Rivista Italiana di Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 48, n. 2/2024

luglio-dicembre

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. 48, n. 2/2024

luglio-dicembre

FrancoAngeli

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 © 2024 by FrancoAngeli s.r.l.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore ed è pubblicata con licenza Creative *Commons Attribuzione-Non Commerciale-Non opere derivate 4.0 Internazionale* (CC-BY-NC-ND 4.0).

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

v. 48, II semestre 2024

Indice

Editoriale/Editorial

7 **La nuova Rivista Italiana di Acustica: un primo bilancio**
Eleonora Carletti, Francesco Pompoli

Articoli scientifici/Scientific papers

9 **The ECODRIVE Project: controlling and managing traffic for reducing noise from private road transport**
Patrizia Bellucci, Tina Onorato, Ernesto Cipriani

19 **Ottimizzazione dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici: applicazione al Parco Regionale della Valle del Ticino**
Giorgia Guagliumi, Roberto Benocci, Andrea Potenza, Valentina Zaffaroni-Caorsi, Fabio Angelini, Giovanni Zambon

33 **Rassegna dei metodi di analisi della sostenibilità applicabili alle misure di mitigazione sonora**
Patrizia Bellucci, Francesca Ciarallo, Laura Peruzzi

Note tecniche/Technical notes

49 **Acoustic design of a modular studio box for use as control and mixing room for immersive audio**
Andrea Cicero

59 **Indagine sperimentale sul rumore intrinseco della strumentazione nelle misurazioni fonometriche e la misurazione a livelli sonori molto bassi**
Andrea Cerniglia, Giovanni Brambilla

Lettere all'editore/Letters to the editor

67 **Lettera all'editore su "Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà"**
Daniele Ponteggia

Vita dell'associazione/Life of the association

69 **Resoconto del 50° Convegno Nazionale AIA**
Gaetano Licitra, Lucilla Aiello

Viaggio nei Laboratori di Acustica/Acoustic Laboratory Tour

75 **Viaggio nei Laboratori di Acustica: Università di Napoli Federico II**
Raffaele Dragonetti, Elio Di Giulio, Marialuisa Napolitano, Rosario Romano, Francesco Pompoli

Progetti di ricerca in acustica/Acoustics research projects

81 **PRIN: Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale.**
OUTFIT – crOwdsoUrced daTa Feeding noise maps in dIgital Twins
Elena Ascari, Pasquale Gorrasi

83 **Acoustic performances of Test Cases developed within iclimabuilt project: an open innovation test bed for building envelope materials**
Andrea Gerbotto, Louena Shtrepi, Fabio Favoino, Arianna Astolfi

La nuova Rivista Italiana di Acustica: un primo bilancio

Eleonora Carletti* | Francesco Pompoli**

Gentile Lettore, gentile Lettrice,

con questo numero si chiude il secondo anno di attività della nuova Rivista Italiana di Acustica (RIA), dopo il passaggio all'Editore FrancoAngeli. Cogliamo l'occasione per condividere un primo bilancio dell'attività svolta, per sottolineare quanto di positivo sia stato realizzato, cosa ci si propone di raggiungere nel prossimo futuro e le attuali criticità nella gestione della RIA.

Partiamo dagli obiettivi individuati dal Consiglio Direttivo dell'AIA che hanno portato alla nomina di un Comitato Editoriale incaricato di raggiungerli, e di quanto è stato finora realizzato:

- *gestire il passaggio ad un editore professionale per dare maggiore visibilità e professionalità alla RIA*: questa attività ha impegnato tutta la redazione per predisporre un "ciclo di lavorazione" degli articoli soddisfacente, sia in termini di revisioni scientifiche che di qualità editoriale finale degli articoli; i risultati sono sotto gli occhi di tutti, una pubblicazione facilmente accessibile, scaricabile liberamente in pdf per intero o per singoli contenuti, con una grafica elegante ma nello stesso tempo pulita ed essenziale. Alcuni aspetti della gestione sono ancora in corso di ottimizzazione, il nostro sforzo per migliorare continua!;
- *valorizzare i contenuti scientifici della RIA per portarla ad una indicizzazione di livello internazionale (Scopus)*: il miglioramento della qualità dei contenuti necessita di contributi originali, che non siano già stati integralmente o parzialmente pubblicati, per evitare spiacevoli contenziosi con altre riviste a cui gli autori hanno in precedenza ceduto i diritti di pubblicazione. La qualità degli articoli scientifici richiede anche che siano presenti aspetti innovativi della ricerca presentata, che vanno accuratamente evidenziati attraverso una panoramica di bibliografia già esistente sull'argomento. Nel caso in cui questo aspetto manchi, è possibile proporre alla RIA una nota tecnica, che presenti un contenuto applicativo di potenziale interesse per i lettori della Rivista;
- *ottenere l'indicizzazione della RIA su Scopus*: tale aspetto è di fondamentale importanza per l'attuale metodo di selezione del personale nelle Università ed Enti di Ricerca italiani: molte metriche utilizzate per valutare "oggettivamente" la produzione scientifica di un ricercatore passano attraverso i contenuti indicizzati su Scopus, per cui se si vuole stimolare la sottomissione di articoli scientifici alla RIA è fondamentale entrare in questa piattaforma; grazie ai primi tre fascicoli pubblicati (1/47, 2/47 e 1/48) la richiesta di indicizzazione è già stata sottomessa e siamo in attesa del risultato finale, che confidiamo sarà positivo. Potenziali aspetti critici che abbiamo cercato di curare ma che possono essere migliorati sono relativi alla internazionalizzazione della Rivista, sia in termini di Comitato Editoriale (abbiamo al momento 13 membri afferenti ad istituzioni straniere) che di contributi scientifici (su questo aspetto dobbiamo lavorare intensamente);
- *rendere più rapida la pubblicazione degli articoli sulla RIA*: attualmente i tempi di pubblicazione possono essere piuttosto lunghi, a causa della periodicità semestrale dei fascicoli; dal prossimo anno l'editore Franco Angeli metterà a disposizione della Rivista la modalità di pubblicazione *Online First*, che prevede la pubblicazione dei singoli contributi appena disponibili nel formato editoriale finale, senza attendere l'uscita del fascicolo semestrale. Questa modalità ha un costo aggiuntivo che l'AIA ha deciso di sostenere al posto dei singoli autori, per incrementare l'appetibilità della RIA; tale modalità verrà attivata non appena ottenuta l'indicizzazione su Scopus, quindi auspicabilmente durante il 2025;
- *rendere la RIA non solo una rivista scientifica ma anche un organo di informazione per i Soci AIA, realizzando contenuti extra-scientifici che valorizzino e lascino traccia delle numerose attività svolte in ambito acustico in Italia*: su questo aspetto abbiamo lavorato intensamente, realizzando una sorta di fascicolo aggiuntivo che raccoglie diverse tipologie di sezioni come, ad esempio: a) la rubrica "Vita dell'Associazione", con resoconti delle principali attività organizzate da AIA, quali ad esempio Convegni e Seminari; b) una sezione legata ai "Progetti di Ricerca", che descrive progetti di ricerca di rilevanza nazionale ed internazionale ed illustra i temi di frontiera in ambito acustico che coinvolgono i ricercatori italiani; c) la nuova sezione "Viaggio nei Laboratori di Acustica", che inauguriamo in questo numero, e che attraverso la visita virtuale della sede di un ente di ricerca italiano, ne illustrerà i principali laboratori, le attrezzature, le strumentazioni e le tematiche di ricerca. Per arricchire ulteriormente questi contenuti tutti i soci AIA sono invitati a proporre nuovi contributi che possano essere di interesse per i lettori;
- *recuperare e valorizzare la storia della RIA, ormai vicina al cinquantesimo anno (2027), creando un database di tutti*

* Direttrice Responsabile della Rivista Italiana di Acustica
** Responsabile di Redazione della Rivista Italiana di Acustica

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18827

gli articoli pubblicati dalla sua nascita, liberamente consultabile online sul sito della Associazione: questa attività è da poco stata avviata e speriamo possa essere terminata nel prossimo anno.

Per concludere, tra gli aspetti critici che al momento sono solo parzialmente risolti, abbiamo sicuramente un numero ridotto di proposte sottomesse alla Rivista: l'azione di stimolo alla sottomissione è continua, ad esempio invitando partecipanti a Convegni e Seminari a presentare contributi ampliati alla RIA, oppure "obbligando" i partecipanti ai premi AIA a presentare un articolo alla Rivista.

Finora questi sforzi hanno prodotto un buon numero di articoli (18 articoli scientifici, 9 note tecniche, 5 contributi invitati, 1 lettera all'editore distribuiti in 2 anni e 4 fascicoli), ma l'obiettivo a lungo termine sarebbe quello di ottenere "spontaneamente" un maggior numero di articoli ed intensificare l'attività di revisione e pubblicazione di articoli; la speranza è che l'indicizzazione della RIA possa aiutare questo processo ma l'invito che ci sentiamo di fare a tutti i Soci è quello di pensare alla RIA come un bene della nostra Associazione, che per vivere e prosperare ha bisogno di essere alimentato dai nostri contributi.

Ci teniamo infine a ringraziare i membri del Comitato Editoriale per il loro impegno, i revisori anonimi degli articoli per il loro tempo prezioso, il nostro editore FrancoAngeli per la sua professionalità, la Presidenza ed i Consiglieri AIA per il loro costante sostegno e, non ultimi, gli autori per il loro contributo scientifico.

The ECODRIVE Project: controlling and managing traffic for reducing noise from private road transport

Patrizia Bellucci[a] | Tina Onorato[a,b]* | Ernesto Cipriani[b]

[a] ANAS SpA, Production Services Direction - PMO Research and Development, Via Pianciani, 26, 00185 Rome

[b] Department of Civil, Computer Science and Aeronautical Technologies Engineering, Rome Tre University, Via Vito Volterra, 62, 00146 Rome

* Corresponding author: tina.onorato@uniroma3.it

Ricevuto: 15/3/2024
Accettato: 26/5/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa17484
ISSNe: 2385-2615

In order to meet the current pressure from the European Commission on the Member States, in last decades, innovative solutions have been proposed to improve the sustainability of human activities on the territory. In this context, the ECODRIVE Project aims at reducing atmospheric pollution and noise generated by private road transport through the implementation of specific traffic management and control policies, which can encourage users towards more sustainable driving behaviours. In order to demonstrate the effectiveness of these policies, and with the aim of focusing the analysis on the acoustic part of the project, the effects of some policies based on the application of increasingly restrictive speed limits were illustrated. The results showed how careful traffic management can guarantee environmental benefits. In the future, however, it will also be necessary to take into account the side effects of the application of these policies, such as the increase in travel times, which is one of the main disadvantages for road users.
Keywords: sustainability, noise pollution, noise emissions

Il progetto ECODRIVE: controllo e gestione del traffico per ridurre il rumore del trasporto privato su strada

Per far fronte alle attuali pressioni della Commissione Europea sugli stati membri, negli ultimi decenni sono state proposte soluzioni innovative per migliorare la sostenibilità delle attività umane sul territorio. Il progetto ECODRIVE si inserisce in questo contesto, con l'obiettivo di ridurre le emissioni inquinanti in atmosfera e il rumore generato dal trasporto privato su strada, mediante l'implementazione di apposite politiche di gestione e controllo del traffico che possano spingere gli utenti verso comportamenti di guida più sostenibili. Al fine di mostrare l'efficacia di tali politiche e con l'obiettivo di focalizzare l'analisi sulla parte acustica del progetto, sono stati illustrati gli effetti di alcune politiche basate sull'applicazione di limiti di velocità sempre più restrittivi. I risultati hanno mostrato come la gestione del traffico in modo oculato possa garantire benefici ambientali. In futuro, però, sarà necessario tenere conto anche degli effetti collaterali dell'applicazione di tali politiche, come, ad esempio, l'incremento dei tempi di viaggio, che rappresenta uno dei principali svantaggi per gli utenti della strada.
Parole chiave: sostenibilità, inquinamento acustico, emissioni acustiche

1 | Introduction

The rapid development of society occurred in recent times has affected all human activities, leading to the economic growth, the increase in the welfare of population, as well as an overall increase in population. In the transportation field this resulted in an increasing demand for mobility among people, who began to prefer car as the mean of transport that best suits their needs. Automotive industries, planners and Public Administrations tried to deal with these changing requirements of population, with continuous advancements in cars' technology, the expansion of road infrastructures, and the development of communication and monitoring systems to improve road circulation. This widespread usage of cars, however, has negative consequences on congestion, road safety, and, more importantly, on the environmental impact of the private road transport. The latter is central to an ongoing debate regarding the measures to be taken to achieve the objectives of the European Green Deal [1], that is pressing Member States to take specific actions to reach the "Zero Emission Target". The transport sector is primarily involved in achieving this goal, as it is one of the major contributors to pollutant emissions in atmosphere, especially GHG, coming from burning fossil fuels, and to noise production. Noise is known as the "unseen pollutant" [2] and its long-term effects can be very harmful to human health, environment, and ecosystems. In fact, according to what is reported in the last quinquennial Report on the Implementation of the Noise Directive [3], it is the second most important environmental disease factor in the EU, after air pollution, and proper actions must be taken to reduce by 30% (compared with 2017) the number of people chronically exposed to traffic noise by 2030, as mandated by the European Greed Deal. However, the predictions of the European Environmental

Agency (EEA) are not so optimistic [4]. According to these estimates, in 2017 about 18 million people in Europe were suffering from long-term exposure to road, rail and aircraft noise and this datum has remained relatively constant until today. The same report [4] argues that the 30% reduction of people exposed is unlikely to be achieved within the time limit set by the European Commission, unless significative resources will be spent on more efficient transport planning, better management of transport systems, and significative reductions in road traffic. In this context, the ECODRIVE project takes place, aiming at reducing both pollutant emissions and noise due to private road transport by managing and controlling traffic flows, with proper policies. These actions, involving the main traffic variables, e.g. speed limits or road's capacity, force users to take less aggressive and more sustainable driving behaviours. The project will be the topic of this paper, which will be divided as follows: in the next section (Section 2), the theoretical framework and the literature review will be reported, while in Section 3 the main aspects of the project will be presented. In Section 4, the main results from the speed-based tests conducted on a real network will be exhibited and discussed. The last paragraph (Section 5) will be devoted to the conclusions and the potential future developments of the project.

2 | Literature review

Noise pollution is the introduction into the environment of any unwanted, unintentional, and disturbing sound producing disturbance or annoyance in humans, daily activities, and ecosystems [2]. The main noise sources, due to human activities on the territory can be identified in: domestic activities, social events, commercial, industrial and craft activities, and transportation [5]. The latter is one of the major causes of noise pollution, especially in urban areas, and it can be attributable to three different noise sources: road, rail, and aircraft noise. Although railway noise and aircraft noise, especially during the taking-off and landing phases, reach significative values, they are discontinuous and only cause nuisance in the areas neighbouring stations and airports, while road traffic noise is present throughout the entire territory and affects urban, suburban, and residential areas.

For the assessment of road traffic noise, different models were developed over the years [6], [7], [8]. These models have become more accurate over time, as detection techniques have been refined, but they all consider the same fundamental variables, albeit related in different ways:

- *Q*: traffic volumes [veh/h], as it is known that noise levels increase for larger numbers of vehicles [9];
- v_m: traffic mean speed [km/h], as data indicates a linear relationship between noise and speed [10]. Speed is known for being the variable that has the greatest impact on noise;
- *d*: distance from the source [m], since the noise reduces as the distance between the source and the receiver increases, due to the propagation phenomenon [11].

In addition to the variables used in calculation, there are several other factors that influence the noise emitted by vehicles. These factors can be classified as follows [9]:

- *Traffic factors* that, in addition to traffic volumes and mean speeds, also include vehicle composition, the percentage of heavy vehicles within the fleet, and the presence of congestion or bottlenecks;
- *Road factors* which concern the characteristics of the infrastructure, such as pavements, grade, geometry, presence of intersections, and installation of noise barriers;
- *Vehicle factors*, that mainly relate to vehicle features, e.g. type of engine, type of fuel, age and state of maintenance of the vehicle;
- *Human factors* which include behaviour, habits, and experience of drivers.

In the last years, the European Union tried to provide a unique methodology for the assessment of noise emissions form transportation, to standardize the calculation procedures of all Member States. This has led to the entry into force of the Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 [12], which describes CNOSSOS-EU model [13], for the assessment of noise from transportation systems. The model allows to estimate traffic noise as a combination of propulsion noise (Eq. 1), that generates from the engine of the vehicle, and the roll-ing noise (Eq. 2), that is caused by the movement of tyres on the road surface.

$$L_{WP\,f,m} = A_{P\,f,m} + B_{P\,f,m} \cdot \left(\frac{v_m - v_{ref}}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WP\,f,m}(v_m) \qquad (1)$$

$$L_{WR\,f,m} = A_{R\,f,m} + B_{R\,f,m} \cdot log\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR\,f,m}(v_m) \qquad (2)$$

Where:

- $L_{WPf,m}$ is the propulsion noise sound power level, in the frequency *f*, for a vehicle of class *m* [dB];
- $L_{WRf,m}$ is the rolling noise sound power level, in the frequency *f*, for a vehicle of class *m* [dB];
- v_m is the traffic mean speed [km/h];
- v_{ref} is the reference speed, equal to 70 km/h;
- $A_{pf,m}$, $B_{Pf,m}$, $A_{Rf,m}$, and $B_{Rf,m}$ are coefficients differentiated for each octave band and for each vehicle class *m*, for a reference speed v_{ref} [12];
- $\Delta L_{pf,m}$, $\Delta BL_{Rf,m}$ are the sums of corrective factors, that consider conditions which differ from those of the base calculation [12].

The Environmental Noise Directive 2002/49/EC [14] has laid down several rules to be followed by all EU Member States in designing and implementing targeted actions for noise reduction. These actions are known as "noise mitigation measures" and they are usually classified into three categories: at the source, on the propagation path, and on the receivers [15]. At-source measures are the most efficient noise mitigation strategies [16] and they are thought to act on the different components of road traffic noise. In fact, incentivizing the pur-

chase of electric vehicles, or encouraging users towards more moderate driving behaviours can allow to reduce the propulsion noise, while abatements in rolling noise can be achieved through interventions on tyres and road surfaces, as well as through variations in road speed limits. Targeted measures on mobility, such as reductions of traffic volumes, restrictions on speed limits and vehicle compositions, as well as incentives for sharing mobility, and adoption of toll schemes, can also help to reach good results in terms of noise pollution reduction. When at-source measures are not sufficient and interventions on propagation paths are needed, the installation of noise barriers is recommended, being the most effective actions, even if the performance of each barrier depends on the characteristics of the site where it is placed [15]. When interventions at the source or along the propagation paths are insufficient, too complicated, or too expensive, interventions on the receivers are taken into account. These actions consist in modifications and improvements on buildings and façades, to reduce the negative effects of the noise.

The ECODRIVE Project, which is the subject of this paper, involves the application and test of some traffic management and control policies, to encourage users to adopt more sustainable driving behaviours, thereby reducing emissions from road transport. For this reason, these policies can be classified as at-source measures, where the sources of noise are the individual vehicles moving in the network.

3 | The ECODRIVE Project

In compliance with European regulations, noise levels in areas adjacent to road infrastructure must be kept below certain thresholds. Therefore, if the noise caused by vehicle traffic exceeds the legal limits, targeted actions must be taken to reduce it. The ECODRIVE Project is aimed at designing and applying several policies for managing and controlling traffic, to reduce the overall emissions from road traffic. These policies, acting on the main traffic flow variables, such as mean speeds, vehicles composition, road capacity, etc... aim at influencing road users' behaviours towards milder and more sustainable driving styles. For these reasons, the measures tested under the ECODRIVE Project can be considered as "at-source" measures. However, the road noise reduction is not the only goal of the project, but it is also meant to reduce pollutant emissions from vehicle exhaust pipe. The Project follows a simulation approach and consists of three phases, with the first two already concluded and the final phase still ongoing. The first part of the project was fully devoted to the building of a theoretical framework, which includes all the fundamental models to be integrated within the simulation tool. The second phase focused on the building and calibration of the test network. Preliminary tests were also run in this phase. The last phase involves laboratory tests to determine the traffic configurations that best minimize the environmental impact of road traffic.

3.1 | Methodology

The ECODRIVE project follows a simulation approach. The methodology employed in the project is reported in Fig. 1.

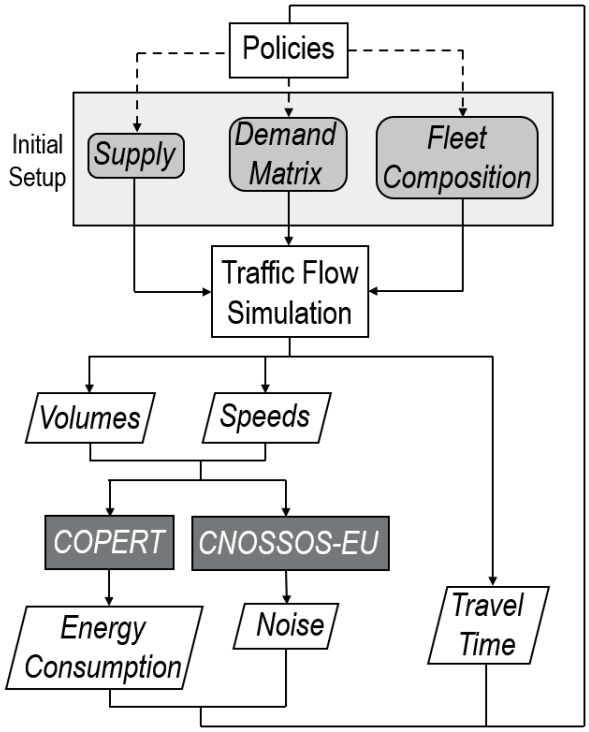


Fig. 1 – Methodology of the project
Metodologia del progetto

The starting configuration comprises a supply system, a demand matrix, and the characteristics of vehicle fleet. The supply system includes not only the road network with its geometrical characteristics, and centroids, but also speed limits, priority rules and potential restrictions on the circulation of different vehicle classes (which may involve closing one or more lanes to specific vehicle types). The demand matrix represents all the movements between origins and destinations throughout the network, for a specific time interval. The fleet composition mainly refers to the share of heavy vehicles and the distribution of car emission classes according to EURO standards. These three components of the initial setup are the input for the traffic flow simulation. In the specific case of the project, the IT tools chosen for running the simulation was PTV Vissim™ [17], which, for its microscopic nature that, although generates complexities in the model, allows to differentiate actions per lanes, per segments, per vehicle classes, etc., seemed to be the software that best suited the objectives of the project. At the end of the simulation process, several outputs are obtained; among them, traffic volumes and traffic mean speeds are the two key variables for feeding the emission models. As mentioned before, the ECODRIVE project is aimed at the reduction of the overall emissions from road traffic. For this reason, two different emission models are involved: COPERT methodology [18, 19] is used for esti-

mating the energy consumption of the traffic stream, while CNOSSOS-EU model is applied for noise assessment. Energy consumption is assessed as a proxy variable for pollutant emissions. This choice is based on the fact that cars with different technologies, developed many years apart, are compared. Moreover, if it is necessary to evaluate scenarios that are far apart in time, the automotive industry can advance its technological development. Using energy consumption instead of emissions, allows for the comparison of emission values from different vehicle classes equipped with more or less advanced technologies. This decision based on the strict correlation between energy consumption and certain pollutants, such as CO_2, which follow a similar trend except for a constant factor (the emission factor EF) [20]. Both energy consumption and noise contribute to determine the environmental impact of the system. Another simulation output is Travel Time, that is important for the estimation of the performances of the network, as each policy applied should be meant to reduce air and noise pollution, without worsening the level of service of the road. Once energy consumption, noise, and travel time have been estimated, traffic management and control policies are applied. These measures can indifferently act on any of the three components of the initial setup, modifying one or more elements. The policy's choice can be autonomously made from the modeller or influenced by the simulation results. The representation of policies being freely applicable in any system component and having the ability to act differently is shown in Fig. 1 by dotted lines. Once the policy has been applied, the procedure is repeated, until an acceptable reduction of emissions is achieved.

3.2 | Test network

The road segment chosen for the tests is the South-Eastern Quadrant of the Freeway A90 in Rome, commonly known among Italian inhabitants as GRA (Grande Raccordo Anulare), a ring-shaped freeway that surrounds the Italian Capital. Freeway A90 is the main collector of movements of the city of Rome and its South-Eastern part, being the main connection between the most important generation and attraction poles of the city of Rome, turns out to be the busiest part of the road, with traffic volumes that can reach 5000 veh/h during morning rush hour [21]. Probably due to the high volumes of traffic or to the road's geometry, with a junction every 2 km, the GRA is often affected by congestion and road accidents, which are troublesome for viability, social and economic costs, and environmental impact. Limiting the analysis to a single quadrant, which is the most problematic, allows to localize the interventions and their effects. The GRA and the section chosen for the tests are reported in Fig. 2. The network under exam is made up of two main trunks, one in ascendant direction, which coincides with the internal carriageway, and the other in the opposite direction, which is the external carriageway, with the main exits and entries in the right part. Both the directions are characterized by three lanes, and, in some stretches, a shoulder lane is also present, that is used in case of forced stops of users, vehicles breakdowns, or for passing the rescue and emergency vehicles.



Fig. 2 – Freeway A90. In red is highlighted the South-Eastern Quadrant chosen for the tests, with its main junctions

L'autostrada A90. In rosso è evidenziato il Quadrante sud-est scelto per i test, con i suoi principali svincoli

3.3 | The noise reduction acceptability criteria

As reported in 3.1 | the procedure is repeated, testing new policies, until an acceptable reduction of noise is achieved. For the road segment in exam, described in 3.2 |a single section was chosen and the corresponding values of volumes, recorded by ANAS detectors [21], were considered. Keeping the volume values constant, traffic mean speed was variated, from 5 km/h to 130 km/h and the noise was assessed with the CNOSSOS-EU model. It is important to notice that the Freeway A90 in Rome is paved with draining asphalt, which is expected to reduce noise by 3 dB compared to normal asphalt. The corrective factors for the draining asphalt [12] were used for assessing rolling noise (Eq. 2). The assessed values of noise are reported in Tab. 1.

In Tab. 1, noise levels for speeds below 20 km/h have been assessed and reported only for computational completeness, but they will not be considered in the subsequent evaluations and comparisons. In fact, as reported in the Commission Directive (EU) 2015/996 [12], for speed values lower than 20 km/h, the sound power level is the same defined by the formula applied for 20 km/h. Actually, the rising values of noise levels recorded for the lowest speeds, should not be considered as a trend reversal, but as a consequence of the fact that the model does not typically applies for speeds lower than 20 km/h. As the values of Tab. 1 are assessed in standard conditions, for real traffic volumes, with no traffic disruptions of limitations, with varying speed, any noise reduction achieved through speed limit reduction that is similar, equal or greater than the values reported in Tab. 1, is considered acceptable.

Tab. 1 – Values of noise with varying speed, for constant traffic volumes, for each vehicle class

Valori del rumore al variare della velocità, per volumi di traffico costanti, per ciascuna classe veicolare

Speed [km/h]	*Cars Noise [dB]*	*Heavy Vehicles Noise [dB]*	*Motorbikes Noise [dB]*	*Total Noise [dB]*
130	88.8	89.6	67.4	92.2
125	88.6	89.3	66.8	92.0
120	88.3	89.0	66.2	91.7
115	88.0	88.8	65.6	91.4
110	87.7	88.5	65.0	91.2
105	87.5	88.3	64.5	90.9
100	87.2	88.0	63.9	90.6
95	86.9	87.7	63.4	90.4
90	86.6	87.5	62.9	90.1
85	86.2	87.3	62.4	89.8
80	85.9	87.0	62.0	89.5
75	85.6	86.8	61.5	89.2
70	85.2	86.6	61.1	89.0
65	84.9	86.4	60.8	88.7
60	84.5	86.2	60.4	88.4
55	84.1	86.0	60.1	88.2
50	83.7	85.9	59.9	87.9
45	83.3	85.8	59.7	87.7
40	82.8	85.7	59.6	87.5
35	82.4	85.8	59.5	87.4
30	81.9	85.9	59.6	87.4
25	81.6	86.1	59.7	87.4
20	81.3	86.5	60.1	87.7
15	81.2	87.3	60.8	88.2
10	81.6	88.5	61.9	89.3
5	83.4	91.1	64.4	91.8

4 | Speed tests

Being a Freeway, according to Italian Traffic Laws [22], the speed limit in GRA is equal to 130 km/h for cars and motorbikes, and 80 km/h for heavy vehicles, which are also prohibited from passing on the third lane, located on the left of the carriageway. Several laboratory tests were conducted, based on the progressive reduction of speed limits. The choice of applying speed-based policies is since, as aforesaid in paragraph 2, speed is the variable that most influences noise emissions, but, as the ECO-DRIVE Project is aimed at reducing the overall emissions from private road transport, it has a considerable influence also on vehicles energy consumption. Three different sets of tests were carried out. In the first set, speed limits were gradually reduced for all the vehicles in the network, as reported in Tab. 2. As the simulation tool does not automatically adjust the speed limit of vehicles if it is lower than the imposed one, heavy vehicles, which travel at 80 km/h, are affected by the speed reduction only when the limit is posed equal to 70 km/h.

Tab. 2 – First set of speed-based policies: same reduced speed limit for all vehicle classes

Primo set di politiche: stesso limite di velocità ridotto per tutte le classi veicolari

Policy ID	*Cars Speed Limit [km/h]*	*Heavy Vehicles Speed Limit [km/h]*	*Motorbikes Speed Limit [km/h]*
P01	130	80	130
P02	120	80	120
P03	110	80	110
P04	100	80	100
P05	90	80	90
P06	80	80	80
P07	70	70	70

Tab. 3 summarizes the second set of tests, where the limits' differentiation is based on the vehicle class, while Tab. 4 reports a synthesis of the last set of policies, where speed restrictions were imposed on a per-lane basis. As regards Tab. 3, five different vehicle classes were defined:

Tab. 3 – Second set of speed-based policies: reduced speed limit differentiated for all vehicle classes

Secondo set di politiche: limite di velocità ridotto differenziato per le varie classi veicolari

Policy ID	*LE Cars Speed Limit [km/h]*	*ME Cars Speed Limit [km/h]*	*HE Cars Speed Limit [km/h]*	*Heavy Vehicles Speed Limit [km/h]*	*Motorbikes Speed Limit [km/h]*
P08	130	130	120	80	130
P09	130	120	120	80	120
P10	120	120	110	80	120
P11	120	110	110	80	120
P12	110	110	100	80	110
P13	110	100	100	80	110
P14	100	100	90	80	110
P15	100	90	90	80	100
P16	90	90	80	80	90
P17	90	80	80	80	90
P18	80	80	70	80	80
P19	80	70	70	80	80

Tab. 4 – Third set of policies: limit restrictions imposed on a per-lane basis

Terzo set di politiche: limiti di velocità differenziati per corsia

Policy ID	*Shoulder Lane Speed Limit [km/h]*	*Right Lane Speed Limit [km/h]*	*Central Lane Speed Limit [km/h]*	*Left Lane Speed Limit [km/h]*
P20	110	110	120	130
P21	100	100	110	120
P22	90	90	100	110
P23	80	80	90	100
P24	70	70	80	90

High-Emitting cars (HE Cars) include EURO 0, EURO 1, EURO 2, and EURO 3 vehicles; Medium-Emitting cars (ME Cars) encompasses EURO 4 and EURO 5 vehicles, while Low-Emitting cars are composed by EURO 6 vehicles. Heavy Vehicles and Motorbikes are the other two vehicle classes considered during simulations.

The simulation period lasts 7800 seconds and the demand matrix covers morning rush hour, form 7 a.m. to 8 a.m. The current Roman composition is assigned: it has been obtained by ANAS databases, and it is made up as follows:

- 25.55% of Low-Emitting cars;
- 33.45% of Medium-Emitting cars;
- 19.94% of High-Emitting cars;
- 20.86% of heavy vehicles;
- 0.2% of motorbikes.

The simulation period has been divided into 9 shorter time intervals, each 900 seconds long. Moreover, the two main trunks of the road have been divided into seven smaller sections, with a total of fourteen segments, which coincide with the road stretches between two consecutive junctions. However, in the results presented in the next paragraph, to provide an overview of the outcomes, values will be averaged over time (over all the time intervals) and over space (over all the road segments), maintaining the only subdivision in ascending and descending direction. In is important to notice that the ECODRIVE Project aims at improving the overall environmental quality, without compromising the level of service of the infrastructure. This paper focuses solely on the project's noise-related environmental impact, while briefly mentioning other policies' effects on the network.

4.1 | Results

4.1.1 | Traffic Mean Speeds

Despite of the speed limits imposed on the network; vehicles' speed depends on traffic conditions. In fact, in the two directions, not all the vehicles can reach the desired speed, which is equal to the imposed limit, as they are constrained by the speed of the preceding vehicle.

In Fig. 3, Traffic mean speeds obtained as an output of simulations are reported for the first set of policies (Tab. 2). Similarly, Fig. 4, and Fig. 5 exhibit the values of speed for the second (Tab. 3) and the third (Tab. 4) set of speed policies respectively.

Mean Speeds [km/h]						
ID Policy	Ascending Direction			Descending Direction		
	Cars	Heavy Vehicles	Motorbikes	Cars	Heavy Vehicles	Motorbikes
P01	98.24	80.75	102.20	66.37	54.16	74.27
P02	97.22	80.67	101.91	66.59	54.50	73.00
P03	95.92	80.60	100.04	65.96	54.52	73.47
P04	93.65	80.46	96.67	64.54	53.97	71.33
P05	89.16	79.57	91.71	62.75	53.80	68.83
P06	82.47	76.98	83.75	58.87	51.61	64.73
P07	74.10	70.48	75.38	54.49	48.61	59.59

Fig. 3 – Traffic mean speeds in ascending and descending direction for the first set of policies

Velocità medie di traffico in direzione ascendente e discendente per il primo set di politiche

Mean Speeds [km/h]						
ID Policy	Ascending Direction			Descending Direction		
	Cars	Heavy Vehicles	Motorbikes	Cars	Heavy Vehicles	Motorbikes
P08	97.69	80.51	102.49	65.90	53.92	73.92
P09	97.89	80.68	102.68	65.75	53.76	74.28
P10	96.86	80.60	101.16	66.09	54.34	73.91
P11	96.61	80.63	102.12	65.82	54.09	73.48
P12	95.14	80.59	99.91	65.47	54.45	72.76
P13	94.43	80.55	98.93	64.96	53.95	73.13
P14	91.99	80.30	95.98	64.26	54.36	71.66
P15	90.53	80.20	94.84	63.70	54.49	70.75
P16	86.67	79.57	91.09	61.17	53.10	68.19
P17	84.43	78.90	89.22	59.85	52.63	67.93
P18	79.37	75.53	82.84	56.99	50.81	64.11
P19	76.67	74.32	81.61	56.08	50.65	62.84

Fig. 4 – Traffic mean speeds in ascending and descending direction for the second set of policies

Velocità medie di traffico in direzione ascendente e discendente per il secondo set di politiche

Mean Speeds [km/h]						
ID Policy	Ascending Direction			Descending Direction		
	Cars	Heavy Vehicles	Motorbikes	Cars	Heavy Vehicles	Motorbikes
P20	97.13	80.68	101.74	66.19	54.43	73.49
P21	95.59	80.62	100.22	65.83	54.54	73.35
P22	92.51	80.01	96.19	64.16	53.80	71.61
P23	87.46	77.99	90.51	61.94	52.65	68.89
P24	79.97	72.89	83.10	58.88	50.85	65.43

Fig. 5 – Traffic mean speeds in ascending and descending direction for the third set of policies

Velocità medie di traffico in direzione ascendente e discendente per il terzo set di politiche

In each of the figure above, red cells represent higher speeds, while green cells are associated with lower speeds, that are supposed to generate less emissions.

In all the cases analyzed, there are fewer vehicles travelling in the ascending than the descending direction and, for this reason, this direction is characterized by higher speeds and a greater sensitivity to changing limits. On the contrary, speeds variations in the opposite direction are not so marked since the occurrence of congestion in some segments of the external carriageway. Traffic mean speeds show a decreasing trend for increasingly restrictive speed limits, although less marked in the descending direction. The only anomaly to this trend could be represented by the sixth column of Fig. 4, the one related to heavy vehicles in the descending direction. However, focusing on the numbers within the cells, it is possible to notice that the values are quite similar, and these small fluctuations can be attributable to the stochasticity of the simulation tool.

4.1.2 | Noise

Noise was assessed following the CNOSSOS-EU procedure, as the European Directive mandates. In the following tables, noise values in both the carriageways are reported. As an example, two different representative sections belonging to the two directions of travel were considered. In the results shown below, motorbikes are omitted from the graphs, as

they constitute a negligible percentage in the vehicle composition and are, therefore, irrelevant for the purposes of the analysis.

In Fig. 6, the ascending direction noise results are reported for the first set of policies.

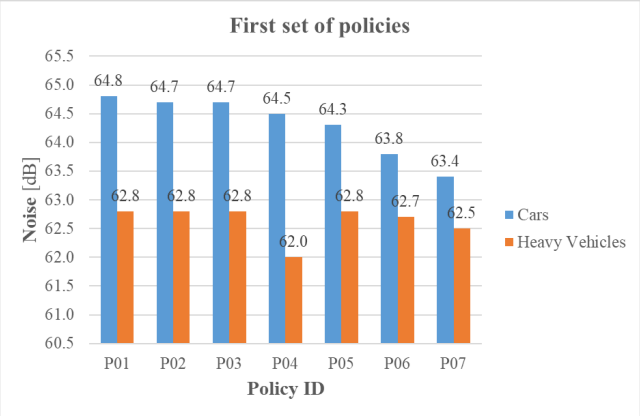


Fig. 6 – Noise values obtained after the application of the first set of policies, in the ascending direction

Valori di rumore ottenuti nell'applicazione del primo set di politiche, in direzione ascendente

As shown in Fig. 6, with increasingly restrictive speed limits, noise levels show a decreasing trend, especially for cars, which are sub-divided into three different classes and are mainly affected by policies' application. Concerning heavy vehicles, as they are forced to travel with a reduced speed equal to 80 km/h, due to legal limitations, they are affected by the reduction of speed only when it reaches 70 km/h. For this reason, their noise reduction is not so significative.

Similar trends for both cars and heavy vehicles noise emissions are recorded after the application of differentiated speed limits per vehicle class, as reported in Fig. 7, and for differentiation in speeds on a per-lane basis, as Fig. 8 exhibits.

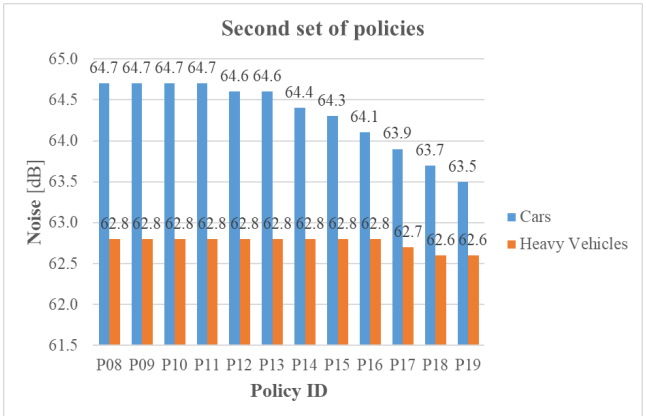


Fig. 7 – Noise values obtained after the application of the second set of policies, in the ascending direction

Valori di rumore ottenuti nell'applicazione del secondo set di politiche, in direzione ascendente

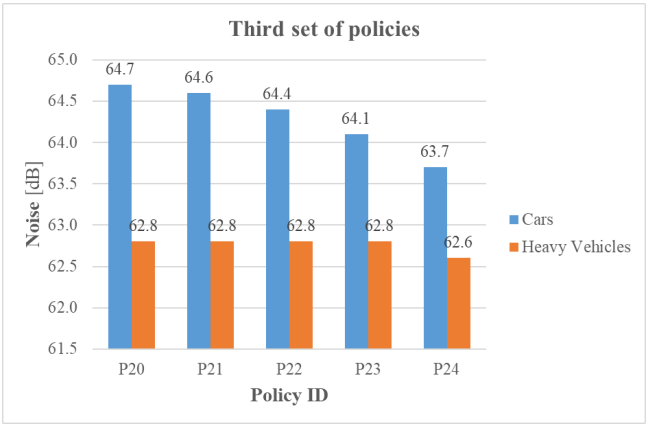


Fig. 8 – Noise values obtained after the application of the third set of policies, in the ascending direction

Valori di rumore ottenuti nell'applicazione del terzo set di politiche, in direzione ascendente

In the opposite direction, which is the most congested, the quasi-linear trend shown for the internal carriageway is not so marked, as Fig. 9, Fig. 10, and Fig. 11 show.

