics and food networks. The results highlight the importance of integrated and multidisciplinary approaches to the analysis of the soundscape and ecosystem structure in order to better capture the complexity of interactions between biotic and abiotic components. The integration of ecoacoustic methods with structural and environmental data allows for a better understanding of ecological processes and provides more robust analytical tools for the management and conservation of forest ecosystems.

Bibliografia

- [1] B.C. Pijanowski, L.J. Villanueva-Rivera, S.L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napoletano, S. H. Gage, N. Pieretti, Soundscape ecology: the science of sound in the landscape, *BioSci.* 61 (2011) 203-216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
- [2] A. Farina, *Ecoacoustics: A quantitative approach to investigate the ecological role of environmental sounds*, Mathematics, 2018.
- [3] B.C. Pijanowski, A. Farina, S.H. Gage, S. L. Dumyahn, B.L. Krause, What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landsc. Ecol.* 26 (2011) 1213-1232. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>.
- [4] A. Farina, *Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] J.W. Doser, A.O. Finley, E.P. Kasten, S.H. Gage, Assessing soundscape disturbance through hierarchical models and acoustic indices: A case study on a shelterwood logged northern Michigan forest, *Ecol. Indic.* 113 (2020) 106244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106244>. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80020-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80020-X).
- [6] H.P. Kunc, R. Schmidt, The effects of anthropogenic noise on animals: a meta-analysis, *Biol. Lett.* 15 (2019) 20190649. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0649>.
- [7] A. Farina, S.H. Gage (Eds.), *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*, John Wiley & Sons, 2017.
- [8] M. Depaetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J. Sueur, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, *Ecol. Indic.* 13 (2012) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>.
- [9] R. Benocci, G. Brambilla, A. Bisceglie, G. Zambon, Sound ecology indicators applied to urban parks: A preliminary study, *Asia-Pac. J. Sci. Technol.* 25 (2020) 1-10.
- [10] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal, *PloS one.* 3 (2008) e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.
- [11] M. Depaetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J. Sueur, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, *Ecol. Indic.* 13 (2012) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>.
- [12] N. Pieretti, A. Farina, D. Morri, A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI), *Ecol. Indic.* 11 (2011) 868-873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- [13] A. Benítez-López, R. Alkemade, P. A. Verweij, The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis, *Biological Conservation.* 143 (2010) 1307-1316. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.009>.

- [14] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018; Available online: www.R-project.org/ (accessed on 18 February 2025).
- [15] Seewave: Sound Analysis and Synthesis. <https://cran.r-project.org/web/packages/seewave/index.html> (accessed on 19 February 2025).
- [16] Soundecology: Soundscape Ecology. <https://cran.r-project.org/web/packages/soundecology/index.html> (accessed on 19 February 2025).
- [17] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, S. Pavoine, Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation, *Acta Acustica united with Acustica*. 100 (2014) 772–781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.
- [18] N. Pieretti, A. Farina, D. Morri, A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI), *Ecological indicators*. 11 (2011) 868–873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- [19] W. Yang, J. Kang, Soundscape and sound preference in urban squares: A case study in Sheffield, *Journal of urban design*. 10 (2005) 61–80. <https://doi.org/10.1080/13574800500062395>.
- [20] N.T. Boelman, G.P. Asner, P.J. Hart, R.E. Martin, Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing, *Ecological Applications*. 17 (2007) 2137–2144. <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>.
- [21] J. M. Grey, J.W. Gordon, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 63(1978) 1493–1500. <https://doi.org/10.1121/1.381843>.
- [22] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal, *PloS one*. 3 (2008) e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.
- [23] V.S. Ramaiah, R.R. Rao, Multi-speaker activity detection using zero crossing rate. In 2016 International Conference on Communication and Signal Processing. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCSP.2016.7754232>.
- [24] A. Potenza, V. Zaffaroni-Caorsi, R. Benocci, G. Guagliumi, J. M. Fouani, A. Bisceglie, G. Zambon, Biases in Ecoacoustics Analysis: A Protocol to Equalize Audio Recorders, *Sensors (Basel, Switzerland)*. 24 (2024), 4642. <https://doi.org/10.3390/s24144642>.
- [25] MathWorks: MATLAB. www.mathworks.com/products/matlab.html. (accessed on 12 February 2025).
- [26] G. Guagliumi, R. Benocci, F. Angelini, V. Zaffaroni-Caorsi, A. Potenza, G. Zambon, Ottimizzazione dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici: applicazione al Parco Regionale della Valle del Ticino, *Rivista italiana di acustica*. 2 (2024) 19–31. <https://doi.org/10.3280/Oria2-2024oa17780>.
- [27] I.T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Springer, 2002.
- [28] I.T. Jolliffe, B.J. Morgan, Principal component analysis and exploratory factor analysis, *Statistical methods in medical research*. 1 (1992) 69–95. <https://doi.org/10.1177/096228029200100105>.
- [29] Package 'clValid'. <https://cran.r-project.org/web/packages/clValid/clValid.pdf> (accessed on 12 February 2025).
- [30] G. Brock, V. Pihur, S. Datta, S. Datta, clValid: An R Package for Cluster Validation, *Journal of Statistical Software*. 25 (2008) 1–22. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i04>.
- [31] J. Handl, J. Knowles, D.B. Kell, Computational cluster validation in post-genomic data analysis, *Bioinformatics*. 21 (2005) 3201–3212. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti517>.
- [32] R. Benocci, H.E. Roman, A. Bisceglie, F. Angelini, G. Brambilla, G. Zambon, Eco-Acoustic Assessment of an Urban Park by Statistical Analysis, *Sustainability*. 13 (2005), 7857. <https://doi.org/10.3390/su13147857>.
- [33] GlobAllomeTree. Assessing volume, biomass and carbon stocks of trees and forests. www.globallometree.org/accounts/login/. (accessed on 18 February 2025).
- [34] M.A. Lefsky, W.B. Cohen, G.G. Parker, D.J. Harding, Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists, *BioScience*. 52 (2002) 19–30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2).
- [35] CAN-EYE web site - INRAE. <https://can-eye.paca.hub.inrae.fr/>. (accessed on 3 February 2025).
- [36] J.M. Chen, T.A. Black, Defining leaf area index for non-flat leaves, *Plant, Cell & Environment*. 15 (1992) 421–429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>.
- [37] QGIS 3.28 Firenze. <https://blog.qgis.org/2022/10/25/qgis-3-28-firenze-is-released/>. (accessed on 12 February 2025).
- [38] A. Ali, M. Lohbeck, E.R. Yan, Forest strata-dependent functional evenness explains whole-community aboveground biomass through opposing mechanisms, *Forest ecology and management*. 424 (2018) 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.015>.
- [39] C. Brush, Cavity use by secondary cavity-nesting birds and response to manipulations, *The Condor*. 85 (1983) 461–466. <https://doi.org/10.2307/1367987>.
- [40] Raven Pro – Cornell Lab of Ornithology. www.ravensoundsoftware.com/software/raven-pro/ (accessed on 12 February 2025).
- [41] J. Sueur, T. Aubin, C. Simonis, Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis, *Bioacoustics*. 18 (2008) 213–226. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753600>.
- [42] S. Dröge, T.R. Fulgence, K. Osen, A.A.N.A. Rakotomalala, E. Raveloaritiana, D. Schwab, D.A. Martin, Understanding acoustic indices as multi-taxa biodiversity and habitat quality indicators. *Ecological Indicators* 169 (2024) 112909. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112909>.
- [43] R. Benocci, A. Potenza, A. Bisceglie, H.E. Roman, G. Zambon, Mapping of the acoustic environment at an Urban Park in the City Area of Milan, Italy, using very low-cost sensors, *Sensors*. 22 (2022) 3528. <https://doi.org/10.3390/s22093528>.
- [44] R. Benocci, G. Guagliumi, A. Potenza, V. Zaffaroni-Caorsi, H.E. Roman, G. Zambon, Application of Transfer Entropy Measure to Characterize Environmental Sounds in Urban and Wild Parks, *Sensors*. 25 (2025) 1046. <https://doi.org/10.3390/s25041046>.
- [45] M.G. Khanaposhitani, A. Gasc, D. Francomano, L.J. Villanueva-Rivera, J. Jung, M.J. Mossman, B.C. Pijanowski, Effects of highways on bird distribution and soundscape diversity around Aldo Leopold's shack in Baraboo, Wisconsin, USA, *Landscape and Urban Planning*. 192 (2019) 103666. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103666>.
- [46] R.B. Machado, L. Aguiar, G. Jones, Do acoustic indices reflect the characteristics of bird communities in the savannas of Central Brazil?, *Landscape and Urban Planning* 162 (2017) 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.01.014>.
- [47] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, S. Pavoine, Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation, *Acta*

- Acustica united with Acustica. 100 (2014) 772-781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.
- [48] X. He, Y. Deng, A. Dong, L. Lin, The relationship between acoustic indices, vegetation, and topographic characteristics is spatially dependent in a tropical forest in southwestern China, *Ecological Indicators*. 142 (2022) 109229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109229>.
- [49] B.K. Pekin, J. Jung, L.J. Villanueva-Rivera, B.C. Pijanowski, J.A. Ahumada, Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest, *Landscape ecology*. 27 (2012) 1513-1522. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9806-4>.
- [50] L. Rankin, A.C. Axel, Biodiversity assessment in tropical biomes using ecoacoustics: Linking soundscape to forest structure in a human-dominated tropical dry forest in southern Madagascar, *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*. (2017) 129-145. <https://doi.org/10.1002/9781119230724.ch8>.
- [51] T. Shaw, M. Scherer-Lorenzen, S. Müller, Forest structural heterogeneity positively affects bird richness and acoustic diversity in a temperate, central European forest, *Frontiers in Ecology and Evolution*. 12 (2024) 1387879. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1387879>.
- [52] J.R. Karr, R.R. Roth, Vegetation Structure and Avian Diversity in Several New World Areas, *The American Naturalist*. 105 (1971) 423-435. <https://doi.org/10.1086/282735>.
- [53] C.A. Quinn, P. Burns, C.R. Hakkenberg, L. Salas, B. Pasch, S.J. GoetzScott, M.L. Clark, Soundscape components inform acoustic index patterns and refine estimates of bird species richness, *Front. Remote Sens.* 4 (2023) 1156837. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1156837>.
- [54] L. Barbaro, A. Sourdril, J.S. Froidevaux, M. Cauchoix, F. Calatayud, M. Deconchat, A. Gasc, Linking acoustic diversity to compositional and configurational heterogeneity in mosaic landscapes, *Landscape Ecology*. 37 (2022) 1125-1143. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01391-8>.
- [55] M. Budka, G. Gazda-Szypulski, A. Muszyńska, E. Sokołowska, A. Staniewicz, P. Bogawski, Acoustic indices enable the discrimination of temperate forest types and better predict differences in bird species composition than in bird species richness, *Environmental and Sustainability Indicators*. 24 (2024) 100529. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100529>.
- [56] Z. Hao, C. Wang, Z. Sun, Z., C.K. Bosch, D. Zhao, B. Sun, N. Pei, Soundscape mapping for spatial-temporal estimate on bird activities in urban forests, *Urban forestry & urban greening*. 57 (2021) 126822. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126822>.
- [57] R.H. MacArthur, J.W. MacArthur, On bird species diversity, *Ecology*. 42 (1961), 594-598. <http://dx.doi.org/10.2307/1932254>.
- [58] M.W. Wilson, J. Pithon, T. Gittings, T.C. Kelly, P.S. Giller, J. O'Halloran, Effects of growth stage and tree species composition on breeding bird assemblages of plantation forests, *Bird Study*. 53 (2006) 225-236. <https://doi.org/10.1080/00063650609461437>.
- [59] B.O. Poulsen, Avian richness and abundance in temperate Danish forests: tree variables important to birds and their conservation, *Biodiversity & Conservation*. 11 (2002) 1551-1566. <https://doi.org/10.1023/A:1016839518172>.
- [60] J. Schieck, M. Nietfeid, J.B. Stelfox, J.B. Differences in bird species richness and abundance among three successional stages of aspen-dominated boreal forests, *Canadian Journal of Zoology*. 73 (1995) 1417-1431. <https://doi.org/10.1139/z95-167>.

Realizzazione della “Camera dei Diamanti” e verifica delle prestazioni di spazializzazione del suono

Jacopo Grassi^{a*} | Nicola Prodi^a

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli Studi di Ferrara,
Via Giuseppe Saragat, 1, 44122 Ferrara

* Autore di riferimento:
jacopo.grassi@unife.it

Ricevuto: 9/1/2025

Accettato: 3/3/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19121

ISSN: 2385-2615

La “Camera dei Diamanti” è una piattaforma per realtà virtuale sviluppata presso l’Università di Ferrara. Le principali applicazioni spaziano dalla medicina alla psicologia e all’industria. Ad esempio: ricerca su protesi acustiche, intelligibilità della parola, sound quality dei prodotti, formazione e sicurezza. È illustrato il processo di realizzazione del sistema formato da una cabina audiometrica con al suo interno 41 altoparlanti (di cui un subwoofer) e un visore per realtà virtuale. Questa strumentazione provvede alla riproduzione di ambienti virtuali realistici; la parte audio è ottenuta grazie alla tecnologia Ambisonics, ormai diventata uno standard del settore; quella video è stata sviluppata con Unity.

È stata ideata una metodologia oggettiva che sfrutta array microfonic per stimare la bontà della spazializzazione del suono, utile a verificare il funzionamento del sistema e conoscerne i limiti. I risultati ottenuti per la “Camera dei Diamanti” sono particolarmente incoraggianti poiché l’errore di riproduzione di una sorgente sonora singola virtuale o reale si aggira attorno a 1°-2°, valori simili alla capacità umana di distinguere due suoni come provenienti da direzioni diverse in condizioni ottimali.

Parole chiave: Ambisonics, spazializzazione del suono, localizzazione, realtà virtuale, array microfonic, minimum audible angle

Realization of the “Camera dei Diamanti” and performance evaluation of the sound spatialization

“Camera dei Diamanti” is the virtual reality lab of the University of Ferrara. The main applications range from medicine and psychology to industry. Practical examples are acoustical prosthesis research, speech intelligibility, sound quality of industrial products, education and safety training. This work shows the physical realization of the hardware, so how 41 loudspeakers (including a subwoofer), an acoustic treatment and virtual reality glasses were added to an audiometric chamber. These make it possible to reproduce realistic virtual reality scenarios; the audio playback is achieved using Ambisonics technology, that is a standard nowadays for those labs; the video reproduction is managed by Unity.

An objective methodology, based on microphone arrays, has been developed to evaluate the performance of spatialization of the sound in order to be aware of the hardware’s limits.

The results obtained for the “Camera dei Diamanti” are encouragingly positive since the reproduction error evaluated for single source, both real and virtual ones, is around 1°-2°. These values are comparable to the human capability to distinguish two sounds coming from different directions under optimal conditions.

Keywords: Ambisonics, sound spatialization, localization, virtual reality, microphone arrays, minimum audible angle

1 | Introduzione

1.1 | Laboratorio di realtà virtuale

I laboratori per la realtà virtuale sono una delle risorse ad oggi più avanzate per la riproduzione di scenari virtuali audio-video. Costano di un array di altoparlanti e di un sistema di riproduzione video come visori per la realtà virtuale o proiettori. Strutture del genere sono spesso collocate in camere anecoiche per avere una restituzione audio molto fedele e ben controllabile.

Tali laboratori hanno suscitato particolare interesse nell’ambiente internazionale della ricerca, soprattutto in psi-

coacustica e nelle scienze per l’udito. Ad esempio in ambito audiologico è possibile ricreare ambienti acustici complessi [1] che non sono facilmente riproducibili con le tecniche di laboratorio più classiche. Presentando il Virtual Reality Lab dell’Università di Oldenburg, Hohmann et al. [2] mostrano come sia importante l’utilizzo di tali strutture per la valutazione e la progettazione di dispositivi innovativi per i deficit uditivi perché è rilevante ridurre al minimo la discrepanza tra sperimentazioni in laboratorio e l’esperienza nella vita reale [3-5]. Con i laboratori per la realtà virtuale si possono proporre efficacemente l’insegnamento e la riabilitazione alla distinzione di diversi stimoli sonori provenienti da direzioni differenti, in

condizioni controllate, ripetibili e molto simili alla realtà quotidiana [2].

I laboratori in questione sono dotati di strumentazione avanzata, ad esempio quello dell'Università di Oldenburg gestisce la parte video con uno schermo cilindrico (oppure con un visore per realtà virtuale HTC Vive [6]) e la parte audio con 28 altoparlanti nascosti dietro allo schermo cilindrico stesso. Viene anche utilizzato il sistema TASCAR [7] che permette di scegliere il tipo di rendering audio. Alla Università Tecnica della Danimarca (DTU) è presente AVIL [8] che consta di un sistema formato da 72 altoparlanti e un visore HTC VIVE PRO. In Italia sono presenti altre due realtà simili: "Stanza di Matilde" al IRCCS materno infantile Burlo Garofolo e "Audio Space Lab" al Politecnico di Torino. In particolare quest'ultima [9] è una stanza equipaggiata con 18 altoparlanti e un visore Meta Quest 2. Altri esempi sono SCaLAr dell'Università RWTH di Aachen [10] e ALF [11] della Base Air Force Wright-Patterson che sono formate rispettivamente da array di 64 e 277 altoparlanti.

La "Camera dei Diamanti" è un laboratorio per la realtà virtuale dell'Università di Ferrara. Il nome richiama uno dei simboli della città, il Palazzo dei Diamanti, le cui facciate sono completamente ricoperte da cunei, vedi Fig. 1. All'interno della camera è presente un pattern simile ottenuto grazie ad un trattamento acustico formato da coni di melammina, vedi Fig. 5.



Fig. 1 – Palazzo dei Diamanti
Palazzo dei Diamanti

Tieghi Maurizio, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferrara_palazzo_diamanti.jpg

È uno spazio adibito alla riproduzione di scenari virtuali visivo-uditivi tramite un array di 41 altoparlanti e un visore per la realtà virtuale Meta Quest 3. La tecnologia sfruttata per la riproduzione audio è Ambisonics (vedi paragrafo 1.2): l'utilizzo di semplici cuffie avrebbe limitato la percezione, ad esempio l'esternalizzazione del suono sarebbe più difficoltosa, ovvero il soggetto che indossa cuffie è più portato a "sentire il suono dentro la testa"; ma avrebbe limitato anche applicazioni di carattere medico come la valutazione delle performance di localizzazione del suono o di intelligibilità della parola di soggetti con protesi acustiche.

Il punto di forza, che distingue le indagini svolte all'interno di un laboratorio di realtà virtuale rispetto a quelle eseguite in ambienti più "tradizionali", è l'alto livello di sensazione di immersione all'interno della scena in cui ci si trova. La percezione della qualità di un prodotto industriale è fortemente

dipendente dalla presentazione di un'informazione visivo-uditiva, dalla sua qualità e dalla capacità di questa di essere trasmessa in modo fedele e immersivo al soggetto interessato. Lo stesso ragionamento è valido per le applicazioni inerenti agli addestramenti di sicurezza in diversi ambienti.

L'obiettivo dello studio è presentare come è stata realizzata la Camera dei Diamanti e formulare una metodologia di stima delle prestazioni di spazializzazione del suono che sia semplice ed efficace. Viene proposta, inoltre, l'applicazione della metodologia stessa alla "Camera dei Diamanti".

1.2 | Ambisonics

Ambisonics è una tecnologia sviluppata per la registrazione e la riproduzione spazializzata del suono, che può operare in maniera indipendente dalla configurazione degli altoparlanti che eseguono il playback, a patto che questi siano disposti su una superficie quasi sferica [12]. Invece, l'acquisizione del segnale avviene attraverso array microfonici aventi molte capsule (tipicamente 19, 32 o 64) disposte su di una superficie sferica.

Zotter e Frank [12] mostrano come la tecnologia sia basata sulla descrizione del campo sonoro attraverso armoniche sferiche, vedi Fig. 2. Più elevato è il numero di armoniche sferiche disponibili, più cresce la precisione con cui avvengono la registrazione e la riproduzione in termini di spazialità. L'ordine Ambisonics, graficamente, è il "numero di riga del triangolo" in Fig. 2 partendo dallo 0 della punta in alto (ordine 0 significa avere un'armonica sola).

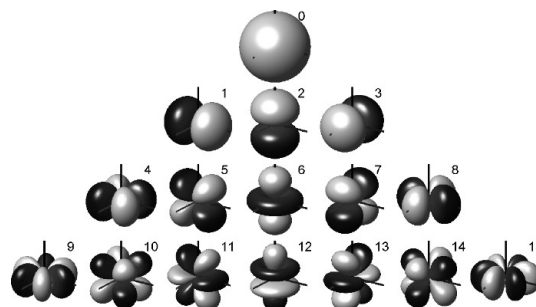


Fig. 2 – Armoniche sferiche fino al terzo ordine indicizzate con il numero di canale Ambisonics ACN (da Zotter e Frank [12])
Spherical harmonics up to the third order indexed with the Ambisonics channel number ACN (from Zotter and Frank [12])

Tecnicamente servirebbe un canale per ogni armonica sferica (si definisce Ambisonic Channel Number come $ACN = (O + 1)^2$, con O numero dell'ordine), dunque guardando la Fig. 2 ne servirebbero 16. Ciò significa che registrare un segnale al terzo ordine Ambisonics significa avere un array microfonico da almeno 16 capsule microfoniche orientate in modo diverso. Parlando invece di riproduzione, si può avere un playback del terzo ordine anche con un numero inferiore di altoparlanti, questo grazie al decoder ALLRAD, sviluppato da Zotter e Frank [13], che include nell'elaborazione del segnale il metodo di panning VBAP (vector-base amplitude panning),

ideato da Pulkki [14], ovvero un sistema di restituzione che permette il posizionamento delle sorgenti virtuali nello spazio.

Nel caso della “Camera dei Diamanti”, con 41 altoparlanti, sono state riprodotte tracce anche del settimo ordine. Per avere, invece, un settimo ordine “puro” sarebbero necessari 64 altoparlanti.

1.3 | Capacità di localizzazione di sorgenti singole

Per valutare le performances di spazializzazione e comprendere se l'errore di riproduzione, in termini di posizionamento dei suoni, è accettabile, bisogna aver ben presente i limiti dell'uomo nel percepire la direzione di un suono e prendere questi valori come riferimento.

Viene introdotto un sistema di riferimento sferico centrato nella testa dell'ascoltatore; la posizione, ad esempio di una sorgente, viene definita con gli angoli di azimut ed elevazione, vedi Fig. 3. Il primo descrive l'angolo che spazza il piano “orizzontale” che passa per gli occhi dell'ascoltatore con riferimento di 0° nella direzione frontale; alla destra dell'ascoltatore assume valori negativi e alla sinistra positivi, i valori sono compresi tra -180° e 180°. Il secondo angolo spazza sul piano, detto “mediano”, che taglia verticalmente la testa dell'ascoltatore; con riferimento alla direzione frontale si hanno 0°, con valori compresi tra 90° e -90°, sopra l'orizzontale sono positivi e sotto negativi. Il raggio della sfera è considerato costante e unitario.

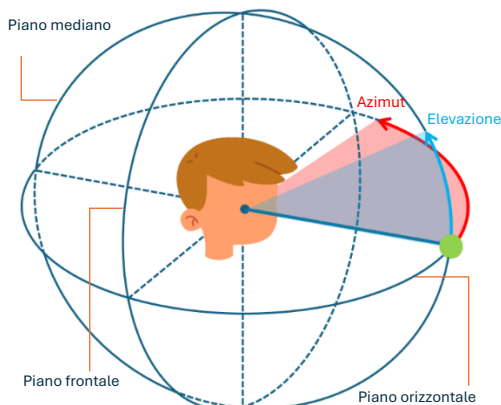


Fig. 3 – Sistema di riferimento (azimut in rosso ed elevazione in blu)
Reference system (azimuth in red and elevation in blue)

Blauert [15] definisce la localizzazione come “la legge o la regola in base alla quale la posizione di un evento uditivo è correlata a uno o più attributi specifici di un evento sonoro, o di un altro evento che è in qualche modo correlato all'evento uditivo.” Dove l'evento sonoro identifica il fenomeno fisico di propagazione dell'onda, mentre l'evento uditivo rappresenta la percezione di esso. Poi si definisce [15] anche la sfocatura di localizzazione come “la più piccola variazione di uno o più attributi specifici di un evento sonoro o di un altro evento correlato a un evento uditivo, sufficiente a produrre una va-

riazione nella posizione dell'evento uditivo. La sfocatura di localizzazione è una proprietà della localizzazione”. Blauert [15] continua paragonando la localizzazione a quella funzione che lega i punti del campo spaziale reale a quello della percezione, allora la sfocatura sarà la caratteristica che quantifica la “risoluzione” della spazialità percepita, che è minore rispetto a quella reale. La percezione della posizione di una sorgente singola dipende da molteplici fattori come la frequenza, la direzione di provenienza e la tipologia di segnale. In base alla combinazione dei fattori, possono insorgere anche illusioni uditive che posizionano la sorgente percepita in un punto completamente diverso da quello reale.

Carlini et al. [16] rimarcano come sia necessario aver presente che la posizione percepita viene processata dal cervello attraverso le cosiddette differenze interaurali. In pratica, in base a come il suono arriva all'ascoltatore, le due orecchie ricevono due segnali diversi l'uno dall'altro. Le differenze rilevanti sono in termini di livello (ILD – Interaural Level Difference), di tempo (ITD – Interaural Time Difference) e di fase (IPD – Interaural Phase Difference). Queste differenze sono praticamente nulle sul piano mediano, ne consegue una scarsa abilità dell'uomo a riconoscere la provenienza dei suoni se posizionati proprio su tale piano. A questo proposito Blauert [17] ha dimostrato come la percezione della posizione di toni puri sia dipendente quasi esclusivamente dalla frequenza: alcuni toni vengono percepiti nella parte frontale, altri nel posteriore e alcuni sopra la testa anche se emessi da altoparlanti con direzione diversa, ma sempre sul piano mediano.

1.3.1 | Minimum Audible Angle (MAA)

Per quantificare la performance uditiva di localizzazione si usa abitualmente il minimum audible angle (MAA) definito da Mills [18] come “la più piccola differenza percepibile tra gli azimut di due sorgenti identiche”, concetto facilmente estendibile all'angolo di elevazione. Lo studio di Grantham et al. [19], mostra valori di MAA in azimut, elevazione e diagonale (60° rispetto all'orizzontale) riportati in Tab. 1. I dati in questione evidenziano come l'uomo riesca a distinguere molto meglio due sorgenti singole quando si differenziano angolarmente in azimut, risultati che confermano quelli trovati da Perrot e Saberi [20] in precedenza; in tutti i casi è stato preso il riferimento, ovvero la posizione attorno alla quale si

Tab. 1 – Valori di MAA riportati in di Grantham et al. [19]; Wideband=70-15000 Hz, High pass=6000-15000Hz, Low pass=70-2000 Hz; fra parentesi la deviazione standard
MAA values from Grantham et al. [19]; Wideband=70-15000 Hz, High pass=6000-15000Hz, Low pass=70-2000 Hz; standard deviation in brackets

Segnale	Azimut	Diagonale	Verticale
Wideband	1.6° (0,3°)	2.8° (0,4°)	6.5° (2.4°)
High pass	1.6° (0,6°)	4.1° (1.4°)	11.6° (12.0°)
Low pass	1.5° (0,4°)	3.4° (1.0°)	19.0° (13.0°)

presenteranno stimoli di confronto appena spostati per ricavare i valori di MAA, a 0° di elevazione ed azimut, che successivamente verrà abbreviato in “direzione frontale”. Altri studi, come quello di Mills [18] e di Perrot e Saberi [20], rilevano un MAA nella direzione frontale minore rispetto a 1.6° di wide-band-azimut, ovvero di circa 1° in azimut.

Tuttavia, gli MAA ricavati con sistemi che prevedono sorgenti virtuali, come Ambisonics, sono tendenzialmente più alti rispetto a quelli citati in precedenza che sono stati trovati con l'utilizzo esclusivo di sorgenti reali. Nello studio di Sochaczewska et al. [21] si vede come, con un Ambisonics del terzo ordine, il valore MAA nella direzione frontale si aggiri attorno ai 3.2° di media. In ogni caso viene riportato un andamento di MAA al variare del riferimento in azimut molto simile: MAA cresce leggermente fino ai 60°-75° di azimut di riferimento per poi aumentare in maniera più decisa fino al riferimento 90° in cui si raggiungono, per lo studio [21], valori di MAA maggiori di 10° in media.

Invece, Meng et al. [22] hanno raccolto valori di MAA utilizzando VBAP. Lo studio dimostra come si possa sostituire la sorgente fisica con quella virtuale sul piano orizzontale nelle posizioni azimutali di 0° e 90°. Infatti, le misure medie di MAA con sorgente virtuale sono di 1.1° a 0° e di 3.1° a 90°, mentre quelle con sorgenti fisiche sono rispettivamente di 1.2° e 3.3°.

In conclusione, occorre tenere conto dell'influenza sulla percezione sonora di un dispositivo “indossato” in testa, come il visore per realtà virtuale, e l'effetto dell'informazione visiva fornita. È stato dimostrato da Huisman et al. [8] che, sul piano orizzontale:

- La prestazione di localizzazione non presenta differenze significative tra terzo, quinto e undicesimo ordine Ambisonics; peggiora molto per il primo.
- In assenza di informazione visiva, la presenza del visore sposta la percezione della sorgente più a sinistra quando essa è a sinistra e, rispettivamente, a destra.
- In presenza dell'informazione visiva, l'impatto del visore è trascurabile sulla capacità di localizzazione per applicazioni “ludiche”, non compromette l'esperienza immersiva, ma è da tenere in conto per la sperimentazione scientifica.

2 | Realizzazione della “Camera dei Diamanti”

2.1 | Hardware

Nel laboratorio di acustica dell'Università di Ferrara era presente una cabina audiometrica di dimensioni esterne di 4.20 × 3.18 × 2.76 m, prodotta da Puma Acoustics e trattata acusticamente con coni di melammina. Il pavimento della stanza è sollevato da terra e sostenuto da supporti che permettono un isolamento vibrazionale dai disturbi che possono incorrere dall'ambiente esterno. Inoltre, è anche presente un sistema di ventilazione estremamente silenzioso che consente un prezioso e fondamentale ricircolo di aria. Per disporre gli altoparlanti su di una superficie quasi sferica, è stato montato, in prima battuta, un telaio in acciaio che avesse la funzione di sostegno di pianta quadrata di lato 3.26 m e alto 2.20 m (vedi Fig. 4).



Fig. 4 – Cabina audiometrica con telaio in acciaio
Audiometric booth with steel frame

Successivamente, sono stati fissati sul telaio 32 altoparlanti passivi e 8 altoparlanti attivi sono stati posti su supporti appositi. La scelta del diverso montaggio degli altoparlanti è dovuta principalmente alla necessità di sfruttare e riempire lo spazio lontano dalla struttura. In questo modo si sono anche prevenuti possibili problemi di fissaggio degli altoparlanti attivi che sono molto pesanti (vedi Tab. 2). Inoltre, sapendo che le casse passive in dotazione coprono un range in frequenza minore rispetto alle attive, questa sistemazione ha permesso di posizionare gli altoparlanti più performanti nella parte frontale sul piano orizzontale, ovvero la zona in cui è richiesta la maggiore risoluzione angolare per via dei valori di MAA più bassi.

Il passo successivo è stato fissare al telaio un ulteriore strato di prismi di melammina per cercare di abbassare la frequenza di taglio della camera e quindi prevenire la maggior parte delle riflessioni; vedi Fig. 5.

Inoltre, la camera è stata dotata di una sedia regolabile in altezza, posta al centro della pianta, per fare in modo che l'ascoltatore possa posizionarsi con le orecchie a 1,12 m da terra, punto corrispondente al centro dell'array di casse, per avere la migliore esperienza di riproduzione possibile.

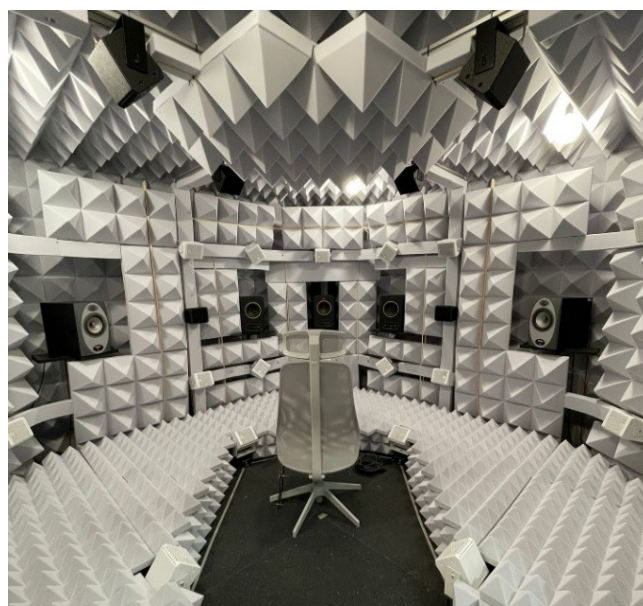


Fig. 5 – Camera dei Diamanti” ultimata
Finished “Camera dei Diamanti”

2.1.1 | Altoparlanti, scheda audio e amplificatore

In Tab. 2 sono riportate le specifiche degli altoparlanti utilizzati e si vuol far notare come la riproduzione copra un range di frequenza vasto. Il subwoofer è stato aggiunto in seguito per “aiutare” le basse frequenze.

Tab. 2 – Specifiche degli altoparlanti
Loudspeakers' specs

	Tannoy 7 Gold (active)	Tannoy Precision 6D (active)	RCF Compact M04 (passive)
Potenza max	300 W	110 W	240 W
SPL max	110 dB	116 dB	113 dB
Range di frequenza	65 Hz 20 kHz	59 Hz 51 kHz	90 Hz 20 kHz
Frequenza di crossover	1500 Hz	2500 Hz	1800 Hz
Tipo di crossover	Two-way	Two-way	Two-way
Peso	9.4 kg	13 kg	2.3 kg

In Fig. 6 è riportata la disposizione degli altoparlanti nella camera. I cerchi si riferiscono alla posizione degli altoparlanti passivi, mentre le piccole stelle a quelle degli attivi.

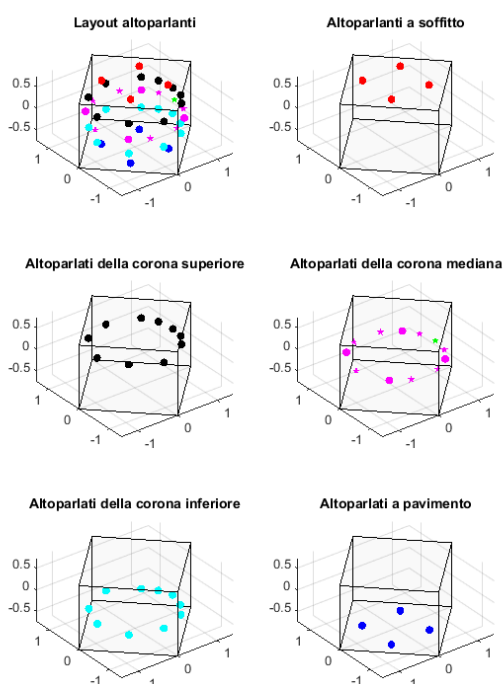


Fig. 6 – Disposizione degli altoparlanti
Loudspeakers' layout

Si evidenzia come la distribuzione degli altoparlanti non sia omogenea, ma abbia una densità più elevata nella parte frontale, ovvero nel punto indicato con la stella verde, coincidente sia

con un altoparlante attivo che con il punto di origine (0,0) del sistema di riferimento azimuth-elevazione riferito alla camera. Una maggiore densità permette una migliore capacità del sistema a spazializzare il suono in quella zona, che bisogna ricordare essere la più critica da trattare dato che ivi il valore di MAA è il minimo.

Il cablaggio fisico è rappresentato dalle frecce che uniscono i vari blocchi in Fig. 7. Quindi, il segnale parte da un computer, passa attraverso una scheda audio RME Fireface UFX III e si separa in due filoni che si dirigono verso gli altoparlanti attivi e passivi. In quest'ultimo, il segnale viene trattato da un amplificatore digitale a 32 canali Innosonix MA32/LP².

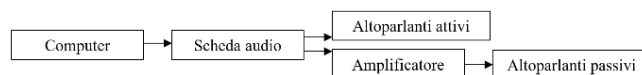


Fig. 7 – Cablaggio tra componenti hardware
Hardware components wiring

2.2 | Software

Il controllo dei segnali audio è stato sviluppato con Plogue Bidule, un software DAW (Digital Audio Workstation) nel quale è stata implementata una catena di “plugins” che permettesse la restituzione acustica desiderata all'interno della camera. I plugins sono estensioni del programma, spesso create da terze parti, che aggiungono funzioni non presenti nel software in sé. Possono essere intesi come una sorta di filtro sul segnale di input, l'output sarà modificato secondo alcuni parametri. In questo studio verranno utilizzate le suite COM-PASS e SPARTA sviluppate dall'Università di Aalto, la IEM Plugin Suite dell'Università di Graz e il plugin MCFX-Convolver di Matthias Kronlachner e poi ottimizzato da Angelo Farina.

2.2.1 | Flusso dei dati e filtri

In Fig. 8 è riportato un esempio del flusso dei dati che parte da un file audio (.wav da 64 canali) di input e che arriva all'output della scheda audio.

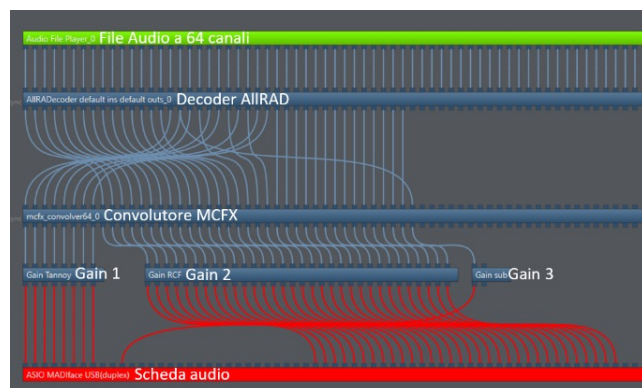


Fig. 8 – Flusso dei dati in Plogue Bidule, dove Gain 1, 2 e 3 si riferiscono rispettivamente ai gain di Tannoy, RCF e subwoofer
Data flow in Plogue Bidule where Gain 1, 2 and 3 refer respectively to gains of Tannoy, RCF and subwoofer

Il segnale passa, inizialmente, attraverso il decoder AI-IRADecoder (IEM Plugins Suite), ovvero l'artefice della distribuzione del segnale sui vari altoparlanti sfruttando l'algoritmo AllRAD citato in precedenza. Poi, il segnale viene convoluto con filtri per avere l'equalizzazione e l'allineamento temporale ad un campione rispetto al centro della camera di ciascuna cassa. Il segnale è campionato a 48 kHz, ciò significa che il tempo massimo di differenza con cui due segnali possono arrivare al centro della camera è di circa 20 μ s. In questo modo le casse emettono come se fossero posizionate su di una sfera quasi perfetta. Successivamente il segnale entra in blocchi che gestiscono i livelli di ciascuna cassa i quali sono regolati in modo che ogni altoparlante produca lo stesso livello misurato al centro della stanza.

Sia i filtri che i livelli sono stati misurati e realizzati con una capsula microfonica a condensatore Brüel & Kjær (B&K) 4165 associata ad un preamplificatore B&K 5935. Gli "intrecchi" dei collegamenti in Fig. 8 sono dovuti alla diversa numerazione tra filtri e canali degli altoparlanti.

3 | Verifica delle prestazioni di spazialità del suono

3.1 | Metodologia

Le performance oggettive della camera, in termini di rappresentazione spaziale del suono, sono state studiate attraverso la riproduzione di un rumore da una sorgente singola e la registrazione di esso attraverso un array microfonico. Confrontando la posizione della sorgente del rumore in input con quella rilevata dal microfono, si può stimare l'errore commesso.

Sono state verificate le posizioni di sorgenti singole sia virtuali che reali. Per le prime sono stati sfruttati dei file.wav di rumori rosa in terzi d'ottava (bande con frequenza di centro banda di 400 Hz, 1000 Hz e 4000 Hz) e uno a banda larga resi disponibili dall'Università di York (Cooper [23]) e codificati con un Ambisonics del settimo ordine. Invece, la verifica del posizionamento della sorgente reale è stata effettuata utilizzando un rumore bianco (100 Hz-15 kHz) emesso da un altoparlante alla volta.

Posizioni Sorgenti Virtuali	
Azimuth	Elevation
0	2
0	90
0	-90
-90	2
90	2
-180	0
0	26
-36	-26
36	-26
-72	26
72	26
-108	-26
108	-26
-144	26
144	26
180	-26

Fig. 9 – Posizioni delle sorgenti virtuali (Cooper [23]) espresse in gradi
Virtual sources positions (Cooper [23]) expressed in degrees

Le coordinate delle sorgenti virtuali (espresse in gradi, vedi Fig. 9) coincidono con le facce di un dodecaedro e di un cubo, non sono 18 (12+6), ma 16 perché due di esse coincidono. L'elevazione di qualche sorgente è a 2° e non a 0° (ad esempio la faccia frontale ce la si aspetterebbe a 0° sia di azimuth che di elevazione) per un probabile errore nella codifica del segnale, ma le misure non risentono di questo scostamento.

3.2 | Misura

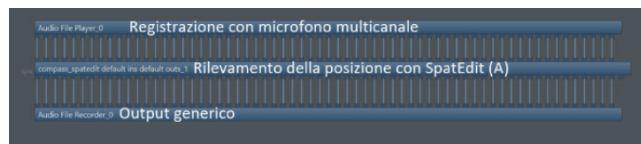


Fig. 10 – Catena di plugins per la misura della posizione della sorgente singola registrata con Eigenmike® a 64 canali
Plugins chain for measuring the position of a single source recorded with a 64-channel Eigenmike®

In Fig. 10 è mostrata la catena di plugin utilizzata per ricavare la posizione della sorgente singola dalla registrazione effettuata con un microfono Eigenmike® a 64 canali mostrato in Fig. 12. In input è presente la registrazione che viene analizzata dal plugin SpatEdit (A) della suite COMPASS in Fig. 11.

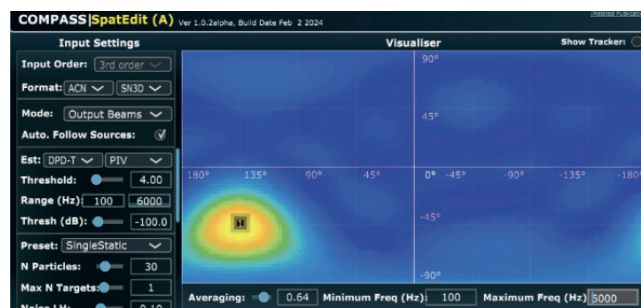


Fig. 11 – COMPASS SpatEdit (A)
COMPASS SpatEdit (A)

Il componente in questione prende il segnale in ingresso e calcola una colormap dell'ambiente acustico. È fornito di un tracker che può seguire automaticamente la posizione delle sorgenti presenti nella scena sonora e fornire una stima delle coordinate in azimuth ed elevazione.

È stato utilizzato il preset "SingleStatic" che ottimizza i valori dei parametri che governano il tracking per una sorgente singola stazionaria. Il tracking automatico è stato sfruttato fintanto che non commettesse errori molto evidenti: se il quadrato (con al suo interno il numero 1, vedi Fig. 11) che stima la posizione della sorgente era molto spostato rispetto "all'alone" più chiaro, si è preferito il metodo manuale trascinando il quadrato stesso al centro della zona più gialla.

L'errore è stato calcolato come la differenza tra le posizioni registrate e quelle emesse in termini di distanza lineare.

Questa non è altro che una corda della sfera e quindi è stato possibile riformulare l'errore calcolato come angolo al centro.



Fig. 12 – Setup di misura con Eigenmike® a 64 canali
Measure setup with 64 channels Eigenmike®

3.3 | Risultati

I risultati sono stati calcolati per tutte le posizioni di sorgente singola virtuale e reale come spiegato in precedenza. Di seguito sono riportate le colormaps ottenute con un'interpolazione di tipo “natural neighbor” dell'errore di ogni punto valutato come angolo al centro. Inoltre, i grafici mostrano con cerchi le posizioni reali delle sorgenti e con crocette le posizioni registrate. In Fig. 13 sono riportati gli assi di azimuth ed elevazione per facilitare la lettura dei grafici in Fig. 15 e Fig. 14.

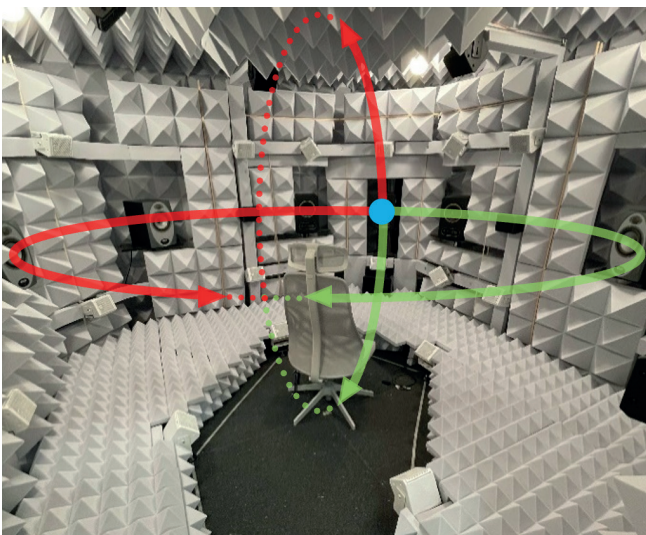


Fig. 13 – Rappresentazione degli assi in riferimento al sistema azimuth-elevazione riportato nei grafici a seguire
Representation of the azimuth-elevation axes used in the following graphs

Dal grafico in Fig. 15 si può evincere come gli errori siano sempre tra 1° e 3°. Inoltre, si vuole evidenziare come nella zona critica, ovvero nell'intersezione degli assi, l'errore sia limitato a 1.3°.

Ancora una volta, facendo riferimento alla Fig. 14, l'errore non supera i 3°, risulta mediamente più elevato e anche distribuito in maniera più omogenea sulla parte di superficie sferica interpolata. È da notare anche un'assenza di evidenti pattern di errore se non per un accenno di somiglianza nell'emisfero destro (Fig. 14 (b), (c) e (d)).

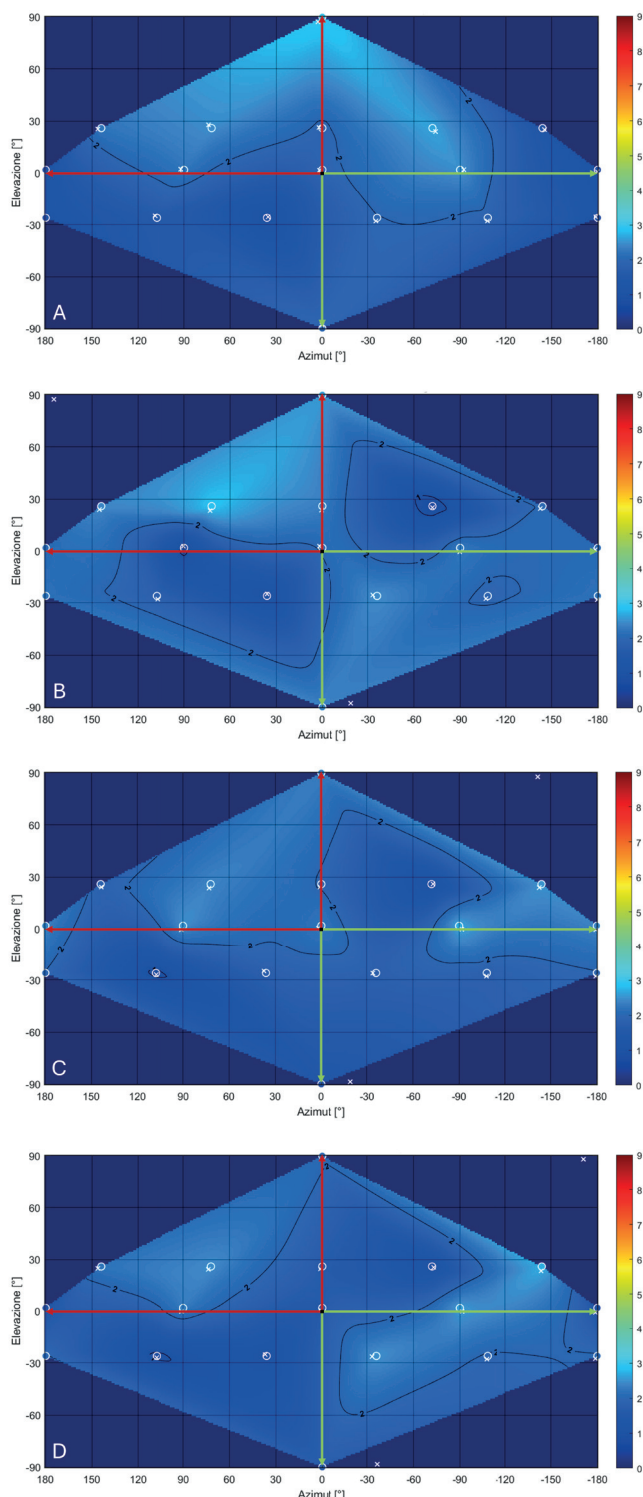


Fig. 14 – Colormaps dell'errore delle sorgenti virtuali nel caso di rumore rosa: per bande di terzi d'ottava (frequenze di centro banda di 250 Hz (a), 1000 Hz (b) e 4000Hz (c)) e per banda larga (d)
Error colormaps of virtual sources for different pink noise types: one-third-octave bands (center-band frequency equals to 250 Hz (a), 1000 Hz (b) e 4000Hz (c)) and wide band (d)

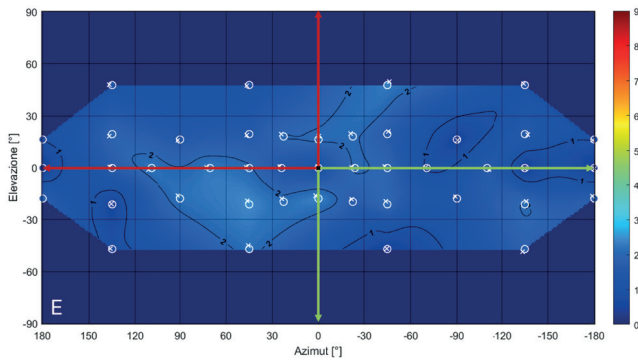


Fig. 15 – Colormaps dell'errore delle sorgenti reali con rumore bianco
Error colormaps of real sources using a white noise

Nel grafico in Fig. 16 si riportano le medie degli errori di-
visi per tipologia di segnale, di sorgente e di emisfero a cui
appartiene la sorgente singola.

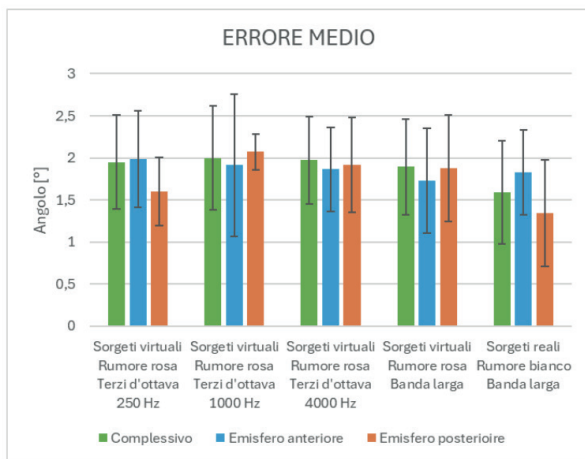


Fig. 16 – Confronto tra diversi gruppi di errore divisi per tipologia di segnale e di sorgente con sottogruppi relativi all'emisfero in cui sono posizionate le sorgenti singole
Comparison between errors grouped by signal and source type with subgroups indicating in which hemisphere the sound comes from

3.4 | Discussione

I risultati ottenuti consentono di poter affermare che la Camera dei Diamanti possiede ottime capacità di riprodurre uno stimolo sonoro localizzato. Infatti, i valori di errore angolare, misurato “oggettivamente”, sono comparabili con i valori di MAA di letteratura. Poi confrontando i valori medi degli errori divisi per tipologia, si può vedere come non siano presenti grosse differenze tra valori ottenuti con segnali diversi, emisfero di appartenenza della sorgente che sia essa reale o virtuale.

Nella valutazione dell'errore non sono state considerate le incertezze e i limiti che una misura del genere può introdurre nella stima della posizione di una sorgente sonora. Di conseguenza la misura è effettivamente comprensiva di una parte di errore che non è stata stimata e potrebbe incidere in termini migliorativi.

Inoltre, è necessario tener presente che le performance stimate sono prettamente oggettive. Questo non assicura una performance percettiva ottimale, ma garantisce il buon funzionamento dell'hardware. È una validazione di base per poter verificare che ci siano condizioni che possano consentire un ascolto spazializzato soddisfacente.

4 | OSC e sviluppo del sistema a realtà virtuale

4.1 | OSC e WhisPER

È stata sviluppata una comunicazione OSC (Open-Sound-Control, sviluppato da Wright e Freed [24]) per lo scambio di informazioni tra player DAW e altri software. Il protocollo di comunicazione scelto consente di avere un'ampia gamma di controlli che rendono il sistema adattabile alle più svariate applicazioni.

OSC è stato utilizzato per far mandare comandi al DAW da Unity, software che gestisce la parte visiva della realtà virtuale, oppure da WhisPER [25], un applicativo MATLAB sviluppato dall'Università Tecnica di Berlino che offre la possibilità di eseguire numerosi test psicoacustici di diversa natura. In Fig. 17 è mostrato un test per la valutazione di soglie psicofisiche. Per esempio, si potrebbe chiedere al soggetto di riconoscere il suono percepito come “diverso” rispetto ad altri due uguali. In particolare, in Fig. 17, è illustrato un test a 3-AFC (risposta forzata tra tre alternative) con procedura adattiva 2down/1up [26], ovvero lo stimolo corretto da scegliere diventa più “difficile” da distinguere quando viene scelto correttamente per due volte di fila e torna ad essere più “facile” non appena viene selezionata la risposta sbagliata.

Questa procedura può essere, per esempio, implementata per la valutazione del minimum audible angle (MAA).

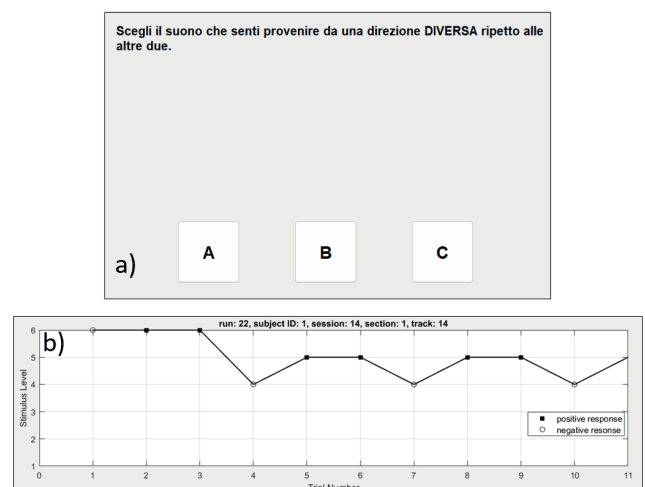


Fig. 17 – Esempio di schermata WhisPER per un test a 3AFC (a) per stabilire una soglia uditiva con procedura 2down/1up (b)
Example of a WhisPER screenshot for a 3AFC test (a) to stabilize a hearing threshold with the 2down/1up procedure (b)

Il sistema a realtà virtuale utilizza un visore Meta Quest 3 per cui sono state sviluppate tre demo in ambiente Unity in collaborazione con l'Ufficio di Servizi E-learning e Multimediali dell'Università di Ferrara.

- Esperienza audio-visiva virtuale (senza interazione). Vengono proposti un video bidimensionale “proiettato” su una sfera tridimensionale nera e la relativa traccia audio con Ambisonics del settimo ordine. L'esperienza introduce il partecipante al mondo dell'audio spazializzato sia dal punto di vista percettivo che concettuale in quanto l'avatar presente in Fig. 18 spiega l'evoluzione di questa tecnologia sfruttando l'Ambisonics stesso.

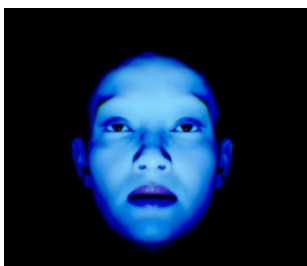


Fig. 18 – Speech 70A (Cooper et al. [23])
Speech 70A (Cooper et al. [23])

- Test di localizzazione con puntatore. Il test in questione permette di stimare le differenze tra la posizione della sorgente sonora singola e quella percepita dall'ascoltatore, valori utili alla ricostruzione delle capacità di localizzazione del soggetto. Il soggetto è in grado di comunicare al sistema la direzione percepita grazie ad un puntatore virtuale che funziona come una “pistola” (vedi Fig. 19). In pratica viene definita la posizione di una sorgente singola (da cui verrà emesso lo stimolo sonoro) con il plugin SPARTA AmbiENC attraverso comandi OSC inviati da un programma terzo. Il partecipante allora deve sparare nella direzione nella quale sente arrivare il suono; a quel punto la sorgente cambia posizione randomicamente tra un set prefissato di punti e il soggetto tornerà a sparare. Ad ogni iterazione viene calcolata la differenza tra la posizione della sorgente e quella indicata dal soggetto.

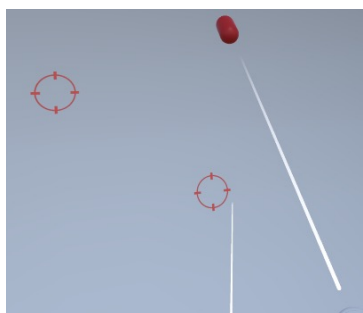


Fig. 19 – Test di localizzazione
Localization test

- Test di intelligibilità della parola a matrice contestualizzato. Il test a matrice è uno strumento clinico per la valutazione dell'intelligibilità della parola, inizialmente ideato da Hagerman [27] e poi riproposto in lingua italiana da Puglisi et al. [28]. Al soggetto vengono presentati un rumore “disturbante” e frasi di cinque parole pronunciate da un parlatore. Il partecipante deve allora selezionare sulla matrice le parole percepite.

Per la demo è stata registrata una scena di disturbo al bar della facoltà di ingegneria con una videocamera a 360° e un array microfonico Zylia®. Poi, è stato raccolto il materiale audio-video del parlatore in camera anecoica. La figura è stata sovrapposta al video 3D e la traccia audio anecoica è riprodotta in parallelo alla scena acustica spazializzata. Alla fine del test viene prodotto automaticamente file di report che segnala le risposte sbagliate e i tempi di risposta del soggetto.

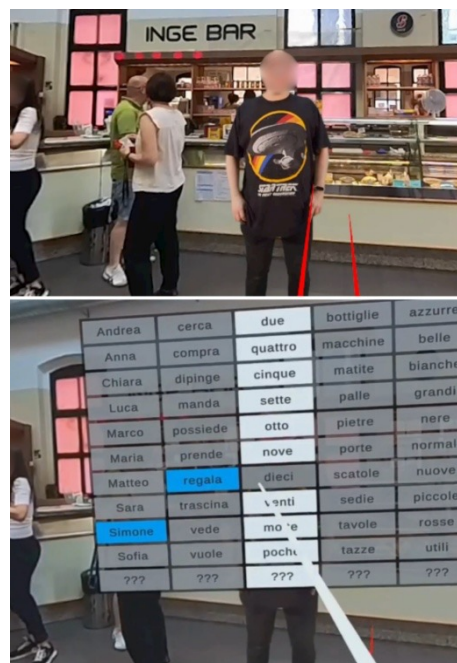


Fig. 20 – Test a matrice di intelligibilità della parola contestualizzato
Contextualized speech intelligibility matrix test

5 | Prospettive future

Sono in programma miglioramenti del sistema, ovvero l'inserimento di un sistema che consenta di avere pupillometria e una routine di calibrazione del visore per la realtà virtuale. Dal comportamento della pupilla si può stimare l'affaticamento di un soggetto nel portare a termine un compito [29]. Dati del genere sono fondamentali nella valutazione della differente “fatica uditiva” che può incorrere in diversi pazienti con stesse capacità di intelligibilità della parola [30]. La calibrazione, invece, si concretizza nel far corrispondere il sistema di riferimento virtuale con quello reale, quindi quello del visore con quello mostrato in Fig. 13. Una collimazione precisa tra i due

sistemi di riferimento garantisce, ovviamente, raccolte dati più accurate, ad esempio quando si svolgono test con puntatore del tipo in Fig. 19.

La “Camera dei diamanti” è uno strumento che può essere sfruttato in una vasta gamma di applicazioni. Si prospettano ricerche in campo medico-psicologico, come la valutazione della percezione della localizzazione di pazienti con protesi cocleari in ottica di insegnamento e riabilitazione.

Invece, un esempio di impiego a livello automotive è il perfezionamento dei sistemi AVAS (Acoustic Vehicle Alerting Systems): ricreando uno scenario acustico cittadino si possono valutare le migliori strategie di progettazione del suono tenendo conto del contesto e della direzione di arrivo del pericolo con grande realismo percettivo. Inoltre, si possono ricreare le condizioni all'interno dell'abitacolo per simulare il rumore percepito a diversi regimi di marcia e progettare soluzioni mirate al miglioramento dell'ambiente acustico.

Le applicazioni industriali comprendono la sound quality del prodotto, in particolare la cura dell'emissione sonora dell'oggetto visto da direzioni diverse, ma anche in stanze con caratteristiche acustiche particolari (ad esempio molto riverberanti).

Un altro ambito interessante è l'utilizzo di questo sistema in campo e-learning, sia dal punto di vista didattico-scolastico che da quello di training di sicurezza. La realtà virtuale ad alta fedeltà può essere una componente decisiva nel preparare le persone alla gestione di scenari critici. In tal modo sarebbe possibile ricreare una situazione molto realistica in cui il soggetto riesce a provare le procedure di sicurezza senza un vero pericolo.

6 | Conclusioni

Lo sviluppo di una metodologia di validazione oggettiva delle prestazioni di spazializzazione è cruciale per il confronto tra performance di camere differenti, per evidenziare carenze (come valutare eventuali riflessioni e altoparlanti mal orientati), ma anche per rendersi conto dei limiti di risoluzione spaziale del sistema.

La “Camera dei Diamanti” è una struttura innovativa in grado di porsi in una posizione strategica nello spazio della ricerca di base e applicata, ma anche dell'industria. Le potenzialità multipurpose garantiscono la possibilità di intraprendere plurimi percorsi che portino innovazione a realtà medicali e d'impresa. Inoltre, questa tecnologia è scalabile e adattabile alla precisa applicazione: si può ad esempio pensare di ricostruire un sistema del genere attorno ad un simulatore NVH (Noise, Vibration and Harshness) automotive o anche migliorare e aggiornare le cabine audiologiche presenti nelle cliniche e negli ospedali.

Conclusions

The introduction of a new technique capable of objectively validating the sound spatialization performance of the chamber is crucial to compare other rooms, to highlight localized deficiencies (for exam-

ple, to evaluate reflections and disoriented loudspeakers), and be aware of the internal limitations of the audio system itself.

The “Camera dei Diamanti” is a new, innovative, and powerful tool that occupies a strategic position for basic and applied research, but also in the industrial world. Its multipurpose functions guarantee the possibility of exploring many different avenues of innovation for human well-being and technical progress. Moreover, this technology is scalable and adaptable to specific applications: it is possible, for example, to build the hardware all around an NVH (Noise, Vibration and Harshness) vehicle simulator or to improve the performance of audiometric booths already in use in clinics and hospitals.

7 | Ringraziamenti

Si ringraziano il gruppo di ricerca di acustica dell'Università di Ferrara, l'Ufficio di Servizi E-learning e Multimediali dell'Università di Ferrara, in particolare Andrea Bertelli e Giulia Tampone che hanno sviluppato le applicazioni per il visore per la realtà virtuale, Angelo Farina, il Comitato Editoriale della RIA e il team di FrancoAngeli Editore.

Il presente lavoro è stato sostenuto dal fondo FIRD2024 “Camera dei Diamanti: una piattaforma UniFe di testing e training in realtà virtuale”.

Bibliografia

- [1] N.A. Lesica, Why Do Hearing Aids Fail to Restore Normal Auditory Perception?, *Trends in Neurosciences* 41 (2018) 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.01.008>.
- [2] V. Hohmann, R. Paluch, M. Krueger, M. Meis, G. Grimm, The Virtual Reality Lab: Realization and Application of Virtual Sound Environments, *Ear & Hearing* 41 (2020) 31S–38S. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000945>.
- [3] Y.-H. Wu, E. Stangl, O. Chipara, S.S. Hasan, S. DeVries, J. Oleson, Efficacy and Effectiveness of Advanced Hearing Aid Directional and Noise Reduction Technologies for Older Adults With Mild to Moderate Hearing Loss, *Ear & Hearing* 40 (2019) 805–822. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000672>.
- [4] R.A. Bentler, Effectiveness of Directional Microphones and Noise Reduction Schemes in Hearing Aids: A Systematic Review of the Evidence, *J Am Acad Audiol* 16 (2005) 473–484. <https://doi.org/10.3766/jaaa.16.7.7>.
- [5] M.T. Cord, R.K. Surr, B.E. Walden, O. Dyrland, Relationship between Laboratory Measures of Directional Advantage and Everyday Success with Directional Microphone Hearing Aids, *J Am Acad Audiol* 15 (2004) 353–364. <https://doi.org/10.3766/jaaa.15.5.3>.
- [6] G. Llorach Tó, G. Grimm, M. Hendrikse, V. Hohmann, Towards Realistic Immersive Audiovisual Simulations for Hearing Research: Capture, Virtual Scenes and Reproduction, 2018. <https://doi.org/10.1145/3264869.3264874>.
- [7] G. Grimm, J. Luberadzka, V. Hohmann, A Toolbox for Rendering Virtual Acoustic Environments in the Context of Audiology, *Acta Acustica United with Acustica* 105 (2019) 566–578. <https://doi.org/10.3813/AAA.919337>.
- [8] T. Huisman, A. Ahrens, E. MacDonald, Ambisonics Sound Source Localization With Varying Amount of Visual Information

- in Virtual Reality, *Frontiers in Virtual Reality* 2 (2021). www.frontiersin.org/journals/virtual-reality/articles/10.3389/frvir.2021.722321.
- [9] A. Guastamacchia, R.G. Rosso, G.E. Puglisi, F. Riente, L. Shtrepi, A. Astolfi, Real and Virtual Lecture Rooms: Validation of a Virtual Reality System for the Perceptual Assessment of Room Acoustical Quality, *Acoustics* 6 (2024) 933–965. <https://doi.org/10.3390/acoustics6040052>.
- [10] F. Pausch, G. Behler, J. Fels, SCaLAR – A surrounding spherical cap loudspeaker array for flexible generation and evaluation of virtual acoustic environments, *Acta Acust.* 4 (2020) 19. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020014>.
- [11] G.D. Romigh, D.S. Brungart, B.D. Simpson, Free-Field Localization Performance With a Head-Track Virtual Auditory Display, *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.* 9 (2015) 943–954. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2421874>.
- [12] F. Zotter, M. Frank, Ambisonic Amplitude Panning and Decoding in Higher Orders, in: F. Zotter, M. Frank (Eds.), *Ambisonics: A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 53–98. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17207-7_4.
- [13] F. Zotter, M. Frank, All-Round Ambisonic Panning and Decoding, *Journal of the Audio Engineering Society* 60 (2012) 807–820.
- [14] V. Pulkki, *Spatial Sound Generation and Perception by Amplitude Panning Techniques*, (2001).
- [15] J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, The MIT Press, 1996. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6391.001.0001>.
- [16] A. Carlini, C. Bordeau, M. Ambard, Auditory localization: a comprehensive practical review, *Frontiers in Psychology* 15 (2024). www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2024.1408073.
- [17] J. Blauert, Sound Localization in the Median Plane, *Acta Acustica United with Acustica* 22 (1969).
- [18] A.W. Mills, On the Minimum Audible Angle, *The Journal of the Acoustical Society of America* 30 (1958) 237–246. <https://doi.org/10.1121/1.1909553>.
- [19] W. Grantham, B. Hornsby, E. Erpenbeck, Auditory spatial resolution in horizontal, vertical, and diagonal planes, *The Journal of the Acoustical Society of America* 114 (2003) 1009–22. <https://doi.org/10.1121/1.1590970>.
- [20] D.R. Perrott, K. Saberi, Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth, *The Journal of the Acoustical Society of America* 87 (1990) 1728–1731. <https://doi.org/10.1121/1.399421>.
- [21] K. Sochaczewska, P. Malecki, M. Piotrowska, Evaluation of the Minimum Audible Angle on Horizontal Plane in 3rd order Ambisonic Spherical Playback System, 2021. <https://doi.org/10.1109/I3DA48870.2021.9610858>.
- [22] R. Meng, J. Xiang, J. Sang, C. Zheng, X. Li, S. Bleeck, J. Cai, J. Wang, Investigation of an MAA Test With Virtual Sound Synthesis, *Frontiers in Psychology* 12 (2021). www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2021.656052.
- [23] J. Cooper, Immersive Audiovisual Materials Database, (2024). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10571315>.
- [24] M. Wright, A. Freed, OSC, (2021). <https://ccrma.stanford.edu/groups/osc/index.html> (accessed December 5, 2024).
- [25] S. Ciba, A. Wlodarski, H.-J. Maempel, WhisPER – A New Tool for Performing Listening Tests, 126th Audio Engineering Society Convention 2009 1 (2012).
- [26] H. Levitt, Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics, *The Journal of the Acoustical Society of America* 49 (1971) Suppl 2:467+. <https://doi.org/10.1121/1.1912375>.
- [27] B. Hagerman, Sentences for Testing Speech Intelligibility in Noise, *Scandinavian Audiology* 11 (1982) 79–87. <https://doi.org/10.3109/01050398209076203>.
- [28] G.E. Puglisi, A. Warzybok, S. Hochmuth, C. Visentin, A. Astolfi, N. Prodi, B. Kollmeier, An Italian matrix sentence test for the evaluation of speech intelligibility in noise, *International Journal of Audiology* 54 (2015) 44–50. <https://doi.org/10.3109/14992027.2015.1061709>.
- [29] J. Beatty, Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources., *Psychological Bulletin* 91 (1982) 276–292. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>.
- [30] M.B. Winn, D. Wendt, T. Koelewijn, S.E. Kuchinsky, Best Practices and Advice for Using Pupillometry to Measure Listening Effort: An Introduction for Those Who Want to Get Started, *Trends in Hearing* 22 (2018) 2331216518800869. <https://doi.org/10.1177/2331216518800869>.

Miglioramento acustico della Chiesa di Santo Stefano al Ponte Firenze

Marco Franchini^{a*} | Carlo Baistrocchi^a | Veronica Amodeo^a

^a Dipartimento di Architettura,
Università degli Studi di Firenze,
Via della Mattonaia, 8, 50121 Firenze

* Autore di riferimento:
m.franchini.frinco@gmail.com

Ricevuto: 27/2/2025

Accettato: 3/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19495

ISSNe: 2385-2615

Il presente lavoro riguarda il miglioramento acustico della chiesa di Santo Stefano al Ponte, situata nel centro storico di Firenze, sconsacrata dal 1986 e oggi convertita in sala per fini culturali. Nello specifico, è utilizzata come auditorium dall'Orchestra da Camera Fiorentina. L'intervento di miglioramento acustico è necessario poiché le caratteristiche acustiche richieste da una sala concerti sono differenti rispetto a quelle proprie di un edificio religioso. Il percorso progettuale inizia con la misurazione in loco dei parametri acustici e la loro analisi allo stato attuale attraverso la modellazione virtuale dell'ambiente. Successivamente viene proposto un ventaglio di possibili interventi che sono analizzati sia sotto l'aspetto acustico che architettonico. Particolare attenzione è stata posta al loro inserimento nel contesto architettonico e artistico della chiesa. Le valutazioni progettuali hanno portato alla definizione di una serie di interventi, tra cui una camera acustica da posizionare attorno all'orchestra per migliorare l'acustica a beneficio dei musicisti oltre che del pubblico.

Parole chiave: caratterizzazione acustica, progetto acustico, patrimonio edilizio, misurazione acustica, auditorium, chiesa

Acoustic Improvement of Santo Stefano al Ponte Church

The present work concerns the acoustic improvement of the Santo Stefano al Ponte church, located in the historic centre of Florence. The church has been deconsecrated since 1986 and immediately converted for cultural purposes. It is currently used as an auditorium for the Orchestra da Camera Fiorentina. The acoustic enhancement is necessary because the acoustic requirements of a concert hall differ significantly from those of a religious building. The design process begins with on-site measurements of the acoustic parameters and their current analysis through the virtual modelling of the environment.

Subsequently, a range of possible interventions is proposed and analysed from both acoustic and architectural perspectives. Particular attention is directed toward integrating these interventions within the architectural and artistic context of the church. The evaluation process led to the design of a series of interventions, including an acoustic shell to be placed around the orchestra.

Keywords: acoustic characterization, acoustic design, building heritage, acoustic measurements, auditorium, church

1 | Introduzione

Le città contemporanee sono ricche di edifici abbandonati, basti pensare alle chiese sconsacrate o alle fabbriche delle prime periferie, che oggi sono compresi nel tessuto urbano consolidato. Tutti questi edifici hanno perso la loro funzione iniziale per diversi motivi, ma visto il loro valore artistico e testimoniale è importante valorizzarli con nuove destinazioni d'uso. Queste sono spesso di carattere culturale come musei, centri congressi, archivi e sedi di associazioni o enti.

L'inserimento di queste nuove funzioni richiede necessariamente un adeguamento delle caratteristiche proprie dell'ambiente originale. Per quanto riguarda la qualità acustica, spesso si crea un contrasto tra quello che è l'involucro storico

e quelle che sono le esigenze dovute alla nuova funzione in esso contenute. Il presente lavoro riporta il caso studio del progetto di miglioramento acustico della chiesa di Santo Stefano al Ponte, oggetto di tesi di laurea magistrale in architettura. La chiesa, situata nel centro storico di Firenze, è stata sconsacrata nel 1986 e sin da subito è stata convertita per fini culturali. Attualmente è utilizzata come sala per eventi multimediali, prendendo il nome di "Cattedrale delle Immagini", e come auditorium per l'Orchestra da Camera Fiorentina diretta dal Maestro Giuseppe Lanzetta.

Le caratteristiche acustiche richieste da una sala concerti sono differenti rispetto a quelle proprie di un edificio religioso. L'ambiente di una chiesa appare ricco di riverbero, mentre la musica da camera richiede un ambiente più asciutto con tempi di riverbero (Tr) minori. Nello specifico il Maestro Lanzetta ha evidenziato la presenza di un eccessivo riverbero, soprattutto del suono degli strumenti più gravi, come ottoni

¹ Vincitore del premio "Giovani professionisti" edizione 2024.

e timpani, che risulta impastato, e la difficoltà di diffondere omogeneamente il suono in tutta la platea, in particolare il suono della voce del coro, che durante alcuni concerti accompagna l'orchestra.

1.1 | La Chiesa di Santo Stefano al Ponte

La chiesa di Santo Stefano al Ponte è una delle più antiche chiese del centro storico di Firenze. Fondata nella seconda metà del X secolo, ha acquisito nel tempo differenti epiteti. Essa sorge con la facciata parallela al cardo nelle vicinanze della "cerchia antica" delle mura fiorentine (erette tra il IX e X secolo) in prossimità della porta Santa Maria (odierna Via Por Santa Maria).

L'impianto della chiesa è stato sviluppato in tre fasi principali: romanica, gotica e barocca, riconoscibili nella struttura odierna. L'originale impianto romanico a tre navate, del quale rimane traccia solo nella parte inferiore della facciata con l'imponente ingresso centrale decorato con una bicromia di marmi e i due ingressi laterali sormontati da bifore, venne radicalmente modificato nel periodo gotico tra fine XIII secolo e inizio XIV secolo. In questa fase si consolida l'odierno impianto a navata unica, vengono realizzati il coro, tre cappelle e la nicchia con arco a sesto acuto nella parete di sinistra, mentre nella facciata sono inserite le tre monofore allineate ai portali. Nei secoli successivi vennero addossati sulle pareti laterali della navata diversi altari votivi dalle più importanti famiglie fiorentine che frequentavano la chiesa.



Fig. 1 – Interno della Chiesa di Santo Stefano al Ponte
Interior of Santo Stefano al Ponte's church

L'intervento più cospicuo e caratterizzante della chiesa di Santo Stefano al Ponte è di epoca barocca, finanziato

dal marchese Anton Maria Bartolommei (proprietario del palazzo adiacente alla chiesa) che probabilmente ne diresse anche i lavori. I lavori iniziarono nel 1631 e furono portati avanti dagli eredi anche dopo la morte del marchese nel 1641, fino al 1655 (Fig. 1). L'intervento, che mirava al completo rifacimento dell'apparato decorativo della chiesa, venne interrotto e realizzato solo nella zona presbiteriale, nel coro, nella tribuna; venne inoltre creata la cripta. La matrice stilistica distintiva e caratterizzante dell'intervento di epoca barocca è il rigoroso utilizzo della linea retta in sostituzione di ogni forma curva. Questa peculiarità è evidente nell'arco monumentale a tutto sesto di accesso alle cappelle, deliberatamente spezzato in sette segmenti rettilinei, e nella cupola che sormonta le cappelle, non emisferica ma frammentata in precise forme geometriche poligonali. L'utilizzo della linea retta di archi, lesene, pilastri e modanature è enfatizzato dall'utilizzo della pietra serena in contrasto con lo stucco bianco per ricercare l'ombra proiettata sugli elementi geometrici, obbligando lo spettatore ad una visione complessiva della facciata interna [1]. A questa fase risale anche l'originale altare centrale con bassorilievo in bronzo di Ferdinando Tacca, del 1656, raffigurante il martirio di Santo Stefano.

Gli elementi di maggior pregio artistico sono l'altare del Giambologna del 1594 e la scalinata con balaustra del Buontalenti del 1574 che vennero inseriti alla fine del XIX secolo a seguito di un profondo restauro stilistico delle rispettive chiese di provenienza, Santa Maria Nuova e Santa Trinita. I due elementi entrano in contrasto con la regolarità e rigidità dell'apparato decorativo della chiesa perché frutto di momenti culturali completamente differenti. L'altare maggiore del Giambologna in marmo richiama lo stile classico, mentre la scala balaustrata del Buontalenti è espressione dell'architettura manieristica fiorentina, con il disegno nervoso dello scalino in pietra serena che con le sue curve assomiglia alle valve di una conchiglia a spirale o all'ala di un pipistrello.

Nel corso del '900 la chiesa fu oggetto di più interventi di restauro, dapprima dovuti agli ingenti danni subiti nell'agosto del '44 (a causa dalla disperata ritirata delle truppe naziste che minarono l'intera zona attorno Ponte Vecchio) e successivamente all'alluvione del '66 (quando l'acqua dell'Arno ricoprì la parte rialzata dell'altare maggiore). I restauri terminarono solo all'inizio degli anni '80, ma a causa dello spopolamento del centro città, la chiesa fu abbandonata e sconsacrata nel 1986.

Attualmente la chiesa è utilizzata come sede di eventi principalmente di natura culturale, come mostre e concerti, e in particolare come auditorium per l'Orchestra da Camera Fiorentina diretta dal Maestro Giuseppe Lanzetta. L'orchestra è formata da circa 40 elementi divisi in tre principali sezioni: archi, fiati e percussioni, spesso accompagnata dal coro o da solisti. Il pavimento della navata si presenta rivestito di moquette. Nella chiesa sono presenti ingombranti strutture metalliche temporanee asservite agli spettacoli di video mapping.

2 | Metodo

2.1 | Parametri acustici

In letteratura i parametri acustici oggettivi ai quali si ricorre per l'analisi acustica delle sale da concerto sono vari. Tuttavia, non vi è un accordo unanime su quali e quanti parametri fisici oggettivi, e quali combinazioni tra essi, siano necessari per descrivere con sufficiente completezza la qualità del suono percepita in una sala da concerto.

Alla base dello studio dei principali parametri oggettivi che descrivono l'acustica di una sala da concerti ci sono gli attributi percettivi definiti da Leo Beranek [2]. In questo studio è stato scelto di considerare i parametri acustici relativi alla riverberazione, nitidezza e percezione del suono, che verranno spiegati nel seguito.

Il senso di riverberazione è l'attributo più evidente che si percepisce in un ambiente confinato. Il principale parametro utilizzato per descrivere la riverberazione è il tempo di riverbero (T_{60}), cioè l'intervallo di tempo necessario affinché il livello di pressione sonora all'interno di un ambiente decada di 60 dB. La difficoltà di misurare un decadimento di 60 dB ha evidenziato la necessità di ricorrere a intervalli più brevi (p.e. T_{20} , T_{30}). Durante l'esecuzione di un passaggio musicale articolato, è possibile che venga percepita soltanto la parte iniziale del decadimento dei picchi e che quella successiva rimanga mascherata; per questo motivo è utile fare riferimento all'Early Decay Time (EDT) che rappresenta il decadimento sonoro dei primi 10 dB.

È importante valutare anche il comportamento acustico alle basse frequenze, che contribuisce alla percezione del 'Calore' di un ambiente. Come descrittore oggettivo di questa qualità si utilizza il Rapporto tra Bassi (BR), definito come il rapporto tra il tempo di riverbero alle basse frequenze (125-250 Hz) e quello alle medie frequenze (500-1000 Hz).

$$BR = \frac{(T_{R125} + T_{R250})}{2 * T_{R500-1000}} \quad (1)$$

La nitidezza del messaggio sonoro è influenzata dall'energia che raggiunge l'orecchio dell'ascoltatore. Il suono diretto e quello delle prime riflessioni sono i suoni che maggiormente influenzano il suono percepito. Spesso la loro combinazione permette di rafforzare il suono che raggiunge l'ascoltatore. Per tenere conto di questo aspetto si utilizza il parametro della Chiarezza (C_{80}), cioè la relazione tra l'energia dei primi 80 ms e la componente di energia successiva.

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \quad (2)$$

L'intensità percepita permette di giudicare se un suono è forte o debole e viene descritta dall'indice di robustezza (G), che mette in relazione la risposta all'impulso per una coppia sorgente/ricevitore all'interno della sala con quella che avrebbero in campo libero a una distanza di 10 m.

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right] \quad (3)$$

Questo indice vuole rappresentare l'effetto di amplificazione della sala, infatti è anche definito come la differenza tra il livello di pressione sonora nel punto di osservazione e il livello di pressione sonora della sorgente.

2.2 | Misurazioni acustiche strumentali

La campagna di misurazione del TR è stata effettuata mediante la tecnica della risposta all'impulso, come previsto dalla norma UNI EN ISO 3382 [3], il 26 giugno 2023. La misurazione di questo parametro è servita sia per descrivere la qualità acustica dell'ambiente che per tarare il modello acustico virtuale della sala, dal quale sono stati ricavati i descrittori oggettivi dell'ambiente e che è stato utilizzato come base del progetto di miglioramento acustico.

La sorgente sonora impulsiva impiegata in tutte le posizioni è una pistola a salve di misurazione. In alcune posizioni, a questa misurazione è stata affiancata una seconda misurazione, che ha utilizzato come impulso lo scoppio di un pallone gonfiato ad aria. Per l'acquisizione del segnale sono state utilizzate due differenti strumentazioni, affiancate in tutte le misurazioni: un fonometro in Classe 1 e un registratore digitale.

Le misurazioni si sono concentrate nell'ambiente principale della chiesa, cioè la navata unica. Per simulare la percezione sonora degli ascoltatori, la sorgente è stata posta al centro dell'area presbiteriale rialzata, nella posizione dove normalmente è collocata l'orchestra, mentre i ricevitori sono stati collocati nella zona bassa dell'assemblea (platea). Successivamente l'analisi si è concentrata sull'area presbiteriale rialzata (orchestra), sia per determinare la percezione acustica reciproca dei musicisti durante l'esecuzione di un concerto, posizionando la sorgente e il ricevitore nella zona dell'orchestra, sia misurando l'eventuale interferenza degli ambienti retrostanti l'orchestra (cappelle e coro), ponendo la sorgente al loro interno e il ricevitore al centro dell'orchestra. Infine sono stati misurati i parametri dei singoli ambienti minori: la cappella laterale e il coro (Fig. 2).

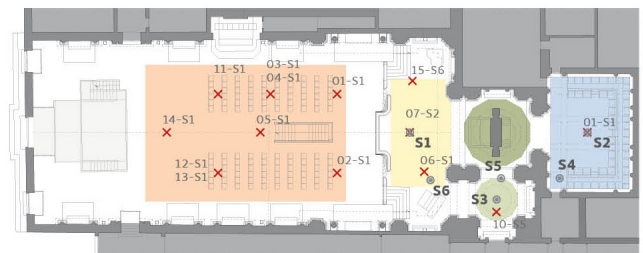


Fig. 2 – Planimetria della chiesa con posizionamento delle sorgenti e dei ricevitori

Plan of the church with positioning of sources and receivers

2.3 | Simulazione acustica mediante modello

Le misurazioni acustiche in loco rappresentano solo puntualmente l'ambiente [4], ma vista la complessità e l'articolazione della chiesa, risulta necessario analizzare l'intero complesso

basandosi su un modello tridimensionale virtuale che permetta di ottenere i descrittori acustici in qualsiasi punto. La simulazione è stata eseguita impiegando il software Ramsete®, basato sul metodo geometrico e in particolare sul sistema del Pyramid Tracing [5].

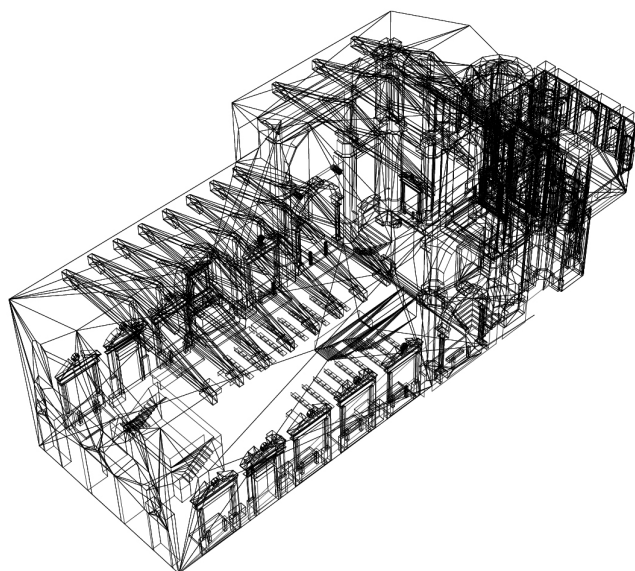


Fig. 3 – Modello tridimensionale dell'ambiente
3D model of the environment

La geometria dell'ambiente è stata semplificata, trascurando l'intero apparato decorativo (Fig. 3). Ad ogni superficie è stato attribuito un materiale con relativi coefficiente di assorbimento e coefficiente di scattering. Successivamente il modello è stato tarato sulla base delle misure del Tr eseguite in loco.

La simulazione ha permesso di analizzare in maniera dettagliata la distribuzione dei valori dei parametri, sia in maniera puntuale, inserendo i ricevitori nei punti più significativi dell'ambiente, sia in maniera grafica, creando attraverso una griglia di ricevitori una mappa cromatica. Oltre all'analisi dello stato attuale della sala, il modello acustico ha permesso di inserire all'interno dell'ambiente anche le soluzioni progettuali proposte, valutando il loro contributo al miglioramento della qualità acustica.

Dalla simulazione virtuale sono stati ricavati i parametri acustici fondamentali: tempo di riverbero (Tr), Early Decay Time (EDT), chiarezza (C80) e intensità sonora (G).

3 | Risultati delle analisi acustiche

3.1 | Confronto tra strumenti di misurazione

Il confronto tra le due differenti strumentazioni utilizzate come ricevitore, è servito per verificare l'accuratezza delle misure di Tr eseguite attraverso l'analisi del segnale registrato rispetto ai valori misurati direttamente con il fonometro. Quale strumento di riferimento è stato considerato il fonometro in quanto soggetto a regolare taratura e calibrazione. Il registratore ha acquisito file con estensione.wav che sono stati analizzati at-

traverso il software Audacity con plugin Aurora. Come riportato nel grafico (Fig. 4), il T30 presenta minime differenze tra le due strumentazioni a partire dalle frequenze medio-alte (bande maggiori di 500 Hz), mentre la differenza aumenta con la diminuzione delle frequenze a causa di una minore sensibilità del registratore alle basse frequenze. Il confronto tra le due differenti sorgenti serve per valutarne l'affidabilità. Lo scoppio di un pallone gonfiato ad aria è un metodo artigianale che, seppur comodo, non garantisce un'eccitazione costante dell'ambiente a tutte le frequenze e ha un'intensità sonora inferiore rispetto allo sparo della pistola a salve, che garantisce una maggiore riproducibilità. Nonostante queste differenze di strumentazione, si può notare dal grafico (Fig. 4) che le due sorgenti producono un'eccitazione simile dell'ambiente e permettono di ottenere valori simili del T30 per tutto lo spettro sonoro, ad eccezione delle frequenze più basse.

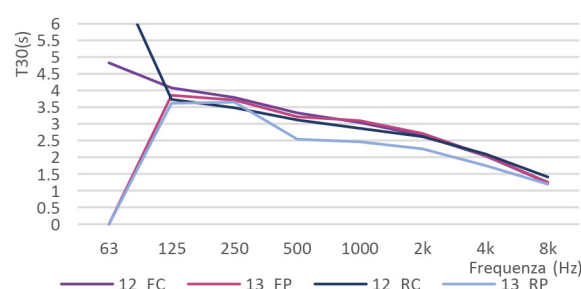


Fig. 4 – Confronto tra metodologie di misurazione in due punti.
F: fonometro; R: registratore; C: sparo; P: pallone
Comparison between measurement methodologies in 2 points.
F: sound level mete; R: recorder; C: gun shot; P: balloon

Al fine della caratterizzazione dell'ambiente e della misurazione dei parametri relativi alla riverberazione, sono stati considerati i parametri misurati utilizzando come strumento il fonometro e come sorgente lo sparo della pistola a salve.

3.2 | Caratterizzazione acustica

L'analisi evidenzia come i differenti ambienti della chiesa sono fortemente influenzati tra di loro a livello acustico, seppur funzionalmente e architettonicamente indipendenti. È possibile notare come le cappelle e il coro retrostanti la parte dell'orchestra siano accoppiati con l'ambiente principale della chiesa. Questo crea forti interferenze tra l'ambiente principale e gli ambienti retrostanti, come evidenziato dal grafico (Fig. 5). Il decadimento nella chiesa è descritto da una retta a pendenza costante, mentre i decadimenti nella cappella laterale e nel coro sono caratterizzati da una doppia pendenza: il primo tratto con una maggiore pendenza rappresenta il decadimento proprio del singolo ambiente retrostante, meno riverberante della chiesa; nel secondo tratto la pendenza è invece minore e risulta parallela al decadimento dell'ambiente principale. Questo dimostra che, nella seconda parte, la coda di riverbero che si crea nell'ambiente principale sovrasta il decadimento proprio dell'ambiente.

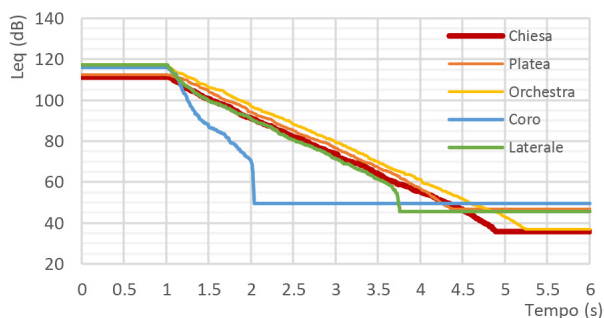


Fig. 5 – Decadimento sonoro delle singole zone
Sound decay of individual zones

L'interazione tra gli ambienti retrostanti e l'ambiente principale della chiesa si manifesta anche nella zona dell'orchestra, interposta tra la navata e le cappelle. In particolare questo si nota nell'effetto delle mancate riflessioni orizzontali che inizialmente si disperdono negli ambienti retrostanti, come evidenziato dalla differenza tra EDT e T30.

Il volume principale della chiesa, che costituisce la vera e propria sala concerti, è stato analizzato nel complesso e nelle due parti funzionali che lo compongono: la platea (navata) e l'orchestra (presbiterio). In generale l'ambiente risulta riverberante e caldo: il T30 è maggiore rispetto ai livelli ideali (1.40 s-2.30 s) con BR positivo, quindi l'ambiente è più riverberante alle basse frequenze. Il suono risulta nitido, ad eccezione delle basse frequenze, mentre l'intensità sonora percepita è lievemente inferiore ai livelli ottimali (9-13), dovuta alla dispersione del suono nel grande volume, essendo l'altezza non proporzionata alla superficie. Analizzando le riflessioni, il T30 risulta costante e uniforme, sia nella zona della platea che in quella dell'orchestra, in quanto il grande volume della sala principale permette di diffondere in maniera omogenea il suono e le riverberazioni. T30 a 500 Hz è pari a 3.20 s mentre a 125 Hz raggiunge i 3.95 s (Fig. 6a). Invece, come immaginabile, dall'analisi dell'EDT questo non risulta omogeneo nella platea, aumentando proporzionalmente all'aumentare della distanza dalla sorgente; ciò è comprensibile perché le riflessioni sono più concentrate nel tempo quando la distanza dalla sorgente è maggiore, oltre al fatto che la diffusione del suono nella platea è ostacolata dal ribassamento della copertura (Fig. 3) che riflette il suono verso la sorgente. Anche nella zona dell'orchestra, l'EDT risulta non uniforme, a causa della vicinanza con le superfici riflettenti e la concentrazione delle riflessioni in prossimità dell'arco d'ingresso alla cappella centrale (Fig. 6b).

Analizzando la chiarezza C80, la platea presenta una sua distribuzione progressiva al variare della distanza dalla sorgente. In particolare, nella parte centrale della chiesa (quella con altezza maggiore), la chiarezza risulta omogeneamente distribuita con un valore di poco positivo, mentre nella parte della chiesa prossima alla facciata la distribuzione non è omogenea ed emergono valori inferiori. Questo è causato dal ritardo con cui le riflessioni raggiungono tale zona, per la distanza dalla sorgente e per il sopra accennato ostacolo costituito dal ribassamento del soffitto. Alle basse frequen-

ze, che portano una maggior energia sonora delle riflessioni nell'ambiente, si nota un peggioramento della chiarezza dovuto al corrispondente minor assorbimento delle superfici. Nella zona dell'orchestra, C80 è fortemente influenzata dalla vicinanza del ricevitore alla sorgente e alle superfici riflettenti, per questo si creano dei picchi anomali (Fig. 6c).

Anche G è fortemente influenzato dalla posizione della sorgente e del ricevitore, evidenziando una progressiva diminuzione con l'aumentare della distanza reciproca. G non ha un andamento costante al variare delle frequenze, in particolare le basse frequenze risultano percepite più forti rispetto alle medio-alte frequenze, con una differenza di 3 dB tra la banda di frequenza centrata a 125 Hz e quella centrata a 2 kHz, in quanto l'assorbimento delle basse frequenze è inferiore rispetto a quelle medio-alte (Fig. 6d).

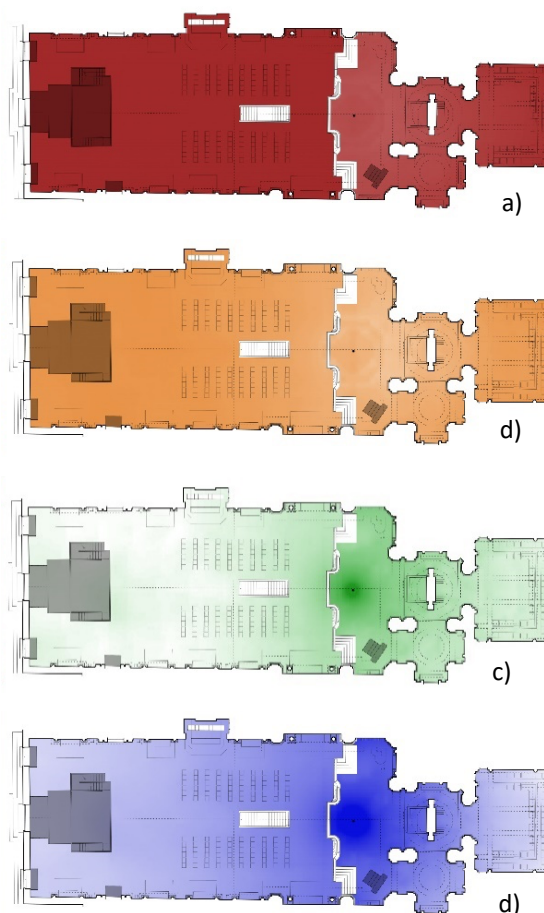


Fig. 6 – Mappatura dei parametri acustici dello stato attuale a 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)
Mapping of the acoustic parameters of the current state at 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)

4 | Progetto

4.1 | Obiettivi progettuali

La richiesta di miglioramento dell'acustica della chiesa nasce dall'esigenza dell'Orchestra da Camera Fiorentina. Il direttore Maestro Giuseppe Lanzetta sostiene che nella chiesa si sente

bene durante i concerti, anche se l'acustica è *abbondante*. Analizzando nello specifico le varie sezioni dell'orchestra, ha sottolineato che sia gli archi che il pianoforte non vengono penalizzati dall'acustica della chiesa, anzi questa migliora la loro percezione. Al contrario, gli ottoni e i timpani vengono penalizzati dall'eccesso di riverbero dell'ambiente facendo impastare i suoni e non rendendoli ben comprensibili, mentre i flauti e gli oboi non subiscono molte alterazioni e il loro suono rimane pulito. La voce del coro, che durante alcuni concerti accompagna l'orchestra, viene invece penalizzata in quanto non ha abbastanza potenza da raggiungere in maniera omogenea tutta la platea.

Le valutazioni soggettive del Maestro Lanzetta sono state confermate dall'analisi acustica dello stato attuale. L'ambiente presenta un tempo di riverbero superiore rispetto a quello ottimale indicato dalla letteratura [4]. Analizzando lo spettro si nota che alle basse frequenze il tempo di riverbero aumenta causando una minor chiarezza dei bassi nella platea. Le medie e alte frequenze risultano, al contrario, chiare per il pubblico [6]. La percezione dell'intensità del suono è inferiore rispetto ai valori ottimali per tutte le frequenze, in quanto esso si disperde liberamente nel grande volume e non è indirizzato verso la platea. L'intensità sonora percepita delle medio-alte frequenze è inferiore rispetto alle basse perché le prime sono assorbite dalle superfici dell'ambiente e dall'aria presente nel volume, mentre le seconde sono persistenti e difficilmente assorbite, visto la presenza di molte superfici riflettenti [2].

Questi difetti sono generalizzati nella platea, mentre la zona dell'orchestra presenta alcune riflessioni che disturbano e influenzano negativamente l'ascolto reciproco dei musicisti durante l'esecuzione. Queste riflessioni sono causate dalla conformazione della zona del presbiterio dove normalmente si colloca l'orchestra. In particolare, gli effetti negativi delle riflessioni sono causati dalle superfici riflettenti non omogenee vicine ai musicisti, dal grande volume sopra l'orchestra e dalla presenza del ribassamento nel tetto della chiesa che riflette il suono non verso la platea ma verso l'orchestra, oltre che dall'influenza degli ambienti retrostanti e dalla presenza dell'arco di accesso ad essi che focalizza le riflessioni sull'orchestra. I tre obiettivi del progetto sono:

- proteggere l'orchestra dai disturbi ed interferenze provenienti in particolare dagli ambienti retrostanti, parzialmente mitigati dalla presenza dell'altare del Giambologna;
- migliorare la diffusione del suono nella platea, evitando la dispersione nell'enorme volume;
- ridurre il riverbero in eccesso, in particolare quello relativo alle basse frequenze.

Per la valutazione del progetto di miglioramento acustico, gli obiettivi sono stati tradotti nei parametri oggettivi di riferimento (Tab. 1).

Nello specifico, si sono valutate le possibilità di proteggere l'orchestra attraverso sia la modifica della geometria dello spazio fisico in cui essa è collocata, privilegiando il suo-

no diretto, sia attraverso la modifica dei parametri acustici, cercando di ottenere un aumento di C80 e G e una diminuzione del tempo di riverbero. Il miglioramento della diffusione sonora in platea è stato analizzato attraverso la verifica dell'omogeneizzazione dei parametri e all'aumento di C80 e G. La riduzione del riverbero è stata analizzata attraverso la diminuzione del T30, prestando particolare attenzione alle basse frequenze attraverso analisi del BR.

Tab. 1 – Parametri di riferimento, 500 Hz
Reference parameters, 500 Hz

Parametro	Valore	Ob.1	Ob.2	Ob.3	
T30	1.40 – 2.30	X		X	[4]
EDT	1.60 – 1.80	X		X	[2]
C80	-2 – +2	X	X		[2]
G	9 – 13	X	X		[2]
BR	1.10 – 1.25			X	[6]

Il progetto è stato analizzato non solo dal punto di vista del miglioramento acustico, ma anche da quello estetico e architettonico, considerato che l'intervento si inserisce in un complesso apparato monumentale, frutto dello sviluppo della fabbrica in diversi periodi storici. Per questo è importante che l'intervento sia congruo con il contesto, pur mostrandosi come contemporaneo senza confondersi con le decorazioni della chiesa, evitando così la creazione di falsi storici. È stata inoltre valutata la reversibilità dell'intervento, al fine di garantire la sua completa rimozione e la possibilità di ripristino della chiesa in ogni momento.

L'analisi acustica e architettonica di ciascuna soluzione è stata schematizzata graficamente attraverso un grafico a radar, per facilitare il confronto tra le diverse soluzioni (Fig. 7).



Fig. 7 – Esempio di grafico di analisi delle singole soluzioni
Example of analysis graph of individual solutions

4.2 | Valutazione dei singoli interventi

Per valutare quale sia il miglior intervento applicabile per la correzione acustica della chiesa è stato realizzato un abaco delle possibili soluzioni. Quelle analizzate sono otto e si racchiudono in due tipologie: soluzioni studiate come schermatura verso gli ambienti circostanti e soluzioni che modificano il soffitto per migliorare la diffusione del suono. Tali soluzioni

sono state implementate all'interno del modello acustico di Ramsete®, che ha permesso di valutarne l'efficacia.

Schermatura dalle zone circostanti l'orchestra

La prima tipologia di interventi è indirizzata alla schermatura della zona dell'orchestra dalle interferenze e riflessioni degli ambienti retrostanti. Questi interventi hanno lo scopo di migliorare la percezione nell'area dell'orchestra, senza voler modificare la percezione sonora del pubblico. Una criticità di queste soluzioni è quella di intervenire nella zona presbiteriale dove si concentra l'apparato decorativo seicentesco, mutando la percezione visiva e architettonica dell'ambiente durante le esecuzioni dei concerti.

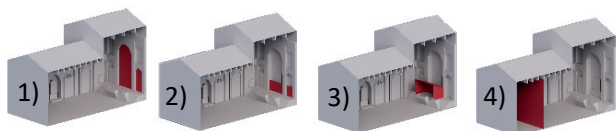


Fig. 8 – Schemi relativi agli interventi relativi alla schermatura delle zone retrostanti

Diagrams relating to shielding interventions

Gli interventi analizzati sono:

1. chiusura totale degli archi;
2. chiusura parziale degli archi;
3. posizionamento di un elemento di protezione attorno l'orchestra (guscio o *shell*);
4. posizionamento di una schermatura assorbente sul fondo della chiesa.

La chiusura completa degli archi di accesso agli ambienti retrostanti l'orchestra (Fig. 8.1) è l'intervento più diretto per ridurre ed eliminare interferenza delle cappelle e del coro [7]. Esso migliora l'ascolto nella zona dell'orchestra, omogeneizzando C80 e G, eliminando i picchi, senza però influire su T30, mentre non modifica la percezione da parte del pubblico; nessun parametro acustico della chiesa subisce variazioni significative. La chiusura degli archi impatta però fortemente a livello visivo; per questo vengono valutate tre differenti tipologie di materiali: tendaggi, pareti piene e vetro che, seppur con caratteristiche acustiche differenti, riescono a conseguire i medesimi risultati di miglioramento acustico, permettendo una differente percezione dell'ambiente e dell'intervento.

La chiusura parziale degli archi (Fig. 8.2), a differenza della chiusura completa, vuole permettere comunque la visione della cupola della cappella centrale durante l'esecuzione. Questa soluzione riesce a garantire i medesimi valori acustici della precedente. Risulta meno impattante a livello visivo, ma comunque fortemente impattante a livello architettonico. Anche per questa soluzione sono stati valutati differenti materiali (tendaggi, pareti piene e vetro) che risultano equivalenti dal punto di vista acustico, mentre il loro impatto è paragonabile a quello della chiusura completa degli archi.

Il posizionamento di un elemento di protezione posto attorno all'orchestra (Fig. 8.3) abbina la protezione di questa dagli ambienti retrostanti con la possibilità di indirizzare il suono direttamente verso la platea, creando una sorta di "gu-

scio". Questo elemento è spesso montato all'interno della torre scenica nei teatri [2, 8]. L'inserimento di un guscio risulta indipendente dall'apparato decorativo fornendo un alto grado di reversibilità. L'intervento produce un lieve miglioramento del T30 nella chiesa, mentre l'EDT subisce una consistente diminuzione, dovuta al miglior direzionamento del suono verso la platea. Di conseguenza C80 e G aumentano. Questi miglioramenti sono enfatizzati nella zona dell'orchestra perché il suono vi viene circoscritto dall'involucro, lasciando libertà di propagazione dell'onda sonora solo in direzione della platea.

Il posizionamento di una schermatura assorbente sul fondo della platea (Fig. 8.4), lato facciata, serve a ridurre le riflessioni, specialmente dei bassi, e a diminuire il volume della platea. L'utilizzo a tale scopo di un tendaggio permette la facile rimozione dello schermo quando la chiesa non è utilizzata come sala da concerto e non produce alcun impatto visivo sull'ascoltatore durante le esecuzioni. Questo intervento, però, non porta un significativo miglioramento all'acustica dell'ambiente.

4.2.1 | Modifica del soffitto per migliorare la diffusione

La seconda tipologia di interventi è indirizzata a modificare le riflessioni, in particolare a correggere e uniformare quelle provenienti dal soffitto. Queste soluzioni risultano invasive a livello architettonico ma preservano la visione e l'aspetto monumentale dell'apparato decorativo presbiteriale. Le soluzioni analizzate sono:

5. inserimento di materiale fonoassorbente nella copertura;
6. posizionamento di un controsoffitto piano;
7. posizionamento di un controsoffitto sagomato;
8. posizionamento di pannelli appesi (*clouds*).

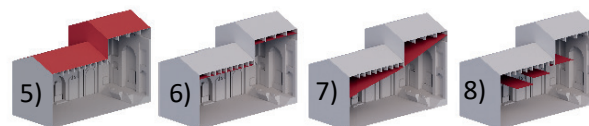


Fig. 9 – Schemi relativi agli interventi per la modifica del soffitto

Diagrams relating to interventions for modifying the ceiling

L'inserimento di materiale fonoassorbente nella copertura (Fig. 9.5) è l'intervento che modifica meno l'aspetto visivo della chiesa, in quanto non modifica il volume ma solamente la finitura del soffitto; il suo scopo è diminuire le riflessioni, soprattutto nella parte posta sopra l'orchestra. L'intervento produce effetti generalizzati sull'intero ambiente della chiesa: T30 e EDT diminuiscono, mentre C80 aumenta. G invece subisce effetti differenti: nella platea diminuisce, mentre nella zona dell'orchestra aumenta. Per mitigare l'impatto visivo e analizzare il comportamento delle singole parti della copertura sono state analizzate anche diverse soluzioni di posizionamento del materiale assorbente. Posizionando il materiale solo nelle falde inclinate, e non nella parete verticale di collegamento tra le due quote del tetto, vengono prodotti i medesimi risultati che con il soffitto completamente rivestito. Posizionando il materiale

solo nella parete verticale si ha, invece, un effetto acustico meno marcato, ad eccezione di G nella zona dell'orchestra, che aumenta dimostrando che la percezione dell'orchestra è influenzata dal suono riflesso da quella parete.

Il posizionamento di un controsoffitto piano (Fig. 9.6) posto all'intradosso delle capriate è un intervento che, attraverso la modifica del volume e l'utilizzo di materiali idonei, ha lo scopo di modificare l'andamento dell'onda sonora e le sue riflessioni, migliorando così la diffusione del suono in tutto l'ambiente; inoltre corregge la tendenza a focalizzare il suono nella parte centrale della chiesa, dovuta alla forma del tetto a due falde che è assimilabile a un piano concavo [9]. Analizzando i parametri acustici si nota, però, che non si genera nessun miglioramento sostanziale nell'acustica dell'ambiente. Al fine di mitigare l'impatto architettonico sono state valutate diverse soluzioni di materiali per il controsoffitto, come tendaggi, pannellature in legno, vetrate o materiale assorbente, le cui caratteristiche influiscono anche sull'acustica.

Un controsoffitto più articolato rispetto alla soluzione precedente (Fig. 9.7) fa sì che, anche visivamente, l'ambiente della chiesa non risulti come la somma di due volumi di altezze differenti, bensì come volume unico. L'inclinazione del nuovo soffitto direziona meglio il suono verso la platea ed elimina le riflessioni provenienti dalla parete verticale. Anche questo intervento risulta, però, molto invasivo rispetto all'apparato architettonico della chiesa, alterando notevolmente la percezione attuale della chiesa. Per questa soluzione sono stati analizzati due differenti materiali: pannelli fonoassorbenti e pannelli riflettenti in legno. L'utilizzo di un materiale fonoassorbente produce la brusca diminuzione dei tempi di riverbero e di conseguenza l'aumento della chiarezza, dovuta alla riduzione delle riflessioni provenienti dal soffitto e dalla loro minor potenza in quanto assorbite dal nuovo elemento. Il nuovo controsoffitto ligneo, invece, produce una piccola diminuzione dei tempi di riverbero generalizzata nella chiesa, dovuta alla miglior distribuzione delle riflessioni; questo migliora anche la percezione, misurabile attraverso un lieve incremento della robustezza.

Il posizionamento di pannelli sospesi in legno, denominati *clouds* (Fig. 9.8) riprende la soluzione alla base di molte delle moderne sale a geometria variabile [6] e ha lo scopo di direzionare meglio le riflessioni del soffitto. I pannelli modificano sicuramente la visione dell'ambiente, ma sono percepibili come elemento moderno aggiunto, senza entrare in contrasto con gli elementi architettonici e decorativi. La simulazione mostra che T30 e EDT diminuisce, mentre sia G che C80 aumentano, in quanto il percorso l'onda sonora riflette sui pannelli appesi e non si disperde nell'enorme volume della chiesa.

5 | Discussione

5.1 | Definizione della strategia progettuale

L'analisi delle varie soluzioni mostra la difficoltà di influenzare e migliorare il tempo di riverbero della platea, portandolo a valori ottimali, senza aggiungere molte superfici as-

sorbenti, impattanti sotto l'aspetto architettonico e visivo. Un compromesso è dato dall'inserimento puntuale delle superfici assorbenti sulla parete verticale di collegamento tra le due coperture o dai tendaggi posti all'ingresso della chiesa o dall'aggiunta di materiale fonoassorbente nelle soluzioni che come scopo principale hanno quello di direzionare il suono verso gli uditori (come i *clouds* o il guscio sull'orchestra).

L'analisi del BR evidenzia una difficoltà nel migliorare questo parametro: solo l'inserimento di *clouds* o di un guscio sull'orchestra garantisce un miglioramento della percezione delle basse frequenze.

Nello stato attuale C80 risulta accettabile. Le soluzioni che hanno lo scopo di direzionare meglio il suono ne producono un importante miglioramento, facendo sì che il suono diretto e delle prime riflessioni sia più intenso delle riflessioni successive. Anche le soluzioni che modificano l'assorbimento dell'ambiente sono migliorative, permettendo un bilanciamento tra suono iniziale e successivo. Come già evidenziato nella descrizione dello stato attuale, nella zona dell'orchestra C80 è molto alto, in quanto il suono diretto e delle prime riflessioni è predominante, vista la vicinanza tra sorgente e ricevitore.

In platea G aumenta rispetto allo stato attuale, approssimando i valori ottimali, in tutte le soluzioni che migliorano le riflessioni. Risultano invece inefficaci, o leggermente peggiorative, al riguardo le soluzioni con inserimento di materiale assorbente che attenua l'energia sonora delle riflessioni.