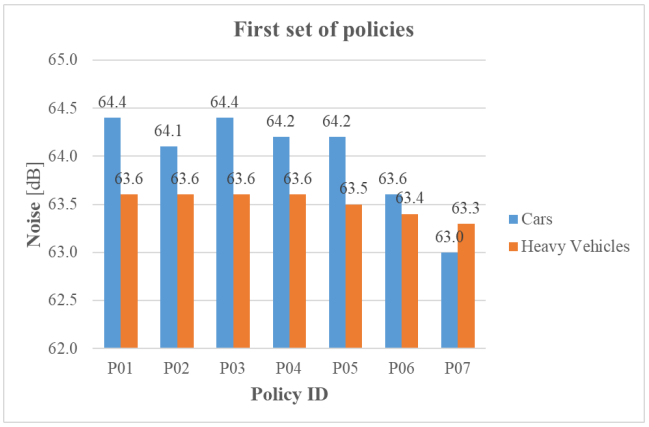


Fig. 9 – Noise values obtained after the application of the first set of policies, in the descending direction

Valori di rumore ottenuti nell'applicazione del primo set di politiche, in direzione discendente

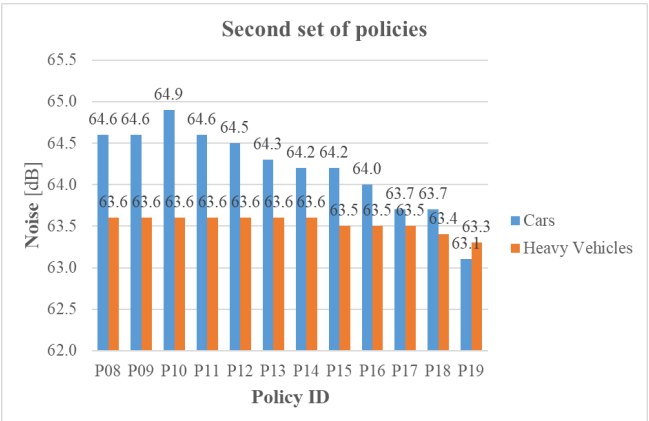


Fig. 10 – Noise values obtained after the application of the second set of policies, in the descending direction

Valori di rumore ottenuti nell'applicazione del primo set di politiche, in direzione discendente

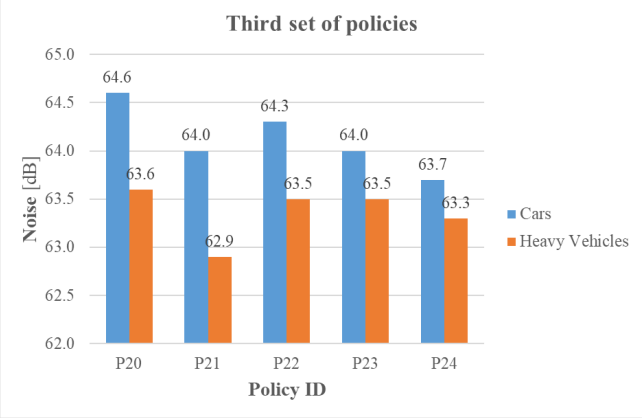


Fig. 11 – Noise values obtained after the application of the third set of policies, in the descending direction.

Valori di rumore ottenuti nell'applicazione del primo set di politiche, in direzione discendente

This anomalous behaviour can be explained with the higher traffic volumes which pass by the main trunk in this travel direction. Despite of the average speed recorded along the entire direction, at a local level, specific combinations of speed limits can induce a "traffic fluidification", especially in areas close to the congestion, which then reverberate in the adjacent sections. This phenomenon leads to higher speeds and higher traffic volumes. For these reasons, in some cases, such as the ones showed in Fig. 9, Fig. 10, and Fig. 11, noise raises again, after an initial decrease. Such traffic dynamics are beyond the scope of this paper. It is important to note that, regardless of the more or less pronounced speed variations, the noise trend generally decreases even in the descending direction, although the differences from one scenario to the next are not as marked as in the opposite direction. What emerges from a comparison between Fig. 6, Fig. 7, and Fig. 8 and Fig. 9, Fig. 10, and Fig. 11 is that, even though values of mean speeds in the external carriageway are significantly lower than the ones in the opposite direction, the values of noise are lower, but not much different. One explanation for this phenomenon lies in the number of vehicles crossing the two sections: the descending direction, which is more heavily loaded, has significantly more vehicles than the other direction.

To consider these values of reduction acceptable, a comparison with the values in Tab. 1 is necessary. As an example, for each set of policies, the last one was considered and compared with the P01 policy that, for its configuration, coincides with the current combination of speed limits and it can be considered the baseline scenario. The choice of the last policy of each set as an example is since the differences in speed compared to the current state are much more pronounced and the effectiveness of the management policies is more evident. In Tab. 5, a comparison between simulated values of noise and the values reported in Tab. 1 is reported. Since, as mentioned before, heavy vehicles are not affected by direct interventions, the comparison was made on cars, which show the main variations after policies' application. In the last two columns of Tab. 5 the difference between the value of cars noise in the specific scenario and the same value in the current scenario is shown for both simulated values and values reported in Tab. 1, according to the values of speed exhibited in Tab. 1, Fig. 3, Fig. 4, and Fig. 5.

Tab. 5 – Comparison of noise reductions, with the values of Tab. 1

Confronto delle riduzioni di rumore ottenute, con i valori della Tab. 1

Policies compared	*Direction*	*Simulated Noise reduction [dB]*	*Noise reduction from Tab. 1 [dB]*
P01 → P07	Ascending	–1.4	–1.6
	Descending	–1.4	–0.8
P01 → P19	Ascending	–1.3	–1.6
	Descending	–1.3	–0.8
P01 → P24	Ascending	–1.1	–1.3
	Descending	–0.7	–0.4

As reported in Tab. 5, direct and homogeneous interventions on all vehicle classes, generates better environmental benefits in terms of noise. In fact, the first set of policies is the one that best meets the objectives of this paper. Indeed, in the other two sets of policies, only a small number of vehicles are subject to a reduced speed limit, effectively limiting the impact of a speed reduction extended to all vehicles. Surprisingly, the most encouraging results are those related to the descending direction, where noise reduction, although limited compared to the ascending one, results greater than the standard conditions.

4.1.3 | Other effects and limitations of the study

As this paper focuses on the acoustic part of the ECODRIVE project, the effects on the other variables considered in the project will only be mentioned. Since homogeneous intervention in the speed of all classes of vehicles in the fleet circulating on the network seems to be the best solution, and perhaps the most obvious one, it is legitimate to ask why the second and third sets of measures have been implemented. As already mentioned, the ECODRIVE Project is aimed at the reduction of the overall emissions from private road transport, without compromising the level of service of the infrastructure. Limiting speeds reductions to the most pollutant vehicles reduces the number of vehicles that drive at a lower speed than permitted and, therefore, take longer to reach their destination, thus encouraging the use of less polluting vehicles. The main negative consequence of applying the speed limits described in this paper is in terms of travel times. For example, moving from a 130 km/h limit to a 70 km/h limit could increase travel times by more than 30%, making such policies of limited applicability. For this reason, it is necessary to develop an optimisation procedure

that helps to balance the environmental benefits and the reduction in network service levels. However, it is important to highlight that, for the network in exam, the last important consideration concerns the correction coefficients of CNOSSOS-EU. For the network in exam, a draining asphalt has been considered, which, how is known from literature, reduces road noise by approximately 3 dB. By using standard road pavements, the efficiency of speed-based traffic management and control policies could be increased.

5 | Conclusions and future developments

The ECODRIVE project, presented in this paper, aims at reducing the atmospheric pollution and noise emissions generated by private road transport through specific traffic management. The project, which is based on a simulation approach, involves the application of different traffic management and control policies that, by acting on traffic dynamics and on the main flow variables, as well as on all the parameters that influence road transport emissions, make it possible to improve the environmental performance of road transport. This paper focuses mainly on the acoustic part of the project, trying to concentrate the analysis on the effectiveness of these measures in reducing the noise generated by the vehicles. As an example, the results of the speed-based tests are reported. These tests were carried out considering three different sets of measures: in the first set, the speed was progressively reduced by acting on all vehicle classes circulating on the network under study; the second set provided for the differentiation of the speed limit by vehicle class, while, in the last set, the reduction of the limit affected the lanes and not the vehicles. The results, presented separately for the two main trunks of the network, that run in opposite travel directions, highlighted greater effectiveness when speed limits lower than those permitted by law are imposed indifferently on all vehicles on the network. However, in order to also take into account pollutant emissions, the reduction of which is one of the other main objectives of the project, only briefly mentioned, it is necessary to intervene in a differentiated way, according to vehicle classes, in order to promote the circulation of less polluting vehicles and to minimise the increase in travel times that inevitably occurs when users are forced to drive at speeds lower than those allowed by law. The results also show that the effectiveness of the measures in the descending direction, which corresponds to the most heavily trafficked section of the network, is greater than that obtained in the standard conditions shown in Tab. 1, despite the fact that the speed values in the different scenarios slightly differ from one to another. In conclusion, the results presented in support of the objectives of the ECODRIVE project have shown how careful management of road traffic can achieve significant environmental benefits, especially in terms of road traffic noise. However, as already mentioned several times in this paper, in the future developments of the project it is necessary to include other variables, while developing a solution procedure that allows the optimisation of pollutant emissions and traffic noise, trying not to excessively reduce the level of service of the infrastructure.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto ECODRIVE, che è stato presentato in questo articolo, si pone come obiettivo la riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera e delle emissioni acustiche generate dal trasporto privato su strada tramite un'apposita gestione del traffico. Il progetto, basato su un approccio simulativo, prevede l'applicazione di diverse politiche di gestione e controllo del traffico, che, intervenendo sulle dinamiche del traffico e sulle variabili principali del deflusso, nonché su tutti i parametri che influenzano le emissioni su strada, consentano di migliorare le prestazioni ambientali del traffico stradale. Nel presente articolo, ci si è concentrati principalmente sulla parte acustica del progetto, cercando di concentrare l'analisi sull'efficacia di tali azioni sulla riduzione del rumore generato dai veicoli. A titolo di esempio, sono stati riportati i risultati dei test sulla velocità, condotti considerando tre diversi set di politiche: nel primo set, la velocità è stata progressivamente ridotta agendo su tutte le classi veicolari circolanti sulla rete in esame; il secondo set, invece, ha previsto la differenziazione del limite di velocità per classe veicolare, mentre nell'ultimo set, la riduzione del limite ha interessato le corsie e non i veicoli. I risultati, mostrati separatamente per i due tronchi principali della rete, che corrono in direzioni opposte, hanno evidenziato un'efficacia maggiore qualora limiti di velocità inferiori a quelli permessi per legge siano imposti indifferentemente a tutti i veicoli sulla rete. Tuttavia, per tenere conto anche delle emissioni inquinanti, la cui riduzione rappresenta uno degli atri grandi obiettivi del progetto, che è stato solo brevemente accennato, è necessario intervenire in maniera differenziata sulle classi veicolari al fine di incentivare la circolazione dei veicoli meno inquinanti e di ridurre al minimo gli incrementi dei tempi di viaggio cui, inevitabilmente, si va incontro imponendo agli utenti velocità inferiori a quelle permesse dalla legge. Dai risultati, inoltre, è emerso come l'efficacia delle politiche in direzione discendente, corrispondente alla carreggiata più trafficata della rete, pur presentando valori di velocità che, nei vari scenari, si discostano poco l'uno dall'altro, risulta maggiore rispetto a quella ottenuta nelle condizioni standard riportate nella Tab. 1.

In conclusione, i risultati mostrati a supporto degli obiettivi del progetto ECODRIVE, hanno evidenziato come una gestione oculata del traffico stradale consenta di ottenere notevoli benefici ambientali, soprattutto in termini di rumore dovuto al traffico stradale. Tuttavia, come già menzionato più volte nell'articolo, negli sviluppi futuri del progetto, è necessario includere ulteriori variabili, sviluppando al contempo una procedura risolutiva, che consenta di ottimizzare le emissioni inquinanti e il rumore da traffico, cercando di non peggiorare eccessivamente il livello di servizio dell'infrastruttura.

6 | Acknowledgements

The Authors would like to thank RIA Editorial Board and Franco Angeli journal teams.

Bibliography

[1] The European Green Deal | European Commission (n.d.). https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (accessed on March 05, 2024).

[2] V.R. Harnapp, A.G. Noble, Noise Pollution, GeoJournal. 14 (1987) 217-226. https://doi.org/10.1007/BF00435812.

[3] Report from the Commission to the European Parliament and the Council, on the implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive 2002/49/EC" | European Commission (n.d.). https://environment.ec.europa.eu/system/files/2023-03/COM_2023_139_1_EN_ACT_part1_v3.pdf (accessed on March 04, 2024).

[4] Outlook to 2030 – Can the number of people affected by transport noise be cut by 2030? | European Environment Agency (n.d.). www.eea.europa.eu/publications/outlook-to-2030/outlook-to-2030-can-the/#case-studies (accessed on March 04, 2024).

[5] V. B. Omubo-Pepple, M. A. Briggs-Kamara, I. Tamunobereton-ari, Noise Pollution in Port Harcourt Metropolis: Sources, Effects and Control, The Pacific J of Sc and Tech 11 (2011). www.ijera.com/papers/Vol2_issue3/TB2331753182.pdf.

[6] C. Steele, A Critical Review of some Traffic Prediction Models, Appl Acoustics 62 (2001) 271-287. https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00030-X.

[7] H.N. Rajakumara, R.M. Mahalinge Gowda, Road Traffic Noise Prediction Models: A Review, Int J Sustain Dev Plann 3 (2008) https://doi.org/10.2495/SDP-V3-N3-257-271.

[8] N. Garg, S. Maji, A Critical Review of Principal Traffic Noise Models: Strategies and Implications, Environmental Impact Assessment Review 46 (2014) 68-81. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.02.001.

[9] T. Subramani, M. Kavita, K.P. Sivaraj, Modelling Od Traffic Noise Pollution, Int J Eng Res Appl 2 (2012) 3175-3182. www.ijera.com/papers/Vol2_issue3/TB2331753182.pdf.

[10] B. Zarin, S. Ardekani, The Relation between Freeway Average Speed and Speed Noise, J of Trans Tech 5 (2015) 88-101. http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2015.52009.

[11] J.E. Piercy, T.F.W. Embleton, L.C. Sutherland, Review of Noise Propagation in the Atmosphere, J Acoust Soc Am 61 (1977) 1403-1418. https://doi.org/10.1121/1.381455.

[12] Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015, establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament of the Council (n.d.). https://eur-lex.europa.eu/legal-cotent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0996 (accessed on March 06, 2024).

[13] S. Kephalopoulos, M. Paviotti, F. Anfosso-Lédée, D. Van Maercke, S. Shilton, N. Jones, Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping, Sc of the Tot Env 482-483 (2014) 400-410. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.031.

[14] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise (n.d.). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049 (accessed on March 06, 2024).

[15] P. Bellucci, F. Ciarallo, M. Garai, L. Peruzzi, F. Praticò, On the Sustainability of Noise Mitigation Measures, in Proc of the 10th Conven of Acoustic Ass, Turin, Italy, 2023. DOI: 10.61782/fa.2023.0026.

[16] L.C. Den Boer, A. Schroten, Traffic Noise Reduction in Europe: Healt effects, social costs and technical and policy option, Report of CE Delft: Solution for Environment, economy, and technology, Delft, Netherlands, 2007.

[17] F. Fellendorf, P. Vortisch, Microscopic traffic flow simulator VISSIM, in Barcelò, J., Ed., Fundamentals of Traffic Simulation, International Series in Operation Research & Management,145 Springer, New York, 2016, 63-93. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_2.

[18] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Technical guidance to prepare national emission inventories (2023). file:///C:/Users/User/Downloads/Introduction_to_EEA_EMEP-Guidebook2023_TH-AL-23-005-EN-N.pdf (accessed on March 08, 2024).

[19] United Nations Economic Commission for Europe, Guidelines for reporting emissions and projections data under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (2015). https://unece.org/DAM/env/documents/2015/AIR/EB/English.pdf (accessed on March 08, 2024).

[20] S.M. Patella, F. Scrucca, L. Mannini, F. Asdrubali, Integrated Approach for the road greenhouse gas emissions calculation in a life-cycke perspective, Ingegneria Ferroviaria 77 (2022) 277-296. www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85130045035&origin=inward&txGid=a62c9be9198ae255acab201973d9d964.

[21] ANAS, Italian FS Group (n.d.). www.stradeanas.it/it/le-strade/la-rete-anas/i-grandi-itinerari-anas/grande-raccordo-anulare-di-roma-e-autostrada-roma-%E2%80%93 (accessed on March 11, 2024).

[22] D.lgs n. 285 of 30 April 1992 – Nuovo Codice della Strada. www.gazzettaufficiale.it/sommario/codici/strada (accessed on March 11, 2024).

Ottimizzazione dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici: applicazione al Parco Regionale della Valle del Ticino

Giorgia Guagliumi[a]* | Roberto Benocci[a] | Andrea Potenza[a] | Valentina Zaffaroni-Caorsi[a] | Fabio Angelini[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: 3/5/2024
Accettato: 26/8/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa17780
ISSNe: 2385-2615

La valutazione della qualità ambientale e l'identificazione precoce di effetti nefasti sono aspetti significativi per la conservazione degli ecosistemi e per la prevenzione dal degrado dei diversi habitat. Nel suddetto contesto, la comprensione del paesaggio sonoro riveste un ruolo cruciale, in quanto fornisce potenziali indicatori dello stato di salute e dell'integrità degli ambienti naturali. Questo studio si propone di contribuire all'avanzamento di tale comprensione mediante l'introduzione di una nuova metodologia applicata ad una campagna di misurazione condotta in una zona umida presso il Parco Regionale della Valle del Ticino. Tale metodo consiste nella ottimizzazione della scelta dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici, offrendo un'analisi maggiormente accurata del soundscape e presentando nuove prospettive per una ricerca approfondita nell'ambito dell'ecologia del paesaggio sonoro. La validazione qualitativa di tali indici è stata condotta per mezzo di un protocollo, attraverso l'ascolto diretto delle tracce audio, con l'obiettivo di dettagliare le sorgenti antropofoniche presenti e di ottenere una maggiore oggettività della risposta.
Parole chiave: indici eco-acustici, rumore antropogenico, paesaggio sonoro, ascolto diretto, parco urbano

Optimization of the calculation parameters of the eco-acoustic indices: application to the Ticino Valley Regional Park

The assessment of environmental quality and the early identification of harmful effects are significant aspects for the conservation of ecosystems and for the prevention of degradation of various habitats. In this context, understanding the soundscape plays a crucial role, as it provides potential indicator of the health and integrity of natural environments. This study aims to contribute to the advancement of this understanding through the introduction of a new methodology applied to a measurement campaign conducted in a wetland at the Ticino Valley Regional Park. This method consists in optimizing the choice of calculation parameters of the eco-acoustic indices, offering a more accurate analysis of the soundscape and presenting new perspectives for in-depth research in the field of soundscape ecology. The qualitative validation of these indices was conducted by means of a protocol, through direct listening to the audio tracks, with the aim of detailing the anthropophonic sources present and obtaining greater objectivity of the response.
Keywords: eco-acoustic indices, anthropogenic noise, soundscape, direct listening, urban park

1 | Introduzione

Nel vasto panorama delle scienze ambientali, il suono si configura come un elemento fondamentale per gli organismi che lo producono e che ne sono esposti. Lo studio dell'inquinamento acustico, dei suoi effetti sulla fauna selvatica e sugli ecosistemi terrestri risulta fondamentale per comprendere e preservare la biodiversità, la quale risulta principalmente minacciata dalle attività umane [1]. Il monitoraggio acustico passivo (PAM) è una tecnica che implica la registrazione e l'analisi dei suoni di un ambiente estraendo molteplici informazioni [2] ed emerge come la strategia più efficace per identificare e comprendere i primi segnali del degrado degli ecosistemi [3].

L'introduzione di indici eco-acustici semplifica le analisi in quanto questi si focalizzano su differenti caratteristiche del suono [1]. Per questo motivo rappresentano un valido supporto per valutare la complessità dell'ambiente acustico e per monitorare la qualità ambientale [4].

In questo articolo si propone una nuova metodologia per la determinazione dei parametri necessari per il calcolo degli indici eco-acustici atta a rappresentare il paesaggio sonoro in maniera più corrispondente alla realtà rispetto a quanto ottenibile mediante approcci convenzionali esistenti in letteratura [5, 6, 7]. In particolare, esaminando parametri relativi alle frequenze biofoniche e antropiche presenti nell'area oggetto di studio, e non utilizzando parametri standardizzati, il suddetto approccio permette di fornire una rappresentazione più accurata e precisa della realtà sonora locale.

Per la loro validazione, è stata condotta un'analisi preliminare delle registrazioni audio attraverso ascolto diretto per

mezzo di un protocollo comune adottato da diversi operatori, con l'obiettivo di dettagliare le sorgenti antropofoniche presenti nell'ambiente.

2 | Materiali e metodi

2.1 | Area di studio

L'area oggetto di studio è situata presso la Lanca del Moriano (PV) nel Parco Naturale Lombardo della Valle del Ticino (Fig. 1). Tale area rientra nel Sito d'Interesse Comunitario "Basso Corso e Sponde del Ticino" e comprende sia la depressione valliva del fiume Ticino, sia parte della pianura in cui è inciso il solco fluviale, la cosiddetta "bassa pianura". Estendendosi su 39 ettari, uno degli elementi maggiormente impattanti a livello ambientale è l'autostrada A7, comunemente nota come "Autostrada dei Giovi", ovvero la principale arteria stradale che collega il capoluogo della Lombardia (Milano) a quello ligure (Genova).

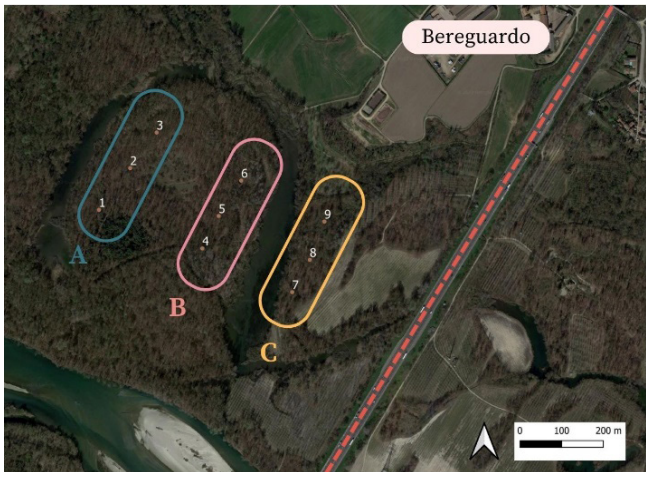


Fig. 1 – Area oggetto di studio e suddivisione dei siti di misura in fasce spaziali equidistanti dall'autostrada: I. fascia A (siti 1-2-3); II. fascia B (siti 4-5-6); fascia C (punti 7-8-9)

Area under study and subdivision of the measurement sites into spatial bands equidistant from the motorway: I. band A (sites 1-2-3); II. band B (sites 4-5-6); band C (sites 7-8-9)

2.2 | La campagna di monitoraggio

Nell'area oggetto di studio, sono stati selezionati nove siti di misurazione collocati all'interno di una griglia che insiste su diverse tipologie di habitat con il fine di porre in essere la rilevanza dell'eterogeneità ambientale [8]. I siti di misurazione sono stati selezionati scegliendo la disposizione migliore all'interno della griglia regolare, la quale prevede gli strumenti allineati parallelamente alla sorgente maggiore di disturbo, ovvero l'autostrada. All'interno della lanca sono situate due fasce: la fascia A, comprendente i siti di misurazione 1-2-3, e la fascia B, che include i punti 4-5-6 (Fig. 1). Al di fuori del solco fluviale è presente la fascia C, contenente i siti 7-8-9 (Fig. 1), che permette di analizzare in maniera più accurata il rumore antropico prodotto dal traffico veicolare e relativi rumori stradali. Tali fasce presentano le seguenti distanze medie dall'autostrada: 762 m, 516 m, 284 m, rispettivamente per la Fascia A, B e C. Le suddette sono state determinate attraverso la funzione "v.dstance" del software QGIS, la quale permette di calcolare con precisione la distanza minima tra i punti d'interesse (ossia i siti di misurazione) ed il poligono rappresentante l'autostrada.

Per quanto concerne il campionamento temporale, lo studio in esame è esteso a periodi di monitoraggio a lungo termine: per ogni stagione le registrazioni hanno una durata pari a due settimane e sono effettuate con il seguente schema:

- 1 minuto di registrazione;
- 5 minuti di pausa.

Nello specifico è stata analizzata la campagna primaverile 2022, dal 13 al 27 aprile.

2.3 | Strumenti di misurazione

I sensori impiegati per lo studio sono nove dispositivi di registrazione audio: otto Song Meter Micro (SMM, siti di misura n 1-8) della Wildlife Acoustic e un Soundscape Explorer Terrestrial (SET, sito di misura n 9) della Lunilettronik, aventi una frequenza di campionamento pari a 48 kHz. I SMM sono registratori programmabili dotati di un microfono con una frequenza di campionamento massima di 96 kHz e possiedono una risposta in frequenza non lineare. Il SET è un registratore programmabile dotato di due microfoni con una frequenza di campionamento massima di 48 kHz e 192 kHz e diversi sensori ambientali (per umidità, temperatura, luminosità e pressione atmosferica), avente una risposta in frequenza quasi piatta fino a 6 kHz.

Nello specifico, da un'analisi spettrale delle registrazioni per i SMM è stato riscontrato un problema noto come Direct Current (DC) offset, il quale si riferisce alla presenza di una componente di corrente continua nel segnale audio. Tale fenomeno è stato osservato in tutti i SMM ad eccezione del dispositivo n.6, l'unico non affetto dal suddetto problema. Questa componente può derivare da differenti fattori e può causare diversi problemi, influenzando i risultati del calcolo degli indici eco-acustici, quali:

1. alterazione della forma d'onda, in quanto l'offset introduce una componente costante nel segnale di tensione;
2. alterazione del dominio delle frequenze, poiché la corrente continua si manifesta come un picco di intensità nel primo bin di frequenza nell'analisi spettrale del segnale.

Conseguentemente, per quanto concerne gli indici eco-acustici che tengono conto della distribuzione spettrale dell'energia, la presenza di tale picco influenza la valutazione degli indici stessi.

Il processo di rimozione della DC offset è stato fondamentale per corregge l'intera forma d'onda del segnale, riallineandola attorno al valore medio ideale pari a zero. Tale rimozione ha consistito nel calcolare il valore medio del se-

gnale audio, identificando l'entità dello spostamento verticale (lungo l'asse delle ordinate) presente nel segnale. Utilizzando il suddetto valore medio come riferimento, si è proceduto a sottrarre tale offset da ogni campione audio nella registrazione. Questo processo ha permesso di garantire una maggiore affidabilità nelle analisi ed elaborazioni successive, contribuendo a preservare la complessiva qualità delle registrazioni sonore.

2.4 | Calcolo degli indici eco-acustici

L'interesse sempre più crescente riguardo l'uso di indici eco-acustici nell'ambito ecologico è spinto dalla necessità di comprendere ed analizzare le variazioni dell'attività acustica in un determinato ambiente. Tali indici mirano a fornire una rapida analisi delle caratteristiche sonore di un ambiente enfatizzando proprietà diverse.

In questo studio, l'analisi e il calcolo degli indici sono stati eseguiti nell'ambiente 'R' [9], utilizzando i pacchetti "tuneR", "seewave" e "soundecology". In particolare, il calcolo della Fast Fourier Transform (FFT) è stato fissato a 1024 punti, in quanto il suddetto valore permette di conseguire una risoluzione spettrale ottimale, pari a 46,87 Hz, assicurando così una precisa analisi delle caratteristiche acustiche in questione.

La metodologia proposta non prevede l'utilizzo di un unico indice eco-acustico in quanto non rappresenterebbe la totalità delle caratteristiche del suono e limiterebbe la comprensione complessiva dell'ambiente acustico [10]. L'utilizzo di più indici consente, infatti, di ottenere più informazioni specifiche riguardanti diversi aspetti del suono, come la pressione acustica, la qualità e la direzionalità del suono; permette di adattare le analisi alle specifiche esigenze applicative, quali la valutazione del rumore ambientale o della qualità del suono; e riduce la probabilità di ottenere una interpretazione non esaustiva o distorta dell'ambiente sonoro.

Gli indici eco-acustici oggetto di studio sono otto: l'Acoustic Complexity Index (ACI) [11], l'Acoustic Diversity Index (ADI) [12], l'Acoustic Evenness Index (AEI) [12], il Bioacoustic Index (BI) [13], il Normalized Difference Soundscape Index (NDSI) [14], l'Acoustic Entropy (H) [15], il Dynamic Spectral Centroid (DSC) [12] e il Zero Crossing Rate (ZCR) [16]. Tali indici sono stati calcolati mediante due metodi distinti. La metodologia tradizionale, ampiamente adottata in letteratura, prevede per il calcolo di tali indici la selezione di valori standard di default, quali: I. la frequenza minima impostata a 100 Hz per permettere di catturare componenti sonore significative [5], come il rumore derivante principalmente dal traffico stradale a bassa frequenza; II. la frequenza massima in input utilizzata per studiare la componente biofonica, pari a 12 kHz [6]; il livello di soglia (dB_threshold) per il calcolo degli indici ADI e AEI, che rappresenta il limite inferiore per considerare un suono rilevante nelle analisi acustiche e convenzionalmente fissata a -50dB o -30dB a seconda del contesto specifico [7].

In questo contesto viene proposta una ottimizzazione di tali parametri rispetto allo studio della biofonia. La metodologia sviluppata ha previsto in primo luogo la selezione di una giornata con condizioni meteorologiche appropriate, quali assenza di pioggia (o durata temporale di precipitazioni ristretta) e presenza di vento moderato. La pioggia produce un suono caratteristico a seguito del suo impatto con differenti superfici (rami, foglie) e la presenza di gocce d'acqua nell'aria può alterare la percezione del suono e mascherare suoni da indagare, come le vocalizzazioni dell'avifauna. Dal punto di vista del traffico veicolare, la pioggia potrebbe aumentare l'area interessata dalla propagazione del rumore in quanto l'asfalto bagnato interagisce con gli pneumatici dei veicoli in movimento e agisce come una superficie riflettente.

Di concerto, il vento potrebbe provocare lo spostamento di elementi (come vegetazione od oggetti) ed interferire con il suono desiderato e mascherare o coprire altri suoni che si desidera registrare. Dal punto di vista veicolare, qualora il vento avesse la medesima direzione del rumore del traffico, quest'ultimo sarebbe trasportato a distanze maggiori e con una velocità più elevata, giungendo in maniera più rapida allo strumento di registrazione, rendendolo inoltre di maggiore intensità.

In ultima analisi, è stato scelto di condurre le analisi in un giorno festivo in modo tale da considerare lo scenario peggiore in termini di componente antropofonica, caratterizzato da un maggiore traffico e disturbi generati da passi, voci e rumore delle biciclette.

A seguito della selezione del giorno ottimale, le analisi delle registrazioni sono state condotte in tre fasce orarie: una rappresentante l'alba, in quanto momento della giornata in cui le specie di uccelli risultano essere più attive; una il tramonto, ovvero il periodo in cui alcune specie cantano per fini di corteggiamento o di comportamento territoriale; e una fascia oraria intermedia [17]. È stato analizzato lo spettrogramma delle registrazioni filtrando le frequenze tramite il software Kaleidoscope, col fine di determinare il valore della frequenza massima antropofonica, selezionando quella fascia di frequenze per le quali fossero presenti solo rumori antropofonici, scartando quindi ogni tipologia di biofonia. La frequenza ottenuta è stata determinata per tre fasce spaziali (A, B e C, Fig. 1), all'interno delle quali i siti di misurazione per ogni fascia sono equidistanti dalla sorgente di traffico. Per ciascun sito di misura è stato selezionato lo scenario peggiore e selezionato come valore finale il valore più elevato, identificando la soglia antropofonica.

A seguito dell'identificazione delle specie presenti in campo attraverso la tecnica del conteggio dei punti a distanza limitata [18], sono stati scaricati i canti relativi ad ogni specie dal database europeo Xeno-Canto [19], con lo scopo di indentificare, per mezzo del programma Audacity [20], la maggior frequenza di canto specie-specifica. Tra tutte le frequenze rilevate, è stata selezionata quella più elevata al fine di determinare la frequenza massima da utilizzare nel calcolo degli indici acustici.

Nel processo di calcolo specifico per gli indici ADI e AEI, abbiamo apportato modifiche allo script originale degli indici, la cui versione originale è consultabile nel pacchetto R soundecology. Le suddette modifiche sono risultate necessarie per integrare il valore della frequenza minima all'interno

del calcolo degli indici, in modo da simulare il calcolo di altri indici, quali: ACI, BI, NDSI e DSC, che utilizzano tale parametro nel loro calcolo, consentendo di cogliere maggiormente le possibili variazioni indicate nel paesaggio sonoro. Gli indici di diversità e omogeneità acustica richiedono inoltre l'inserimento in input di uno specifico parametro, la dB_threshold, che definisce un livello minimo di intensità sonora in decibel al di sopra del quale i suoni vengono considerati rilevanti per il calcolo degli indici. Per ottenere il valore desiderato della dB_threshold, ci si è concentrati sull'analisi della biofonia presente in ogni registrazione, assicurandosi di non trascurare le vocalizzazioni più remote. Utilizzando il medesimo giorno e la stessa suddivisione oraria, gli spettrogrammi delle registrazioni sono stati esaminati tramite Kaleidoscope [21] e, identificando le vocalizzazioni più distanti dal registratore, è stato ottenuto il relativo livello di intensità sonora espresso in decibel (dB).

Infine, siccome sono stati utilizzati registratori differenti, si è provveduto all'equalizzazione delle registrazioni al fine di ottenere una risposta in frequenza equivalente a quella di un fonometro, permettendo una comparabilità dei livelli sonori e degli indici eco-acustici [22]. Al tal fine, è necessario confrontare le risposte in frequenza dei registratori con quella di un fonometro e generare un filtro che renda possibile l'equivalenza delle registrazioni. La procedura consiste di tre passaggi: I. misurare un rumore bianco con un fonometro e i registratori, II. generare un filtro nel dominio delle frequenze calcolando il rapporto tra il Power Spectral Density della registrazione acquisita dal fonometro e quello dal registratore in esame, III. applicare il suddetto filtro alle registrazioni effettuate in campo. I dettagli del procedimento seguiti per tali elaborazioni sono esposti nel recente studio di Potenza et al. [22], il cui script Matlab di esecuzione è presente nei Supplementary Materials del medesimo.

2.5 | Analisi statistica

Al fine di evidenziare l'importanza di una valutazione dettagliata dei dati di input e dell'uso corretto di varie tipologie di strumenti, è stato condotto un confronto tra la metodologia tradizionale e quella innovativa presentata in questo articolo, concentrandosi sugli andamenti temporali medi orari e sulle relative mappe spaziali per ciascun indice eco-acustico.

Per quanto riguarda l'analisi metodologica più approfondita, gli indici eco-acustici sono stati sottoposti ad una Analisi delle Componenti Principali (PCA). Il dataset è stato organizzato in maniera ottimale attraverso la realizzazione di una matrice**,** in cui *n* rappresenta i siti di misura (in questo studio 8, poiché il dispositivo n.5 è stato perso durante la campagna di misurazione) e *k* i differenti indici utilizzati (pari a 8 come spiegato in precedenza). Al fine di analizzare la distribuzione della componente biofonica, sono stati considerati gli intervalli temporali rappresentanti la massima attività canora dell'avifauna, ossia un'ora prima dell'alba e due ore dopo di essa. È stata così organizzata una matrice, dove *n* indica gli otto siti di misurazione e *k* i valori dei diversi indici eco-acustici nell'intorno temporale delle albe. Successivamente, è stato eseguito un pretrattamento dei dati, consistente nella scalatura dei dati presenti nella matrice. Il processo di scalatura ha coinvolto l'utilizzo della funzione "prcomp" in R, con l'opzione "scale=TRUE". Questa operazione ha trasformato i dati di ciascuna variabile (ovvero gli indici eco-acustici utilizzati) in modo tale che abbiano una media pari a zero e una deviazione standard pari a uno. Tale operazione è stata fondamentale per uniformare le scale delle variabili, evitando che le differenze di ampiezza tra i valori delle variabili influenzassero in modo sproporzionato i risultati della PCA, non modificando il contenuto informativo. In seguito, è stata indagata la similitudine del soundscape registrato nei siti di misura applicando la Cluster Analysis sulla matrice, ottenuta tramite l'implementazione della PCA, in cui il termine *c* si riferisce alle componenti principali selezionate.

Al fine di validare gli indici eco-acustici, sono state condotte delle analisi sulle registrazioni audio, permettendo così di realizzare uno studio più dettagliato e oggettivo. Per realizzare la suddetta attività di ascolto è stata implementata una nuova metodologia, volta all'ottenimento di una maggiore oggettività nonostante la presenza di diversi operatori (ripetibilità di analisi di un singolo operatore e riproducibilità di analisi tra operatori diversi).

Sono state condotte diverse sessioni di training coinvolgendo due operatori con esperienze pregresse in prove di ascolto per progetti di ricerca similari in differenti parchi urbani. Gli operatori, nella fascia di età tra 25-35 anni, hanno partecipato a tali sessioni al fine di rendere i risultati delle analisi degli ascolti i più affini e similari possibili, migliorando così la coerenza e l'affidabilità delle valutazioni. Dal momento che il singolo individuo possiede una percezione a livello uditivo differente e soggettiva, l'addestramento congiunto ha permesso di standardizzare i risultati ed ottenere la più auspicabile uniformità. Durante le sessioni di training è stata utilizzata in maniera sincrona la medesima tipologia di cuffie acustiche, con il volume del supporto personale al 100% delle funzionalità e selezionando un ambiente di studio privo di rumore di fondo disturbante (come voci, passi, apparecchi o dispositivi rumorosi, impianti tecnici, ecc.). Il software utilizzato per l'addestramento e per i successivi ascolti delle campagne in esame è Kaleidoscope, il quale permette di ascoltare i file audio e al contempo visualizzarne a schermo lo spettrogramma. Al fine di quantificare le biofonie, le antroponie e le geofonie, è stata effettuata un'indagine uditiva secondo uno schema standardizzato [23, 24] e successivamente approfondito e dettagliato, come visibile in Tab. 1. Per ogni minuto di registrazione sono state condotte delle ricerche approfondite riguardanti le vocalizzazioni dell'avifauna e le fonti non biofoniche. Per quanto concerne le prime, è stata indagata la numerosità degli individui presenti (nessuno, pochi, molti), la diversità di specie (nessuna specie, 1 specie presente, >1 specie presenti), la vicinanza delle vocalizzazioni ai dispositivi di registrazione (nessun individuo, individui

vicini al sensore, lontani dal sensore, sia vicini che lontani dal dispositivo) e la durata del suono dell'avifauna espressa in termini di percentuale di attività di canto degli uccelli nel minuto considerato (0, 25, 50, 75, 100)%. I contributi non biofonici sono suddivisi in traffico stradale, passaggi di aerei, voci e/o passi, eventi geofonici e altre sorgenti di rumore. Il primo è suddiviso in due categorie, quali il livello di traffico (assenza di traffico, traffico vicino al dispositivo audio, lontano dal sensore) e la tipologia di traffico (traffico assente, continuo, intermittente). Le geofonie, quali pioggia e vento, sono state esaminate specificando la loro presenza o assenza e, quando necessario, specificando se fossero presenti livelli sonori così elevati da ostacolare un'analisi ottimale del paesaggio sonoro, in quanto mascheravano tutti gli altri suoni presenti. Infine, sono state esaminate altre fonti di rumore, annotando la loro assenza o presenza e specificando la loro origine, come movimenti della vegetazione, presenza di rametti spezzati o il passaggio di altri animali, quando possibile dettagliandone la specie (ad esempio, il ronzio degli insetti o la presenza di rane).

Tab. 1 – Categorie sonore analizzate durante gli ascolti (raggruppati per tipologie)
Sound categories analyzed during listening (grouped by types)

Sorgente Sonora	*Identificazione*	*Parametri*
Numerosità aviaria	Nessuna specie	0
	Pochi individui	1
	Numerosi individui	2
Diversità di specie	Nessuna specie	0
	Una specie	1
	Più di una specie	2
Vicinanza degli individui	Nessun individuo	0
	Vicini al sensore	1
	Lontani dal sensore	2
	Sia vicini che lontani	3
Durata percentuale delle vocalizzazioni	Assente	0%
	Presente per 15s	25%
	Presente per 30s	50%
	Presente per 45s	75%
	Presente per 60s	100%
Livello di traffico	Assenza di traffico	0
	Vicino al sensore	1
	Distante dal sensore	2
Tipologia di traffico	Assenza di traffico	0
	Traffico continuo	1
	Traffico intermittente	2
Passaggio di aerei	Assenza di aerei	0
	Presenza di aerei	1
Voci	Assenza di voci	0
	Presenza di voci	1
Passi	Assenza di passi	0
	Presenza di passi	1
Pioggia	Assenza di pioggia	0
	Presenza di pioggia	1
Vento	Assenza di vento	0
	Presenza di vento	1
Altre sorgenti	Assenza di sorgenti	0
	Specifica di sorgenti	1

Con l'obiettivo di ottimizzare e armonizzare la tecnica d'ascolto, le fasi di training sono state realizzate in giorni differenti, selezionando la stessa registrazione scelta in modo aleatorio. Al termine di tali ascolti, sono stati confrontati i risultati ottenuti dai diversi operatori e, qualora vi fossero delle differenze significative, veniva avviata una discussione per capire quale fosse l'approssimazione migliore al valore reale.

Gli ascolti diretti delle registrazioni risultano necessari per validare gli indici eco-acustici, al fine di comprendere quale metodologia sia la più accurata. A tale scopo, in via preliminare, è stato analizzato il livello di frequenza relativa di ciascun parametro durante gli ascolti diretti, in relazione al sito oggetto di studio (uno per ogni fascia spaziale A, B e C). Successivamente, tali valori sono stati confrontati qualitativamente con i risultati ottenuti dalla Cluster Analysis utilizzando i due metodi precedentemente descritti.

3 | Risultati

3.1 | Parametri di calcolo

La soglia antropofonica, ovvero la frequenza minima per il calcolo degli indici, è stata calcolata per tre differenti fasce spaziali che differiscono unicamente per la loro distanza dall'autostrada: I. fascia A, comprendente i siti 1-3; II. fascia B, ossia i punti 4-6; III. fascia C, la più vicina all'autostrada, comprendente i siti 7-9. Il valore di frequenza che riflette lo scenario peggiore per ogni fascia, ossia il valore più elevato di frequenza attribuibile a sorgenti antropofoniche, è riportato in Tab. 2. Nella fascia A e nella fascia B, la frequenza massima antropofonica è pari a 1700 Hz, mentre nella fascia C è pari a 1750 Hz. È stato selezionato come valore caratteristico dell'area di studio il valore più elevato, pari a 1750 Hz.

Dai suddetti valori, si osserva come la frequenza massima attribuibile a sorgenti antropofoniche, costituita prevalentemente dal traffico veicolare dell'autostrada, rimanga sostanzialmente inalterata con l'aumentare della distanza dalle fasce spaziali. Tale comportamento può essere spiegato dal fatto secondo cui il rumore veicolare si propaga efficacemente nelle diverse fasce spaziali in quanto l'autostrada si colloca sul piano campagna e il terreno tra le fasce risulta pianeggiante. Conseguentemente, la propagazione del rumore tende a essere più uniforme e, senza variazioni di elevazione significative, può diffondersi su una vasta area con minori attenuazioni dovute a cambiamenti topografici. Inoltre, il suddetto comportamento è ulteriormente accentuato dall'assenza di barriere naturali o artificiali e dalla presenza di vegetazione rada nelle vicinanze dell'autostrada, che non offrono schermatura e assorbimento del rumore.

Le analisi degli spettri di frequenza, infatti, confermano che il traffico veicolare si manifesta principalmente nelle basse frequenze senza mostrare variazioni significative tra le diverse fasce spaziali. Tale risultato è stato confermato anche durante gli ascolti diretti delle registrazioni, dove la costante

presenza di basse frequenze indica come il rumore proveniente dall'autostrada sia predominante in queste bande.

Studi hanno dimostrato come la vegetazione possa influenzare significativamente l'ambiente sonoro, bensì la sua efficacia dipenda dalla densità e dalla tipologia delle specie vegetali presenti [25]. Per essere efficaci nel ridurre il rumore del traffico, le barriere naturali devono essere sufficientemente dense e alte [26]. Tale aspetto risulta coerente con le osservazioni effettuate nell'area di studio, dove le caratteristiche presenti non sono in grado di fornire un'adeguata attenuazione del rumore.

Tab. 2 – Valori di frequenza antropofonica massima per ogni fascia spaziale

Maximum anthropophonic frequency values for each spatial band

Fascia Spaziale	*Frequenza massima [Hz]*
A	1700
B	1700
C	1750

La frequenza massima biofonica identificata è stata ottenuta indagando le frequenze emesse dagli individui presenti nell'area di studio. L'intervallo di frequenza attribuibile alle specie aviarie locali è risultato compreso tra 1,75 kHz e 9 kHz.

Infine, per quanto concerne la dB_threshold, è stata in seguito realizzata una media dei valori acquisiti rispetto alle tre differenti fasce orarie (6:00, 12:00, 19:00) in quanto la biofonia possiede delle caratteristiche differenti durante il corso della giornata. Dai risultati, presenti in Tab. 3, è stata effettuata la media di tali soglie ottenendo come valore finale –73 dB.

Tab. 3 – Livelli di soglia in decibel medi per ogni fascia oraria

Threshold levels in average decibels for each time slot

Fascia oraria	*dB_threshold [dB]*
05:00 – 08:00	–71
11:00 – 14:00	–73
18:00 – 21:00	–72

3.2 | Analisi statistica

Il calcolo degli indici eco-acustici è stato effettuato con entrambe le metodologie presentate, con l'obiettivo di confrontare tali approcci e determinarne eventuali differenze. In particolare, sono stati confrontati gli andamenti temporali per ogni indice, notando quali fossero le differenze principali e le relative conseguenze.

Nel presente studio è stato esaminato l'effetto del DC offset sugli indici eco-acustici, a titolo di esempio si riportano l'NDSI e il DSC, utilizzando dati acquisiti in una specifica giornata (il 25 aprile 2022, per un sito scelto in maniera casuale) durante il periodo dell'alba, noto per la sua elevata biofonicità. Per valutare tale effetto, sono stati eseguiti calcoli sia per la metodologia tradizionale sia per quella ottimizzata, rappresentando graficamente i risultati (Figg. 2-3), mediante tre configurazioni distinte: I. utilizzo dei parametri in input per il calcolo dell'indice ("OR" e "OR_m2"); II. rimozione del DC offset dalle registrazioni audio ("DC" e "DC_m2"); III. equalizzazione delle registrazioni ("EQ" e "EQ_m2").

Per quanto concerne l'andamento dell'NDSI (Fig. 2) risulta evidente come l'offset prodotto dalla corrente continua non influenzi significativamente i valori dell'indice quando confrontato con i risultati ottenuti con la rimozione di tale offset ("OR" e "DC", Fig. 2a). Ciononostante, l'ottimizzazione dei parametri evidenzia una lieve discrepanza tra le curve "OR_m2" e "DC_m2" (Fig. 2b), in maniera più marcata nel periodo temporale compreso tra le 5:00 e le 6:30. Inoltre, l'equalizzazione delle registrazioni permette di risolvere il problema legato alla non linearità della risposta in frequenza dello strumento, fornendo delle curve maggiormente accurate ("EQ" e "EQ_m2", Fig. 2).

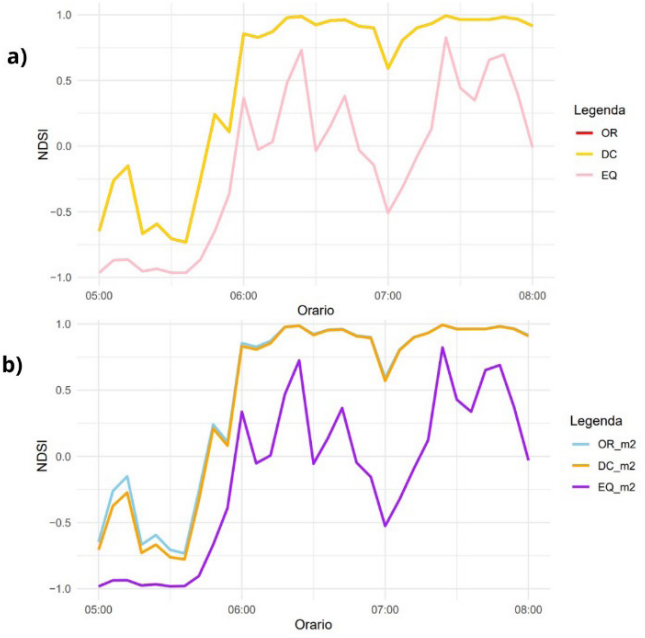


Fig. 2 – Andamento dell'NDSI durante un'alba calcolato mediante il metodo tradizionale (a) e il metodo ottimizzato (b). Nelle metodologie presentate, si distinguono tre configurazioni: I. OR, che mantiene i parametri originali in input; II. DC, in cui viene risolto il DC offset; III. EQ, in cui si equalizzano le registrazioni

Trend of the NDSI during a sunrise calculated using the traditional method (a) and the optimized method (b). In the methodologies presented, three configurations can be distinguished: I. OR, which maintains the original input parameters; II. DC, where the DC off-set is resolved; III. EQ, where you equalize your recordings

Di concerto, l'ottimizzazione dei parametri di input ed il processo di equalizzazione hanno dimostrato di influenzare significativamente i valori del DSC in quanto esso, considerando la distribuzione spettrale del segnale, risulta maggiormente reattivo alle modifiche di tali parametri, influenzando la risoluzione temporale e frequenziale dell'analisi. Inoltre, siccome il DSC si basa su una media ponderata, risulta influenzato dalle

componenti a bassa energia tanto quanto dalle componenti ad alta energia. Conseguentemente l'ottimizzazione dei parametri migliora la rilevazione delle componenti più deboli, che contribuiscono significativamente al valore dell'indice stesso.

L'analisi delle curve equalizzate ottenute mediante il metodo tradizionale (EQ, Fig. 3a) e quello ottimizzato (EQ_m2, Fig. 3b) evidenzia in maniera più specifica i benefici dell'ottimizzazione dei parametri. La suddetta metodologia, infatti, migliora la stabilità e la precisione delle curve del DSC, riducendo la variabilità e migliorando la qualità del segnale audio, rilevando con accuratezza le differenti componenti sonore significative.

In contrasto, sebbene l'NDSI sia anch'esso sensibile ai cambiamenti nei parametri di input, risulta meno influenzato dalle variazioni frequenziali e più concentrato sulla segregazione delle componenti biofoniche e antropofoniche, rendendolo meno reattivo ai miglioramenti nella qualità del segnale audio derivanti dall'ottimizzazione dei parametri, rispetto a quanto invece riscontrato dagli andamenti del DSC (Fig. 3).

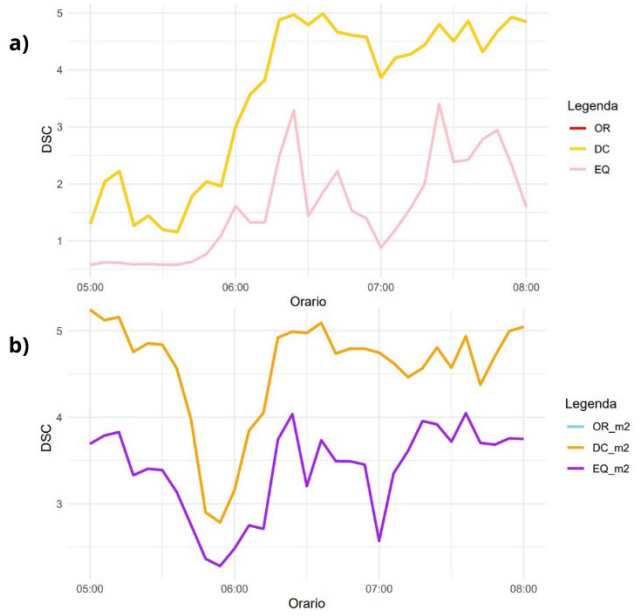


Fig. 3 – Andamento del DSC durante un'alba calcolato mediante il metodo tradizionale (a) e il metodo ottimizzato (b). Nelle metodologie presentate, si distinguono tre configurazioni: I. OR, che mantiene i parametri originali in input; II. DC, in cui viene risolto il DC offset; III. EQ, in cui si equalizzano le registrazioni

DSC trend during a sunrise calculated using the traditional method (a) and the optimized method (b). In the methodologies presented, three configurations can be distinguished: I. OR, which maintains the original input parameters; II. DC, where the DC off-set is resolved; III. EQ, where you equalize your recordings

Quindi, l'ottimizzazione dei parametri di input e l'equalizzazione delle registrazioni hanno dimostrato di influenzare in maniera sostanziale i valori dei diversi indici. Per le suddette ragioni sono stati studiati gli andamenti degli indici durante l'intera campagna di misura, confrontando le metodologie presentate, non discutendo il caso riguardante la rimozione dell'offset dovuto alla corrente continua in quanto possiede minime discrepanze rispetto al caso originale.

Per quanto concerne l'NDSI, inizialmente è stato effettuato il calcolo mediante le impostazioni di default, in cui: la frequenza minima riferita alle sorgenti antropofoniche è pari a 100 Hz, la frequenza di ripartizione corrispondente alla frequenza massima antropofonica e alla frequenza minima biofonica è pari a 2000 Hz, e la frequenza massima biofonica è pari a 1200 Hz. Si nota come l'andamento dell'indice durante le ore notturne (Fig. 4a) presenti valori negativi in quanto nel paesaggio sonoro prevale la componente antropofonica. Si osservano lievi incrementi prima delle 05:00, i quali sono attribuibili alle vocalizzazioni di uccelli notturni e alla presenza di un traffico particolarmente intenso che determina un significativo aumento del rumore alle basse frequenze. Nell'intorno temporale dell'alba, si osserva un picco nell'andamento, caratterizzato dai valori più elevati, i quali sono attribuibili alla predominanza della componente biofonica. Tale fenomeno si verifica poiché il periodo temporale considerato rappresenta il momento della giornata in cui l'avifauna risulta più attiva. Durante le ore diurne, si registra un calo dell'indice dei siti 7, 8 e 9 (rispettivamente in verde, grigio e rosso in Fig. 4a) rispetto agli altri punti di misura, poiché più vicini all'autostrada e risultano pertanto influenzati da una maggiore componente antropofonica. Nel grafico si nota un incremento dell'indice durante le ore pomeridiane, il quale è attribuibile a una diminuzione del traffico nelle ore centrali della giornata.

Al contrario, ottimizzando i parametri di calcolo e correggendo il problema inerente alla corrente continua, l'andamento dell'NDSI (Fig. 4b) evidenzia una predominanza antropica nel paesaggio sonoro, in quanto il suddetto presenta, nella sua quasi totalità, valori negativi. L'andamento generale presenta valori più bassi nella fase notturna ed un aumento nella fase diurna, attribuibile alla presenza prevalente della componente biofonica, la quale emerge nei siti 1, 4 e 6 (rispettivamente in viola, blu e azzurro in Fig. 4b). Nei punti di misura più prossimi all'autostrada, in particolare il sito 7 e 8 (in verde, grigio in Fig. 4b), si osserva un andamento dell'indice particolarmente basso, tendente a valori vicini a –1, indicando un paesaggio sonoro dominato completamente dall'antropofonia.

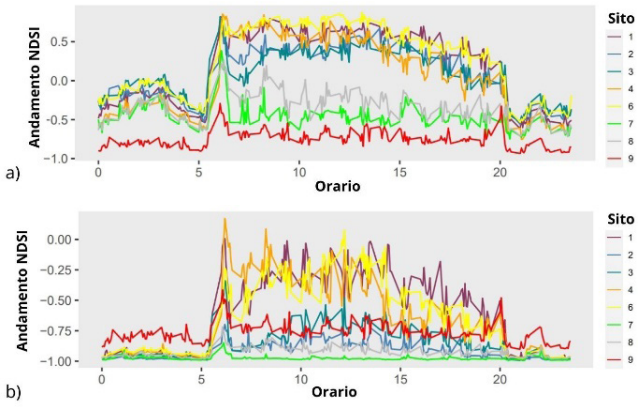


Fig. 4 – Andamento temporale dell'NDSI mediato sulle ore di ogni giorno per ciascun sito con la metodologia tradizionale (a) e innovativa (b)

Temporal trend of NDSI averaged over the hours of each day for each site using traditional (a) and innovative (b) methodologies

Al contrario, sebbene il sito 9 rientri nella fascia spaziale più vicina alla sorgente di traffico (in rosso in Fig. 4b), esso risulta caratterizzato da un andamento più elevato.

Attraverso l'analisi delle due metodologie, si è osservato un aumento dell'indice durante le ore di maggiore attività canora. Tuttavia, è emerso che i valori dell'NDSI calcolati ottimizzando i parametri di input risultino essere significativamente inferiori rispetto all'utilizzo dei parametri di default. Questo suggerisce che tale ottimizzazione possa influenzare in maniera sostanziale i risultati delle analisi, portando ad una differente interpretazione della realtà.

Per quanto concerne il Dynamic Spectral Centroid, tale indice è stato inizialmente calcolato utilizzando i parametri di input predefiniti, con una frequenza minima pari a 100 Hz e una frequenza massima di 12 kHz (Fig. 5a). L'andamento del DSC durante le ore notturne mostra valori inferiori, poiché il centroide è influenzato principalmente dal rumore del traffico veicolare, che domina in questa fascia oraria. Eventuali aumenti sono attribuibili alle vocalizzazioni di uccelli notturni. Durante le ore diurne, il DSC presenta valori più elevati dovuti alle vocalizzazioni dell'avifauna, che raggiungono il loro picco durante l'alba e successivamente diminuiscono a causa della riduzione delle vocalizzazioni. Il grafico evidenzia come i siti 7, 8 e 9 (rispettivamente in verde, grigio e rosso, Fig. 5a) mostrino andamenti del DSC inferiori rispetto agli altri punti di misura, poiché sono maggiormente influenzati dalle frequenze del traffico stradale. Inoltre, un andamento particolarmente basso e diversificato è quello del punto 9 che, essendo il SET l'unico strumento di misura diverso dagli altri (SMM) non possiede l'errore strumentale dei Song Meter Micro che possiedono un picco a 6 kHz nella sensibilità, il quale provoca un aumento degli andamenti temporali.

Ottimizzando i parametri di input, il DSC è stato ricalcolato con una frequenza minima di 1750 Hz e una frequenza massima di 9 kHz. Il suddetto processo ha portato a una diversa distribuzione dei valori dell'indice (Fig. 5b). Durante le ore notturne, il DSC continua a mostrare valori inferiori, legati prevalentemente al rumore del traffico. Tuttavia, durante le ore diurne, i valori del DSC ottimizzato risultano più uniformi e leggermente più bassi rispetto a quelli calcolati con il metodo tradizionale, a causa della miglior risoluzione delle componenti biofoniche. In particolare, durante l'alba l'andamento risulta più marcato e preciso, evidenziando le variazioni nelle vocalizzazioni dell'avifauna. I siti 7, 8 e 9 mostrano valori inferiori, ma l'ottimizzazione dei parametri consente una migliore distinzione tra le componenti biofoniche e antropiche, permettendo di ottenere una rappresentazione più accurata del paesaggio sonoro, facilitando l'interpretazione dei dati e la distinzione tra le diverse sorgenti sonore.

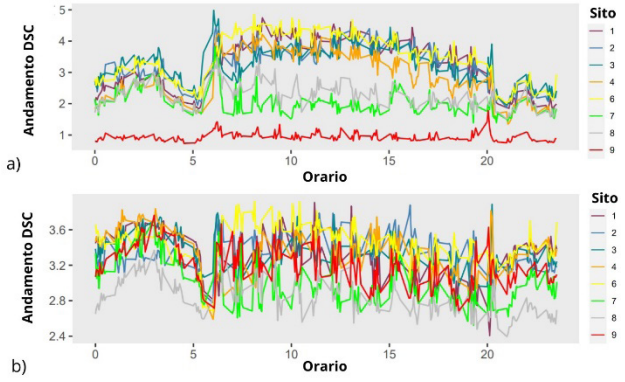


Fig. 5 – Andamento temporale del DSC mediato sulle ore di ogni giorno per ciascun sito con la metodologia tradizionale (a) e innovativa (b)

Temporal trend of DSC averaged over the hours of each day for each site using traditional (a) and innovative (b) methodologies

A seguire, gli indici sono stati sottoposti ad analisi maggiormente approfondita mediante la PCA. Utilizzando il primo metodo, i risultati (Fig. 6) hanno permesso di selezionare tre dimensioni che spiegano il 78,4% della varianza.

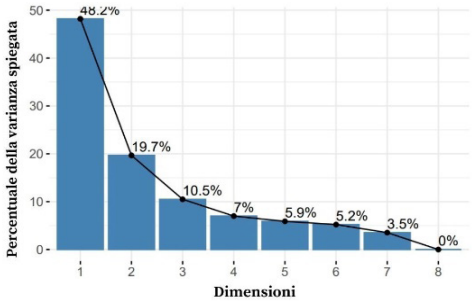


Fig. 6 – Percentuale della varianza spiegata in funzione delle nuove componenti: risultati della PCA utilizzando i parametri di default per il calcolo degli indici eco-acustici

Percentage of variance explained as a function of the new components: PCA results using the default parameters for calculating the eco-acoustic indices

Successivamente, è stata indagata la dissimilarità del soundscape nei siti di misura applicando la Cluster Analysis sulla matrice ottenuta tramite l'implementazione della PCA. Si è proceduto a esplorare diverse tipologie di clustering attraverso il pacchetto R "Clvalid" [27], il quale fornisce suggerimenti sui metodi di clustering e sul numero di raggruppamenti più appropriati per il dataset considerato. Tale strumento ha selezionato per un'analisi ottimale due cluster e il metodo gerarchico agglomerativo noto come Hierarchical Clustering. La validazione delle differenti soluzioni di clustering è stata condotta sulla base di parametri che misurano la compattezza, la connessione e la separazione dei clusters ottenuti. I metodi considerati per determinare la soluzione ottimale forniti in input alla funzione clValid sono i seguenti: DIvisive ANAlysis clustering (DIANA) [28], K-means [gan], Partitioning Around Medoids (PAM), Clustering LARge Applications (CLARA) e Hierarchical Clustering. La distanza tra le osservazioni è stata calcolata utilizzando la metrica euclidea, impiegata per valutare a livello statistico la dissimilarità tra punti nello spazio euclideo. Per quanto concerne il clustering gerarchico, è stato adottato il metodo di Ward per l'elaborazione del dendrogramma, in particolare è stata utilizzata la funzione "hclust" con il parametro "ward.D" per implementare il metodo di Ward.

Tale approccio ha rivelato una distinzione significativa del sito 6 (Fig. 7) rispetto agli altri siti di misurazione.

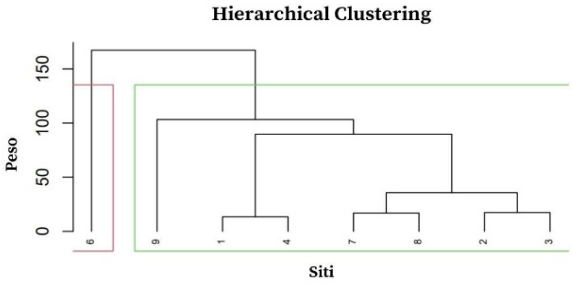


Fig. 7 – Suddivisione del dataset ottenuto col metodo tradizionale in due cluster secondo il metodo Hierarchical: cluster 1 composto dal sito 6, cluster 2 composto da tutti gli altri punti di misura

Subdivision of the dataset obtained with the traditional method into two clusters according to the Hierarchical method: cluster 1 composed of site 6, cluster 2 composed of all the other measurement points

Al contrario, ottimizzando i parametri di calcolo, i risultati della PCA (Fig. 8) hanno permesso di selezionare quattro componenti principali che spiegano il 79,7% della varianza.

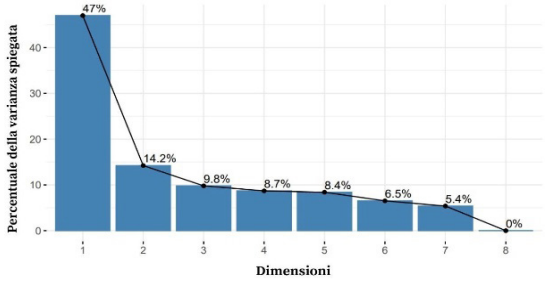


Fig. 8 – Percentuale della varianza spiegata in funzione delle nuove componenti: risultati della PCA utilizzando i parametri ottimizzati per il calcolo degli indici eco-acustici

Percentage of variance explained as a function of the new components: PCA results using the optimized parameters for the calculation of the eco-acoustic indices

A seguire, è stata applicata la Cluster Analysis sulla matrice ottenuta tramite l'implementazione della PCA e, utilizzando il pacchetto "Clvalid", è stato selezionato il metodo gerarchico agglomerativo per la suddivisione dei siti in due cluster. I risultati (Fig. 9) mostrano come i siti 7-8-9 risultino isolatati rispetto agli altri punti di misurazione.

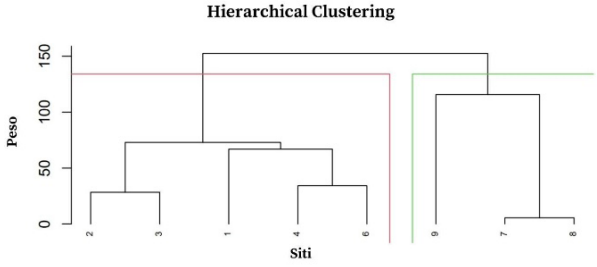


Fig. 9 – Suddivisione del dataset ottenuto col metodo ottimizzato in due cluster secondo il metodo Hierarchical: cluster 1 composto dai siti 1-2-3-4-6, cluster 2 composto dai siti 7-8-9.

Subdivision of the dataset obtained with the optimized method into two clusters according to the Hierarchical method: cluster 1 composed of sites 1-2-3-4-6, cluster 2 composed of sites 7-8-9

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli derivanti dall'analisi delle registrazioni effettuate tramite ascolto diretto. Per ciascuna delle fasce spaziali A, B e C, distinte in base alla distanza dall'autostrada, sono stati selezionati i punti di misura 3, 4 e 7. Inoltre, è stato condotto uno studio aggiuntivo sul sito P1, poiché le registrazioni hanno mostrato un paesaggio sonoro differente rispetto agli altri punti della fascia A, la più distante dalla principale fonte di rumore antropico.

Successivamente, è stata calcolata la frequenza di occorrenza delle diverse sorgenti sonore per i punti analizzati. I risultati, riportati nella Tab. 4, sono stati elaborati in istogrammi relativi ai parametri dell'ascolto e riferiti ai singoli siti (Fig. 10), come realizzato in studi precedenti [29], mettendo in evidenza:

- Una minore presenza di individui nel sito vicino alle sorgenti di traffico veicolare (P7, fascia C) e, al contrario, una maggiore presenza nelle fasce spaziali B e C (ovvero i siti P1, P3 in fascia A e P4 in fascia B).
- In prossimità di sorgenti antropofoniche si osserva una maggiore distanza degli individui dai registratori (P7), a differenza degli altri tre siti in cui l'attività canora risulta più vicina agli strumenti di misura (P1, P3 e P4).
- La durata delle vocalizzazioni sembra non essere influenzata particolarmente dalla distanza dalle sorgenti di traffico, sebbene il sito 7 risulti lievemente inferiore rispetto agli altri punti.
- La diversità delle specie non provoca variazioni tra i diversi siti: questo potrebbe essere attribuibile al fatto che, durante l'attività di ascolto, si considerano solo tre parametri: l'assenza di specie, la presenza di una singola specie

Tab. 4 – Frequenza relativa alle diverse sorgenti sonore per i punti in esame: sito 1 (fascia A), sito 4 (fascia B) e sito 7 (fascia C)

Frequency relating to the different sound sources for the points in question: site 1 (band A), site 4 (band B) and site 7 (band C)

Sorgente Sonora	*Parametri*	*Freq sito 1*	*Freq sito 4*	*Freq sito 7*
Numerosità aviaria	0	61	65	66
	1	100	101	137
	2	79	74	37
Diversità di specie	0	61	65	66
	1	21	20	23
	2	158	155	151
Vicinanza degli individui	0	61	65	66
	1	2	96	1
	2	93	79	136
	3	84	0	37
Durata percentuale delle vocalizzazioni	0%	61	65	66
	25%	24	18	21
	50%	8	10	8
	75%	17	14	30
	100%	130	133	115
Livello di traffico	0	2	0	0
	1	8	0	240
	2	230	240	0
Tipologia di traffico	0	2	0	0
	1	8	240	240
	2	230	0	0

e la presenza di più di una sola specie. Poiché tale valutazione non risulta particolarmente accurata in termini di ricchezza di specie, il parametro indagato può non produrre risultati significativi.

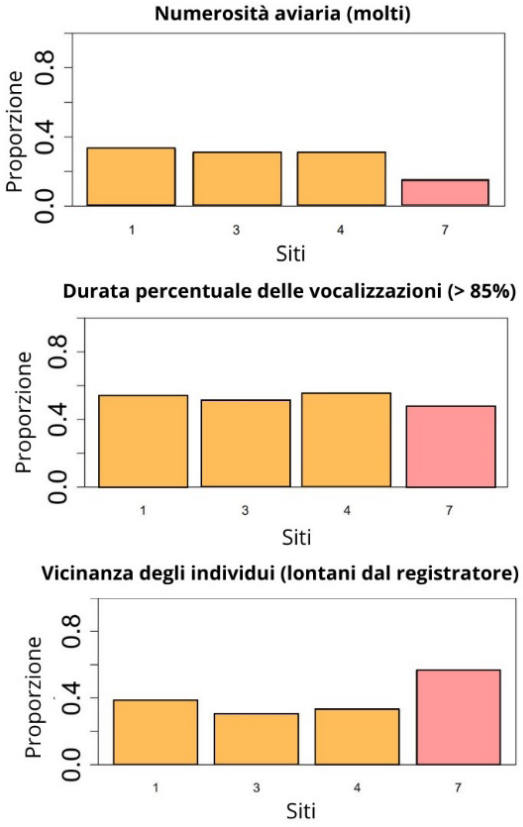


Fig. 10 – Proporzione dei parametri dell'ascolto riferiti ai singoli siti rientranti in ciascun cluster e in ciascun intervallo di: numerosità di specie aviarie, durata percentuale delle vocalizzazioni e vicinanza degli individui. (In arancione il cluster 1, in rosa il cluster 2)

Proportion of listening parameters and referring to the individual sites falling within each cluster and in each interval of: number of avian species, percentage duration of vocalizations and proximity of individuals. (Cluster 1 in orange, cluster 2 in pink)

I risultati presenti nella Tab. 4 e negli istogrammi in Fig. 10 confermano la suddivisione in cluster ottenuta tramite l'approccio ottimizzato (Fig. 11) e dimostrano coerenza con le osservazioni qualitative effettuate durante l'ascolto diretto delle registrazioni. In dettaglio:

- I siti P1, P3 e P4 presentano caratteristiche simili (Fig. 10), corrispondendo al cluster 1 ottenuto dalle analisi statistiche (Fig. 11, in arancione).
- Il sito P7 mostra andamenti differenti rispetto ai punti precedenti, evidenziando una netta distinzione dovuta principalmente al rumore antropico generato dal traffico veicolare, come confermato dalla Cluster Analysis del paesaggio sonoro (cluster 2 in Fig. 11, in rosa).
- Il traffico veicolare emerge come una problematica predominante in tutti i siti di misurazione, in linea con le osservazioni fatte durante l'ascolto delle registrazioni.

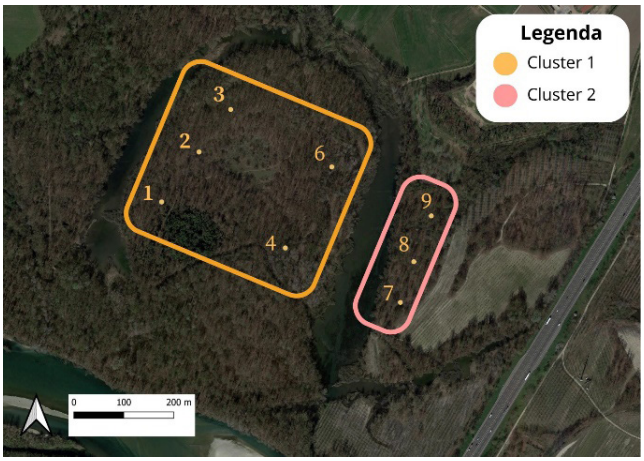


Fig. 11 – Rappresentazione della suddivisione in cluster dell'area di studio mappata con il software QGIS

Representation of the clustering of the study area mapped with the QGIS software

4 | Discussione

Il metodo proposto permette di ottimizzare l'analisi delle registrazioni audio al fine di migliorare l'interpretazione delle sorgenti sonore presenti e quindi caratterizzare il soundscape in maniera statistica. La metodologia proposta non può essere applicata mediante l'utilizzo di un unico indice [10] in quanto non rappresenterebbe la completezza e la totalità delle caratteristiche del suono, come la frequenza, la durata, la direzione e l'intensità, e non descriverebbe la complessità e diversità degli ambienti acustici. Inoltre, le considerazioni effettuate non valutano l'impiego di tutti gli indici al contempo [30] poiché potrebbe causare ridondanza o alterare l'interpretazione dei risultati in quanto tali indici potrebbero risultare correlati.

L'inclusione di una pluralità di indici [31] e l'adozione di due diverse metodologie di analisi hanno consentito una discriminazione più accurata tra i vari scenari del paesaggio sonoro. La necessità di utilizzare parametri ottimizzati per ciascun indice eco-acustico non è ampiamente documentata nella letteratura scientifica. Nelle loro recenti pubblicazioni Metcalf et al. [32] hanno sottolineato l'importanza di applicare bande di frequenza specifiche in relazione ai gruppi tassonomici monitorati, limitandosi però ad un gruppo ristretto di indici, quali ACI e BI. Anche altri lavori, come quello pubblicato da Bradfer-Lawrence et al. [33], ribadiscono la suddetta necessità seppure in misura minore rispetto alle altre raccomandazioni esplicitate nello studio.

Nonostante tali raccomandazioni, una parte significativa della comunità scientifica prosegue ad utilizzare parametri di default per il calcolo degli indici acustici. Tale riscontro è evidente in numerosi articoli, come ad esempio quello presentato da Chen et al. [34] in cui non vengono specificati i criteri per la scelta dei valori di calcolo. In altri studi, i valori non vengono riportati affatto, come [35] e [36], nei quali si omette la descrizione dei parametri e valori utilizzati per i calcoli, sia nel corpus dell'articolo sia nei materiali supplementari.

La mancanza di trasparenza e standardizzazione nella selezione dei parametri rappresenta un ostacolo significativo per il progresso della ricerca eco-acustica. L'utilizzo indiscriminato di parametri di default o la mancata documentazione dei criteri adottati rende difficoltosa la comparabilità dei risultati tra studi diversi e può portare a interpretazioni errate. Esempi emblematici sono rappresentati dalla problematica della dB_threshold per gli indici ADI e AEI, spesso trascurata o non specificata. Anche l'indice più impiegato, l'ACI, quando applicato a 12kHz senza considerare il contesto ecologico, può fornire risultati poco rappresentativi, come visibile nei recenti studi di Droge et al. [37].

È dunque evidente la necessità di criteri chiari e condivisi per la selezione dei parametri eco-acustici, come suggerito dagli studi citati, che permettano di garantire la riproducibilità e la comparabilità dei risultati, contribuendo a una migliore comprensione e protezione della biodiversità acustica a livello globale.

L'analisi spettrale preliminare, accompagnata da corrispondenti analisi statistiche, ha rivelato come la rimozione del DC offset non incida significativamente sui trend osservati (Fig. 2 e Fig. 3). I risultati indicano infatti che i suddetti trend non differiscono in modo sostanziale rispetto ai dati originali (OR- DC in Fig. 2, OR_m-DC_m2 in Fig. 3), portando a escludere tale casistica dalle analisi successive. Al contrario, la differenza sostanziale è determinata dall'equalizzazione e dall'ottimizzazione dei parametri.

Questo ha consentito di individuare quale fosse la metodologia ottimale, evidenziata dagli andamenti degli indici, in particolare NDSI e DSC, ottenuti mediante l'ottimizzazione dei parametri in input (Fig. 4b, 5b) in accordo con i risultati degli ascolti (Tab. 4 e Fig. 10). Tali risultati, rappresentati dagli istogrammi in Fig. 10, hanno validato la cluster analysis, dimostrando la coerenza presente tra i risultati numerici e le percezioni qualitative. Quest'ultima analisi ha permesso di determinare la reale suddivisione del paesaggio in termini di similitudini acustiche (Fig. 9, 11), portando a una distinzione chiara tra due estremi del paesaggio sonoro oggetto di studio: gli habitat interni alla Lanca e la macchia marginale influenzata dall'autostrada. Tali risultati sono stati corroborati dall'analisi diretta delle registrazioni audio, evidenziando ulteriormente come il paesaggio sonoro sia negativamente influenzato dal traffico veicolare e da altre fonti di disturbo antropico. Conseguentemente risulta auspicabile implementare misure di mitigazione del rumore in tale area, valutando attentamente il rapporto costi-benefici per determinare l'efficacia delle soluzioni proposte. La silvicultura attuale, infatti, potrebbe non fornire un'ottimale schermatura e assorbimento del rumore, a causa dei tagli e della ridotta vegetazione. In aggiunta, un miglioramento del monitoraggio del Parco dovrebbe riguardare il controllo dell'attività venatoria che, sebbene risulti illegale secondo la legge, è stata dimostrata essere presente tramite l'ascolto delle registrazioni e il ritrovamento di bossoli durante le campagne di monitoraggio.

5 | Conclusioni

Nel corso dell'ultimo secolo, l'espansione demografica ha avuto un impatto significativo sull'equilibrio ecologico, portando ad un aumento accelerato delle pressioni sulla biodiversità, alterando fortemente gli ecosistemi della Terra e portando a impatti drammatici sulle comunità ecologiche [38]. Comprendere i cambiamenti della biodiversità e prevedere gli scenari futuri è quindi urgente per sviluppare programmi di conservazione adeguati [39].

I recenti progressi tecnologici hanno spinto il monitoraggio della biodiversità ad un livello superiore, con nuovi strumenti per la valutazione spaziale e temporale degli ecosistemi su scala globale [40]. In tale ottica, il lavoro svolto in questa attività ha sviluppato una metodologia di analisi del soundscape direzionata al raffinamento delle analisi e a consentire una più efficacie comparabilità delle ricerche in tale ambito, partendo da indagini condotte presso l'area umida di un Parco regionale contiguo a sorgenti di rumore antropico.

La metodologia di analisi è stata implementata calcolando gli otto indici eco-acustici sulle registrazioni relative alle albe (in cui è presente maggiore attività biofonica aviaria). Tali indici sono stati inizialmente calcolati utilizzando impostazioni standard e successivamente ottimizzando le impostazioni attraverso l'analisi degli spettrogrammi. Questo ha permesso un'interpretazione più realistica degli indici eco-acustici (Fig. 4b, 5b) e ha evidenziato una suddivisione tra i siti nell'area di studio in funzione della distanza dall'infrastruttura stradale, generando una divisione coerente con l'ascolto delle registrazioni (Tab. 4 e Fig. 10). Nelle suddette suddivisioni emergono, infatti, diverse caratteristiche sonore: I. nelle aree interne alla lanca, ossia i punti 1-2-3-4-6, si osserva una maggiore attività biofonica, sia in termini di numerosità degli individui sia per quanto concerne la durata percentuale delle vocalizzazioni, mentre l'intensità del traffico veicolare risulta minore; II. al di fuori del solco fluviale, ossia in concomitanza dei siti 7-8-9 vicini all'autostrada, le vocalizzazioni risultano meno frequenti e più distanti dai registratori, e si registra un traffico veicolare intermittente e più intenso.

In conclusione, l'indagine del soundscape si dimostra essere uno strumento utile per lo studio della biodiversità e dell'impatto dell'uomo su di essa attraverso l'acquisizione dei dati tramite sistemi di monitoraggio passivo, capaci di minimizzare l'impatto sulla fauna e sugli ecosistemi. Gli studi condotti hanno contribuito a determinare un metodo innovativo per l'indagine del paesaggio sonoro, permettendo di elaborare future mappature degli indici eco-acustici e migliorare la comprensione della struttura del paesaggio sonoro. Tale approccio potrebbe costituire un solido fondamento per future indagini e ricerche nel campo della conservazione della biodiversità e dello studio dell'ecologia acustica, nonché a fornire una base scientifica per pianificare le strategie di conservazione ed identificare le azioni necessarie per proteggere e gestire in modo sostenibile l'ambiente e la sua biodiversità.

Conclusions

Over the last century, population expansion caused a significant impact on ecological balance, leading to an accelerated increase in pressures on biodiversity, strongly altering the Earth's ecosystems and leading to dramatic impacts on ecological communities [38]. Understanding changes in biodiversity and predicting future scenarios is therefore urgent to develop adequate conservation programs [39].