La scelta delle soluzioni di progetto ha tenuto conto, oltre che delle suddette valutazioni prettamente quantitative, anche della segnalata esigenza di proteggere l'orchestra dalle interferenze prodotte dai ritorni di suono dagli ambienti retrostanti. Inoltre si è cercato di far sì che l'intervento risulti poco invasivo e facilmente rimovibile, permettendo la comprensione totale dell'apparato decorativo della chiesa, mostrandosi come intervento moderno nel rispetto del pregio architettonico dell'edificio.

5.2 | Progetto di miglioramento

Il progetto di miglioramento acustico consiste nell'unione di tre soluzioni (Fig. 10).

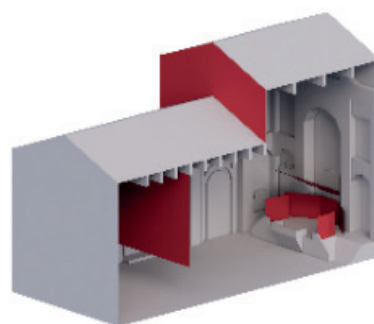


Fig. 10 – Modello 3d del progetto
3D model of the project

L'intervento principale è dato dall'inserimento di un elemento a protezione dell'orchestra, il guscio. Nello specifico, esso viene scomposto in due parti: gli elementi verticali e la copertura; questo serve per alleggerire l'elemento, che non appare come una "camera acustica" posizionata nel presbiterio, ma come un insieme di frammenti del guscio che si inseriscono in quello che è il complesso quadro dell'apparato monumentale, mostrandosi come un elemento autonomo. Gli elementi verticali sono disposti attorno all'orchestra, ma, come succede nelle decorazioni, non seguono una linea curva, bensì una spezzata, come il profilo degli archi. La funzione è quella di proteggere e schermare l'orchestra dagli ambienti retrostanti, circoscrivendo le riflessioni all'orchestra. Questi elementi sono formati da tre moduli di legno autoportanti che si assemblano verticalmente. Due di questi pannelli rigidi hanno la funzione di riflettere il suono, mentre quello centrale è un pannello sottile con intercapedine che sfrutta il principio della risonanza di membrana per assorbire le basse frequenze, in particolare quelle dei timpani e degli ottoni [10].

L'elemento di copertura dell'orchestra ha lo scopo di dirigere il suono verso la platea evitandone la dispersione negli ambienti retrostanti e nel grande volume della chiesa. La copertura è formata da pannelli rigidi sospesi che si ancorano a una struttura metallica sorretta, attraverso tiranti, da pali telescopici. Questo elemento permette la visione della cupola della cappella centrale retrostante, ma impedisce la visione completa dell'altare del Giambologna durante le esecuzioni concertistiche. Grazie alla sua modularità e alla sua divisione in elementi può essere installato solo quando è necessario, e smontato e tenuto a deposito negli ambienti annessi alla chiesa nel restante periodo.

Gli altri due interventi previsti hanno lo scopo di migliorare la distribuzione del suono; non entrano in relazione con l'apparato decorativo del presbiterio. Il primo consiste nell'applicazione di pannelli fonoassorbenti alla parete di collegamento tra le due differenti quote della copertura, con lo scopo di limitare le riflessioni dei suoni che riescono a raggiungere questa superficie. Sicuramente questo intervento non è di agevole rimozione, ma riguarda un punto nascosto della chiesa, e risulta quindi poco impattante a livello visivo.

Il secondo intervento prevede l'inserimento di una tenda mobile nella zona dell'ingresso della chiesa con lo scopo di diminuire le riflessioni che provengono dal fondo della chiesa, oltre a dividere e diminuire il volume dell'ambiente. La tenda è sorretta da rulli posti in prossimità della catena della capriata e si ferma a 2 m da terra così da non nascondere la visuale dell'apparato decorativo presbiteriale quando si entra nella chiesa e da non impedire il movimento all'interno di essa, lasciando libere le vie di fuga in caso di emergenza.

5.3 | Analisi acustica del progetto

L'analisi dei parametri acustici della chiesa risultanti dal progetto, mostra come gli obiettivi siano raggiunti (Tab. 2).

Tab. 2 – Parametri di progetto, 500 Hz
Project parameters, 500 Hz

Parametro	Platea	Orchestra	Rif.
T30	2.19 s	1.99 s	1.40 – 2.30
EDT	1.65 s	0.83 s	1.60 – 1.80
C80	2.60	9.77	-2 – +2
G	8.77	15.54	9 – 13
BR	1.33	1.33	1.10 – 1.25

La necessità di proteggere l'orchestra dai disturbi degli ambienti retrostanti è risolta grazie all'inserimento del guscio frammentato che direziona il suono e impedisce riflessioni dalle cappelle e dal coro. Il confinamento del suono attorno all'orchestra ne permette l'omogenea diffusione fra le diverse sezioni (Fig. 11).

Il miglioramento della diffusione del suono nella platea è ottenuto sia mediante la configurazione del guscio che vi indirizza il suono, sia mediante l'inserimento di materiale fonoassorbente che assorbe le riflessioni residue che si disperdono. Questo miglioramento è descritto dall'aumento di C80 e G che evidenziano l'aumento di intensità sonora delle prime riflessioni.

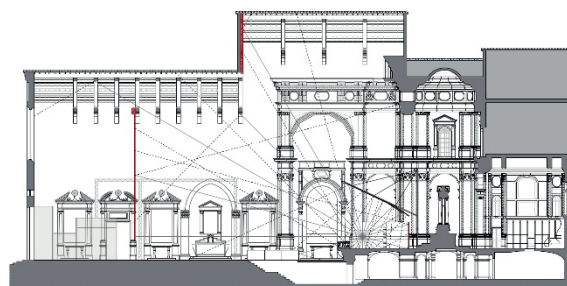


Fig. 11 – Analisi geometrica delle riflessioni
Geometric analysis of reflections

Il riverbero risulta diminuito grazie alla concentrazione delle prime riflessioni sulla platea, all'inserimento del materiale fonoassorbente in copertura e alla tenda all'ingresso, che asciugano l'ambiente assorbendo principalmente la coda sonora. Il riverbero delle basse frequenze è diminuito come mostrato dall'analisi di G, pur mantenendo costante BR.

Dall'analisi delle riflessioni si nota come i T30 risulta fortemente diminuiti dopo l'intervento rientrando nei parametri di riferimento (Fig. 12a).

Nella platea T30 rimane omogeneo su tutta la superficie, mentre EDT, seppur influenzato dalla distanza della sorgente, risulta maggiormente omogeneo rispetto allo stato iniziale grazie alla concentrazione delle prime riflessioni sulla platea. Nell'orchestra il T30 risulta inferiore rispetto alla platea (Fig. 14a). Questa differenza risulta accentuata analizzando EDT, perché le riflessioni vengono confinate attorno all'orchestra dal guscio. Tramite l'inserimento del guscio la distribuzione delle riflessioni risulta costante in tutta l'orchestra, al contrario della distribuzione delle riflessioni dello stato attuale che sono focalizzate sotto l'arco della cappella principale (Fig. 14b).

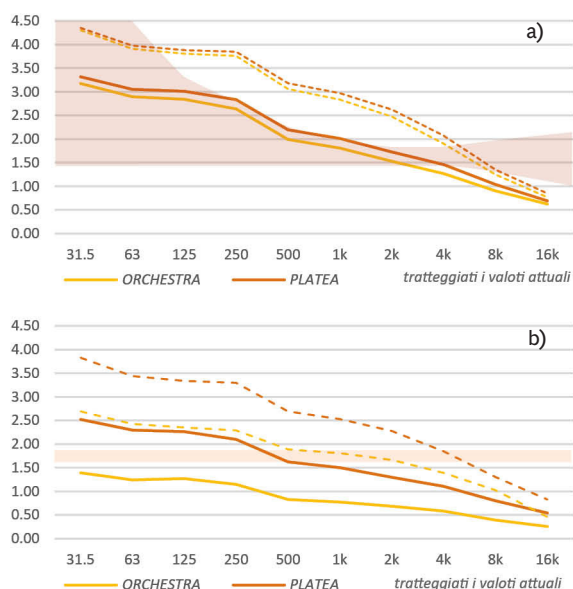


Fig. 12 – Grafico per banda di frequenza. T30 (a), EDT (b)
Graph by frequency band. T30 (a), EDT (b)

L'analisi della chiarezza mostra come C80 aumenti in tutto l'ambiente; questo è dovuto alla maggiore intensità delle prime riflessioni (Fig. 13a). Nello specifico, C80 nella zona della platea cresce superando il valore ottimale di riferimento pari a 2 dB. Il risultato è accettabile perché rientra nell'intervallo di valori previsti dalla norma UNI EN ISO 3382.

Nella platea l'andamento di C80 è costante e diminuisce progressivamente con l'aumento della distanza dalla sorgente; l'intensità sonora delle prime riflessioni diminuisce con l'aumentare della distanza del ricevitore dalla sorgente, mentre l'intensità della coda sonora rimane costante in tutto l'ambiente. C80 nell'orchestra, per quanto influenzata dalla vicinanza alla sorgente sonora, risulta omogeneamente distribuita (Fig. 14c).

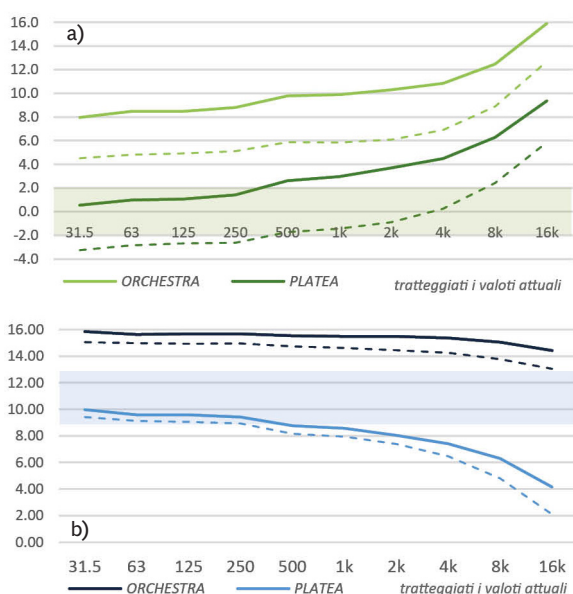


Fig. 13 – Grafico per banda di frequenza. C80 (a), G (b)
Graph by frequency band. C80 (a), G (b)

L'intensità sonora percepita, analizzata attraverso G, migliora grazie agli interventi di progetto che avvicinano il parametro ai valori ottimali. G è per sua natura condizionata dalla vicinanza tra ricevitore e sorgente. Nella platea, l'andamento risulta omogeneamente decrescente con l'aumento della distanza dalla sorgente (Fig. 14d). La differenza tra G filtrata alle diverse frequenze diminuisce rispetto a quanto misurato nello stato attuale. G relativa alle basse frequenze risulta maggiore di solo 1,50 dB rispetto a G alle medio-alte frequenze. Questo conferma il raggiungimento dell'obiettivo di percepire meno forti e persistenti le basse frequenze. G alle basse frequenze risulta costante rispetto allo stato attuale, mentre G alle alte frequenze aumenta allo stato di progetto. Questo significa che l'intensità sonora percepita appare più uniforme al variare delle frequenze, seppur il BR risulti corrispondente a quello analizzato allo stato attuale (Fig. 13b).

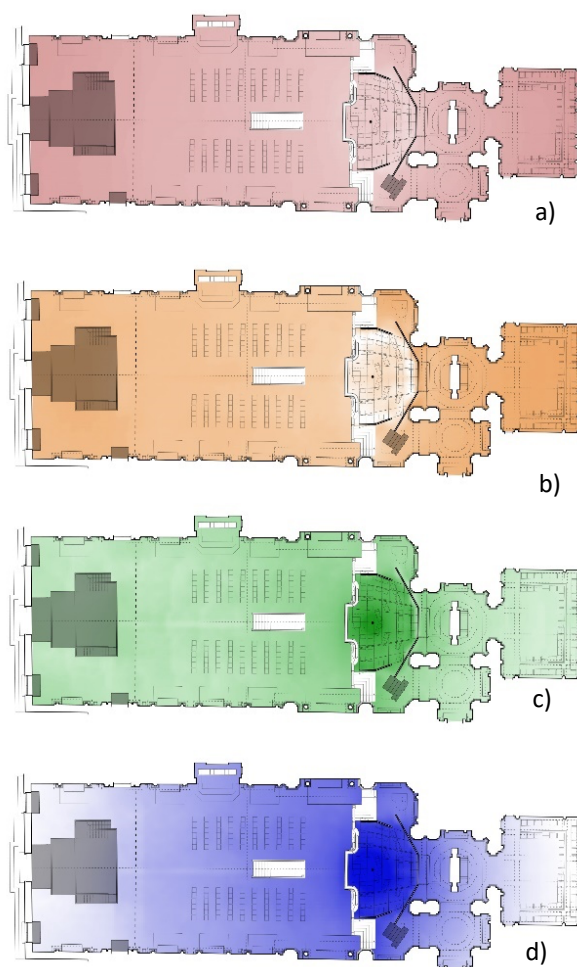


Fig. 14 – Mappatura dei parametri acustici del progetto a 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)
Mapping of the acoustic parameters of the project at 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)

6 | Conclusioni

Il progetto di riqualificazione acustica della chiesa di Santo Stefano al Ponte è finalizzato al miglioramento della diffusione del suono nella platea, alla riduzione dell'eccessivo riverbe-

ro presente nella chiesa, soprattutto alle basse frequenze, e alla protezione dell'orchestra dalle interferenze delle cappelle e del coro retrostanti, in accordo alle esigenze manifestate dal Maestro Lanzetta.

Il miglioramento è stato valutato attraverso l'analisi dei parametri oggettivi che descrivono il comportamento acustico dell'ambiente (T30, EDT, C80 e G), ricorrendo a misurazioni strumentali in loco e a simulazioni acustiche mediante software. Dall'analisi risulta come il progetto raggiunga gli obiettivi, conseguendo i valori ottimali dei parametri acustici per una sala da concerto.

La valutazione degli interventi progettuali non si è limitata all'analisi del comportamento acustico, ma ha preso in considerazione anche le interazioni tra le proposte progettuali e l'ambiente monumentale della chiesa, di enorme valore storico-artistico. Inoltre, le scelte sono state indirizzate verso soluzioni temporanee e facilmente removibili: la tenda posta all'ingresso della chiesa può essere raccolta all'altezza della catena della capriata, mentre il guscio modulare è scomponibile in elementi che possono essere conservati negli ambienti di servizio della chiesa, quando questa non è utilizzata come sala da concerto.

Conclusions

The acoustic enhancement project for the Church of Santo Stefano al Ponte aims to optimize sound diffusion in the audience area by mitigating excessive reverberation, especially at low frequencies, and to shield the orchestra from interferences originating from the chapels and the rear choir, as highlighted by Maestro Lanzetta.

The intervention's effectiveness is evaluated through the analysis of objective acoustic parameters (T30, EDT, C80, and G) by using virtual simulations. The results indicate that the project successfully meets its objectives and achieves optimal acoustic conditions for a concert hall.

The evaluation of the proposed interventions went beyond acoustic performance analysis, it also considered the interaction between the design solutions and the church's monumental setting, which is of great historical and artistic significance. Furthermore, the design choices prioritized temporary and easily removable solutions: the curtain at the church entrance can be retracted to the level of the truss chain, while the modular shell is composed of separable components, which can be stored in the church's service areas when not in use for concerts.



Fig. 15 – Foto-inserimento del progetto
Photoinsertion of the project

7 | Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare il Maestro Giuseppe Lanzetta, direttore dell'Orchestra da Camera Fiorentina.

La base del rilievo architettonico è dell'Arch. Antonio Fara.

Bibliografia

- [1] Spagnesi A., Pacciani S. (a cura di), *Santo Stefano al Ponte Vecchio*, Firenze, Edizioni della Meridiana, 1999.
- [2] Beranek L., *Concert Halls and Opera Houses: music, acoustics and architecture*, New York, Springer, 2010.
- [3] UNI EN ISO 3382-1, *Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 1: Sale da spettacolo*, Milano, UNI, 2009.
- [4] Spagnolo R. (a cura di), *Manuale di acustica applicata*, Milano, Città Studi Edizioni, 2008.
- [5] Galaverna P., Giabbani M., Farina A., Truffelli G., *RAMSETE Software di previsione acustica – Manuale dell'utente e Manuale Teorico*, GENESIS Software e Consulenza Acustiche, 2002.
- [6] Cingolani S., Spagnolo R. (a cura di), *Acustica musicale e architettonica*, Milano, Città Studi, 2008.
- [7] Brasolin R., Ruggeri P., Peron F., Cattaneo P., Britton C., *Analisi e progettazione acustica per il riuso di una chiesa medioevale come sala da registrazione*, Atti del 43° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, Alghero, 2016.
- [8] Farina A., Fausti P., Pompoli R., *The acoustical shell of the "nuovo teatro comunale" in Cagliari*, Atti del International IOA Conference "Opera and Concert Hall Acoustics", London Gatwick, 1995.
- [9] Barron M., *Auditorium acoustics and architectural design*, London, E & FN Spon, 1993.
- [10] Meyer J., *Acoustics and the Performance of Music*, New York, Springer, 2009.

Il rapporto tra i suoni e la città: valutazione della qualità sonora in ambito urbano

Giulia Valentini^{a*} | Samantha Di Loreto^a | Massimo Angrilli^b | Sergio Montelpare^a

^a Dipartimento di Ingegneria e Geologia,
Università degli Studi G. D'Annunzio,
Viale Pindaro, 42, 65127 Pescara

^b Dipartimento di Architettura,
Università degli Studi G. D'Annunzio,
Viale Pindaro, 42, 65127 Pescara

* Autore di riferimento:
giulia.valentini001@studenti.unich.it

Ricevuto: 20/2/2025

Accettato: 29/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19446

ISSNe: 2385-2615

Questo studio analizza il paesaggio sonoro della zona universitaria di Pescara, un'area urbana caratterizzata da un'elevata densità di attività e servizi. La ricerca combina analisi quantitative dell'ambiente acustico con valutazioni qualitative della percezione sonora, focalizzandosi su quattro aree strategiche: il polo universitario di Viale Pindaro, il corridoio di Via Falcone e Borsellino, Piazza Ettore Troilo e il parco ex Caserma Di Cocco. Attraverso misurazioni acustiche e indagini sulla percezione degli utenti, lo studio ha evidenziato la complessità del paesaggio sonoro urbano e la sua influenza sulla qualità della vita. In particolare, è stato approfondito il progetto di riqualificazione del corridoio verde che collega il tribunale all'università, analizzandone l'impatto sul comfort acustico. I risultati suggeriscono che l'integrazione della pianificazione del soundscape nella progettazione urbana può migliorare significativamente l'esperienza degli spazi pubblici, fornendo indicazioni pratiche per future strategie di sviluppo urbano sostenibile.

Parole chiave: paesaggio sonoro, ambiente acustico urbano, pianificazione urbana, percezione sonora, qualità acustica, riqualificazione urbana

The relationship between sounds and cities: evaluation of sound quality in the urban environment

This study analyses the soundscape of the university district in Pescara, an urban area characterized by high-density activities and services. The research combines quantitative analysis of the acoustic environment with qualitative assessments of sound perception, focusing on four strategic areas: the Viale Pindaro university campus, the Via Falcone e Borsellino corridor, Piazza Ettore Troilo, and the former Di Cocco Barracks Park. Through acoustic measurements and user perception surveys, the study highlighted the complexity of the urban soundscape and its influence on quality of life. Special attention was given to the redevelopment project of the green corridor connecting the courthouse to the university, analysing its impact on acoustic comfort. The results suggest that integrating soundscape planning into urban design can significantly improve the experience of public spaces, providing practical guidelines for future sustainable urban development strategies.

Keywords: soundscape, urban acoustic environment, urban planning, sound perception, sound quality, urban redevelopment

1 | Introduzione

La consapevolezza e la riflessione sulla pratica dell'ascolto dei suoni che ci circondano costituisce il primo passo per comprendere il nostro legame con l'ambiente circostante [1,2]. Valutare e analizzare un suono ci permette di riflettere sulla sua qualità, valore, scopo e origine, che può essere di natura umana, animale, vegetale, climatica o meccanica [3,4]. In un'epoca in cui siamo immersi in una vasta gamma di suoni artificiali che superano quelli naturali, l'arte di saper ascoltare è diventata più che mai importante poiché i paesaggi sonori del mondo sono in costante mutamento, adattandosi nel corso del tempo ai cambiamenti della società [5].

Bisognerebbe considerare il suono che ci circonda come un'informazione preziosa poiché questi suoni, che comunemente passano inosservati o inascoltati, possono invece contenere aspetti significativi che meritano di essere esplorati e apprezzati [6].

La ricerca di armonia e benessere, attraverso i sensi e la percezione, porta ad esplorare e riconoscere l'ambiente sonoro che meglio soddisfa questi requisiti [7,8]. Spesso, però, non siamo pienamente consapevoli del ruolo fondamentale che l'orecchio e l'ascolto svolgono in questo processo [9].

Il termine "Paesaggio Sonoro", tradotto dal neologismo inglese "Soundscape" (composto da "sound", suono, e "landscape", paesaggio), si riferisce all'intero ambiente acustico naturale percepito e vissuto, comprendente i suoni generati dalla natura, dagli animali e dagli esseri umani [10]. Il paesaggio sonoro può essere descritto dunque come la colonna sonora della nostra esistenza, composta sia dai suoni che percepiamo involontariamente sia da quelli che cerchiamo e creiamo consapevolmente [11]. Questi suoni, nel loro incontro, sono in grado di lasciare un'impronta distintiva nell'identità sonora delle persone e delle comunità, diventando parte integrante della nostra memoria sonora [12,13].

Questo concetto, sebbene originario del campo musicale, abbraccia un'ampia gamma di discipline accademiche, tra cui l'acustica e la psicologia poiché è un ambito di studio che richiede una diretta esperienza sensoriale dei suoni e dei rumori circostanti [14]. Il concetto di paesaggio sonoro e le ricerche correlate sono il risultato del lavoro del compositore canadese Raymond Murray Schafer[10], che lo ha teorizzato all'interno del World Soundscape Project da lui fondato nella seconda metà degli anni Sessanta, un'iniziativa di ricerca volta a promuovere una nuova ecologia del suono, sensibile agli emergenti problemi legati all'inquinamento acustico [15,16].

Le ricerche sul paesaggio sonoro, dunque, devono assumere un ruolo centrale nell'interpretazione dei luoghi, focalizzandosi su categorie attraverso le quali comprendere il legame che si sviluppa tra gli esseri umani e gli elementi sonori dell'ambiente [17]. Infatti, negli ultimi anni, si è sempre più compreso l'importanza dei paesaggi sonori nel migliorare la qualità complessiva dell'ambiente, riconosciuto soprattutto nel settore dell'architettura e della pianificazione urbana [18]. L'approccio al paesaggio sonoro, dunque, si concentra sul miglioramento dell'ambiente acustico percepito, riconoscendo l'interconnessione tra gli esseri umani e le varie sorgenti sonore per una valutazione completa della qualità acustica [19].

1.1 | Contributo di questo lavoro

Questo studio si propone di analizzare e valutare il paesaggio sonoro della zona universitaria di Pescara (Italia) attraverso un approccio metodologico integrato, seguendo i principi stabiliti da recenti studi nel campo [20]. La ricerca si articola su tre obiettivi principali:

- Caratterizzare quantitativamente e qualitativamente l'ambiente acustico dell'area universitaria, un distretto urbano ad alta densità di popolazione studentesca, valutando l'interazione tra suoni naturali e artificiali che contribuiscono alla sua identità sonora.
- Investigare la percezione soggettiva del paesaggio sonoro attraverso un'indagine qualitativa strutturata sulla popolazione locale. Questo approccio partecipativo mira a comprendere come gli utenti dell'area percepiscono e interagiscono con l'ambiente acustico.
- Analizzare, come caso studio specifico, l'impatto acustico del progetto di riqualificazione del corridoio verde che connette il tribunale all'università. Questo elemento urbano rappresenta un importante collegamento fisico e simbolico nel tessuto cittadino, la cui valutazione sonora può fornire indicazioni significative per future strategie di pianificazione e rigenerazione urbana.

La ricerca si inserisce nel crescente corpo di studi che evidenziano l'importanza del soundscape nella pianificazione urbana [21], con particolare attenzione alle aree universitarie come spazi di socialità e apprendimento.

I risultati di questa ricerca mirano a fornire indicazioni pratiche per l'implementazione di strategie di gestione

del paesaggio sonoro in contesti universitari urbani, contribuendo al crescente dibattito sulla qualità acustica degli spazi pubblici.

2 | Materiali e metodi

2.1 | Analisi del soundscape urbano

Il presente studio è stato condotto nella città di Pescara, importante centro urbano dell'Abruzzo situato sulla costa adriatica (Fig. 1). La città, che si sviluppa a circa 4 metri sul livello del mare intorno alla foce del fiume Pescara sul terminale della Val Pescara, rappresenta un interessante caso di studio per l'analisi del paesaggio sonoro urbano.

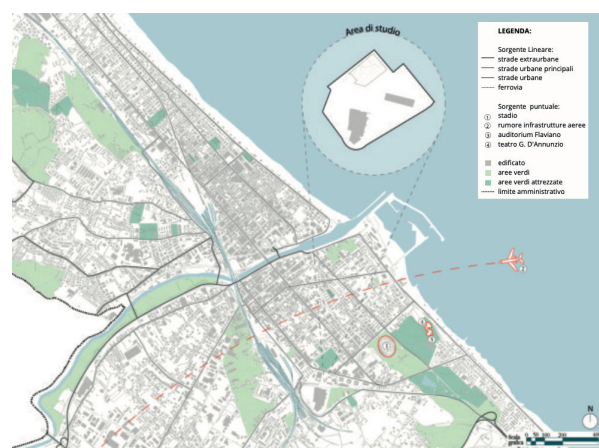


Fig. 1 – Analisi del landscape dell'area di studio
Landscape analysis of the study area

I punti individuati per le misurazioni derivano dall'analisi dei servizi e luoghi di interesse che influenzano e caratterizzano la zona esaminata, prendendo in considerazione le componenti chiave delle persone, dell'ambiente acustico e del contesto circostante. L'analisi dettagliata dei suoni naturali e artificiali presenti ha rivelato un quadro dinamico e affascinante, capace di creare un'atmosfera unica. Tuttavia, è emerso come l'eccesso di rumore possa avere effetti significativi sulla salute e sul benessere degli individui, mettendo in luce la necessità di interventi mirati per migliorare la qualità del paesaggio sonoro urbano.

L'obiettivo è duplice: da un lato, mappare e analizzare le caratteristiche sonore dell'area di studio, dall'altro, suggerire interventi progettuali per migliorare il benessere acustico degli utenti.

2.2 | Selezione del caso di studio

L'area specifica oggetto della ricerca è il distretto universitario, una zona particolarmente dinamica che ospita diverse funzioni urbane strategiche e rappresenta un punto nevralgico per la vita cittadina. La Fig. 2 mostra le aree selezionate per la loro rilevanza all'interno del tessuto urbano e per la presenza di importanti poli attrattivi.

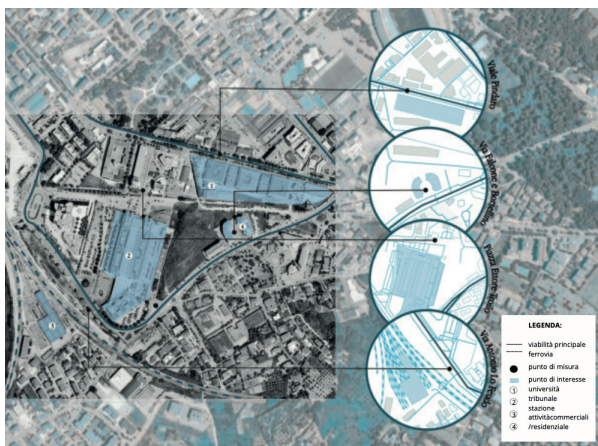


Fig. 2 – Identificazione punti strategici dell'area selezionata
Functional analysis of the area

La prima area si sviluppa lungo Viale Pindaro, dove l'Università costituisce il fulcro principale delle attività. Questa zona è caratterizzata da un ricco tessuto di servizi commerciali e pubblici, tra cui spiccano la Caserma dei Vigili del Fuoco e il Parco ex Caserma Di Cocco. La presenza dell'università genera significativi flussi pedonali e veicolari, che contribuiscono a definire l'identità sonora dell'area.

La seconda area di interesse è rappresentata da Via Falcone e Borsellino, un importante asse urbano che collega diversi poli attrattivi. Questa zona è caratterizzata dalla presenza di istituti scolastici, del Tribunale e della stazione ferroviaria su Via Antonio lo Feudo. La combinazione di queste funzioni genera un intenso movimento di persone e veicoli, creando un ambiente sonoro particolarmente complesso e stratificato.

Piazza Ettore Troilo rappresenta la terza area di studio, configurandosi come un importante punto di aggregazione urbana. La piazza, circondata da uffici e servizi commerciali e pubblici, è animata da un costante flusso di persone grazie alla sua posizione strategica tra l'Università, il Tribunale e la stazione ferroviaria.

2.2.1 | Il progetto del corridoio verde

Il caso studio analizza ulteriormente il progetto del Corridoio Verde di Pescara, un intervento di riqualificazione urbana che collega fisicamente il tribunale con l'università e idealmente estende il legame dell'ateneo con l'intero territorio. Realizzato grazie a una convenzione tra gli enti, il progetto prevede la creazione di spazi verdi e l'implementazione della mobilità sostenibile. Accanto al corridoio, verranno realizzati una pista ciclabile, camminatoi, vialetti, rampe per l'accesso dei disabili, una nuova recinzione, un nuovo sistema di illuminazione e alberature all'interno del campus universitario. L'obiettivo è trasformare la sede di viale Pindaro in un vero e proprio campus. Il progetto si articola attorno a diversi elementi chiave. Particolare attenzione è stata dedicata alla mobilità sostenibile, con la creazione di percorsi pedonali fluidi e accessibili che rispondono alle moderne esigenze di slow mobility urbana. Gli

ingressi principali, posizionati strategicamente a est e ovest del campus, sono stati ripensati come piazze dinamiche che favoriscono l'aggregazione spontanea degli studenti.

Il sistema di connessioni interne è stato completamente riprogettato, creando un percorso principale che collega i vari dipartimenti e si apre su una grande piazza longitudinale centrale. Questo spazio, attrezzato con aree studio, servizi di ristorazione e zone relax, diventa il cuore pulsante della vita universitaria. Un elemento particolarmente innovativo è rappresentato dalla recinzione perimetrale multifunzionale, che integra rastrelliere per biciclette e attrezzature per l'attività fisica.

Il rinnovamento si completa con un intervento sulle facciate degli edifici esistenti, che oltre alla loro funzione pratica di schermatura, assumono un ruolo iconico nel definire la nuova identità visiva del campus, contribuendo a creare un ambiente universitario moderno e accogliente, perfettamente integrato nel tessuto urbano circostante.

Il percorso si sviluppa seguendo una logica di graduale transizione sonora:

- Polo Universitario: Punto di partenza dove le misurazioni hanno evidenziato la necessità di spazi di decompressione acustica;
- Area Tribunale: Zona di transizione dove la progettazione ha integrato elementi di mitigazione sonora;
- Edilizia Popolare: Segmento che risponde alle esigenze di riqualificazione acustica emerse durante l'analisi;

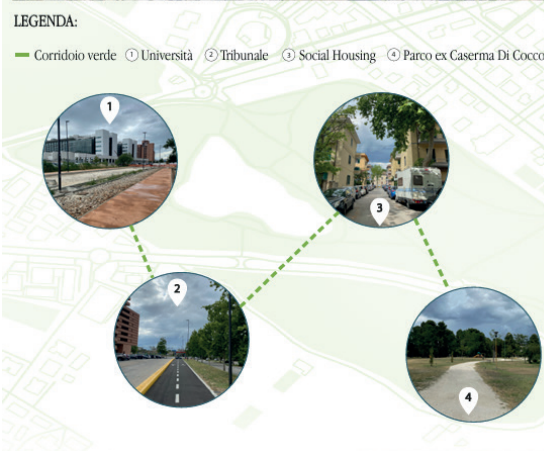
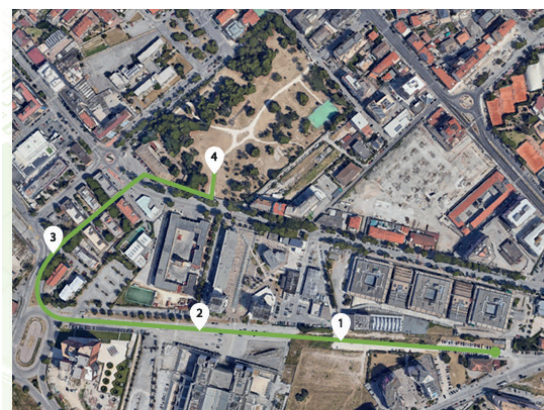


Fig. 3 – Il progetto del corridoio verde: percorso e indicazioni con indicati punti di interesse
Greenway project: path and points of interest indications

- Parco ex Caserma Di Cocco: Destinazione finale progettata come area di quiete in risposta alle preferenze emerse dai test d'ascolto.

In Fig. 3 si riporta il percorso del progetto del corridoio verde.

Le scelte progettuali saranno informate dai risultati delle analisi che si otterranno dal presente studio:

- Passeggiata Sonora: Sviluppata in risposta alle preferenze sonore emerse dai test d'ascolto.
- Aree di Quietude: Localizzate nei punti dove l'analisi psicoacustica ha evidenziato condizioni favorevoli.
- Elementi di Mitigazione: Posizionati strategicamente in base alla mappatura acustica dell'area

2.3 | Protocollo di raccolta dati

I metodi per la raccolta e l'analisi dei dati sul paesaggio sonoro si basano sulla norma ISO 12913-1 [22], che fornisce una definizione e un quadro concettuale di paesaggio sonoro e ambiente sonoro e sulla norma ISO 12913-2 [23], che definisce gli aspetti relativi alla misurazione, pianificazione, progettazione e la gestione del paesaggio sonoro. La raccolta dati è stata articolata in due fasi principali:

Misurazione Oggettiva: Sono state effettuate misurazioni acustiche dei principali indicatori sonori, oltre al livello di pressione sonora SPL sono stati misurati i parametri psicoacustici per identificare le caratteristiche acustiche dominanti con variazioni di intensità a seconda delle aree considerate. (Loudness, Sharpness, Roughness, Fluctuation Strength).

L'attività di misurazione è stata svolta con l'ausilio di attrezzature e dispositivi dedicati: Testa binaurale B&K type 4100; Sistema multicanale portatile Soundbook (8 canali); Software SAMURAI per l'elaborazione dati.

Valutazione Soggettiva: Per comprendere come le persone percepiscono e interagiscono con l'ambiente sonoro della zona universitaria, abbiamo sfruttato la valutazione basata sulla realtà aumentata. Questo approccio ha permesso ai partecipanti di immergersi virtualmente negli spazi urbani oggetto di studio, superando i limiti delle tradizionali indagini basate su questionari statici.

Il test è stato somministrato a due gruppi distinti di partecipanti: da un lato gli utenti quotidiani dell'area, come studenti, docenti e residenti, dall'altro esperti del settore quali architetti, urbanisti e ingegneri. Attraverso una piattaforma online, i partecipanti hanno potuto esplorare virtualmente gli spazi urbani grazie all'integrazione di fotografie sferiche a 360° e registrazioni audio binaurali. Questa combinazione ha ricreato un'esperienza immersiva molto vicina alla realtà, permettendo ai partecipanti di muoversi virtualmente negli spazi e percepire l'ambiente sonoro come se fossero fisicamente presenti sul posto. Per ogni area di studio, i partecipanti hanno potuto esplorare liberamente l'ambiente virtuale, prestando particolare attenzione alle caratteristiche sonore del luogo. Sono stati invitati a valutare diversi aspetti dell'esperienza, come la piacevolezza dei suoni percepiti, even-

tuali elementi di disturbo, il senso di tranquillità trasmesso dall'ambiente e la coerenza tra gli elementi visivi e sonori.

Mappatura aree di quiete: Infine, per la mappatura delle aree di quiete oltre alla registrazione binaurale classica è stata anche utilizzata l'app Hush City, uno strumento che permette di identificare e valutare gli spazi urbani tranquilli attraverso la raccolta di dati acustici e feedback degli utenti. L'app consente di registrare livelli sonori, scattare foto, e raccogliere valutazioni qualitative sulle caratteristiche dell'ambiente sonoro.

3 | Risultati

3.1 | Risultati della caratterizzazione psicoacustica dell'area di studio

L'analisi psicoacustica nell'area universitaria di Pescara ha evidenziato pattern significativi nella distribuzione spaziale dei parametri acustici. Le misurazioni effettuate con la testa binaurale B&K type 4100 hanno permesso di valutare i quattro parametri psicoacustici fondamentali in quattro punti strategici (P1-P4).

Attraverso le misurazioni effettuate con la testa binaurale, sono stati valutati quattro parametri psicoacustici fondamentali: Loudness, Sharpness, Roughness e Fluctuation Strength.

In Tab. 1 i risultati delle misure effettuate nei 4 punti di interesse per i due canali destro (r) e sinistro (l).

Tab. 1 – Risultati delle misure binaurali
(r=orecchio destro; l= orecchio sinistro)
Results of binaural measurements (r=right ear; l= left ear)

Grandezze	P1	P2	P3	P4
SPL	60.9 (r)	66.9 (r)	62.7 (r)	65.4 (l)
(dBA)	59.9 (l)	69.9 (l)	64.0 (l)	66.8 (r)
Loudness	20.27 (r)	25.09 (r)	19.49 (r)	26.17(r)
(Sone)	18.74 (l)	40.49 (l)	34.53 (l)	44.68 (l)
Sharpness	1.51 (r)	1.50 (r)	1.58 (r)	1.61 (r)
(Acum)	1.39 (l)	1.65 (l)	1.67 (l)	1.60 (l)
Roughness	0.33 (r)	0.31 (r)	0.76 (r)	0.28 (r)
(Asper)	0.41 (l)	0.25 (l)	0.78 (l)	0.32 (l)
Fluctuation	0.02 (r)	0.03 (r)	0.10 (r)	0.03 (r)
strenght (Vacil)	0.03 (l)	0.02 (l)	0.11 (l)	0.04 (l)

I risultati dell'analisi mostrano variazioni significative tra le diverse zone del campus. In particolare, l'area di Viale Pindaro ha evidenziato livelli di Loudness più elevati durante le ore di punta, correlati principalmente al traffico veicolare e alle attività degli studenti (*valori più elevati nel punto P4 (44.68 sone, canale sinistro)*). La Sharpness ha mostrato picchi interessanti in corrispondenza degli ingressi principali, dove si concentra la maggior parte delle interazioni sociali (*mostra una distribuzione relativamente uniforme (1.39-1.67 acum)*). La misura della Roughness ha, invece, permesso di identificare le zone più critiche dal punto di vista del comfort acustico, particolarmente evidenti nelle

aree di intersezione tra i flussi pedonali e veicolari (*evidenza picchi significativi nel punto P3 (0.76-0.78 asper)*). Il parametro Fluctuation Strength ha invece evidenziato la variabilità temporale del paesaggio sonoro, con oscillazioni più marcate nelle zone di aggregazione studentesca.

Per arricchire la caratterizzazione acustica e fornire una visione più completa della variabilità spaziale e temporale del soundscape, abbiamo integrato l'analisi con i descrittori percentili (Tab. 2). Questi descrittori, ampiamente utilizzati negli studi di soundscape urbano, permettono di caratterizzare rispettivamente il livello sonoro mediano e la variabilità dinamica dell'ambiente acustico [24,25]. I dati sono stati raccolti con misurazioni di 35 minuti in ciascun punto, durata adeguata per garantire la significatività statistica dei risultati.

Tab. 2 – Livelli percentili del SPL in dB(A) nei quattro punti di misurazione (r=orecchio destro; l=orecchio sinistro)
Percentile levels of SPL in dB(A) at the four measurement points (r=right ear; l=left ear)

Grandezze (dBA)	P1	P2	P3	P4
L1	68.0 (r) 65.7 (l)	74.5 (r) 78.5 (l)	72.6 (r) 73.8 (l)	74.1 (r) 76.0 (l)
L10	64.1 (r) 63.3 (l)	71.0 (r) 73.5 (l)	67.7 (r) 68.5 (l)	70.4 (r) 72.5 (l)
L50	63.0 (r) 62.1 (l)	69.7 (r) 72.2 (l)	64.8 (r) 66.0 (l)	68.8 (r) 70.5 (l)
L90	59.7 (r) 58.9 (l)	65.5 (r) 68.4 (l)	59.6 (r) 62.4 (l)	61.8 (r) 62.7 (l)
L95	56.5 (r) 55.8 (l)	61.6 (r) 64.1 (l)	56.2 (r) 57.7 (l)	55.9 (r) 56.4 (l)
L99	55.8 (r) 55.0 (l)	60.7 (r) 62.7 (l)	55.1 (r) 56.4 (l)	54.3 (r) 54.8 (l)

La distribuzione spaziale dei parametri (Fig. 4) evidenzia come le aree a maggior criticità acustica coincidano con i punti di maggior flusso pedonale e veicolare. Questi risultati sono in linea con studi precedenti [26,27] che hanno evidenziato correlazioni simili in contesti universitari urbani.

Per quanto riguarda l'analisi soggettiva, 47 sono state le risposte ritenute valide dei partecipanti ai questionari. I risultati dell'indagine hanno rivelato che gli studenti sono stati gli utenti principali osservati (Fig. 5).

Riguardo alla valutazione dell'ambiente acustico, è emerso che i suoni prodotti dagli esseri umani e le fonti di rumore provenienti da costruzioni, industrie e macchinari pesanti sono stati predominanti in tutti e quattro i siti, generando una percezione di caos e confusione in termini di qualità del paesaggio sonoro (Figg. 6-7).

La qualità percepita del paesaggio sonoro mostra una correlazione interessante con i parametri psicoacustici misurati. Il punteggio medio di concordanza ambiente-suono (6.23/10) suggerisce un'accettabile ma migliorabile integrazione tra paesaggio sonoro e contesto urbano.

Tuttavia, la descrizione del paesaggio urbano è stata valutata da "Molto brutto" a "Molto bello", ottenendo un punteggio di 2,81 su una scala da uno a cinque.

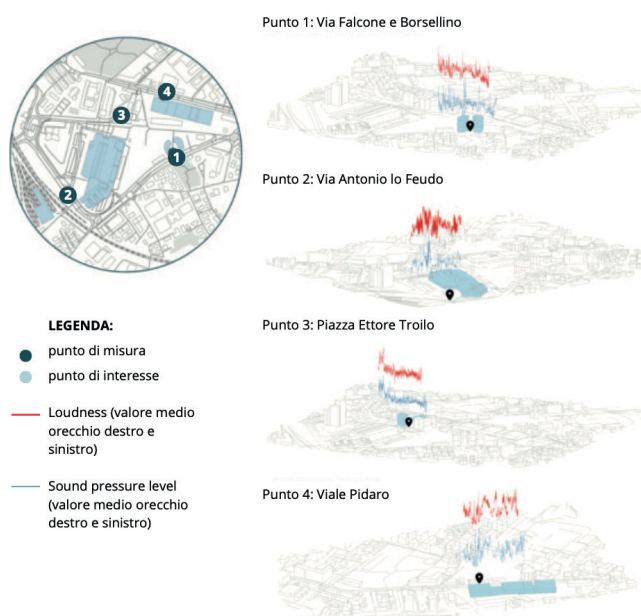


Fig. 4 – Geolocalizzazione dei parametri psicoacustici
Geolocation of psychoacoustic parameters

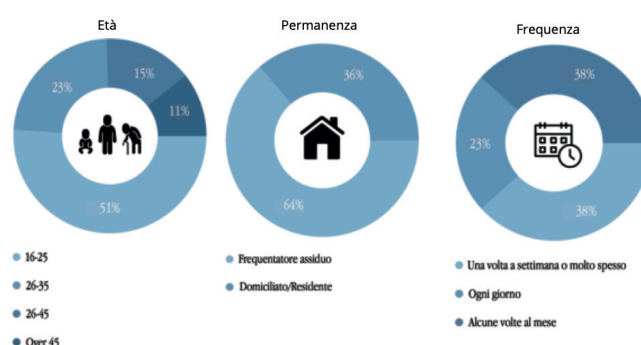


Fig. 5 – Distribuzione percentuale delle caratteristiche soggettive dei partecipanti al test
Percentage distribution of the subjective characteristics of the test participants

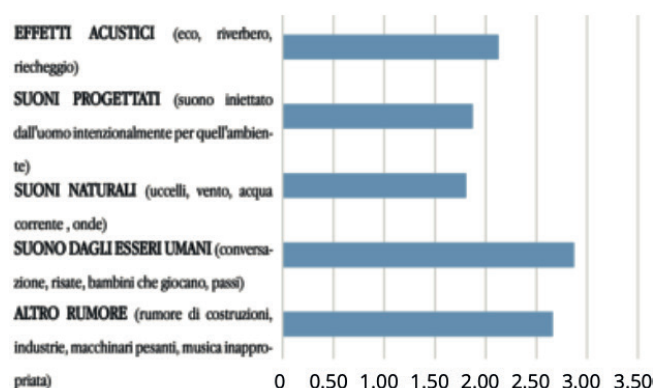


Fig. 6 – Differenziazione dei vari tipi di sorgente sonora percepita
Differentiation of the various types of perceived sound sources

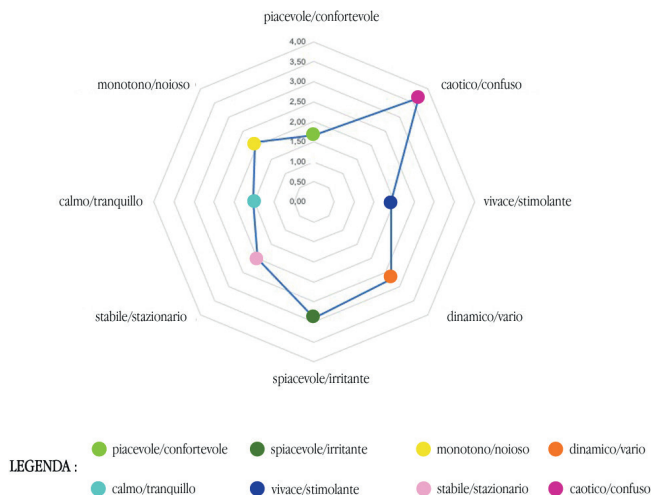


Fig. 7 – Qualità effettiva percepita del paesaggio sonoro
Perceived actual quality of the sound landscape

Le misurazioni oggettive dei livelli sonori, benché quantitativamente precise, non riflettono sempre l'esperienza soggettiva di chi frequenta quotidianamente gli spazi analizzati. Le indagini hanno evidenziato come il rumore influisca significativamente sul benessere psicofisico, dalla concentrazione al sonno fino alla salute mentale. Questo divario tra dati strumentali e percezione soggettiva sottolinea l'importanza di un approccio partecipativo nella gestione del paesaggio sonoro, dove il coinvolgimento della comunità diventa essenziale per sviluppare soluzioni efficaci e realmente rispondenti alle necessità di chi vive e lavora nell'area.

3.2 | Confronto tra qualità acustica oggettiva e percezione soggettiva

Per determinare l'influenza dei parametri acustici misurati sulla percezione soggettiva, abbiamo calcolato le correlazioni lineari tra i valori normalizzati di SPL, Loudness, Roughness e Fluctuation e le valutazioni di piacevolezza (Pleasant) e calma (Calm).

Dall'analisi emergono alcune tendenze significative (Fig. 8):

- SPL (Livello di Pressione Sonora) è l'unico parametro con un effetto statisticamente significativo ($p = 0.0403$), indicando una relazione importante tra SPL e percezione soggettiva. L'effetto è positivo, il che suggerisce che all'aumentare di SPL, la percezione soggettiva varia in modo significativo.
- Loudness e Sharpness non risultano statisticamente significativi ($p > 0.05$), suggerendo che il loro impatto diretto sulla percezione soggettiva non è fortemente determinante nei dati analizzati.
- Roughness e Fluctuation sono stati esclusi dal modello a causa di problemi di collinearità o dipendenza lineare con gli altri parametri, il che indica che non aggiungono informazioni uniche nel contesto del dataset disponibile.



Fig. 8 – Correlazioni lineari, alcuni risultati degni di nota:
 $R^2 = 0.8623$; Adjusted $R^2 = 0.759$; F-statistic = 8.35 ($p = 0.03387$)
Linear correlations, some noteworthy results: $R^2 = 0.8623$;
Adjusted $R^2 = 0.759$; F-statistic = 8.35 ($p = 0.03387$)

Ad integrazione dell'analisi delle correlazioni basata sui parametri psicoacustici, abbiamo esaminato la significatività statistica dei descrittori percentili del livello sonoro, particolarmente rilevanti nell'analisi del soundscape. La Fig. 9 presenta una rappresentazione grafica della distribuzione dei livelli percentili nei quattro punti di misurazione.

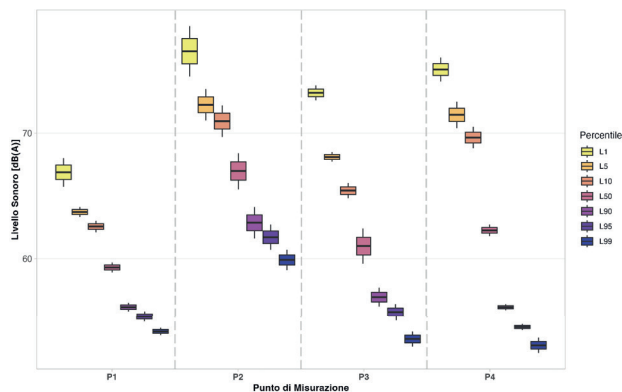


Fig. 9 – Box plot dei livelli percentili SPL nei quattro punti di misurazione

Box plot of the SPL percentile levels in the four measuring points

L'analisi di significatività dei descrittori percentili ha evidenziato:

- Livello mediano L50: i valori di L50 variano significativamente tra i punti di misurazione ($p < 0.01$), con il punto P2 (67.0 dBA) che si distingue nettamente dagli altri punti. La differenza tra P2 e P1 (59.3 dBA) è particolarmente marcata (7.7 dBA) e statisticamente significativa. Il livello L50, rappresentando il valore mediano, fornisce un'indicazione robusta del "clima acustico tipico" di ciascuna area, risultando complementare all'SPL medio nelle analisi di correlazione.
- Variabilità dinamica L10-L90: questo descrittore mostra differenze altamente significative tra i punti ($p < 0.005$),

con il punto P4 che presenta un valore (13.5 dBA) più che doppio rispetto a P1 (6.4 dBA). Tale differenza è particolarmente importante poiché valori elevati di L10-L90 sono associati ad ambienti sonori con maggiori fluttuazioni temporali, aspetto che non emerge dall'analisi dell'SPL medio. L'analisi ha rivelato correlazioni significative tra:

- L50 e Loudness ($r = 0.89, p < 0.01$), confermando la forte relazione tra livello sonoro mediano e percezione di intensità sonora;
- L10-L90 e Fluctuation Strength ($r = 0.76, p < 0.05$), evidenziando come la variabilità temporale del livello sonoro sia correlata alla percezione delle modulazioni sonore.

3.3 | Indice di qualità acustica

Questi risultati hanno guidato l'assegnazione dei pesi nell'SQI [28], in modo che i parametri con un'influenza maggiore sulla percezione del comfort acustico abbiano un impatto più significativo sulla valutazione complessiva.

Si è quindi definito un Indice di Qualità Acustica basato sulla combinazione ponderata dei parametri oggettivi, con pesi assegnati in base alla loro influenza sulla percezione del comfort acustico, come in Eq. (1):

$$SQI = (1 - SPL) \times 0.3 + (1 - Loudness) \times 0.3 + (1 - Roughness) \times 0.2 + (1 - Fluctuation) \times 0.2 \quad (1)$$

Dove un valore più alto indica una qualità acustica migliore. Per rappresentare graficamente il confronto tra qualità acustica e percezione soggettiva, abbiamo creato un grafico in Fig. 10 con punti blu per l'Indice di Qualità Acustica e punti rossi per le valutazioni soggettive (piacevolezza). I punti sono posizionati lungo l'asse orizzontale, che rappresenta gli indici normalizzati, mentre l'asse verticale indica i punti di misurazione.

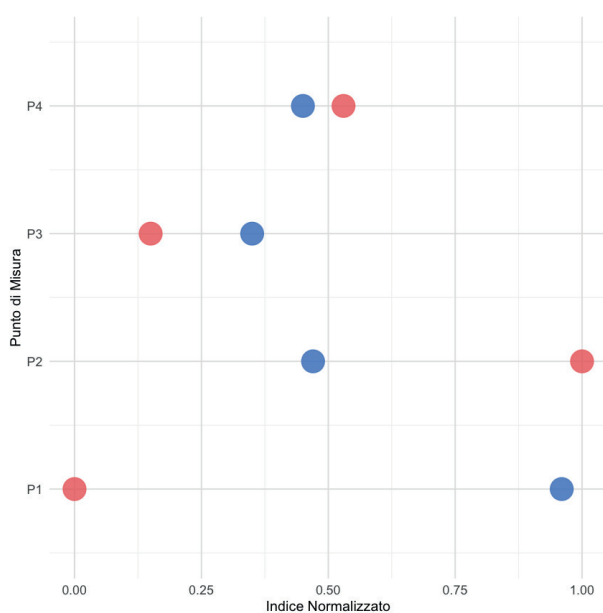


Fig. 10 – Qualità effettiva percepita del paesaggio sonoro
Perceived actual quality of the soundscape

3.4 | Risultati della mappatura delle aree di quiete

La caratterizzazione delle aree di quiete è stata condotta attraverso un approccio metodologico duale, combinando le misurazioni tradizionali mediante testa binaurale con il rilevamento partecipativo attraverso l'app Hush City.

Questa integrazione ha permesso di ottenere una comprensione più completa delle caratteristiche acustiche delle aree studiate.

Le app mobili sono sempre più sviluppate come strumenti partecipativi nei progetti di Citizen science dedicati al rumore ambientale. Tuttavia, sono meno comuni quelle destinate all'identificazione e alla valutazione delle aree silenziose. L'app gratuita di Citizen science Hush City [29], inventata dalla Dr. Arch. Antonella Radicchi nel 2015 e poi sviluppato presso l'Università Tecnica di Berlino nell'ambito dei progetti: Beyond the Noise: Open Source Soundscapes (2016-18, prima versione dell'app mobile Hush City) e Hush City Mobile Lab (2018-20, seconda versione dell'app mobile Hush City e prima versione dell'app basata sul web) lanciata nel 2017, permette agli utenti di creare una mappa ad accesso aperto delle aree tranquille, influenzando così piani e politiche per una vita più sana.

In Fig. 11 è riportato il workflow dell'app per il caso di studio in esame.

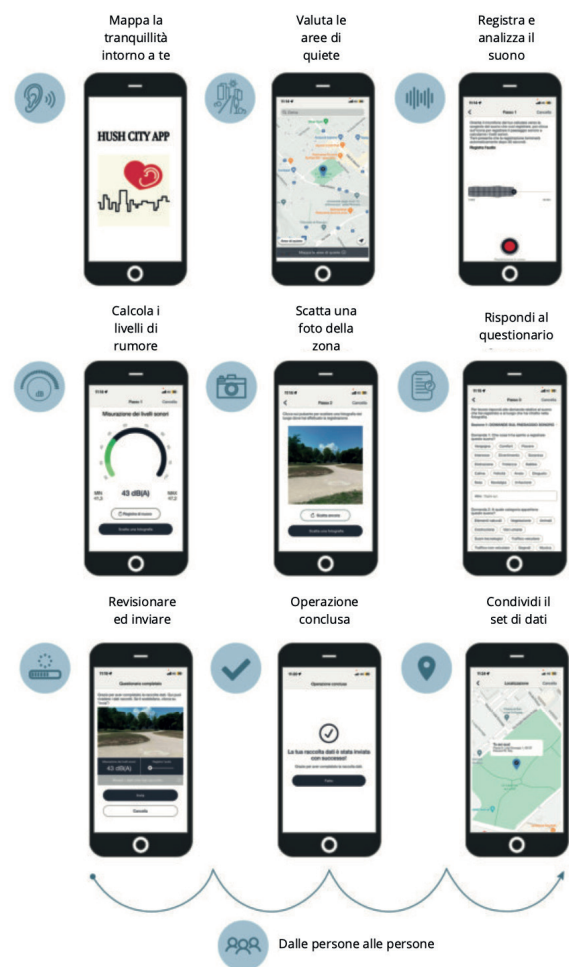


Fig. 11 – Workflow dell'app Hush city map
Workflow of the Hush city map app

Parallelamente è stato effettuato un soundwalk (Fig. 12), metodo che consiste nel camminare in un'area prestando particolare attenzione all'ambiente sonoro. Durante questa esperienza, ogni membro del gruppo ha individuato punti di valutazione all'interno del Parco ex Caserma Di Cocco.