Recent technological advances have pushed biodiversity monitoring to the next level, with new tools for spatial and temporal assessment of ecosystems on a global scale [40]. From this perspective, the work carried out in this activity has developed a soundscape analysis methodology aimed at refining the analyzes and allowing for more effective comparability of research in this area, starting from investigations conducted in the wetland area of a regional park adjacent to sources of anthropogenic noise.

The analysis methodology was implemented by calculating the eight eco-acoustic indices through the recordings obtained during the entire measurement campaign, in the time period relating to dawns (in which there is greater avian biophonic activity). These indices were initially calculated using standard settings and subsequently calculated by optimizing the settings through an analysis of the spectrograms. This allowed a more realistic interpretation of the eco-acoustic indices (Fig. 4b, 5b) and highlighted a subdivision between the sites in the study area according to the distance from the road infrastructure, generating a division consistent with listening to the recordings (Tab.4 e Fig.10). In fact, in the aforementioned subdivisions, various sound characteristics emerge: I. in the areas inside the oxbow, i.e. points 1-2-3-4-6, a greater biophonic activity is observed, both in terms of the number of individuals and in terms of the percentage duration of vocalizations, while the intensity of vehicular traffic is lower; II. outside the river channel, i.e. in conjunction with sites 7-8-9 close to the motorway, the vocalizations are less frequent and further away from the recorders, and there is intermittent and more intense vehicular traffic.

In conclusion, the investigation of soundscape proves to be a useful tool for the study of biodiversity and the impact of man on it through the acquisition of data through passive monitoring systems, capable of minimizing the impact on fauna and ecosystems. The studies conducted have contributed to determining an innovative method for investigating the soundscape, which will allow us to produce appropriate mappings of eco-acoustic indices and improve understanding of the structure of the soundscape. Such an approach could provide a solid foundation for future investigations and research in the field of biodiversity conservation and the study of acoustic ecology, as well as providing a scientific basis for planning conservation strategies and identifying the actions necessary to protect and sustainably manage the environment and its biodiversity.

Bibliografia

[1] R. Benocci, G. Brambilla, A. Bisceglie, G. Zambon, Eco-acoustic indices to evaluate soundscape degradation due to human intrusion, Sustainability. 12(2020) 10455. https://doi.org/10.3390/su122410455.

[2] D.T. Blumstein, D.J. Mennill, P. Clemins, L. Girod, K. Yao, G. Patricelli, J.L. Deppe, A.H. Krakauer, C. Clark, K.A. Cortopassi, S.F. Hanser, B. McCowan, A.M. Ali, A.N.G. Kirschel, Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus, Journal of Applied Ecology. 48 (2011) 758-767. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01993.x.

[3] P.M. Vitousek, H.A. Mooney, J. Lubchenco, J.M. Melillo, Human domination of Earth's ecosystems, Science. 277 (1997) 494-499. https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494.

[4] M. Depraetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J.Sueur, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, Ecological Indicators. 13 (2012) 46-54. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006.

[5] A. Farina, Soundscape ecology: principles, patterns, methods and applications, Springer Science & Business Media, 2013.

[6] 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, BioScience. 61(2011) 203-216. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6.

[7] L.J. Villanueva-Rivera, B. C. Pijanowski, J. Doucette, B. Pekin, A primer of acoustic analysis for landscape ecologists, Landscape ecology. 26 (2011) 1233-1246. https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9.

[8] M. Campos-Cerqueira, J.L. Mena, V. Tejeda-Gómez, N. Aguilar-Amuchastegui, N. Gutierrez, T.M. Aide, How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru?, Remote Sensing in Ecology and Conservation. 6 (2020) 274-285. https://doi.org/10.1002/rse2.120.

[9] R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, (2018). www.r-project.org/ (accessed April 15, 2024).

[10] 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.

[11] 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.

[12] W. Yang, J. Kang, Soundscape and sound preferences in urban squares: A case study in Sheffield, Journal of urban design. 10 (2005) 61-80. https://doi.org/10.1080/13574800500062395.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] R.D. Beason, R. Riesch, J. Koricheva, Investigating the effects of tree species diversity and relative density on bird species richness with acoustic indices, Ecological Indicators. 154 (2023) 110652. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110652.

[18] L. Fornasari, L. Bani, E. de Carli, R.I. Massa, Optimum design in monitoring common birds and their habitat, GIBIER FANE SAUVAGE-GAME AND WILDLIFE. 15 (1998) 309-322.

[19] xeno-canto: Sharing wildlife sounds from around the world, (2005). https://xeno-canto.org/collection/area/europe (accessed April 25, 2024).

[20] Audacity: free software for recording and editing audio. www.audacityteam.org/ (accessed April 25, 2024).

[21] Wildlife acoustic, Kaleidoscope Lite: View your wildlife recordings to identify species and more. www.wildlifeacoustics.com/products/kaleidoscope/kaleidoscope-lite (accessed April 25, 2024).

[22] 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, 24 (2024) 4642. https://doi.org/10.3390/s24144642.

[23] R. Benocci, H.E. Roman, A. Bisceglie, F. Angelini, G. Brambilla, G. Zambon, Auto-correlations and long time memory of environment sound: The case of an Urban Park in the city of Milan (Italy), Ecological Indicators. 134 (2022) 108492. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108492.

[24] R. Benocci, A. Afify, A. Potenza, H. E. Roman, G. Zambon, Self-consistent soundscape ranking index: the case of an urban park, Sensors. 23 (2023) 3401. https://doi.org/10.3390/s23073401.

[25] E. Margaritis, J. Kang, K. Filipan, D. Botteldooren, The influence of vegetation and surrounding traffic noise parameters on the sound environment of urban parks. Applied geography, 94 (2018) 199-212. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.02.017.

[26] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K. Verheyen, Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. Journal of Sound and Vibration, 331 (2012) 2404-2425. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.01.006.

[27] G. Brock, V. Pihur, 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.

[28] G. Goujun, M. Chaoqun, J. Wu, Data clustering: theory, algorithms and applications, American Statistical Association and Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.

[29] 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.

[30] T. Bradfer-Lawrence, N. Gardner, L. Bunnefeld, N. Bunnefeld, S.G. Willis, D.H. Dent, Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research, Methods Ecol. Evol. 10 (2019) 1796–1807. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254.

[31] 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.

[32] O.C. Metcalf, J. Barlow, C. Devenish, S. Marsden, E. Berenguer, A.C. Lees: Acoustic indices perform better when applied at ecologically meaningful time and frequency scales. Methods in Ecology and Evolution, 12 (2021) 421-431. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13521.

[33] T. Bradfer-Lawrence, C. Desjonqueres, A. Eldridge, A. Johnston, O. Metcalf: Using acoustic indices in ecology: Guidance on study design, analyses and interpretation. Methods in Ecology and Evolution, 14 (2023) 2192-2204. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14194.

[34] Y. F. Chen, Y. Luo, C. Mammides, K.F. Cao, S. Zhu, E. Goodale: The relationship between acoustic indices, elevation, and vegetation, in a forest plot network of southern China. Ecological Indicators, 129 (2021) 107942. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107942.

[35] S. Galappaththi, E. Goodale, J. Sun, A. Jiang, C. Mammides: The incidence of bird sounds, and other categories of non-focal sounds, confound the relationships between acoustic indices and bird species richness in southern China. Global Ecology and Conservation, 51 (2024) e02922. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02922.

[36] M. Latifi, S. Fakheran, M. Moshtaghie, M. Ranaie, P.M. Tussi: Soundscape analysis using eco-acoustic indices for the birds biodiversity assessment in urban parks (case study: Isfahan City, Iran). Environmental Monitoring and Assessment, 195 (2023) 629. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11237-2.

[37] S. Dröge, D.A. Martin, R. Andriafanomezantsoa, Z. Burivalova, T.R. Fulgence, K. Osen, H. Kreft: Listening to a changing landscape: Acoustic indices reflect bird species richness and plot-scale vegetation structure across different land-use types in north-eastern Madagascar. Ecological Indicators, 120 (2021) 106929. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106929.

[38] T. Newbold, L.N. Hudson, A.P. Arnell, S. Contu, A. De Palma, S. Ferrier, S.L.L. Hill, A.J. Hoskins, I. Lysenko, H.R.P. Phillips, V.J. Burton, C.W.T. Chng, S. Emerson, D. Gao, G. Pask-Hale, J. Hutton, M. Jung, K. Sanchez-Ortiz, B.I. Simmons, S. Whitmee, H. Zhang, J.P.W. Scharlemann, A. Purvis, Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment, Science. 353 (2016) 288-291. https://doi.org/10.1126/science.aaf2201.

[39] H.M. Pereira, S. Ferrier, M. Walters, G.N. Geller, R.H.G. Jongman, R.J. Scholes, M.W. Bruford, N. Brummitt, S.H.M. Butchart, A.C. Cardoso, N.C. Coops, E. Dulloo, D.P. Faith, J. Freyhof, R.D. Gregory, C. Heip, R. Höft, G. Hurtt, W. Jetz, D.S. Karp, M.A. McGeoch, D. Obura, Y. Onoda, N. Pettorelli, B. Reyers, R. Sayre, J.P.W. Scharlemann, S.N. Stuart, E. Turak, M. Walpole e M. Wegmann, Essential Biodiversity Variables, Science 339 (2013) 277-278. https://doi.org/10.1126/science.1229931.

[40] I. Alcocer, H. Lima, L.S.M. Sugai, D. Llusia, Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis, Biological Reviews. 97 (2022) 2209-2236. https://doi.org/10.1111/brv.12890.

Rassegna dei metodi di analisi della sostenibilità applicabili alle misure di mitigazione sonora

Patrizia Bellucci[a]* | Francesca Ciarallo[a] | Laura Peruzzi[a]

[a] ANAS SpA,
Centro di Ricerca e Sperimentazione Stradale,
Via della Stazione di Cesano, 311, 00123 Roma
* Autore di riferimento:
p.bellucci@stradeanas.it

Ricevuto: 15/3/2024
Accettato: 9/8/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa17502
ISSNe: 2385-2615

Negli ultimi anni, il tema della sostenibilità ha assunto grande importanza in ogni campo, inclusa la mitigazione del rumore, e le parti interessate si sono trovate a fare i conti con tecniche ancora in evoluzione e incerte per valutare gli aspetti sociali, economici e ambientali correlati. Questo in relazione al fatto che la valutazione della sostenibilità può essere effettuata utilizzando metodi diversi e innumerevoli indicatori. Per chiarire il problema e identificare metodologie adatte a valutare la sostenibilità delle soluzioni di mitigazione del rumore per le strade, il comitato italiano PIARC TC 3.4.2 ha intrapreso uno studio approfondito sulle tecniche più consolidate, dalla Valutazione della Sostenibilità del Ciclo di Vita al più recente protocollo ENVISION. Questo studio ha implicato uno sforzo ampio e mirato per definire il significato di sostenibilità, che ha tenuto conto delle prospettive dei gestori delle infrastrutture stradali, degli utenti e della popolazione. Nell'ambito dello studio sono stati identificati criteri e indicatori per descrivere le performance delle soluzioni di mitigazione del rumore e sono state individuate le metodologie che maggiormente si adattano per valutarne la relativa sostenibilità.
Parole chiave: rumore, mitigazione, sostenibilità

Review of sustainability analysis methods suitable to noise mitigation measures
In recent years, sustainability has become a critical issue across various sectors, including the domain of noise mitigation. Stakeholders face challenges in evaluating the social, economic, and environmental impacts of noise mitigation measures due to the evolving and uncertain nature of available assessment techniques. There exists a plethora of methods and indicators for conducting sustainability assessments, leading to confusion and complexity in determining the most effective approach. To address these challenges, the Italian PIARC committee TC 3.4.2 embarked on a comprehensive study to identify and analyse the most reliable techniques for assessing the sustainability of noise mitigation solutions for roads. This study ranged from exploring Life Cycle Sustainability Assessment methods to examining the newer ENVISION protocol. It aimed at defining sustainability from the viewpoints of infrastructure managers, users, and the general population, and at identifying specific criteria and indicators for evaluating the performance of noise mitigation solutions, as well as the methodologies suitable to their sustainability assessment.
Keywords: noise, mitigation, sustainability

1 | Introduzione

Il traffico stradale rappresenta la principale fonte di inquinamento acustico in Europa, con livelli di rumore che si prevede aumenteranno nelle aree urbane e rurali nel prossimo decennio a causa della crescita urbana e della crescente richiesta di mobilità. Sebbene l'Unione Europea raccomandi di evitare esposizioni prolungate a livelli di rumore superiori a 55 dB(A), si stima che nella maggior parte dei paesi europei, oltre il 50% della popolazione residente nelle aree urbane sia esposto a livelli di rumore stradale superiori a 55 dB(A). Per contrastare questa tendenza, gli Stati Membri dell'UE hanno pianificato l'adozione di una varietà di azioni per ridurre e gestire i livelli di rumore, in conformità con le norme stabilite dalla Direttiva Europea sul Rumore Ambientale 2002/49/CE e i rispettivi regolamenti nazionali. Tuttavia, non è ancora chiaro quale siano l'efficacia e la sostenibilità delle misure di mitigazione del rumore concretamente applicabili nei diversi ambiti. Ragione per cui sono necessari ulteriori studi per approfondire gli impatti legati ai tre pilastri della sostenibilità (ambientale, sociale ed economica).

Negli ultimi anni, il tema della sostenibilità ha assunto grande importanza in ogni campo, inclusa la mitigazione del rumore, e le parti interessate si sono trovate a fare i conti con tecniche ancora in evoluzione e incerte per valutare gli aspetti sociali, economici e ambientali correlati. Questo in virtù del fatto che la valutazione della sostenibilità può essere effettuata applicando metodi diversi e un'infinità di indicatori.

Per affrontare questo problema e identificare metodologie adeguate a valutare la sostenibilità delle soluzioni di mitigazione del rumore stradale, il comitato italiano PIARC TC

3.4.2 [1] ha avviato uno studio approfondito sulle tecniche più consolidate, dalla Valutazione della Sostenibilità del Ciclo di Vita al più recente protocollo ENVISION.

2 | Il Comitato Tecnico PIARC TC 3.4.2

Il Comitato Tecnico TC 3.4.2 è una commissione istituita da PIARC, l'Associazione Mondiale della Strada, con un focus specifico sulla sostenibilità ambientale delle infrastrutture e dei trasporti stradali. Questa commissione tecnica aggrega un insieme eterogeneo di figure professionali, che spazia dai gestori di infrastrutture stradali, a professionisti, accademici e operatori del settore di elevato prestigio. La commissione riflette gli obiettivi e l'ambito operativo del corrispondente comitato internazionale, includendo tra le sue prerogative l'identificazione di fattori e criteri per la selezione di soluzioni mitigative, allineati ai principi di sviluppo sostenibile.

Nel suo ruolo, il Comitato italiano funge da rappresentante di PIARC a livello nazionale, per promuovere e facilitare la diffusione capillare dei risultati degli studi intrapresi e delle raccomandazioni emerse a livello europeo. In questo contesto, il Comitato ha prodotto un rapporto che descrive lo stato dell'arte in materia di misure di mitigazione del rumore, che include ricerche sul campo, indagini scientifiche, analisi di casi studio e revisioni della letteratura esistente. Il documento offre una panoramica delle tecniche di progettazione, realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali, oltre a fornire delle indicazioni pratiche sui criteri da adottare per l'identificazione delle soluzioni maggiormente sostenibili.

3 | Metodi di valutazione della sostenibilità applicabili alle misure di mitigazione sonora

Le misure di mitigazione del rumore sono progettate per ridurre l'inquinamento acustico e il suo impatto sull'ambiente e sulla salute umana. Pertanto, già in relazione alla loro funzione intrinseca, esibiscono attributi ambientalmente sostenibili. Tuttavia, le misure di mitigazione del rumore possono definirsi effettivamente sostenibili se progettate per essere efficaci a lungo termine dal punto di vista non solo ambientale, ma anche economico e sociale.

In letteratura sono stati descritti numerosi metodi per valutare la sostenibilità in diversi campi di applicazione. I metodi più interessanti e maggiormente impiegati sono i seguenti:

- Metodi basati sugli standard ISO 14040 e ISO 14044, che fanno riferimento alla valutazione del ciclo di vita attraverso un'analisi dettagliata degli impatti ambientali (LCA), la stima dei costi (LCC o LCCA) e gli impatti sociali (SLCA). Valutazioni che poi confluiscono nell'analisi di sostenibilità dell'intero ciclo di vita (LCSA).
- Il Protocollo ENVISION, maggiormente focalizzato su progetti di largo respiro di ingegneria civile, incluse le infrastrutture di trasporto, energetiche, idriche e di comunicazione.

3.1 | Life Cycle Sustainability Assessment

La Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) si riferisce alla valutazione degli impatti e benefici di carattere ambientale, sociale ed economico che caratterizzano un prodotto durante tutto il suo ciclo di vita. Questo tipo di valutazione consente di fornire un quadro completo sugli impatti positivi e negativi di un prodotto, supportando le imprese e gli attori della catena del valore nell'identificazione dei punti deboli e delle azioni da intraprendere per rendere il proprio prodotto maggiormente sostenibile. Parimenti, i risultati di questa valutazione costituiscono un utile ausilio nelle fasi decisionali di investimento e/o scelta dei prodotti stessi.

La valutazione di sostenibilità di un prodotto deve, quindi, tenere conto di tutte le fasi del ciclo di vita, a partire dall'estrazione dei materiali componenti il prodotto stesso, alla sua manifattura ed impiego, fino alla sua dismissione. In questo modo è possibile individuare il peso di ciascuna fase nelle varie dimensioni della sostenibilità (ambientale, sociale ed economica) ed apportare eventualmente dei correttivi al processo, qualora si evidenzino carichi ambientali, sociali o economici non equilibrati.

Ad oggi le tecniche utilizzate per valutare le tre dimensioni della sostenibilità si basano sull'approccio delineato dalle ISO 14040 e ISO 14044. In particolare, la dimensione ambientale è analizzata con la tecnica LCA (Life Cycle Assessment), mentre quella economica con la LCC (Life Cycle Cost). Infine, la dimensione sociale è trattata con la S-LCA (Social Life Cycle Assessment).

Fu Walter Klopffer che nel 2008 introdusse il concetto di Life Cycle Sustainability Assessment, suggerendo di combinare i risultati di queste tre valutazioni per ottenere una visione integrata ed omnicomprensiva della sostenibilità dei prodotti:

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA \quad (1)$$

Nei paragrafi successivi sono descritte le tecniche adottate per valutare l'LCA, LCC ed S-LCA ed infine gli algoritmi e le tecniche impiegate per la loro combinazione.

3.1.1 | Life Cycle Assessment

L'analisi LCA, acronimo di Life Cycle Assessment, è un metodo standardizzato a livello internazionale utilizzato per valutare i potenziali impatti ambientali di un prodotto nel corso del suo intero ciclo di vita (Wenzel et al., 1997). I primi studi in materia risalgono a fine anni Sessanta, inizio anni Settanta, ma è solo con la pubblicazione della norma ISO 14040 nel 1994 che si pone fine alla proliferazione di approcci diversificati e si avvia la fase di standardizzazione, attraverso la definizione della terminologia e di metodi di valutazione condivisi. In sintesi, la metodologia LCA consente la valutazione analitica dell'impatto ambientale potenziale associato ad un prodotto, eseguita in quattro fasi specifiche che sono alla base delle norme ISO 14040 "Principi e quadro di riferimento" [5] e ISO

14044 “Requisiti e linee guida” [6]. La prima sintetizza a livello teorico in che cosa si sostanzia una corretta valutazione LCA, mentre la seconda guida l’operatore verso una corretta esecuzione.

Le quattro fasi consequenziali (Fig. 1) introdotte dalla norma si sostanziano nelle seguenti azioni:

1. Definizione dello scopo e degli obiettivi della valutazione.
2. Inventario delle risorse e delle emissioni.
3. Valutazione degli impatti.
4. Interpretazione dei risultati.

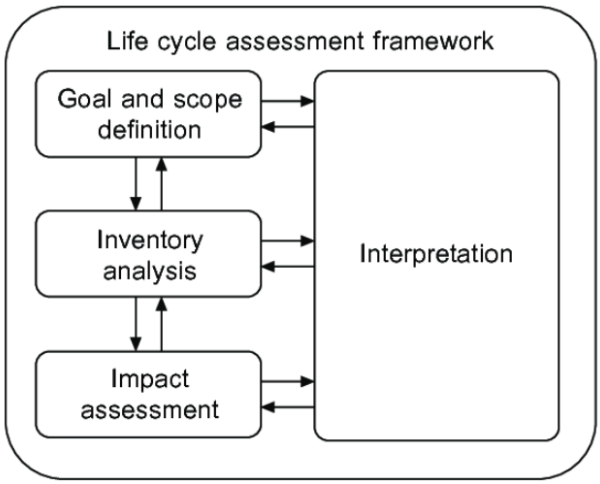


Fig. 1 – Struttura dello studio relativo all’analisi del ciclo di vita [4]
Structure of the life cycle analysis [4]

La prima fase definisce il campo di applicazione dell’analisi, ossia l’ambito e il livello di dettaglio che si vuole ottenere. Essa tiene conto dell’unità funzionale rispetto alla quale si vogliono rapportare i risultati e le categorie di impatto ambientale da considerare: cambiamento climatico, scarsità idrica, consumo di risorse, ecc.

In questa fase deve essere definito il sistema, ovvero l’insieme elementare di unità di processo, tra loro connesse, che perseguono una o più funzioni e la scelta delle categorie di impatto ambientale sulle quali effettuare le valutazioni.

Nella fase successiva la norma prevede un’analisi delle componenti in ingresso (risorse) e in uscita (emissioni) dal sistema oggetto di valutazione, la definizione delle modalità di raccolta e di analisi dati, e la loro allocazione nelle diverse unità di processo.

Per convertire i dati di inventario in un insieme di potenziali impatti, occorre effettuare un’analisi delle conseguenze che derivano dall’uso delle risorse e dalle emissioni prodotte nelle varie fasi del ciclo di vita.

Nella Fig. 2 è riportato lo schema UNEP/SETAC (ove UNEP significa United Nations Environment Programme), che lega i dati di inventario con i potenziali impatti e le categorie di danno. In questa valutazione si considerano tipicamente 3 categorie di danno riferite agli impatti sulla salute, all’uso delle risorse e alla qualità dell’ecosistema.

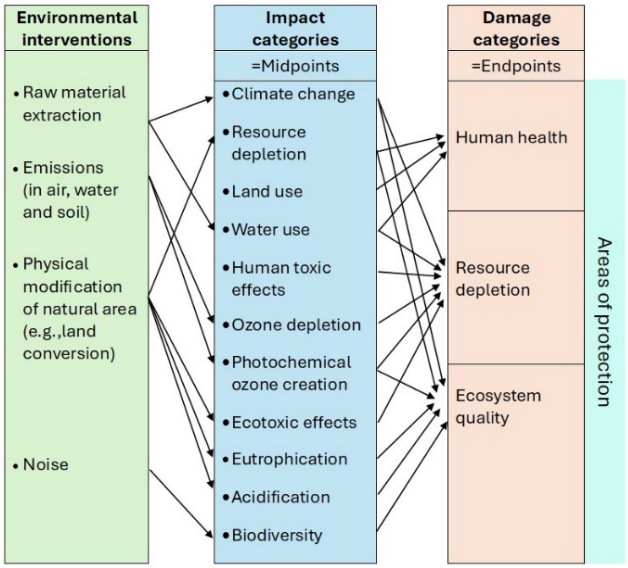


Fig. 2 – Schema generale UNEP/SETAC che collega i dati di inventario con gli impatti e le categorie di danno [4]
UNEP/SETAC general scheme linking inventory data with impacts and damage categories [4]

Su queste tre grandi categorie convergono un insieme di fattori di impatto, come illustrato in Fig. 2. A loro volta i fattori di impatto sono determinati dall’uso di materiali grezzi e dalle emissioni generate dal sistema nel corso del suo ciclo di vita, come dalle analisi di inventario. Gli impatti devono essere quantificati mediante degli indicatori e rapportati alle categorie di danno attraverso opportuni modelli.

Le norme di riferimento contemplano anche una successiva elaborazione facoltativa dei risultati ottenuti, che comprende le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione. La prima consente di migliorare la comprensione degli indicatori ottenuti e di facilitarne il confronto.

Il raggruppamento invece è una procedura di riordino e classificazione delle categorie di impatto, che dipende dall’obiettivo e dal campo di applicazione dello studio. Più nello specifico, le categorie di impatto possono essere riordinate su base nominale, in relazione alle emissioni, o alle risorse o su scala spaziale, o ancora sulla base di una gerarchia, per esempio di priorità. È evidente che tale operazione, sulla quale deve essere garantita trasparenza, può essere condotta in maniera differente da individui e società, per cui diversi possono essere i risultati ottenuti a parità di indicatori normalizzati. Con la ponderazione, i risultati di un indicatore sono pesati utilizzando dei fattori numerici o di ponderazione, scelti tramite un procedimento di assegnazione.

La fase finale, della procedura LCA, contempla la valutazione dei risultati, che vengono riepilogati e discussi, in relazione agli obiettivi e al campo di applicazione, per fornire un set di conclusioni e raccomandazioni (Fig. 3).

La valutazione LCA seppur schematica, varia sensibilmente a seconda di quelli che sono gli obiettivi, pertanto può essere condotta in modo iterativo e può portare a valutazioni differenti a seconda dell’approccio utilizzato. Inol-

tre, è importante ricordare che restituisce valori di impatto potenziale e non reali su quanto succede in un sistema, dipendenti fortemente anche dal grado di dettaglio e dagli intervalli di tempo considerati.

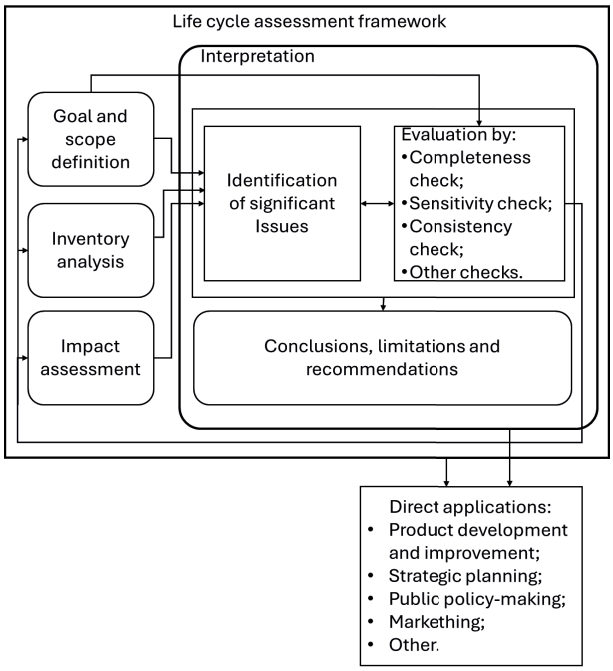


Fig. 3 – Relazione tra gli elementi nella fase di interpretazione [5]
Relationship between the elements in the interpretation phase [5]

3.1.2 | Life Cycle Costing

Delle tre dimensioni che compongono la LCSA quella economica è la più datata tra le analisi applicate.

Attualmente la LCC è regolamentata dalle norme ISO 15686 e ISO 14040 e analizza il costo totale di un processo o di parte di esso nell'arco della sua vita, includendo i costi di pianificazione, progettazione, acquisizione, gestione, manutenzione e dismissione, meno il valore residuo del prodotto al termine della vita utile [16]. Dunque, è una valutazione economica in cui si considerano tutti i costi che sono originati dall'opera in un periodo determinato di analisi.

Come per la LCA si esplica in quattro fasi:

1. Ambito e definizione degli obiettivi.
2. Analisi dei costi.
3. Aggregazione dei costi per categoria.
4. Interpretazione dei dati.

Definiti l'ambito e gli obiettivi della valutazione, con modalità analoghe a quelle indicate dalla norma per la LCA, si passa alla seconda fase in cui si effettua un'analisi dei costi.

I costi del ciclo di vita (Direttiva 2014/24/CE art. 68) comprendono i costi diretti e indiretti. I primi sono quelli sostenuti direttamente dalla stazione appaltante o da altri utilizzatori. La direttiva identifica quattro categorie di costo: costi relativi all'acquisizione, all'utilizzo, alla manutenzione e al fine vita.

I costi indiretti invece, sono quelli non direttamente sostenuti da chi usufruisce del bene e dunque imputati a esternalità ambientali legate ai prodotti, servizi o lavori nel corso del ciclo di vita. Essi si calcolano computando le quantità di input (materiali, energia, acqua) e di output (emissioni in aria, acqua, suolo e rifiuti) del sistema prodotto. Si definisce poi l'inventario che viene valutato secondo una o più categorie d'impatto e attraverso l'utilizzo di fattori di monetizzazione si trasformano i risultati delle categorie d'impatto in valore.

Tale analisi può essere svolta in parallelo alla LCA, per ampliare la valutazione, o in modo sequenziale. In quest'ultimo caso i risultati dell'una diventano il punto di partenza dell'altra. Qualsiasi sia l'approccio, l'obiettivo finale è quello di ottenere una migliore sostenibilità economica del prodotto o del servizio.

3.1.3 | Social Life Cycle Assessment

L'ultimo pilastro dell'analisi di sostenibilità del ciclo di vita di un prodotto riguarda la valutazione sociale (S-LCA), Social Life Cycle Assessment. Questa metodologia analizza gli impatti reali o potenziali in ambito sociale che i prodotti o servizi generano durante il loro ciclo di vita. Le prime discussioni su come affrontare la tematica iniziarono negli anni '80 quando si riconobbe la necessità di integrare i criteri sociali nelle analisi LCA. Fu l'UNEP nel 2009, congiuntamente con il SETAC, a pubblicare le prime linee guida sulla valutazione degli impatti sociali [4]. Le linee Guida hanno introdotto 5 categorie di stakeholder che possono essere impattati da un prodotto o servizio: lavoratori, attori della catena del valore, comunità locali, consumatori e società.

Ciascuna di queste corrisponde ad una o ad un gruppo di persone coinvolte nella catena del sistema del prodotto o comunque influenzata dalle attività correlate durante il ciclo di vita. Per valutare i potenziali impatti sociali e socioeconomici, sono state definite 31 sottocategorie di impatto sociale descritte in una serie complementare di schede metodologiche pubblicate nel 2013 (Benoît et al. 2013). Le sottocategorie di impatto sono elementi o attributi sociali e socioeconomici che descrivono come ciascuna categoria può essere influenzata dai potenziali impatti sociali e socioeconomici del sistema di prodotti. Queste vengono valutate attraverso diversi indicatori di tipo quantitativo, semiquantitativo e qualitativo. In ogni caso l'approccio metodologico alla S-LCA segue, come per la LCA, le quattro fasi standardizzate della ISO 14040, ma incentrate sugli aspetti sociali. Infatti, se nella LCA il sistema di prodotto, identificato nella prima fase, era dato dai processi che caratterizzano i diversi livelli del ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento finale, nella SLCA la prima fase è incentrata nella individuazione delle imprese coinvolte nel ciclo di vita all'interno delle quali hanno luogo i diversi processi industriali. Dunque, nella Social LCA l'analisi non va più effettuata a livello di processo ma bensì di imprese coinvolte nel ciclo di vita e più precisamente, si concentra sul comportamento di quest'ultime nei confronti degli sta-

keholders. Inoltre, va considerato che, molti impatti sociali non hanno relazione con i processi che compongono il sistema di prodotto o di servizio, ma con il comportamento dell'impresa che segue il processo stesso; ciò significa che il legame causale non può essere, come nell'LCA, tra processo e impatto, ma tra condotta dell'impresa e impatto. Pertanto, analizzare gli impatti a livello di impresa anziché di prodotto risulta essere più ostico. Bisogna infatti pensare che, nella sfera ambientale essi hanno accezione negativa mentre nell'ambito sociale possono essere negativi o positivi rispetto ad un determinato valore o standard normativo sancito o imposto dalla società. Inoltre, se la LCA basa la sua analisi su aspetti naturali per lo più prevedibili e misurabili la S-LCA indaga su fenomeni sociali, che sono influenzati, per loro natura, da molteplici fattori. Ne consegue che correlare le due analisi può risultare molto più complesso.

3.1.4 | Life Cycle Sustainability Assessment

Anche per la Life Cycle Sustainability Assessment l'approccio generale segue quello già definito dalla norma ISO 14040 delle quattro fasi: (i) definizione dell'ambito e degli obiettivi, (ii) analisi dell'inventario, (iii) valutazione degli impatti e (iv) interpretazione dei risultati. Poiché la LCSA deve combinare le tre valutazioni precedentemente illustrate (LCA, LCC e S-LCA), per ognuna delle quali ambito e obiettivi sono stati definiti, occorre individuare un terreno comune di valutazione, ossia definire un ambito ed obiettivi, inclusa l'unità funzionale di riferimento, validi per le tre valutazioni.

La valutazione LCSA deve, inoltre, contenere tutte le unità funzionali individuate nei tre sottoprocessi, alcune delle quali possono risultare condivise, come illustrato in Fig. 4.

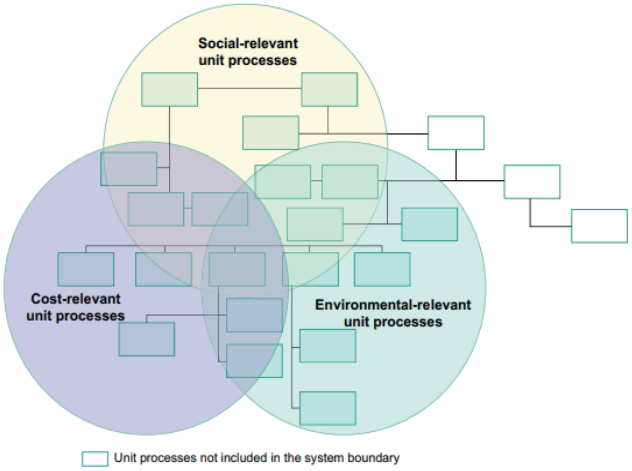


Fig. 4 – Individuazione dell'ambito della LCSA [4]
Identification of the scope in the LCSA [4]

Questa fase include anche l'identificazione degli impatti singolarmente individuati nell'ambito delle tre valutazioni.

Nella fase di raccolta dati che caratterizza l'analisi di inventario, occorre tenere conto di tutte le informazioni riferite alle tre valutazioni (LCA, LCC e S-LCA) per ciascuna delle unità di processo di cui si compone il sistema.

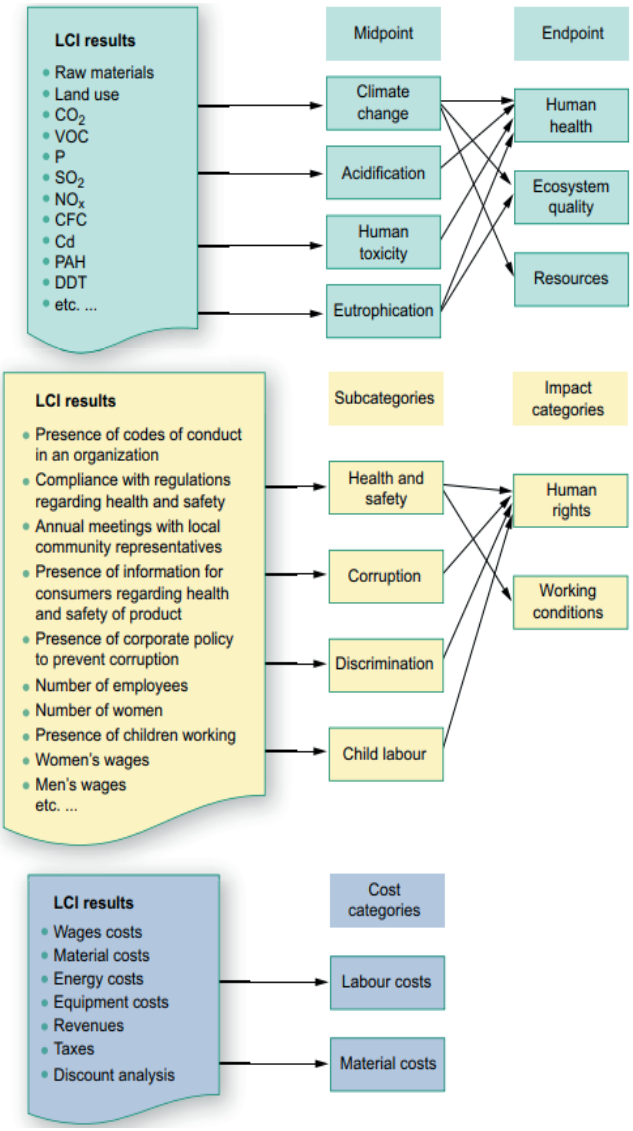


Fig. 5 – Esempio di classificazione ed assegnazione delle categorie di impatto nella LCSA [4]
Example of classification and allocation of impact categories in the LCSA [4]

Gli impatti elencati nella fase precedente di inventario sono poi classificati ed assegnati a categorie di impatto. Poiché le categorie di impatto si diversificano nelle tre valutazioni, conviene mantenere questo step separato nelle tre componenti, come illustrato a titolo esemplificativo, nella Fig. 5.

Nell'ultima fase di valutazione si procede con l'interpretazione dei risultati in maniera combinata, tenendo conto della presenza contemporanea di benefici ed aspetti critici riferiti alle tre dimensioni della sostenibilità: economica, ambientale e sociale.

Questo tipo di analisi consente di individuare quelle parti del processo che possono essere migliorate dal punto di vista della sostenibilità. Parimenti, qualora utilizzata per comparare prodotti che manifestino le stesse funzionalità, è di supporto nell'individuazione delle soluzioni maggiormente sostenibili.

3.1.5 | Analisi multicriteria

L'integrazione e successiva interpretazione dei risultati ottenuti attraverso le tre analisi (LCA, LCC e S-LCA) può essere effettuata applicando uno dei metodi decisionali multicriteria (MCDM) ad oggi disponibili. I metodi decisionali multicriteria trovano generalmente applicazione nei problemi dove è richiesto di prendere delle decisioni che coinvolgono un numero finito di alternative. I metodi multicriteria maggiormente utilizzati si possono classificare in tre categorie principali che si basano sull'approccio impiegato:

- Approccio finalizzato all'ottenimento di un punteggio finale. In questo tipo di approccio, tutti gli attributi disponibili sono considerati una sola volta e viene selezionata un'alternativa con la massima utilità o punteggio. Un esempio di questo approccio è il metodo SAW.
- Approccio finalizzato al compromesso. Questo approccio prevede la selezione di alternative che hanno la distanza minima dalla soluzione ideale e la distanza massima da quella non ideale. Appartiene, per esempio, a questa categoria il metodo TOPSIS.
- Approccio finalizzato alla concordanza. In questo tipo di approccio la selezione dell'alternativa si basa sull'organizzazione di una serie di preferenze che soddisfano una misura di concordanza adottata. Questo tipo di approccio è applicato, per esempio, nel metodo ELECTRE.

In funzione del metodo multicriteria selezionato per l'analisi, i dati riferiti a ciascun criterio di sostenibilità vengono normalizzati, pesati ed aggregati per calcolare un indice numerico globale rappresentativo del prodotto/servizio analizzato.

Il processo di normalizzazione ha lo scopo di rendere possibile l'aggregazione dei risultati associati ai criteri valutati con diversi indicatori e differenti unità di misura, attraverso la conversione delle grandezze riferite agli indicatori utilizzati in unità adimensionali variabili in una scala da 0 a 1.

L'operazione di pesatura introduce dei coefficienti che rispecchiano soggettivamente l'importanza assegnata ai vari criteri in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali verso i quali i prodotti dovrebbero tendere.

Una volta normalizzati e pesati, i vari attributi sono aggregati per fornire un indice di sostenibilità che valuta complessivamente e classifica le varie alternative analizzate.

Tuttavia, i metodi multicriteria presentano delle criticità legate alla soggettività con cui alcuni parametri sono definiti. In primis, i coefficienti di pesatura, definiti in base agli obiettivi della valutazione. I coefficienti sono, pertanto, individuati dagli stessi decisori e quindi, a parità di scenario, possono condurre a risultati diversi. È importante, quindi, definire delle modalità univoche con cui attribuire i coefficienti peso ai vari attributi.

Risultati diversi si possono ottenere anche a seguito dell'utilizzo di differenti metodi MCDM, per cui è prassi comune ripetere la valutazione di sostenibilità utilizzando più modelli per suffragare la decisione finale.

Un altro elemento a cui occorre porre attenzione riguarda la presenza o meno di alternative dominanti rispetto ad altre per uno o più attributi. Al fine di orientare la valutazione verso alternative comparabili, il confronto dovrebbe essere eseguito tra alternative non dominanti. Le alternative non dominanti possono essere individuate attraverso particolari tecniche, come il metodo "Dominance", nel quale le varie alternative vengono comparate a coppie, una alla volta, e scartate quelle che via via risultano dominate per un qualche attributo.