Fig. 12 – Soundwalk e acquisizione binaurale in situ
Soundwalk and binaural in situ acquisition

Utilizzando l'app mobile, è stato possibile raccogliere dati sia qualitativi che quantitativi sulle aree tranquille attraverso un processo in quattro fasi sequenziali. Gli utenti hanno iniziato con una registrazione audio di 30 secondi, calcolando i livelli di pressione sonora, hanno scattato una foto della zona tranquilla e risposto a un questionario. Dopo aver completato queste fasi, i dati sono stati inviati e collegati in tempo reale a una mappa web ad accesso aperto. Il questionario, composto da 20 domande predefinite, esplora vari fattori che influenzano l'esperienza ambientale.

Una volta inviati tramite l'app mobile, i dati sono stati georeferenziati e contrassegnati con data e ora in tempo reale sulla mappa di Hush City.

La Fig. 13 mostra i risultati della mappatura effettuata mediante la mobile app.

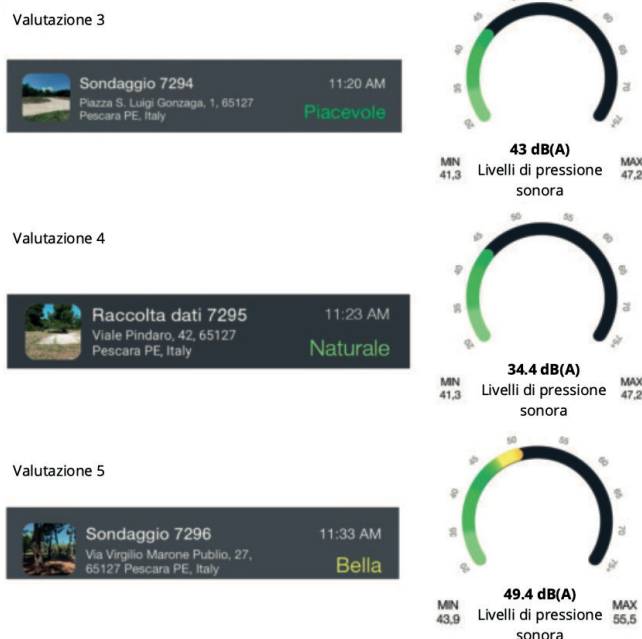
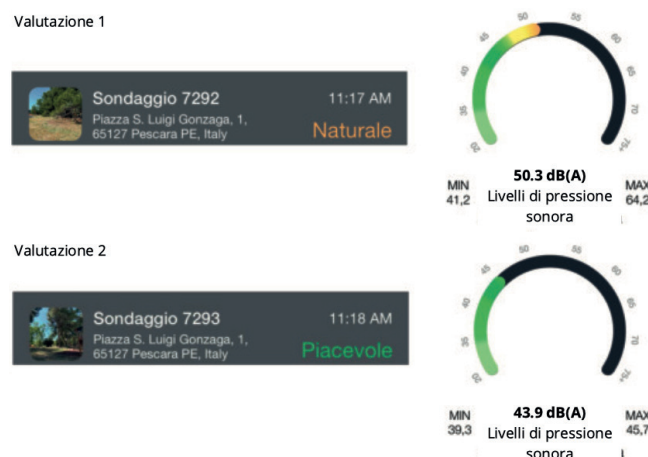


Fig. 13 – Risultati della Mappatura acustica con Hush city map
Noise mapping results with Hush city map

Le misurazioni binaurali nelle aree di quiete identificate mostrano valori di SPL intorno ai 45 dBA, con parametri psico-acustici che suggeriscono un ambiente sonoro relativamente stabile e piacevole.

Di seguito si riportano i valori tabellati (Tab. 3) relativi alle misurazioni effettuate in situ con la testa binaurale.

Tab. 3 – Risultati delle misure binaurali
(r=orecchio destro; l= orecchio sinistro)
Results of binaural measurements (r=right ear; l= left ear)

	Loud-ness (Phone)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Fluctuation strenght (Vacil)
Right	72.91	1.22	0.41	0
left	72.74	1.31	0.46	0

3.5 | Benefici ambientali e sociali della riprogettazione

L'analisi del soundscape urbano ha evidenziato come la qualità sonora degli spazi urbani influenzi significativamente il benessere e l'utilizzo degli spazi pubblici. In particolare, le aree con elevati livelli di rumore sono risultate associate a una minore percezione di comfort acustico e benessere psicologico, mentre quelle caratterizzate da suoni naturali e livelli di rumore più contenuti sono state valutate più positivamente.

Sulla base di questi risultati e nell'ambito del progetto del nuovo campus Pindaro, concepito come un'infrastruttura sostenibile e multifunzionale volta a favorire un ambiente più verde e rilassante, sono state sviluppate proposte progettuali mirate.

Questo percorso, oltre a fungere da corridoio acustico e visivo, contribuisce a ridurre l'impatto del rumore e a migliorare la qualità acustica urbana. Il percorso inizia dall'università e

si snoda attraverso il tribunale, le aree di edilizia popolare, fino a giungere al Parco ex Caserma Di Cocco, punto di riferimento per la comunità. Questo collegamento facilita la mobilità e offre nuove opportunità di relax e interazione con la natura grazie alla passeggiata sonora e alle aree di quiete che non solo offrono un'esperienza estetica, ma contribuiscono anche al benessere psico-fisico dei visitatori, riducendo lo stress e migliorando l'umore.

In Fig. 14 si dimostra come l'integrazione consapevole degli aspetti acustici nella pianificazione urbana possa contribuire significativamente al miglioramento della qualità della vita nel contesto universitario.



Fig. 14 – Mappa del corridoio verde con indicazione dei punti di interesse e delle aree di quiete

Map of the greenway showing points of interest and quiet areas

I risultati della mappatura delle aree di quiete attraverso Hush City hanno evidenziato il potenziale di mitigazione acustica del verde urbano, supportando l'approccio progettuale del corridoio verde. L'integrazione di elementi naturali e la creazione di zone buffer tra aree trafficate e spazi di studio si allinea con le best practice internazionali per il miglioramento del comfort acustico in ambito universitario.

Questo percorso sonoro è inoltre arricchito da installazioni che integrano suoni naturali e artistici, offrendo un'esperienza di immersione totale nella natura. Gli utenti potranno godere di suoni rilassanti come il canto degli uccelli, il fruscio delle foglie e l'acqua che scorre, favorendo la meditazione e il benessere mentale. All'interno del parco sono state mappate specifiche aree di quiete, create per offrire agli studenti e ai cittadini luoghi dove poter rilassarsi, studiare o semplicemente riflettere. Queste aree sono dotate di panchine ergonomiche, ombreggiature naturali e installazioni artistiche che favoriscono il relax e la contemplazione.

I risultati della ricerca hanno chiaramente evidenziato come la riqualificazione urbana debba andare oltre gli aspetti estetici e funzionali per includere anche la gestione e l'ottimizzazione del paesaggio sonoro. L'integrazione del soundscape nei processi di riqualifica non solo migliora l'esperienza percettiva degli spazi urbani, ma può anche avere un impatto positivo sul benessere psicofisico dei cittadini. L'attenzione ai dettagli acustici è fondamentale per creare

ambienti più vivibili e accoglienti, dove il rumore non viene semplicemente ridotto, ma l'intero ambiente sonoro viene armonizzato e valorizzato. In particolare, la riqualificazione del corridoio verde rappresenta un esempio concreto di come la progettazione urbana possa integrare attivamente il paesaggio sonoro per migliorare la qualità della vita. Le ricerche future potrebbero approfondire l'impatto di specifici interventi sonori ed esplorare l'impiego di tecnologie avanzate per la mappatura e la gestione del soundscape urbano.

4 | Conclusioni

Nel corso di una ricerca approfondita sulla valutazione del paesaggio sonoro nella zona universitaria di Pescara, è stato attentamente esplorato l'ambiente acustico che circonda questa vivace area. La sinfonia di suoni, sia naturali che artificiali, che caratterizza questo contesto ha rivelato un quadro affascinante e complesso, capace di creare un'atmosfera unica e dinamica. Tuttavia, è emerso chiaramente che l'eccesso di rumore può avere un impatto significativo sulla salute e sul benessere delle persone. Un aspetto cruciale della ricerca è stata l'importanza attribuita ai test soggettivi, che hanno permesso di raccogliere preziose risposte dirette dai residenti e dagli utenti della zona universitaria. Queste valutazioni soggettive hanno fornito una prospettiva indispensabile sul modo in cui l'ambiente sonoro viene percepito da chi lo vive quotidianamente. Le risposte ottenute hanno rivelato una gamma di esperienze e percezioni, evidenziando come il rumore possa influire non solo sul benessere fisico, ma anche su quello psicologico. Questi feedback hanno messo in luce l'importanza di un approccio partecipativo nella gestione del paesaggio sonoro, coinvolgendo la comunità nella definizione delle priorità e delle soluzioni. Le valutazioni soggettive, unite a quelle oggettive, hanno sottolineato la necessità di adottare soluzioni innovative per migliorare la qualità del paesaggio sonoro urbano. Attraverso interventi di pianificazione urbana e l'implementazione di misure di mitigazione acustica, è possibile trasformare l'area in uno spazio più armonioso e accogliente per tutti.

In conclusione, questa ricerca non solo sottolinea l'importanza della tutela del paesaggio sonoro urbano, ma evidenzia anche il potenziale trasformativo che interventi mirati e innovativi possono avere nell'ottimizzazione dell'ambiente acustico. Invita a una maggiore consapevolezza e azione per creare comunità più attente al benessere di chi le abita creando un equilibrio armonioso tra i suoni della città, affinché diventino un'esperienza piacevole per l'udito e un conforto per l'anima.

Conclusions

During an in-depth research on soundscape evaluation in the university area of Pescara, the acoustic environment surrounding this vibrant area was carefully explored. The symphony of sounds, both

natural and artificial, that characterizes this context has revealed a fascinating and complex picture, capable of creating a unique and dynamic atmosphere. However, it has clearly emerged that excess noise can significantly impact people's health and well-being.

A crucial aspect of the research was the importance attributed to subjective tests, which allowed for collecting valuable direct responses from residents and users of the university area. These subjective evaluations provided an indispensable perspective on how the sound environment is perceived by those who experience it daily. The responses obtained revealed a range of experiences and perceptions, highlighting how noise can affect not only physical well-being, but also psychological well-being.

This feedback highlighted the importance of a participatory approach in soundscape management, involving the community in defining priorities and solutions. Subjective evaluations, combined with objective ones, emphasized the need to adopt innovative solutions to improve the quality of the urban soundscape. Through urban planning interventions and the implementation of acoustic mitigation measures, it is possible to transform the area into a more harmonious and welcoming space for everyone.

In conclusion, this research not only emphasizes the importance of protecting the urban soundscape but also highlights the transformative potential that targeted and innovative interventions can have in optimizing the acoustic environment. It calls for greater awareness and action to create communities more attentive to the well-being of their inhabitants, creating a harmonious balance between the sounds of the city, so that they become a pleasant experience for the ear and a comfort for the soul.

Bibliografia

- [1] A. Radicchi, P. Cevikayak Yelmi, A. Chung, P. Jordan, S. Stewart, A. Tsaligopoulos, L. McCunn, M. Grant, Sound and the healthy city, *Cities and Health* 5 (2021) 1–13. <https://doi.org/10.1080/23748834.2020.1821980>.
- [2] A. Tsaligopoulos, Y.G. Matsinos, Approaching Quietness as an Urban Sustainability Opportunity, *Environments - MDPI* 9 (2022). <https://doi.org/10.3390/environments9020012>.
- [3] F. D'Alessandro, L. Evangelisti, C. Guattari, G. Grazieschi, F. Orsini, Influence of visual aspects and other features on the soundscape assessment of a university external area, *Building Acoustics* 25 (2018) 199–217. <https://doi.org/10.1177/1351010X18778759>.
- [4] J. Liu, J. Kang, H. Behm, T. Luo, Effects of landscape on soundscape perception: Soundwalks in city parks, *Landscape and Urban Planning* 123 (2014) 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.003>.
- [5] R.M. Rehan, The phonic identity of the city urban soundscape for sustainable spaces, *HBRC Journal* 12 (2016) 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.12.005>.
- [6] H. Booi, F. van den Berg, Quiet areas and the need for quietness in Amsterdam, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 9 (2012) 1030–1050. <https://doi.org/10.3390/ijerph9041030>.
- [7] K. Vogiatzis, N. Rémy, Changing the urban sound environment in greece: a guide based on selected case studies of strategic noise maps (Snm) and noise action plans (nap) in medium and large urban areas, *Environments - MDPI* 5 (2018) 1–19. <https://doi.org/10.3390/environments5060064>.
- [8] J. Liu, Y. Wang, C. Zimmer, J. Kang, T. Yu, Factors associated with soundscape experiences in urban green spaces: A case study in Rostock, Germany, *Urban Forestry and Urban Greening* 37 (2019) 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.003>.
- [9] A. Gidlöf-Gunnarsson, E. Öhrström, Attractive “quiet” courtyards: A potential modifier of urban residents' responses to road traffic noise?, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 7 (2010) 3359–3375. <https://doi.org/10.3390/ijerph7093359>.
- [10] Murray Schafer R., *The new soundscape*, 1969.
- [11] L. Cassina, L. Fredianelli, I. Menichini, C. Chiari, G. Licitra, Audio-visual preferences and tranquillity ratings in urban areas, *Environments - MDPI* 5 (2018) 1–17. <https://doi.org/10.3390/environments5010001>.
- [12] F. Aletta, T. Oberman, A. Mitchell, H. Tong, J. Kang, Assessing the changing urban sound environment during the COVID-19 lockdown period using short-term acoustic measurements, *Noise Mapping* 7 (2020) 123–134. <https://doi.org/10.1515/noise-2020-0011>.
- [13] M. Erfanian, A.J. Mitchell, J. Kang, F. Aletta, The Psychophysiological Implications of Soundscape: A Systematic Review of Empirical Literature and a Research Agenda, *IJERPH* 16 (2019) 3533. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193533>.
- [14] Adams M., Bruce, N., Davies, W., Cain, W., Jennings, P., Carlyle, P., Cusack, P., Hume, K., Plack, C., *SOUNDWALKING AS METHODOLOGY FOR UNDERSTANDING SOUNDSCAPES*, Acoustics Research Centre, University of Salford, Salford, UK 30 (2008) 131–35.
- [15] Legge quadro sull'inquinamento acustico, 1995.
- [16] DPCM14 novembre 1997-Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore., 1997.
- [17] G. Cerwén, F. Mossberg, Implementation of quiet areas in Sweden, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (2019). <https://doi.org/10.3390/ijerph16010134>.
- [18] Z. Allam, S.E. Bibri, D. Chabaud, C. Moreno, The ‘15-Minute City’ concept can shape a net-zero urban future, *Humanities and Social Sciences Communications* 9 (2022) 1–5.
- [19] S. Di Loreto, F. Serpilli, V. Lori, Soundscape Approach in the Seaport of Ancona: A Case Study, *Acoustics* 4 (2022) 492–516. <https://doi.org/10.3390/acoustics4020031>.
- [20] J.-Y. Hong, K.H. Chong, Designing Public Soundscapes through Social Architecture and Soundscape Approaches: Reflective Review of Architectural Design Studio, *Sustainability* 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151612399>.
- [21] Y. Hasegawa, S.-K. Lau, C.K. Chau, Potential mutual efforts of landscape factors to improve residential soundscapes in compact urban cities, *Landscape and Urban Planning* 227 (2022) 104534. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104534>.
- [22] International standard ISO, Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework, International Organization for Standardization, 2014. www.iso.org/standard/52161.html.
- [23] International standard ISO, Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements, International Organization for Standardization, 2018. www.iso.org/standard/75267.html.
- [24] M.S. Engel, A. Fiebig, C. Pfaffenbach, J. Fels, A Review of the Use of Psychoacoustic Indicators on Soundscape Studies, *Current Pollution Reports* 7 (2021) 359–378. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00197-1>.

- [25] G. Brambilla, V. Gallo, G. Zambon, The Soundscape Quality in Some Urban Parks in Milan, Italy, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10 (2013) 2348–2369. <https://doi.org/10.3390/ijerph10062348>.
- [26] Q. Liang, S. Lin, L. Wang, F. Yang, Y. Yang, The Impact of Campus Soundscape on Enhancing Student Emotional Well-Being: A Case Study of Fuzhou University, *Buildings* 15 (2025). <https://doi.org/10.3390/buildings15010079>.
- [27] X. Lu, G. Li, X. Song, L. Zhou, G. Lv, Concept, Framework, and Data Model for Geographical Soundscapes, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 14 (2025). <https://doi.org/10.3390/ijgi14010036>.
- [28] S. Di Loreto, F. Serpilli, V. Lori, Methods for product sound design: a correlation between annoyance and sound quality of noise emitted by household appliances, in: 2022. www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85147440744&partnerID=40&md5=130fcd14cd3d22efcd26b1c70485dcc1.
- [29] R.M. Alsina-Pagès, G.J. Ginovart-Panisello, M. Freixes, A. Radicchi, A soundwalk in the heart of poble nou superblock in barcelona: Preliminary study of the acoustic events, *Noise Mapping* 8 (2021) 207–216. <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0016>.

Analisi delle caratteristiche acustiche di alcuni teatri all'italiana toscani

Carlo Bartoli^a | Giacomo Salvadori^a | Tommaso D'Orazio^b | Claudia Guattari^{b*} |
Luca Evangelisti^c | Francesco Asdrubali^d

^a Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Via Carlo Francesco Gabba, 22, 56122 Pisa

^b Dipartimento di Filosofia, Comunicazione, Spettacolo, Università degli Studi Roma TRE, Via Ostiense, 234, 00146 Roma

^c Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica, Università degli Studi Roma TRE, Via Vito Volterra, 62, 00146 Roma

^d Dipartimento di Scienze Umane e Sociali Internazionali (SUSI), Università per Stranieri di Perugia, Piazza Giuseppe Ermini, 1, 06123 Perugia

* Autore di riferimento:
claudia.guattari@uniroma3.it

Ricevuto: 19/9/2024

Accettato: 24/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20510

ISSN: 2385-2615

Il presente lavoro analizza le caratteristiche acustiche di alcuni teatri toscani, basata sui risultati di campagne di misurazioni effettuate in vari contesti teatrali nel corso degli ultimi anni. L'obiettivo principale è quello di mettere in luce e discutere le specificità acustiche di questi spazi, tutti appartenenti alla tipologia del teatro all'italiana, pur mostrando differenze per dimensioni, materiali utilizzati ed epoche di costruzione. I dati raccolti offrono una visione approfondita delle qualità sonore dei teatri considerati, fornendo importanti indicazioni per una migliore comprensione dell'esperienza acustica all'interno di tali ambienti e per la conservazione della loro autenticità e rilevanza storico-culturale.

Parole chiave: teatri storici, acustica architettonica, tempo di riverbero, Valdarno

Investigation of the Acoustic Characteristics of Some Tuscan Italian-style Theaters

The present study examines the acoustic characteristics of several Tuscan theaters, based on the results of measurement campaigns conducted in various theatrical settings over the past years. The main goal is to highlight and discuss the acoustic specifics of these spaces, all belonging to the Italian-style theater typology, while showing differences in size, materials used, and construction epochs. The collected data offer an in-depth insight into the sound qualities of the theaters considered, providing significant indications for a better understanding of the acoustic experience within such environments and for the preservation of their authenticity and historical-cultural relevance.

Keywords: historical theaters, architectural acoustics, reverberation time, Valdarno

1 | Introduzione

I teatri rappresentano un ampio e vario insieme di spazi performativi caratterizzati da una vasta complessità e, allo stesso tempo, da una grande versatilità che li rende adatti a ospitare una molteplicità di eventi artistici e culturali [1]. Tra questi, in particolare, il teatro all'italiana si distingue come un tipo di struttura teatrale caratteristica del costruito italiano e particolarmente diffusa nel panorama architettonico italiano tra il XVIII e il XIX secolo. Le sue principali peculiarità architettoniche sono individuabili in una sala a forma di ferro di cavallo, che porta alla creazione di una platea che si trasforma nel tempo da sala da ballo ad una zona deputata ad una migliore visibilità dello spettacolo, ottimizzata per la fruizione dello spettacolo dal vivo; nell'eliminazione delle gradinate per arrivare alla costruzione di palchi tra loro separati e divisi in altezza per ordini, che offrono al pubblico una visione privilegiata degli eventi; ad una maggiore profondità della scena progettata per permettere l'utilizzo delle innovative quinte prospettiche e la possibilità di recitare dentro la scena e non, come consuetudine nel teatro, davanti ad essa.

Un tempo l'opera lirica veniva rappresentata solo nei palazzi reali e nobiliari; perciò, era riservata solo a pochissime persone privilegiate. Il popolo inizia a godere di questa nuova forma di spettacolo solo dopo l'apertura del primo teatro d'opera, che nasce a Venezia nel 1637 [2].

2 | Le caratteristiche del teatro d'opera "all'italiana"

Tra il 1600 e il 1700 nasce una nuova tipologia di edificio teatrale chiamato "teatro all'italiana". Questa innovativa struttura non solo ha avuto un impatto significativo in Italia, ma è stata d'esempio per tantissimi teatri d'opera, influenzando la progettazione di numerosi teatri dell'opera in tutta Europa [3]. Rispetto ai precedenti modelli, il teatro all'italiana ha introdotto diverse novità architettoniche e funzionali. L'orchestra viene collocata in uno spazio più basso rispetto al palcoscenico, così da permettere al pubblico di vedere cosa accade in scena.

Il palcoscenico stesso diventa anche molto più grande, proprio per ospitare i tanti macchinari e le scene che diventano sempre più imponenti. Dove adesso si trova la "platea" (la distesa di poltrone che stanno davanti al palcoscenico) un tempo le persone potevano assistere allo spettacolo acquistando un biglietto e rimanendo per tutto il tempo in piedi, oppure su qualche scomoda panca.

Nei palchi più alti si trova il "loggione" dove un tempo prendeva posto il pubblico meno abbiente, come ad esempio i giovani, che solitamente, per riuscire a vedere lo spettacolo, dovevano stare in piedi. Il teatro era un importante luogo di ritrovo, dove gli ospiti potevano chiacchierare, mangiare, ascoltare un po' di musica e giocare d'azzardo non solo nei palchi, ma anche nel "foyer" che si trova all'entrata del teatro.

e nei “ridotti”, che erano delle grandi stanze utilizzate di solito per mangiare e bere.

L'influenza della disposizione architettonica, in particolare la configurazione dei palchi e delle logge, ha un impatto significativo sulla qualità dell'ascolto nei teatri storici. Lo studio condotto presso l'Università di Bologna da Cocchi, Garai & Tavernelli [4] incentrato sul Teatro Comunale di Bologna, ha dimostrato come la distribuzione spaziale e la geometria dei palchi possano alterare i parametri acustici percepiti dal pubblico, in particolare in termini di chiarezza sonora e definizione spaziale

Lo scopo di questo lavoro è il confronto tra le caratteristiche acustiche e architettoniche di nove teatri all'italiana toscani, situati in diverse province, studiati negli ultimi anni. Tale analisi mira a fornire una comprensione approfondita delle specificità di tali spazi e delle loro influenze sulla percezione sonora, contribuendo così alla valorizzazione e alla conservazione del patrimonio teatrale della Toscana.

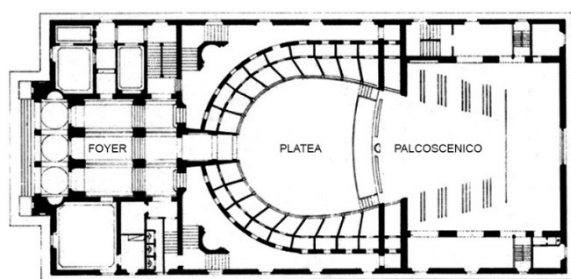


Fig. 1 – Planimetria tipica del teatro all'italiana.

Fonte: <https://spazioscenico.altervista.org/>

Typical floor plan of the Italian-style theater

3 | Analisi della letteratura

La storia degli studi sull'acustica risale all'antichità, con i greci che si confrontarono per primi con la sfida di rendere udibile e intelligibile il suono in spazi teatrali ampi e affollati. Nonostante basassero le loro conclusioni principalmente sull'esperienza pratica, riuscirono a ottenere risultati notevoli, come dimostrato dalla qualità dell'acustica nei loro teatri. Tuttavia, è nel corso dei secoli successivi che gli studi sull'acustica hanno fatto progressi significativi. È importante notare che i primi teatri all'italiana, che emersero tra il XVII e il XVIII secolo, furono progettati in maniera empirica, senza una piena comprensione della teoria della riverberazione e degli altri concetti acustici fondamentali. Solo più tardi, nel tardo XIX e all'inizio del XX secolo, con il lavoro di Wallace Clement Sabine, l'acustica architettonica iniziò a essere studiata sistematicamente. Il lavoro di Sabine ha gettato le basi per la comprensione scientifica della propagazione del suono negli ambienti chiusi, introducendo concetti come il tempo di riverberazione e fornendo metodi per misurare e ottimizzare l'acustica degli spazi teatrali e degli altri ambienti architettonici. Oggi, gli studi sull'acustica dei teatri comprendono una serie di parametri rilevanti, tra cui il tempo di riverberazione, l'indice di artico-

lazione, la distribuzione del suono e la diffusione spaziale. Questi fattori sono cruciali per garantire che gli spettatori possano godere di un'esperienza acustica ottimale durante le performance teatrali.

In particolare, gli studi di Kuttruff [5] sono fondamentali per la comprensione dell'acustica degli ambienti chiusi, poiché esaminano in profondità i fenomeni fisici legati alla propagazione del suono all'interno di spazi confinati, concentrandosi sui parametri che influenzano la qualità acustica. Kuttruff fornisce una base teorica solida per la comprensione di questi concetti e propone linee guida per la loro ottimizzazione in diversi contesti, tra cui teatri e sale da concerto. Inoltre, esplora anche le implicazioni pratiche della progettazione acustica, offrendo una combinazione di teoria e applicazione utile per l'analisi e il miglioramento delle prestazioni acustiche nei teatri storici, inclusi quelli all'italiana.

La standardizzazione delle misure acustiche nei teatri storici è un elemento essenziale per garantire la comparabilità e l'affidabilità dei dati raccolti. In tal senso, le linee guida proposte da Prodi & Pompoli [6] forniscono un protocollo metodologico dettagliato per la conduzione di misurazioni acustiche all'interno dei teatri d'opera storici, stabilendo criteri rigorosi per l'acquisizione e l'interpretazione dei parametri acustici fondamentali.

Anche le ricerche di Marshall Long [7] sono un riferimento per la progettazione acustica di spazi destinati a spettacoli, come teatri e sale da concerto. Long si concentra su parametri chiave come il tempo di riverberazione, la chiarezza e la definizione, discutendone l'impatto su vari tipi di esibizioni, dal parlato alla musica ed affrontando anche le tecniche costruttive e l'uso di materiali per ottimizzare la qualità acustica, fornendo strumenti pratici per la progettazione e la valutazione acustica di spazi come i teatri all'italiana. L'opera di Long è particolarmente utile per comprendere come configurare spazi performativi che rispondano adeguatamente alle esigenze acustiche.

La caratterizzazione acustica degli spazi, soprattutto nei contesti teatrali in cui l'acustica riveste un ruolo fondamentale, ha suscitato grande interesse negli studi scientifici. Questo articolo si concentra sulla caratterizzazione acustica di nove teatri tradizionali nella zona del Valdarno in Italia. Precedenti ricerche hanno investigato le caratteristiche acustiche dei teatri italiani, con particolare enfasi su quelli storici all'italiana e dell'opera.

Un'analisi dettagliata delle caratteristiche acustiche dei teatri storici italiani è stata condotta da Magrini et al. [8], il cui studio, presentato nell'ambito del convegno *Teatri d'opera dell'Unità d'Italia*, ha fornito un'ampia raccolta di dati sperimentali su parametri acustici chiave, quali tempo di riverberazione, chiarezza e definizione sonora. Questo lavoro rappresenta un riferimento fondamentale per comprendere le peculiarità acustiche di queste strutture e il loro ruolo nella diffusione del suono.

Prodi et al. [1] hanno analizzato le peculiarità acustiche di 48 teatri storici dell'opera italiana. Lo studio si basa su dati raccolti in condizioni standardizzate, utilizzando una sorgente

te omnidirezionale posizionata sul palcoscenico. L'analisi dei teatri considerati è stata suddivisa in due gruppi: il Gruppo A, caratterizzato da particolari condizioni che favoriscono un aumento del tempo di riverberazione, e il Gruppo B, comprendente teatri con caratteristiche più "regolari". I dati rilevati includono i parametri: T30, EDT, BR, C80, G, IACC e ITDG. I risultati mostrano una correlazione tra il tempo di riverberazione T30 e il volume della sala, con i teatri regolari che tendono a presentare una minore riverberazione. Tuttavia, la pendenza delle curve T30/V suggerisce che le differenze nel tempo di riverberazione dipendono più dal livello di assorbimento acustico che dalla geometria della sala. L'analisi del tempo di decadimento precoce EDT evidenzia una maggiore secchezza acustica nei teatri tradizionali rispetto a quelli moderni, anche con l'aumentare del volume. In contrasto, i teatri moderni mostrano una maggiore riverberazione con l'aumentare del volume, come indicato dalla pendenza della regressione EDT/V. Questi risultati contribuiscono alla comprensione delle differenze acustiche tra teatri tradizionali e moderni, offrendo preziose informazioni per la progettazione e l'ottimizzazione degli spazi teatrali.

Lo studio di Bevilacqua et al. [9] ha esaminato l'analisi acustica di quattro teatri situati in Campania, caratterizzati da una pianta a forma di ferro di cavallo. I teatri considerati sono il Teatro Vittorio Emanuele II di Benevento, il Teatro Garibaldi di Santa Maria Capua Vetere, il Teatro Mercadante di Napoli e il Teatro Verdi di Salerno. Questi teatri, con varie capacità e caratteristiche architettoniche, sono stati studiati per comprendere le loro prestazioni acustiche. Le misurazioni sono state condotte utilizzando un altoparlante omnidirezionale equalizzato ed un segnale sweep con una banda di frequenza da 40 Hz a 20 kHz. Le posizioni di misurazione sono state standardizzate e comprendevano la platea e diversi livelli dei palchi. I parametri acustici misurati includono EDT, T30, C80, D50 e LF80 in relazione alla frequenza. I risultati mostrano che il Teatro Vittorio Emanuele II è più adatto per le performance teatrali, mentre il Teatro Garibaldi è più idoneo per le performance musicali. Il Teatro Mercadante di Napoli e il Teatro Verdi di Salerno mostrano un equilibrio migliore tra le due qualità, con il Teatro di Napoli che si distingue come il migliore per l'ascolto della musica. Tutti e quattro i teatri presentano valori di STI che riflettono condizioni favorevoli per il discorso, con valori compresi tra 0,60 e 0,74.

Tronchin, Bevilacqua e Yan [10] hanno studiato il Teatro Ponchielli di Cremona, costruito nel 1808 dall'architetto Luigi Canonica e successivamente ristrutturato nel 1989. La struttura presenta una disposizione a "ferro di cavallo", con 4 ordini di logge e una galleria superiore, ospitando complessivamente 1188 posti. Il materiale predominante è il legno, utilizzato per soffitto e pareti, mentre le poltrone sono rivestite in tessuto imbottito. Lo studio presenta i risultati delle caratteristiche acustiche del teatro, ottenuti tramite misurazioni in situ e simulazioni acustiche con il software Ramsete 3.0. Le misurazioni sono state condotte con una sorgente dodecaedrica omnidirezionale posta sul palco. I parametri analizzati includono EDT, T20, C80, D50 e STI, e i risultati indicano ot-

time proprietà acustiche del teatro, adatto sia per spettacoli musicali che recitati. Simulazioni con il software hanno confermato le buone prestazioni acustiche in diverse condizioni di occupazione della sala. Infine, sono state confrontate le caratteristiche acustiche del Teatro Ponchielli con quelle del Teatro Mercadante di Napoli, del Teatro Verdi di Salerno e del Teatro Masini di Faenza attraverso appositi grafici.

Lo studio di Fausti & Prodi [11], condotto presso l'Università di Ferrara sul Teatro Municipale di Reggio Emilia, ha evidenziato come gli interventi di restauro possano modificare sensibilmente la risposta acustica dell'ambiente. Le ristrutturazioni nei teatri storici, infatti, devono essere condotte con particolare attenzione alla conservazione delle loro proprietà acustiche originarie. L'analisi comparativa dei parametri acustici prima e dopo le ristrutturazioni ha dimostrato l'importanza di un approccio metodico nella progettazione degli interventi di recupero, al fine di mantenere inalterate le qualità sonore originali.

Quaia, Bettarello e Caniato si sono concentrati sulle caratteristiche acustiche del Teatro Sociale di Rovigo e del Politeama di Como [12], entrambi esempi di teatri all'italiana realizzati in calcestruzzo armato. Il Teatro Sociale di Rovigo, con la sua struttura a ferro di cavallo su cinque livelli, offre una capacità di circa 1188 posti, mentre il Politeama di Como si sviluppa su tre piani, ospitando circa 1300 posti a sedere. I parametri acustici valutati includono T30, EDT, C80 e D50, misurati tramite un segnale sweep inviato da una sorgente dodecaedrica e con una gamma di frequenza da 20 Hz a 20 kHz. I risultati sono presentati attraverso grafici che mostrano la variazione dei valori acustici nelle diverse sezioni dei teatri. Nel Teatro Sociale di Rovigo si osserva un tempo di riverberazione uniforme e decrescente con la frequenza, risultando favorevole per spettacoli musicali e recitati. Al contrario, nel Politeama di Como i tempi di riverberazione sono più alti, indicando una preferenza per la musica rispetto al discorso parlato. Le differenze nell'acustica sono attribuite alle diverse finiture interne e alla presenza di arredi nei due teatri, nonostante entrambi siano costruiti con calcestruzzo armato.

Ancora Bevilacqua et al., [13] hanno studiato il Teatro Municipale di Piacenza, progettato dall'architetto Lotario Tomba e inaugurato nel 1804. La sala principale presenta una forma ellittica, con capacità totale di 1121 posti. In questo articolo sono state utilizzate due diverse tecniche di misurazione, la prima, più tradizionale, finalizzata alla misurazione dei parametri monoaurali e binaurali, mentre la seconda, più innovativa, finalizzata a catturare gli effetti necessari per una rappresentazione acustica per applicazioni di realtà virtuale. Nella misurazione dei parametri monoaurali e binaurali i parametri sono stati analizzati in linea con i requisiti standard stabiliti nella norma ISO 3382-1 [14]. Il segnale di eccitazione emesso dalla sorgente sonora è di tipo sweep a un livello uniforme di pressione sonora nell'intervallo tra 40 Hz e 20 kHz. Infine, i parametri riportati nell'articolo: C50, C80, D50, Ts, EDT, T20, T30, Jlf, Jlfc, Lj mostrano che il teatro è adatto sia per le performance musicali che per le rappresentazioni teatrali.

Infine, Garai et al. [15] hanno misurato le caratteristiche acustiche di undici teatri storici di piccole e medie dimensioni del nord Italia. I teatri sono accumulati dallo stesso periodo storico di costruzione (dalla fine del 1700 alla fine del 1800) e dalla stessa area geografica. Le misurazioni sono state condotte utilizzando una sorgente dodecaedrica in due posizioni all'interno del palco. I teatri possono essere sotto divisi in tre gruppi: il primo comprende i teatri con volume della sala di circa 3200 m³, il secondo gruppo è composto dai teatri di volume della sala di media grandezza, di circa 1800 m³ e l'ultimo gruppo è composto dai teatri il cui volume della sala non supera 1200 m³. I parametri calcolati in base alla norma ISO 3382-1 sono: T30, EDT, C80, Ts, G, IACCE, IACCL. I risultati calcolati definiscono in generale che le sale hanno un tempo di riverberazione T30 basso, EDT basso e valori elevati di C80, ideali per opere liriche italiane. Infine, il rapporto EDT/T30 inferiore a 1 identifica un decadimento di tipo "cliff-type" caratteristico delle sale storiche italiane.

4 | Descrizione dei casi di studio

Le sale analizzate nell'ambito dello studio sono tutte appartenenti alla tipologia del teatro all'italiana. In particolare, sono stati esaminati 9 teatri di cui 3 nella provincia di Pisa, 3 nella provincia di Livorno e i restanti 3 rispettivamente nelle province di Lucca, Carrara e Firenze.

I teatri studiati sono tra loro collegati dallo stesso territorio d'appartenenza (il Valdarno) e dalle analoghe caratteristiche architettoniche (teatri all'italiana). Il campione considerato comprende teatri costruiti dalla seconda metà del 1800 circa fino al 1900. Il più antico di questi è il teatro Animosi di Carrara risalente al 1840 mentre il più moderno è il teatro De Filippo di Cecina (Livorno) realizzato nel 1982 (Tab. 1).

Tab. 1 – Teatri oggetto di studio e loro epoca
Theaters under study and their era

Teatro	Anno
Teatro Francesco di Bartolo di Buti (PI)	1842
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca (LU)	1790
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno (PI)	1902
Teatro Animosi di Carrara (MS)	1840
Teatro Roma di Castagneto Carducci (LI)	1865
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	1864
Teatro Marchioneschi di Guardistallo (PI)	1883
Teatro De Filippo di Cecina (LI)	1982
Teatro del Popolo di Castelfiorentino (FI)	1872

Inoltre, i casi di studio analizzati si differenziano in relazione alla cubatura della sala. Infatti, il campione studiato comprende teatri con volume della sala variabili, la prevalenza dei teatri esaminati, comunque, è caratterizzata da sale il cui volume non supera i 5000 m³.

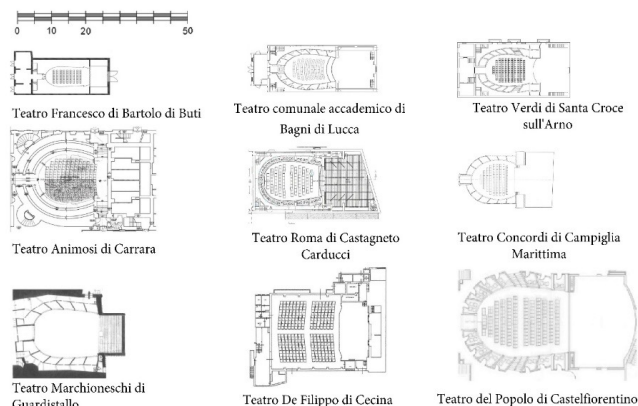


Fig. 2 – Planimetrie in scala dei teatri esaminati
Scale plans of the theatres examined

Tab. 2 – Dimensioni principali dei teatri esaminati
Main dimensions of the theatres examined

Teatro	Larghezza palco [m]	Lunghezza palco [m]	Area palco [m ²]
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	7	6	42
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	10	10	105
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	14	7	92
Teatro Animosi di Carrara	14	13	182
Teatro Roma di Castagneto Carducci	13	9	119
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	14	7	93
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	10	7	65
Teatro De Filippo di Cecina	14	7	97
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	12	12	146

Tab. 3 – Volume, posti totali e file in platea dei teatri esaminati
Volume, total seats and rows in the stalls of the theatres examined

Teatro	Volume [m ³]	Posti totali	File in platea
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	900	236	9
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	2050	304	9
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	2250	260	11
Teatro Animosi di Carrara	4550	450	13
Teatro Roma di Castagneto Carducci	2150	190	11
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	1513	207	9
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	3000	150	9
Teatro De Filippo di Cecina	3174	400	15
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	4950	354	12

Le strutture prese in esame, del resto, sono costruzioni antecedenti al XX secolo e perciò hanno subito nel corso degli anni molteplici ristrutturazioni. Nella maggior parte dei teatri, tuttavia, i restauri effettuati hanno lasciato invariate le caratteristiche originali degli edifici. Quasi la totalità dei casi in esame presenta una pavimentazione in parquet e materiali fonoassorbenti all'interno delle sale da teatro a eccezione del teatro comunale accademico di Bagni di Lucca (Lucca) in cui la pavimentazione è realizzata in calcestruzzo armato. Oltre alle comuni caratteristiche dei teatri all'italiana, il teatro il Teatro del Popolo di Castelfiorentino (Firenze), il teatro comunale accademico di Bagni di Lucca (Lucca) e il teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno (Pisa) sono accomunati da una considerevole somiglianza stilistica e architettonica, marcata soprattutto dalla presenza a loro interno del soffitto a cupola.

4.1 | Teatro Francesco di Bartolo di Buti

Il Teatro Bartolo di Buti, eretto nel 1842 e soggetto a un restauro nel 1978, si caratterizza per una pianta rettangolare e un volume di circa 900 m³. L'interno, in pieno stile del teatro all'italiana, presenta un atrio che si apre su una sala a ferro di cavallo circondata da eleganti palchi, decorati da affreschi di Giarrè. Il palcoscenico, con ampio arco scenico, è dotato di camerini nel sottopalco. La sala ospita 236 posti a sedere, mentre il palcoscenico si estende per 7 m in larghezza, 6 m in profondità e sorge a 1.15 m dalla platea.

Considerate le dimensioni limitate della sala, è essenziale garantire un tempo di riverberazione ottimale, mantenendo valori contenuti. A tale scopo, la pavimentazione è realizzata in legno di abete e le poltrone sono rivestite in tessuto. Le pareti sono in cotto intonacato mentre il soffitto convesso è decorato con affreschi. Le aperture, provviste di tendaggi in velluto, sono studiate per uniformare l'assorbimento acustico, integrando dettagli che valorizzano l'aspetto complessivo della sala.



Fig. 3 – Teatro Francesco di Bartolo di Buti
Francesco di Bartolo theater in Buti

Fonte: www.quinewsvaldera.it/buti-il-teatro-si-sposta-di-luogo-in-luogo.htm

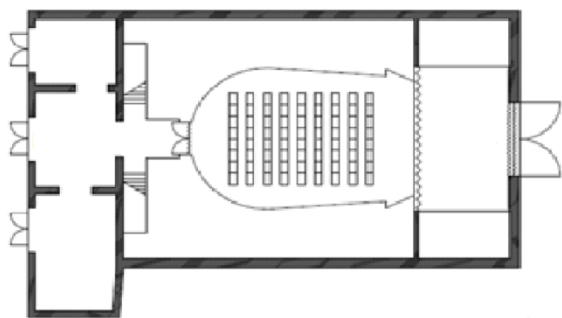


Fig. 4 – Planimetria del teatro Francesco di Bartolo di Buti
Floor plan of Francesco di Bartolo theatre in Buti

4.2 | Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Il Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca, eretto nel 1790 e oggetto di una ristrutturazione nel 1986, sorge al centro del capoluogo del Comune di Bagni di Lucca. All'esterno,

no, si presenta con un'elegante facciata articolata su due piani, ornata da lesene e sormontata da un timpano triangolare. Internamente, il teatro segue le tipiche forme dell'architettura all'italiana.

Un ampio ingresso conduce ai corridoi che conducono verso i piani superiori e alla sala principale, caratterizzata dalla tradizionale forma a ferro di cavallo, circondata da tre ordini di palchi. Dalla platea è possibile raggiungere la buca dell'orchestra, e tramite una scala laterale realizzata in legno e ferro è possibile accedere al palcoscenico, al di sotto del quale si trovano i camerini. La platea ha una larghezza di 10.30 m e una profondità di 10.20 m, offrendo un totale di 304 posti. Il palcoscenico, largo 12.50 m e profondo 8 m, contribuisce all'ampio volume complessivo del teatro, che ammonta a 2050 m³.

In seguito all'opera di ristrutturazione avviata negli anni '80, il teatro presenta ora materiali moderni che hanno sostituito le strutture originali. La pavimentazione e la volta a cupola sono state rinnovate in cemento armato, mentre le poltrone della platea e dei palchi sono realizzate in legno rivestito di velluto. L'ingresso è caratterizzato da importanti tendaggi, delle porte in legno chiudono i palchi e il corrimano del parapetto è rifinito con velluto.



Fig. 5 – Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca
The Academic Municipal Theater of Bagni di Lucca

Fonte: <https://bellabagnidilucca.com/2013/01/02/bagni-di-lucca-teatro-accademico/>

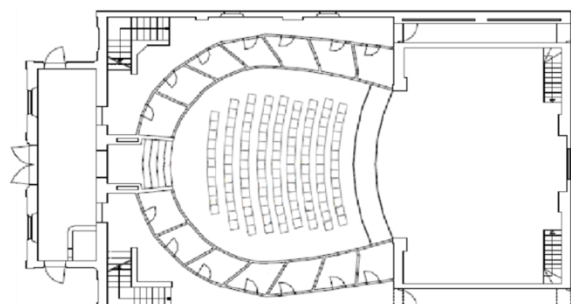


Fig. 6 – Planimetria del teatro comunale accademico di Bagni di Lucca
Floor plan of the Academic Municipal Theater of Bagni di Lucca

4.3 | Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Il Teatro Verdi, eretto nel 1902 e soggetto a un restauro nel 1983, si trova a Santa Croce Sull'Arno, nel territorio della provincia di Pisa. Ideato dall'architetto Michelangelo Majorfi, il teatro esibisce una facciata neorinascimentale. Internamente, assume la classica forma a ferro di cavallo, con tre ordini di palchi e una buca dell'orchestra, occupando uno spazio di circa 2250 m³. Il palcoscenico, profondo 6.80 m e largo 13.50 m, ha subito diverse ristrutturazioni nel corso degli anni, incluso un intervento negli anni '80 che ha rinforzato la struttura della sala, consolidato gli elementi lignei, rinnovato i camerini e adeguato gli standard di sicurezza. La capacità della sala è di circa 260 posti a sedere.

Dopo il restauro degli anni '80, sono state apportate ulteriori modifiche, tra cui l'irrigidimento della volta con resine, l'installazione di poltrone rivestite in tessuto, la posa di un pavimento in cotto, un palcoscenico realizzato in legno e l'aggiunta di un nuovo sipario in panno.



Fig. 7 – Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno
The Verdi Theater of Santa Croce sull'Arno

Fonte: www.toscanaspettacolo.it/teatro/teatro-comunale-verdi-santacrocesullarno/

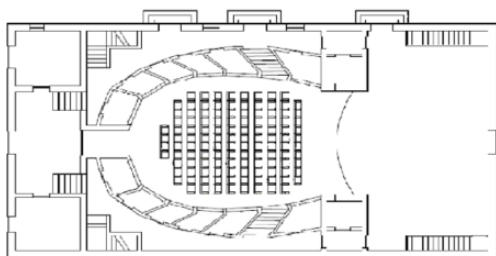


Fig. 8 – Planimetria del teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno
Floor plan of the Verdi Theater of Santa Croce sull'Arno

4.4 | Teatro Animosi di Carrara

Il Teatro, eretto nel 1840 e sottoposto a un restauro negli anni '80, si trova nella parte nord-ovest della città. Internamente, segue il tradizionale schema del teatro all'italiana, con palchi a ferro di cavallo disposti su tre ordini, loggione e palco reale

adornato da raffinati fregi marmorei. La platea, spaziosa con una larghezza di 11.50 m e una lunghezza di 13 m, si affaccia su un palcoscenico largo 14 m, profondo 13 m e alto 10 m. La capienza complessiva della sala è di circa 450 posti a sedere, con un volume totale di circa 4550 m³.

Dopo l'ultimo restauro negli anni '80, sono stati impiegati materiali moderni per conformare la struttura alle normative di sicurezza. La preesistente struttura portante in legno è stata sostituita da una nuova in cemento armato, colato in loco. La platea è stata completamente rifatta mediante l'uso di cemento, successivamente rivestito con parquet, rendendola anche resistente al fuoco. Le capriate originali del tetto sono state conservate, sottoposte a un trattamento ignifugo.



Fig. 9 – Teatro Animosi di Carrara
The Animosi Theater of Carrara

Fonte: <https://artbonus.gov.it/1538-teatro-animosi.html>

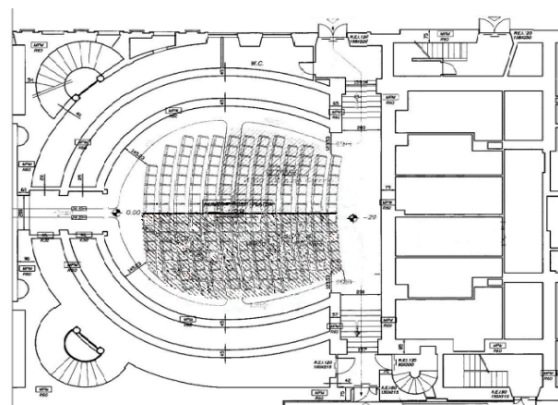


Fig. 10 – Planimetria del teatro Animosi di Carrara
Floor plan of the Animosi Theater of Carrara

4.5 | Teatro Roma di Castagneto Carducci

Il Teatro Roma di Castagneto Carducci, eretto nel 1865 e oggetto di una ristrutturazione nel 2004, presenta una sala ellittica caratterizzata da un ordine di 12 palchi e un piccolo palco "reale". La platea, con dimensioni di 9 metri per 12, offre una capienza di 154 posti, mentre il loggione sovrastante, profondo circa 2 metri e con una superficie

di 80 metri quadrati, si estende lungo tutto il perimetro dei palchi. Attualmente privo di arredi, il loggione originariamente ospitava panche lignee. Il boccascena, largo 6.30 metri e alto 5, è collocato in uno spazio di 9.20 per 12.90 metri, ampliato durante l'ultima ristrutturazione. Il prosenio, elevato di 1.30 metri rispetto al piano della platea e collegato al sottopalco e al sipario, presenta un'apertura alla Greca foderata in velluto. All'interno del vano del palcoscenico sono presenti due camerini di dimensioni 2×1.20 metri. Il soffitto e l'arcoscenico della sala, raggiungibili attraverso un foyer con biglietteria, vantano decorazioni in stile art déco realizzate dai Ciatti, una famiglia di artigiani locali. La capacità totale del teatro è di 190 posti, mentre il volume complessivo dell'edificio si attesta su 2150 m^3 .



Fig. 11 – Teatro Roma di Castagneto Carducci
The Roma Theater of Castagneto Carducci

Fonte: www.toscanaspettacolo.it/teatro/teatro-roma-castagnetocarducci/

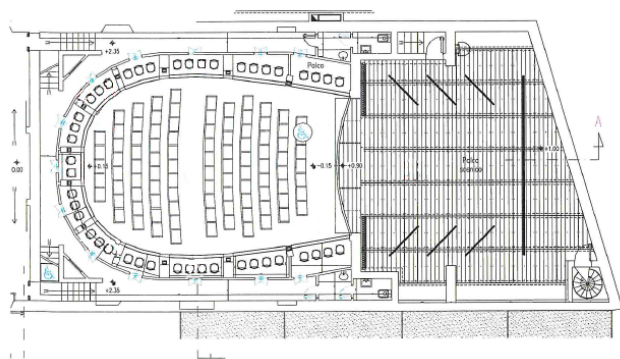


Fig. 12 – Planimetria del teatro Roma di Castagneto Carducci
Floor plan of the Roma Theater of Castagneto Carducci

4.6 | Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Il Teatro Concordi di Campiglia Marittima, eretto nel 1864 e soggetto a una ristrutturazione nel 1987, ha visto il suo restauro concentrarsi principalmente sul ripristino delle condizioni statiche, funzionali e formali dell'edificio originario, costruito nel secolo precedente. Seguendo i rigorosi principi del teatro all'italiana, la struttura dispone di platea e palchi dispo-

sti a "ferro di cavallo" su tre ordini verticali. Il palcoscenico è inclinato verso il pubblico per garantire una visione ottimale, mentre la platea sale gradualmente verso il fondo con un'inclinazione rivolta alla scena. La copertura e il pavimento del palcoscenico sono realizzati in legno. Le dimensioni della sala sono di $9.20 \times 10.20 \text{ m}$, mentre quelle del palcoscenico sono di $6.90 \times 13.50 \text{ m}$, con una superficie totale di 740 m^2 e un volume totale di 7080 m^3 . Il numero totale di posti a sedere è di 207. Il volume d'aria è calcolato sommando i contributi di platea, palchetti e palcoscenico fino ai muri perimetrali, con un valore complessivo di 1513 m^3 .



Fig. 13 – Teatro Concordi di Campiglia Marittima
The Concordi Theater of Campiglia Marittima

Fonte: www.toscanaspettacolo.it/teatro/teatro-dei-concordi-campiglia-marittima/

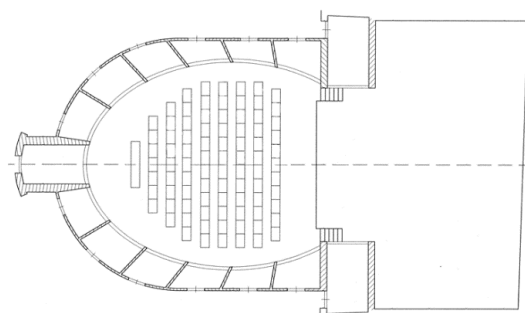


Fig. 14 – Planimetria del teatro Concordi di Campiglia Marittima
Floor plan of the Concordi Theater of Campiglia Marittima

4.7 | Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Il Teatro V. Marchionneschi, inaugurato nel 1883 a Guardistallo e restaurato negli anni '90, presenta un palco rettangolare, di legno chiaro circondato da drappi rossi che funzionano come quinte e sipario, con dimensioni di 10×6.5 metri e un'altezza di circa 7.5 metri. La platea, con poltroncine rivestite in tessuto rosso, è di forma ellittica e si estende per 10×7 metri, con un'altezza interna di 8 metri. Le dimensioni dei palchetti, è di $2 \times 2.5 \text{ m}$, con un'altezza di 2 m. La superficie totale è di 230 m^2 , con un volume totale di 3000 m^3 . La capacità del teatro è di 150 posti, distribuiti tra platea e due ordini di gallerie.



Fig. 15 – Teatro Marchionneschi di Guardistallo
The Marchionneschi Theater in Guardistallo

Fonte: www.intoscana.it/it/guardistallo-borgo-residenza-artisti/

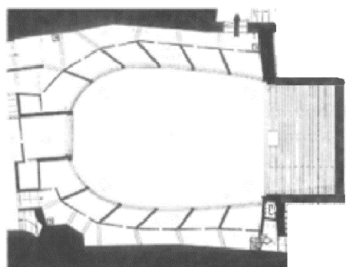


Fig. 16 – Planimetria del teatro Marchionneschi di Guardistallo
Floor plan of the Marchionneschi Theater in Guardistallo

4.8 | Teatro E. De Filippo di Cecina

Il teatro di Cecina nasce come auditorium del vicino complesso scolastico che ospitava, la sua trasformazione in teatro cittadino avviene negli anni Ottanta quando il Comune interviene per ristrutturarlo. Il teatro attualmente può accogliere solo 300 spettatori nella platea, dato che la galleria da 100 posti è inagibile a causa di problemi strutturali. Il pavimento è rivestito in linoleum, mentre pareti e soffitto sono dotati di pannelli fonoassorbenti. Il palco, con una pianta rettangolare e due piani, presenta dimensioni significative: 7.14 m di larghezza, 13.60 m di lunghezza e 7.90 m di altezza, con un volume totale di 3174 m³. La platea, con dimensioni di 16.20 m in lunghezza, 17.30 m in larghezza e un'altezza media del piano terra di 3.20 m, offre uno spazio considerevole per il pubblico.



Fig. 17 – Teatro E. De Filippo di Cecina
The E. De Filippo Theater in Cecina

Fonte: www.nuovagiovanile.it/inaugurazione-teatro-de-filippo-di-cecina/

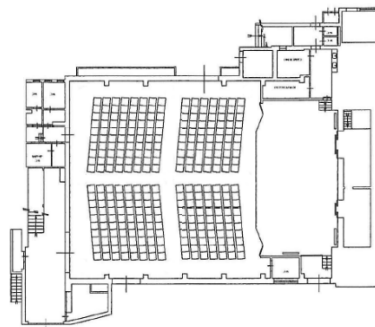


Fig. 18 – Planimetria del teatro E. De Filippo di Cecina
Floor plan of the E. De Filippo Theater in Cecina

4.9 | Teatro del Popolo di Castelfiorentino

Il Teatro del Popolo, eretto nel 1872 e successivamente restaurato nel 1929, incarna un esemplare teatro all'italiana nel centro storico del comune di Castelfiorentino, in provincia di Firenze. La struttura si presenta come un autentico teatro all'italiana, caratterizzato da una sala a ferro di cavallo, palchi distribuiti su tre ordini e un equilibrato rapporto tra la sala, il boccascena e le dimensioni del palcoscenico. La platea, con una larghezza di 11 m e una profondità di 14.30 m. è caratterizzata da una pavimentazione in parquet di rovere. La sala, che vanta tre ordini di palchi e un loggione, è dotata di tendaggi in velluto ignifugo. Il soffitto è costituito da una volta



Fig. 19 – Teatro del Popolo di Castelfiorentino
Popolo Theater in Castelfiorentino

Fonte: www.teatro.it/teatri/del-popolo-castelfiorentino-cartellone

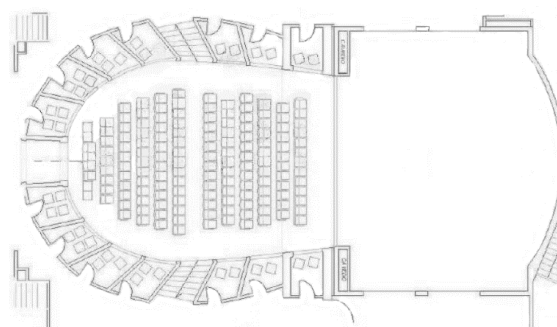


Fig. 20 – Planimetria del teatro del Popolo di Castelfiorentino
Floor plan of Popolo Theater in Castelfiorentino

sovrastata da un solaio in legno. Il boccascena, largo 8.80 m, si affianca a un palco con una larghezza utile di 12.20 m, una profondità massima di 12 m e un'altezza graticcio di 12 m. La capacità complessiva del teatro è di 354 posti, mentre la volumetria dell'edificio si attesta su 4950 m³.

5 | La metodologia applicata e la campagna sperimentale

L'analisi dell'acustica delle sale e la misurazione dei parametri acustici che le caratterizzano è stata effettuata sollecitando il sistema con un segnale impulsivo, ricavandone così la risposta all'impulso, o attraverso una sorgente omnidirezionale.

La tecnica di misura più tradizionale per ricavare la risposta all'impulso della sala è basata sulla generazione del segnale impulsivo attraverso l'uso di colpi di pistola a salve. La misurazione della risposta all'impulso della sala deve avvenire in assenza di sistemi di amplificazione accesi. Le prove sono state effettuate senza pubblico in sala (erano presenti solo gli operatori che hanno effettuato le prove), ma realizzando tutte le condizioni che si verificano durante gli spettacoli: porte chiuse, tende tirate, sipario aperto.

La risposta della sala è stata registrata utilizzando un fonometro, il microfono è sempre stato posto ad un'altezza di circa 1,20 m, corrispondenti all'altezza auricolare media degli ascoltatori seduti su poltrone tipo. Le misure sono state ripetute in diverse posizioni nella platea dei teatri esaminati [14, 16, 17].

5.1 | Teatro Francesco di Bartolo di Buti

Le indagini acustiche sono state eseguite in otto punti, di cui quattro nella platea e quattro nei due livelli dei palchi, al fine di determinare i valori di T30 e D50 (Fig. 21). La sorgente sonora è stata generata attraverso un segnale impulsivo generato dallo sparo di una pistola a salve. I parametri acustici così rilevati sono stati misurati e analizzati tramite lo strumento software "AURORA".

Le prove sono state condotte replicando le condizioni di uno spettacolo reale, con porte e tendaggi chiusi e sipario aperto. In Tab. 4 sono riportati i valori misurati durante la prova.

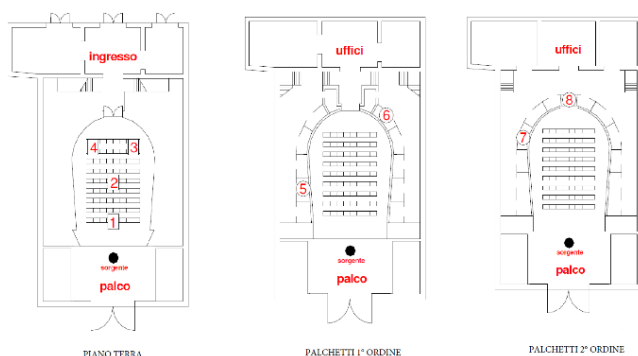


Fig. 21 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.2 | Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Le rilevazioni sono state eseguite su 29 posizioni, Fig. 22, di cui 18 nella platea disposte seguendo una griglia adeguata, mentre le restanti sono posizionate sui palchi, a un'altezza di 1.20 m dal pavimento, per determinare i valori di T20, T30, D50, C80 e EDT. Le prove sono state eseguite nella sala replicando le condizioni di uno spettacolo: porte e tendaggi chiusi, sipario aperto. La sorgente sonora, a 1.60 m dal pavimento, è generata da un segnale impulsivo ottenuto con lo sparo di una pistola a salve calibro 9 mm. Per eseguire la campagna di misurazione, è stato utilizzato il fonometro Larson-Davis modello LD824, con una scheda audio esterna Triton. I dati raccolti sono stati elaborati tramite il software Dirac. Per ciascuna posizione sono stati effettuati tre spari, e i valori riportati in Tab. 5 rappresentano la media aritmetica dei risultati di ogni singolo colpo.

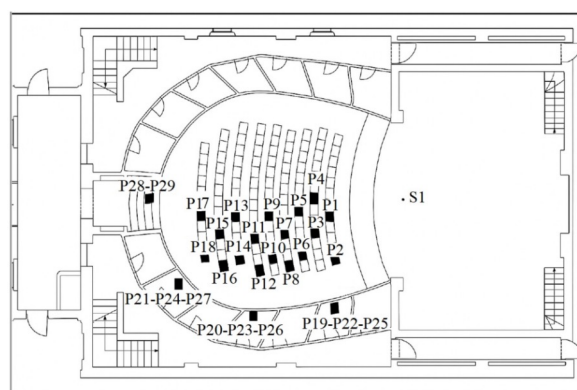


Fig. 22 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.3 | Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Le rilevazioni sono state eseguite in un totale di 29 posizioni, di cui 16 in platea e le restanti 13 distribuite tra i tre ordini di palchi, ad un'altezza di 1.20 m dal suolo, per calcolare i valori di T20, T30, D50, C80, EDT (Fig. 23). Le prove sono state condotte in una sala vuota, ricreando le condizioni che si verificano durante uno spettacolo: porte e tendaggi chiusi, sipario aperto. La sorgente sonora, posizionata a 1.50 m dal suolo, è

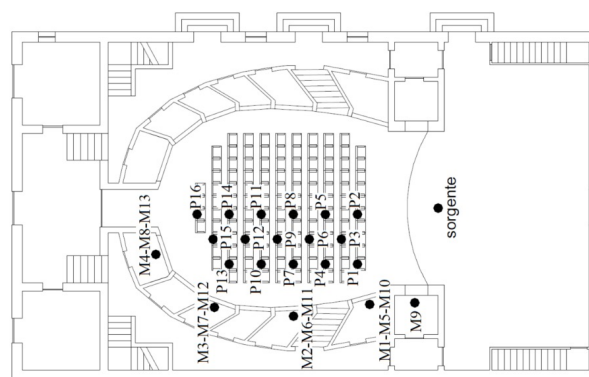


Fig. 23 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

stata generata da un segnale impulsivo ottenuto dallo sparo di una pistola a salve calibro 9 mm. La risposta è stata registrata tramite un fonometro Larson-Davis modello LD824, collegato ad una scheda audio esterna Triron. I dati raccolti sono stati elaborati tramite il software Dirac. Per ciascuna postazione sono stati eseguiti tre colpi di pistola, in modo di avere una media significativa e i valori riportati in Tab. 6 sono la media aritmetica dei risultati ottenuti da ciascun singolo sparo.

5.4 | Teatro Animosi di Carrara

Le misurazioni sono state eseguite tramite il fonometro modello 2250 della casa produttrice Brüel & Kjær su 29 posizioni di cui 17 in platea e 12 sui palchi e nel loggione, situate a un'altezza di 1,20 metri dal suolo, per determinare i valori di T20, D50, C80 e EDT (Fig. 24). Le prove sono state effettuate in una sala vuota, simulando le condizioni che si verificano durante uno spettacolo, con porte e tendaggi chiusi e sipario aperto. La sorgente sonora utilizzata è un altoparlante omnidirezionale 4292 della Brüel & Kjær e tramite il software Dirac sono stati analizzati i dati registrati.

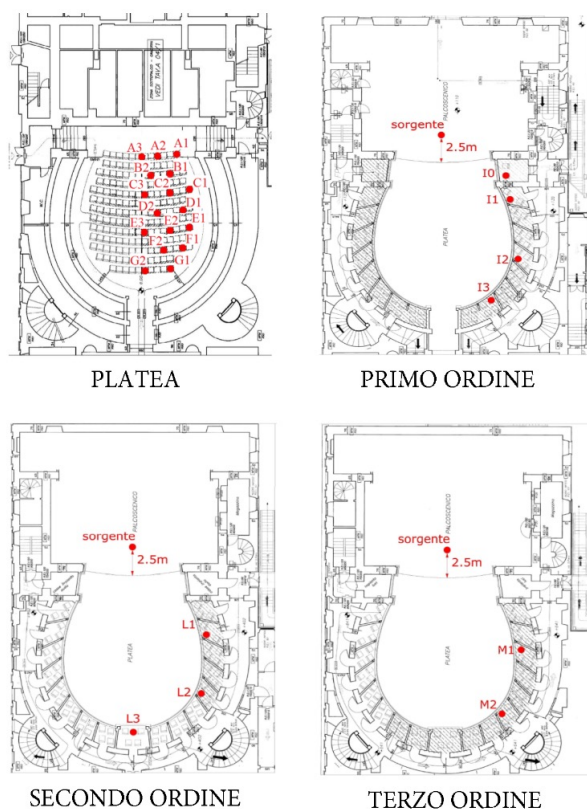


Fig. 24 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.5 | Teatro Roma di Castagneto Carducci

Le misurazioni acustiche sono state analizzate complessivamente 10 posizioni, di cui le prime 5 in platea, due sul primo ordine, una sul palco "reale" e altre due sul secondo ordine (Fig. 25). Questo approccio mira a coprire integralmente il volume del

teatro occupato dagli spettatori. Per ottenere la risposta all'impulso della sala, è stato utilizzato un segnale impulsivo mediante colpi di pistola a salve, con proiettili calibro 8. Tali misurazioni devono avvenire in assenza di amplificazione attiva. La sorgente sonora è posizionata sul palco, nel punto centrale, e sono stati determinati i valori significativi del T30 e della frequenza minima di Schroeder (48.42 Hz). La risposta è stata registrata utilizzando un fonometro (Larson-Davis) e mediante il software "AURA" sono stati analizzati i dati.

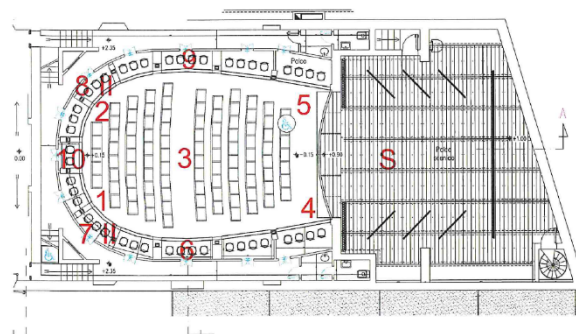


Fig. 25 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.6 | Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Per le misurazioni acustiche, sono state esaminate 23 posizioni con fonometri a 1.20 metri d'altezza: 14 nella platea, 3 nel primo ordine, 4 nel secondo e 2 nel terzo ordine di palchi (Fig. 26).

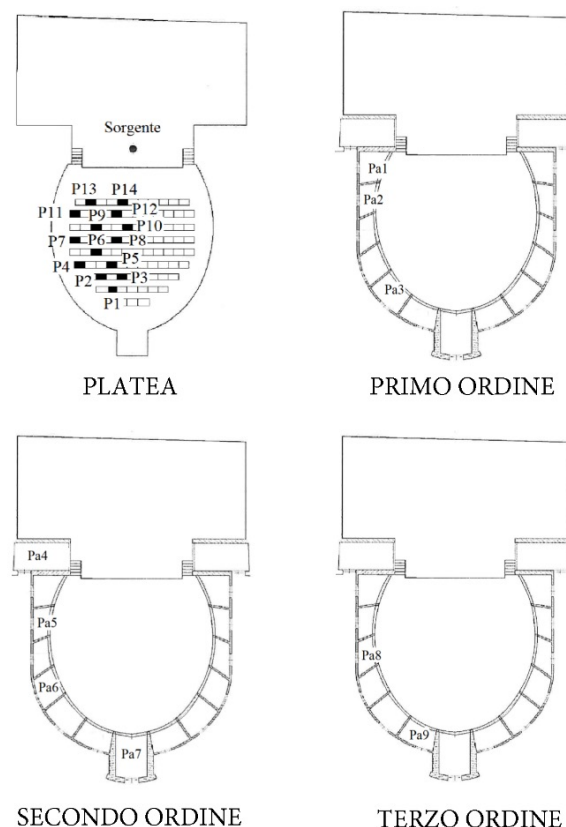


Fig. 26 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

Questo approccio mira a coprire integralmente il volume del teatro occupato dagli spettatori. Per ottenere la risposta all'impulso della sala, sono stati prodotti segnali impulsivi mediante colpi di pistola a salve, calibro 8, senza amplificazione attiva. La prova è stata condotta senza pubblico (solo con gli operatori), ricreando le condizioni degli spettacoli con porte chiuse, tende tirate e sipario aperto. La sorgente sonora, posizionata centralmente sul palco, ha permesso di determinare valori significativi come T30, D50, C80 e EDT. La risposta è stata registrata con un fonometro Larson-Davis e i dati sono stati successivamente analizzati tramite il software "AURA".

5.7 | Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Per ottenere la risposta all'impulso della sala in analisi, il segnale impulsivo è stato generato mediante l'utilizzo di colpi di pistola a salve, con proiettili calibro 8. Le 10 prove sono state condotte in diverse zone della sala, con 5 nel complesso della platea, 3 nel primo ordine di palchi e 2 nel secondo ordine di palchi (Fig. 27). Posizionando la sorgente sonora centralmente sul palco, è stato determinato il valore significativo del T30. Inoltre, è stata calcolata la frequenza limite di Schroeder, che si attesta a 48 Hz. Il fonometro Larson-Davis ha registrato la risposta, mentre l'elaborazione dei dati è stata eseguita con il software "AURA".

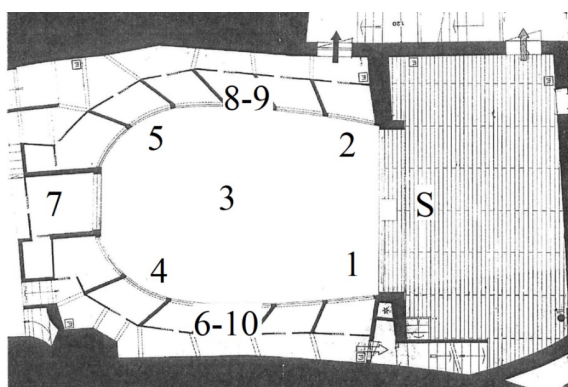


Fig. 27 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.8 | Teatro E. De Filippo di Cecina

La risposta acustica della sala è stata rilevata usando un segnale impulsivo prodotto da spari di pistola a salve, utilizzando proiettili calibro 8. Al fine di esaminare tutte le posizioni di ascolto possibili del pubblico, sono stati effettuati 11 spari, escludendo il piano superiore, inagibile e non utilizzabile dagli ascoltatori (Fig. 28). La sorgente sonora, centralmente posizionata sul palco, ha consentito di determinare il valore significativo del T30. È stata calcolata la frequenza limite di Schroeder, attestandosi a 42 Hz. Con un fonometro Larson-Davis sono stati registrati i dati e successivamente sono stati elaborati tramite il software "AURA".

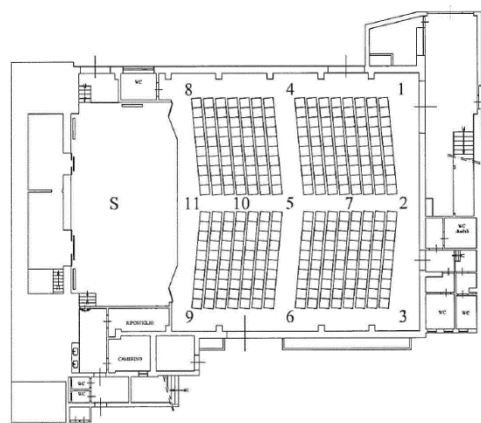


Fig. 28 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.9 | Teatro del Popolo di Castelfiorentino

Le misurazioni sono state eseguite su 38 punti distinti all'interno della sala, di cui 20 localizzati in platea e 18 distribuiti tra i palchi e il loggione, tutti posti a un'altitudine di 1.20 m dal suolo (Fig. 29). L'obiettivo era determinare i valori di T30, D50, C80 ed EDT. Le prove sono state condotte con la sala vuota, replicando le condizioni tipiche di uno spettacolo: porte e tendaggi chiusi, sipario aperto. La sorgente sonora, di tipo

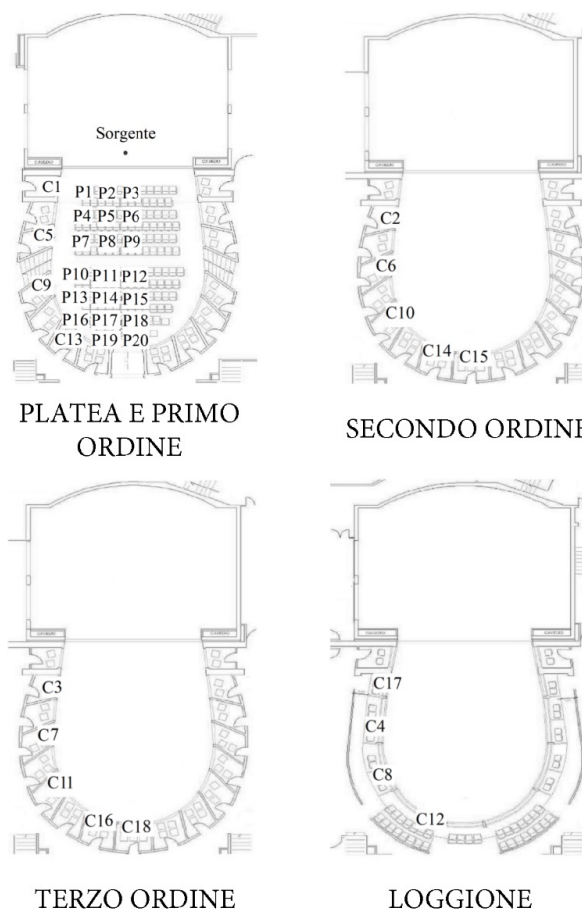


Fig. 29 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

dodecaedrico omnidirezionale, modello 4292 della casa Brüel & Kjær, è stata posizionata a un'altitudine di 1.50 m dal suolo, corrispondente alla posizione di un oratore. Il fonometro utilizzato è il modello 2250 della ditta Brüel & Kjær e i dati sono stati elaborati tramite il software "Dirac".

6 | Analisi dei risultati

6.1 | Teatro Francesco di Bartolo di Buti

Il Teatro Bartolo di Buti, con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.36$ s e un volume di 900 m³, è adatto per spettacoli di musica leggera. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. La sala offre una qualità acustica soddisfacente, con una migliore predisposizione per la musica rispetto alla prosa. I valori misurati relativi al Teatro Francesco Bartolo di Buti sono riportati in Tabella 4.

Tab. 4 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Francesco Bartolo di Buti
Measured values for various frequency bands of the Francesco di Bartolo theatre in Buti

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]
T30 [s]	1.57	1.36	1.15
D50 [%]	-	6.02	-

6.2 | Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Il teatro presenta un tempo di riverberazione di 0,85 secondi a 1000 Hz, risultando idoneo per gli spettacoli di prosa e il parlato generale, soprattutto considerando il suo volume di 2050 m³ (Fig. 30). L'indice di chiarezza (C80) mostra valori inferiori alle basse, mentre alle alte frequenze, con valori superiori a 3 dB, il campo sonoro è chiaro e più adatto all'ascolto del parlato [18]. Allo stesso modo, l'indice di definizione (D50) indica valori inferiori alle basse frequenze rispetto alle alte. In conclusione, nonostante alcune differenze, i parametri acustici

Tab. 5 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca
Measured values for various frequency bands of the Academic Municipal theater of Bagni di Lucca

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.53	1.20	0.98	0.86	0.78	0.68
T20 [s]	1.71	1.24	0.99	0.85	0.77	0.70
T30 [s]	1.84	1.28	1.01	0.85	0.78	0.71
Ts [ms]	111.37	92.21	78.19	66.05	58.53	53.90
C80 [dB]	0.86	1.72	2.59	3.95	4.81	5.70
D50 [%]	0.42	0.42	0.45	0.52	0.57	0.59

indicano che il Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca è più adatto per gli spettacoli di prosa rispetto alla musica (Fig. 30). I valori misurati relativi al Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca sono riportati in Tabella 5.

6.3 | Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Il Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno si caratterizza per un tempo di riverberazione che si colloca in un intervallo intermedio tra i valori di riferimento tipici della musica operistica e del teatro di prosa (Fig. 30). L'indice di chiarezza (C80) rivela valori inferiori alle frequenze di 125 e 250 Hz, mentre alle alte frequenze, con valori superiori a 3 dB, il campo sonoro risulta più chiaro e adatto all'ascolto del parlato. L'indice di definizione suggerisce che la sala è più idonea per spettacoli musicali alle basse frequenze e per spettacoli di prosa e parlato alle alte frequenze [18]. I valori misurati del Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno sono riportati in Tabella 6.

Tab. 6 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno
Measured values for various frequency bands of the The Verdi Theater of Santa Croce sull'Arno

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.41	1.22	0.98	0.87	0.68	0.71
T20 [s]	1.49	1.37	1.08	0.95	0.85	0.79
T30 [s]	1.57	1.38	1.10	1.02	0.86	0.79
Ts [ms]	104.01	96.00	85.04	73.02	64.02	58.04
C80 [dB]	1.67	1.19	2.25	3.31	4.39	5.01
D50 [%]	0.44	0.41	0.44	0.49	0.54	0.57

6.4 | Teatro Animosi di Carrara

Il Teatro Animosi di Carrara è adatto per spettacoli da ballo e da concerto. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. Il parametro di chiarezza C80 supera il valore di +2 per ogni frequenza, indicando una propensione favorevole al parlato. Similmente, il parametro di definizione D50 supera il valore di 0.5 nelle medie frequenze, suggerendo che il teatro sia più adatto agli spettacoli di prosa [18]. I valori misurati del Teatro Animosi di Carrara sono riportati in Tabella 7.

Tab. 7 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Animosi di Carrara
Measured values for various frequency bands of the Animosi Theater of Carrara

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.28	1.17	0.98	0.90	0.84	0.80
T20 [s]	1.50	1.32	1.11	1.05	0.99	0.87
C80 [dB]	2.25	2.34	3.73	5.05	5.34	5.74
D50 [%]	0.36	0.44	0.50	0.56	0.59	0.60

6.5 | Teatro Roma di Castagneto Carducci

Il Teatro Roma di Castagneto Carducci con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.26$ s e un volume di 2150 m^3 , è adatto per spettacoli da ballo e da concerto. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30. In conclusione, la recente ristrutturazione della sala ha comportato significativi miglioramenti nell'ascolto, sia per la musica che per la voce. I valori misurati del Teatro Roma di Castagneto Carducci sono riportati in Tabella 8.

Tab. 8 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Roma di Castagneto Carducci

Measured values for various frequency bands of the Roma Theater of Castagneto Carducci

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]	MEDIA
T30 [s]	1.68	1.10	1.00	1.26

6.6 | Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Analizzando il tempo di riverberazione del Teatro Concordi di Campiglia Marittima, notiamo che si situa tra un teatro d'opera e uno di prosa nel diagramma tempo di riverberazione-volume (Fig. 30). Questo rende la sala idonea per spettacoli di prosa, ma meno adatta per la musica operistica. Il tempo di riverberazione trovato, pari a 0.75 s a 500-1000 Hz, è infatti più vicino ai valori indicati per la prosa. Gli indici di chiarezza e definizione confermano la qualità acustica per la prosa. In sintesi, il Teatro Concordi è idoneo per spettacoli di prosa, ma miglioramenti nella riflettività sarebbero necessari per la musica operistica. I valori misurati del Teatro Concordi di Campiglia Marittima sono riportati in Tabella 9.

Tab. 9 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Measured values for various frequency bands of the Concordi Theater of Campiglia Marittima

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.09	0.91	0.71	0.63	0.61	0.60
T30 [s]	1.25	1.03	0.80	0.69	0.66	0.62
C80 [dB]	4.13	4.37	5.64	6.78	6.84	6.98
D50 [%]	0.58	0.58	0.59	0.64	0.65	0.67

6.7 | Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Il Teatro Marchionneschi di Guardistallo con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.71$ s e un volume di 3000 m^3 , è adatto per ospitare concerti di musica leggera e classica. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili

con tali eventi. I valori misurati del Teatro Marchionneschi di Guardistallo sono riportati in Tabella 10.

Tab. 10 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Measured values for frequency bands of the Marchionneschi Theater in Guardistallo

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]	MEDIA
T30 [s]	2.00	1.83	1.30	1.71

6.8 | Teatro E. De Filippo di Cecina

Il Teatro E. De Filippo di Cecina, con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.4$ s e un volume di 3174 m^3 , è adatto come sala da musica operistica e da concerto. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. I valori misurati del Teatro E. De Filippo di Cecina sono riportati in Tabella 11.

Tab. 11 – Valori misurati per bande di frequenze del teatro E. De Filippo di Cecina

Measured values for various frequency bands of the E. De Filippo Theater in Cecina

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]	MEDIA
T30 [s]	1.51	1.41	1.28	1.40

6.9 | Teatro del Popolo di Castelfiorentino

Il Teatro del Popolo di Castelfiorentino, seguendo il modello italiano, è concepito principalmente per la rappresentazione di opere teatrali incentrate sul parlato. Il Teatro del Popolo di Castelfiorentino, con un tempo di riverbero di $T_{30} = 0.84$ s e un volume di 4950 m^3 , è adatto come sala per autori del parlato. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. I valori misurati del Teatro del Popolo di Castelfiorentino sono riportati in Tabella 12.

Tab. 12 – Valori misurati per bande di frequenze del teatro del Popolo di Castelfiorentino

Measured values for various frequency bands of Popolo Theater in Castelfiorentino

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	-	-	-	0.86	-	-
T30 [s]	1.53	1.41	1.06	0.84	0.76	0.69
C80 [dB]	1.33	3.37	5.12	7.25	8.17	9.50
D50 [%]	0.40	0.51	0.62	0.71	0.74	0.80

6.10 | Ulteriori approfondimenti sui parametri acustici rilevati nei teatri

La Tabella 13 riporta una sintesi dei parametri rilevati per ciascun teatro analizzato. In particolare, la tabella riporta i valori dell'Early Decay Time (EDT), del tempo di riverberazione (T30), dell'indice di chiarezza (C80) e dell'indice di definizione (D50).

Tab. 13 – Parametri rilevati per ciascun teatro
Parameters detected for each theatre

Teatro	EDT [s]	T30 [s]	C80 [dB]	D50 [%]
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	-	1.36	-	0.60
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	0.86	0.85	3.95	0.52
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	0.87	1.02	3.31	0.49
Teatro Animosi di Carrara	0.9	1.05	5.05	0.56
Teatro Roma di Castagneto Carducci	-	1.26	0.00	0.00
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	0.63	0.69	6.78	0.64
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	-	1.71	-	-
Teatro De Filippo di Cecina	-	1.41	-	-
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	0.86	0.84	7.25	0.71

Il parametro T30 è il solo che è stato misurato in tutte le sessioni di misurazione, mentre EDT, C80 e D50 sono stati misurati solo in alcuni dei teatri esaminati.

In Tabella 14 sono elencati i teatri oggetto delle diverse indagini sperimentali con il relativo volume e il T30 rilevato.

Tab. 14 – Teatri oggetto di studio e loro caratteristiche acustiche
Theaters under study and their acoustic characteristics

Teatro	Volume [m³]	T30 [s]
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	900	1.36
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	2050	0.85
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	2250	1.02
Teatro Animosi di Carrara	4550	1.05
Teatro Roma di Castagneto Carducci	2150	1.26
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	1513	0.69
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	3000	1.71
Teatro De Filippo di Cecina	3174	1.41
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	4950	0.84

L'andamento dei parametri misurati a volte rientra tra i valori ottimali, a volte se ne discosta. Questi risultati dipendono ovviamente dal volume della sala e da quelle che sono le principali caratteristiche dei materiali presenti. Dai risultati sperimentali emerge una condizione eterogenea in termini di condizioni acustiche all'interno dei teatri toscani indagati nel corso negli anni. Dopo aver misurato i valori del tempo di riverberazione per ciascun teatro è possibile valutare quale sia la miglior destinazione d'uso tramite il grafico dei valori ottimali del tempo di riverberazione in funzione del volume della sala.

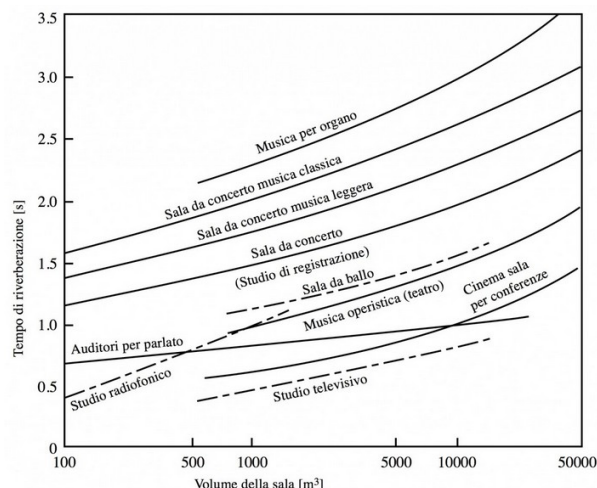


Fig. 30 – Grafico del tempo di riverbero ottimale in relazione al volume della sala e alla destinazione d'uso
Graph of the optimal reverberation time in relation to the volume of the room and the intended use

La maggior parte dei teatri presi in esame sono adatti ad ospitare concerti, in particolare il teatro Roma di Castagneto Carducci, il teatro de Filippo, il teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno, e il teatro Animosi di Carrara sono idonei come sala da musica operistica e da concerto; mentre il teatro Francesco Bartolo di Buti e il teatro Marchioneschi sono idonei per ospitare concerti di musica classica e leggera. Il teatro comunale accademico di Bagni di Lucca, il teatro Concordi di Campiglia Marittima e il teatro del Popolo, invece, a causa del basso valore del tempo di riverberazione, risultano più adatti per ospitare conferenze.

In Figura 31 è evidenziato il risultato del tempo di riverberazione T30 rappresentato in funzione volume della sala. La maggior parte dei teatri indagati hanno volumetrie significative, comprese tra i 2000 m³ e i 5000 m³, e hanno tempi di riverberazione medi molto differenti tra loro. La grande eterogeneità di valori al variare del volume della sala non è sempre in linea con i valori ottimali.

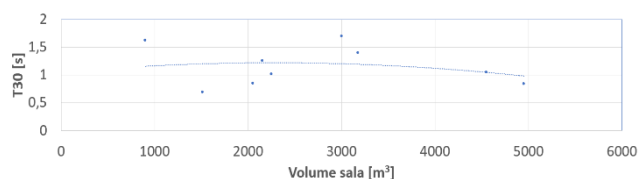


Fig. 31 – Valori di T30 in funzione del volume
T30 values as a function of the room volume

Pur nella loro variabilità, i valori di T30 risultano comunque in linea con quelli di precedenti studi [14].

7 | Discussione

L'analisi dei risultati acustici evidenzia una variazione nei valori misurati, influenzata dal volume della sala e dalle caratteristiche dei materiali utilizzati. Tuttavia, emergono alcune somiglianze tra alcuni teatri, suggerendo correlazioni interessanti.

Ad esempio, il Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca, il Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno e il Teatro del Popolo presentano una caratteristica architettonica comune, ovvero la presenza di una cupola all'interno della sala. Nonostante qualche variazione, i valori di EDT, T30 e C80 di questi teatri sono simili, sebbene il Teatro del Popolo si discosti leggermente in termini di quest'ultimo parametro. È inoltre interessante notare che nella letteratura [1] sono stati condotti studi su teatri simili come il Teatro Piccinni di Bari e il Teatro Sociale di Rovigo, che presentano caratteristiche architettoniche, anno di costruzione e volumetria analoghe a quelli analizzati nel nostro studio. La Tabella 15 riporta i teatri insieme alle loro caratteristiche.

Tab. 15 – Teatri oggetto di studio con caratteristiche architettoniche simili ad altri teatri in letteratura e loro caratteristiche acustiche

Theaters under study with architectural features similar to other theaters in literature and their acoustic characteristics

Teatro	EDT [s]	T30 [s]	C80 [dB]
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	0.86	0.85	3.95
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	0.87	1.02	3.31
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	0.86	0.84	7.25
Piccinni di Bari	1.09	1.11	3.30
Sociale di Rovigo	1.06	1.18	4.30

Inoltre, è stato notato un collegamento significativo tra i valori di EDT e T30 misurati in questa ricerca e i parametri acustici rilevati in studi precedenti [1, 9] su teatri di dimensioni analoghe. Ad esempio, i teatri esaminati, come il teatro comunale accademico di Bagni di Lucca e il teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno, mostrano una volumetria simile a quella dei teatri Vittorio Emanuele II di Benevento e il teatro Traetta di Bitonto, entrambi con un volume di circa 2000 m³. Nella Tabella 16 vengono comparati i valori di EDT e T30 di questi teatri in base al loro volume.

Tab. 16 – Confronto dei valori misurati di EDT e T30 con teatri di precedenti studi di simile volumetria

Comparison of measured EDT and T30 values with theaters from previous studies of similar volume

Teatro	Volume [m ³]	EDT [s]	T30 [s]
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	2050	0.86	0.85
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	2250	0.87	1.02
Traetta di Bitonto	1925	0.95	1.15
Vittorio Emanuele II di Benevento	2000	0.85	1.00

Infine, la stessa tendenza si riscontra per il teatro Animosi di Carrara, con un volume di circa 4500 m³, il quale presenta valori molto simili di EDT, T30 e C80 rispetto al teatro Rossini di Pesaro, il teatro Alfieri di Asti, il teatro Verdi di Salerno e il teatro del Pavone di Perugia, tutti oggetto di studi precedenti [1], con una volumetria simile. Di seguito, nella Tabella 17, sono riportati i confronti dei valori dei teatri in relazione al loro volume.

Tab. 17 – Confronto dei valori misurati di EDT, T30 e C80 con teatri di precedenti studi di simile volumetria
Comparison of measured EDT, T30, and C80 values with theaters from previous studies of similar volume

Teatro	Volume [m ³]	EDT [s]	T30 [s]	C80 [dB]
Teatro Animosi di Carrara	4550	0.90	1.05	5.05
Rossini di Pesaro	4000	0.96	1.03	5.50
Alfieri di Asti	4000	0.90	1.00	5.30
Verdi di Salerno	4500	0.96	1.07	5.20
Teatro del Pavone di Perugia	4725	1.01	1.11	4.90

8 | Considerazioni conclusive

L'articolo esamina nove teatri all'italiana che appartengono tutti alla stessa regione geografica, il Valdarno in Toscana. Inoltre, presentano una simile estetica architettonica tipica dei teatri all'italiana, caratterizzata dalla presenza di logge e dalla disposizione a ferro di cavallo all'interno dello spazio teatrale. Infine, essi risalgono a un periodo storico comune, compreso tra il 1800 e il 1900. Nonostante le molte caratteristiche comuni, i teatri presi in esame presentano significative differenze. Tra queste, spiccano le variazioni volumetriche delle sale: dal Teatro Francesco di Bartolo di Buti, con un volume di 900 m³, al Teatro del Popolo di Castelfiorentino che raggiunge i 4950 m³. Inoltre, vi sono differenze nei materiali impiegati all'interno: alcuni teatri utilizzano materiali assorbenti, indicativi di interventi di restauro mirati a migliorare l'acustica, mentre altri adottano materiali meno performanti, con conseguenti variazioni nei valori delle caratteristiche acustiche, in particolare del tempo di riverberazione T30. Va notato che altri parametri acustici come EDT, C80 e D50 non sono stati calcolati per tutti i teatri, rendendo difficile un confronto diretto. Confrontando i valori misurati con il grafico del tempo di riverberazione ottimale in relazione al volume della sala, emerge chiaramente una diversa destinazione d'uso per ciascun teatro. Dai grafici ottenuti tramite i valori del tempo di riverberazione (T30) in relazione al volume della sala, si osserva una tendenza generale a una riduzione con l'aumentare del volume. Ciò suggerisce, come evidenziato da Prodi et al. [1], che le differenze nel tempo di riverberazione dipendono più dal livello di assorbimento acustico, e quindi dai materiali presenti, che dalla geometria della sala.

Sono stati analizzati anche altri aspetti relativi alle caratteristiche architettoniche e compositive dei materiali nei teatri considerati nell'analisi. Particolare attenzione è stata dedicata al comportamento dei teatri con simili peculiarità architettoniche, analizzando principalmente la presenza delle cupole nelle sale. Si è osservato che tali elementi architettonici influenzano in modo analogo i valori di EDT, T30 e C80. Infatti, i parametri misurati evidenziano similitudini tra i teatri esaminati in questa ricerca che presentano una cupola, e quelli con caratteristiche architettoniche analoghe documentati in altre indagini [1]. Infine, è stato riscontrato un forte legame tra i valori misurati di EDT, T30 e C80 nei teatri della presente ricerca e i teatri do-

cumentati in precedenti studi [1, 9] con simile volumetria, evidenziando così l'importanza della cubatura della sala nella determinazione di tali parametri acustici. In conclusione, questo studio offre una dettagliata analisi delle proprietà acustiche dei teatri all'italiana nel Valdarno, mettendo in luce le variazioni all'interno di questa tipologia architettonica e il loro impatto sull'esperienza uditiva durante le diverse forme di spettacolo. Comprendere tali differenze è cruciale per assicurare un ambiente acustico ottimale sia per il pubblico che per gli artisti che si esibiscono in questi teatri storici.

Conclusions

The article examines nine Italian theaters, all belonging to the same geographical region, the Valdarno. Furthermore, they exhibit a similar architectural aesthetic typical of Italian theaters, characterized by the presence of loggias and a horseshoe arrangement within the theater space. Finally, they date back to a common historical period, ranging from 1800 to 1900. Despite many common features, the theaters under examination present significant differences. Among these, the volumetric variations of the halls stand out: from the Teatro Francesco di Bartolo in Buti, with a volume of 900 m³, to the Popolo Theater in Castelfiorentino, which reaches 4950 m³. Additionally, there are differences in the materials used inside: some theaters use absorbent materials, indicative of targeted restoration interventions to improve acoustics, while others adopt less performing materials, resulting in variations in acoustic characteristic values, particularly in the reverberation time T30. It should be noted that other acoustic parameters such as EDT, D50 and C80 were not calculated for all theaters, making direct comparison difficult. Through the table of measured values and the graph of optimal reverberation time relative to the volume of the hall, a different intended use for each theater clearly emerges. From the graphs obtained using the reverberation time (T30) values in relation to the room volume, a general trend of reduction is observed as the volume increases. This means that, as observed by Prodi et al. [1] the differences in reverberation time are more related to the absorption properties, and thus to the characteristics of the materials, than to the geometry of the theatre. Other aspects related to the architectural and compositional characteristics of the materials in the theaters considered in the analysis were also analyzed. Particular attention was paid to the behavior of theaters with similar architectural peculiarities, mainly analyzing the presence of domes in the halls. It was observed that such architectural elements similarly influence the values of EDT, T30, and C80. Indeed, the measured parameters highlight similarities between the theaters examined in this research that feature a dome, and those with analogous architectural characteristics documented in other investigations [1]. Finally, a strong connection was found between the measured values of EDT, T30, and C80 in the theaters of this research and theaters documented in previous studies [1, 9] with similar volumes, thus highlighting the importance of the hall's volume in determining these acoustic parameters. In conclusion, this study offers a detailed analysis of the acoustic properties of Italian theaters in the Valdarno, highlighting the variations within this architectural typology and their impact on auditory experience during different forms of performance. Understanding such differences is crucial to ensure an optimal acoustic environment for both the audience and the artists performing in these historic theaters.

Bibliografia

- [1] Prodi N., Pompoli R., Martellotta, F., Sato S.I., *Acoustics of Italian Historical Opera Houses*, J. Acoust. Soc. Am., 138 (2015), pp. 769-781. DOI: 10.1121/1.4926905
- [2] Prodi, N., Pompoli, R., *Acoustic in the restoration of Italian historical Opera Houses: A review*, J. Cult. Herit., 21(2016), pp. 915-921. DOI: 10.1016/j.culher.2016.03.004
- [3] Tronchin L., Bevilacqua A., *The Royal Tajo Opera Theatre of Lisbon: From architecture to acoustics*, J. Acoust. Soc. Am., 153 (2023), pp. 400-414. DOI: 10.1121/10.0016861
- [4] Cocchi, A., Garai, M., & Tavernelli, C. (2000). Boxes and sound quality in an Italian opera house. *Journal of Sound and Vibration*, 232(1), 171-191. doi:10.1006/jsvi.1999.2692.
- [5] Kuttruff, H., *Room Acoustics*, CRC Press, 6th Edition, (2014)
- [6] Pompoli, R., & Prodi, N. (2000). Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: Procedures and validation. *Journal of Sound and Vibration*, 232(1), 281-301. doi:10.1006/jsvi.1999.2821.
- [7] Long, M., *Architectural Acoustics*, Elsevier, 2nd Edition, (2006).
- [8] Magrini, A., Zecchin, R., Di Bella, A., Farina, A., Capra, A., Maffei, L., Iannace, G., Ianniello, C., Dragonetti, R., Cirillo, E., Martellotta, F., Masoero, M., Astolfi, A., Pompoli, R., Prodi, N., Tarabusi, V., & Tronchin, L. (2011). Caratteristiche acustiche dei teatri storici italiani: una collaborazione di ricerca tra le Università di Bologna, Ferrara, Napoli Federico II, Napoli 2, Padova, Parma, Pavia e dei Politecnici di Bari e Torino. *Convegno Teatri d'Opera dell'Unità d'Italia*, Venezia, 23 novembre 2011.
- [9] Bevilacqua, A., Sukaj, S., Ciaburro, G., Iannace, G., Lombardi, I., & Trematerra, A. (2022). How a quartet of theatres plays under an acoustic perspective: A comparison between horseshoe-shaped plans in Campania. *Building Acoustics*, 29(3), 317-329. <https://doi.org/10.1177/1351010X221080769>.
- [10] Tronchin L., Bevilacqua A., Yan R., *Acoustic Characterization and Quality Assessment of Cremona's Ponchielli Theater* Appl. Sci. 2023, 13, 4057. <https://doi.org/10.3390/app13064057>.
- [11] Fausti, P., & Prodi, N. (2002). On the testing of renovations inside historical opera houses. *Journal of Sound and Vibration*, 258(3), 563-575. doi:10.1006/jsvi.5276.
- [12] Quaia A., Bettarello F., Caniato M. *Qualificazione acustica del Teatro Sociale di Rovigo e del Politeama di Como*, Atti del 42° Convegno Nazionale AIA, Firenze 2015.
- [13] Bevilacqua A., Merli F., Armelloni E., Farina A., Farina A., Tronchin L., *Acoustic parameters of the Municipal Theatre of Piacenza shown on different ways of representation*, Conference: 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA).
- [14] ISO 3382, *Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters*, International Organization for Standardization, (1997/2009).
- [15] Garai M., Morandi F., D'Orazio D., De Cesaris S., Loreti L., *Acoustic measurements in eleven Italian opera houses: correlations between room criteria and considerations on the local evolution of a typology*, Build. Environ., 94 (2015), pp. 900-912. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.026
- [16] UNI/TS 11326-2:2015 <https://store.uni.com/uni-ts-11326-2-2015>.
- [17] Bartoli C., Salvadori G., D'Orazio T., Guattari C., Evangelisti L., Asdrubali F., *Analisi delle caratteristiche acustiche di alcuni teatri all'italiana toscani*. In: Atti del 49° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, 2023.

Riqualficazione acustica in un ambiente ristorativo: un caso di studio

Alessia Griginis^{a*} | Laura Giorgia Sorano^b | Roberto Furlan^c | Anna Sarcheletti^d

^a Vibes Srl,
Via Luigi Leonardo Colli, 10, 10128 Torino
^b ROCKWOOL Italia SpA,
Via Antonio Canova, 12, 20145 Milano
^c Acustica Scientifica e Tecnica,
Via Cambroso, 53, 35020 Codevigo (PD)
^d Studio M, Via Enna, 7, 35141 Padova
* Autore di riferimento:
alessia@vibesacoustic.com

Ricevuto: 31/7/2024

Accettato: 2/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20511

ISSN: 2385-2615

Nel contesto di una ristrutturazione mirata a migliorare l'esperienza gastronomica in un ristorante di Abano Terme, è stato effettuato uno studio approfondito sull'acustica interna. Questo articolo analizza il processo di ottimizzazione del tempo di riverberazione, un parametro chiave nella qualità dell'ambiente sonoro. Utilizzando una metodologia scientifica che include misurazioni preliminari, progettazione e implementazione di interventi acustici, e misurazioni post-intervento, sono stati identificati e risolti i problemi di riverberazione eccessiva. L'analisi ante operam ha rivelato un tempo di riverberazione superiore ai valori ottimali, causando una percezione acustica sfavorevole. Gli interventi implementati, come l'installazione di materiali fonoassorbenti e la riorganizzazione degli spazi, hanno significativamente ridotto il tempo di riverberazione, migliorando il comfort e la comunicazione all'interno del ristorante. I risultati post-intervento hanno confermato un ambiente acustico notevolmente più gradevole, con benefici tangibili sull'esperienza gastronomica dei clienti. Questo studio sottolinea l'importanza dell'acustica nella progettazione e ristrutturazione di spazi pubblici, evidenziando il suo impatto sulla qualità complessiva del servizio.

Parole chiave: riqualficazione acustica, assorbimento acustico, comfort interno, tempo di riverberazione, misurazioni acustiche

Acoustic renovation in a dining environment: a case study

In the context of a renovation aimed at enhancing the dining experience in a restaurant in Abano Terme, a thorough study of internal acoustics was conducted. This article explores the process of optimizing reverberation time, a crucial parameter for sound environment quality. By employing a scientific approach that includes preliminary measurements, the design and implementation of acoustic interventions, and post-intervention measurements, issues related to excessive reverberation were identified and addressed. The pre-intervention analysis revealed that reverberation time exceeded optimal levels, resulting in an unfavorable acoustic experience. Interventions such as the installation of sound-absorbing materials and spatial reorganization significantly reduced reverberation time, improving both comfort and communication within the restaurant. The post-intervention results confirmed a notably more pleasant acoustic environment, with clear benefits for the patrons' dining experience. This study highlights the importance of acoustics in the design and renovation of public spaces, emphasizing its impact on the overall quality of service.

Keywords: acoustic renovation, acoustic absorption, indoor comfort, reverberation time, acoustic measurements

1 | Introduzione

Nel cuore di Abano Terme, un rinomato ristorante ha recentemente completato un ambizioso progetto di ristrutturazione, con l'obiettivo di trasformare l'esperienza gastronomica dei suoi clienti. Questo intervento ha abbracciato non solo un restyling estetico e funzionale degli spazi, ma ha anche posto un'attenzione particolare su un elemento spesso trascurato ma essenziale: il comfort acustico. Un ambiente sonoro equilibrato non solo favorisce il benessere dei commensali, ma amplifica il piacere di ogni piatto servito, creando un'esperienza multisensoriale che unisce gusto e atmosfera.

Negli ultimi anni, un crescente numero di studi ha messo in evidenza come l'acustica degli ambienti di ristorazione

influenzi significativamente l'esperienza dei clienti. Ricerche condotte da Bradley e Wang [1] hanno dimostrato che alti livelli di rumore ambientale possono ridurre la percezione del gusto e della qualità del cibo, compromettendo il piacere dell'esperienza gastronomica. Parallelamente, Christensen et al. [2] hanno evidenziato che una cattiva acustica può aumentare i livelli di stress dei commensali e diminuire la loro soddisfazione complessiva.

Un parametro fondamentale nell'acustica degli spazi è il tempo di riverberazione (T60), che Hodgson (1999) [3] ha identificato come un elemento chiave per la qualità sonora di un ambiente. Un T60 eccessivo può rendere difficoltosa la comunicazione verbale, interferendo con la convivialità e il comfort acustico.

Ulteriori ricerche si sono concentrate sull'impatto delle caratteristiche acustiche sul comportamento dei clienti nei ristoranti. Ad esempio, uno studio di Chang e Chen [4] ha rivelato che un ambiente acustico ottimale non solo migliora la percezione complessiva del locale, ma può anche incentivare i clienti a prolungare la loro permanenza, aumentando così il consumo di piatti e bevande. Inoltre, Yin et al. [5] hanno analizzato la dimensione psicologica dell'acustica, dimostrando che un ambiente acusticamente confortevole favorisce il benessere psicologico e la soddisfazione complessiva del cliente.

Questo articolo si propone di approfondire il ruolo del tempo di riverberazione (T60) nella progettazione e ristrutturazione degli ambienti di ristorazione, con particolare attenzione all'analisi delle soluzioni acustiche per ottimizzare la qualità sonora e migliorare l'esperienza dei clienti.

Secondo il programma di ricerca "Quiet areas in restaurants" [6], per una buona comunicazione verbale, in particolare, il tempo di riverberazione medio (RT) nella gamma di frequenze da 500 a 2000 Hz, misurato in assenza di clienti, dovrebbe essere inferiore a un secondo e, per le persone con difficoltà uditive, non dovrebbe superare 0.5-0.6 secondi.

Il progetto è iniziato con un rilievo geometrico dettagliato degli ambienti e la misurazione contestuale della risposta all'impulso nella configurazione originaria a sala vuota. Successivamente, la condizione progettuale è stata simulata all'interno di un modello geometrico della sala, includendo l'inserimento strategico di superfici fonoassorbenti distribuite in armonia con l'architettura esistente. Questo approccio ha permesso di ottimizzare il design acustico del ristorante, garantendo un ambiente confortevole per i clienti e migliorando significativamente la qualità sonora nelle interazioni sociali.

Un elemento distintivo dell'intervento è la personalizzazione delle soluzioni acustiche in base alle specifiche caratteristiche architettoniche del ristorante, un approccio innovativo e raramente approfondito in studi precedenti. Inoltre, la ricerca si concentra su come le modifiche acustiche possano tradursi in un reale incremento della soddisfazione del cliente, migliorando non solo il comfort percepito, ma anche arricchendo l'esperienza culinaria complessiva.

Per dimostrare l'impatto dell'intervento, sono stati analizzati diversi fattori qualitativi. Dopo l'implementazione delle soluzioni acustiche, i clienti hanno riferito un aumento della percezione di intimità e tranquillità, facilitando conversazioni più fluide e significative durante i pasti. Questi miglioramenti hanno contribuito a una qualità interazionale superiore, con molti clienti che hanno descritto l'esperienza come più coinvolgente e soddisfacente. Inoltre, l'ottimizzazione acustica ha valorizzato i suoni ambientali, come le interazioni tra il personale di sala e i clienti, oltre alla musica di sottofondo, contribuendo a creare un'atmosfera che ha elevato l'esperienza gastronomica nel suo insieme. Questo suggerisce che un ambiente acustico adeguato non solo migliora il comfort percepito, ma intensifica anche l'apprezzamento sensoriale del pasto.

L'analisi dei risultati post-intervento fornisce un contributo significativo alla comprensione di come le scelte progettuali in ambito acustico possano trasformare gli ambienti ristorativi, rendendoli non solo più funzionali, ma anche più accoglienti e gradevoli per gli utenti. Questo approccio contribuisce a definire un modello di ristorazione che pone il cliente al centro dell'esperienza gastronomica.

2 | Il caso studio

Il ristorante Il Savoiaro, situato all'interno dell'Hotel Savoia di Abano Terme e fondato negli anni '80, ha saputo adattarsi ai cambiamenti del tempo, offrendo un'esperienza culinaria che combina con maestria la tradizione veneta con innovative tecniche gastronomiche. Nonostante il suo successo consolidato, l'ambiente acustico del locale – che si estende su una superficie di 320 m² con un volume di 770 m³ – presentava criticità significative: numerosi clienti avevano segnalato livelli di rumore eccessivi e una fastidiosa riverberazione che compromettevano il comfort e l'apprezzamento della proposta gastronomica.

Per affrontare queste problematiche, è stato avviato un ambizioso progetto di ristrutturazione, mirato a ottimizzare l'acustica del locale e, di conseguenza, a migliorare la qualità complessiva dell'esperienza culinaria, ponendo particolare attenzione al benessere dei commensali.

3 | Fasi metodologiche

3.1 | Misurazioni ante-operam

Sono state effettuate rilevazioni preliminari dei livelli di rumore e del tempo di riverberazione (T60) nel ristorante prima dell'inizio della ristrutturazione. Queste misurazioni hanno definito una baseline per le condizioni acustiche pre-intervento e hanno permesso di individuare le aree critiche da migliorare.

Le misurazioni sono state condotte utilizzando la tecnica "Log Sine Sweep" e strumenti conformi alle normative internazionali, come la UNI EN ISO 3382 per il tempo di riverberazione.

I risultati raccolti sono stati utilizzati per valutare le performance acustiche dello stato di fatto.

3.2 | Progettazione degli interventi

Sulla base delle misurazioni iniziali, sono state progettate soluzioni mirate per ridurre il tempo di riverberazione e ottimizzare l'ambiente acustico.

Le soluzioni hanno incluso l'individuazione di materiali fonoassorbenti specifici e la riorganizzazione spaziale degli interni per migliorare il comfort acustico e ridurre i livelli di rumore indesiderati.

3.3 | Implementazione degli interventi

Gli interventi progettati sono stati realizzati attraverso:

- l'installazione di materiali fonoassorbenti strategicamente posizionati;
- una riorganizzazione degli spazi interni, rispettando le esigenze estetiche e funzionali del ristorante;
- la selezione accurata dei materiali e delle tecniche di installazione per garantire una riduzione efficace del tempo di riverberazione e un miglioramento complessivo della qualità acustica.

3.4 | Misurazioni post-intervento

Una volta completati gli interventi, sono state effettuate nuove misurazioni per valutare i cambiamenti nell'acustica ambientale e verificare il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Le valutazioni post-intervento hanno compreso la misurazione aggiornata del tempo di riverberazione.

Sono stati utilizzati strumenti conformi alle normative IEC 61672-1, IEC 61260 e IEC 60942 per garantire la precisione dei dati.

4 | Strumenti e analisi

L'analisi acustica si è concentrata sul tempo di riverberazione (T60), che misura la persistenza del suono dopo l'interruzione della sorgente sonora, influenzando direttamente la chiarezza e il comfort acustico.

Gli strumenti impiegati per la campagna di monitoraggio acustico comprendevano:

- Fonometro NTI XL2 con Extended Acoustic Pack;
- Microfono MelLab MYc-3;

entrambi certificati per misurazioni affidabili.

Questa metodologia ha permesso di ottenere una visione dettagliata delle problematiche acustiche iniziali e di quantificare con precisione i miglioramenti apportati dagli interventi di riqualificazione.

5 | Analisi acustica dello scenario ante-operam

I locali del ristorante presentavano geometrie variabili, con proporzioni prevalentemente quadrate. Le pareti e il soffitto, rifiniti con superfici lisce e rasate, del tipo spatolato a pori chiusi su supporto in muratura o cartongesso, erano caratterizzati da una marcata riflettanza sonora [7], quasi del tutto priva di diffusione. Questa configurazione contribuiva ad aumentare significativamente il tempo di riverberazione, rendendo l'ambiente acusticamente problematico.