I risultati di queste valutazioni possono anche essere affetti da errori derivanti dall'utilizzo di indicatori non indipendenti, ossia di indicatori in qualche modo legati ad altri indicatori. In questo caso è opportuno suddividere l'indicatore in una serie di sotto-indicatori indipendenti che non contribuiscono ad accrescere o decrescere in maniera anomala il valore finale dell'indice di sostenibilità.

Infine, occorre considerare il grado di incertezza associato ai dati di input utilizzati nella valutazione ed effettuare un'analisi di sensibilità per valutare quanto la variabilità del dato possa influire sul risultato finale. È ovvio che quanto maggiore è l'incertezza associata ai dati e quindi al risultato finale, tanto maggiore è la complessità del processo decisionale che segue l'esito del metodo MCDM adottato.

3.1.6 | Il modello QUIESTT per le barriere antirumore

Il progetto europeo QUIESST (QUIetening the Environment for a Sustainable Surface Transport) [8], cofinanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (FP7/2007-2013), si è posto come obiettivo lo sviluppo di una procedura di analisi della sostenibilità delle barriere antirumore impiegate per le infrastrutture di trasporto. I dispositivi sono stati valutati dal punto di vista dell'impatto sociale, ambientale, economico e tecnico durante le fasi di progettazione, costruzione, esercizio, manutenzione e smantellamento a fine vita.

Il metodo proposto in QUIESST [8] prevede la valutazione della sostenibilità attraverso un percorso logico che presuppone l'applicazione di un processo valutativo che si compone di diversi step, partendo dalla scelta del modello più idoneo al raggiungimento degli obiettivi prefissati:

- Selezione del metodo di analisi multicriteria da utilizzare.
- Selezione dei criteri di valutazione.
- Selezione dei valori ottimali e dei pesi da assegnare ai diversi criteri.
- Pesatura e normalizzazione dei valori associati a ciascun criterio.
- Calcolo dell'indice di sostenibilità.

In generale, è abbastanza raro reperire un database di criteri di sostenibilità sviluppato ad hoc per uno specifico progetto e/o prodotto (ad esempio, ponti, dighe, autostrade, edifici, aeroporti, ospedali, ecc.).

In QUIESST la raccolta dei dati e la generazione delle informazioni hanno portato alla definizione di un database che comprende 141 criteri di valutazione, di cui 92 misurabili direttamente, specifici per le barriere antirumore che descrivono una serie di caratteristiche di prodotto riconducibili ai

quattro aspetti fondamentali della sostenibilità e a tutte le fasi di vita del sistema.

I dati contenuti nel database rappresentano in definitiva i valori più probabili/medi/generici/indicativi che possono essere ottenuti per le diverse tipologie di barriere antirumore, e che quindi possono essere utilizzati per confrontare le prestazioni di un particolare tipo di barriera o per condurre valutazioni indicative di sostenibilità.

La valutazione dei prodotti in merito ai diversi criteri e agli indicatori ad essi riconducibili richiede che siano inoltre assegnati dei coefficienti peso per modulare l'importanza di ciascun criterio in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali verso i quali i prodotti dovrebbero tendere.

Una volta selezionati i criteri di interesse, per ciascuno di essi è necessario individuare i Key Performance Indicators (KPI), cioè gli indicatori con relativa unità di misura. Per alcuni criteri la scelta è relativamente semplice: per quelli tecnici si può fare riferimento alle Norme tecniche armonizzate, per quelli economici i costi capitali che concorrono al Life Cycle Cost (LCC) sono in genere rapportati all'unità di superficie della barriera antirumore (€/mq). Per altri indicatori è invece necessario condurre delle analisi più approfondite: per alcuni criteri di tipo ambientale, ad esempio, il calcolo dell'indicatore presuppone il ricorso ad algoritmi codificati nell'ambito di norme tecniche specifiche. Infine, per i criteri di tipo sociale l'indicatore è più di carattere qualitativo, misurabile attraverso una valutazione diretta, con un giudizio espresso su scala tipo Likert (Likert R) o con valutazioni del tipo "on/off". È il caso, ad esempio, della valutazione dell'impatto paesaggistico e di tutti gli aspetti correlati: disegno architettonico della barriera, possibilità di oscuramento delle aree residenziali o di accumulo di rifiuti in prossimità della barriera stessa.

La valutazione dei prodotti in merito ai diversi criteri e agli indicatori ad essi riconducibili richiede che siano assegnati dei coefficienti peso per modulare l'importanza di ciascun criterio in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali verso i quali i prodotti dovrebbero tendere.

Il metodo prevede anche un'operazione di normalizzazione dei valori associati a ciascun criterio su una scala da 0 (bassa sostenibilità) a 1 (alta sostenibilità) per poter comparare tra loro criteri con unità di misura diverse. Nell'ambito del progetto QUIESST sono indicati sei tipi di criteri applicabili per la misurazione e la normalizzazione dei criteri di sostenibilità dei sistemi di riduzione del rumore.

In generale la valutazione della sostenibilità di un prodotto o di una soluzione è frutto di un processo di analisi combinata di una serie di criteri, ritenuti idonei alla valutazione, da attuarsi attraverso processi decisionali multi-criteria (MCDM). Per i sistemi antirumore, nell'ambito del progetto QUIESST sono stati individuati alcuni modelli di analisi ritenuti idonei per il caso specifico. La valutazione della sostenibilità è un problema di analisi multicriteria (MCA) in quanto comporta la selezione e la valutazione di molteplici criteri di sostenibilità dei dispositivi di riduzione del rumore in conflitto.

In funzione del metodo multicriteria selezionato per l'analisi, i dati riferiti a ciascun criterio di sostenibilità vengono normalizzati, pesati ed aggregati per calcolare un indice numerico globale rappresentativo del prodotto analizzato. Tuttavia, va notato che l'ottimizzazione di un particolare criterio isolatamente, ad es. costi e prestazioni tecniche, non aumenta necessariamente la sostenibilità dei progetti dei dispositivi di riduzione del rumore.

In effetti, è la combinazione del risultato di tutti i criteri misurati in relazione tra loro in modo equo all'interno del quadro di sostenibilità definito che mostra la relativa sostenibilità del progetto nel suo insieme. Gli strumenti di analisi multicriteria (MCA) offrono un approccio fattibile per valutare più criteri di sostenibilità in combinazione tra loro in modo imparziale per generare un valore dell'indice in grado di denotare le prestazioni di sostenibilità complessive.

3.2 | Il protocollo ENVISION

ENVISION [9] è un protocollo che consente la valutazione e misurazione del grado di sostenibilità di progetti infrastrutturali, attraverso l'intera gamma di indicatori sociali, economici e ambientali. ENVISION è concepito come un sistema olistico di valutazione della sostenibilità applicabile a tutti i tipi e dimensioni di infrastrutture pubbliche e private. Lo scopo di ENVISION è quello di promuovere progetti maggiormente sostenibili e di supportare le parti interessate nello sviluppo ed implementazione di soluzioni resilienti e sostenibili nel lungo termine.

Il protocollo ENVISION è costituito da un sistema flessibile di criteri e obiettivi prestazionali finalizzati all'identificazione di approcci sostenibili durante le varie fasi del ciclo di vita di un progetto. Consta di 64 indicatori di sostenibilità e resilienza, chiamati «crediti», organizzati intorno a cinque pilastri fondamentali: qualità della vita, leadership, allocazione delle risorse, natura, clima e resilienza. A loro volta, questi comprendono aspetti quali il benessere umano, la mobilità, lo sviluppo della comunità, la collaborazione, la pianificazione, l'economia, i materiali, l'energia, l'acqua, l'ubicazione, la conservazione, l'ecologia, le emissioni e la resilienza, che, nel loro insieme contribuiscono a valutare il grado di sostenibilità dei progetti (Fig. 6).

Ciascuno dei 64 crediti ha più livelli realizzativi che rappresentano lo spettro dei possibili obiettivi di performance, dal leggero miglioramento oltre la pratica convenzionale, alla conservazione e al ripristino di comunità e ambienti. Valutando il raggiungimento di ciascuno dei 64 crediti, i team di progetto possono stabilire in che misura il progetto è sostenibile rispetto ai diversi aspetti valutati e su quali parametri eventualmente intervenire per migliorarne le prestazioni di sostenibilità.

Il protocollo ENVISION prevede, in aggiunta all'autovalutazione, anche la possibilità di certificare il grado di sostenibilità del progetto da parte di un soggetto terzo, fornendo, in questo modo, un riconoscimento pubblico delle prestazioni esibite.

Il protocollo ENVISION può essere applicato nelle diverse fasi del ciclo di vita di un progetto, dalla pianificazione fino alla dismissione a fine vita di un'infrastruttura. Quanto più precoce è la sua applicazione, tanto più efficace ed efficiente risulta il perseguimento degli obiettivi di sostenibilità.



Energy

Distribution
Hydroelectric
Coal
Natural Gas
Wind
Solar
Biomass

Water

Treatment
Distribution
Capture / Storage
Stormwater
Flood Control
Nutrient Management

Waste

Solid waste
Recycling
Hazardous Waste
Collection & Transfer



Transportation

Airports
Roads / Highways
Bikes / Pedestrians
Railways
Transit
Ports
Waterways

Landscape

Public Realm
Parks
Ecosystem Services
Natural Infrastructure
Environmental Remediation

Information

Telecom
Cables
Internet
Phones
Data Centers
Sensors

Fig. 6 – Infrastrutture oggetto di valutazione del protocollo ENVISION

Infrastructure assessed under the ENVISION Protocol

3.2.1 | Utilizzo del protocollo ENVISION nelle varie fasi del ciclo di vita delle infrastrutture

Nella fase di pianificazione del progetto, ENVISION può essere utilizzato per valutare i desiderata della comunità, coinvolgere le parti interessate e creare consenso attorno alla migliore soluzione progettuale. Può, inoltre, essere utilizzato per definire l'ambito di un progetto, l'assegnazione di priorità a un elenco di progetti e per effettuare il confronto delle alternative progettuali.

Nella fase di progettazione, ENVISION, attraverso il processo di valutazione per crediti, guida verso l'identificazione dei possibili margini di miglioramento da attuare al progetto per incrementarne la sostenibilità.

Nella fase di costruzione, il grado di sostenibilità del progetto viene misurato nel concreto, documentato e confrontato con quello individuato in fase di progettazione. In questa fase è inoltre possibile misurare l'impatto dei crediti sul processo di costruzione e sui costi. Durante la fase di esercizio e manutenzione, ENVISION fornisce indicatori chiave di prestazione che possono essere monitorati durante la vita del progetto.

3.2.2 | Valutazione delle componenti di sostenibilità

Nel protocollo ENVISION alle tre dimensioni della sostenibilità (sociale, economico e ambientale) è stata aggiunta una quarta dimensione riferita ai cambiamenti climatici e alla resilienza delle infrastrutture ad eventi estremi.

Componente sociale. Per quanto concerne la componente sociale occorre considerare tutti quegli aspetti che possano garantire equità e giustizia sociale. Per esempio, una infrastruttura può essere migliorata dal punto di vista ambientale ed economico, ma al contempo indurre fenomeni di congestione o espansione urbana.

L'equità e la giustizia sociale si riferiscono alla responsabilità di una società di garantire uguaglianza, nonché la preservazione e tutela dei diritti civili e umani. Questi aspetti sono particolarmente rilevanti per lo sviluppo delle infrastrutture, che spesso implicano vantaggi ed impatti potenzialmente significativi. ENVISION affronta l'equità e la giustizia sociale incoraggiando il coinvolgimento attivo delle parti interessate della comunità durante l'intero ciclo di vita del progetto, incoraggiando i team di progetto a sviluppare una comunicazione bidirezionale con le comunità interessate, consentendo loro di esaminare in modo olistico gli impatti di un progetto da ogni angolazione.

Componente ambientale. Il ripristino delle risorse naturali e dei servizi ecosistemici è un obiettivo esplicito del protocollo ENVISION. Sebbene il miglioramento delle prestazioni sostenibili di un'infrastruttura sia un obiettivo essenziale e immediato, i progetti dovrebbero tendere nel lungo termine al ripristino delle condizioni ambientali, ove possibile. Ciò ha lo scopo di rafforzare il concetto che, per contribuire alla sostenibilità, i progetti devono fare di più che mitigare gli impatti negativi. La mitigazione è importante, ma non contribuisce al ripristino delle condizioni economiche, ambientali e sociali a livelli sostenibili.

Componente economica. Lo sviluppo economico condotto senza esaurire le risorse sociali e naturali è un target essenziale dello sviluppo sostenibile. Sebbene non tutti i progetti infrastrutturali siano direttamente collegati alla crescita economica, è comunque presente in qualche modo anche la dimensione economica.

Il ritorno sull'investimento e i costi di capitale iniziali sono spesso i fattori chiave nelle decisioni di pianificazione, che, tuttavia, non tengono conto dei costi del ciclo di vita del progetto, dei rischi e dell'incertezza, o degli impatti più ampi sull'ambiente e sulla società. ENVISION quantifica anche questi aspetti per evitare di trascurare i ritorni sostenibili sull'investimento, come i minori costi di utilità, di esercizio e manutenzione o di sostituzione.

Componente di resilienza. I rischi a breve e lungo termine devono essere ridotti. In ENVISION i team di progetto sono guidati a implementare misure e infrastrutture che impediscano di impegnare la comunità in costi fissi elevati o di creare una forte dipendenza da risorse che potrebbero diventare scarse e/o molto costose. Al contrario, i progetti che creano o aumentano la vulnerabilità a eventi meteorologici estremi, disastri naturali e/o condizioni economiche sono considerati concettualmente carenti.

In ENVISION il progetto viene analizzato in tutte le sue componenti per l'intero ciclo di vita, dando maggiore credito ai progetti che analizzano le varie componenti delle opere progettate. I progetti che offrono una maggiore durata e flessibilità per prolungare la vita utile delle opere costruite ricevono un ulteriore riconoscimento. Il prolungamento della vita utile delle opere costruite significa che le strutture sostitutive sono meno necessarie. Viene, inoltre, dato più credito a quei progetti che incorporano i principi di decostruzione e che consentono il riutilizzo e il riciclo di materiali e attrezzature.

3.2.3 | I crediti di ENVISION

ENVISION consta di 64 indicatori di sostenibilità e resilienza, chiamati "crediti", organizzati intorno a cinque pilastri fondamentali: qualità della vita, leadership, allocazione delle risorse, natura, clima e resilienza. A loro volta, questi comprendono aspetti quali il benessere umano, la mobilità, lo sviluppo della comunità, la collaborazione, la pianificazione, l'economia, i materiali, l'energia, l'acqua, l'ubicazione, la conservazione, l'ecologia, le emissioni e la resilienza. Nella Fig. 7 sono illustrati i 64 crediti individuati dal protocollo ENVISION.

A ciascuno di questi crediti è assegnato un punteggio che rispecchia la prestazione dell'azione attuata. La somma di tutti i punteggi fornisce la valutazione finale, espressa in percentuale rispetto al punteggio totale ammissibile.

Il punteggio fa riferimento al raggiungimento delle seguenti prestazioni in termini di sostenibilità:

- Improved: miglioramento rispetto ai requisiti normativi/convenzionali;
- Enhanced: prestazioni superiori rispetto ai requisiti normativi;
- Superior: prestazioni di alto livello;
- Conserving: prestazioni a zero impatto;
- Restorative: prestazioni che ripristinano sistemi naturali o sociali. A tale performance è assegnato il punteggio più alto. Il livello Restorative non è applicabile a tutti gli obiettivi di performance.

Non tutti i crediti hanno cinque livelli di realizzazione. I livelli sono determinati dalla natura del credito e dalla capacità di operare distinzioni significative tra i livelli.

I criteri di valutazione sono indicati con delle lettere che vanno da A ad E e comprendono sia requisiti qualitativi che quantitativi. Tutti i criteri di valutazione sono inquadrati come domande, le cui risposte devono attenersi alle descrizioni fornite sui diversi crediti dal protocollo stesso per poter essere categorizzate opportunamente.

Per la valutazione delle prestazioni è necessario che sia fissata una baseline rispetto alla quale determinare i miglioramenti che conseguono all'applicazione di una soluzione o di più soluzioni alternative.

ENVISION riconosce che non tutti i crediti sono applicabili ai vari tipi di progetto. In questo caso, tali crediti possono essere omessi nel processo di valutazione. La non applicazione deve essere opportunamente giustificata.

4 | Applicazione dei metodi analizzati a due casi studio

Nei successivi paragrafi sono illustrati due casi studio riferiti a differenti applicazioni operative.

Nel primo caso studio sono state confrontate le prestazioni di diverse tipologie di barriera antirumore per valutarne la relativa sostenibilità attraverso il modello QUIESTT.

Nel secondo caso studio è stato, invece, utilizzato il protocollo ENVISION per valutare la sostenibilità di due alternative progettuali applicate ad un'area suburbana per mitigare gli impatti sonori prodotti da una infrastruttura stradale.

4.1 | Primo caso studio: applicazione del modello QUIESTT

Il modello QUIESTT è stato applicato a 11 diverse tipologie di barriere per valutarne la sostenibilità intrinseca, indipendente dall'applicazione delle stesse in un determinato contesto operativo.

Allo scopo è stata utilizzata una procedura semplificata, basata sulle indicazioni rese disponibili dal progetto QUIESST, nell'ambito della quale i principali tipologici di barriera sono stati analizzati dal punto di vista dell'impatto sociale, ambientale, economico e tecnico [28].

L'analisi di sostenibilità è stata condotta utilizzando un metodo semplice e intuitivo, noto come SAW (Simple Additive Weighting). Questo approccio prevede:

1. la selezione dei criteri di valutazione;
2. l'individuazione dei benchmark per i criteri selezionati;
3. la pesatura e normalizzazione dei valori assegnati a ciascun criterio su una scala da 0 (bassa sostenibilità) a 1 (alta sostenibilità);
4. la somma dei valori normalizzati;
5. il calcolo dell'indice di sostenibilità.

I criteri di valutazione sono stati scelti tra quelli individuati nel progetto QUIESST, tenendo conto del loro impatto sulla specifica applicazione. Dal database QUIESST sono stati selezionati 44 criteri di valutazione che descrivono varie caratteristiche di prodotto, riconducibili ai quattro aspetti fondamentali della sostenibilità: ambientale, sociale, tecnico ed economico.

ENVISION POINTS TABLE

			Improved	Enhanced	Superior	Conserving	Restorative	Maximum Points
Quality of Life	Wellbeing	QL1.1 Improve Community Quality of Life	2	5	10	20	26	200
		QL1.2 Enhance Public Health & Safety	2	7	12	16	20	
		QL1.3 Improve Construction Safety	2	5	10	14	—	
		QL1.4 Minimize Noise & Vibration	1	3	6	10	12	
		QL1.5 Minimize Light Pollution	1	3	6	10	12	
		QL1.6 Minimize Construction Impacts	1	2	4	8	—	
	Mobility	QL2.1 Improve Community Mobility	1	3	7	11	14	
		QL2.2 Encourage Sustainable Transportation	—	5	8	12	16	
		QL2.3 Improve Access & Wayfinding	1	5	9	14	—	
	Community	QL3.1 Advance Equity & Social Justice	3	6	10	14	18	
		QL3.2 Preserve Historic & Cultural Resources	—	2	7	12	18	
		QL3.3 Enhance Views & Local Character	1	3	7	11	14	
		QL3.4 Enhance Public Space & Amenities	1	3	7	11	14	
Leadership	Collaboration	LD1.1 Provide Effective Leadership & Commitment	2	5	12	18	—	182
		LD1.2 Foster Collaboration & Teamwork	2	5	12	18	—	
		LD1.3 Provide for Stakeholder Involvement	3	6	9	14	18	
		LD1.4 Pursue Byproduct Synergies	3	6	12	14	18	
	Planning	LD2.1 Establish a Sustainability Management Plan	4	7	12	18	—	
		LD2.2 Plan for Sustainable Communities	4	6	9	12	16	
		LD2.3 Plan for Long-Term Monitoring & Maintenance	2	5	8	12	—	
		LD2.4 Plan for End-of-Life	2	5	8	14	—	
	Economy	LD3.1 Stimulate Economic Prosperity & Development	3	6	12	20	—	
		LD3.2 Develop Local Skills & Capabilities	2	4	8	12	16	
		LD3.3 Conduct a Life-Cycle Economic Evaluation	5	7	10	12	14	
Resource Allocation	Materials	RA1.1 Support Sustainable Procurement Practices	3	6	9	12	—	196
		RA1.2 Use Recycled Materials	4	6	9	16	—	
		RA1.3 Reduce Operational Waste	4	7	10	14	—	
		RA1.4 Reduce Construction Waste	4	7	10	16	—	
		RA1.5 Balance Earthwork On Site	2	4	6	8	—	
	Energy	RA2.1 Reduce Operational Energy Consumption	6	12	18	26	—	
		RA2.2 Reduce Construction Energy Consumption	1	4	8	12	—	
		RA2.3 Use Renewable Energy	5	10	15	20	24	
		RA2.4 Commission & Monitor Energy Systems	3	6	12	14	—	
	Water	RA3.1 Preserve Water Resources	3	5	7	9	12	
		RA3.2 Reduce Operational Water Consumption	4	9	13	17	22	
		RA3.3 Reduce Construction Water Consumption	1	3	5	8	—	
		RA3.4 Monitor Water Systems	1	3	6	12	—	
Natural World	Siting	NW1.1 Preserve Sites of High Ecological Value	2	6	12	16	22	232
		NW1.2 Provide Wetland & Surface Water Buffers	2	5	10	16	20	
		NW1.3 Preserve Prime Farmland	—	2	8	12	16	
		NW1.4 Preserve Undeveloped Land	3	8	12	18	24	
	Conservation	NW2.1 Reclaim Brownfields	11	13	16	19	22	
		NW2.2 Manage Stormwater	2	4	9	17	24	
		NW2.3 Reduce Pesticide & Fertilizer Impacts	1	2	5	9	12	
		NW2.4 Protect Surface & Groundwater Quality	2	5	9	14	20	
	Ecology	NW3.1 Enhance Functional Habitats	2	5	9	15	18	
		NW3.2 Enhance Wetland & Surface Water Functions	3	7	12	18	20	
		NW3.3 Maintain Floodplain Functions	1	3	7	11	14	
		NW3.4 Control Invasive Species	1	2	6	9	12	
		NW3.5 Protect Soil Health	—	3	4	6	8	
Climate and Resilience	Emissions	CR1.1 Reduce Net Embodied Carbon	5	10	15	20	—	190
		CR1.2 Reduce Greenhouse Gas Emissions	8	13	18	22	26	
		CR1.3 Reduce Air Pollutant Emissions	2	4	9	14	18	
	Resilience	CR2.1 Avoid Unsuitable Development	3	6	8	12	16	
		CR2.2 Assess Climate Change Vulnerability	8	14	18	20	—	
		CR2.3 Evaluate Risk and Resilience	11	18	24	26	—	
		CR2.4 Establish Resilience Goals and Strategies	—	8	14	20	—	
		CR2.5 Maximize Resilience	11	15	20	26	—	
		CR2.6 Improve Infrastructure Integration	2	5	9	13	18	
							Maximum TOTAL Points	1,000

Fig. 7 – Punteggi riferiti ai diversi crediti in funzione delle prestazioni (ENVISION)

Performance scores for different credits (ENVISION)

I criteri tecnici scelti hanno riguardato principalmente le caratteristiche geometriche e funzionali del prodotto, la durabilità, l'edificabilità e rimovibilità della barriera, la frequenza di manutenzione, il controllo della riflessione luminosa e la resistenza al vandalismo.

I criteri ambientali sono stati riferiti alle potenzialità di riciclabilità ed eco-compatibilità del prodotto, mentre quelli economici ai costi di fornitura, posa in opera, trasporto, manutenzione ordinaria e straordinaria.

A questi criteri ne sono stati aggiunti due di tipo qualitativo: estetico (integrazione della barriera con il paesaggio e design) e di opportunità (adattabilità ai diversi scenari ambientali e territoriali).

In assenza di informazioni affidabili, non è stato possibile valutare l'impatto sociale dei prodotti analizzati.

La valutazione dei prodotti in base ai diversi criteri e agli indicatori richiede l'assegnazione di coefficienti peso per modulare l'importanza di ciascun criterio in funzione degli obiettivi della valutazione e dei valori ottimali a cui i prodotti dovrebbero tendere. La figura 8 mostra un esempio di matrice per l'assegnazione dei benchmark e dei pesi ai diversi criteri, in base al tipo di barriera analizzato.

Criterio di sostenibilità	Vulnerabilità al vandalismo
Sociale	X
Economico	
Ambientale	
Tecnico	
Peso	1
Tipo di indicatore	Quantitativo
Metodo di valutazione	Valutazione vulnerabilità al vandalismo: 1 elevata -10 bassa
Barriera Metallica	2
Barriera in cls	2
Valore finale	10

Fig. 8 – Assegnazione dei valori ottimali e dei pesi ai criteri di valutazione selezionati

Assignment of optimal values and weights to selected evaluation criteria

In verde sono evidenziati i pesi assegnati ai diversi criteri in funzione della loro rilevanza (alta=1, media=0,5 o bassa=0,1) per il raggiungimento degli obiettivi di progetto. In azzurro sono riportati i valori ottimali attribuiti ai diversi criteri basati su dati di letteratura, norme di riferimento o potenzialità dei prodotti esistenti in commercio. In rosso sono indicati i valori assunti dal particolare criterio per il tipo di barriera analizzato.

Le informazioni necessarie per valutare i diversi criteri sono state raccolte direttamente dai produttori delle barriere acustiche. A tal fine, è stato predisposto un questionario, distribuito ai principali produttori presenti sul mercato e organizzato in 5 diversi fogli Excel, ciascuno dedicato a uno specifico tipo di barriera: calcestruzzo, plastica, trasparente, legno e metallo. Il questionario è stato somministrato a 18 produttori. Al questionario hanno risposto soltanto 11 delle aziende contattate.

4.1.1 | Calcolo dell'indice di sostenibilità per tipologia di barriera

Per calcolare l'indice di sostenibilità attraverso il metodo SAW, i dati relativi a ciascun criterio forniti dai produttori sono stati normalizzati rispetto ai valori ottimali individuati. Successivamente, i valori normalizzati sono stati ponderati in base al punteggio di rilevanza assegnato a ciascun criterio. La somma di questi valori, ulteriormente normalizzata tra 0 e 1, ha permesso di ottenere l'indice di sostenibilità complessivo del prodotto.

La valutazione della sostenibilità dei prodotti è stata effettuata seguendo una procedura che prevede prima il calcolo dell'indice di sostenibilità per ogni tipologia di barriera e poi l'estrazione della classifica complessiva. Dall'analisi è emersa la seguente graduatoria, in ordine decrescente di sostenibilità:

1. barriere trasparenti: punteggio 0,66;
2. barriere in legno: punteggio 0,35;
3. barriere in calcestruzzo: punteggio 0,30;
4. barriere metalliche: punteggio 0,28.

Le barriere trasparenti si sono distinte per la loro elevata sostenibilità, principalmente grazie alle eccellenti caratteristiche estetiche e alla versatilità d'uso. Al contrario, le barriere metalliche hanno ottenuto i punteggi più bassi, dovuti principalmente alla frequente necessità di manutenzione e alla mancanza di accorgimenti supplementari per migliorarne le prestazioni. Non sono state reperite informazioni sufficienti sulle barriere in plastica e, pertanto, quest'ultime sono state escluse dalla valutazione.

4.2 | Secondo caso studio: applicazione del protocollo ENVISION [1,2]

Il secondo caso studio si riferisce a un'area suburbana situata nella città di Roma, attraversata dall'autostrada A90. Nonostante il carattere prevalentemente industriale dell'area, sono presenti diversi edifici residenziali e due recettori sensibili: un asilo nido e una scuola primaria. Data la vicinanza di molti recettori alla sorgente stradale, lungo l'autostrada A90 sono state a suo tempo installate barriere antirumore. Recenti indagini fonometriche hanno, tuttavia, rilevato livelli di pressione sonora ancora al di sopra dei limiti di legge. Pertanto, per ridurre ulteriormente l'impatto ai ricettori, sono state progettate due soluzioni correttive ed è stato applicato il protocollo ENVISION per identificare la soluzione più sostenibile.

4.3 | Individuazione e progettazione delle misure di mitigazione sonora

Le ipotesi progettuali sono state delineate considerando il livello medio di rumore dell'area e la presenza di singoli hotspot con alti impatti acustici. La valutazione di impatto acustico è stata effettuata tra gennaio e maggio 2021 utilizzando un modello di calcolo calibrato con dati raccolti in loco presso una serie di recettori opportunamente selezionati e rappresentativi del clima acustico dell'area. I risultati, mostra-

ti in Tabella 1, indicano che i livelli di rumore superano i limiti di legge di 1-4 dB(A) in media, con punte di 11-16 dB(A) presso gli edifici residenziali che costeggiano l'autostrada.

Tab. 1 – Risultati delle misure
Results of the measurement campaign

Ricettore	*Indirizzo*	*Altezza (m)*	*LAeq (dB)*
PR1	Via Orazio Raimondo	4	52,0
PR2	Scuola elementare "Federico Fellini"	4	54,0
PR3	Asilo nido "Uno, Due Tre... Stella"	4	55,0
PR4	Via Ubaldo Comandini	4	67,0
PR5	Via Emilio Brusa	4	73,5
PR6	Via Salvatore Barzilai	4	75,0
PR7	Via Giacomo Delitala	4	73,0

I dati acquisiti hanno suggerito l'implementazione di un approccio olistico, basato sull'implementazione ed integrazione di diverse misure di mitigazione sonora per risanare la totalità dell'area. Per consentire il confronto, in termini di sostenibilità, dei potenziali interventi di risanamento, sono stati valutati due scenari mitigativi, denominati A e B.

4.3.1 | Scenario A

Questo scenario (Figura 9) include due soluzioni:

- una pavimentazione antirumore, per ridurre i livelli di rumore in corrispondenza dei ricettori con superamenti inferiori a 3 dB(A);
- barriere antirumore da apporre lungo le carreggiate e lo spartitraffico in corrispondenza dei ricettori critici con superamenti maggiori di 3 dB(A).

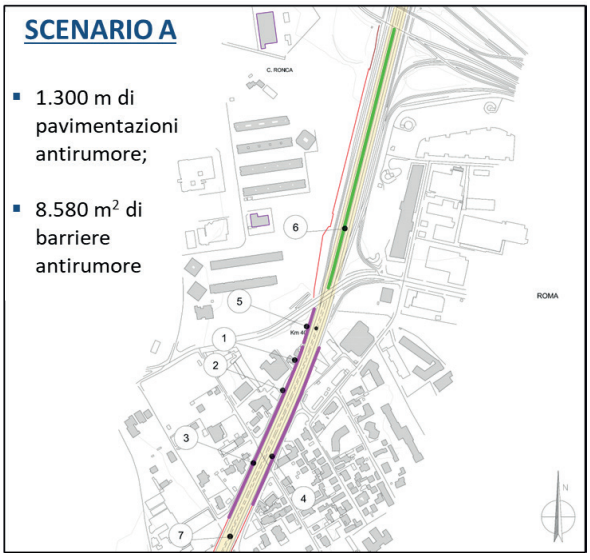


Fig. 9 – Scenario mitigativo A
Noise mitigation measures related to Scenario A

L'accoppiamento della pavimentazione antirumore con le barriere acustiche consente di mitigare anche i ricettori più arretrati rispetto alla sorgente, agendo uniformemente su tutta l'area e contribuendo a contenere l'altezza delle barriere necessarie per ridurre l'impatto sui ricettori più critici. La Tabella 2 mostra il tipo e la dimensione delle misure progettate.

Tab. 2 – Tipo e dimensioni delle misure mitigative progettate (Scenario A)
Type and size of noise mitigation measures (Scenario A)

Tipo	*L (m)*	*H (m)*	*Aggetto*		*Superficie (m²)*
			Estensione (m)	*Tilt (°)*	
Barriere carreggiata interna	470	5	3	45	3.760
Barriere carreggiata esterna	340	5	3	45	2.720
Barriera spartitraffico	525	4	–	–	2.100
Pavimentazione antirumore	1.300		–	–	36.400

4.3.2 | Scenario B

Come nello scenario A, lo scenario B (Fig. 10) include una pavimentazione antirumore e l'installazione di barriere acustiche, ma solo sui lati esterni delle carreggiate dell'autostrada A90. Laddove l'uso delle barriere antirumore richiederebbe investimenti significativi per garantire il raggiungimento degli obiettivi di riduzione del rumore, la soluzione prevede l'implementazione di misure dirette ai recettori (finestre insonorizzate).

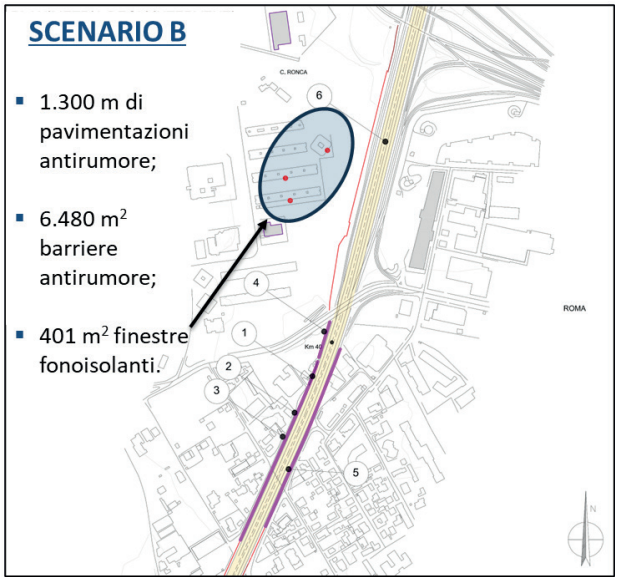


Fig. 10 – Scenario mitigativo B
Noise mitigation measures related to Scenario B

La Tabella 3 mostra il tipo e la dimensione delle misure progettate.

Tab. 3 – Tipo e dimensioni delle misure mitigative progettate (Scenario B)

Type and size of noise mitigation measures (Scenario B)

Tipo	*L (m)*	*H (m)*	*Aggetto*		*Superficie (m²)*
			Estensione (m)	*Tilt (°)*	
Barriere antirumore carreggiata interna	470	5	3	45	3.760
Barriere antirumore carreggiata esterna	340	5	3	45	2.720
Pavimentazione antirumore	1.300		–	–	36.400

4.4 | Analisi di sostenibilità delle soluzioni progettate

Considerando il contesto infrastrutturale delle soluzioni progettate, è stato deciso di applicare il protocollo ENVISION per valutarne la sostenibilità. Il protocollo ENVISION prevede la valutazione di 64 criteri, non tutti applicabili al contesto specifico. Di conseguenza, considerando l'oggetto degli interventi pianificati, sono stati selezionati esclusivamente quei criteri ad essi strettamente correlati o per i quali è possibile trovare le informazioni necessarie alla loro quantificazione, anche in relazione al livello di dettaglio raggiunto nella fase di progettazione. ENVISION definisce cinque categorie di criteri, all'interno delle quali sono identificate ulteriori sottocategorie:

1. Qualità della vita: Benessere, Mobilità, Comunità.
2. Leadership: Collaborazione, Pianificazione, Economia.
3. Allocazione delle Risorse: Materiali, Energia, Acqua.
4. Natura: Ubicazione, Conservazione, Ecologia.
5. Clima e Resilienza: Emissioni, Resilienza.

In relazione al caso studio proposto, i criteri che possono essere oggettivamente valutati in base al livello di dettaglio progettuale raggiunto sono illustrati nella Tabella 4.

I criteri che necessitano di maggiori informazioni, disponibili solo in fasi avanzate della progettazione o di gara, per quanto riguarda le modalità costruttive, potranno essere applicati successivamente. Il protocollo ENVISION implica, infatti, un approccio incrementale, che si estende progressivamente a tutti i criteri identificati, man mano che vengono acquisiti nuovi dettagli. In altre parole, il protocollo ENVISION fornisce gli strumenti per valutare il grado di sostenibilità di un progetto durante le varie fasi di sviluppo e per indirizzare il processo decisionale verso soluzioni che ottimizzino le prestazioni complessive.

Nella Tabella 5 sono riportati i risultati ottenuti, attraverso i quali è possibile evincere che lo scenario B è più sostenibile dello scenario A, anche se alcuni aspetti peculiari delle soluzioni progettate non sono in alcun modo quantificati, come la minore accettazione da parte della popolazione esposta di misure di mitigazione implementate direttamente sui recettori.

Tab. 4 – Criteri selezionati per la valutazione della sostenibilità degli scenari progettuali analizzati

Selected criteria for evaluating the sustainability of the designed scenarios

Categoria	*Sottocategoria*	*Criteri*
Qualità della vita	*Benessere*	QL1.1 Migliorare la qualità della vita
		QL1.2 Migliorare la salute pubblica e la sicurezza
		QL1.4 Minimizzare il rumore e le vibrazioni
	Comunità	QL3.1 Migliorare l'equità e la giustizia sociale
		QL3.3 Migliorare l'impatto visivo ed il carattere locale
Leadership	*Collaborazione*	LD1.2 promuovere la collaborazione ed il lavoro di squadra
	Pianificazione	LD2.1 Stabilire un piano di gestione della sostenibilità
		LD2.3 Pianificare il monitoraggio e la manutenzione a lungo termine
		LD2.4 Pianificare la fine del ciclo di vita
	Economia	LD3.3 Effettuare una valutazione dell'impatto economico sull'intero ciclo di vita
Allocazione delle risorse	*Materiali*	RA1.2 Utilizzo di materiali riciclati
	Energia	RA2.3 Utilizzo di energia da fonte rinnovabile
		RA2.4 Monitoraggio dei Sistemi energetici
Natura	*Ubicazione*	NW1.4 Preservare le aree non sviluppate
	Ecologia	NW3.1 Migliorare gli habitat funzionali
Clima e resilienza	*Emissioni*	CR1.1 Ridurre le concentrazioni di carbonio
		CR1.3 Ridurre le emissioni di inquinanti in atmosfera

Quest'ultimo aspetto pone un problema di giustizia sociale e di apprezzamento da parte della popolazione residente, che dovrebbe essere debitamente considerato. Inoltre, sebbene analisi economiche come la LCCA e l'analisi costi/benefici siano menzionate nel criterio LD3.3, non emergono evidenze quantitative in grado di indirizzare la valutazione, a differenza di quanto riscontrato per altri criteri, come quelli relativi all'uso di materiali riciclati (RA1.2) o alle emissioni di CO2 (CR.1.1). L'applicazione del protocollo ENVISION ha mostrato una serie di carenze dovute essenzialmente alla natura generale del metodo di valutazione proposto, per il quale si ritiene sia necessaria l'introduzione di ulteriori indicatori, all'interno dei criteri proposti, in grado di fornire valutazioni quantitative su alcuni aspetti correlati con l'oggetto della valutazione.

Tab. 5 – Risultati ottenuti con l'applicazione del protocollo ENVISION al caso studio

Results achieved by applying the ENVISION protocol to the case study

Criteri	*Scenario A*	*Scenario B*
QL1.1 Migliorare la qualità della vita della comunità	5	5
QL1.2 Migliorare la salute e la sicurezza pubblica	16	16
QL1.4 Minimizzare il rumore e le vibrazioni	12	10
QL3.1 Promuovere l'equità e la giustizia sociale	13	13
QL3.3 Migliorare l'impatto visivo e il carattere locale	14	14
LD1.2 Promuovere la collaborazione e il lavoro di squadra	15	15
LD2.1 Stabilire un piano di gestione della sostenibilità	1	1
LD2.3 Pianificare il monitoraggio e la manutenzione a lungo termine	2	2
LD2.4 Pianificare la fine del ciclo di vita	13	13
LD3.3 Condurre una valutazione economica del ciclo di vita	14	14
RA1.2 Utilizzare materiali riciclati	2	2
RA2.3 Utilizzare energia da fonti rinnovabili	0	0
RA2.4 Monitorare i sistemi energetici	0	0
NW1.4 Preservare le aree non sviluppate	18	18
CR1.1 Ridurre le concentrazioni di carbonio	5	10
CR1.3 Ridurre le emissioni di inquinanti in atmosfera	4	4
Total score	134	137

5 | Confronto tra i metodi analizzati

Il presente studio ha esaminato e confrontato due importanti strumenti di valutazione della sostenibilità: il protocollo ENVISION e la Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Entrambi gli strumenti mirano a indirizzare e quantificare gli aspetti della sostenibilità, sebbene attraverso approcci metodologici distinti e con applicazioni in ambiti diversi. Il protocollo ENVISION si distingue per la sua specifica applicabilità ai progetti infrastrutturali, offrendo un framework strutturato per incorporare pratiche sostenibili fin dalle fasi iniziali di progettazione e costruzione. Questa focalizzazione permette agli stakeholder coinvolti nei progetti infrastrutturali di adottare decisioni consapevoli per migliorare la performance ambientale, sociale ed economica. Tuttavia, la sua applicazione resta limitata a questo specifico settore, potendo trascurare altre fasi cruciali del ciclo di vita di un progetto.