Gli arredi includevano tavoli e sedie con tovagliati, oltre a poltroncine imbottite rivestite in tessuto, elementi che offrivano un moderato grado di assorbimento acustico. Tuttavia, tali caratteristiche non erano sufficienti a bilanciare le proprietà

fortemente riflettenti delle superfici predominanti, favorendo così la creazione di un ambiente acusticamente sfavorevole e poco confortevole per i clienti.



Fig. 1 – Configurazione spaziale e arredi che causavano un eccessivo tempo di riverberazione

Spatial configuration and furnishings that caused excessive reverberation time

Le misurazioni acustiche effettuate prima dell'intervento di ristrutturazione hanno rilevato un tempo di riverberazione eccessivo all'interno del ristorante, con valori compresi tra 1.2 e 1.5 secondi. Questi valori, significativamente superiori agli standard ottimali per un ambiente destinato alla ristorazione, hanno evidenziato la necessità urgente di un intervento mirato a migliorare il comfort acustico complessivo del locale.

Un tempo di riverberazione così elevato contribuiva a creare una sensazione di rumore costante, che comprometteva la chiarezza della comunicazione tra i clienti e riduceva l'apprezzamento delle pietanze servite. Inoltre, tale condizione generava disagio, affaticamento e stress per il personale di sala, incidendo negativamente sia sull'esperienza dei clienti sia sulla qualità del servizio.

In Fig. 2 si riporta la pianta del ristorante con indicazione dei punti di misurazione del tempo di riverberazione.

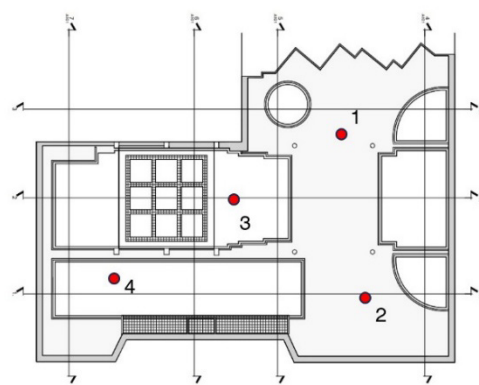
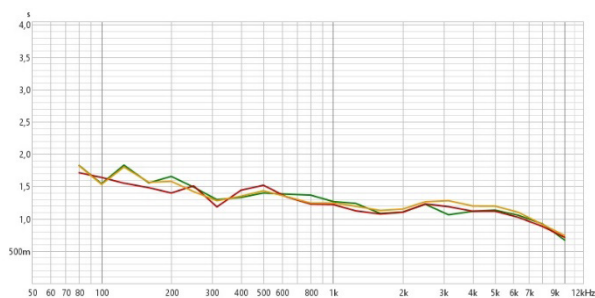
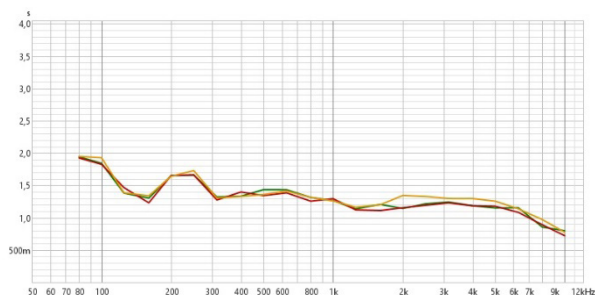


Fig. 2 – Pianta del ristorante con indicazione di punti di misura
Restaurant floor plan with measurement points indicated

In Fig. 3 si riportano i valori del tempo di riverberazione misurati nelle condizioni ante-operam nei punti 1, 2, 3 e 4.



PUNTO 1



PUNTO 2



PUNTO 3



PUNTO 4

Legenda

- T0pt ● Tempo di riverberazione ottimale
- T20 ● Tempo di riverberazione misurato su 20 dB di decadimento
- T30 ● Tempo di riverberazione misurato su 30 dB di decadimento

Fig. 3 – Valori di Tempo di riverberazione misurati ante operam
Reverberation time values measured ante operam

Dall'analisi della risposta all'impulso è stato calcolato anche l'indice di Definizione D50, che ha mostrato valori compresi tra il 35% e il 40%. Queste percentuali indicano una scarsa intelligibilità del parlato, rendendo difficoltosa la com-

prensione delle conversazioni da parte dei clienti. Tale condizione non solo comprometteva significativamente la qualità dell'esperienza gastronomica, ma aumentava anche il rischio di errori nelle ordinazioni da parte del personale di sala, costretto a richiedere ripetutamente chiarimenti sul menù.

Nel contesto di riferimento, il Tempo di Riverbero "Ottimale" è stato determinato attraverso l'analisi della pendenza della curva integrale di Schroeder, valutando contestualmente l'andamento della curva di decadimento delle prime riflessioni e i parametri T30 e T20. In condizioni acusticamente regolari, T0pt risulta coerente con T20 e T30, costituendo un indicatore utile per l'identificazione di eventuali anomalie nel decadimento dell'energia sonora nel tempo. Tuttavia, la definizione del valore ottimale non è stata vincolata alla specifica destinazione d'uso del locale, determinata invece sulla base di riferimenti consolidati in letteratura e di un confronto diretto con la Committenza.

5.1 | Obiettivi e strategie di intervento sul tempo di riverberazione

L'intervento mirato per il ristorante Il Savoiano si è posto come obiettivo principale la riduzione del tempo di riverberazione, puntando a valori ottimali inferiori a 1,00 secondo, in linea con le raccomandazioni per i pubblici esercizi.

Un ulteriore obiettivo fondamentale è stato il miglioramento dell'intelligibilità del parlato, un elemento essenziale in un ristorante per garantire ai clienti la possibilità di conversare agevolmente, senza difficoltà né disturbi causati dal rumore di fondo.

5.2 | Il progetto acustico

Nel progetto di ristrutturazione del ristorante Il Savoiano, una delle principali sfide è stata rappresentata dall'inefficienza del controsoffitto in cartongesso esistente, caratterizzato da un basso coefficiente di assorbimento acustico. Questa condizione contribuiva a un tempo di riverberazione eccessivo, compromettendo il comfort acustico e l'esperienza gastronomica dei clienti.

La definizione del progetto acustico è avvenuta attraverso un approccio metodologico basato su riferimenti normativi e letteratura tecnica di settore, tenendo conto delle effettive possibilità di intervento in relazione alle superfici trattabili e alla loro distribuzione nello spazio. Sono state inoltre considerate esperienze pregresse in locali con caratteristiche analoghe, frequentati da una clientela simile per profilo ed esigenze.

Per una corretta valutazione dell'intervento, sono state eseguite simulazioni predittive del comportamento acustico dell'ambiente trattato, con particolare attenzione alla risposta alle frequenze vocali. Tali simulazioni hanno permesso di stimare in modo accurato l'efficacia delle soluzioni progettuali prima della loro implementazione, garantendo un'ottimizzazione mirata degli interventi.

Il calcolo della superficie assorbente necessaria è stato effettuato attraverso l'applicazione delle formule classiche di Sabine ed Eyring, in combinazione con i dati sperimentali relativi

alle caratteristiche fonoassorbenti dei materiali selezionati. La scelta dei materiali è avvenuta in collaborazione con gli Architetti e la Committenza, bilanciando esigenze estetiche e funzionali con gli obiettivi di riduzione del tempo di riverberazione.

Dato l'importante valore architettonico del locale e l'eleganza richiesta, l'installazione di un controsoffitto modulare è stata considerata inadatta, poiché avrebbe introdotto un elemento visivamente invasivo, in contrasto con l'estetica raffinata del ristorante. Per questo motivo, si è optato per soluzioni più sofisticate e discrete, tra cui l'adozione di baffle acustici sospesi senza cornice, elementi acustici sospesi direttamente dal soffitto esistente, realizzati in lana di roccia con uno spessore di 40 mm e un design a intradosso curvo.

Questi interventi non solo garantiscono un miglioramento significativo delle prestazioni acustiche, ma sono stati progettati per essere facilmente smontabili, consentendo eventuali modifiche o aggiustamenti futuri senza compromettere la funzionalità né l'aspetto del ristorante.

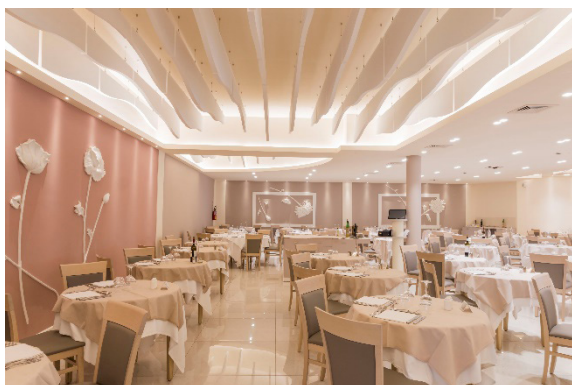


Fig. 4 – Installazione dei baffle acustici nel ristorante
Installation of acoustic baffles in the restaurant

L'ottimizzazione del posizionamento di questi elementi è stata determinata sulla base delle simulazioni acustiche, al fine di massimizzare l'assorbimento delle basse frequenze, ridurre il tempo di riverberazione e incrementare l'indice di diffusività della superficie del soffitto. Il risultato è un ambiente acusticamente più equilibrato e confortevole, capace di migliorare significativamente la qualità dell'esperienza sonora e conversazionale dei clienti.



Fig. 5 – Installazione dei baffle acustici nel ristorante
Installation of acoustic baffles in the restaurant

5.3 | L'installazione dei dei baffle acustici

L'installazione dei baffle acustici ha seguito un processo accurato, articolato in diverse fasi per garantire un'integrazione ottimale con l'ambiente del ristorante. La prima fase ha previsto la pulizia approfondita della superficie del soffitto, per assicurare una base adeguata all'installazione e prevenire problemi di adesione, garantendo al contempo la sicurezza dei fissaggi.



Fig. 6 – Fissaggio dei pendini al solaio
Fixing of suspension hangers to the ceiling slab

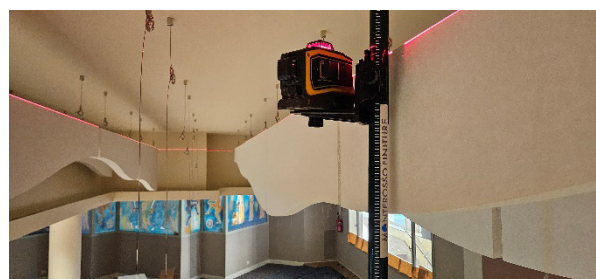


Fig. 7 – Utilizzo del laser di livello per garantire la precisione nell'installazione dei baffle acustici
Use of a laser level to ensure precision in the installation of acoustic baffles

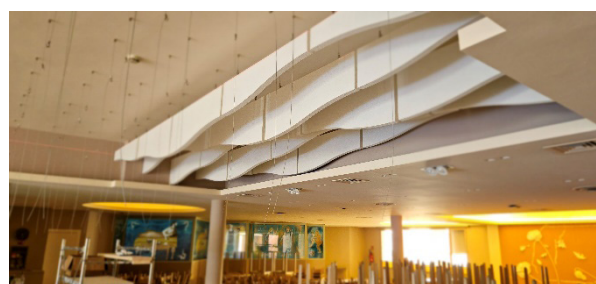
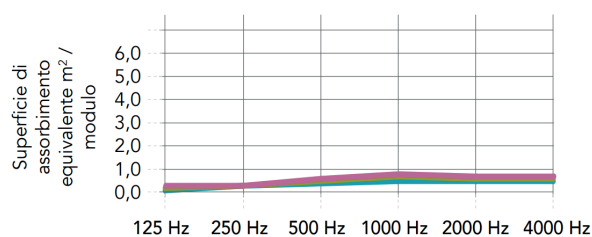


Fig. 8 – Completamento dell'installazione dei baffle acustici con design ondulato
Finalization of the installation of wave-shaped acoustic baffles

Successivamente, è stata condotta un'analisi preliminare per determinare con precisione i punti in cui posizionare i baffle. La fase di marcatura ha avuto un ruolo cruciale nell'assicurare che i baffle venissero collocati in posizioni strategiche, ottimizzando così l'efficacia dell'assorbimento acustico. La disposizione di ciascun baffle è stata pianificata attraverso simulazioni acustiche avanzate, che hanno permesso di prevedere l'impatto sul tempo di riverberazione.

Tab. 1 – Area equivalente della soluzione scelta**Equivalent Area of the Chosen Solution**

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Onda 1200x150/300x50 mm: un solo baffle (1 baffle/m²; distanza tra file: 83 cm)	0,12	0,29	0,42	0,50	0,49	0,46
Onda 1200x300/450x50 mm: un solo baffle (1 baffle/m²; distanza tra file: 83 cm)	0,24	0,32	0,52	0,66	0,62	0,63
Onda 1200x450/600x50 mm: un solo baffle (1 baffle/m²; distanza tra file: 83 cm)	0,25	0,34	0,63	0,76	0,72	0,71

Dopo aver marcato i punti precisi del solaio dove andare ad installare i pendini di sospensione dei pannelli, l'installazione è proseguita secondo le specifiche tecniche contenute nella descrizione di installazione del sistema.

Ogni baffle è stato dotato di due cappucci posizionati a 200 mm dal bordo, nei quali sono stati inseriti gli occhielli delle viti, che sono stati avvitati fino a quando la filettatura non era più visibile, con un ulteriore mezzo giro per garantire la stabilità. Successivamente, i baffle sono stati fissati all'intradosso, che è stato verificato per assicurarsi che avesse una capacità di carico di almeno 16 kg/m². Il kit di sospensione è stato poi installato, con il filo fatto scorrere nel gancio, che si blocca automaticamente per garantire la massima sicurezza.

Questa soluzione tecnica ha permesso di integrare efficacemente il controllo acustico con le esigenze estetiche del ristorante, mantenendo l'eleganza del design e migliorando la qualità acustica dell'ambiente. L'adozione di baffle senza cornice e dal design curvo ha ottimizzato l'assorbimento delle basse frequenze e migliorato la diffusione uniforme dell'energia sonora, riducendo le riflessioni indesiderate e migliorando la chiarezza del suono.

Le proprietà di assorbimento acustico dei baffle installati sono state quantificate tramite l'area equivalente di assorbimento acustico (Aeq), espressa in metri quadrati per oggetto (Tab. 1). L'area equivalente rappresenta un prodotto fittizio in grado di assorbire la stessa quantità di suono del baffle testato, con un coefficiente di assorbimento (α) pari a 1,00 su tutte le frequenze. A differenza dei controsoffitti continui tradizionali, che hanno un comportamento a membrana e vengono valutati tramite il coefficiente di assorbimento α Sabine, i baffle acustici assorbono il suono su tutta la loro superficie, inclusi i bordi. Questo comportamento è misurato secondo la norma ISO 354 [8]. I dettagli tecnici dei baffle acustici adottati sono riportati nella Tab. 1, che illustra i coefficienti di assorbimento espressi come area equivalente (Aeq).

6 | Analisi acustica dello scenario post operam

A seguito degli interventi di riqualificazione acustica del ristorante Il Savoardo, sono stati effettuati rilevamenti fonometrici di verifica, ripetendo le misurazioni condotte nella fase pre-intervento. Questi rilevamenti sono stati eseguiti negli stessi punti di

misura, utilizzando la medesima sorgente sonora e apparecchiatura, per garantire la coerenza dei dati. Per maggiore precisione, sono stati aggiunti altri due punti di misura all'interno dell'ambiente, per un totale di 6 postazioni di misura post-operam.

In Fig. 9 si riporta la pianta del ristorante con indicazione dei punti di misurazione del tempo di riverberazione.

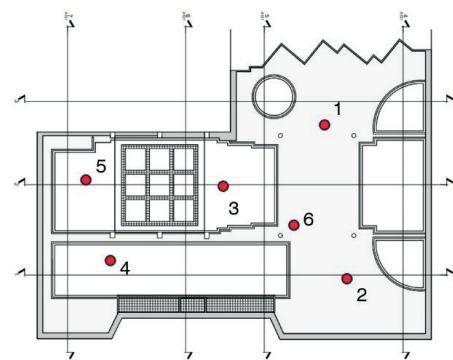
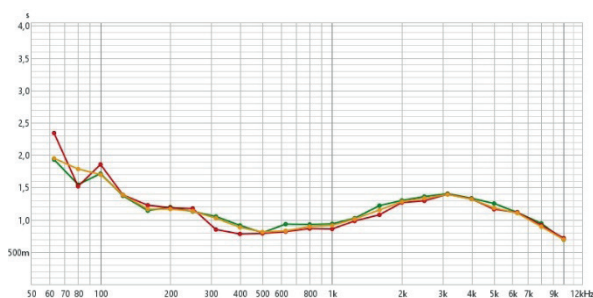


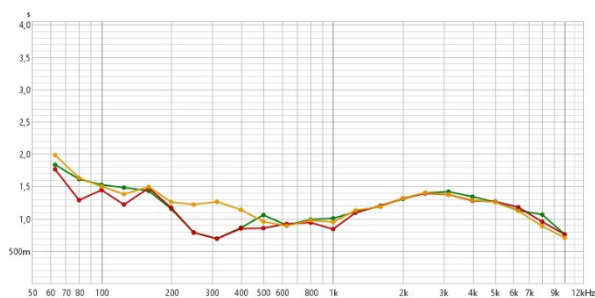
Fig. 9 – Pianta del ristorante con indicazione di punti di misura
Restaurant floor plan with indication of measurement points

I risultati delle misurazioni post-intervento hanno confermato un netto miglioramento del comfort acustico. Il tempo di riverberazione è stato significativamente ridotto, attestandosi su valori medi compresi tra 0.80 e 0.95 secondi, in linea con le previsioni progettuali. Questo intervallo è ottimale per un ambiente ristorativo, poiché elimina l'eccesso di riverbero, migliorando la chiarezza del parlato e il comfort generale. La riduzione del tempo di riverberazione ha facilitato la comunicazione tra i commensali, rendendo l'atmosfera più accogliente e funzionale.

Le nuove misurazioni hanno anche evidenziato un significativo incremento nell'intelligibilità del parlato, grazie alla riduzione del rumore di fondo e all'ottimizzazione dell'acustica interna.

In Fig. 10 si riportano i valori del tempo di riverberazione misurati nelle condizioni post-operam nei punti 1, 2, 3 e 4.

**PUNTO 1****PUNTO 2**



PUNTO 3



PUNTO 4



PUNTO 5



PUNTO 6

Legenda

- T_{opt} ● Tempo di riverberazione ottimale
- T₂₀ ● Tempo di riverberazione misurato su 20 dB di decadimento
- T₃₀ ● Tempo di riverberazione misurato su 30 dB di decadimento

Fig. 10 – Valori di Tempo di riverberazione misurati post operam
Reverberation time values measured post operam

Gli interventi realizzati, come previsto dal progetto, si sono dimostrati altamente efficaci nel correggere i principali difetti acustici riscontrati nei locali, attribuibili a dimensioni, proporzioni e caratteristiche superficiali delle pareti,

rilevati strumentalmente in loco. Questi interventi hanno sensibilmente migliorato la qualità acustica della sala ristorante, offrendo un ambiente più confortevole e fruibile per gli ospiti.

Tra i benefici principali, si segnala la possibilità di diffondere un accompagnamento musicale di alta qualità, anche dal vivo, senza interferire con la chiarezza del parlato o il comfort acustico generale. Le nuove caratteristiche acustiche hanno ridotto efficacemente il rumore di fondo, migliorando la confortevolezza della conversazione tra i commensali e creando un'atmosfera più rilassata. Questo miglioramento ha avuto un impatto positivo anche sul personale di sala, che ora opera in un ambiente meno stressante e più favorevole alla comunicazione con gli ospiti.

7 | Discussione dei risultati

I risultati ottenuti dalla riqualificazione acustica del ristorante Il Savoiano dimostrano in modo evidente l'efficacia degli interventi realizzati. Prima della ristrutturazione, il tempo di riverberazione (T₆₀) era notevolmente superiore ai valori ottimali, variando tra 1.20 e 1.50 secondi. Questa condizione creava un ambiente acusticamente sfavorevole, caratterizzato da un'elevata percezione del rumore di fondo e da una ridotta chiarezza del parlato, compromettendo l'esperienza gastronomica dei clienti e aumentando lo stress per il personale di sala.

Dopo l'installazione di baffle acustici senza cornice in lana di roccia e una riorganizzazione spaziale strategica, il T₆₀ è stato ridotto a un intervallo compreso tra 0,80 e 0,95 secondi, valori ideali per un ambiente ristorativo. Questa riduzione ha portato a un miglioramento significativo dell'intelligibilità del parlato, facilitando la comunicazione tra i commensali e creando un'atmosfera più rilassata e piacevole.

Parallelamente, l'analisi post-intervento ha registrato un miglioramento dell'indice di chiarezza (C₅₀), con valori medi compresi tra -5 dB e +5 dB nell'intervallo di frequenze tra 100 Hz e 5000 Hz in tutti i punti di misura. Questo parametro, a differenza dell'indice di Definizione D₅₀, fornisce un'informazione immediata sulla distribuzione dell'energia sonora tra le prime riflessioni e il suono riverberato, consentendo una valutazione più diretta della chiarezza del parlato all'interno dell'ambiente trattato.

Questi risultati sono stati raggiunti senza compromettere l'estetica del ristorante, grazie all'adozione di soluzioni acustiche discrete, facilmente smontabili e integrate armoniosamente con l'ambiente.

La riduzione del rumore di fondo e l'incremento del comfort acustico hanno arricchito l'esperienza culinaria dei clienti, migliorando al contempo le condizioni di lavoro del personale. Questo progetto dimostra come una progettazione acustica accurata e ben eseguita possa trasformare in modo significativo la qualità complessiva di un ambiente ristorativo, ponendo il cliente al centro dell'esperienza.

8 | Conclusioni

Il progetto di riqualificazione acustica del ristorante *Il Savoiardo* ha dimostrato come un intervento mirato e ben progettato possa trasformare significativamente la qualità di un ambiente ristorativo.

Gli interventi, basati su un'approfondita analisi preliminare, hanno accorgimenti che hanno permesso di ridurre il tempo di riverberazione a valori ottimali migliorando sensibilmente l'intelligibilità del parlato, riducendo il rumore di fondo e creando un'atmosfera più rilassata e accogliente.

Nonostante i miglioramenti acustici, l'estetica del ristorante è stata preservata grazie all'adozione di soluzioni discrete e facilmente integrabili, che hanno valorizzato l'eleganza del design. Questo equilibrio tra funzionalità e stile ha contribuito a un'esperienza culinaria superiore per i clienti e a migliori condizioni di lavoro per il personale.

In definitiva, il progetto ha dimostrato come una progettazione acustica accurata e personalizzata possa non solo risolvere problematiche specifiche, ma anche arricchire l'esperienza complessiva, confermando l'importanza del comfort acustico nei moderni ambienti di ristorazione. Il *Savoiardo* rappresenta così un modello di eccellenza, ponendo il cliente al centro di un'esperienza gastronomica curata in ogni dettaglio.

Conclusions

The acoustic refurbishment project of the restaurant *Il Savoiardo* has demonstrated how a targeted and well-designed intervention can significantly enhance the quality of a dining environment.

The interventions, based on an in-depth preliminary analysis, implemented measures that successfully reduced the reverberation time to optimal levels, significantly improving speech intelligibility, lowering background noise, and creating a more relaxed and welcoming atmosphere.

Despite the acoustic improvements, the restaurant's aesthetic was preserved through the use of discreet and easily integrable solutions, which enhanced the elegance of its design. This balance between functionality and style contributed to a superior dining experience for customers and better working conditions for the staff.

Ultimately, the project demonstrated how accurate and tailored acoustic design can not only address specific issues but also en-

rich the overall experience, underscoring the importance of acoustic comfort in modern dining environments. *Il Savoiardo* thus stands as a model of excellence, placing the customer at the center of a gastronomic experience meticulously crafted in every detail.

Bibliografia

- [1] J.S. Bradley, L. Wang, *The influence of room acoustics on the perceived quality of food in restaurants*, Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(5), 2242-2247, <https://doi.org/10.1121/1.1500498>.
- [2] D.L. Christensen, et al., *The impact of restaurant acoustics on customer satisfaction*, International Journal of Hospitality Management, 2015, 50, 66-73, <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2015.07.005>.
- [3] M. Hodgson, *Room acoustics and the dining experience: The effect of reverberation time on customer satisfaction in restaurants*, Acoustics Australia, 1999, 27(2), 50-54.
- [4] S. Chang, H. Chen, *Investigating the relationship between ambient noise and dining experience in restaurants*, Journal of Hospitality Marketing & Management, 2018, 27(7), 852-872, <https://doi.org/10.1080/19368623.2018.1471915>.
- [5] H. Yin, C. Wu, Z. Chen, *Psychological comfort and dining experience: The role of acoustic environment in restaurants*, Food Quality and Preference, 2019, 75, 98-105, <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.008>.
- [6] A. Astolfi, V. Corrado, M. Filippi, *Good acoustical quality in restaurants: A compromise between speech intelligibility and privacy*, Acta Acust. Stuttg. 89 (2003).
- [7] ISO 3382-1, *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, International Organization for Standardization, 2009.
- [8] W.C. Sabine, *The Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere*, Journal of the Acoustical Society of America, 1922, 1(4), 263-265.
- [9] ISO 354, *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, International Organization for Standardization, 2003.
- [10] L. Lococciolo, *Riqualificazione acustica del TEX – Il Teatro dell'Ex Fadda*, Rivista Italiana di Acustica, 2022, 46, 51-59.
- [11] J. Jasper, *Architectural Acoustics: Principles and Design*, CRC Press, 2014.
- [12] C. Davis, *Sound System Engineering*, Focal Press, 2007.
- [13] B.C.J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing*, Academic Press, 2012.

Acoustic comfort and fit-out in open space offices: considerations based on a real case assessment

Andrea Giglio^{a*} | Walter Tiano^a

^a Deerns Italia SpA,
Via Monte Rosa, 91, 20149 Milano

* Corresponding author:
andrea.giglio@deerns.com

Ricevuto: 22/3/2025

Accettato: 23/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20512

ISSN: 2385-2615

Multiple activities in open offices lead to multiple sound sources that can negatively affect users. In response, an approach has been developed that considers objective parameters, subjective perception, and architectural solutions. However, common practice reveals interferences between these areas, causing poor acoustic design. This paper aims to identify these interferences by analyzing a real case. Objective parameters (STI, RT, and $L_{Aeq,T}$) were measured and evaluated according to EN ISO 3382-3 and BS ISO 22955. A synthesized GABO questionnaire was distributed to identify the most annoying sound sources. The results show that compliant STI and RT do not lead to low annoyance levels from understandable and unintelligible speech. Compliant noise levels are still perceived as annoying for all activities. Additionally, the position of functions can affect how sources are perceived differently. This highlights the need for multi-criteria analysis to analyze and overcome these interferences and ensure high acoustic comfort.

Keywords: acoustic comfort, open offices, fit-out, architectural acoustics

Il confort acustico e il fit-out degli uffici open space: considerazioni basate sull'analisi di un caso reale

La presenza di più attività negli open offices comporta più sorgenti sonore che possono avere effetti negativi sugli utenti. In risposta, è stato sviluppato un approccio che considera parametri oggettivi, percezione soggettiva e soluzioni architettoniche. Nella pratica comune, però, si riscontrano delle interferenze tra tali ambiti che, se non risolte, causano una progettazione acustica scadente. Tale paper intende identificare tali interferenze tramite l'analisi di un caso reale. I parametri oggettivi (STI, RT e $L_{Aeq,T}$) sono stati misurati e valutati rispetto alla EN ISO 3382-3 e alla BS ISO 22955. Una versione sintetizzata del questionario GABO è stata distribuita per identificare le attività più disturbate. I risultati mostrano come, STI e RT ottemperanti non comportino un basso livello di fastidio del parlato comprensibile e non comprensibile. Valori di rumorosità ottemperanti sono comunque percepiti fastidiosi per tutte le attività. Inoltre, la posizione tra le funzioni può avere effetti diversi sul modo in cui le sorgenti sono percepite. Ciò evidenzia la necessità di analisi multi-criteriali per analizzare e superare tali interferenze e garantire un elevato comfort acustico.

Parole chiave: confort acustico, open offices, fit-out, acustica architettonica

1 | Introduction

Open offices enhance exchanges between colleagues and facilitate all team-based organisational work.

Several activities conducted in the same space increase the number of disruptive sources – such as ringing telephones, conversations over the phone, face-to-face discussions, typing on computer keyboards, office equipment, and more – that negatively impact cognitive performance in tasks like mental arithmetic [1], learning associated words or text [1,2], mental workload and visual/auditory attention [3], and both text comprehension and memorisation [4,5]

These disturbances appear more significant based on the task being performed rather than solely on the source type. Jones and Macken (1995) demonstrate that the number of errors in a short memorisation task decreases with the presence of additional voices during the task [6]. The level of annoyance

due to noise increases with the task's difficulty [7,8], and the distraction mainly arises from the intelligibility of speech [9,10].

Individual factors, such as general sensitivity to noise, can also account for the level of annoyance experienced in an open workspace [11]. Some studies indicate that individuals who are generally more sensitive to noise report feeling more exposed and thus more bothered by it [12,13]. For this reason, it is crucial to view the working environment holistically when assessing sound quality.

The first attempt to account for the relative loudness perceived by the human ear was defined by the A-weighted curves [14]. Still, the previous studies have demonstrated that dB(A) is insufficient to describe human perception.

For this reason, several methodologies have been developed for this aspect. The BS ISO 22955:2021 (hereinafter BS ISO 22955) proposes the GABO model (Gene Acoustique dans les Bureaux Ouvrés) [15] questionnaire to assist com-

panies in complementing objective noise intensity measurements with employees' subjective evaluations of their physical working environment. The model comprises 67 questions grouped into four specific dimensions: general perception of the working environment, perception of the noise environment, general perception of noise, and health assessment. BS ISO 2955 defines a methodology for designing acoustic comfort in existing or new open spaces. It outlines five activities that could be undertaken in open spaces, specifies the objective metrics and targets for each, and presents architectural and technological solutions that aid in achieving those targets [16].

1.1 | Application in current practice: problem

Achieving optimal indoor acoustic comfort in open space offices involves balancing clients' budgets and requests alongside targets set by law or voluntary protocols (such as LEED, BREEAM, and Well). This balancing also requires integration with various technical disciplines, including MEP (Mechanical, Electrical, and Plumbing), architecture, and structural engineering, while considering installation factors at the building site. The most challenging aspect in current practice is to find a compromise among all those aspects, even if the literature does not present a consistent methodology for finding and solving those clashes. Acoustic comfort in open spaces is achievable by balancing several targets, which can challenge the acoustic designer to respond clearly to clients and architects. This paper seeks to identify these conflicts by evaluating the open space of an international engineering firm's headquarters and analysing the impact of noise on activities related to the space's architectural features.

2 | Methodology

The paper's aim requires to be developed on a case study since no references have been found in literature at the state of this paper.

The study requires a survey of the space to identify the main geometrical characteristics (volume, area, height) and the acoustic materials. The acoustic measurements were run according to UNI 3382:3 and BS ISO 22955. Lastly, a questionnaire has been performed to characterise the sample and understand the annoyance level caused by the noises of the activities.

2.1 | Case study architecture

The selected case study represents a typical open space of an engineering firm featuring several types of functional spaces.

The company's main organisational structure consists of discipline-based departments assembled in the workplace. The workplaces alternate between collaborative spaces, phone booths, meeting rooms, and informal meeting areas (Fig. 1). Those are organised in the main longitudinal zone separated by two corridors.

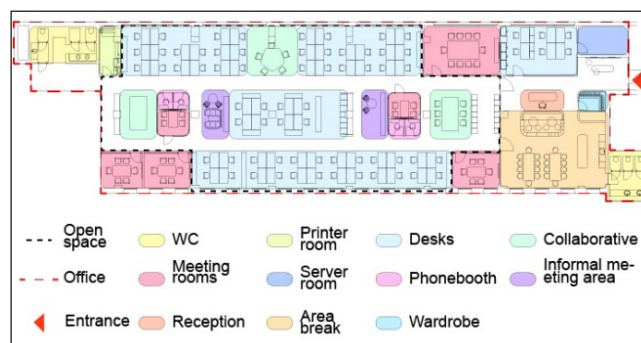


Fig. 1 – Functional zoning
Aree funzionali

Due to the existing countershaft and MEP distribution, there are no plasterboard partitions in the central area of the open office. Therefore, small meeting rooms and phone booths have lower ceilings than the net floor height.

According to BS ISO 22955, the activity categories identified in the open space are communication outside the room (via calls, etc.) (hereinafter Activity n° 3) and collaboration among individuals at nearby workstations (hereinafter Activity n° 4).

Additional activities are proposed based on observations of each employee's main tasks. These activities include:

1. Text understanding (Activity n° 1);
2. Writing (emails, reports, etc.) (Activity n° 2);
3. Digital modelling (including 3D BIM, 3D simulations, etc.) (Activity n° 5);
4. Design-related activities (Activity n° 6).

Activity n° 4 matches these activities, while tasks associated with design phases (Activity n° 6) fall under Category Two. The maximum targets equivalent weighted A sound pressure level during activity for these new activities are assigned according to the BS ISO 22955 standards (Tab. 1).

Tab. 1 – Targets of Weighted A sound pressure level during activity per activity

Valori massimi di livello di pressione sonora ponderati
 $A L_{Aeq,T}$ durante le ore di lavoro

Activity number	Activity typology	Target $L_{Aeq,T}$ (dB(A))
1	Text understanding	40
2	Text writing (email, report, etc.)	40
3	Communication outside the room (via calls, etc.)	55
4	Collaboration among individuals at nearby workstations	52
5	Digital modelling (including 3D BIM, 3D simulations, etc.)	40
6	Design activities	48

The acoustic materials in the space are textile-based panels on the desks, moquette and wool fibre panels placed in some of the perforated panels of the chilled beams. Table 2 shows the α_w for each material.

Tab. 2 – Absorption coefficient of acoustic materials
Coefficienti di fonoassorbimento dei materiali acustici

Furniture/ position	Material	Absorption coefficient α_w
Chair	Textile	0.4
False ceiling	Perforated panels with mineral wool panel	0.8
Pavement	Moquette	0.3
Desk screen	Textile	0.7

2.2 | Measurements

The measurements aim to evaluate descriptors representing the open space's sound sources. Speech intelligibility and background noise are measured according to ISO 3382 part 3, which necessitates defining both a direct and an indirect path to establish measurement points.

The paths are determined based on the need to characterise the various spaces with distinct architectural features (Fig. 2). Path n° 1 goes through the area near the façade with a high window-to-wall ratio (WWR) and features a single collaborative desk (identified with id Col B) at the centre.

Path n° 2 is defined in the central area of the open space. It presents the lower number of workspaces bounded by shelves. Between the desks and the collaborative desk C, an informal meeting area, a cluster compounded by two phone-booths, and a meeting room are located.

Path n° 3 is defined along the third longitudinal area, with a lower WWR and no collaborative desks. Path n° 4 is determined to go from path n° 3 to path n° 1, passing through the second path. STI and equivalent weighted-A sound pressure level measurements have been performed with a specific STI speaker (NTI TalkBox) that simulates a human talker (60 dB(A) at 1 meter according to IEC 60268-16) with the STIPA test signal and spoken messages [17]. The background noise during the activity is measured with an SPL meter over an 8-hour session from 9 am to 5 pm [16]. The measurements are performed in three different positions of the open space chosen, one in each area. Since the attendance at the open space is not constant, they are run three times a week. The Reverberation time is

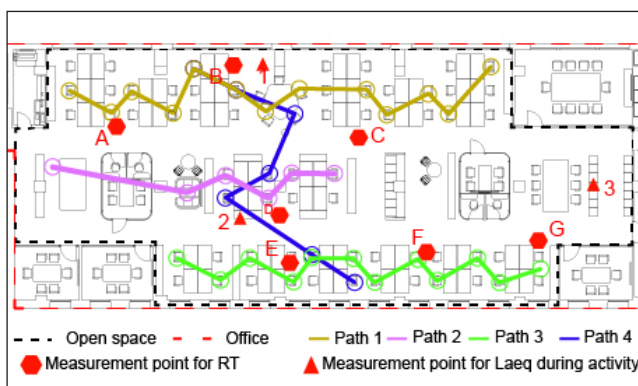


Fig. 2 – Measurement points and paths
Punti e percorsi di misura

measured by generating a sound sweep with an omnidirectional speaker and placing the microphone at the most representative points. The measurements are performed with calibrated microphones and processed by the Soundbook MK I (Fig. 2).

2.3 | The questionnaire

The questionnaire aims to understand the general assessment of the open space and the relationship between the noise sources and the activities. The shared questionnaire is based on the GABO model but with some adjustments. The number of questions has been reduced to 32 to encourage employees to respond, which takes 5 minutes rather than 15 minutes.

The content addressed the participants' overall assessment of the surrounding environment in the workstation from which they answered and the evaluation of various sound sources according to the activities to be executed.

Three sections compound the survey:

- General information for a demographic characterisation of the user sample and using the frequency of the workstations;
- The perception of the space quality;
- The perception of the most disturbing noises per activities.

The first section concerns eight closed-ended questions. The second section concerns ten questions evaluated with a five-point Likert scale (from "less satisfied" to "very satisfied"), and the last section concerns five questions assessed with a seven-point scale (from "less disturbing" to "very disturbing"). Four more open-ended questions are presented in several sections (for asking about the motivations behind the answer or writing a general comment).

The first section concerns questions about the age and gender involved (Q1 – Q2), the workstation ID, and the time the questionnaire is answered.

For the habits of the open space, the questions consider the frequency per week of office work and the preferred workspace.

For the overall perception of the environment, the questionnaire asks for an evaluation (on a scale from "less satisfied" to "most satisfied") of noise (Q12), concentration (Q13), lighting comfort (Q14), position of the workstation (Q15), private conversation possibility (Q16), thermic comfort (Q17), furniture quality (Q18), and view of external areas (Q19). These five noise sources are presented in the literature as the main sources of noise annoyance in open offices [18,19], and they are also mentioned by the employees interviewed during the semi-structured interviews carried out before the questionnaire.

For the individual sound sources perception, the questionnaire involved evaluating the most disturbing sound sources and the most disturbed activity (scale from "less disturbing" to "most disturbing") for air terminal units (Q20), unintelligible speech (Q21), intelligible speech (Q22), colleagues' walk (Q23), and noise given by working facilities (such as clicking the mouse or tapping the text board).

In the end, two questions aim to evaluate the general noise level (Q30) and the level of noise disturbance (Q31). A final open question asks for a voluntary comment (Q32).

2.4 | Correlation analysis

The correlation between the acoustic environment and architecture is established by aggregating the results into spatial clusters. For the purpose of this paper, the open space is divided into nine clusters, each representing a specific number of desk seats and specific architectural characteristics and position (Fig. 3).

Initially, Pearson’s correlation coefficient (*r*) between age, gender, use habits and overall perception of noises was estimated. The Pearson correlation measures the strength of the linear relationship between two variables. It has a value between -1 and 1 , with a value of -1 meaning a total negative linear correlation, 0 being no correlation, and $+1$ meaning a total positive correlation. The results show that the overall perception is not affected by age ($r = 0$), gender ($r = 0.13$), and the number of working days at the office per week ($r = 0.05$).

The reliability coefficient (Cronbach’s alpha) was estimated for evaluating noises, indicating acceptable data reliability [20] for the annoying perception of noises (0.7) and the overall quality of the open space (0.68). In the end, observations about achieving targets for objective metrics concerning the users’ answers are presented.

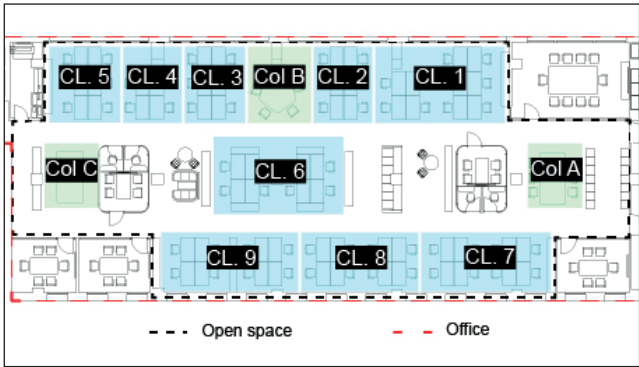


Fig. 3 – Clusters and Collaborative desks ID
Codice identificativo ID dei raggruppamenti di scrivanie
e delle aree collaborative

3 | Results

3.1 | Measurement results

The following paragraphs present the results of the objective parameters and the evaluation according to the targets: reverberation time, background noise and sound transmission index.

3.1.1 | Reverberation time RT

The measured values do not comply with the regulation requirements. The BS ISO requires a maximum value of 0.5 s (as arithmetic means between 250 and 4000 Hz) and 0.8 s at 125 Hz for space activities 2, 3, and 4. These activities are mostly executed in the area where the measurements are performed. None of the values comply with the RT means, and only in clusters eight and nine is the RT at 125 Hz fulfilled (Fig. 4).

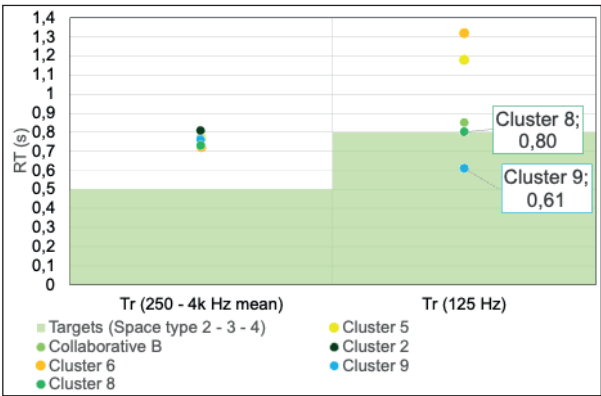


Fig. 4 – Reverberation time values
Valori di tempo di riverbero

3.1.2 | Background noise during activity $L_{Aeq,T}$

The measured values are 51 dB(A) in the Collaborative B (position 1), 49 dB(A) in the Cluster 6 (position 2), and 52 dB(A) in the Collaborative A (position 3). The BS ISO specifies a requirement for a value below this threshold. Among all the compliances, the background noise in Cluster 6 does not meet the request for activity, primarily due to a limited amount of collaborative work. The average background noise value during activity is compliant only for activities focusing on remote communication (by phone call) (Tab. 3).

Tab. 3 – Comparison between workstation noise level during activity and targets per activity type

Comparazione tra il livello di fondo durante le attività lavorative e i valori massimi secondo la BS ISO 22955

$L_{Aeq,T}$ (dB(A))	Target per activity type (dB(A))					
	1	2	3	4	5	6
50	≤40	≤40	≤55	≤52	≤40	≤48

3.1.3 | Distraction and privacy distance

The ISO 3382-3 defines distraction distance as the distance from the source where the STI is 0.5. The privacy distance is the distance from the source where the STI is 0.2.

Path 1’s STI values are measured at eight workstations (Fig. 5). Six out of eight positions present STI higher than 0.5. Position 7 and position 8, a distance higher than the distraction distance (12.4 metres from the receiver), have a value

lower than 0.5. With this linear regression, the privacy distance is 28.8 m from the source (Fig. 5).

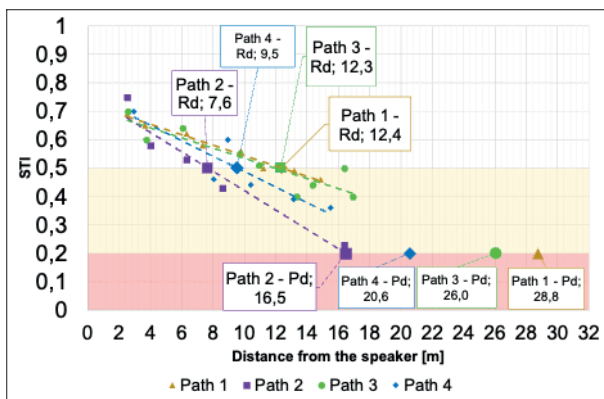


Fig. 5 – STI, distraction distance Rd and privacy distance Pd
Valori di STI, distanza di distrazione e distanza di privacy

In the second path, the presence of shelves with a height of 1.7 m, a meeting room, two phone booths and a sofa for informal meetings affect the STI values consistently the therefore the results (Fig. 5). Point 5 (measurement point at the collaboration desk C) shows a significant decrease in the STI value, almost achieving the privacy distance (16.5 m). Position 4 (corresponding to the area for informal meetings) is after the distraction distance (7.6 m) with an STI value lower than 0.5. The third path corresponds to clusters seven to nine. The distraction path is 12.3 m, and the privacy distance is 26.0 m, according to the linear regression of measured STI values. Four out of nine workstations have an STI higher than 0.5. (Fig. 5). The fourth path goes through the three previous lines. Most STI values are lower than 0.5 since they are more distant than the distraction distance (9.5 m).

3.2 | Questionnaire results

Eighty-six samples were collected during the survey, representing 79% of the total employees. The most frequently selected workplaces are in clusters 3 and 5, along with Collaboratives A and C. Most questionnaires were completed between 9:00 and 13:00 (52%), during which the LAeq is 50 dB(A).

3.2.1 | Sample's characterisation and office-using habits

The initial section of the questionnaire shows that most respondents identify as male (72%). In comparison, females comprise 28%, and non-binary individuals comprise 0% (Fig. 6a). A significant portion, 45%, of participants are aged between 25 and 34, and 27% fall into the 35 to 44 age range (Fig. 6b). Regarding office usage habits, 91% of respondents have previously worked in open spaces, while 9% do so for the first time (Fig. 6c). On average, 47% work in the office three days a week, 26% four days, and 13% five days per week (Fig. 6d).

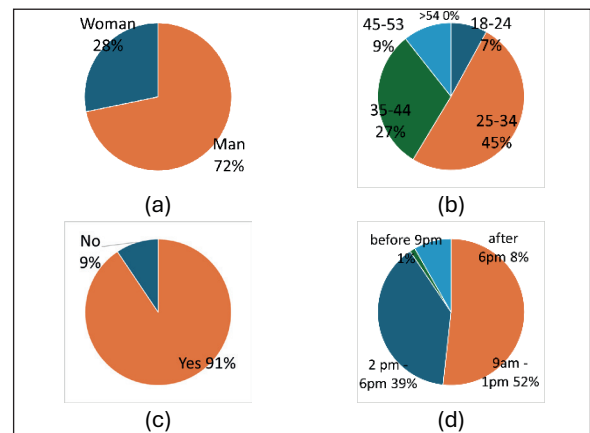


Fig. 6 – Answers of a) gender, b) age, c) first experience in open space working, and d) time slot of the answers

Risposte in percentuale circa a) genere, b) età c) prima esperienza lavorativa in un open space e d) orario in cui è stato compilato il questionario

3.2.2 | Evaluation of overall space quality

Fig. 7 illustrates the distribution of respondents' evaluations regarding overall space quality. The space is generally perceived as positive, particularly regarding the workstation area and furniture quality. The "workstation position" indicates the ability to access office facilities (meeting rooms, phone booths, and workstations). It received a satisfaction rating of 49%, indicating a 4 out of 5, and 33% reported being very satisfied. The category "furniture quality" refers to the quality of objects in the workstation (desk, chair, monitor, etc). The satisfaction rating is 42% for level 4 out of 5 and 41% for very satisfied. The categories rated negatively are the view of external areas and private conversation. The office is on the ground floor with a horizontal plan with windows in the most extended faces. One side faces a service street, the other a greenery. The most negative rates come from the cluster close to the first side. The category most rated negatively is the possibility of having a private conversation. 22% of the answers rate the space as less satisfying, and 28% rate the space as 2 out of 5.

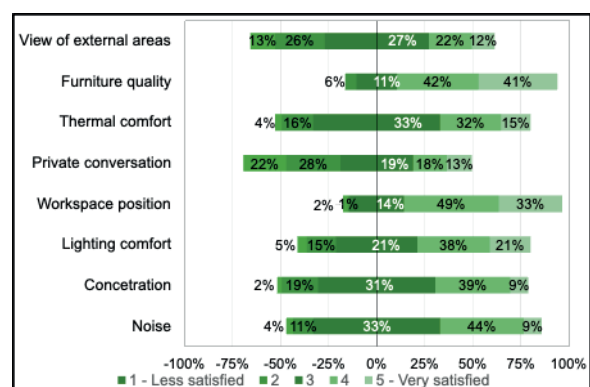


Fig. 7 – Space quality satisfaction

Percentuale di soddisfazione della qualità dell'open space

3.2.3 | Perception of noise sources

The questions about the most annoying sound sources highlight that users passing by and working facilities are positively perceived. The working facilities are the sources tuned by physical tools that enable the works' activities (such as mouse clicking and board texting). The most annoying sound source is comprehensible speech. 24% of the respondents rated the category 5 out of 7, 17% 6 out of 7, and 19% very annoying (Fig. 8).

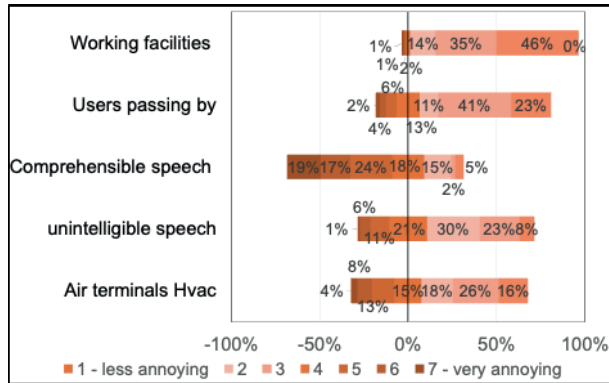


Fig. 8 – Annoyance and sound sources
Percentuale di disturbo causato da specifiche sorgenti

4 | Discussion

4.1 | Correlation between annoyed task, sound source, measured SPL by cluster, and architecture features

In cluster 1, the main sources of annoyance are unintelligible speech and colleagues' walking, with an average of 6.9 at the 90th percentile. They affect all activities, even if the measured SPL fulfils the target for calls with externals (Activity n° 3, green box) and activities with collaboration between people at the nearest workstation (Activity n° 4, dark green box) (Fig. 9).

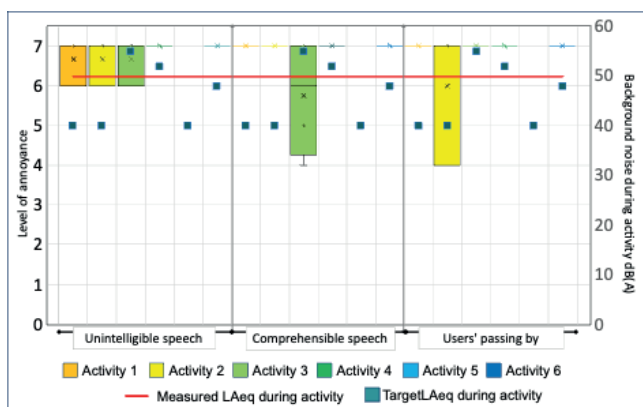


Fig. 9 – Level of annoyance per activity perceived due to unintelligible and comprehensible speech and users' passing by in cluster 1

Livello di disturbo percepito per attività dovuto al parlato comprensibile, non comprensibile e al passaggio nel cluster 1

Cluster 1 is the first cluster that most users have to pass by to get to the different areas of the open space. Moreover, it is close to the entrances of two meeting rooms. It is reasonable to think that the high level of annoyance caused by comprehensible conversations, unintelligible conversations, and colleagues walking are affected by this position. The 30% of reflective material characterises the cluster, and moquette has the higher equivalent area, but it has the lower absorption coefficient. Nevertheless, the Tr (125 Hz) complies with the BS ISO 22955 (Fig. 4).

In cluster 2, the most highly rated annoying sources, such as comprehensible conversation and users passing by, affect activities 1, 2, and 3. The other sources moderately affect the activities. Cluster 2 is in between collaborative desk B and cluster 1. The highly reflective material in the false ceiling (less than 20 %) defines a Tr(125 Hz) compliant but totally out of range for Tr(250-4000 Hz mean) (Fig. 4).

In cluster 3, the noise from the air terminal moderately annoyed activities 1 and 2, and in this case the SPL was higher than the targets expected for activity number 4. Unintelligible speech is, on average, perceived as annoying rather than comprehensible. The colleagues' walking is moderately annoying.

Cluster 4 has the most disturbing noise, attributed to the air terminal, with a rating of 4 out of 7. This observation applies to all activities. The other sources moderately affect various activities.

In Cluster 5, air terminal noise is evaluated as more annoying than unintelligible speech for calls with externals (Activity n° 3, green box). The terminals' noise is rated on average between 4 and 7 as a level of annoyance, bringing the 90th percentile to 6. Nevertheless, the measured background noise (50 db (A)) meeting the target (55 db (A)). Among the sources, comprehensible conversations are perceived as the least annoying for all activities compared to other sources. On average, the most annoying activity is the text understanding (Activity n° 1, orange box) (Fig. 10).

The effect of the close collaborative desk C can justify the high annoyance given by comprehensible speech at cluster 5. In this cluster, the percentage of absorption materials is less than 20% as the mineral wool panels are not present in all the perforated panels in the false ceiling.

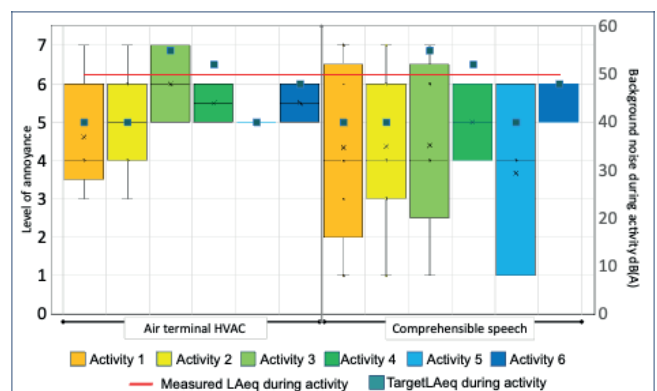


Fig. 10 – Level of annoyance per activity perceived due to unintelligible and comprehensible speech and users' passing by, in cluster 5

Livello di disturbo percepito per attività dovuto alla rumorosità degli impianti e al parlato non comprensibile nel cluster 5

In cluster 6, the most annoying activity is related to text comprehension (Activity n° 1, orange box) averagely rated 5 out of 7, due to unintelligible conversations (Fig. 11). In this case, the measured background noise during the activity is 10 dB(A) higher than the target (40 dB(A)). The least annoying activity is communication call (activity n° 3, green box) a rate of three out of seven, which means all the sound sources. The measured value is lower than the target (55 dB(A)) in this case.

Cluster 6 is the most enclosed cluster: the 1.2 m high shelves separate the desks from the corridors, with one collaborative desk and one informal meeting area. The mineral wool panel in the false ceiling covers 50% of the available area in this area.

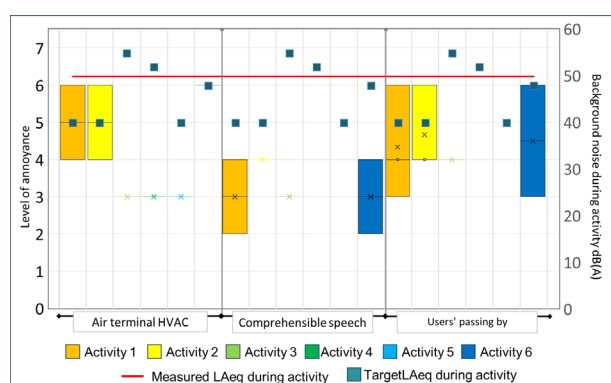


Fig. 11 – Level of annoyance per activity perceived due to unintelligible and comprehensible speech and users' passing by, in cluster 6

Livello di disturbo percepito dovuto al parlato comprensibile, rumorosità degli impianti e il passaggio dei colleghi nel cluster 6

Cluster 7 is close to collaborative desk A, the entrance of a meeting room, and two phonebooths. Moreover, it is the second closest cluster to the entrance after cluster 1. Nevertheless, no sources consistently annoy the activities. Activity n° 4 is the most annoying, with a four out of seven rate. The cluster presents a higher number of mineral wool panels in the false ceiling.

The answers from cluster 8 present a wide range of rates for most activities. Considering the 90% percentile, activity n°1 is the most annoyed by air terminal noise, and the second is mainly annoyed by comprehensible conversations.

Cluster 9 presents a low annoyance of almost all the activities' sources. The most annoying part was the non-comprehensible conversation during the fourth activity. The cluster is between two meeting rooms and the informal meeting area. The latter is compounded by a couch that creates an enclosed space. The conversation from this space can be perceived but not understood.

5 | Conclusions

The paper aims to evaluate the relationship between the acoustic environment of an open office and the fit-out project. The acoustic environment is assessed by integrating objective

room acoustics parameters. The paper highlights reverberation time, background noise during activities, and the sound transmission index among these parameters. The decision to include these parameters is supported by extensive literature that identifies comprehensible and unintelligible speech as the most disruptive noises in open spaces. This was also indicated by the questionnaire conducted to gauge perceptions of the overall acoustic quality of the open space and the impact of specific sound sources on frequently performed activities. The architectural features of the fit-out that are primarily studied by cluster include the percentage of absorptive and reflective materials and their positioning within the layout.

The results reveal that the targets established by one relation (higher than or lower than a specific value) do not effectively simplify the evaluation process of acoustic comfort. A compliant RT may not lead to negative perceptions of air terminal noise or intelligible speech, even if the STI meets the target (cluster 1). In this regard, developing scale-based rating systems for each parameter and then creating a unified index could enhance acoustic comfort design and play a more significant role in the overall design process of the open space.

From an architectural standpoint, the layout and positioning of the functions are crucial in defining acoustic comfort. The relationship between the positioning of the cluster and the perception of noise impact on activities depends on the surrounding functions. In the closest cluster to the entrance (cluster 1), the annoyance level of colleagues passing by is rated more annoying than in the cluster where the flow of walking is minimal (cluster 5). This comparison considers identical architectural features in terms of the quantity of absorptive material. Meeting rooms and collaborative desks can heighten the negative perception of comprehensible speech at the work desk, even if the STI adheres to standards.

Moving forward, clarifying these correlations can enhance the acoustic comfort design of open spaces by facilitating smoother communication with stakeholders in the design process, particularly architects. Furthermore, applying this methodology to a larger sample of case studies could help to find more correlations.

Conclusioni

L'articolo si propone di valutare la relazione tra l'ambiente acustico di un ufficio open space e il fit-out. L'ambiente acustico è valutato integrando parametri oggettivi come il tempo di riverberazione, il rumore di fondo durante le attività e il sound transmission index (STI). La decisione di considerare questi parametri è supportata da un'ampia letteratura che identifica il parlato comprensibile e non intelligibile come i rumori più fastidiosi negli spazi open space. Ciò è emerso anche dal questionario condotto per valutare la percezione della qualità acustica complessiva dell'open space e l'impatto di specifiche fonti sonore sulle attività svolte. Le caratteristiche architettoniche, studiate principalmente per cluster (ossia aree con le medesime caratteristiche spaziali e materiche) comprendono la percentuale di materiali assorbenti e riflettenti e il loro posizionamento all'interno del layout.

I risultati rivelano che i parametri stabiliti da una relazione (superiore o inferiore a un valore specifico) non semplificano efficacemente il processo di valutazione del comfort acustico. Un valore di tempo di riverbero conforme può coincidere con una percezione negativa del rumore dei terminali impiantistici o del parlato intelligibile, anche se il valore dello STI è soddisfatto (cluster 1).

Dal punto di vista architettonico, la disposizione e la collocazione delle funzioni sono fondamentali per definire il comfort acustico. La relazione tra il posizionamento del cluster e la percezione dell'impatto acustico sulle attività dipende dalle funzioni circostanti. Nel cluster più vicino all'ingresso dell'open space (cluster 1), il livello di fastidio del passaggio dei colleghi è valutato in modo più negativo rispetto al cluster in cui il flusso è minimo (cluster 5). Questo confronto considera caratteristiche architettoniche identiche in termini di quantità di materiale assorbente. Le sale riunioni e le scrivanie collaborative possono aumentare la percezione negativa di un discorso comprensibile alla scrivania, anche se l'STI rispetta gli standard.

In futuro, chiarire queste correlazioni può migliorare la progettazione del comfort acustico degli uffici open-space, facilitando l'interscambio di informazioni con gli altri attori del processo di progettazione, in particolare con gli architetti. A questo proposito, lo sviluppo di sistemi di valutazione basati su scale per ogni descrittore e la successiva creazione di un indice univoco potrebbero migliorare la progettazione del confort acustico e riuscire ad incidere in modo più significativo nel processo di progettazione dello open space. Inoltre, l'applicazione di questa metodologia a un campione più ampio di casi studio potrebbe contribuire a identificare nuove correlazioni.

6 | Acknowledgement

The authors thank the engineering firm Deerns Italia for accepting the use of the office as a case study and the employees who answered the questionnaires. Furthermore, the authors thank the acousticians Renzo Sonzogni, Leonardo Locciolo (Soning Ingegneria), and Studio Ambiente for supporting the measurement phase.

Bibliography

- [1] S. Banbury, D.C. Berry, Disruption of office-related tasks by speech and office noise, *British Journal of Psychology* 89 (1998) 499–517. <https://doi.org/10.1111/J.2044-8295.1998.TB02699.X>.
- [2] D.C. LeCompte, Extending the Irrelevant Speech Effect Beyond Serial Recall, *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 20 (1994) 1396–1408. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.20.6.1396>.
- [3] M.J. Jafari, R. Khosrowabadi, S. Khodakarim, F. Mohammadian, The Effect of Noise Exposure on Cognitive Performance and Brain Activity Patterns, *Open Access Maced J Med Sci* 7 (2019) 2924. <https://doi.org/10.3889/OAMJMS.2019.742>.
- [4] C.J.P. Oswald, S. Tremblay, D.M. Jones, Disruption of comprehension by the meaning of irrelevant sound, *Memory* 8 (2000) 345–350. <https://doi.org/10.1080/09658210050117762>.
- [5] I. Knez, S. Hygge, Irrelevant speech and indoor lighting: Effects on cognitive performance and self-reported affect, *Appl Cogn Psychol* 16 (2002) 709–718. <https://doi.org/10.1002/ACP.829>.
- [6] D.M. Jones, W.J. Macken, Phonological Similarity in the Irrelevant Speech Effect: Within- or Between-Stream Similarity?, *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 21 (1995) 103–115. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.1.103>.
- [7] A. Kjellberg, Noise annoyance during the performance of different non auditory tasks, *Percept Mot Skills* 73 (1991) 39. <https://doi.org/10.2466/PMS.73.4.39-49>.
- [8] L. Mayiwar, T. Hærem, Open-office noise and information processing, *Journal of Managerial Psychology* 38 (2023) 404–418. <https://doi.org/10.1108/JMP-03-2023-0140>.
- [9] L. Brocolini, E. Parizet, P. Chevret, Effect of masking noise on cognitive performance and annoyance in open plan offices, *Applied Acoustics* 114 (2016) 44–55. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2016.07.012>.
- [10] A. Ebissou, E. Parizet, P. Chevret, Use of the Speech Transmission Index for the assessment of sound annoyance in open-plan offices, *Applied Acoustics* 88 (2015) 90–95. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2014.07.012>.
- [11] Open-plan office density and environmental satisfaction - NRC Publications Archive - Canada.ca, (n.d.). <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=b5008ea2-42b7-40ae-ae93-ff6bb70279ce> (accessed March 16, 2025).
- [12] J.J. Hurrell, M.A. McLaney, Exposure to job stress—a new psychometric instrument., *Scand J Work Environ Health* 14 (1988) 27–28.
- [13] M. Pierrette, C. Marquis-Favre, J. Morel, L. Rioux, M. Vallet, S. Viollon, A. Moch, Noise annoyance from industrial and road traffic combined noises: A survey and a total annoyance model comparison, *J Environ Psychol* 32 (2012) 178–186. <https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2012.01.006>.
- [14] IEC 61672-1:2013 | IEC, (n.d.). <https://webstore.iec.ch/en/publication/5708> (accessed March 16, 2025).
- [15] M. Pierrette, P. Chevret, Gène acoustique dans les bureaux ouverts (GABO), (2019) 27. <https://doi.org/10.34894/VQ1DJA>.
- [16] ISO 22955:2021 - Acoustics – Acoustic quality of open office spaces, (n.d.). www.iso.org/standard/74237.html (accessed March 16, 2025).
- [17] ISO 3382-3:2022 - Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices, (n.d.). www.iso.org/standard/77437.html (accessed March 16, 2025).
- [18] M. Pierrette, E. Parizet, P. Chevret, J. Chatillon, Noise effect on comfort in open-space offices: development of an assessment questionnaire, *Ergonomics* 58 (2015) 96–106. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.961972>.
- [19] E. Sundstrom, J.P. Town, R.W. Rice, D.P. Osborn, M. Brill, Office Noise, Satisfaction, and Performance, *Environ Behav* 26 (1994) 195–222. <https://doi.org/10.1177/001391659402600204>.
- [20] M. Tavakol, R. Dennick, Making sense of Cronbach's alpha, *Int J Med Educ* 2 (2011) 53. <https://doi.org/10.5116/IJME.4DFB.8DFD>.

Resoconto del Simposio internazionale AIA “Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia”

Gioia Fusaro^{a*} | Massimo Garai^a

^a Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Bologna,
Viale Risorgimento, 2, 40136 Bologna

* Autore di riferimento:
gioia.fusaro@unibo.it

Ricevuto: 30/5/2025

Accettato: 30/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20513

ISSN: 2385-2615

Il 30 gennaio 2025 si è tenuto a Bologna il Simposio Internazionale “Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia”, organizzato congiuntamente da AIA Giovani e Dipartimento di Ingegneria Industriale di Bologna. L'evento ha coinvolto studenti, ricercatori e aziende per esplorare soluzioni acustiche innovative e sostenibili come materiali riciclati, biobased e metamateriali. La giornata ha incluso presentazioni scientifiche, testimonianze professionali e un'intensa sessione di networking con speed dating tra giovani e imprese. L'iniziativa ha promosso lo scambio tra ricerca e industria, con un forte focus su innovazione, carriera e sostenibilità.

Parole chiave: acustica sostenibile, innovazione nei materiali, metamateriali, networking professionale

Report on the AIA International Symposium “Innovative Materials in acoustics: between sustainability and technology”

On 30 January 2025, the International Symposium “Innovative Materials in Acoustics: Between Sustainability and Technology”, jointly organised by AIA Giovani and the Department of Industrial Engineering of Bologna, was held in Bologna. The event involved students, researchers and companies to explore innovative and sustainable acoustic solutions such as recycled and bio-based materials and metamaterials. The day included scientific presentations, professional testimonials and an intensive networking session with speed dating between young people and companies. The initiative promoted exchange between research and industry, with a strong focus on innovation, careers and sustainability.

Keywords: sustainable acoustics, innovation in materials, metamaterials, professional networking

1 | Introduzione

Il 30 gennaio 2025 si è tenuto a Bologna, presso l'Aula Magna della Scuola di Ingegneria dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, il Simposio Internazionale dal titolo “Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia”. L'evento, promosso dall'Associazione Italiana di Acustica (AIA) e in particolare dal gruppo AIA Giovani, ha goduto del supporto scientifico e organizzativo del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) e del patrocinio dello EAA Young Acousticians Network (YAN) e dell'International Congress in Acoustics (ICA).

Il simposio ha rappresentato un appuntamento di grande rilievo per la comunità scientifica e tecnica attiva nel settore dell'acustica applicata, con un focus specifico sulle nuove generazioni di esperti: studenti universitari, dottorandi, giovani ricercatori e giovani professionisti. Il comitato organizzatore era composto da Massimo Garai, Luca Barbaresi, Gioia Fusaro e Louena Shtrepi, con la collaborazione di Simona Senesi della segreteria AIA.

L'obiettivo principale del simposio è stato quello di mettere in connessione scienza, tecnologia e sostenibilità attraverso la discussione delle più recenti innovazioni nel cam-

po dei materiali per l'acustica: materiali riciclati, biobased e metamateriali, analizzandone le potenzialità nella gestione avanzata del suono e nella riduzione dell'impatto ambientale. Il simposio ha inteso anche incentivare il dialogo tra ricerca e industria, stimolando il confronto diretto tra chi sviluppa nuove soluzioni e chi le applica concretamente.



Fig. 1 – L'apertura dei lavori del Simposio Internazionale
The opening of the International Symposium

2 | Descrizione della giornata e del progetto

La giornata si è aperta alle ore 9:00 con la registrazione dei partecipanti, seguita alle 9:30 dall'apertura ufficiale dei lavori e dai saluti istituzionali, a cura del Presidente dell'AIA Patrizio Fausti e del Prof. Massimo Garai, che ha introdotto gli obiettivi del simposio e ha sottolineato l'importanza di investire nella formazione e nella crescita delle nuove generazioni di esperti di acustica.

Prima sessione – Sui materiali innovativi

La prima sessione, a pagamento e accreditata per il rilascio di 3 Crediti Formativi Professionali (CFP) per ingegneri, geometri e periti, si è svolta tra le ore 10:00 e le 13:00, articolandosi in due momenti principali: i) materiali per l'acustica sostenibili; ii) metamateriali acustici. La sessione è stata moderata dal Prof. Massimo Garai.

La prima parte, dalle 10:00 alle 11:30, è stata dedicata alla teoria e applicazioni di materiali ad alto contenuto di riciclato e biobased. Le presentazioni scientifiche sono state affidate a tre giovani ricercatori di spicco:

- Chiara Rubino (Politecnico di Bari) ha presentato studi su materiali biobased per l'isolamento acustico, evidenziando le caratteristiche tecniche e i vantaggi ambientali rispetto ai materiali tradizionali.
- Philippe Glé (CEREMA – Université Gustave Eiffel) ha discusso i criteri di sostenibilità applicati alla progettazione acustica dei materiali da costruzione.
- Andrea Santoni (Università di Ferrara) ha approfondito il potenziale di alcuni materiali riciclati per applicazioni edilizie con prestazioni acustiche competitive.

Dalle 12:00 alle 13:00 si è tenuta la seconda parte della sessione, focalizzata sui metamateriali acustici, una frontiera emergente della scienza dei materiali. Le presentazioni scientifiche sono state affidate ad altri tre giovani ricercatori di spicco:

- Sebastiano Cominelli (Politecnico di Milano), che ha illustrato il funzionamento dei metamateriali a struttura periodica e le loro applicazioni nell'isolamento acustico avanzato.
- Domenico De Salvio (Università di Bologna), con una presentazione su metamateriali innovativi per applicazioni ferroviarie realizzati attraverso tecniche di manifattura additiva.
- Jean Boulvert (Sil&Add), che ha descritto lo sviluppo di soluzioni industriali basate su metamateriali acustici, già applicate nel campo dei trasporti e dell'edilizia.

Seconda sessione – Sulle carriere in acustica

La seconda sessione, a partecipazione gratuita e con registrazione in loco, è iniziata alle ore 14:00 con un confronto sul tema "Carriere nella ricerca e nella professione in acustica in Italia e all'estero", coordinato dal Prof. Luca Barbaresi. Gli interventi sono stati:

- Luca Cappellini (Saint-Gobain Italia), che ha condiviso la sua esperienza nel mondo industriale, evidenziando come

le competenze acustiche siano sempre più richieste in ambito produttivo e progettuale.

- Chiara Scrosati (CNR-ITC Milano), che ha illustrato le opportunità di carriera nella ricerca pubblica e nei centri di eccellenza italiani.
- Matteo Cingolani (Beyma Valencia), che ha portato una visione internazionale del settore, descrivendo le differenze e le affinità tra la realtà italiana e quella spagnola nel campo dell'acustica e tra la realtà accademica e quella industriale.

Dalle 15:00 alle 15:30 è stato lasciato spazio alle domande del pubblico e alla discussione con i relatori.



Fig. 2 – Un momento della sessione sulle carriere in acustica
Debating on careers in Acoustics

Nella seconda parte del pomeriggio, dalle 16:00, si è svolta un'intensa sessione pomeridiana di networking AIA Giovani, coordinata dalla Dott.ssa Gioia Fusaro e dalla Prof.ssa Louena Shtrepi. L'attività si è articolata in tre segmenti principali:

- Mappatura dei giovani ricercatori e professionisti in acustica in Italia e nel mondo, per creare una rete informale e favorire future collaborazioni.
- Lavori in piccoli gruppi per rispondere alle domande: che cosa i giovani si aspettano da un network di acustici? Quali sono le difficoltà che si possono incontrare nell'avviare una carriera in acustica? Che cosa i giovani si aspettano dall'Associazione Italiana di Acustica?
- Una sessione di speed dating tra giovani partecipanti e rappresentanti di aziende e studi di progettazione, previa prenotazione obbligatoria.

Questa attività, protrattasi fino alle 17:30, ha riscosso grande successo per la sua capacità di mettere direttamente in contatto il mondo accademico con quello industriale. I giovani partecipanti hanno potuto presentarsi, porre domande e ricevere consigli personalizzati dai rappresentanti delle se-

guenti realtà aziendali: Ausilio Srl, Deerns, Electrolux Group, 3TI Progetti.

Tavola rotonda conclusiva

La giornata si è conclusa alle ore 17:30 con una tavola rotonda, seguita poi dalla chiusura dei lavori, durante la quale è stato ribadito il ruolo centrale dell'innovazione tecnologica e della sostenibilità ambientale nella progettazione acustica del futuro.

Durante tutta la giornata è stata attiva una segreteria organizzativa, con assistenza logistica a cura di Simona Senesi. Il simposio ha previsto quote di partecipazione ridotte e tarate su varie fasce (studenti, soci AIA, non soci, sostenitori istituzionali); inoltre sono stati garantiti attestati di partecipazione a tutti i presenti. L'evento è stato patrocinato da varie istituzioni e ha visto la partecipazione di numerosi sostenitori AIA 2025.



Fig. 3 – Discussione tra i giovani acustici durante i lavori di gruppo
Discussion among the young acousticians during the teamwork.

3 | Conclusioni e prospettive

La prima edizione del Simposio Internazionale AIA su “Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia” si è conclusa con un bilancio estremamente positivo. La partecipazione attiva di giovani e professionisti esperti, la qualità degli interventi scientifici e la varietà degli approcci proposti hanno evidenziato la vitalità di un settore in continua evoluzione.

Il simposio ha saputo coniugare il rigore accademico con l'apertura verso le esigenze del mondo industriale, promuovendo un approccio multidisciplinare e trasversale. In particolare, la riflessione sui materiali sostenibili, sui metamateriali acustici e sulle prospettive di carriera ha offerto ai partecipanti più giovani strumenti concreti per orientare le proprie scelte professionali e contribuire in modo significativo all'innovazione nel settore.

Il successo della sessione di speed dating e delle attività di networking AIA Giovani ha confermato quanto sia strategico facilitare l'incontro tra giovani talenti e attori consolidati dell'industria e della ricerca. L'iniziativa ha rappresentato un modello virtuoso di collaborazione e ha posto le basi per nuove sinergie future.

A conclusione della giornata, il comitato organizzatore ha espresso l'intenzione di rendere questo evento un appuntamento periodico, al fine di continuare a supportare la formazione, l'aggiornamento e la crescita professionale di coloro che si occupano, a vario titolo, di acustica in chiave sostenibile. Prossimo appuntamento durante il convegno AIA 2025 a Treviso con un evento specifico per giovani acustici.



Fig. 4 – Locandina del programma
Programme leaflet

Resoconto del Simposio AIA-UNI

“L'evoluzione della normativa tecnica in acustica: ultimi aggiornamenti”

Chiara Scrosati^{a*} | Massimo Garai^b

^a CNR-ITC, Istituto per le tecnologie della costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Via Lombardia, 49, 20098
San Giuliano Milanese (MI)

^b Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Bologna,
Via Risorgimento, 2, 40136 Bologna

* Autore di riferimento:
scrosati@itc.cnr.it

Ricevuto: 15/5/2025

Accettato: 16/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20516

ISSN: 2385-2615

Il giorno 20 marzo 2025 si è tenuto il simposio AIA-UNI “L'evoluzione della normativa tecnica in acustica: ultimi aggiornamenti” presso la sede UNI di Milano. Il simposio è stato organizzato congiuntamente da AIA e UNI con lo scopo specifico di aggiornare sui temi caldi della normativa tecnica italiana chi si occupa di acustica e in particolar modo i soci AIA e i soci UNI. In questo articolo si propone un resoconto delle attività scientifiche che si sono tenute durante il Simposio.

Parole chiave: normativa tecnica, acustica, UNI, CEN, ISO

Report on the AIA-UNI symposium “The evolution of technical standards in acoustics: latest updates”

On March 20, 2025, the AIA-UNI symposium “The evolution of technical standards in acoustics: latest updates” was held at the UNI headquarters in Milan. The symposium was jointly organized by AIA and UNI with the specific aim of updating experts in acoustics and in particular AIA members and UNI members on the hot topics of Italian standards. This article provides an account of the scientific activities that took place during the Symposium.

Keywords: standards, acoustics, UNI, CEN, ISO

1 | Introduzione

Il giorno 20 marzo 2025 si è tenuto il simposio AIA-UNI “L'evoluzione della normativa tecnica in acustica: ultimi aggiornamenti” presso la sede UNI di Milano. Il simposio è stato organizzato dall'AIA e da UNI con il patrocinio di ITC-CNR e dell'Ordine degli Ingegneri di Milano, con lo scopo specifico di aggiornare sui temi caldi della normativa tecnica italiana chi si occupa di acustica e in particolar modo i soci AIA e i soci UNI.

L'evento ha riunito esperti italiani che lavorano sia a livello nazionale che internazionale per discutere degli ultimi aggiornamenti normativi in acustica. L'evento era volto a condividere conoscenze avanzate, aggiornando sui temi caldi a livello internazionale che hanno notevoli ricadute a livello nazionale. Uno degli obiettivi principali del simposio è stato quello di promuovere e incentivare lo scambio di idee tra ricercatori, normatori tecnici e aziende che si occupano di acustica e che possono beneficiare di importanti ricadute sul loro lavoro dovute all'aggiornamento del panorama normativo internazionale. Promosso dai membri del CD AIA attivamente presenti in UNI, l'incontro ha messo a confronto i soci dei due tra i più importanti Soggetti che a livello Italiano si occupano di acustica anche tramite una tavola rotonda in cui è stato possibile confrontarsi dal vivo.

È stato un evento con una grande partecipazione con più di 100 iscritti che hanno partecipato in presenza, e con 13 memorie ed una tavola rotonda finale.

In questo articolo si propone un resoconto delle attività scientifiche che si sono tenute durante il Simposio.

2 | Programma scientifico

Il Simposio suddiviso in due sessioni, ha affrontato al mattino la sessione sui lavori Nazionali e al pomeriggio la sessione sui lavori Internazionali.

Nella mattinata, dopo i saluti istituzionali del Presidente AIA Patrizio Fausti e del Presidente UNI Giuseppe Rossi, il presidente della UNI/CT002 Commissione Acustica, Massimo Garai, ha presentato una panoramica della commissione e delle sue relazioni internazionali, dopodiché sono seguite 3 sotto-sessioni tematiche relative alle tre sottocommissioni UNI/CT002/SC01 Acustica Edilizia, UNI/CT002/SC02 Vibrazioni e UNI/CT002/SC03 Acustica Ambientale.

Nel pomeriggio la sessione sui lavori Internazionali CEN e ISO si è poi conclusa con una tavola rotonda finale.



Fig. 1 – Il presidente AIA e il presidente UNI rivolgono i saluti istituzionali ai partecipanti
The AIA president and the UNI president address institutional greetings to participants



Fig. 2 – I partecipanti al simposio
Participants to the symposium

3 | I sessione Lavori Nazionali

3.1 | Panoramica sulla UNI/CT 002 Acustica e Vibrazioni

La panoramica dei lavori e della composizione della commissione Acustica e Vibrazioni e delle sue relazioni internazionali, presentata dal presidente della commissione Massimo Garai, ha fatto chiarezza sul grande lavoro della commissione sia dal punto di vista nazionale che da quello internazionale.

La commissione ha all'attivo 50 norme nazionali (UNI), ha adottato 40 norme europee (EN), 80 norme internazionali (ISO) e ben 145 norme UNI EN ISO. Inoltre, ha in avanzato stadio di elaborazione altre 7 norme nazionali. La UNI/CT 002 si è recentemente strutturata in tre sottocommissioni, per meglio affrontare i grandi temi dell'acustica edilizia (SC 01), delle vibrazioni (SC 02) e dell'acustica ambientale (SC 03). A livello nazionale, la commissione ha cercato di svolgere un ruolo proattivo per sviluppare norme tecniche che rappresentino lo stato dell'arte e siano le migliori soluzioni per le imprese, gli enti governativi e la società in generale. Ma il maggior risultato degli anni recenti è il potenziamento della dimensione internazionale. La UNI/CT 002 svolge un'intensa attività di interfaccia con le omologhe commissioni in ambito europeo (CEN/TC 211 Acoustics, CEN/TC 126 Acoustic properties of building elements and of buildings, CEN/TC 231 Mechanical Vibrations) e internazionale (ISO/TC 43 Acoustics, ISO/TC 108 Mechanical Vibrations) e relativi sottocommissioni e gruppi di lavoro. Qui gli esperti italiani da una parte portano un apprezzato contributo tecnico in ambito sovranazionale, dall'altra riportano in Italia esperienze tecniche internazionali e lavorano per adattare le norme internazionali alla realtà italiana, supportando gli attori italiani nella competizione globale.

3.2 | UNI/CT 002/SC 01 Acustica Edilizia

A seguire, si è trattato delle norme che sono state pubblicate da poco o che sono in corso di finalizzazione per la pubblicazione.

Matteo Borghi ha illustrato la norma di recente pubblicazione (settembre 2024) **UNI 11175** "Linee guida per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici", che si divide in due parti: Parte 1: metodo di calcolo semplificato basato

su grandezze a numero unico e Parte 2: Dati di ingresso per il modello di calcolo. La Parte 1 descrive i calcoli, in relazione alle soluzioni tecniche, per ottenere determinati risultati, elenca le grandezze acustiche rilevanti e definisce le applicazioni e le restrizioni. In particolar modo nell'intervento si è affrontata la tematica delle strutture di tipo A e di tipo B così come sono indicate nella norma e le differenti formule per il calcolo del rumore attraverso i percorsi laterali. La Parte 2 fornisce indicazioni in merito al reperimento e utilizzo dei dati di ingresso e specifiche per la creazione di banche dati. Per ottenere risultati affidabili è necessario che tali dati siano attendibili. Matteo Borghi ha illustrato considerazioni generali e specifiche sulle banche dati. Infine ha illustrato gli sviluppi futuri che riguardano in particolar modo una futura Specifica Tecnica sugli esempi.

Simone Secchi ha presentato la norma **UNI 11296** "Isolamento acustico dei serramenti", pubblicata a maggio 2024. Essa definisce i criteri per la posa in opera di componenti di facciata (serramenti, dispositivi per il passaggio dell'aria, sistemi di oscuramento/schermatura e altri componenti presenti in facciata) e fornisce indicazioni sulla verifica dell'isolamento acustico della facciata dal rumore esterno. Si applica agli interventi su edifici esistenti e di nuova costruzione, riferiti unicamente ai casi di propagazione del rumore per via aerea. La norma relativa ai criteri per la posa in opera dei componenti di facciata si applica anche ai serramenti interni di separazione tra ambienti che richiedono protezione dal rumore. L'appendice A della norma costituisce documento di riferimento per l'applicazione dei DPR 18 novembre 1998, n. 459 (art. 5) e 30 marzo 2004, n. 142 (art. 6 e 7), relativi alle disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare e ferroviario, mediante interventi diretti sui ricettori. Simone Secchi nel suo intervento ha mostrato i difetti più ricorrenti sulle prestazioni di isolamento acustico di facciata e il relativo grado di criticità e rimediabilità.

La coordinatrice Linda Parati ha presentato in anteprima il lavoro del GL07. Il gruppo di lavoro, dopo aver prodotto la Parte 1, Requisiti generali, e la Parte 2, Settore scolastico, della serie **UNI 11532** "Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione" ha portato avanti la Parte 3 della norma relativa al confort acustico negli uffici. Sono a buon punto i lavori per poter utilizzare dei descrittori più avanzati del tempo di riverberazione, quali per esempio il tasso di decadimento spaziale del parlato ($D_{2,S}$) e l'attenuazione acustica in situ del parlato ($D_{A,S}$), che possono meglio descrivere il campo acustico in ambienti non sabiniani come gli uffici open-space. In ottica di sostenibilità, si sta considerando anche l'integrazione dell'approccio WELL.

3.3 | UNI/CT 002/SC 02 Vibrazioni

Il presidente della sottocommissione Vibrazioni, Giovanni Moschioni, ha presentato una panoramica generale dei lavori della sottocommissione.

La sottocommissione SC 02 Vibrazioni ha prodotto negli anni norme originali ed è stata interfaccia per i lavori internazionali. Tra le norme originali degli ultimi anni si ricordano le seguenti:

UNI 9916 (danno architettonico degli edifici, 2014); UNI 11568 (strumenti e metodi per misura di vibrazioni, 2015); UNI 9614 (disturbo da vibrazioni negli edifici, 2017); UNI 11740 (vibrazioni immesse da macchine negli edifici 2019); UNI 11849 (misura delle vibrazioni trasmesse dal sedile di escavatori 2022) e UNI 10985 (rilievi dinamici sui ponti, 2025).

Moschioni ha presentato l'attività principale di questo periodo che è concentrata su due tematiche:

1. Revisione della norma **UNI 9614** Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo.
2. Nuova norma sulla misura delle vibrazioni in assenza di tecnici (traduzione dell'inglese "unattended").

3.4 | UNI/CT 002/SC 03 Acustica Ambientale

Per quanto riguarda la neonata sottocommissione SC 03, si sono trattati in particolare i lavori di due gruppi di lavoro, originariamente riferiti direttamente alla CT002 e che ora sono stati inseriti tra i gruppi di pertinenza della SC 03.

Il gruppo UNI/CT 002/SC 03/GL 04 (ex UNI/CT 002/GL 36) sta elaborando un progetto di norma sulla seconda parte della **UNI/TS 11659**, dedicata alla predisposizione delle modalità di valutazione del rapporto costi/efficacia applicato alle misure di mitigazione sonora. Il progetto dovrebbe permettere di definire i criteri di sostenibilità economica di cui all'art. 26 del D.Lgs. 17 Febbraio 2017, n. 42.

Patrizia Bellucci ha illustrato il lavoro del GL. In aggiunta ai paragrafi consueti, riguardanti lo scopo e il campo di applicazione, e i termini e definizioni, questa parte della specifica tecnica introduce il concetto di analisi costi/efficacia, definisce l'orizzonte temporale della valutazione, descrive le modalità con cui valutare l'efficacia, introducendo due approcci, puntuale e strategico, da utilizzare rispettivamente nei casi in cui si disponga di informazioni progettuali di dettaglio (approccio ristorativo) o per valutazioni di carattere strategico (approccio mitigativo). Il progetto di norma introduce, inoltre, le modalità con cui valutare l'efficienza delle soluzioni investigate, tramite il rapporto Costi/Efficacia ed esplicita la procedura da utilizzare per il calcolo dell'incertezza associata alla valutazione, rimandando anche alle norme di riferimento (UNI/TS 11326-1 "Valutazione dell'incertezza nelle misurazioni e nei calcoli di acustica", UNI CEI ENV 13005). Nelle due appendici sono descritti alcuni esempi, riferiti all'approccio puntuale (Appendice 1) e strategico (Appendice 2), applicati alle sorgenti stradale, ferroviaria e aeroportuale.

La norma **UNI 11160-1** pubblicata il 10 aprile 2025, "Linee guida per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo di sistemi antirumore per infrastrutture stradali" è stata presentata da Gianni Brero, che è stato il relatore della norma. La norma riguarda un settore interessato da importanti appalti, essendo infatti oggetto della stessa i sistemi antirumore sog-

getti a marcatura CE in quanto inclusi nell'ambito del Regolamento Europeo UE 3110/2024 sui Prodotti da Costruzione (CPR). Brero ha illustrato le parti salienti della norma e di tutto il processo che il produttore deve effettuare riguardo le prove iniziali di tipo presso un laboratorio notificato, seguendo le norme delle serie UNI EN 1793 e UNI EN 1394 nonché le UNI EN 14389 e UNI EN 17383, i controlli in produzione secondo le procedure di qualità aziendale e l'applicazione della marcatura CE secondo la UNI EN 14388. La UNI 11160-1 costituisce una guida alla stesura degli elaborati per il progettista ed una guida alla stesura dei capitolati per la stazione appaltante.

4 | Il sessione Lavori Internazionali

Nel pomeriggio la sessione dei lavori internazionali è stata articolata in due parti: i lavori CEN e i lavori ISO.

I membri della commissione acustica sono particolarmente attivi in entrambi i settori sia come coordinatori di gruppi di lavoro CEN (CEN/TC 226/WG 6 e CEN/TC 256/SC 1/WG 40, M. Garai), sia come project leader per la revisione di norme ISO (ISO 354 e ISO 16283-3, C. Scrosati) e come partecipanti ai tavoli CEN e ISO. Questo dà l'indubbio vantaggio di poter essere sempre aggiornati su tutti i lavori internazionali e di poter così aggiornare in tempo reale i relativi gruppi di lavoro nazionali.

4.1 | Lavori CEN

Antonino Di Bella ha esposto una panoramica dei lavori CEN, introducendo anche il cosiddetto Vienna Agreement, che è un accordo di cooperazione tra il CEN (Comitato Europeo di Normazione) e l'ISO (Organizzazione Internazionale per la Normazione) volto ad evitare la duplicazione degli sforzi di normazione e a promuovere l'armonizzazione delle norme a livello internazionale. Firmato nel 1991, questo accordo stabilisce le modalità di collaborazione tra i due enti per lo sviluppo di norme comuni. Inoltre ha esposto una panoramica delle ultime norme pubblicate dal CEN/TC 126 Acoustic properties of building elements and of buildings.

Ha poi proseguito illustrando la serie di norme **EN 12354** Calcolo previsionale delle prestazioni acustiche degli edifici. Questa serie è composta da 6 parti, di cui le prime parti sono di pertinenza ISO e CEN, mentre invece le ultime due solo di pertinenza CEN. Tutte le parti però restano sviluppate in ambito CEN. Attualmente sono in corso i lavori di aggiornamento relativi alle prime tre parti ed è in fase di lavorazione la parte 7 "Ground-borne sound insulation against outdoor ground vibration". Di Bella ha poi illustrato i lavori di aggiornamento della parte 1. Per poi illustrare le differenze tra la versione del 2009 e la nuova versione aggiornata del 2023 della parte 5 secondo cui è possibile effettuare il calcolo previsionale del rumore degli impianti.

Gianni Brero ha presentato un aggiornamento sulla serie **EN 1793** Misurazione delle caratteristiche intrinseche delle

barriere antirumore stradali. La serie, composta di 6 parti, permette la valutazione delle caratteristiche intrinseche di assorbimento e isolamento acustico delle barriere antirumore sia in campo sonoro diffuso (su campioni posti in camera riverberante, parti 1 e 2) sia in campo sonoro diretto (cioè su barriere installate all'aperto, parti 5 e 6). Recentemente è stata aggiornata secondo l'esperienza maturata in anni di misure in laboratorio ed in opera ed è ormai prossima al voto finale. Inoltre, la parte 4 permette di misurare la diffrazione intrinseca prodotta dai dispositivi aggiunti sulla sommità delle barriere (detti anche diffrattori) e la parte 3 presenta lo spettro normalizzato del rumore da traffico stradale.

4.2 | Lavori ISO

Chiara Pia, funzionaria tecnica di UNI, ha illustrato i lavori ISO. L'ISO/TC43 "Acoustics", con le sue tre sottocommissioni ISO/TC43/CS01 "Noise", ISO/TC43/CS02 "Building Acoustics" e ISO/TC43/CS03 "Underwater Acoustics" ha in attivo 224 norme pubblicate e 30 norme in fase di sviluppo.

L'ISO/TC 108 "Mechanical vibration, shock and condition monitoring" ha in attivo 201 norme pubblicate e 29 norme in via di sviluppo.

Chiara Scrosati ha illustrato i lavori riguardanti la **ISO 16283-3** Misurazione in opera dell'isolamento acustico delle facciate. Uno dei temi principali di aggiornamento è l'estensione a volumi superiori di 250m³ per gli ambienti riceventi. Questo aspetto della misurazione in opera non è limitato alla sola parte 3 della norma ma in futuro potrà riguardare anche le prime due parti. Un altro motivo di aggiornamento è la verifica dei requisiti della norma sui livelli di pressione sonora dell'altoparlante sul campione di prova. Ha inoltre illustrato quale sarà la nuova figura della norma per chiarire meglio il posizionamento della sorgente sonora. Infine ha illustrato la nuova appendice che farà parte della revisione della norma sugli esempi di posizionamento della sorgente sonora e del microfono esterno e il frame temporale per la pubblicazione che dovrà avvenire entro il mese di settembre 2026.

A conclusione dei lavori internazionali, Matteo Borghi ha illustrato i lavori di aggiornamento della **ISO 9052-1** Misurazione della rigidità dinamica. La norma è attualmente in fase di revisione per chiarire alcuni aspetti fondamentali che riguardano la misura stessa. Primo tra tutti quello di trovare alternative alla correzione per resistività del flusso d'aria. Nel gruppo di lavoro internazionale si sta discutendo di due possibili alternative:

1. utilizzare un metodo che non necessita della correzione (valido per tutti i tipi di materiali);
2. utilizzare un fattore di correzione che sia una funzione continua della resistività del flusso d'aria laterale.

Per quanto riguarda la prima alternativa, il metodo proposto, in fase di discussione nel gruppo di lavoro, consiste nell'effettuare la misurazione su un campione di grandi dimensioni (1m × 1m) rispetto alle dimensioni attualmente prescritte nella norma 20cm × 20cm. È in fase di studio e defi-

nizione un Round Robin Test internazionale per la verifica di questa proposta.

5 | Tavola Rotonda Finale

È seguita una interessante e dinamica discussione su tutti gli argomenti trattati durante i lavori del Simposio.



**Fig. 3 – Tavola Rotonda
Round table**

6 | Conclusioni

Il simposio AIA-UNI del 20 marzo 2025, che ha ottenuto una grande partecipazione, ha fatto il punto sulla composizione della commissione tecnica UNI/CT002 "Acustica e Vibrazioni", sui suoi lavori e sulle sue relazioni internazionali.

Il simposio è stato diviso in due parti, una riguardante i lavori nazionali e una riguardante quelli internazionali.

Sono state illustrate norme nazionali pubblicate da poco o in corso di finalizzazione per la pubblicazione ovvero: serie UNI 11175, UNI 11296, serie UNI 11532, UNI 9614, UNI/TS 11659 e UNI 11160-1.

Nella sessione internazionale sono stati illustrati i lavori CEN e ISO e le relative norme in fase di aggiornamento o appena aggiornate quali: serie EN 12354, serie EN 1793, ISO 16283-3 e ISO 9052-1.

Conclusions

The AIA-UNI symposium of March 20, 2025, which received a large participation, assessed the composition of UNI/CT002 "Acoustics and Vibrations" technical commission, its work and its international relations.

The symposium was divided into two parts, one concerning national works and one concerning international works.

National standards recently published or in the process of being finalized for publication were illustrated, namely: UNI 11175 series, UNI 11296, UNI 11532 series, UNI 9614, UNI/TS 11659 and UNI 11160-1.

In the international session, CEN and ISO works were illustrated and the related standards in the process of being updated or just updated such as: EN 12354 series, EN 1793 series, ISO 16283-3 and ISO 9052-1.

7 | Ringraziamenti

Si ringraziano tutti i relatori e soprattutto tutti i partecipanti che hanno reso un successo l'evento!

Si ringrazia Simona Senesi della segreteria AIA per l'imprescindibile e prezioso supporto. Si ringraziano Chiara Pia e Marco De Gregori di UNI per il supporto prima e durante la giornata.

Resoconto del Seminario AIA

“Una ‘buona’ musica dentro e fuori i locali di pubblico spettacolo e all’aperto”

Lucilla Aiello^a | Gianpiero Evola^{b*} | Antonio Gagliano^b | Gaetano Licitra^c

^a Libero Professionista,
Via Carrubella, 20/A, 95123 Catania

^b Dipartimento di Ingegneria Elettrica,
Elettronica e Informatica (DIEEI),
Università degli Studi di Catania,
Via Santa Sofia, 64, 95123 Catania

* Autore di riferimento:
gianpiero.evola@unict.it

Ricevuto: 20/5/2025

Accettato: 25/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20517

ISSNe: 2385-2615

Il 14 aprile 2025 a Catania si è tenuto il Seminario “Una ‘buona’ musica dentro e fuori i locali di pubblico spettacolo e all’aperto”, presso l’aula Magna “Oliveri” dell’Università degli Studi di Catania. Il Seminario è stato organizzato dall’Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica (DIEEI) dell’Università di Catania. Il presente articolo ne riassume lo scopo, i contenuti e gli interventi.

Parole chiave: seminario, musica, pubblico, spettacolo

Report of the AIA Workshop “A ‘good’ music inside and outside the public entertainment venues, and outdoors”

On 14th April 2025 the University of Catania hosted the seminar entitled “A ‘good’ music inside and outside the public entertainment venues, and outdoors” at the Aula Magna “Oliveri”. The event was organized by the Acoustical Society of Italy (AIA) in collaboration with the Department of Electric, Electronic and Computer Engineering, University of Catania. This article summarizes its scopes, contents and talks.

Keywords: seminar, music, public, spectacle

1 | Introduzione

Nella giornata del 14 aprile 2025 si è tenuto il Seminario “Una ‘buona’ musica dentro e fuori i locali di pubblico spettacolo e all’aperto”, presso l’aula Magna “Oliveri” dell’Università degli Studi di Catania. Il Seminario è stato organizzato dall’Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica (DIEEI) dell’Università di Catania. Il Seminario ha trattato le innovazioni nella sonorizzazione e insonorizzazione dei locali destinati al pubblico spettacolo e delle aree che ospitano attività di intrattenimento rumorose, analizzando le iniziative degli enti locali e le attività di controllo conseguenti, attivate in varie regioni italiane. Si è inoltre discusso dei contenziosi che derivano da una cattiva programmazione e gestione delle attività e degli eventi che generano immissione di rumore nell’ambiente circostante. Tra i relatori, sono intervenuti numerosi esperti provenienti da differenti regioni e con variegate competenze professionali, spaziando dai centri di ricerca alle aziende e ai liberi professionisti. L’evento è stato seguito da una platea di oltre 40 professionisti, che hanno beneficiato dei Crediti Formativi Professionali (CFP) erogati per Ingegneri. La partecipazione al Seminario e la successiva verifica ha dato luogo al riconoscimento di sei ore di aggiornamento per i Tecnici Competenti in Acustica ambientale (TCA).

Il presente articolo fornisce una breve sintesi dei contenuti tecnici e scientifici, sociali e organizzativi del Seminario.

2 | Programma scientifico

I lavori sono stati aperti dal Presidente AIA, Prof. Patrizio Fausti, dal Presidente AIDII (Associazione Italiana degli Igienisti Industriali), ing. Sergio Luzzi, dal Presidente di Assoacustici, ing. Roberto Bianucci, e dal presidente Inarsind, ing. Carmelo Russo, che hanno delineato i temi del Seminario evidenziandone l’importanza nel quadro delle attività promosse da AIA.

Il Seminario è stato articolato in due sessioni:

- Sessione mattutina, coordinata da Gaetano Licitra.
- Sessione pomeridiana, coordinata da Antonio Gagliano.

Gli interventi dei relatori nelle due sessioni tecniche hanno discusso delle criticità legate alla rumorosità nei locali di pubblico spettacolo, di soluzioni innovative per ridurre l’impatto acustico e migliorare la qualità acustica degli ambienti, incentivando lo scambio di idee tra ricercatori e aziende.



Fig. 1 – La sede del seminario: l’Aula Magna “Oliveri” dell’Università degli Studi di Catania

The Seminar venue Aula Magna “Oliveri” of the University of Catania

Il Seminario ha dato luogo ad un'intensa attività di networking e crescita professionale, favorendo la nascita di collaborazioni e nuove progettualità. Alle due sessioni tecniche è seguito un partecipato e costruttivo dibattito tra relatori e il pubblico (Fig. 1). I numerosi interventi dei TCA presenti hanno consentito di confrontarsi su casistiche e problematiche correnti, condividendo le criticità affrontate e le soluzioni tecniche adottate.

3 | La sintesi degli interventi

La prima sessione è stata avviata dall'intervento di Antonio Sansone Santamaria di ARPA Sicilia, dal titolo "Il controllo del rumore nei luoghi di pubblico spettacolo". La presentazione ha evidenziato come la diffusione musicale nei locali debba rispettare i limiti stabiliti dal DPCM 14/11/97 e, per comuni privi di classificazione acustica in Sicilia, i limiti assoluti definiti dal DPCM 01/03/91. Sono stati evidenziate alcune delle "carenze" riscontrate nelle relazioni di impatto acustico, quali l'assenza di indicazione della strumentazione utilizzata, l'incongruenza dei valori di rumore immesso e la mancata considerazione del rumore antropico. Sono state anche affrontate le criticità relative alle autorizzazioni in deroga e le problematiche connesse all'attività di controllo da parte dei comuni.



Fig. 2 – Gli interventi di alcuni relatori nella prima sessione
The presentations given by some speakers in the first session

A seguire, Jacopo Fogola di ARPA Piemonte ha illustrato l'esperienza di ARPA Piemonte per il monitoraggio, il controllo e la gestione del rumore della movida a Torino. Fogola ha presentato le fasi del monitoraggio acustico nell'area di San Salvario (Torino), e l'analisi dei risultati. È stato illustrato il supporto fornito per la regolamentazione acustica, e le azioni intraprese dall'Amministrazione, come il Piano di Risa-

namento Acustico "Movida" e il Piano di Governo della Notte. Successivamente, la dott.ssa Francesca Neri della Direzione Ecologia e Ambiente del Comune di Catania ha presentato le "Azioni per il contenimento del disturbo da rumore nelle aree interessate da spettacoli musicali".

Antonio Gagliano dell'Università di Catania ha condiviso alcune esperienze nella modellizzazione acustica del rumore ambientale in strade urbane, e delle complessità insite nella modellizzazione del rumore generato dalla folla. L'intervento ha illustrato un caso studio in un'area della città di Marina di Ragusa interessata dalla movida, presentando delle possibili soluzioni di mitigazione del rumore attraverso l'utilizzo di schermi acustici leggeri con geometrie "customizzate".

A seguire, Lucilla Aiello ha approfondito il tema del contenzioso legale e il ruolo del Consulente Tecnico di Ufficio, illustrando l'apparato legislativo di riferimento per la tutela dall'inquinamento sonoro, dalla Legge Quadro 447/95 ai decreti attuativi. È stato approfondito il concetto di "normale tollerabilità" secondo l'Art. 844 del Codice civile e l'Art. 659 del Codice penale, sottolineando il fondamentale ruolo del Tecnico Competente in Acustica ambientale (TCA) e del Consulente Tecnico d'Ufficio (CTU), evidenziandone le competenze richieste e l'importanza di una valutazione tecnica adeguata anche nelle fasi preliminari al contenzioso.

Sergio Luzzi, Presidente AIDII, ha presentato l'attuale quadro legislativo e i recenti aggiornamenti normativi relativi all'elenco nazionale dei CTU competenti in acustica. Luzzi ha evidenziato che l'acustica è stata riconosciuta come categoria di speciale competenza nell'elenco nazionale dei TCA dal D.Lgs 42/2017. Sono stati discussi gli aggiornamenti normativi riguardanti la qualità e il giusto compenso delle consulenze tecniche, facendo riferimento alla sentenza della Corte costituzionale n. 16/2025 e al DM 04 dicembre 2023.

Durante l'intera giornata ed in particolare nella pausa tra la prima e la seconda sessione i partecipanti hanno potuto visionare le interessanti proposte degli sponsor del seminario e discutere con loro della strumentazione e dei prodotti da loro presentati. Gli espositori erano Aesse Misure, Innorec e Red Sound che hanno usufruito di una area attrezzata prossima all'Aula Magna (Fig. 3).



Fig. 3 – Area riservata agli espositori
The Area reserved for exhibitors

La sessione pomeridiana è stata aperta dall'intervento di Gianpiero Evola dell'Università di Catania su "Requisiti acustici e progettazione dei locali per il pubblico spettacolo". La presentazione si è focalizzata sul DPCM 215/99, che determina i requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo. Sono stati illustrati gli obblighi del gestore in merito alla verifica dei livelli di pressione sonora, le procedure di misura e le verifiche da effettuare. La presentazione ha anche trattato gli interventi di adeguamento possibili in caso di non conformità.



Fig. 4 – Gli interventi di alcuni relatori della seconda sessione
The presentations given by some speakers of the second session

In questa sessione Sergio Luzzi ha presentato un'ulteriore relazione, relativa all'acustica dei ristoranti. È stata evidenziata l'importanza di una buona acustica per la comprensibilità del parlato e il comfort dei clienti, citando sondaggi che indicano il rumore tra le più comuni fonti di rimostranza. Luzzi ha illustrato i benefici dei materiali fonoassorbenti, la distribuzione delle superfici riflettenti e assorbenti e l'importanza dell'isolamento acustico per evitare la trasmissione del suono.

Roberto Bianucci, Presidente Assoacustici, ha affrontato il tema dell'insonorizzazione e dell'isolamento acustico

dei locali di pubblico spettacolo distinguendo tra ambienti al chiuso e all'aperto. Nel caso di ambienti al chiuso, sono stati distinti i casi in cui l'attività viene svolta all'interno di un edificio con altre destinazioni e quelli in cui si svolge in un edificio destinato esclusivamente a pubblico spettacolo. Per i locali all'aperto, è stato evidenziato il problema principale del disturbo generato dall'impianto elettroacustico e dagli avventori.

Basilio Mangano ha presentato alcuni esempi per il contenimento dell'inquinamento acustico per spettacoli musicali all'aperto. L'intervento si è concentrato sulle tipologie di impianto elettroacustico (realizzazione di impianti a direttività controllata come l'impianto a pioggia) e sulla struttura ricettiva (soffitto pesante, riduzione del tempo di riverbero, minigonne laterali). Infine, è stata raccomandata la correzione dello spettro dell'emissione sonora dopo gli interventi.

Infine, Andrea Cicero ha discusso di "Taratura degli impianti elettroacustici nei locali: principi, applicazione pratica e rispetto dei limiti normativi". La presentazione ha illustrato i principi base degli impianti elettroacustici, inclusa la risposta in frequenza e la direttività degli altoparlanti. Cicero ha presentato strategie per la riduzione dell'impatto ai ricettori, come la distanza, l'orientamento degli altoparlanti, l'equalizzazione e la limitazione delle emissioni attraverso l'uso di *limiter* elettronici, includendo una dimostrazione pratica.

Ulteriori informazioni sono disponibili sul sito dell'AIA, <https://acustica-aia.it/event/seminario-una-buona-musica-dentro-e-fuori-i-locali-di-pubblico-spettacolo-e-allaperto-catania-14-aprile-2025/>

4 | Eventi sociali

La giornata del Seminario è stata anticipata da una visita alle bellezze della Città di Catania (Fig. 5 e 6), seguita da una cena di benvenuto a cui hanno partecipato i membri del comitato organizzatore, del comitato scientifico ed alcuni relatori.



Fig. 5 – Piazza del Duomo con la Fontana dell'Elefante ('u Liotru)
Dome Square with the Elephant's fountain ('u Liotru)

La convivialità dell'evento, organizzato presso il Ristorante "Fratelli Vittorio" nei pressi di Piazza Duomo (Fig. 7), ha favorito un vivace confronto sulle tematiche del Seminario e

sulle difficoltà nel far riconoscere agli interlocutori istituzionali l'importanza degli aspetti acustici. Sono emersi altresì interessanti spunti per future collaborazioni e per la valorizzazione delle attività di ricerca e di divulgazione in corso.



Fig. 6 – Piazza Duomo e il Vulcano Etna
Piazza Duomo and Etna Volcano



Fig. 7 – Cena di benvenuto
Welcome dinner

5 | L'organizzazione

Il Seminario è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica dell'Università di Catania. Il Comitato Organizzatore locale (G. Licitra, L. Aiello, G. Evola, A. Gagliano) ha curato l'organizzazione dell'evento presso la Cittadella Universitaria Catania, contribuito alla definizione del programma ed alla individuazione dei relatori, diffondendo le informazioni attraverso i canali istituzionali.

Il comitato Scientifico, che oltre ai nomi sopra elencati include il Presidente (P. Fausti) e il Segretario AIA (F. Martellotta), ha supportato l'organizzazione, l'armonizzazione dei contenuti scientifici e la congruità degli interventi proposti.

Si ringrazia la Segreteria del Seminario (S. Senesi) per il supporto alla preparazione e alla diffusione del materiale informativo, e alla gestione degli aspetti amministrativi. Infine, si ringraziano l'Associazione Italiana degli Igienisti Industriali (AIDII) ed Assoacustici per aver concesso il patrocinio, oltre ad AESSE Ambiente e Svantek Italia, Sostenitori AIA 2025, che hanno attivamente partecipato all'evento.

Viaggio nei Laboratori di Acustica: Politecnico di Bari

Ubaldo Ayr^a | Ettore Cirillo^b | Francesco Martellotta^{a*} | Chiara Rubino^a

^a Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125 Bari

^b Già Professore Ordinario presso il Politecnico di Bari

* Autore di riferimento: francesco.martellotta@poliba.it

Ricevuto: 30/4/2025

Accettato: 5/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20518

ISSN: 2385-2615

In questo articolo viene presentato il Laboratorio di Acustica del Politecnico di Bari, descrivendone la storia, le strutture, la strumentazione, le attività di ricerca e trasferimento tecnologico e le principali collaborazioni.

Parole chiave: Laboratorio di acustica, Politecnico di Bari, acustica dei beni culturali, acustica degli ambienti confinati, acustica dei materiali

Acoustic Laboratory Tour: Polytechnic University of Bari

This article presents the Acoustics Laboratory of the Polytechnic University of Bari, describing its history, structures, instrumentation, research and technological transfer activities and the main collaborations.

Keywords: Acoustics Laboratory, Polytechnic University of Bari, cultural heritage acoustics, room acoustics, material acoustics

1 | Introduzione

Con questo articolo proseguiamo il viaggio a tappe attraverso i Laboratori di Acustica che operano in Italia, siano essi appartenenti ad Università, Politecnici, Enti di Ricerca pubblica oppure Laboratori privati, raccontandone la storia, le strutture e apparecchiature presenti, le principali attività di ricerca e di servizio alle imprese. L'obiettivo è quello di creare una fotografia aggiornata della vasta dotazione di strumentazione e strutture votate all'Acustica presenti nel nostro Paese e di favorire la sinergia tra gruppi di ricerca ed il trasferimento tecnologico tra laboratori e imprese. Il viaggio prosegue con il Laboratorio di Acustica del Politecnico di Bari.

2 | La storia del laboratorio

Il Laboratorio di Acustica del Politecnico di Bari, oggi parte integrante del Laboratorio di Fisica Tecnica del Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design, ha una lunga storia alle spalle, iniziata sul finire degli anni Cinquanta del secolo scorso quando, dopo la guerra, all'interno dell'Università degli Studi di Bari venne istituita la Facoltà di Ingegneria. Il primo impulso allo studio dell'acustica venne dato dalla presenza per alcuni anni del prof. Daniele Sette (che poi sarebbe stato fra i fondatori dell'AIA), al quale si deve l'acquisizione delle prime strumentazioni fra cui un fonometro della General Radio (Fig. 1), ottenuto tramite l'Azienda Rilievo Alienazione Residui. Negli anni Sessanta, invece, la presenza per alcuni anni di Italo Barducci come docente, anch'egli Socio Fondatore e poi presidente AIA, vide l'arricchimento della strumentazione con l'acquisizione del tubo di Kundt della Brüel&Kjær tipo 4002, con relativo generatore di segnale, fonometro e banco

di filtri. Negli anni Settanta il Laboratorio vide l'arrivo di Ettore Cirillo che avviò gli studi sulla rumorosità ambientale con particolare riguardo alla rumorosità del traffico urbano. Agli studi teorici seguirono le rilevazioni del rumore del traffico nella città di Bari, i cui risultati furono presentati a Congressi in Italia e all'estero. Infatti, Bari era una delle poche città a possedere dati di rumorosità causata dal traffico urbano. I risultati di queste ricerche furono oggetto di una Conferenza cittadina "Bari: città-ambiente" tenutasi nell'aprile del 1982. In questo periodo il Laboratorio di dotò di una sorgente di rumore di riferimento B&K 4202, diversi fonometri analizzatori B&K (microfoni, preamplificatori, amplificatori di misura, calibratori, registratore grafico, dosimetro/analizzatore statistico elettromeccanico, una sorgente dodecaedrica B&K), nonché un registratore di misura a nastro magnetico portatile Nagra-Kudelski IV SJ per registrazioni calibrate in campo e un generatore di calpestio normalizzato Elit 01. Buona parte delle apparecchiature menzionate sinora sono oggi esposte nella parte "museale" del laboratorio.