D'altra parte, la LCSA si presenta come un metodo più universale, applicabile a un'ampia varietà di prodotti e servizi. Basandosi sui consolidati principi della valutazione del ciclo di vita (LCA), estende l'analisi agli impatti sociali ed economici lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto o servizio, dalla culla alla tomba. Questo approccio olistico fornisce una visione comprensiva della sostenibilità, ma richiede l'impiego di risorse significative e di specifiche competenze tecniche, che possono rappresentare una barriera.

Il confronto tra il protocollo ENVISION e la LCSA evidenzia quindi la complementarità degli strumenti di valutazione della sostenibilità, ciascuno con i propri punti di forza e limitazioni. L'ENVISION, con il suo focus su progetti infrastrutturali e sull'integrazione della sostenibilità nelle fasi di progettazione e realizzazione, si adatta particolarmente bene agli ambienti in cui è necessario guidare decisioni rapide e basate su criteri di sostenibilità. Tuttavia, il carattere generale di questa modalità di valutazione spesso non consente di discernere le differenze tra soluzioni alternative, quando quest'ultime prevedono un iter progettuale e realizzativo simile, mettendo in luce la necessità di personalizzare alcuni dei criteri proposti in relazione all'oggetto della valutazione [2]. Sebbene, quindi, il protocollo ENVISION si proponga come una soluzione alternativa e di più facile gestione nella valutazione della sostenibilità, presenta allo stato attuale ancora delle criticità che possono essere risolte attraverso l'affinamento di alcuni criteri che consentano in maniera più efficace di discernere le peculiarità delle soluzioni proposte. Ciò non toglie, tuttavia, al protocollo ENVISION, il merito di aver proposto un approccio strutturato di facile comprensione ed attuazione, in contrapposizione a modelli di minore facile gestione ed interpretazione, come l'LCSA [3].

D'altro canto, la LCSA, con il suo approccio olistico e la sua applicabilità trasversale, offre una valutazione omnicomprensiva che può guidare scelte sostenibili in una varietà di contesti, nonostante le sue esigenze metodologiche e di risorse possano limitarne l'accessibilità.

In conclusione, la scelta tra il protocollo ENVISION e la LCSA dipende dagli obiettivi specifici del progetto, dal contesto applicativo e dalle risorse disponibili. La loro applicazione e integrazione possono giocare un ruolo fondamentale nell'orientare il mondo verso pratiche più sostenibili, sottolineando l'importanza di un approccio multimodale alla valutazione e all'integrazione della sostenibilità nei progetti e nei prodotti di domani.

6 | Conclusioni

In questo studio sono stati confrontati i due strumenti maggiormente utilizzati per la valutazione della sostenibilità: il protocollo ENVISION e la Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Questi strumenti offrono approcci distinti ma complementari per misurare e guidare le pratiche sostenibili.

Il protocollo ENVISION è particolarmente adatto per progetti infrastrutturali, offrendo un quadro strutturato che consente di integrare i criteri di sostenibilità nelle diverse fasi del ciclo di vita dei progetti.

D'altra parte, la LCSA si presenta come un metodo più universale, applicabile a una vasta gamma di prodotti e servizi. Questo approccio olistico, che combina valutazioni ambientali, sociali ed economiche lungo l'intero ciclo di vita,

fornisce una visione omnicomprensiva della sostenibilità. Tuttavia, richiede risorse significative e competenze specifiche, il che può rappresentare una barriera alla sua implementazione.

Il confronto tra i due approcci ha evidenziato che, sebbene il protocollo ENVISION sia più semplice da gestire, presenta ancora alcune criticità che potrebbero essere migliorate affinando i criteri proposti. Al contrario, la LCSA, nonostante la sua complessità, offre un'analisi dettagliata e integrata, utile per una valutazione globale della sostenibilità.

In conclusione, la scelta tra il protocollo ENVISION e la LCSA dipende dagli obiettivi specifici del progetto, dal contesto applicativo e dalle risorse disponibili. L'applicazione e l'integrazione di entrambi gli strumenti possono giocare un ruolo fondamentale nel promuovere pratiche sostenibili, sottolineando l'importanza di un approccio multimodale alla valutazione della sostenibilità nei progetti e nei prodotti del futuro.

Implementare una combinazione di entrambi i metodi potrebbe fornire una maggiore flessibilità e una valutazione più robusta, con maggiori garanzie di successo nel processo di selezione delle soluzioni da attuare.

Conclusions

In this study, two of the most widely used tools for sustainability assessment have been compared: the ENVISION protocol and the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). These tools offer distinct but complementary approaches to measuring and guiding sustainable practices.

The ENVISION protocol is particularly suitable for infrastructure projects, providing a structured framework that enables the integration of sustainability criteria across various stages of project lifecycles.

On the other hand, LCSA presents a more universal method, applicable to a wide range of products and services. This holistic approach, which combines environmental, social, and economic evaluations throughout the entire lifecycle, provides a comprehensive view of sustainability. However, it requires significant resources and specific expertise, which can be a barrier to its implementation.

The comparison between the two approaches revealed that, while the ENVISION protocol is easier to manage, it still has some critical aspects that could be improved by refining the proposed criteria. Conversely, despite its complexity, LCSA offers a detailed and integrated analysis, useful for a comprehensive evaluation of sustainability.

In conclusion, the choice between the ENVISION protocol and LCSA depends on the specific objectives of the project, the application context, and the available resources. The application and integration of both tools can play a fundamental role in promoting sustainable practices, highlighting the importance of a multimodal approach to sustainability assessment in future projects and products.

Implementing a combination of both methods could provide greater flexibility and a more robust evaluation, ensuring higher success rates in the selection process of the solutions to be implemented.

Bibliografia

[1] M. Garai et al. 2023, Efficacia e sostenibilità delle misure di mitigazione del Rumore da traffico stradale, PIARC ITALIA, TC 3.4.

[2] P. Bellucci, F. Ciarallo, M. Garai, L. Peruzzi, F. Praticò: 2023, On the sustainability of noise mitigation measures, Forum Acusticum 2023, Turin, Italy 11-15 September 2023. DOI: 10.61782/fa.2023.0026

[3] M. Garai, P. Bellucci, G. Magarò, M. Masullo, F. Particò, G. Zambon: 2023, Italian PIARC TC 3.4.2: effectiveness and sustainability of noise mitigation measures, XXVIIth World Road Congress, Prague, 2-6 October 2023.

[4] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) – Towards a Life Cycle Sustainability Assessment – United Nations Environment Programme – 211. Available on: www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf (last access 07/02/2024).

[5] UNI EN ISO 14040:2021. DOI: 10.31030/3179655

[6] UNI EN ISO 14044:2021. DOI: 10.31030/3179656

[7] PAVENCO – Life Cycle Assessment (LCA) delle pavimentazioni stradali- Studio e prospettive, Convegno Asphaltica (2017).

[8] QUIESST – Deliverable No.6.4 Data Collection and Information Generation for the Measurement (where possible) of the Sustainability Generic Relevant Criteria and Indicators for Existing NRDs.

[9] ENVISION: Sustainable Infrastructure Framework Guidance Manual, Institute for Sustainable Infrastructures, Washington, DC, 2018. Available on: https://sustainableinfrastructure.org/wp-content/uploads/ENVISIONV3.9.7.2018.pdf (last access 07/02/2024).

[10] 'Multi-criteria decision analysis for use in transport decision making', DTU Transport Compendium Series part 2, 2014. Available on: https://findit.dtu.dk/en/catalog/54abc0442c0cd7d02b000228 (last access 07/02/2024).

[11] M. Patel, M. Vashi, B. Bhatt: SMART – Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities, Sarvajanik College of Engineering and Technology, 2017.

[12] D. Ozturk, F. Batuk – Technique for order preference by similarity to ideal solution (topsis) for spatial decision problems, www.isprs.org/proceedings/2011/gi4dm/pdf/pp12.pdf

[13] Thomas L. Saaty, Multicriteria decision making – the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation, RWS Publishing, Pittsburgh, 1988.

[14] R. Bernard: Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationelle (RIRO) (8): 57-75 (1968). DOI: 10.1051/ro/196802V100571

[15] P.P. Kalbar, D. Das: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision Making, (205-222), (2020), DOI: 10.1016/B978-0-12-818355-7.00014-3

[16] J.L. Burati, R.M. Weed, C.S. Hughes, H.S. Hill, Optimal Acceptance Standards for Statistical Construction Specifications, 2003. Praticò F.G., LCCA for silent surfaces (2017) Pavement Life-Cycle Assessment – Proceedings of the Pavement Life-cycle Assessment Symposium, 2017, pp. 221-230, DOI: 10.1201/9781315159324-23

[17] www.QUIESST.eu

[18] R. Likert (1932) Technique for the measure of attitudes Arch. Psycho., Vol. 22 N. 140. DOI: 10.1037/t05591-000

[19] J. Salazar, Life Cycle assessment (LCA) of windows and window materials, in Pacheco-Torgal, Fernando, et al. Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labelling and Case Studies, Elsevier Science & Technology, 2013, pp. 502-527. DOI: 10.1533/9780857097729.502

[20] S. Saadatian et al. Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components.

Building and Environment 188 (2021) 107516. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107516

[21] S. Saadatian et al. Environmental and cost life-cycle approach to support selection of windows in early stages of building design. Journal of Cleaner Production 363 (2022) 132624. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132624

[22] S. Saadatian et al. Key drivers of life-cycle environmental and cost assessment of windows for different European climate zones. Journal of Building Engineering 50 (2022) 104206. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104206

[23] Q. Tushar et al. Energy simulation and modeling for window system: A comparative study of life cycle assessment and life cycle costing. Journal of Cleaner Production 330 (2022) 129936. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129936

[24] E. Fregonara, C. Coscia: Analisi Multi Criteria, approcci Life Cycle e Delphi Method: una proposta metodologica per valutare scenari di Progetto. Rivista Valori e valutazioni, n. 23 – 2019 pp. 107-117. DOI: 10.13128/valori-7834

[25] C. Carbonaro, G. Roccasalva: Valutazione multicriteriale dello spazio pubblico: un metodo per le pubbliche Amministrazioni. ISSN online: 2239-0243 | © 2020 Firenze University Press; www.fupress.com/techne; DOI: 10.13128/techne-7834

[26] G. Massei, L. Rocchi, L. Paolotti, A. Boggia: Sviluppo di moduli multicriteri per la valutazione ambientale in GRASS GIS. AESTIMUM 63, Dicembre 2013: 129-143

[27] https://bim.acca.it/bim-for-landscape/ – "Sustainability assessment through the coupling between BIM and MIVES methodologies applied in viaduct projects"; http://hdl.handle.net/2117/192869. DOI: hdl:2117/192869

[28] P. Bellucci, L. Peruzzi, Il progetto ANAS e la valutazione della sostenibilità delle barriere antirumore, 45° Convegno AIA, Aosta, 20-22 Giugno 2018.

Acoustic design of a modular studio box for use as control and mixing room for immersive audio

Andrea Cicero[1]

AC Acustica
Eupro Srl, Divisione Acustica
Viale del Fante, 8, 97100 Ragusa
a.cicero@ac-acustica.it

Ricevuto: 31/3/2024
Accettato: 4/6/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa17606
ISSNe: 2385-2615

This article presents a detailed analysis of the acoustic design process of a soundproofed box intended for control room and mixing for immersive audio. The main objectives of the project were defined based on the quality criteria required for critical listening environments, particularly for Dolby Atmos rooms. The adopted methodological approach relies on predictive evaluations of key acoustic parameters, supported by studies and calculations conducted using advanced numerical models and software. Key phases of the design process include the optimisation of the box dimensions, the modal analysis for low-frequency response, the design of the listening layout and early reflections, the specification of the internal acoustic treatment. The technical solutions adopted aim to ensure an accessible and cost-effective environment, achieved through optimization in material and space selection while still meeting requirements.
Keywords: studio acoustics, acoustic treatment, immersive audio, numerical modelling

Progettazione acustica di un box modulare adibito a sala regia e mixing per audio immersivo
L'articolo presenta una dettagliata analisi del processo di progettazione acustica di un box insonorizzato destinato alla sala regia e mixing per audio immersivo. Gli obiettivi principali del progetto sono stati definiti in base ai criteri di qualità richiesti per ambienti di ascolto critico e, in particolare, per sale Dolby Atmos. L'approccio metodologico adottato si basa su valutazioni previsionali dei parametri acustici chiave, supportate da studi e calcoli svolti tramite modelli numerici e software avanzati. Le fasi chiave del processo di progettazione includono l'ottimizzazione delle dimensioni del box, l'analisi modale per la risposta a bassa frequenza, l'ottimizzazione del layout di ascolto e delle prime riflessioni, nonché la progettazione del trattamento acustico interno. Le soluzioni tecniche adottate mirano a garantire un ambiente accessibile e a costo ridotto, attraverso l'ottimizzazione nella scelta dei materiali e degli spazi, pur rispettando i requisiti previsti.
Parole chiave: acustica degli studi, trattamento acustico, audio immersivo, modellazione numerica

1 | Introduction

In music and film industry, immersive audio is rapidly emerging as an essential element to deliver engaging and increasingly realistic sound experiences. This trend signifies a revolution in the standards of audio production and reproduction, generating new demands in terms of recording and playback technologies, including the need for acoustically controlled environments to ensure precision and fidelity of sound, especially during the mixing stage.

However, critical listening environments are often set up in small spaces where the effects of room resonances become more obvious at lower frequencies, requiring a challenging acoustic design exercise to avoid them compromising the perceived acoustic quality of the reproduced material.

The literature on the acoustics of small rooms is extensive. The earliest work was carried out on ideal room dimensions ratios and the influence of room geometry on the low-frequency response. With regards to rectangular-shaped rooms, studies have been conducted to determine the ideal ratios between height, length and width [1,2] to prevent modal overlapping and reduce the bandwidths with the absence of resonances. Bonello [3] developed a criterion for which the modal density should always be increasing when going from the one-third-octave band to the next higher one in the spectrum. Further developments were provided by Cox and D'Antonio [4,5] who have proposed numerical optimisation of dimension ratios to maximise the flatness of the room low-frequency response. The work has been extended onto non-cuboid rooms [6,7] employing advanced numerical techniques and considering the effects of boundaries' complex impedance.

Research was also conducted on the perceptual aspects of critical listening in small rooms. Studies based on listen-

[1] Vincitore del premio "Giovani professionisti" edizione 2024.

ing tests [8–10] have demonstrated the strong correlation between the perceived improvement in acoustic quality with the reduction of energy decay times at low frequencies. With regards to music stimuli, Fazenda et al. [11] defined the perceptual thresholds for the detection of the room resonances, while Rizzi et al. [12] have refined the characterisation of the transient behaviour of the response at low frequencies and analysed the perceived effects.

In terms of acoustic analysis for small rooms, Rizzi et al. [13] provide a comprehensive work, where a thorough review of the design criteria and the methodology for identification of acoustic defects based on on-field experience is conducted.

In this context, this article aims to examine the stages of the acoustic design of a soundproof cabin designed for use as control room and mixing for immersive audio according to Dolby Atmos criteria, with the intent to propose a structured design workflow to deal with the various aspects of acoustics for the specific type of listening environment, while introducing advanced modelling techniques for low-frequency treatment. The findings of the design exercise are then validated with post-completion measurements, showing good agreement with the defined criteria.

2 | Project overview

The project was commissioned by Clockbeats Srl in Brescia, Italy, a leading Italian company for music production and promotion.

Clockbeats studio facilities include several control rooms and tracking rooms, all built as “soundproof box”, consisting in a modular structure made of a wooden panels build-up, to favour flexibility and rapidity in the assembly and disassembly process, integration in existing structures and reduced costs if compared to traditional recording studios, known for their architectural and structural complexity, while maintaining ample space available and high levels of performance.

With regards to the specific project, the aim is to build a new multichannel control room to be acknowledged in the official *Dolby Atmos Music Studio Public Listing* [14], which includes all the studios that have passed a rigorous commissioning test consisting in the verification of several requirements in terms of hardware, speaker layout and acoustics. Hence, the need for specialist acoustic design.

3 | Design criteria

The reference document titled *Dolby Atmos Home Entertainment Studio Technical Guidelines* [15] summarises the relevant design criteria in terms of studio acoustics. Additionally, recommendations from *AESTD1001.1.01-10* [16] as well as other quality metrics were considered in the design process to further improve the room performance. Tab. 1 shows a summary of all the design aspects that were taken into account.

Tab. 1 – Relevant design criteria summary
Prospetto criteri di progettazione scelti

Item	*Description*	*Ref.*
Room Dimensions	• To be chosen to ensure a reasonably uniform distribution of room modes across the LF region	[3,16]
Speaker Layout	• 7.1.4 equidistant layout • Minimum layout height 2.4 m • Minimum layout width 3.0 m • Minimum layout length 3.5 m	[15]
Early Reflections	• Attenuated in the range 1-8 kHz by at least 10 dB relative to the direct sound within the first 15 ms	[16]
Reverberation Time	• Optimum RT at 500 Hz: 0.2 s • Octave-band RT values within provided limits (see Fig. 1)	[15,16]
Operational Room Response Curve	• AESTD1001.1.01-10 tolerance limits (see Fig. 2) • Dolby Atmos Music Curve (see Fig. 3)	[16,17]
LF Modal Decay Times	• < 0.90 s at 32 Hz • < 0.51 s at 63 Hz • < 0.30 s at 125 Hz	[11]

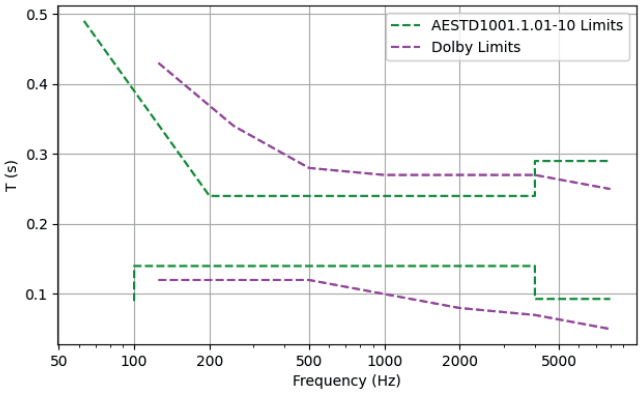


Fig. 1 – Reverberation Time tolerance limits
Limiti di tolleranza per il Tempo di Riverberazione

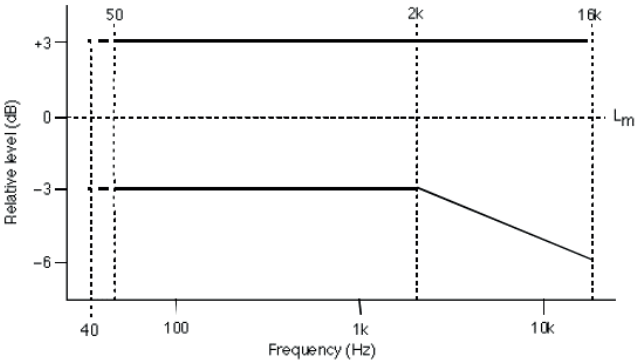


Fig. 2 – Operational Room Response tolerance limits according to AESTD1001.1.01-10 [16]
Limiti di tolleranza per Risposta in Frequenza secondo AESTD1001.1.01-10 [16]

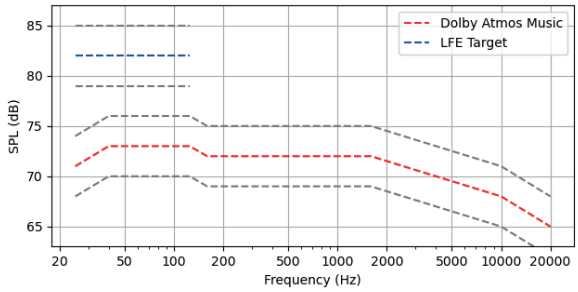


Fig. 3 – Dolby Atmos Music curve [17]
Curva per Dolby Atmos Music [17]

It is noted that sound insulation of the box and noise criteria from the air-conditioning system was beyond the author's scope, hence these aspects are not analysed in the present paper.

4 | Design process

4.1 | Box dimensions

The advantage of a "box" structure is its flexibility in being sized and shaped according to in-situ geometrical constraints, however the implications on the acoustics need to be considered, as the modal behaviour at low frequencies is affected.

Based on the available space on site and the requirements for speaker layout size (see Tab. 1), a trial-and-error process led to the dimensions shown in Tab. 2. It is noted that the proposed height is less than the required minimum in [16], however the chosen dimensions still allow for the minimum speaker layout extents required by Dolby Laboratories (see Tab. 2).

The calculated modal distribution is shown in Fig. 4 together with the number of modes per one-third octave band, demonstrating that the Bonello Criterion is satisfied.

Tab. 2 – Box dimensions
Dimensione del box

Dimension	*Size*	*Ratio to Height*
Length	4.50 m	1.61
Width	3.70 m	1.32
Height	2.80 m	1.00
Volume	46.6 m³	

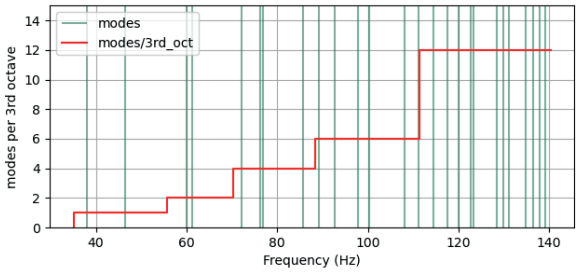


Fig. 4 – Predicted modal distribution, with modal density monotonically increasing over frequency
Distribuzione modale calcolata, con densità modale crescente monotona in frequenza

Fig. 5, instead, shows where the chosen dimensions, represented by a yellow cross, sit in the diagram from [4], together with the Bolt Areas (purple curves): for a 50.0 m³ room (the box is 46.6 m³), the light green patches represent the best and the dark green ones the second-best combinations for room ratios.

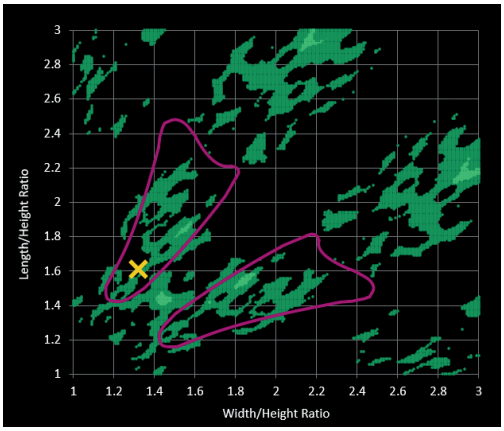


Fig. 5 – Room Dimension Ratio Analysis – screenshot from [18]
Analisi rapporto fra dimensioni della stanza – schermata da [18]

4.2 | Speaker layout

The next step is about placing the listening position along the longitudinal axis of the room and designing the loudspeaker layout, paying attention to constraints in terms of minimum layout dimensions, maximum distance from loudspeakers, maximum and minimum azimuth and elevation angles of loudspeakers, headroom above target SPL [15].

Dolby Laboratories have developed the *Dolby Atmos Room Design Tool Home Entertainment + Music* (from now on referred to as *DARDT*) [18], a Microsoft Excel Macro Tool that helps designing the speaker layout in a parametric way based on working space dimensions, mix position and speaker number and model. The tool automatically generates all the distances from walls to the front baffle of the speakers, providing rapid feedback on potential non-compliances with respect to requirements.

The preferred type of Dolby Atmos layout for mixing music is the "equidistant" one [15], where the distance to each speaker is approximately equal. Loudspeakers are arranged in the most common 7.1.4 configuration (7 speakers in the standard plane, 1 subwoofer, 4 top surround speakers) and the selected models are reported in Tab. 3.

Tab. 3 – List of loudspeakers
Lista altoparlanti

Speaker Position	*Speaker Model*
Screen Speaker (C/L/R)	Genelec 8340A
Side Surround (Ls/Rs)	Genelec 8330A
Rear Surround (Lrs/Rrs)	Genelec 8350A
Top Front (Ltf/Rtf)	Genelec 8330A
Top Rear (Lrf/Rrf)	Genelec 8330A
Subwoofer (LFE)	Genelec 7380A

The main challenge lies in the choice of the optimal mix position, which should be affected the least by the peaks and the dips cause by the modal behaviour of the room at low frequency. The position of speakers is also crucial to avoid pronounced cancellations at specific frequencies caused by Speaker-Boundary Interference (SBIR).

To allow for larger space available inside the box, it was decided to bracket the loudspeakers to the walls and the ceiling of the shell. This, however, sets constraints in terms of distance of speakers from the room boundary, hence some modifications were necessary compared to the standard dimensions and angles proposed by Dolby Laboratories.

The layout shown in Fig. 6 was deemed the best configuration in terms of speaker response.

The mix position was set at 1.78 m from the front wall, corresponding to 0.4 of the box length, to sit in a balanced spot between the peaks and the nulls of the first three axial modes, shown in Fig. 7.

The largest drifts from standard azimuthal were introduced for the following speaker positions:

- **L/R:** 25° from room centre line (recommended 30°, min. 20°, max. 40°), mainly due to minimise a cancellation happening around 90 and 110 Hz, due to the 92 Hz and 100 Hz mode having nulls along the width of the box (see Fig. 8).
- **Lrs/Rrs:** 158° from room centre line (recommended 135°, min. 120°, max 160°), to accommodate low-frequency treatment at the rear corners of the box.

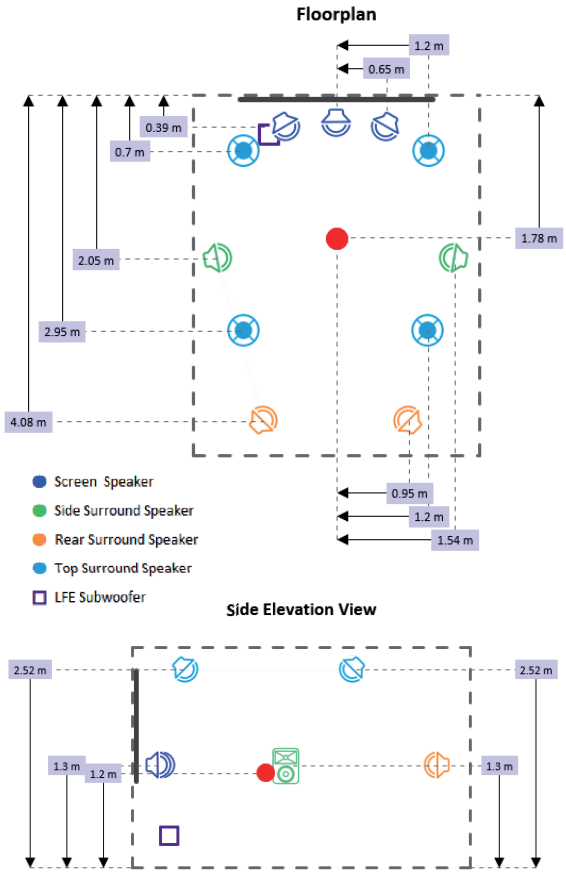


Fig. 6 – Speaker layout – screenshot from [18]
Layout altoparlanti – schermata da [18]

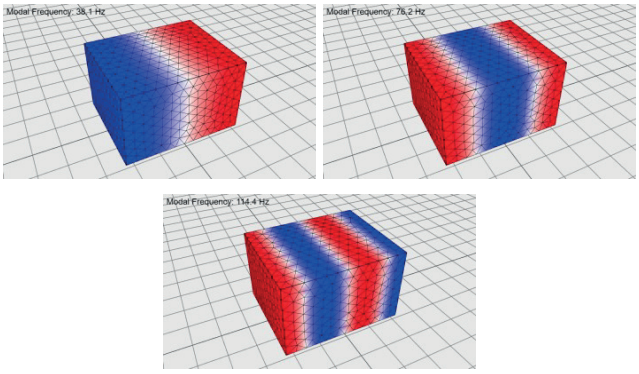


Fig. 7 – First three axial modes along the box length – 38 Hz, 75 Hz and 114 Hz
Primi tre modi assiali lungo la lunghezza del box length – 38 Hz, 75 Hz e 114 Hz

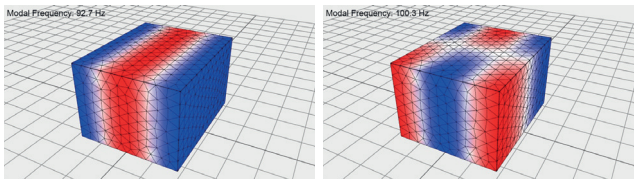


Fig. 8 – 92 Hz and 100 Hz modes
Modi a 92 Hz e 100 Hz

4.3 | Early reflections analysis

Once the layout was approved, the analysis on Early Reflections was conducted in order to locate first-order sound reflections points from all loudspeakers and place acoustic absorption properly. The Image Source Model is employed to estimate the reflections in a geometrical way, using the dedicated module included in CATT-Acoustic v9.1 software [19].

Fig. 9 shows all strong early reflections (more than –15 dB relative to direct sound) in the first 20 ms of the impulse response.

First-reflection points on walls and ceiling can be easily treated with porous absorption to mitigate the strength of reflected sound, preventing alterations in sound source localisation and distortion in the frequency content. One reflection point is also found on the entrance door, for which an absorptive finish was prescribed as well.

The analysis, however, shows reflected paths from the desk and the floor. While the first depend on the final desk shape (outside the author's scope), the latter can represent an issue for sound coming from the Rear Surround and Top Rear speakers. Typically, the use of a thick rug is recommended to attenuate such strong reflections, however the choice depends on the end user's needs, which may go beyond the acoustic aspects.

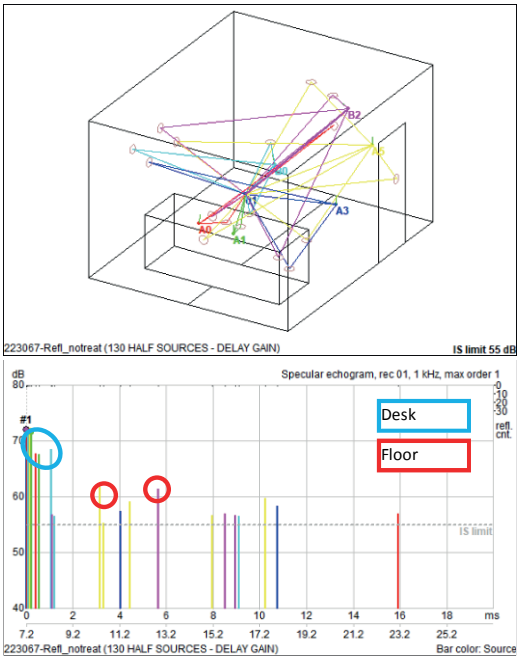


Fig. 9 – Early Reflection analysis (top: direct + reflected paths, bottom: specular echogram for first 20 ms). Different colours correspond to different sources

Analisi Prime Riflessioni (sopra: percorsi diretti + riflessi, sotto: ecogramma speculare per primi 20 ms). Colori diversi corrispondono a sorgenti diverse

actions of people within the room. This is achieved maintaining an open area to absorption greater than 50%.

The thickness of absorption ranges as follows: 35 cm to 47 cm for the front wall; 10 cm to 20 cm for the side walls; 35 cm to 60 cm for the back wall; 16 cm to 30 cm for the ceiling. Assuming a flow resistivity value of 10'000 rayls/m and using Miki model [21], the diffuse incidence absorption coefficients were calculated for the various thicknesses, as shown in Fig. 10. It is noted that the presented curves are valid for treatment with constant thickness, while the proposed treatment features elements with variable thickness.

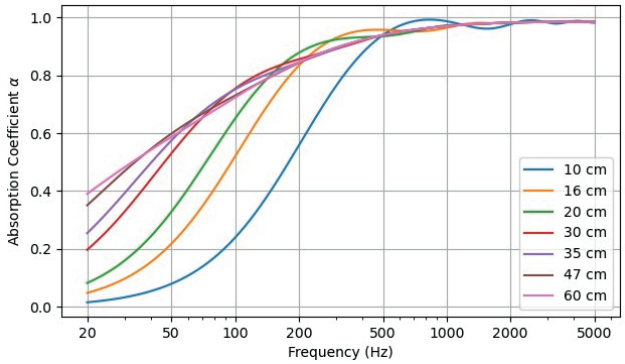


Fig. 10 – Predicted diffuse incidence absorption coefficients for porous treatment

Stima dei coefficienti di assorbimento a incidenza diffusa per il trattamento poroso

4.4 | Acoustic treatment design

The approach to acoustic treatment design was primarily focused on utilising porous absorbers, known for their ability to achieve broad-spectrum absorption across a wide range of frequencies. While it is acknowledged that porous materials exhibit weaker absorption at lower frequencies, they can effectively absorb sound energy throughout the useful spectrum if adequate thickness is considered. This obviates the need for additional solutions like resonators or membranes, which would require more space and tuning efforts. Additionally, porous absorbers offer a more linear absorption profile compared to pressure-based absorbers, making them a practical choice for acoustic treatment projects where efficiency and budget considerations are paramount.

While a *non-environment* room type [20] would be best for immersive audio due to the exceptional level of reduced colouration and consistency in the treatment effectiveness, the reduced area of the box requires the front wall to be made absorbent to increase damping at lower frequencies.

Thus, the design involves all walls and the ceiling to be as absorptive as possible: this is achieved using 40 kg/m^3 rock wool at different thicknesses covered in stretch fabric.

However, the drawback of this type of treatment lies in making the room feel uncomfortably "dead". This issue can be overcome by adding wooden finishes to the corner treatment in a way that it does not affect absorption, except for the high frequencies, in order to provide life to the speech and

While it is obvious that Reverberation Time values at high frequencies are well controlled, a more in-depth study was conducted at lower frequencies to assess whether the proposed treatment is sufficient to mitigate the effects of modal resonances.

A Finite Element Method (FEM) model, developed by the author using Python and the open-source library FEniCSx [22], was set to perform a Frequency Domain study and compute the Operational Room Response curve for both "untreated" and "treated" scenarios. The curves are calculated at the mix position using a monopole source at the chosen subwoofer location.

The geometries were constructed in STEP format and then imported into GMSH [23] to generate the 3D mesh for the model.

The "untreated" case was modelled as a whole cuboid volume with light constant normalised admittance at the boundary, calculated using the simplified formulation provided in [24, p. 351] and assuming an absorption value of 5%, making it as a purely resistive boundary. It is known that this represents an oversimplification on vibrational behaviour of the wooden shell at low frequencies, with a strong reactive component, however, the FEM simulation of the vibroacoustic system would require an important computational effort affected by strong uncertainty on the material properties and mounting constraints, with little or no advantage on the final accuracy of the results.

The "treated" case, instead, required the construction of two solid volumes, corresponding to air and porous absorber respectively, in order to assign different sound propagation properties. The damping provided by the outer wooden shell is still included in the same fashion as the "untreated" scenario. For the proposed treatment, the complex wavenumber for the porous volume to be input in the FEM model was calculated using Miki [21]. Geometries for both models are shown in Fig. 11.

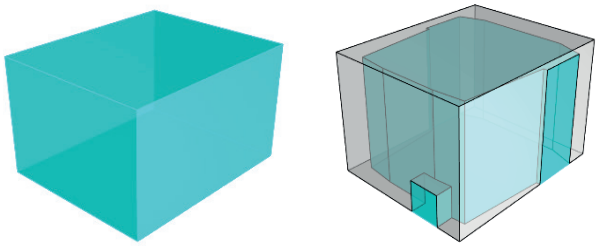


Fig. 11 – 3D geometries for untreated (left) and treated (right) case. Cyan indicates air volume, grey indicates porous volume

Geometrie 3D per i casi non trattato (sinistra) e trattato (destra). Il ciano indica il volume d'aria, il grigio il volume poroso

Simulation results are plotted in Fig. 12, shown both as narrow-band Magnitude Frequency Response (Fig. 12a) and 1/3 octave-band response (Fig. 12b) applied to pink noise, the latter being typically used for verification of compliance with design criteria.

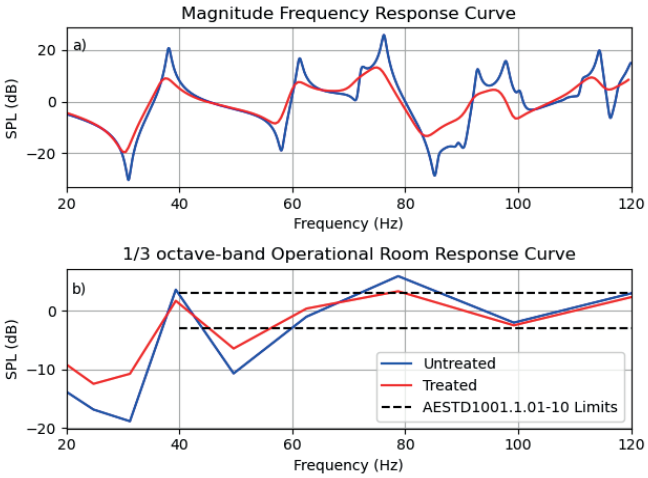


Fig. 12 – Simulation results: a) Magnitude Frequency Response Curve b) 1/3 octave-band Operational Room Response Curve, corrected for Pink Noise

Risultati delle simulazioni: a) Modulo della Funzione di Trasferimento della Curve di risposta in frequenza b) Curva di risposta in 1/3 di bande d'ottava, corretta per rumore rosa

It is noted that, despite the introduction of acoustic treatment significantly improves the flatness of the modal response, some of the peaks and dips caused by the room resonances are still located outside the tolerance limits previously defined. This was expected due to the limited space available for porous treatment to be effective at lower frequencies, requiring the use of equalisation filters on the loudspeakers in a more intensive way than typical fine tuning to adjust the response during the final calibration stage.

Another aspect to consider is the time domain response. Studies based on listening tests [8–11] have demonstrated the strong correlation between the perceived improvement in acoustic quality with the reduction of energy decay times at low frequencies in small rooms, subjectively preferred to the direct "flattening" of the magnitude frequency response.

In order to extract modal decay times (MT_{60}) from the predicted frequency response curves, the indirect method described by Prato et al. [25] was employed, consisting in fitting a Lorentzian function to each detected modal peak and calculating the bandwidth at half maximum. MT_{60} values can then be expressed as follows [26]:

$$MT_{60} = 2.2/\Delta f\,. \tag{1}$$

These values are then compared to the perceptual thresholds of resonances for music from [11], as shown in Fig. 13. The difference in terms of MT_{60} reduction is significant, demonstrating that adequate control of the modal energy and compliance with the defined criterion can be obtained with porous treatment on an extended low-frequency range.

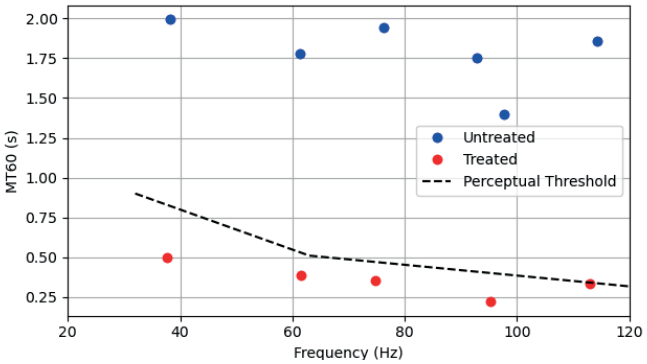


Fig. 13 – Modal Decay Times analysis.

Analisi dei tempi di decadimento modale

5 | Construction and commissioning

The construction phase took place in February 2024, requiring two weeks of work for the complete assembly of the box from scratch.

The wood finishes on all room corners were customised with CNC-milled panels to suit the intended aesthetic of the room, while maintaining the 50% open area to absorption. A custom design desk with the outboard was also fit in the room (see Fig. 15).

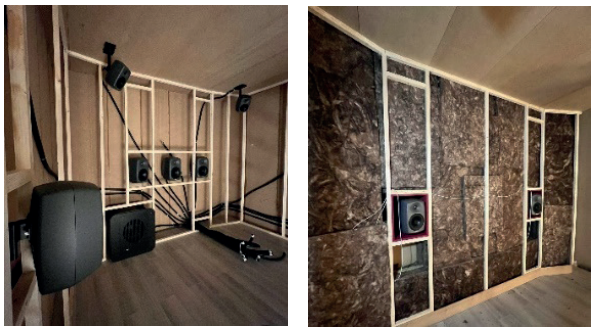


Fig. 14 – Timber structure for acoustic treatment support (left: front wall, right: rear wall)

Struttura in legno per il supporto del trattamento acustico (sinistra: parete frontale, destra: parete posteriore)

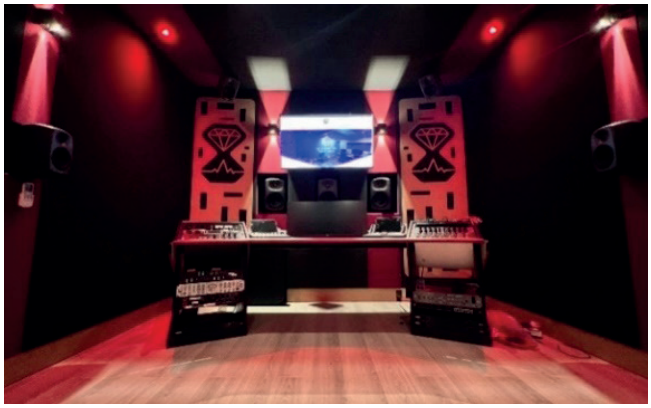


Fig. 15 – End of works – front wall view

Fine lavori – vista parete frontale

Acoustic measurement from the commissioning session were made available for analysis of the results post-completion. It is noted that measurements were performed after the calibration EQ was applied on each loudspeaker channel.

With regards to Operational Room Response, the curves obtained for each channel, as shown in Fig. 16, fall well within the ±3 dB tolerance from the Dolby Atmos Music Curve though, as expected, the requirement of electronic correction with negative gain on modal peaks was confirmed by the commissioning staff.

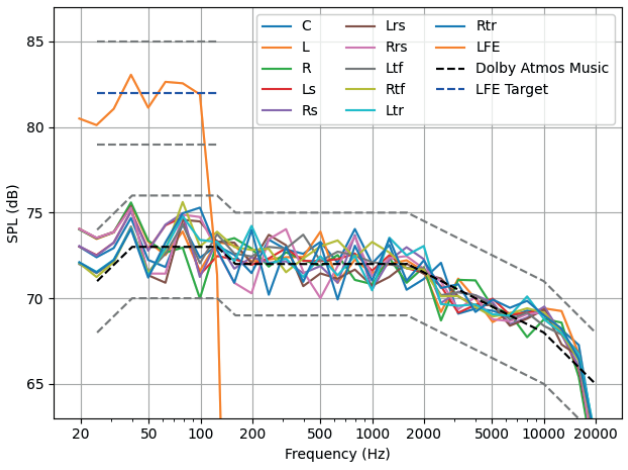


Fig. 16 – Measured frequency response curves – commissioning, 1/3 octave – Active EQ on channels.

Curve di risposta in frequenza misurate in fase di collaudo, 1/3 octave – EQ attiva sui canali

For the validation of modal decay times MT_{60}, Room Eq Wizard (REW) software [27] was used. The software, by means of the "RT60 Decay" function, allows to assess decay times based on fitting a "decay + noise" model on the on the Short-time Fourier Transform (STFT) of the measured impulse response for the identified modal frequencies. Such procedure, similar to the direct method described in [25], was preferred since the frequency response curves did not present identifiable peaks because of the active EQ correction, making the use of an indirect method not possible. Decays were calculated on the 1/12 octave-band smoothed response measured with the subwoofer only, with 12 points per octave resolution. Then, the decay value corresponding to the closest frequencies to the simulated ones were retrieved.

The obtained MT_{60} values are then compared to the previously defined perceptual threshold limits and the predicted values from FEM (see Tab. 4).

Tab. 4 – Evaluation of measured MT_{60} – Retrieved from LFE response. Values highlighted in green comply with design criteria, yellow ones do not

Valutazione dei MT_{60} misurati – Ricavati dalla risposta LFE. I valori evidenziati in verde verificano i criteri di progetto, in giallo non verificano

Simulated Frequency (Hz)	Simulated MT_{60} (s)	Measured Frequency (Hz)	Measured MT_{60} (s)
37.7	0.50	39.4	0.42
61.5	0.38	62.5	0.28
74.7	0.35	74.3	0.25
95.2	0.22	93.6	0.16
112.9	0.33	111.4	0.40

Results show that measured values are close to the design ones and, most importantly, below the perceptual threshold. The measured MT_{60} obtained for 111.4 Hz shows a non-compliance with respect to criteria, to be attributed to the subwoofer being low pass filtered at 90 Hz. This causes a low signal-to-noise ratio at the specific frequency, hence an artifact (overestimation) of the decay rate.

With regards to Reverberation Time, the average curve measured at and around the mix position is shown in Fig. 17, demonstrating a good achievement in terms of decay control. In the range between 250 Hz and 1000 Hz, the curve falls below the recommended Dolby limits (green lines), to be attributed to the oversizing of porous treatment for low-frequency control, while above 2000 Hz the effect of diffusive surfaces at the corners and furniture, and the increased directivity of loudspeakers become more prominent. This, however, it is not of concern in acoustic terms, as it pertains more to the comfort of the individuals working within the space.

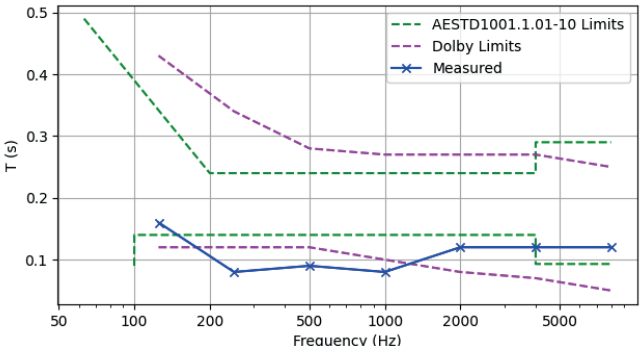


Fig. 17 – Average Reverberation Time curve at mix position
Curva Tempo di Riverberazione medio alla posizione di ascolto

Finally, it is worth noting that the studio has obtained the official *listing* in [14] in May 2024 with no reservations from Dolby Laboratories.

6 | Conclusions

In conclusion, this project aimed to design an acoustically optimized box for immersive audio control room and mixing purposes. The different stages involved in the design workflow have been described, showing the required tasks to ensure that project would successfully achieve its objectives by adhering to stringent design criteria. Advanced techniques for modelling and analysis were employed to minimise uncertainties on the effectiveness of the proposed treatment. Finally, commissioning results demonstrated compliance with designated standards, ensuring optimal sound quality. Moving forward, the intent of this work is to propose a standardized and structured procedure for the design of similar listening environments, facilitating the creation of immersive audio spaces that meet industry quality standards.

Conclusioni

In conclusione, lo scopo del progetto era quello di progettare un box ottimizzato acusticamente per sala regia e mixing per applicazioni in audio immersivo. Le diverse fasi del lavoro di progettazione sono state descritte, mostrando quanto si è reso necessario per garantire che il progetto raggiunga gli obiettivi posti aderendo a requisiti molto rigorosi. Tecniche avanzate di modellazione ed analisi sono state impiegate al fine di minimizzare l'incertezza sull'efficacia del trattamento proposto. Infine, i risultati del commissioning hanno dimostrato la conformità ai criteri di progettazione designati, garantendo una qualità sonora ottimale. L'intento di questo lavoro, dunque, è quello di proporre una procedura standardizzata e strutturata per la progettazione di questa tipologia di ambienti, facilitando la creazione di spazi audio immersivi che soddisfino gli standard di qualità del settore.

7 | Acknowledgements

The author would like to thank Rock Star Design Srls and Clockbeats Srl for the involvement in this challenging project, Fausto Demetrio for the constant support during the design and for sharing data from on-site measurements. The author also thanks the anonymous reviewers for their helpful observations and suggestions.

References

[1] R.H. Bolt, Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms, Journal of the Acoustical Society of America 18 (1946) 130-133. https://doi.org/10.1121/1.1916349.

[2] M.M. Louden, Dimension-ratios of rectangular rooms with good distribution of eigentones, Acustica 24 (1971) 101–104.

[3] O.J. Bonello, New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes, Journal of Audio Engineering Society 29 (1981) 597-606. www..aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3889.

[4] T.J. Cox, P. D'Antonio, Room optimizer: A computer program to optimize the placement of listener, loudspeakers, acoustical surface treatment and room dimensions in critical listening rooms, 103rd Convention of the Audio Engineering Society (1997).

[5] T.J. Cox, P. D'Antonio, M.R. Avis, Room sizing and optimization at low frequencies, Journal of Audio Engineering Society 52 (2004) 640-651. www..aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13011.

[6] P. D'Antonio, R. Petrolli, J. Storyk, Non-cuboid iterative room optimizer, J Acoust Soc Am 148 (2020) 2798–2798. https://doi.org/10.1121/1.5147791.

[7] M. Cardoso Soares, E. Brandão Carneiro, R. Aizik Tenenbaum, P.H. Mareze, Low-frequency room acoustical simulation of a small room with BEM and complex-valued surface impedances, Applied Acoustics 188 (2022) 108570. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108570.

[8] B.M. Fazenda, L.A. Elmer, M. Wankling, J.A. Hargreaves, J.M. Hirst, Subjective preference of modal control in listening rooms, 129th Audio Engineering Society Convention 2010 1 (2010) 496-507.

[9] S.E. Olive, P.L. Schuck, J.G. Ryan, S.L. Sally, M.E. Bonneville, The detection thresholds of resonances at low frequencies, Journal of the Audio Engineering Society 45 (1997) 116-128.

[10] M.R. Avis, B.M. Fazenda, W.J. Davies, Thresholds of detection for changes to the Q factor of low-frequency modes in listening environments, Journal of Audio Engineering Society 55 (2007) 611-622.

[11] B.M. Fazenda, M. Stephenson, A. Goldberg, Perceptual thresholds for the effects of room modes as a function of modal decay, J Acoust Soc Am 137 (2015) 1088-1098. https://doi.org/10.1121/1.4908217.

[12] L. Rizzi, F. Ascari, G. Ghelfi, M. Ferroni, Perception of Low Frequency Transient Acoustic Phenomena in Small Rooms for Music, in: Audio Engineering Society Convention 140, 2016. www..aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18211.

[13] L. Rizzi, G. Ghelfi, M. Santini, Small-Rooms Dedicated to Music: From Room Response Analysis to Acoustic Design, in: Audio Engineering Society Convention 140, 2016, Paris, 2016.

[14] Dolby Laboratories, Dolby Atmos Music Studios, (n.d.). https://professional.dolby.com/music/dolby-atmos-music-studios (accessed March 27, 2024).

[15] Dolby Laboratories, Dolby Atmos Home Entertainment Studio Technical Guidelines, (2021). https://professionalsupport.dolby.com/s/article/Dolby-Atmos-Home-Entertainment-Studio-Technical-Guidelines?language=en_US.

[16] Audio Engineering Society, Multichannel surround sound systems and operations, 2001. www..aes.org/technical/documents/AESTD1001.pdf (accessed April 27, 2024).

[17] Dolby Laboratories, Dolby Atmos Music Room Configuration, (2021). https://professionalsupport.dolby.com/s/article/Dolby-Atmos-Music-Studio-Best-Practices?language=en_US (accessed March 21, 2024).

[18] Dolby Laboratories, Dolby Atmos Room Design Tool Home Entertainment + Music (DARDT HE+Music), (2023).

[19] B.-I. Dalenbäck, CATT-Acoustic, (2022).

[20] P. Richard. Newell, Recording studio design, 3rd ed., Focal, 2012.

[21] Y. Miki, Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models., Journal of the Acoustical Society of Japan (E) 11 (1990) 19-24. https://doi.org/10.1250/ast.11.19.

[22] C.N.R.M.W. Scroggs J.S. Dokken, G.N. Wells, Construction of arbitrary order finite element degree-of-freedom maps on polygonal and polyhedral cell meshes, 2022.

[23] C. Geuzaine, J.-F. Remacle, Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, Int J Numer Methods Eng 79 (2009) 1309-1331. https://doi.org/10.1002/nme.2579.

[24] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sanders, Fundamentals of acoustics, 4th ed., Wiley, New York, 2000.

[25] A. Prato, F. Casassa, P. Di Torino, A. Schiavi, A modal approach for reverberation time measurements in non-diffuse sound field, in: Proceedings of the 23rd International Congress on Sound & Vibration, Athens, 2016.

[26] M. Kleiner, J. Tichy, Acoustics of small rooms, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2014.

[27] J. Mulcahy, Room Eq Wizard, (2024). www..roomeqwizard.com/index.html (accessed March 23, 2024).

Indagine sperimentale sul rumore intrinseco della strumentazione nelle misurazioni fonometriche e la misurazione a livelli sonori molto bassi

Andrea Cerniglia[a]* | Giovanni Brambilla[b]

[a] ACCON Italia Srl,
Via Trento, 11A, 27010 San Genesio ed Uniti
[b] CNR-STEM,
Via Canal Bianco, 28, 44124 Ferrara
* Autore di riferimento:
andrea.cerniglia@accon.it

Ricevuto: 23/7/2024
Accettato: 3/10/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18214
ISSNe: 2385-2615

Vengono descritti i risultati di una indagine sperimentale volta a determinare il rumore auto-generato dalla strumentazione utilizzata nelle misurazioni fonometriche che, nei rilevamenti a bassi livelli sonori, è spesso comparabile con quello da rilevare inficiando, così, il dato acquisito.
In particolare sono stati eseguiti tre set di misurazioni, il primo riguardante 10 diversi tipi di microfoni a condensatore e gli altri due svolti all'interno di una camera anecoica. Questi due set hanno riguardato sei fonometri di marche e modelli diversi e l'applicazione della tecnica metrologica "Coherent Output Power, COP" che consente di rilevare livelli sonori molto bassi, ben al di sotto di quelli normalmente rilevabili con i fonometri tradizionali.
Parole chiave: rumore elettrico, microfoni, fonometri, Coherent Output Power

Experimental survey on the instrumental noise in acoustic measurements and those at very low sound levels
The paper describes the results of an experimental survey aimed at determining the self-generated noise from the instrumentation used for acoustic measurements which, in case of measurements at low sound levels, is often comparable with the one to be detected and, therefore, invalidating the acquired data. Ten different condenser microphones and six sound level meters were tested, the latter in an anechoic chamber. In this chamber the "Coherent Output Power, COP" technique was also applied, as it allows to measure very low noise levels, well below those usually measured by sound level meters.
Keywords: electric noise, microphones, sound level meters, Coherent Output Power

1 | Introduzione

Le attuali prestazioni offerte dalla strumentazione impiegata nelle misurazioni acustiche inducono a ritenere che essa sia idonea in tutte le circostanze, previa qualche preliminare impostazione. Purtroppo la realtà è spesso più complessa e richiede cautela nell'eseguire misurazioni che siano effettivamente rappresentative del fenomeno in osservazione. Un esempio emblematico al riguardo è rappresentato da un livello sonoro da rilevare comparabile con il rumore auto-generato dalla strumentazione impiegata. In tale circostanza, il valore misurato è alterato dal rumore intrinseco della strumentazione e, pertanto, non è rappresentativo dell'effettivo fenomeno da misurare. La soluzione più immediata, ma non sempre risolutiva e a costo più elevato, è l'impiego di sistemi microfono/preamplificatore a basso rumore intrinseco.

Ne consegue la necessità di conoscere l'entità del rumore intrinseco della strumentazione impiegata, non solo come valore globale in dB e dB(A) ma anche, e soprattutto, in funzione delle bande di frequenza, al fine di valutare l'attendibilità della misurazione.

Il rumore auto-generato della strumentazione, detto anche noise floor (nf), è dovuto alle caratteristiche intrinseche dei vari componenti della catena di misura quali microfono, preamplificatore e altri elementi circuitali [1,2]. I dati sul rumore intrinseco della strumentazione sono, solitamente, forniti dai produttori e a questa documentazione tecnica è preferibile fare riferimento. Laddove non disponibile, o in presenza di sistemi strumentali con componenti tra loro compatibili ma di produttori differenti, si pone la necessità di determinare il noise floor del sistema che si intende utilizzare. In letteratura sono reperibili vari riferimenti su metodologie atte a tale scopo [3-5].

In linea generale, è opportuno che in ciascuna banda di frequenza f il livello sonoro misurato L_f sia di almeno 10 dB superiore a quello auto-generato dalla strumentazione L_{fn}, ossia:

$$L_f \geq L_{fn} + 10\ dB \quad [\text{dB}] \tag{1}$$

affinché il livello L_f possa ritenersi verosimilmente rappresentativo del fenomeno in esame, essendo non inficiato dal rumore auto-generato dalla strumentazione L_{fn}. Diversamente occorre apportare una correzione al livello L_f, calcolabile con la relazione:

$$L_{fc} = 10lg\left[10^{(L_f/10)} - 10^{(L_{fn}/10)}\right] \quad [\text{dB}] \tag{2}$$

che fornisce valori attendibili per differenze $L_f - L_{fn} \geq 3$ dB. Per differenze inferiori a 3 dB il valore di L_f non è attendibile.

Nell'ambito dell'argomento metrologico sopra esposto, che presenta rilevanti ripercussioni sulla qualità delle misure, si inserisce questo lavoro che descrive un'indagine sperimentale con il seguente duplice obiettivo:

1. determinare il rumore auto-generato da alcune strumentazioni utilizzate nelle misure acustiche;
2. applicare tecniche metrologiche alternative per la misura di livelli sonori molto bassi, inferiori al rumore strumentale.

A tale scopo l'indagine è stata articolata in tre fasi successive comprendenti:

a) dieci differenti sistemi microfono a condensatore/preamplificatore;
b) sei differenti fonometri;
c) applicazione della "Coherent Output Power COP".

Le due fasi b) e c) sono state condotte in una camera anecoica. I risultati ottenuti, pur se su una dimensione campionaria necessariamente ridotta, possono orientare nella verifica di conformità al requisito esplicitato nella Eq. (1) in assenza di riferimenti più specifici.

2 | Il rumore elettrico

Nel dizionario IEEE [6] il rumore (noise) è definito: "disturbo indesiderato sovrapposto a un segnale di interesse, che tende a oscurarne il contenuto informativo". Nella quasi totalità dei casi di interesse pratico il rumore si combina linearmente con il segnale di interesse (rumore additivo), e quindi vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

Fra i segnali indesiderati che possono sovrapporsi ai segnali di interesse rientrano le fluttuazioni spontanee, fra cui il rumore termico, dovute a proprietà fondamentali della materia, i disturbi provenienti dall'ambiente esterno e anche i rumori di processo, come il rumore di quantizzazione o le distorsioni, che derivano dall'elaborazione dei segnali di interesse [7].

2.1 | Il rumore termico

Il rumore termico (thermal noise) è dovuto al fenomeno dell'agitazione termica e costituisce la sorgente di rumore più comune, in quanto si manifesta in qualsiasi sistema fisico che si trovi a temperatura diversa dallo zero assoluto. Tale rumore è di origine interna e, quindi, ineliminabile. Esso si manifesta come segnale casuale, il cui andamento nel tempo non è descrivibile analiticamente ma soltanto in termini statistici e il cui spettro non è costituito da righe ma di tipo continuo, cioè si estende su regioni di frequenza più o meno ampie. La distribuzione di ampiezza del rumore termico segue la legge di Gauss con valore medio nullo e deviazione standard coincidente con il valore efficace (root mean square, rms).

In particolare il rumore termico elettrico, chiamato anche rumore Johnson [8,9], rappresenta la manifestazione a livello macroscopico del moto casuale dei portatori di carica in un conduttore elettrico. In un resistore a circuito aperto, il quadrato del valore efficace V^2_{neff} della tensione di rumore $v_n(t)$, essendo nullo il valore medio, risulta pari a:

$$V^2_{neff} = 4kTRB_n \ [V] \tag{3}$$

dove $k = 1.38\times10^{-23}$ [J/K] è la costante di Boltzmann, T [K] la temperatura assoluta a cui si trova il resistore con resistenza R [Ω] e B_n la banda di frequenza di osservazione che riveste un ruolo assai importante in quanto le distribuzioni spettrali del segnale di interesse e del rumore sono generalmente assai diverse.

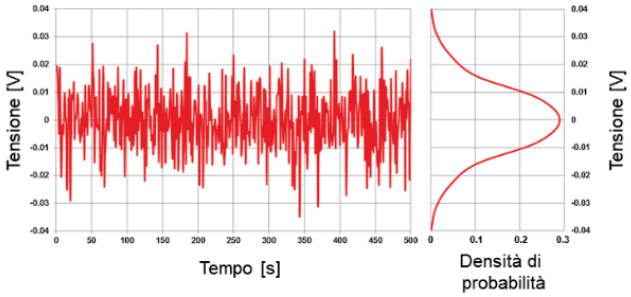


Fig. 1 – Esempio di andamento nel tempo e densità di probabilità di rumore gaussiano con valore medio nullo e varianza unitaria
Example of temporal pattern and probability density function of Gaussian noise with null average value and unitary variance

Nelle misure acustiche vengono utilizzati i filtri passa-banda ad ampiezza relativa percentuale costante, in particolare di 1/1 o 1/3 di ottava, con larghezza di banda assoluta proporzionale alla frequenza centrale f_c della banda stessa. Ne consegue che i filtri a frequenza più elevata hanno una larghezza di banda più ampia (≈ $0.70f_c$ e $0.23f_c$ per 1/1 e 1/3 di ottava rispettivamente) e, quindi, intercettano una maggiore quantità di rumore.

2.2 | Altri tipi di rumore

Tra i vari tipi di rumore il cosiddetto rumore 1/f si osserva in una ampia pluralità di ambiti senza che, tuttavia, ne sia stata formulata una interpretazione fisica comune [10]. Questo rumore, chiamato anche rumore flicker (tremolio) oppure rumore di eccesso (excess noise), deve il suo nome al fatto che si manifesta con uno spettro di potenza che segue, su un'estesa gamma di frequenze, una legge del tipo:

$$S_n(f) \propto \frac{1}{f^\alpha} \tag{4}$$

ove α è un parametro generalmente compreso fra 0.8 e 1.2, e quindi si tratta di un rumore rosa.

Il rumore 1/f, praticamente onnipresente, costituisce un limite invalicabile alla sensibilità delle misure alle frequenze più basse. Il suo contributo prevale fino a una specifica frequenza, frequenza d'incrocio, oltre la quale domina invece il rumore termico. Questo andamento è chiaramente osservabile nella Fig. 2 che mostra l'andamento dei contributi dei due tipi di rumore nello spettro a 1/3 di ottava per un fonometro.

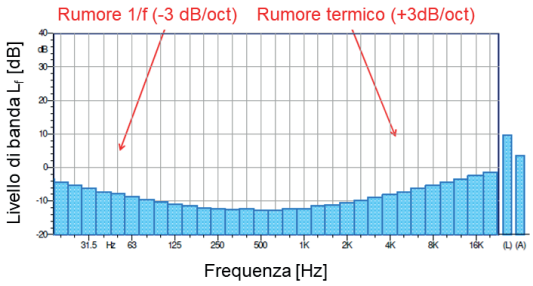


Fig. 2 – Esempio di contributi del rumore 1/f e di quello termico nello spettro a 1/3 di ottava per un fonometro

Example of contributions of 1/f and thermal noises in 1/3 octave band spectrum for a sound level meter

Un maggiore dettaglio è riportato nella Fig. 3 [11] che illustra nello spettro a 1/3 di ottava i contributi del rumore dovuto al microfono, di quello introdotto dal preamplificatore e della loro combinazione. Il rumore elettrico del preamplificatore è predominante alle basse frequenze, mentre quello del microfono è più significativo al crescere della frequenza.

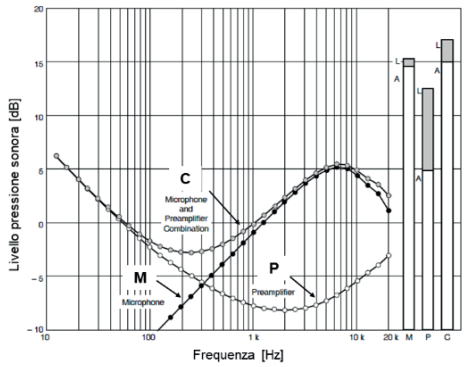


Fig. 3 – Esempio di contributi del rumore del microfono (M), del preamplificatore (P) e loro combinazione (C) nello spettro a 1/3 di ottava (modificato da [11])

Example of contributions of noises from microphone (M), preamplifier (P) and their combination (C) in 1/3 octave band spectrum (adapted from [11])

Nelle misure acustiche solitamente il microfono è del tipo a condensatore che, trattandosi in teoria di un elemento circuitale reattivo, non dovrebbe introdurre rumore. Nella pratica sono comunque presenti dissipazioni, modellabili con una resistenza in parallelo, che producono un rumore termico denominato kTC pari a:

$$\overline{v_n^2} = kT/C \quad [\mathrm{V}^2] \tag{5}$$

ove C [F] è la capacità del condensatore, a sua volta direttamente proporzionale alla superficie delle sue armature. Ne deriva che, a parità di altre condizioni, microfoni da 1" hanno una maggiore capacità C rispetto a quelli da ½" e, pertanto, presentano un minore rumore termico.

Il rumore shot [12] si manifesta quando una corrente elettrica, cioè un flusso di portatori di carica, attraversa una barriera di potenziale, come avviene nei tubi a vuoto o nelle giunzioni p-n. Esso deriva dalla natura discreta della carica elettrica e dall'indipendenza statistica dei singoli eventi di attraversamento da parte di ciascuna carica elementare e per questo è chiamato anche rumore granulare.

Diversamente dai precedenti, il rumore di quantizzazione [13] rientra nella categoria dei disturbi di processo, introdotti nel normale funzionamento dei sistemi elettronici di elaborazione dei segnali. Questo rumore, di natura statistica, rappresenta l'incertezza introdotta dalla quantizzazione in ampiezza di un segnale, per esempio quando viene convertito dalla sua forma analogica a quella digitale che in tale rappresentazione utilizza, necessariamente, un numero finito di bit.

3 | L'indagine sperimentale

Come indicato nell'introduzione, l'indagine sperimentale è stata articolata in tre fasi, la prima condotta in un ambiente normale, con precauzioni per limitarne l'influenza sulle misurazioni, e le altre due svolte in una camera anecoica.

3.1 | Primo set di misure (sistema microfono/preamplificatore)

Sono stati presi in esame dieci microfoni a condensatore di differente diametro e sensibilità, elencati nella Tab. 1. Tutti i microfoni richiedevano una tensione di polarizzazione di 200 V. È stato usato lo stesso preamplificatore per tutti i microfoni, ciascuno dei quali calibrato prima della misura (Fig. 4). Si è proceduto a una duplice misurazione, ciascuna della durata di 30 s, in presenza di tensione di polarizzazione (rumore ambientale + rumore strumentale) e in sua assenza (rumore strumentale), al termine della quale veniva determinato lo spettro a bande di 1/3 di ottava dei livelli minimi da 20 a 20.000 Hz.

Tab. 1 – Microfoni a condensatore considerati

Examined condenser microphones

Microfono	*Diametro [m (inch)]*	*Sensibilità [mV/Pa]*	*Capacità [pF]*
M1	0,0254 (1")	53,0	69,2
M2	0,0254 (1")	43,1	64,5
M3	0,0254 (1")	38,0	62,2
M4	0,0127 (1/2")	11,3	17,5
M5	0,0127 (1/2")	13,7	17,8
M6	0,0127 (1/2")	38,3	12,4
M7	0,0127 (1/2")	37,0	12,7
M8	0,0127 (1/2")	27,0	12,5
M9	0,0127 (1/2")	11,3	16,8
M10	0,00635 (1/4")	1,3	6,1

Per minimizzare l'influenza di rumori e vibrazioni presenti nell'ambiente e interferenti con la misurazione, il sistema microfono/preamplificatore è stato collocato all'interno di un

contenitore isolante (Fig. 5) dal quale fuoriusciva il cavo di connessione con un sistema di analisi SINUS Apollo multicanale.



Fig. 4 – Sistema per la calibrazione dei microfoni
System used for microphone calibration



Fig. 5 – Configurazione sperimentale del primo set di misure
Experimental configuration of the first set of measurements

3.2 | Secondo set di misure (sei fonometri)

I rimanenti due set di misure sono stati svolti nella camera anecoica della MARCO SpA (Fig. 6) avente un volume utile di circa 68 m^3 e frequenza di taglio inferiore teorica nella banda di 1/3 di ottava a 200 Hz.

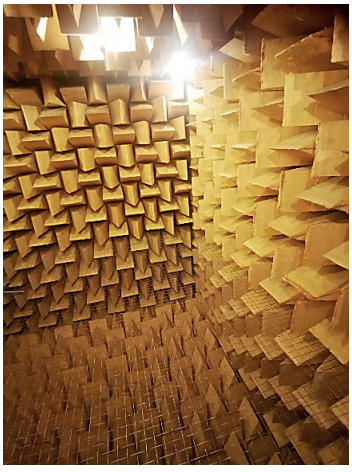


Fig. 6 – Camera anecoica della MARCO SpA (Castenedolo, BS) impiegata per le misurazioni
Anechoic room of MARCO SpA used for the measurements

Il secondo set di misure ha riguardato sei fonometri in classe I di differenti marche e modelli, tutti dotati di microfoni a condensatore da ½" di cui cinque a elettrete e uno con tensione di polarizzazione di 200 V (Tab. 2).

Tab. 2 – Fonometri con microfoni a condensatore da ½" esaminati nella camera anecoica
Sound level meters with ½" condenser microphones examined in the anechoic room

Fonometro	*F1*	*F2*	*F3*	*F4*	*F5*	*F6**
Sensibilità [mV/Pa]	42,8	24,9	46,2	41,7	47,2	43,8

* Microfono con tensione di polarizzazione di 200 V

Ciascun fonometro è stato collocato al centro nella camera anecoica e collegato all'esterno di questa a un analizzatore SINUS Apollo per determinare lo spettro per bande di 1/3 di ottava dei livelli minimi del rumore ambientale all'interno della camera. Per ciascun fonometro è stata eseguita una misurazione con durata di 60 s.

3.3 | Terzo set di misure ("Coherent Output Power, COP")

Questo set di misure, svolto sempre all'interno della camera anecoica, ha riguardato l'applicazione della tecnica metrologica della "Coherent Output Power, COP" che permette di eseguire misurazioni a livelli sonori molto bassi [3,14-17]. Questa tecnica richiede l'impiego di una coppia di microfoni dello stesso tipo, posti in configurazione faccia-faccia a breve distanza tra loro. La funzione COP applicata ai segnali provenienti dai due microfoni è ottenuta moltiplicando l'autospettro FFT del segnale B, $G_{BB}(f)$, per la funzione di coerenza $\gamma^2(f)$, tra il canale B e il canale A:

$$COP = \gamma^2(f) \cdot G_{BB}(f) \tag{6}$$

ove la funzione di coerenza, con valori compresi tra 0 (segnali del tutto non correlati) e 1 (segnali perfettamente correlati), è calcolata mediante:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{AB}(f)|^2}{G_{AA}(f) \cdot G_{BB}(f)} \tag{7}$$

ove $G_{AB}(f)$ è il cross-spettro tra i segnali dei due microfoni A e B e $G_{AA}(f)$ l'autospettro FFT del segnale A.

In riferimento allo schema in Fig. 7, che illustra un sistema Single-Input/Multiple-Output (SIMO), il segnale di interesse incidente sui due microfoni I(t) è praticamente lo stesso, essendo i trasduttori A e B molto vicini tra loro. Il segnale rilevato dai due microfoni è, pertanto, correlato e a questo si sommano il rumore elettrico n_A e n_B dei due sistemi microfoni/preamplificatori e altre componenti aleatorie generando i due segnali in uscita O_A e O_B. Rumore elettrico e componenti aleatorie non sono correlate tra loro per cui, mediando nel tempo i due segnali in uscita,

il loro valore medio tende a zero e rimane, quindi, solo la componente deterministica del segnale in uscita, ossia il segnale incidente I(t) in quanto correlato nei due microfoni.

In assenza di segnale incidente I(t) a ogni raddoppio del tempo di media si ottiene una funzione COP con riduzione di 3 dB del contributo del rumore auto-generato n(t).

Per l'applicazione della COP nella presente indagine è stata impiegata una coppia di microfoni da ½" prepolarizzati, affacciati tra loro alla distanza di 15 mm e posti al centro della camera anecoica all'altezza rispetto al pavimento a griglia di 1,4 m (Fig. 8). I segnali dei due microfoni erano inviati ad un sistema multicanale SINUS Apollo per determinare lo spettro, per bande di 1/3 di ottava dei livelli minimi del rumore ambientale all'interno della camera. Sono state eseguite sei misurazioni, ciascuna della durata di 30 s.

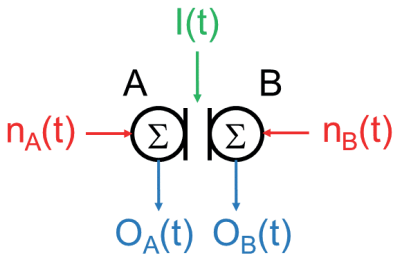


Fig. 7 – Schema di un sistema Single-Input/Multi-Output (SIMO)
Outline of a Single-Input/Multi-Output (SIMO) system



Fig. 8 – Configurazione dei due microfoni affacciati tra loro collocati al centro della camera anecoica
Setup of the two microphones positioned in the center of the anechoic room

4 | Risultati e discussione

4.1 | Sistema microfono/preamplificatore

Gli spettri medi dei livelli minimi ottenuti per le tre dimensioni dei microfoni privi della tensione di polarizzazione (rumore auto-generato) sono riportati nella Fig. 9 insieme a ± lo scarto tipo (area colorata), ad eccezione del singolo microfono da ¼".

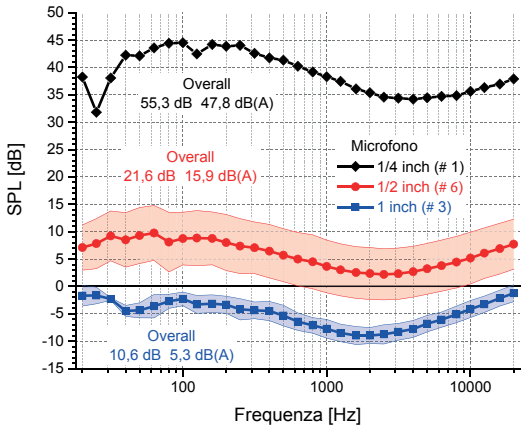


Fig. 9 – Spettri medi del rumore auto-generato per le tre dimensioni dei microfoni (area colorata pari a ± lo scarto tipo)
Average spectra of the self-generated noise for the three microphone types (colored area corresponding to ± 1 standard deviation)

Appare evidente la migliore prestazione dei microfoni da 1" e quella peggiore del microfono da 1/4" a bassa sensibilità e dedicato a misurazioni di livelli sonori elevati. Per ottenere misure non influenzate dal rumore strumentale al di sotto di 10 dB(A) è necessario usare sistemi microfono/preamplificatore ad alta capacità (grande diametro) e con sensibilità maggiore di 30 mV/Pa (Fig. 10). Le curve nere interpolano i dati sperimentali del livello di pressione sonora complessivo in dB (curva a linea intera e simboli pieni) e in dB(A) (curva a linea tratteggiata e simboli vuoti) in funzione della sensibilità dei microfoni di diverso diametro.

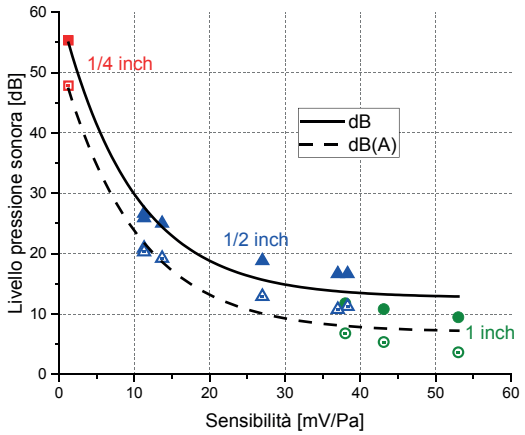


Fig. 10 – Livello di pressione sonora del rumore auto-generato in funzione della sensibilità per le tre dimensioni dei microfoni e corrispondenti curve di interpolazione
SPL of self-generated noise vs sensitivity and microphone diameter and corresponding fitting curves

4.2 | Fonometri

Relativamente alle misurazioni del rumore ambientale in camera anecoica eseguite con i sei fonometri, la Fig. 11 mostra lo spettro medio dei livelli minimi (simboli pieni) insieme a ± lo scarto tipo (area in grigio).

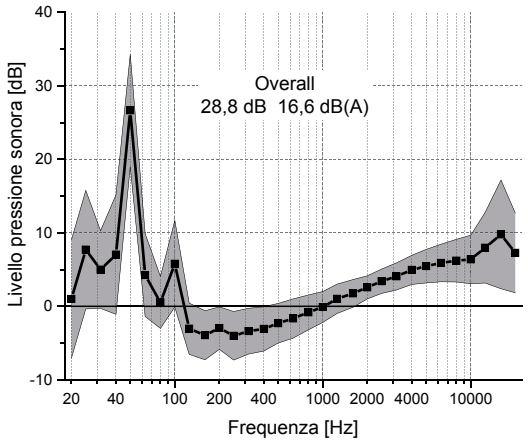


Fig. 11 – Spettro medio dei livelli minimi del rumore ambientale rilevato con i sei fonometri nella camera anecoica (area grigia pari a ± lo scarto tipo)

Average spectra of the environmental noise inside the anechoic room measured by the six sound level meters (colored area corresponding to ± 1 standard deviation)

Al di sotto della frequenza teorica di taglio della camera anecoica (200 Hz) si osservano ampie fluttuazioni dei livelli di banda. Questi livelli, inoltre, aumentano al crescere della frequenza e, in considerazione dell'ambiente di misura silenzioso, sono indicativi della presenza di rumore termico (Fig. 2, 3) imputabile alla strumentazione.

Si conferma, quindi, che la misurazione di livelli sonori molto bassi, quali quelli rilevabili in una camera anecoica, è inficiata dal rumore auto-generato dalla strumentazione e, pertanto, è necessario impiegare tecniche metrologiche alternative come la "Coherent Output Power, COP".

4.3 | Coherent Output Power, COP

Questa tecnica metrologica ha consentito di determinare il rumore all'interno della camera anecoica, eliminando il rumore strumentale e componenti aleatorie non correlate tra loro

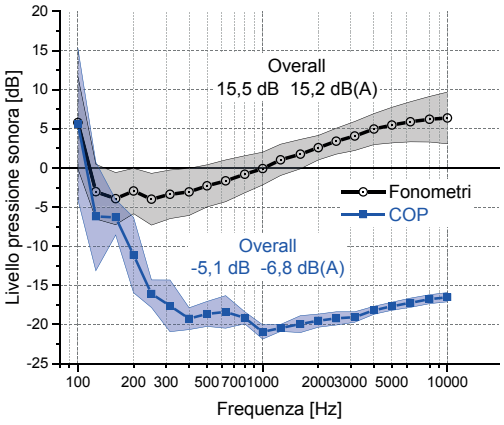


Fig. 12 – Spettro medio dei livelli minimi del rumore ambientale nella camera anecoica determinato con i fonometri e con la tecnica metrologica COP (aree colorate pari a ± lo scarto tipo)

Average spectra of the minimum SPLs of environmental noise inside the anechoic room by sound level meters and COP technique (colored areas correspond to ± 1 standard deviation)

(Eq. 6). Nella Fig. 12 sono riportati gli spettri medi dei livelli minimi del rumore presente nella camera anecoica (curva blu) comparato con quello misurato dai fonometri (curva nera) nell'intervallo di frequenza 100-10.000 Hz. Appare evidente che l'applicazione della tecnica metrologica COP, pur con un limitato tempo di misura di 30 s per i sei rilevamenti eseguiti, ha consentito di escludere il rumore strumentale che influisce considerevolmente sulla misurazione con i fonometri.

Dai dati sopra esposti, in linea generale nell'intervallo delle bande di 1/3 di ottava 200-10.000 Hz si può stimare che il livello minimo medio del rumore auto-generato osservato per i sei fonometri considerati è quello riportato in Tab. 3, ottenuto mediante la relazione:

$$L_{fn} = 10lg\left[10^{(L_f/10)} - 10^{(L_{fCOP}/10)}\right] \quad \text{[dB]} \qquad (8)$$

ove L_f e L_{fCOP} sono i valori medi dei livelli di banda rilevati rispettivamente con i sei fonometri e con la tecnica COP.

Si sottolinea che, ove disponibile, è preferibile fare riferimento alla documentazione dello specifico strumento utilizzato piuttosto che ai dati in Tab. 3.

Tab. 3 – Livello minimo medio del rumore auto-generato osservato per i sei fonometri esaminati nella camera anecoica.