Nella seconda metà degli anni Ottanta il Laboratorio iniziò ad identificarsi anche con uno spazio fisico con la realizzazione della prima camera riverberante [1], oggi dismessa per esigenze di rinnovamento edilizio e sostituita con una nuova struttura. La camera aveva forma poligonale con copertura inclinata e aveva dimensioni libere interne di circa 10 m × 5 m in pianta ed un'altezza media di 4 m (Fig. 1).

Negli anni '90 vennero acquisiti due fonometri analizzatori Norsonic SA110 e Larson Davis 2900 e avviati studi sia sul rumore negli ambienti di ufficio, sia sui modelli numerici per la simulazione del campo riverberante [2]. Negli anni 2000, grazie ad una serie di progetti di ricerca finanziati, che contribuirono a delineare i principali temi di ricerca ancora oggi sviluppati, il Laboratorio arricchì ulteriormente la sua dotazione

strumentale con un sistema di acquisizione a due canali 01dB Symphonie, completa di sonda per misure intensimetriche, due nuove sorgenti sonore omnidirezionali (una B&K e una di maggiore potenza sviluppata in-house), un sistema per la caratterizzazione delle qualità acustiche degli spazi confinati composto da microfono Soundfield MkV e Manichino binaurale B&K 4100D e nel 2006 venne realizzata la camera di ascolto attrezzata con sistema di riproduzione Ambisonic e Stereo-Dipole. In questi anni vennero anche condotti studi sul controllo attivo del rumore nelle canalizzazioni degli impianti ad aria, con la realizzazione di un dimostratore a scala reale[3]. Nel 2018 il Laboratorio ha cambiato sede e si è dotato di una nuova camera riverberante e di una piccola camera anecoica arricchendosi di nuovi strumenti di misura e di software. Nel corso degli anni, il Laboratorio ha offerto supporto alle attività di ricerca, alle attività didattiche nonché alle attività conto terzi e di consulenza scientifica per aziende ed enti.



Fig. 1 – Alcuni degli strumenti antichi attualmente in mostra nel “museo” del Laboratorio e immagine della prima camera riverberante, realizzata negli anni '80

Photograph of some of the ancient instruments shown in the Laboratory “museum” and the first reverberant chamber built during the eighties

3 | Principali linee di ricerca

Le principali linee di ricerca attorno alle quali il Laboratorio si è sviluppato ed ampliato possono essere riassunte nelle seguenti:

1. studi sul rumore negli ambienti di lavoro e relazione con l'indoor environment quality (IEQ);
2. valutazione della qualità acustica degli ambienti confinati con particolare riferimento alle chiese e ai teatri;
3. modellazione del campo sonoro negli ambienti chiusi sia mediante modelli analitici sia mediante modelli numerici;
4. misura dell'assorbimento acustico in campo diffuso di materiali e elementi in laboratorio e in opera;

5. tecniche di acquisizione multicanale per la riproduzione e la visualizzazione dei campi sonori;
6. caratterizzazione sperimentale, design e modellazione di materiali fonoassorbenti innovativi.

Nel seguito verranno brevemente descritte le attività svolte in questi ambiti.

3.1 | Studi sul rumore negli ambienti di lavoro e relazione con l'indoor environment quality (IEQ)

I primi studi in questo ambito furono condotti alla fine degli anni '90 partendo dalla rilevazione dei livelli sonori in diversi uffici di Bari. Il Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale PRIN 1998/99: “Ingegneria dell'Ambiente interno”, nell'ambito del tema “Analisi critica dei parametri descrittivi del benessere ambientale” offrì l'occasione per completare la campagna di rilevazioni differenziando il campione di ambienti rilevati (uffici, singoli, multipli, ma anche ambienti industriali), ampliando il campo di indagine includendo analisi spettrali, dei parametri statistici, dei principali indici di rumore, e affiancando alle rilevazioni oggettive anche la compilazione di questionari per la raccolta delle sensazioni soggettive, ottenendo così informazioni sui descrittori più idonei e sugli intervalli ottimali dei diversi parametri [4]. A questo studio ha fatto seguito, fra il 2008 e il 2012, una attività commissionata dall'INAIL Puglia, volta alla “caratterizzazione della qualità ambientale negli ambienti di lavoro non industriali”, con particolare riferimento alla grande distribuzione, in occasione della quale il tema è stato ulteriormente sviluppato ed esteso ad includere sia gli aspetti della comunicazione (anche per il tramite di misure di intelligibilità del parlato), sia aspetti non acustici (benessere visivo e termico) [5].

3.2 | Valutazione della qualità acustica degli ambienti confinati con particolare riferimento alle chiese e ai teatri

A partire dal 2002, due PRIN e un contratto di ricerca con il “Teatro Pubblico Pugliese” hanno consolidato questo importante filone di ricerca che era stato avviato con una tesi dottorale sulla caratterizzazione acustica delle chiese romaniche pugliesi. La caratterizzazione della qualità acustica dei grandi spazi, effettuata mediante la ripresa della risposta all'impulso ha comportato la messa a punto di una catena di misura composta da una sorgente omnidirezionale con sub-woofer per estendere la risposta in bassa frequenza e da un insieme di microfoni fra cui un B-format per l'acquisizione del campo sonoro 3D, una coppia binaurale con torso per la caratterizzazione degli effetti spaziali, un array a 32 canali per l'acquisizione del segnale in formato Ambisonic fino al terzo ordine. Con particolare riferimento alle chiese, allo scopo di caratterizzare le molteplici esigenze acustiche e tenere conto delle specificità di questi luoghi, fu messo a punto un protocollo condiviso non solo fra le università coinvolte nel progetto ma con la comunità scientifica internazionale [6].

Accanto alla caratterizzazione oggettiva di questi spazi (Fig. 2), all'interno del Laboratorio è stato condotto uno studio psicoacustico svolto mediante test di ascolto condotti nella camera di ascolto, allestita in modalità stereo-dipole, all'interno della quale un panel di esperti ha svolto una serie di confronti a coppie di brani "auralizzati" per riprodurre gli effetti degli spazi reali effettuando. Da tale indagine sono state tratte importanti informazioni sulle preferenze di ascolto specifiche per gli spazi di culto [7].

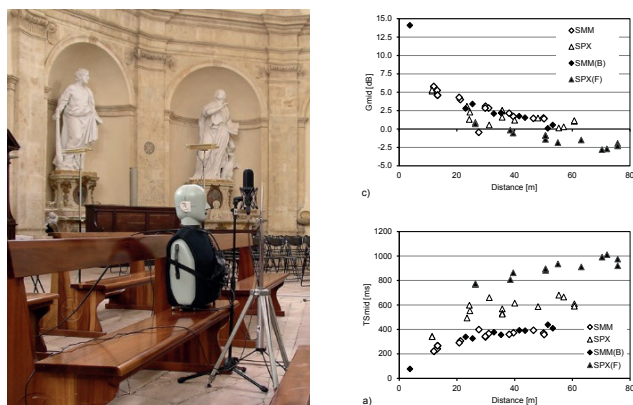


Fig. 2 – Rilevazione della risposta all'impulso binaurale e B-format e successiva analisi della distribuzione spaziale dei parametri
Measurement of binaural and B-format impulse response in a church and subsequent analysis of spatial distribution of measured parameters

Con riferimento agli spazi teatrali fu invece seguito il protocollo messo a punto da Pompoli e Prodi [8] rilevando 24 teatri storici delle diverse province pugliesi, proponendo poi un modello interpretativo dei risultati che partendo dai consolidati modelli di Beranek e Ando per i teatri d'opera è stato generalizzato anche ai teatri di prosa [9].

Ulteriori approfondimenti in questo filone di ricerca sono stati fatti con riferimento alla caratterizzazione acustica delle chiese rupestri [10] e, più recentemente, degli spazi dedicati alla performance corale.

3.3 | Modellazione del campo sonoro negli ambienti chiusi sia mediante modelli analitici sia mediante modelli numerici

Oltre agli studi avviati negli anni '90 sulla modellazione ray tracing [2] i quali ebbero la camera riverberante come caso studio, negli anni successivi, la disponibilità di un'enorme base di dati sperimentali acquisiti durante le attività sul campo ha consentito di portare avanti diversi studi sulla modellazione del campo sonoro, impiegando sia codici di calcolo commerciali basati sul cone-tracing (CATT-Acoustic), che sono stati pertanto verificati in diverse situazioni, sia sviluppando modelli semi-empirici per la modellazione analitica degli effetti di propagazione del campo sonoro [11], anche con riferimento alla presenza di volumi acusticamente accoppiati, sia, infine, arrivando a sviluppare un codice numerico basato sul

metodo del FDTD (Finite Difference Time Domain) con cui, data l'onerosità computazionale, sono stati condotti studi sulla propagazione del suono alle basse frequenze in ambienti di dimensioni contenute [10] (Fig. 3).

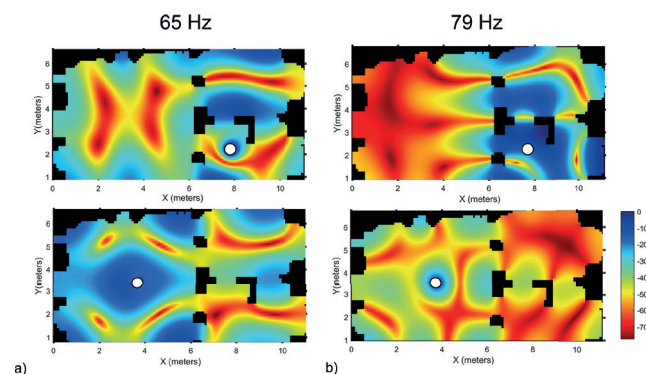


Fig. 3 – Simulazione FDTD della distribuzione dei livelli sonori in corrispondenza di alcune frequenze modali.
FDTD simulation of sound pressure distribution at some modal frequencies

3.4 | Misura dell'assorbimento acustico di materiali e elementi in laboratorio e in opera

La disponibilità di una camera riverberante conforme allo standard ISO 354 [12] ha rappresentato negli anni un punto di forza importante per le attività sperimentali del Laboratorio. Negli anni 2000 la camera fu dotata di un sistema di diffusori fissi in plexiglas che consentirono di rispondere meglio alle specifiche della norma e grazie a ciò, nella camera furono condotti sia test sperimentali funzionali alle attività conto terzi, sia studi legati alla caratterizzazione di "elementi" di più complessa valutazione come sedute, con e senza occupazione [13], tendaggi e arazzi, avendo come obiettivo la definizione non solo di valori utili alla qualificazione secondo normativa, ma soprattutto allo scopo di ottenere valori da impiegare nella pratica sia impiegando approcci analitici (formule di Eyring, Sabine, etc.), sia come dati di ingresso di software di modellazione acustica.

L'impiego di questi ultimi, a partire dai dati raccolti in camera riverberante, ha supportato la validità dell'approccio inverso, proposto da Spagnolo e Benedetto, secondo cui il modo migliore per ottenere i coefficienti da imputare in un software è quello di modellare l'ambiente di test e ottenere per iterazione i coefficienti di assorbimento che restituiscono i parametri acustici misurati (tempo di riverberazione).

Impiegando questo approccio sono state effettuati successivi studi che hanno consentito la caratterizzazione acustica di oggetti difficili da trasportare in laboratorio (come grandi arazzi), direttamente in opera [14].

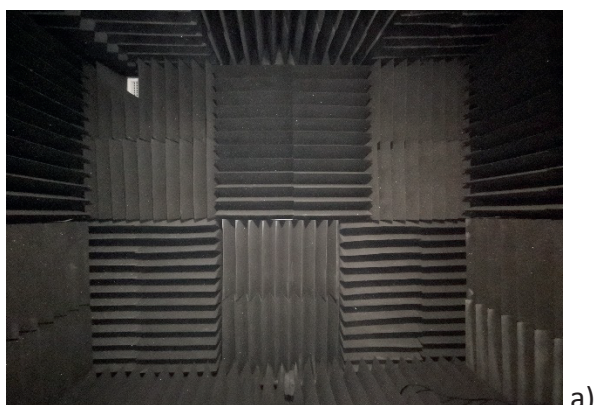
Le esperienze condotte negli anni hanno comunque messo in evidenza la grande "delicatezza" della misura in camera riverberante e, allo scopo di meglio comprendere gli effetti di ciascuna camera sulla misura, nel 2018 il Laboratorio ha partecipato a un Round Robin Test nazionale, i cui esiti hanno

contribuito a supportare i lavori della commissione ISO incaricata della revisione della norma [15].



Fig. 4 – Veduta interna della nuova camera riverberante del Laboratorio

Interior view of the new reverberant chamber of the Laboratory



a)

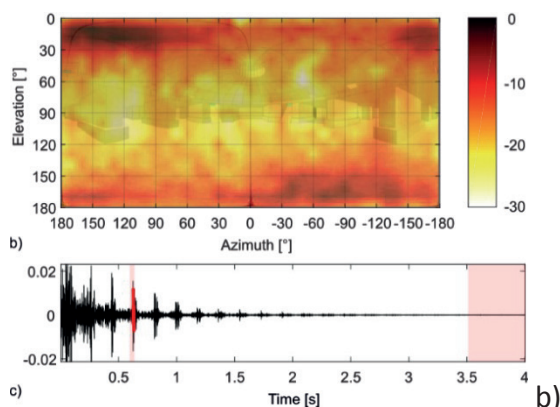


Fig. 5 – Camera d'ascolto del Laboratorio e visualizzazione della distribuzione spaziale delle riflessioni tardive nella Cripta della Cattedrale di Cadice (l'area ombreggiata nella risposta all'impulso denota la porzione di cui sono visualizzati i risultati)
Listening room of the Laboratory and directional reflection maps measured in the Cathedral of Cadiz (shaded areas indicating the time interval portion that is visualized)

Come anticipato, dal 2019 la camera riverberante è stata spostata e riprogettata (Fig. 4), ottimizzando la distribuzione dei diffusori e replicando tutti i test che erano stati condotti nel precedente RRT, impiegando i risultati raccolti per costruire un modello numerico della camera, utile a coadiuvare il posizio-

namento dei campioni e dei punti di misura per minimizzare le deviazioni. Attualmente sono in corso misure per la caratterizzazione di arredi fonoassorbenti a base di scarti tessili.

3.5 | Tecniche di acquisizione multicanale per la riproduzione e la visualizzazione dei campi sonori

Nell'ambito delle attività descritte al punto 3.2, il laboratorio si è dotato negli anni di diversi microfoni Soundfield (un Mk-V e poi un ST-350), e successivamente ha acquisito un Eigenmike 32, con i quali è stato possibile acquisire, per tutti gli ambienti rilevati e per tutte le combinazioni sorgente ricevitore esaminate, almeno la risposta B-format in grado di restituire una scomposizione campo sonoro in formato Ambisonic del primo ordine, fino ad arrivare, grazie all'array a 32 canali, al terzo ordine, così da consentire la riproduzione multicanale all'interno della camera di ascolto (Fig. 5a).

Partendo da questo ricco archivio di risposte all'impulso, accanto all'impiego nell'ambito della camera di ascolto per i test psicoacustici e di preferenza soggettiva, il Laboratorio ha sviluppato un applicativo per la visualizzazione della distribuzione delle riflessioni nel tempo e per l'analisi della diffusione del campo sonoro (Fig. 5b) che è stato impiegato per esaminare e risolvere numerose situazioni in cui le anomalie del campo sonoro risultavano difficilmente spiegabili limitandosi ad una analisi del solo segnale omnidirezionale [16].

3.6 | Caratterizzazione sperimentale, progettazione e modellazione di materiali fonoassorbenti e fonoisolanti innovativi

Il tema della caratterizzazione acustica dei materiali è stato un filo conduttore delle attività del laboratorio, vista la disponibilità sia del tubo di Kundt, sia della camera riverberante. Negli anni 2000 fu messo a punto un sistema per la misura dell'assorbimento acustico in opera secondo normativa UNI ISO 13472-1, testandolo su vari tipi di materiali.

Negli ultimi anni, il Laboratorio ha visto un crescente coinvolgimento su tematiche legate alla caratterizzazione del comportamento acustico di materiali fonoassorbenti ad elevato contenuto di scarti provenienti o dal settore industriale (principalmente tessili) [17], o da quello agricolo (sfalci di potatura o sottoprodotti di altre lavorazioni, come paglia o canapa), unitamente allo sviluppo di metamateriali fonoassorbenti basati sia sull'impiego di membrane microforate [18] sia, in tempi più recenti, di tecniche di manifattura additiva (Fig. 6). Queste ultime sono altresì impiegate nell'ambito di un progetto PRIN per lo sviluppo di elementi fonoisolanti ventilati da impiegare all'interno di finestrature innovative.

La caratterizzazione dei materiali avviene attraverso la misura dell'impedenza superficiale secondo lo standard ISO 10534-2 [19], della resistenza al flusso d'aria secondo la ISO 9053-1 [20], della porosità e della distribuzione dei pori. Ai fini della individuazione delle caratteristiche microstrutturali

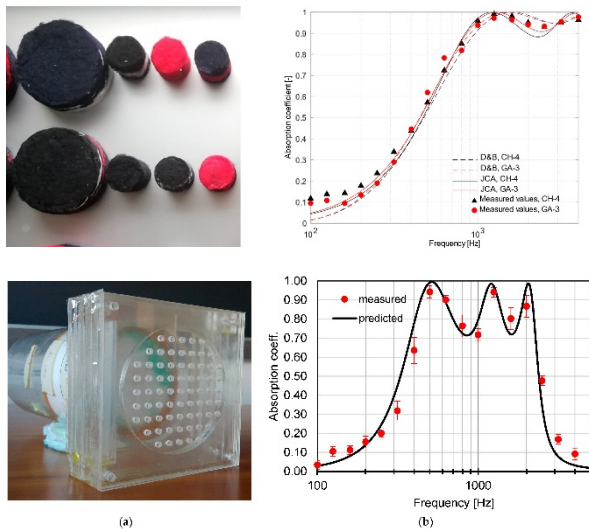


Fig. 6 – Esempi di materiali testati e confronti fra curve sperimentali e curve ottenute per ottimizzazione dei parametri del modello JCA

Examples of tested materials and comparison between experimental curves and those resulting from parameter optimization of JCA model

non misurabili direttamente è stato messo a punto un codice di calcolo che, attraverso un fitting con i valori misurati di assorbimento acustico, estrae i parametri rimanenti una volta prescelto il modello computazionale fra quelli disponibili in letteratura, a partire dal classico Johnson-Champoux-Allard. Dalla conoscenza di tali parametri è poi possibile modellare strutture più complesse e materiali compositi, impiegando il metodo della funzione di trasferimento implementato sia in codici proprietari, sia nel software commerciale Alphacell. Per i materiali per i quali il dato è rilevante, è possibile anche la caratterizzazione della rigidità dinamica secondo ISO 9052-1 [21].

Allo scopo di supportare le attività di ricerca connesse al citato PRIN sulle “meta-finestre” con la caratterizzazione dei metamateriali isolanti ventilati, accanto allo sviluppo di modelli numerici agli elementi finiti sviluppati con il software commerciale Comsol, è stata messa a punto una modifica del tubo ad impedenza per consentire anche la misura del coefficiente di trasmissione col metodo a 4 microfoni (secondo ASTM E2611[22]) e una modifica del sistema per la misura della resistenza al flusso allo scopo di caratterizzare la trasmissione.

4 | Principali dotazioni sperimentali

Il Laboratorio di Fisica Tecnica si è dotato negli anni di diversi apparati di misura per supportare l'attività di ricerca, prima esposta, con una intensa attività sperimentale. Di seguito verranno descritte le principali apparecchiature raggruppate per tipologie.

4.1 | Acustica architettonica

Ai fini della caratterizzazione della propagazione del suono negli ambienti confinati, sono attualmente nella disponibilità

del laboratorio tre diverse sorgenti omnidirezionali di diversa potenza (B&K 4295, Look-Line D301, Outline Globe-source), con i relativi amplificatori, corredate di un subwoofer per misure estese in bassa frequenza fino a 30 Hz. Sul fronte microfonico, accanto ai classici omnidirezionali calibrati da campo diffuso (GRAS 40AR)-si affiancano un Neumann TLM-127 a risposta polare variabile, un Soundfield ST350 portatile, una testa binaurale (B&K 4100D) e un array sferico Eigenmike 32 (Fig. 7). Ad eccezione di quest'ultimo che dispone di una scheda di acquisizione dedicata, la catena di misura è completata da diverse schede audio multicanali gestite tramite un software di acquisizione e analisi interamente sviluppato in Matlab in modo da assicurare una costante adattabilità alle esigenze della ricerca.



Fig. 7 – Tipico setup di misura per acquisizione della risposta all'impulso in ambiente chiuso

Typical measurement setup for impulse response acquisition in indoor environment

Sono inoltre disponibili registratori digitali portatili a 2 e 4 canali per misure in luoghi sprovvisti di alimentazione elettrica e un sistema di acquisizione ad alta frequenza di campionamento (corredato di microfono da 1/8" GRAS 40DP) con sorgente sonora tetraedrica miniaturizzata e generatore di scintille per effettuare misurazioni su modelli in scala.

Sul fronte software il Laboratorio dispone della suite CATT Acoustic per la modellazione conetracing della propagazione del suono in ambiente confinato, unitamente ad altri tool opensource (i-Simpa, Pachyderm).

4.2 | Acustica ambientale/edilizia

Sul fronte delle misure di acustica ambientale ed edilizia, il Laboratorio dispone di un fonometro a due canali 01dB Symphonie e un fonometro palmare 01dB Solo, corredate di microfoni ad incidenza casuale (GRAS 40 AR) e direttivi (MCE 212), con possibilità di collegare al sistema bicanale anche una sonda intensimetrica. Per misure di isolamento di facciata è in dotazione una sorgente direttiva Lookline FLO1 con il relativo amplificatore e una sorgente di calpestio normalizzata Elit01.

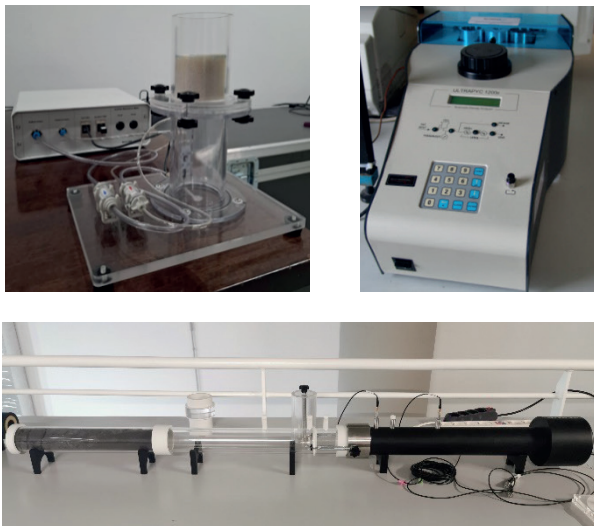


Fig. 8 – Dispositivo per la misura della resistenza al flusso, della porosità e tubo ad onde stazionarie adattato per la misura della trasmissione

Device for air flow resistance measurement, porosity and standing-wave tube adapted for transmission coefficient measurement.

4.3 | Acustica dei materiali

Per la caratterizzazione acustica dei materiali su piccoli campioni vengono impiegati un tubo ad impedenza BSWA SW260, con relativo amplificatore e scheda di acquisizione bicanale, cui è stato affiancato un alimentatore e condizionatore di segnale a quattro canali, unitamente ad una estensione del tubo e del portacampione, funzionale ad effettuare anche misure di trasmissione per i materiali per i quali questa proprietà è significativa (Fig. 8). L'acquisizione ed elaborazione dei segnali viene effettuata mediante software proprietario sviluppato in Matlab. In collaborazione con una azienda locale (Kleitek) è stato sviluppato un dispositivo per la misura della resistenza al flusso d'aria secondo il metodo del flusso stazionario, mentre le misure di porosità e di distribuzione dei pori vengono effettuate con un picnometro ad elio (ULTRAPYC 1200-e Quantachrome) e un porosimetro (Quantachrome Autosorb Ai). Ai fini della caratterizzazione della rigidità dinamica, invece, sono impiegati uno shaker Dataphysics con relativo amplificatore, accelerometri monoassiali e un sensore di forza e accelerazione con relativi condizionatori di segnale.

Sul fronte software il Laboratorio dispone del tool Alpha-cell di Matelys per la modellazione di sistemi complessi di materiali fonoassorbenti, e del pacchetto Comsol per simulazioni acustiche e fluidodinamiche agli elementi finiti.

5 | Collaborazioni

Nel corso degli anni il Laboratorio ha ospitato diversi dottorandi provenienti da università estere, con le quali sono state conseguentemente instaurate proficue collaborazioni scientifiche (in particolare con l'Università di Siviglia e l'Università di Biskra in Algeria) [23,24].

In termini di collaborazioni istituzionali, il Laboratorio, come delineato nelle sezioni precedenti, ha sviluppato numerose collaborazioni con altre università italiane e, nel contempo, ha svolto attività di ricerca in convenzione con l'INAIL Puglia, con il Teatro Pubblico Pugliese, con la Conferenza Episcopale Italiana, con l'Associazione Regionale dei Cori Pugliesi e con la Fondazione Paolo Grassi. Inoltre, il Laboratorio ha svolto attività di consulenza scientifica e supporto sia per la progettazione acustica dell'Auditorium del Conservatorio di Bari sia per l'adeguamento acustico di numerosi luoghi di culto. Attualmente, è in corso una convenzione con l'Autorità Portuale di Bari per il monitoraggio acustico dell'area portuale. In parallelo a tali attività, il Laboratorio offre i propri servizi di misurazione e certificazione acustica ad aziende e privati.

Bibliografia

- [1] E. Cirillo, A. Scaramuzzi, G. Talucci, "La camera riverberante dell'Istituto di Fisica Tecnica e Impianti Termotecnici di Bari"; Atti del Convegno Nazionale AIA, Catania 22-24 aprile 1987, 81-85.
- [2] U. Ayr, F. Piccininni, "Metodo del tracciamento dei raggi sonori: algoritmo e verifica sperimentale", Rivista Italiana di Acustica Gennaio-Giugno 1997.
- [3] U. Ayr, E. Cirillo, "Controllo attivo del rumore di bassa frequenza negli impianti RCV: un sistema sperimentale", 31° Convegno Nazionale AIA, Venezia, 2004.
- [4] U. Ayr, E. Cirillo, F. Martellotta, "An Experimental Study on Noise Indices in Air Conditioned Offices", Applied Acoustics, 62(6) (2001), 633-643.
- [5] Della Crociata S., Simone A., Martellotta F., "Acoustic comfort evaluation for hypermarket workers", Building and Environment 59 (2013) 369-378.
- [6] Martellotta F., Cirillo E., Carbonari A., Ricciardi P., "Guidelines for acoustical measurements in churches", Applied Acoustics 70 (2009), pp. 378-388, doi: 10.1016/j.apacoust.2008.04.004.
- [7] Martellotta F., "Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches", Journal of Sound and Vibration, 317(1-2), (2008) 378-399.
- [8] Prodi N., Pompili R., "Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation", J. Sound Vib., (2000), 232 (1), 281-301.
- [9] Martellotta F., "L'acustica dei Teatri Storici Pugliesi: un ulteriore sviluppo della ricerca", Atti del Convegno: Teatri d'Opera dell'Unità d'Italia, Venezia, 23 Novembre 2011.
- [10] F. Martellotta, S. Liuzzi, C. Rubino, "Reviving the Low-Frequency Response of a Rupestrian Church by Means of FDTD Simulation", Acoustics 5 (2), 396-413, 2023.
- [11] Martellotta F., "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches" J. Acoust. Soc. Am., 125(3), (2009), 1281-1284.
- [12] ISO 354:2003 Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [13] Martellotta F., D'Alba M., Della Crociata S., "Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences", Applied Acoustics, 72 (2011), 341-349.
- [14] Martellotta F., Pon, L., "On-site acoustical characterization of Baroque tapestries: The Barberini collection at St. John the

- Divine Cathedral", *Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3) (2018), 1615-1626.
- [15] Scrosati C., Martellotta F., Pompoli F., [...], Di Filippo S., "Towards more reliable measurements of sound absorption coefficient in reverberation rooms: an Inter-Laboratory Test", *Appl. Acoust.*, 2020, 165, 107298.
- [16] Martellotta F., "On the use of microphone arrays to visualize spatial sound field information", *Applied Acoustics*, 74 (2013), 987–1000.
- [17] Rubino, C., Bonet Aracil, M., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., Martellotta, F., "Wool waste used as sustainable nonwoven for building applications", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278, 123905.
- [18] Pan L, Martellotta F., "A Parametric Study of the Acoustic Performance of Resonant Absorbers Made of Micro-perforated Membranes and Perforated Panels", *Applied Sciences*, 10 (2020), Article number 1581, DOI: 10.3390/app10051581.
- [19] ISO 10534-2:2023, Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes, Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance.
- [20] ISO 9053-1:2018, Acoustics — Determination of airflow resistance Part 1: Static airflow method.
- [21] ISO 9052-1:1989 Acoustics – Determination of dynamic stiffness Part 1: Materials used under floating floors in dwellings.
- [22] ASTM E2611-19, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method.
- [23] Martellotta F., L. Álvarez-Morales; S. Girón; T. Zamarreño, "An investigation of multi-rate sound decay under strongly non-diffuse conditions: the Crypt of the Cathedral of Cadiz", *J Sound and Vibration* 421 (2018), 261-274. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.02.011.
- [24] Benferhat, M.L., Debache B.S., Bouttout A., Martellotta F., Acoustical characterization of three Ottoman masjids built in Algeria, *Building Acoustics* 29(4), pp. 481–501, 2022.

Il grave impatto acustico della (mala)movida. Mezzi di tutela sotto il profilo giuridico. In particolare l'azione in sede civile

Santo Durelli

Studio avv. Durelli,
Via Fieschi, 20, 16121 Genova
studio@avvocatodurelli.it

Ricevuto: 15/3/2025

Accettato: 15/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20520

ISSN: 2385-2615

Con il termine (mala)movida si connota quel fenomeno negativo di pressione antropica che grava su porzioni del territorio, in particolare nei centri storici, caratterizzato dalla presenza di molti locali di rivendita di alimenti e bevande.

Un fenomeno in cui, spesso, sono concentrati e si intrecciano comportamenti giuridicamente illeciti e per più concorrenti profili, quali il disturbo della quiete pubblica e l'inquinamento acustico. Sono pesantemente compromessi i diritti delle persone, quali il diritto alla salute, alla qualità della vita, la proprietà. Come possono difendersi queste persone, quali sono i mezzi di tutela che l'ordinamento offre loro? In questo articolo l'autore analizzerà questi mezzi di tutela, con particolare riguardo all'azione giudiziale in sede civile.

Parole chiave: (mala)movida; disturbo, rumore, tutela, causa

The severe acoustic impact of (bad) nightlife. Legal protection measures. In particular, civil action

The term "(mala)movida" refers to the negative phenomenon of anthropic pressure that weighs on parts of the territory, particularly in historic centres, characterised by the presence of many food and beverage retail outlets. A phenomenon in which, often, illegal behaviour is concentrated and intertwined in several concurrent profiles, such as disturbance of the public peace and noise pollution. The rights of individuals, such as the right to health, quality of life, and property, are severely compromised. How can these individuals defend themselves, and what protection does the legal system offer them? In this article, the author will analyse these means of protection, with particular reference to civil litigation.

Keywords: (bad) nightlife disturbance, noise, protection, lawsuit

1 | Introduzione

Con l'originario significato del termine MOVIDA si contraddistingueva quel fenomeno di massa di fruizione collettiva di luoghi e di esercizi pubblici nelle ore serali e notturne, in cui si esprimeva e si attua il piacere di stare assieme, di vivere relazioni e tempo libero nelle nostre città, piccole o grandi che fossero. Un fenomeno positivo quindi.

Ma con il tempo e soprattutto nel nostro paese, il termine Movida ha mutato il suo significato che – in molti casi – è degradato a connotare un fenomeno negativo, ossia di pressione antropica che grava su porzioni del territorio, in particolare nei centri storici. Fenomeno caratterizzato dalla presenza di molti locali di rivendita al pubblico di alimenti e bevande e che hanno il loro principale business nella vendita di alcolici principalmente in ore notturne ed i cui avventori, non essendovi spazi sufficienti all'interno dei locali stessi, asportano le bevande che consumano all'esterno sulla pubblica via. Un fenomeno in cui, spesso, sono concentrati e si intrecciano comportamenti giuridicamente illeciti e per più concorrenti profili, oltre che socialmente preoccupanti:

- il disturbo della quiete pubblica e l'inquinamento acustico;
- l'occupazione di suolo pubblico e anche privato;

- mancanza di rispetto del decoro pubblico e forme di vandalismo;
- aggressioni e risse;
- spaccio di sostanze stupefacenti.

Quando queste condotte si verificano in modo sistemico, allora si ha un fenomeno che è stato definito con il termine assai incisivo ed efficace di «(mala)movida». Questa è un fenomeno distinto dalla Movida, anche se in essa compreso, nel senso che si manifesta negli stessi luoghi e si dispiega solitamente nelle ore più tarde quando l'alcool e le sostanze stupefacenti hanno raggiunto in molti dei suoi partecipanti un livello alto. La (mala)movida ha assunto in molte città italiane aspetti sempre più preoccupanti, causati da scarsa e comunque inefficace governance da parte delle nostre amministrazioni, come testimoniato da politiche urbanistiche poco consapevoli che hanno consentito un'eccessiva concentrazione di locali dove il principale fine è la vendita di alcolici, che vengono poi consumati all'esterno, sul suolo pubblico, con massimizzazione dei profitti e con scarico sulla collettività di costi sociali altissimi.

Protagonisti della (mala)movida (loro malgrado perché ne sono le principali vittime) sono i residenti dei luoghi ove essa si svolge.

2 | Mezzi di tutela sotto il profilo giuridico

Va fatto un distinguo preliminare importante. In questo breve articolo l'autore tratterà del fenomeno che dà luogo ai cennati problemi quando è generato dalla concentrazione di più esercizi commerciali in una zona circoscritta, che attirano una moltitudine di persone che si riversano all'esterno dei locali per cui il disturbo non è riconducibile a qualcuno di questi in particolare ma al complessivo insieme di queste attività.

Se invece i comportamenti disturbanti sono riconducibili all'attività di uno o più esercizi commerciali chiaramente identificati, allora non sorgono problemi nell'individuazione degli strumenti di reazione idonei allo scopo e che sono:

- la via civilistica basata sugli artt. 844 (1) e 2043 c.c. (2);
- la via amministrativa con l'esposto al Comune in forza della Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 447/1995, decreti attuativi e regolamenti locali;
- la querela ex art. 659 c.p. (2), magari congiunta ad una delle prime due azioni.

In presenza di fenomeno di (mala)movida, invece, le cose si complicano. Si contrappongono frontalmente e nel modo più esasperato, da un lato, i diritti dei residenti alla salute, al benessere, al riposo e, dall'altro, gli interessi economici di molti operatori commerciali. La Pubblica amministrazione si trova nella posizione di chi, da un lato, ha consentito con le sue decisioni la proliferazione di esercizi che creano disturbo, dall'altro di dover intervenire per tutelare i diritti di coloro che sono disturbati, con il risultato, molte volte, di iniziative inefficaci perché frutto di compromessi, se non di totale inerzia o di pura cosmesi. Inoltre si intersecano delicate e complesse questioni di diritto, quali quelle sulla tipologia e legittimità dei provvedimenti da assumere per fronteggiare il problema nonché sulla individuazione del Giudice competente a decidere.

2.1 | Provvedimenti della Pubblica amministrazione

A seguito di esposti, lamentele, proteste di cittadini disturbati dalla (mala)movida, la Pubblica amministrazione è tenuta ad intervenire nel senso che, eseguite le verifiche del caso, ove accerti l'effettiva sussistenza del problema, deve assumere i provvedimenti che, pur nella sua discrezionalità, devono rivelarsi idonei a contrastare il fenomeno.

Quali gli strumenti a sua disposizione? Va chiarito che non vi sono provvedimenti ad hoc – stabiliti a livello normativo – che siano stati pensati per affrontare in modo strutturale o quantomeno specifico il fenomeno (mala)movida in tutte le sue derive patologiche.

I comuni solitamente ricorrono alle **ordinanze cosiddette di necessità**. La norma di riferimento è il decreto legislativo n. 267/2000 (Testo Unico Enti Locali) il cui art. 54 prescrive che, in caso di emergenza sanitaria e di igiene pubblica a carattere locale, il Sindaco adotta ordinanze contingibili ed urgenti. La finalità è dunque quella di salvaguardare le esigenze primarie della collettività, la salute, l'ordine pubblico, l'igiene, ecc. Sono provvedimenti che costituiscono una deroga

ai principi di tipicità degli atti amministrativi (quali sono, ad esempio, l'autorizzazione, le licenze, i nulla osta, la concessione, l'esproprio, i bandi di gara, ecc.) tanto che vengono definiti *extra ordinem* e sono atti a contenuto indeterminato.

Spesso i giudici amministrativi vedono con sospetto l'emanazione di questa tipologia di provvedimenti perché adottati in assenza di un'adeguata istruttoria tesa a verificare la sussistenza degli indispensabili requisiti oppure perché adottati in inammissibile supplenza di provvedimenti amministrativi che avrebbero dovuto essere assunti a seguito di un ordinario iter procedimentale con tutte le garanzie preposte a tutelare un effettivo contraddittorio.

Vi è poi l'**ordinanza contingibile ed urgente specifica per l'inquinamento acustico ex art. 9 legge 447/95**. Recita l'articolo 9: "Qualora sia richiesta da eccezionali ed urgenti necessità di tutela della salute pubblica o dell'ambiente il sindaco, il presidente Giunta regionale... con provvedimento motivato, possono ordinare il ricorso temporaneo a speciali forme di contenimento o di abbattimento delle emissioni sonore, inclusa l'inibitoria parziale o totale di determinate attività".

Sono strumenti efficaci per contrastare la (mala)movida?

Come sopra già si è accennato, per tamponare emergenze può darsi, ma non sono affatto strumento di governance permanente della Movida. La loro legittimità presuppone il rispetto di una pluralità di parametri molto vincolanti: sono ammissibili unicamente per prevenire o eliminare gravi pericoli per l'incolumità dei cittadini, dovuti a situazioni imprevedibili di emergenza e non fronteggiabili con i tipici provvedimenti amministrativi. Inoltre possono produrre solo effetti temporanei, non modificano la disciplina vigente ma ne sospendono soltanto l'applicazione. Devono essere sempre motivate ed emesse all'esito di adeguata istruttoria che deve trasparire proprio dalla motivazione. Il Comune è tenuto a revocarle nel momento in cui cessa l'emergenza/pericolo. Basta che qualcuno di questi parametri non sia rispettato che l'ordinanza è suscettibile di essere annullata.

Piuttosto, sembrano più idonei le **ordinanze emanate in forza dell'art. 9 del TULPS** (Testo Unico delle Legge di Pubblica Sicurezza di cui al r.d. n. 773/1931 e ss.mm.ii., che così dispone: "Oltre le condizioni stabilite dalla legge, chiunque ottenga un'autorizzazione di polizia deve osservare le prescrizioni, che l'autorità di pubblica sicurezza ritenga di imporgli nel pubblico interesse") e ciò in quanto sono provvedimenti la cui legittimità non presuppone la ricorrenza di quei parametri che abbiamo visto occorrenti per le ordinanze contingibili ed urgenti, essendo sufficiente l'elemento, di carattere più generale e meno stringente, della sussistenza di un interesse pubblico.

2.2 | L'azione davanti al Giudice ordinario

Altra opzione di tutela per i disturbati dalla (mala)movida è l'azione davanti al Giudice ordinario fondata principalmente sull'art. 844 c.c. già sopra citato.

In tal caso i ruoli sono invertiti rispetto all'azione amministrativa: i cittadini disturbati non si rivolgono alla Pubblica

amministrazione per chiedere a questa di intervenire nei confronti dei gestori dei locali «fracassoni», bensì promuovono causa contro il Comune affinché il Giudice condanni quest'ultimo ad assumere i provvedimenti meglio ritenuti per risolvere il problema.

Negli ultimi anni si sono susseguite, con esito vittorioso, varie iniziative promosse da cittadini esasperati, con iniziative collettive o singole, per cui questa opzione sembra essere quella preferibile per combattere il fenomeno.

Vi sono recentissime decisioni, infatti, che hanno condannato le Amministrazioni comunali a prendere provvedimenti di mitigazione ed al risarcimento dei danni in misura assai rilevante. Si segnalano: sentenza del Tribunale di Napoli 253 del 20.1.2025; ordinanza ex art. 700 c.p.c. Tribunale di Napoli del marzo 2025; sentenza del Tribunale di Pescara n. 2068 del 2024.

Per comprendere meglio queste decisioni bisogna ripercorrere l'iter seguito dalla precedente giurisprudenza.

Tribunale Brescia sentenza 2621/17 ha accolto la domanda di alcuni residenti nei confronti del Comune di Brescia motivando che l'ente proprietario della strada da cui provengono le immissioni denunciate, deve provvedere ad adottare le misure idonee a far cessare dette immissioni.

Il Tribunale ha ordinato al Comune la cessazione immediata delle immissioni rumorose denunciate mediante l'adozione dei provvedimenti opportuni più idonei allo scopo che il Tribunale stesso ha individuato nella predisposizione di un servizio di vigilanza con l'impiego di agenti comunali che si adoperino a far disperdere ed allontanare dalla strada comunale le persone che stazionano lungo la stessa e che non se ne allontanano spontaneamente.

Corte Appello di Torino del 13.10.2022. In primo grado il Tribunale di Torino nella causa promossa da alcuni residenti del quartiere di San Salvario aveva da un lato condannato il Comune al risarcimento dei danni agli attori disturbati ma, dall'altro, aveva respinto la domanda di condanna del Comune a provvedere ai rimedi necessari per riportare le immissioni nel limite della normale tollerabilità. La sentenza è stata appellata dai residenti. Il Comune di Torino si è difeso ribadendo la tesi che l'incremento del numero dei locali era stata una conseguenza della liberalizzazione del Decreto Bersani, per cui il Comune può imporre restrizioni solo se giustificate da superiori esigenze e nei limiti di proporzionalità ed adeguatezza.

Ed entro questi limiti, è stata la difesa del Comune, aveva già provveduto riducendo orari di apertura e chiusura, disciplinando modalità di somministrazione delle bevande, disponendo controlli di ARPA ed altre misure ancora. Altro non poteva fare e nessun addebito di colpa poteva essergli mosso.

Ma la Corte di appello ha disatteso queste argomentazioni ed ha ribaltato la decisione del tribunale.

La Corte ha ritenuto innanzitutto che la giurisdizione appartenesse al Tribunale ordinario, e non al Tribunale amministrativo (come sosteneva il Comune), in quanto in causa si discuteva principalmente della lesione del diritto alla salute, ossia di un diritto soggettivo la cui tutela compete al giudice ordinario, per l'appunto, e la pubblica amministrazione è

tenuta ad attivarsi per far sì che questo diritto non subisca compromissioni nel suo nucleo essenziale.

E se l'Ente pubblico, anche a mezzo di comportamenti omissivi (come nel caso di specie) non tutela questo diritto, commette un illecito.

All'argomentazione secondo la quale l'incremento del numero dei locali è stata una conseguenza della liberalizzazione del Decreto Bersani, per cui il Comune può imporre restrizioni solo se giustificate da superiori esigenze e nei limiti di proporzionalità ed adeguatezza, la Corte di appello ha osservato che l'azione ex art. 844 c.c., una volta riscontrata la presenza di immissioni intollerabili, al proprietario del fondo da cui esse provengono può esserne ordinata la cessazione a prescindere da qualsiasi profilo di colpa e dalle ragioni per le quali esse si verificano.

Aggiunge però la Corte torinese che se l'Ente possa essere condannato anche al *facere* occorre però considerare la varietà dei casi concreti che possono o meno implicare una interferenza del Giudice ordinario nella sfera rimessa alla discrezionalità amministrativa, discrezionalità che, se non può comprimere diritti fondamentali incompressibili, come quelli fatti valere (alla salute e alla qualità della vita, n.d.r.), può esplicarsi nel modo con cui accordare la tutela.

Tantomeno potrebbe il Giudice ordinario disporre l'emissione di atti amministrativi, ad esempio di riduzione degli orari degli esercizi ovvero di controllo del territorio da parte della Polizia locale.

Ecco il punto di equilibrio individuato dalla Corte: da un lato ha ritenuto di doversi limitare ad ordinare al Comune di far cessare le immissioni rumorose superiori alla normale tollerabilità nelle ore serali e notturne nelle quali la violazione è stata denunciata e constatata (in particolare, esse andranno ridotte con riferimento ai limiti dettati dalla zonizzazione acustica del territorio e dalla normativa regolante la materia per le ore serali e notturne e la relativa verifica andrà poi condotta con le medesime modalità e criteri seguiti dal CTU); dall'altro lato ha lasciato alla discrezionalità del Comune la individuazione dei mezzi e delle misure da applicare per raggiungere l'obiettivo acustico, fissando il termine di 6 mesi e prevedendo per ogni giorno di ritardo il pagamento di una penale a favore di ciascuno dei cittadini che avevano promosso la causa.

Sentenza Corte di Cassazione n. 14209/2023. La sentenza del Tribunale di Brescia sopra riportata era stata riformata dalla Corte di appello di Brescia con sentenza del 2020, secondo la quale non ci sarebbe una norma che impone alla P.A. di intervenire in situazioni di questo tipo, salvo necessità di ordine pubblico, per cui la pretesa dei cittadini non poteva trovare accoglimento.

Avverso la sentenza della Corte bresciana i disturbati hanno proposto ricorso per Cassazione, la quale si è pronunciata con sentenza 14209 del 2023.

La Cassazione ha annullato la sentenza della Corte di appello. Innanzitutto ha enunciato il principio per cui la tutela del privato che lamenta la lesione del diritto alla salute e alla vita familiare e della stessa proprietà, cagionata dalle immissioni acustiche intollerabili ex art. 844 c.c., provenienti da area pub-

blica trova fondamento, anche nei confronti della P.A., anzitutto nelle norme a presidio dei beni oggetto dei menzionati diritti soggettivi (artt. 844, 2043, 2059 c.c., la L. 447/95 n.d.r.).

Inoltre la Cassazione fa capire che non era stata corretta la decisione del Tribunale in punto condanna del Comune di Brescia a incaricare personale dipendente a eseguire servizi di sorveglianza, e ciò perché incide sulla discrezionalità amministrativa, che è da rispettare. Ma la Corte di Appello, anziché ribaltare la sentenza e respingere le domande degli attori, avrebbe potuto e dovuto «imporre (non già le modalità di esercizio del potere discrezionale ad essa spettante, ma) di procedere agli interventi idonei ed esigibili – da esso Comune individuati – per riportare le immissioni acustiche entro la soglia di tollerabilità. Proprio Come aveva disposto la Corte di appello di Torino.

L'autore rileva che le recenti pronunce del Tribunale di Napoli – sentenza n. 253 del 20.1.2025 e ordinanza ex art. 700 cpc del febbraio 2025 – nell'accogliere le domande dei disturbati, non si allineano a questo principio, avendo ritenuto di imporre al Comune precise disposizioni (servizio di vigilanza, tra le altre), come già aveva ritenuto il Tribunale di Brescia.

Personalmente ho delle perplessità sul grado di resistenza di queste pronunce ad eventuali (probabili) impugnazioni.

Ben si può capire che, stante il grado di esasperazione dei disturbati, conseguire una sentenza che porti ad una condanna immediata dell'Ente pubblico ad un fare già ben determinato, possa sembrare un risultato auspicabile, agognato da moltitudini di persone.

Ma il rischio che sia effimero, alla luce della sentenza della Cassazione, pare piuttosto concreto.

L'ordinanza della Cassazione n. 18676 del 9 luglio 2024 su spettacoli organizzati su una piazza del Comune. La recente sentenza della Corte di Cassazione interviene nel delicato equilibrio tra il diritto dei cittadini alla quiete e l'interesse pubblico allo svolgimento di eventi culturali e ricreativi.

La vicenda. In una piazza di località turistica il Comune a partire dal 2013 organizzava numerosi spettacoli che creavano immissioni acustiche fortemente disturbanti con inizio dal primo pomeriggio (prove) fino a tarda sera. I proprietari di una seconda casa che sia affacciava sulla piazza hanno adito le vie legali. Tribunale e Corte di appello di Genova hanno dato ragione ai disturbati. Il Comune è stato condannato a ridurre il numero degli spettacoli (due alla settimana), a terminare gli spettacoli anticipatamente (alle 23) ed a risarcire il danno. Il Comune è ricorso in Cassazione, che ha respinto il ricorso.

L'ordinanza in esame enuncia tre principi chiave:

- l'interesse pubblico non può legittimare immissioni sonore che eccedano i limiti di tollerabilità, mettendo a rischio la salute e la tranquillità dei residenti;
- i limiti posti dai regolamenti (nel caso di specie il regolamento non prevedeva limiti né orari al numero degli spettacoli e consentiva un livello fino a 70 dB al recettore) sono solo indicativi in quanto immissioni che pur rientrino in quei limiti possono considerarsi intollerabili nel caso concreto;

- anche un ente pubblico è soggetto all'obbligo di non provocare immissioni intollerabili, potendo essere condannato ad un fare per riportarle nei limiti ed a risarcire i danni.

Anche questa sentenza segna un passo importante nella tutela del diritto alla quiete dei cittadini.

Le amministrazioni, se non vorranno incorrere nel rischio di essere condannate, prima di organizzare o consentire l'organizzazione di eventi, dovranno effettuare una pianificazione accurata che preveda quantomeno:

- che siano tenuti possibilmente in aree non residenziali;
- se non fosse possibile, la limitazione del numero e della durata degli eventi particolarmente rumorosi;
- l'adozione di misure di mitigazione come barriere acustiche, il controllo del volume degli impianti.

2.3 | L'azione penale

Può suggerirsi di unire alla iniziativa, vuoi in sede amministrativa che privatistica, la presentazione di una querela verso il soggetto disturbante per il reato ex art. 659 c.p. (3).

Può infatti configurarsi in una situazione di disturbo da avventori di locali il reato suddetto. La Corte di Cassazione Penale con la sentenza 14750/20 ha enunciato a proposito della responsabilità penale dei gestori di locali i seguenti principi.

- La veste di titolare della gestione dell'esercizio pubblico comporta l'assunzione dell'obbligo giuridico di controllare, con possibile ricorso ai vari mezzi offerti dall'ordinamento (come l'attuazione dello *"ius excludendi"*, ossia di allontanamento anche ricorrendo a personale a ciò preposto) che la frequentazione del locale da parte degli utenti non sfoci in condotte contrastanti con le norme poste a tutela dell'ordine e della tranquillità pubblica.
- Perché l'evento possa essere addebitato al gestore dell'esercizio commerciale, è sufficiente che esso sia riconducibile al mancato esercizio del potere di controllo da parte del gestore stesso, *da esercitarsi in modo sostanziale e non di sola facciata* (di sola facciata potrebbe essere la semplice affissione di un cartello che invia a non disturbare il vicinato).
- L'obbligo del gestore sussiste a prescindere dall'eventuale inerzia della Pubblica Amministrazione, chiamata per prima a ponderare con rigore gli interessi in gioco nella gestione degli spazi pubblici e a dirimere eventuali contrasti.
- Altro reato configurabile è quello previsto dall'art. 328 c.p. (4) a carico del pubblico ufficiale per omissione di atti di ufficio.

Si suggerisce di unire la denuncia penale benché la norma penale abbia lo scopo di punire il colpevole e non quello di trovare soluzioni al problema sottostante (scopo che è proprio invece sia della norma amministrativa che di quella privatistica), in quanto la denuncia penale (allorquando fondata e la valutazione va compiuta con la massima ponderazione) può costituire un valido mezzo di pressione sugli organi che, nell'ambito di quella Pubblica amministrazione, sarebbero

stati in dovere di intervenire, affinché assumano provvedimenti per alleggerire la loro posizione nel procedimento penale che si aprisse o che fosse già aperto.

(1) Art. 844 c.c. (Immissioni). Il proprietario di un fondo non può impedire le immissioni di fumo o di calore, le esalazioni, i rumori, gli scuotimenti e simili propagazioni derivanti dal fondo del vicino, se non superano la normale tollerabilità, avuto anche riguardo alla condizione dei luoghi.

Nell'applicare questa norma l'autorità giudiziaria deve contemperare le esigenze della produzione con le ragioni della proprietà. Può tener conto della priorità di un determinato uso.

(2) Art. 2043 c.c. (Risarcimento per fatto illecito). Qualunque fatto doloso o colposo, che cagiona ad altri un danno ingiusto, obbliga colui che ha commesso il fatto a risarcire il danno.

(3) (Disturbo delle occupazioni o del riposo delle persone) Chiunque, mediante schiamazzi o rumori, ovvero abusando di strumenti sonori o di segnalazioni acustiche, ovvero suscitando o non impedendo

strepiti di animali, disturba le occupazioni o il riposo delle persone, ovvero gli spettacoli, i ritrovi o i trattenimenti pubblici, è punito con l'arresto fino a tre mesi o con l'ammenda fino a lire tremila.

Si applica l'ammenda da lire mille a cinquemila a chi esercita una professione o un mestiere rumoroso contro le disposizioni della legge o le prescrizioni dell'Autorità.

(4) Art. 328 (Rifiuto di atti d'ufficio. Omissione). Il pubblico ufficiale o l'incaricato di un pubblico servizio, che indebitamente rifiuta un atto del suo ufficio che, per ragioni di giustizia o di sicurezza pubblica, o di ordine pubblico o di igiene e sanità, deve essere compiuto senza ritardo, è punito con la reclusione da sei mesi a due anni.

Fuori dei casi previsti dal primo comma, il pubblico ufficiale o l'incaricato di un pubblico servizio, che entro trenta giorni dalla richiesta di chi vi abbia interesse non compie l'atto del suo ufficio e non risponde per esporre le ragioni del ritardo, è punito con la reclusione fino ad un anno o con la multa fino a lire due milioni.

Tale richiesta deve essere redatta in forma scritta ed il termine di trenta giorni decorrere dalla ricezione della richiesta stessa.

Rivista Italiana di Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

EDITORIALE/EDITORIAL

Angelo Farina, il suo esempio continuerà ad ispirarci!

Fausti

ARTICOLI SCIENTIFICI/SCIENTIFIC PAPERS

The effectiveness of an active noise control system with remote microphones technique in a tractor cabin

Mori et al.

Ecoacustica e struttura forestale: un approccio integrato per l'analisi ecosistemica

Guagliumi et al.

Realizzazione della "Camera dei Diamanti" e verifica delle prestazioni di spazializzazione del suono

Grassi et al.

Miglioramento acustico della Chiesa di Santo Stefano al Ponte Firenze

Franchini et al.

Il rapporto tra i suoni e la città: valutazione della qualità sonora in ambito urbano

Valentini et al.

NOTE TECNICHE/TECHNICAL NOTES

Analisi delle caratteristiche acustiche di alcuni teatri all'italiana toscani

Bartoli et al.

Riqualificazione acustica in un ambiente ristorativo: un caso di studio

Griginis et al.

Acoustic comfort and fit-out in open space offices: considerations based on a real case assessment

Giglio et al.

VITA DELL'ASSOCIAZIONE/LIFE OF THE ASSOCIATION

Resoconto del Simposio internazionale AIA "Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia"

Fusaro et al.

Resoconto del Simposio AIA-UNI "L'evoluzione della normativa tecnica in acustica: ultimi aggiornamenti"

Scrosati et al.

Resoconto del Seminario AIA "Una 'buona' musica dentro e fuori i locali di pubblico spettacolo e all'aperto"

Aiello et al.

VIAGGIO NEI LABORATORI DI ACUSTICA/ACOUSTIC LABORATORY TOUR

Viaggio nei Laboratori di Acustica: Politecnico di Bari

Ayr et al.

ACUSTICA E SOCIETÀ/ACOUSTIC AND SOCIETY

Il grave impatto acustico della (mala)movida. Mezzi di tutela sotto il profilo giuridico. In particolare l'azione in sede civile

Durelli

 **FrancoAngeli**
La passione per le conoscenze

Edizione fuori commercio
R9504.2025.1