Average minimum level of self-generated noise observed for the six sound level meters examined in the anechoic room

Frequenza [Hz]	*Livello minimo medio del rumore auto-generato [dB]*
200	–3,5
250	–4,2
315	–3,5
400	–3,2
500	–2,4
630	–1,7
800	–0,9
1.000	–0,1
1.250	1,0
1.600	1,7
2.000	2,6
2.500	3,4
3.150	4,1
4.000	4,9
5.000	5,5
6.300	5,9
8.000	6,2
10.000	6,4

Ne consegue che, facendo riferimento al requisito in Eq. 1 e in assenza di documentazione specifica della strumentazione impiegata, il livello sonoro minimo misurabile L_f in ciascuna banda di frequenza f deve essere superiore di almeno 10 dB ai valori riportati in Tab. 3.

5 | Conclusioni

L'indagine sperimentale ha evidenziato il ruolo del rumore auto-generato dalla strumentazione impiegata nelle misurazioni fonometriche, particolarmente rilevante quando comparabile con il rumore da rilevare e in grado di deteriorare la qualità della misurazione. Limitatamente alla strumentazione esaminata è stato possibile dare indicazioni generali sul rumore strumentale onde potere verificare la conformità del rumore rilevato al requisito in Eq. 1. A queste indicazioni è preferibile sostituire quelle specifiche della documentazione tecnica della strumentazione impiegata, qualora disponibile.

In merito alle tecniche metrologiche per la misurazione di livelli sonori inferiori al rumore strumentale, la tecnica metrologica "Coherent Output Power COP", utilizzante una coppia di microfoni, è stata proficuamente applicata per rilevare il rumore in una camera anecoica. Si è così evidenziato come in ambienti silenziosi il rumore strumentale, all'aumentare della frequenza, è ben superiore a quello intrinseco dell'ambiente.

Conclusions

The experimental investigation highlighted the important role played by the self-generated noise of the instrumentation used in acoustic measurements when it is comparable with the one to be detected, reducing the quality of the measurement. Limited to the examined instrumentation, it was possible to provide guidelines to check the compliance of the measured sound level with the requirement in Eq. 1. It is preferable to substitute these indications with those of the technical documentation of the used instrumentation, whenever available.

Regarding the metrological techniques for measuring sound levels below instrumental noise, the "Coherent Output Power, COP", using a face-to-face pair of microphones, has been successfully applied to detect the background sound in an anechoic chamber. It was shown that in a silent environment the instrumental noise, with increasing frequency, is much higher than the intrinsic noise of the environment itself.

6 | Ringraziamenti

Si ringrazia MARCO SpA per avere reso disponibile la camera anecoica per l'esecuzione delle misure.

Bibliografia

[1] V. Tarnow, Thermal Noise in Microphones and Preamplifiers, Brüel & Kjær Technical Review, 3 (1972) 3-14.

[2] E. Frederiksen, Microphone System for Extremely Low Sound Levels, Brüel & Kjær Technical Review, 3 (1984) 16-22.

[3] P.K. Møller, Measurement of Background Noise in Sound-Insulated Rooms, Journal of Sound and Vibration 85 (1982) 143-150.

[4] R.M. Ellingson, F.J. Gallun, G. Bock, Measurement with verification of stationary signals and noise in extremely quiet environments: Measuring below the noise floor, J. Acoust. Soc. Am. 137 (2015) 1164–1179 DOI: 10.1121/1.4908566.

[5] A. Armani, La misura di livelli sonori molto bassi 'SottoZeroDB', Spectra S.r.l. Nota tecnica 1-2016.

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, Wiley, 1997.

[7] G.V. Pallottino, Il rumore elettrico. Dalla fisica alla progettazione, Springer-Verlag Italia 2011.

[8] J.B. Johnson, Thermal Agitation of Electricity in Conductors, Physical Review 32 (1928) 97-109 DOI: 10.1103/PhysRev.32.97.

[9] H. Nyquist, Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors, Physical Review 32 (1928) 110-113 DOI: 10.1103/PhysRev.32.110.

[10] V. Radeka, 1/f Noise in Physical Measurements, IEEE Transactions on Nuclear Science 16(1969) 17-35 DOI: 10.1109/TNS.1969.4325473.

[11] Microphone Handbook, Brüel & Kjær Technical Documentation 1 (2019).

[12] W. Schottky, Über spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elekrizitätsleitern, Annalen der Physik 57 (1918) 541-567 DOI: 10.1002/andp.19183622304.

[13] W.R. Bennett, Spectra of quantized signals, Bell Syst. Tech. J. 27 (1948), 446-472 DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01340.x.

[14] J.S. Bendat, W.G. Halvorsen, Noise source identification using coherent output power spectra, Sound and Vibration 9 (1975) 18-24.

[15] M. Nevrela, M. Weisz, J. Szweda, M. Vasina, Removing additive noise in measurements of low sound pressure levels, MM Science Journal (2020) DOI: 10.17973/MMSJ.2020_10_2020044

[16] A. Armani, F. Pompoli, Misura del rumore di fondo nella camera anecoica dell'Università di Ferrara con il metodo della Coherent Output Power(COP), 3°Seminario Acustica e Industria "Tecniche innovative per il controllo del rumore e delle vibrazioni dei prodotti industriali", Ferrara, 15 febbraio 2018.

[17] O.-H. Bjor, Measurement of Extremely Low Sound Pressure Levels, Proc. InterNoise 1997, Budapest, Hungary, 1555-1558.

Lettera all'editore su "Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà"

Daniele Ponteggia

Studio Ing. Ponteggia,
Via del Lanificio, 15A, 05100 Terni
daniele@studioponteggia.it

Ricevuto: 13/9/2024
Accettato: 4/10/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18832
ISSNe: 2385-2615

Questa lettera all'editore contiene un commento all'articolo "Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli studios di Cinecittà" comparso sulla RIA 48/1. L'autore della lettera esprime disaccordo rispetto al valore ottimale di riverberazione scelto dall'autrice per la progettazione di un teatro di posa ed indica riferimenti bibliografici a sostegno della propria posizione.
Parole chiave: lettera all'editore, teatro di posa, riverberazione

Letter to the editor on "Acoustic retrofit of the Teatro 10 of Cinecittà Studios"
This letter to the editor contains a commentary on the article " Acoustic retrofit of the Teatro 10 of Cinecittà studios" published in RIA 48/1. The author of the letter expresses disagreement with the optimal reverberation value chosen by the author for the design of a sound stage and indi-cates bibliographical references to support his position.
Keywords: letter to the editor, sound stage, reverberation

Gentile Editore,

ho letto con molto interesse la nota tecnica "Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà" [1] a firma di Anna Tarsitano pubblicata nella RIA 48/1.

Sono però in disaccordo con la scelta di individuare un tempo di riverberazione di 1.2 secondi come "ottimale" per il comfort acustico di un teatro di posa. Nell'articolo viene asserito che "Essendo il volume dell'ambiente pari a 18.000 m^3 si è considerato un tempo di riverberazione ottimale per il parlato pari a 1,2 s.". Per giustificare questa assunzione viene indicato nel testo come riferimento bibliografico la norma UNI EN ISO 717-1 "Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Isolamento acustico per via aerea". Credo si tratti di un refuso, peraltro confermato dalla citazione bibliografica espressa nella didascalia di tabella 2, che fa invece riferimento all'articolo di Lococciolo "Riqualificazione acustica del TEX – Il Teatro dell'ExFadda, Rivista Italiana di Acustica 46, 2022 pp. 51-59" [2]. In questo caso però l'articolo [2] tratta di "uno spazio multifunzionale pronto ad ospitare proiezioni cinematografi che, rassegne teatrali e stagioni concertistiche ma anche incontri d'autore e conversazioni letterarie o ancora conferenze" che non ritengo sia applicabile al caso in esame.

La letteratura scientifica è piuttosto scarna a tal proposito, ma è possibile individuare almeno due riferimenti bibliografici che discutono delle caratteristiche acustiche che dovrebbe possedere un teatro di posa: Marshall Long, "Architecural Acoustics" [3] e Leslie Doelle, "Environmental Acoustics" [4]. Long indica che per i teatri di posa, che in lingua Inglese vengono chiamati "Sound Stages": "Sound stages are large open rooms used for indoor movie production. Acoustically they are designed to be dead with all surfaces except the floors covered with 4 to 6 inch (100 to 150 mm) deep blankets of absorptive material. The floors are smooth and flat so that cameras can be dollied. The exposed wall surfaces can be faced with commercial quilted blankets covered with hardware cloth below an elevation of 10 ft (3 m).

The best rooms are built with isolated construction, floated floors, double-studded walls, and separately suspended gypsum board ceiling. Access is provided via sound rated doors, which can be quite large. Some facilities have control rooms adjacent to the stage for mixing and recording. The most difficult aspect of sound stage design is noise control. Isolation from exterior noise is a challenge because many stages are built in converted warehouses with lightweight roofs and little thought to the isolation of traffic and aircraft noise. Large air conditioning units are required to cool the stage lighting fixtures and this equipment is often located on the roof, where it is difficult to control. It is much preferable to separately support air handlers on grade or on an elevated steel platform dedicated to that purpose. Ductwork should be isolated from the structural framework either by resilient suspension or by a separate support system. Silencers located at a roof or wall penetration provide exterior as well as equipment noise control" [3].

Doelle invece fa riferimento ai teatri di posa come "Motion-picture Studios": "The site for a motion-picture studio is chosen generally as a compromise between quiet surroundings and reasonable accessibility. Motion-picture studios are usually built as large halls with highly absorbent enclosures so that the sets can contribute their own acoustical characteristics as required. Economy in construction and efficiency of operation suggest that several large-size motion picture studios to be grouped together. This allows set construction and preparations to be

carried out in one or more studios while normal production continues in the adjacent ones. Provision for the required short RT and for a high degree of noise and vibration isolation within these studios is the main acoustical objective" [4].

Si deduce che un teatro di posa debba possedere un elevato grado di isolamento acustico ed un basso rumore degli impianti tecnologici. Per quello che riguarda la riverberazione entrambi i testi citati indicano che non c'è un valore "ottimale" per il tempo di riverberazione. O meglio la riverberazione dovrebbe essere più bassa possibile, sempre che si possa parlare di riverberazione in questi ambienti dove praticamente l'unica superficie non assorbente è il pavimento. Sia Long ("designed to be dead") che Doelle ("highly absorbent enclosures" e "required short RT") sono concordi su questo aspetto, dove Doelle indica anche che "[...] so that the sets can contribute their own acoustical characteristics as required" ovvero indica che saranno le scenografie che verranno costruite in questi ambienti che connoteranno l'acustica dello spazio con le loro caratteristiche di forma e materiali.

Dal punto di vista acustico il teatro di posa ideale è una camera semi-anecoica dove costruire di volta in volta le scenografie che porteranno ad avere le caratteristiche acustiche desiderate. In fondo il teatro di posa è un ambiente chiuso di grandi dimensioni dove poter creare scenografie in condizioni, in particolare di luce, controllate per poter girare contenuti audiovisivi senza essere dipendenti dalle condizioni ambientali di una ripresa in esterni, da cui il tipico colore interno di rivestimento nero delle pareti che dovrebbe essere quindi coniugato ad un "nero acustico" se mi si consente l'espressione, ovvero ad una caratteristica di assorbimento acustico delle pareti il più elevata possibile.

Bibliografia

[1] A. Tarsitano, Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà, Rivista Italiana di Acustica 48, 2024 pp. 91-98. https://doi.org/10.3280/ria1-2024oa17357-

[2] L. Lococciolo, Riqualificazione acustica del TEX – Il Teatro dell'ExFadda, Rivista Italiana di Acustica 46, 2022 pp. 51-59.

[3] M. Long, Architectural Acoustics, Academic Press, 2014 https://doi.org/10.1016/C2009-0-64452-4.

[4] L.L. Doelle, Environmental Acoustics, McGraw-Hill, 1972-

Resoconto del 50° Convegno Nazionale AIA

Gaetano Licitra[a*] | Lucilla Aiello[b]

[a] Dipartimento ARPAT
Via Vittorio Veneto, 27, 56127 Pisa
[b] Libera Professionista,
Via Carrubella, 20A, 95100 Catania
* Autore di riferimento:
g.licitra@arpat.toscana.it

Ricevuto: 15/7/2024
Accettato: 31/7/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18829
ISSNe: 2385-2615

Si è tenuto dal 29 al 31 maggio, presso l'Hotel Diodoro di Taormina, il 50° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA). Il convegno è stato organizzato dall'AIA con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Catania e con il CNR-IPCF sede di Pisa. Nel presente articolo si propone un resoconto delle attività scientifiche e sociali che si sono tenute nei tre giorni di Convegno.
Parole chiave: convegno nazionale, AIA, Associazione Italiana di Acustica

Report of the 50th AIA National Conference
The 50th National Conference of the Acoustical Society of Italy (AIA) was held from 29 to 31 June at Hotel Villa Diodoro di Taormina. The conference was organized by AIA in collaboration with the Department of Engineering of the University of Catania and with the CNR-IPCF headquarters in Pisa. This article presents a report of the scientific and social activities that took place during the three days of the Conference.
Keywords: national conference, AIA, Acoustical Society of Italy

1 | Introduzione

Dal 29 al 31 maggio, presso l'Hotel Diodoro di Taormina, si è tenuto Il 50° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA).

Il convegno è stato organizzato dall'AIA con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Catania e con il CNR-IPCF sede di Pisa.

È stato un convegno di grande partecipazione (180 delegati e 35 sponsor, 14 aziende nell'area espositiva, 70 partecipanti ai corsi accreditati) e di grande successo, con un programma ricco di contenuti tecnico-scientifici (sessioni, presentazioni, poster, rassegne, corsi, premi a giovani acustici) e di momenti di socialità (aperitivo e visita tecnica al Teatro Greco di Taormina, passeggiata all'alba da Taormina al mare e ritorno, cena sociale presso la Villa Diodoro, visita al Museo dei Saperi e delle Mirabilia Siciliane dell'Università di Catania).

Nel presente articolo si propone un resoconto degli aspetti scientifici, sociali e organizzativi che hanno caratterizzato questa edizione del Convegno Nazionale AIA.

2 | Programma scientifico

Il Convegno ha avuto inizio con la cerimonia di apertura durante la quale sono intervenute diverse autorità, tra cui il Dr. Onofrio Maragò, Direttore dell'Istituto Processi Chimico Fisici del CNR, il Prof. Cipolla che ha svolto una lectio magistralis sulla storia del teatro greco e poi romano di Taormina.

Il Prof. Iannace ha poi illustrato le misure di caratterizzazione delle prestazioni acustiche svolte all'interno del Teatro.

Durante la cerimonia sono stati annunciati i vincitori dei premi AIA, assegnati a lavori di grande qualità che hanno premiato giovani acustici ed acustiche, che rappresentano il futuro dell'Associazione: Elio di Giulio e Domenico De Salvio (Premio Sacerdote), Alessia Nora (Premio Giacomini), Andrea Cicero (Premio giovani professionisti). Durante la cerimonia di chiusura è stato inoltre assegnato il premio Barducci ad Angela Guastamacchia.

Le sessioni strutturate organizzate sono state 19 (Tab. 1), coordinate da 35 chairpersons e sono state suddivise in quattro aule in parallelo, con un totale di 118 presentazioni orali.

Una particolare menzione va alle sessioni di "Acustica subacquea", coordinata da Giorgio Riccobene, che ha raccolto contributi di ricercatori ed esperti che operano in ambiti acustici solitamente non rappresentati durante i convegni AIA.

I contributi hanno riguardato sistemi di misura e campagne sperimentali che hanno descritto l'ambiente sonoro sottomarino in varie realtà del paese.

Particolarmente seguita dai più giovani la sessione Applicazioni dell'intelligenza artificiale all'acustica, dove sono stati presentati studi di frontiera su applicazioni in differenti settori (dalla valutazione dello stato di degrado di pavimentazioni stradali agli ambienti ospedalieri o al traffico stradale).

Tra le sessioni più ricche di interventi occorre menzionare quella su Ecologia acustica (impatto sull'uomo e sull'ambiente, bioacustica) (11 presentazioni e 2 poster), Rumore e vibrazioni nei luoghi di lavoro (10 presentazioni) e Valutazione e controllo del rumore degli impianti eolici (8 presentazioni e 1 poster).

Alle sessioni orali si è aggiunta una sessione poster con diciassette contributi, esposti durante il convegno. Gli atti del convegno, che comprendono un totale di 135 articoli, sono

pubblicati al seguente link: https://bit.ly/50ConvegnoAIA con accesso riservato agli iscritti all'evento.

Da sottolineare che per la partecipazione al Convegno AIA Convegno AIA sono stati riconosciuti 3 CFP per Ingegneri, Architetti e Geometri e Periti.

3 | Area espositiva e rassegne tecniche

In specifiche sale della Sede del Convegno è stata allestita un'area espositiva che ha accolto 14 sponsor. Da sottolineare che ben 12 di essi sono sostenitori commerciali annuali dell'AIA e vanno ringraziati per la loro fiducia e costante partecipazione agli eventi organizzati dalla Associazione. Il loro numero, crescente nel corso degli ultimi anni, rappresenta un record storico per l'AIA ed un impegno organizzativo importante per trovare spazi e allestimenti che possano soddisfare le loro richieste. A completamento dell'area espositiva, all'interno del programma scientifico sono state inserite 9 rassegne tecniche durante le quali le aziende sponsor hanno potuto illustrare gli ultimi prodotti/applicazioni nel settore dell'acustica e delle vibrazioni.

4 | Seminari di approfondimento

Nella mattinata di mercoledì, prima dell'inizio del Convegno, ed in quella di venerdì, al termine del Convegno, sono stati organizzati due seminari accreditati per Ingegneri, Architetti, Geometri e Periti della durata di 4 ore dal titolo:

- criteri ambientali minimi e acustica: progettazione, materiali, soluzioni costruttive, casi studio;
- aggiornamenti di acustica forense: strumenti tecnici e giuridici per la misura, la valutazione e la tutela dal rumore intrusivo.

Vi è stata buona partecipazione (circa 70 partecipanti) nei due eventi che sono stati caratterizzati da un aperto confronto tra i relatori e il pubblico.

5 | Eventi sociali

Le tre giornate di Convegno sono state ricche di eventi sociali che hanno favorito un clima di grande affiatamento tra i partecipanti. La prima serata è stata dedicata al Cocktail di Benvenuto, tenutosi presso il Teatro Greco di Taormina. Il cocktail ha seguito le visite guidate al teatro, che hanno riscosso grande successo tra i 210 partecipanti. Di grande impatto la vista spettacolare dall'altura dove si trova il Teatro che consentiva di vedere la costa calabrese e lo Stretto di Messina da una parte e l'Etna e la costa a sud di Taormina con l'Isola Bella e Giardini Naxos.

Nella serata è stata organizzato il primo incontro dei Giovani Acustici Italiani, finalizzato a creare questo nuovo gruppo all'interno di AIA per proporre attività ed eventi futuri orientati ai giovani e da loro organizzati.

La seconda giornata è cominciata all'alba con la seconda edizione dell''iniziativa *Sunrise Run&Walk* che ha accompagnato i coraggiosi partecipanti (50) in una suggestiva passeggiata lungo ripide scalinate che hanno portato alla spiaggia di Isola Bella, dove i più intrepidi si sono tuffati in mare mentre il sole spuntava dietro Isola Bella. La risalita è stata breve ma intensa, fino a raggiungere Porta Messina e proseguire, per i più golosi, verso il *Bam Bar* rinomato per le sue granite e brioche. Lo sforzo e la fiducia dei partecipanti è stata ripagata anche quest'anno da una maglietta celebrativa con il logo della manifestazione disegnato da Giuseppe Bonfiglio.

La serata della seconda giornata è stata dedicata alla Cena Sociale, tenutasi nella bellissima sala delle cerimonie di Villa Diodoro. I partecipanti (237) hanno molto apprezzato la cucina siciliana e le sue prelibatezze. e sono stati intrattenuti dal quartetto di archi *Sweet Ladies*. Hanno seguito gli apprezzatissimi interventi musicali del duo *Gioia Fusaro & Dario D'Orazio* e l'immancabile performance del gruppo *Los Tenores del sueño* che ha ripresentato la hit "*Sonido Lindo (AIA, AIA, AIA, AIA!!!)* riveduta ed aggiornata in alcune strofe.

Nella terza giornata, al termine del Convegno, è stata organizzata una visita al Museo dei Sapori e delle Mirabilia Siciliane a Catania, che poi è stata ripetuta il sabato mattina per coloro i quali non avevano potuto partecipare perché impegnati nel seminario.





Fig. 1 – Cerimonia di apertura

Opening ceremony





Fig. 2 – La visita del Teatro greco-romano di Taormina

Visiting the Greek-Roman Theatre of Taormina



Fig. 3 – La cena del Gruppo Giovani Acustici AIA

The AIA Young Acoustic Group dinner



Fig. 4 – Logo sulla maglietta per la seconda edizione della Sunrise Run & Walk

Logo on the t-shirt for the second edition of the Sunrise Run & Walk



Fig. 5 – All'alba, sul Belvedere prima della discesa a Isola Bella

Sunrise on the Belvedere before the descent to Isola Bella



Fig. 6 – La discesa verso Isola Bella

The descent towards Isola Bella





Fig. 7 – Modalità Run & Swim

Run & Swim Mode



Fig. 8 – Chiusura della Run & Walk per i più golosi...

Delicious closing of the Run & Walk



Fig. 9 – Cena Sociale

Gala dinner



Fig. 10 – Los Tenores del sueño

Tab. 1 – Elenco delle sessioni strutturate e rispettivi chairmen
List of structured sessions and chairmen

Sessione strutturata	*Chairpersons*
S1 – Rumore negli ambienti di vita	J. Fogola B. Mangano
S2 – Rumore e vibrazioni nei luoghi di lavoro	S. Luzzi A. Papa
S3 – Acustica dei materiali e dei sistemi edilizi	A. Gagliano G. Evola
S4 – Acustica architettonica e musicale	C. Rubino D. D'Orazio
S5 – Metrologia, misure acustiche e strumentazione	C. Scrosati A. Di Bella
S6 – Acustica fisica, acustica subacquea, ultrasuoni	G. Riccobene
S7 – Acustica numerica e Modelli Previsionali	C. Guarnaccia F. Mori
S8 – Ecologia acustica (impatto sull'uomo e sull'ambiente, bioacustica)	F. Asdrubali G. Zambon
S9 – Intrusività del rumore e benessere acustico	S. Luzzi L. Aiello
S10 – Applicazioni dell'intelligenza artificiale all'acustica	G. Licitra D. De Salvio
S11 – Acustica e obiettivi per lo sviluppo sostenibile (SDG)	U. Berardi E. A. Piana
S12 – Materiali e metamateriali per l'acustica	M. Garai F. Pompoli
S14 – Mappature acustiche e piani di azione	E. Ascari F. D'Alessandro
S16 – Valutazione e controllo del rumore degli impianti eolici	L. Fredianelli G. Iannace
S17 & S19 – Progetti europei Life Sneak e Horizon Lens	R. Bellomini A. Melloni
S18 – Progetto europeo Life Silent	L. Bellucci M. Garai
S20 – Comfort acustico e multi-dominio negli spazi interni ed esterni: effetti su prestazione, salute e benessere	C. Visentin G.E. Puglisi
S22- Materiali e prodotti per l'industria	P. Bonfiglio M. Caniato

Viaggio nei Laboratori di Acustica: Università di Napoli Federico II

Raffaele Dragonetti[a]* | Elio Di Giulio[a] | Marialuisa Napolitano[a] | Rosario Romano[a] | Francesco Pompoli[b]

[a] Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II, Piazzale Tecchio, 80, 80125 Napoli

[b] Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, Via Saragat, 1, 44121 Ferrara

* Autore di riferimento: dragonet@unina.it

Ricevuto: 9/7/2024
Accettato: 9/7/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18872
ISSNe: 2385-2615

In questo articolo viene presentato il Laboratorio di Acustica dell'Università Federico II di Napoli, descrivendone la storia, le strutture, la strumentazione, le attività di ricerca e trasferimento tecnologico e le principali collaborazioni.

Parole chiave: laboratorio di acustica, Università di Napoli, termoacustica, sound quality, aeroacustica

Acoustic Laboratory Tour: University of Naples Federico II

This article presents the Acoustics Laboratory of the Federico II University of Naples, describing its history, structures, instrumentation, research and technological transfer activities and the main collaborations.

Keywords: Acoustics Laboratory, University of Naples, thermoacoustics, sound quality, aeroacoustics

1 | Introduzione

Con questo articolo cominciamo un 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. Ogni contributo riguarderà un singolo laboratorio del quale proveremo a raccontare 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 e ed il trasferimento tecnologico tra laboratori e imprese.

Il viaggio parte dal Laboratorio di Acustica dell'Università di Napoli Federico II che ho invitato per il primo contributo e proseguirà presso i tanti laboratori di acustica nel nostro territorio.

2 | La storia del laboratorio

Il Laboratorio di Acustica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli Federico II, di seguito denominato LAD, è attivo dalla fine degli anni Sessanta del secolo scorso quando fu realizzata la camera semi-anecoica, attualmente esistente ed in uso, con dimensioni libere interne di 3,20 m x 3,90 m in pianta ed un'altezza di 2,45 m. La sua progettazione e collaudo costituì l'argomento della tesi di laurea del prof. Carmine Ianniello, in seguito responsabile del laboratorio fino al 2013 e Presidente dell'AIA dal 1998 al 2001.

La dotazione strumentale iniziale del laboratorio era costituita da apparecchiature della General Radio nonché da alcuni altoparlanti e un generatore normalizzato di calpestio. Poco dopo fu acquisito il primo tubo ad onde stazionarie della Brüel&Kjær tipo 4002 e, nella prima metà degli anni settanta, in seguito all'intensificazione delle attività di ricerca, buona parte della precedente dotazione strumentale fu sostituita e integrata con apparecchiature B&K (microfoni, preamplificatori, amplificatori di misura, generatori di segnale, calibratori, registratore grafico, banco di filtri di bande ottave e terzi, analizzatore statistico elettromeccanico e tavolo rotante), nonché con un classico registratore di misura a nastro magnetico portatile Nagra-Kudelski IV SJ per registrazioni calibrate in campo. Attualmente la dotazione strumentale del LAD è stata significativamente integrata ed ampliata, adattandola ai temi di ricerca, che verranno illustrati di seguito. Attualmente lavorano presso il LAD i professori Rosario Aniello Romano e Raffaele Dragonetti, la ricercatrice Marialuisa Napolitano e l'assegnista di ricerca Elio Di Giulio. Le attrezzature del LAD vengono anche impiegate per lo svolgimento di tesi di laurea nell'ambito degli insegnamenti curriculari di "Acustica Applicata" e "Acustica Architettonica ed Edilizia" impartiti, rispettivamente, per i corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica e Ingegneria Edile, nonché nell'ambito di diversi corsi tematici presso il corso di dottorato in Ingegneria Industriale e numerosi seminari di approfondimento.

3 | Principali linee di ricerca

Le principali linee di ricerca, che negli ultimi anni ha visto coinvolto il LAD, si sono allineate alle richieste del settore dell'edilizia e dell'industria. Esse si diversificano essenzialmente in:

1. valutazione della qualità acustica degli ambienti confinati e degli spazi aperti;

2. analisi della qualità acustica del rumore emesso dai prodotti industriali, con particolare attenzione al settore automotive;
3. analisi, modellazione e misurazione delle prestazioni acustiche di sistemi per il controllo del rumore, tradizionali ed innovativi;
4. analisi e modellazione di sorgenti aeroacustiche;
5. analisi, modellazione e misurazione di dispositivi termoacustici.

Nel seguito verranno brevemente descritte le attività svolte in questi settori.

3.1 | Valutazione della qualità acustica degli ambienti confinati e degli spazi aperti

In questo ambito il LAD è stato coinvolto in indagini metrologiche in diversi teatri d'opera italiani (Teatro di San Carlo, Teatro dell'Opera di Roma), auditori (Auditorium RAI di Napoli, Auditorium Oscar Niemeyer di Ravello) nonché teatri antichi all'aperto (Teatro Grande e Teatro Odeon di Pompei, Teatro di Segesta) [1]. Le indagini metrologiche sono state condotte mediante codici di calcolo opportunamente sviluppati e, in particolare, integrati con tecniche di acquisizione ed elaborazione del segnale idonee a ridurre l'influenza della rumorosità di fondo.

Il LAD è, inoltre, attrezzato per l'esecuzione di valutazioni di calcolo basate sull'utilizzo di tecniche numeriche FEM e di modelli fondati sulle ipotesi dell'acustica geometrica.

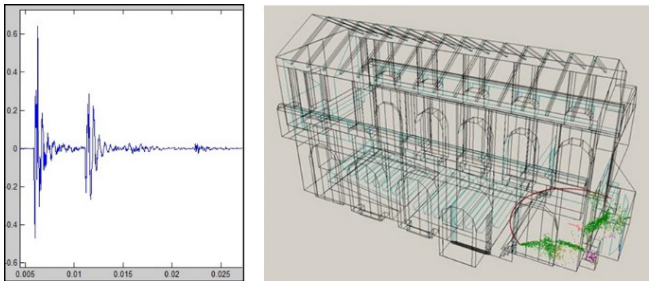


Fig. 1 – Esempi di misura della risposta impulsiva e di valutazione del suono in particolari ambienti chiusi

Examples of impulse response measurement and sound assessment in particular indoor environments

3.2 | Analisi della qualità acustica del rumore emesso dai prodotti industriali

La qualità del suono emesso da un qualsiasi prodotto industriale rappresenta un'imprescindibile caratteristica che esso deve avere prima di essere immesso sul mercato. Sebbene la principale richiesta sia quella di limitare il rumore che esso emette per ovvi problemi di inquinamento acustico, negli anni il suono emesso è diventato anche un brand che ne caratterizza le peculiarità di funzionamento. Per questo è necessario analizzare tutte le sue caratteristiche intrinseche attraverso una indagine psicoacustica. In questo contesto, il suono emesso da diversi prodotti industriali è stato misurato all'interno della camera anecoica del LAD. Sulla scorta dei segnali sonori misurati sono state costruite diverse tipologie di test psicoacustici e sono state condotte diverse campagne di ascolto per valutare diversi aspetti della qualità del suono ed un giudizio complessivo di piacevolezza o di fastidio, come per esempio riportato nel lavoro [2].

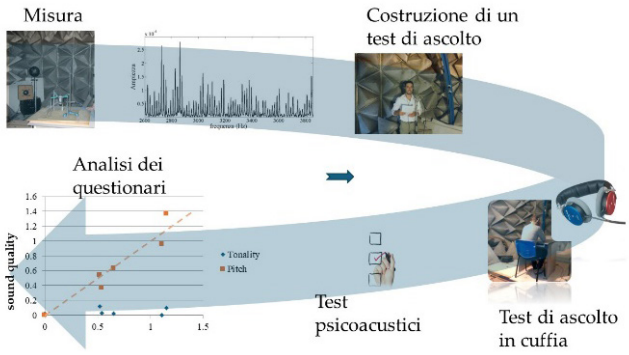


Fig. 2 – Misure di rumori di prodotti industriale, test psicoacustici e analisi dei risultati

Measurements of industrial product noise, psychoacoustic tests and analysis of results

Nella maggior parte dei test condotti è sempre emerso che la sensazione di piacevolezza o di fastidio è ben correlata con i descrittori della sound quality (vedi Fig. 2).

Analisi, modellazione e misurazione delle prestazioni acustiche di sistemi per il controllo del rumore

Il LAD fin dalla sua nascita, è sempre stato impegnato nell'analisi dei sistemi per il controllo del rumore sia da un punto di vista teorico che sperimentale. Negli ultimi anni l'attenzione del mondo scientifico è rivolta verso lo sviluppo di nuove geometrie, realizzate mediante la stampa additiva o attraverso macchine ad asportazione di materiale. A titolo di esempio in Fig. 3 è riportata la fase di progettazione mediante elaborati in ambienti MATLAB, di verifica mediante analisi numeriche agli elementi finiti e di test sperimentali di due prototipi di metamateriali realizzati per assorbire il suono in determinate bande di bassa frequenza [3].

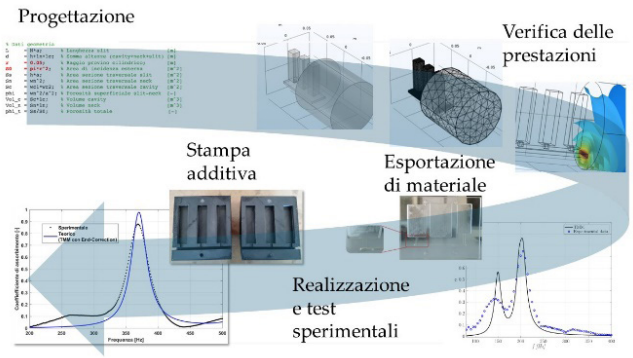


Fig. 3 – Fasi della progettazione, verifica numerica e sperimentale di un metamateriale

Design process, numerical evaluation and experimental test of a metamaterial

In altri casi sono stati realizzati sistemi fonoassorbenti per il controllo del rumore adattando la tipologia di sistema così come la scelta del materiale in funzione delle specifiche richieste. Ad esempio, mediante honeycomb e microperforati è possibile rispondere alla necessità di avere strutture leggere e compatte (Fig. 4a), nel caso in cui la prima esigenza sia la sostenibilità mediante materiali ecosostenibili come materiali realizzati in fibre di canapa (Fig. 4b) ovvero sistemi che si integrano in strutture in fibra di vetro (Fig. 4c).

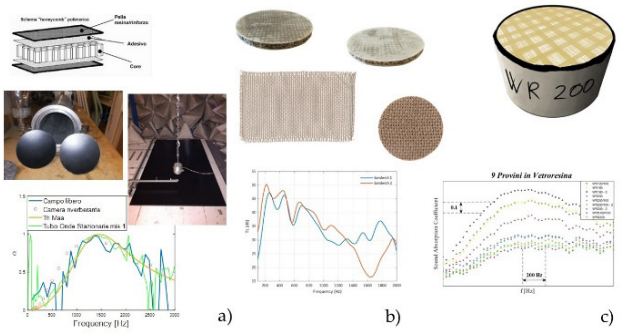


Fig. 4 – Diverse tipologie di sistemi fonoassorbenti. (a) microperforati; (b) compositi in fibre di canapa; (c) composito in fibra di vetro

Different types of sound-absorbing systems. (a) mi-croperforated panel; (b) hemp fiber composite; (c) glass fiber composite

3.3 | Analisi, modellazione di sorgente aeroacustiche

Il problema del rumore derivante da sorgenti aeroacustiche ha assunto un ruolo centrale nella fase di progettazione di diverse tipologie di impianti, tra cui i diffusi HCAV. Le attività di ricerca del LAD in collaborazione con diverse aziende del settore automotive, DENSO Thermal Systems, e industriale, ZLab, si è incentrata sulla caratterizzazione sperimentale delle diverse sorgenti acustiche derivanti da ventole di impianti di condizionamento, oltre che alla definizione di un modello predittivo basato su approcci numerici di fluidodinamica computazionale. In Fig. 5 è possibile osservare il percorso seguito nella fase di modellazione numerica e poi di caratterizzazione sperimentale di uno spettro sonoro derivante dall'interazione di corpi solidi immersi in flussi a bassi numeri di Mach.

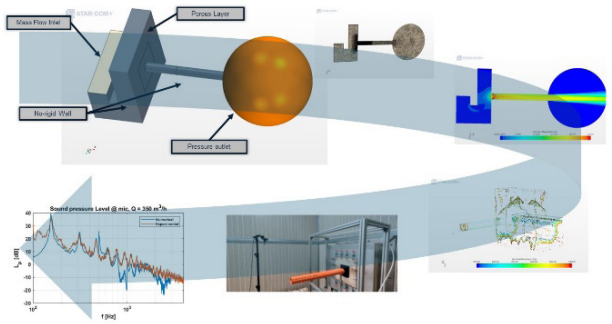


Fig. 5 – Modellazione numerica ed approccio sperimentale seguito nella caratterizzazione dello spettro sonoro dovuto all'interazione fluido-struttura

Numerical modelling and experimental approach followed in characterizing the sound spectrum due to fluid-structure interaction

3.4 | Analisi, modellazione e misurazione di dispositivi termoacustici

La recente crisi energetica connessa agli oramai noti problemi legati al global warming ha motivato l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e il recupero del calore di scarto proveniente dai cicli produttivi. In questo contesto si inseriscono i dispositivi termoacustici [4]. Senza entrare nel dettaglio della descrizione di queste macchine innovative, si vuole sottolineare il contributo di questo laboratorio nello sviluppo di materiali innovativi per la conversione della energia termica in energia acustica, noti come stack o rigeneratori, da utilizzare in sostituzione dei materiali porosi tradizionali con lo scopo di aumentarne le prestazioni. Ispirandosi a microstrutture reali quali le schiume e le fibre, sono state progettate e poi realizzate mediante stampa additiva particolari microstrutture. Ad esempio, materiali fibrosi hanno ispirato la costruzione di microstrutture reticolari inclinate (Fig. 6) [5] e le schiume parzialmente occluse da membrane (Fig. 7).

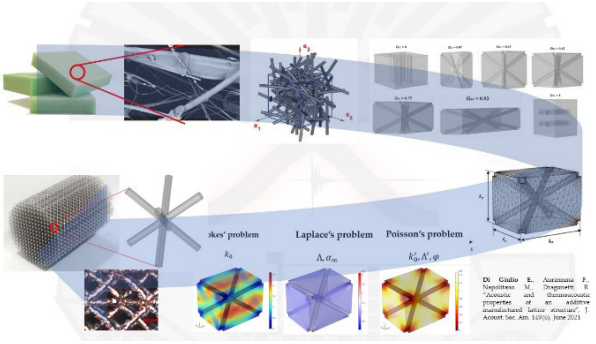


Fig. 6 – Fasi della progettazione e realizzazione di microstrutture reticolari in materiale metallico

Design process and fabrication of micro-lattice structures made of metallic material

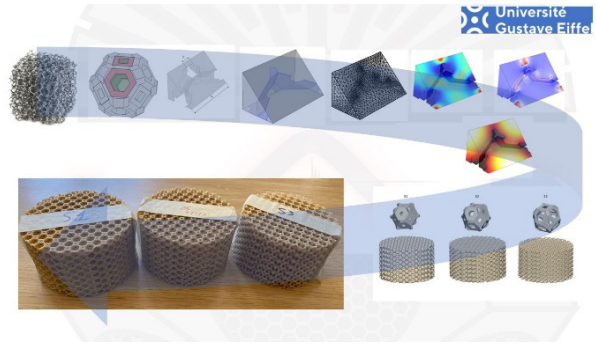


Fig. 7 – Fasi della progettazione e realizzazione di microstrutture in celle parzialmente occluse

Design process and fabrication of micro-structures in partially closed cells

4 | Principali dotazioni sperimentali

Il LAD si è dotato negli ultimi anni di diversi apparati di misura per affiancare l'attività di ricerca, prima esposta, con una intensa attività sperimentale. Di seguito verranno descritte alcune di tali apparecchiature raggruppate per tipologie comuni alle attività di ricerca.

4.1 | Qualità acustica del rumore dei prodotti industriali

I dispositivi per la caratterizzazione della potenza sonora emessa da una qualsiasi sorgente sonora si compongono di un sistema multicanale della National Instruments, numerosi microfoni prepolarizzati o da polarizzare, una sonda intensimetrica. I test di ascolto avvengono mediante le cuffie audiometriche. Inoltre, è stata brevettata una tecnologia che permette di misurare il rumore emesso da un componente industriale a fine line di produzione (EoL) in ambienti di lavoro particolarmente rumorosi. Tale apparecchiatura è stata definita LENC (Low Emission Noise Compensation, vedi Fig. 8) [6].

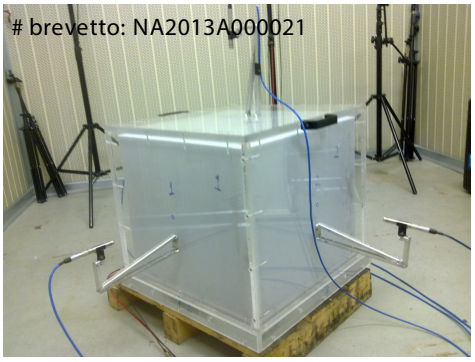


Fig. 8 – Apparecchiatura per il controllo del rumore EoL
EoL noise control equipment

4.2 | Misura delle prestazioni acustiche di sistemi per il controllo del rumore

Per la misura delle prestazioni acustiche dei sistemi utilizzati per il controllo del rumore, il LAD dispone di dotazioni sperimentali innovative per testare le proprietà in ipotesi di campo piano e in campo libero. Nel primo caso il LAD ha ampliato le classiche tecniche di misure mediante il tubo ad onde stazionarie che vedono l'utilizzo di due, tre e quattro microfoni [7,8], vedi Fig. 9. Infatti, senza la necessità di rimuovere il provino dal suo alloggio è possibile testare la resistività al flusso d'aria [9] e, mediante la tecnica a parametri concentrati, conoscere le proprietà viscose e termiche a bassissime frequenze [10,11].



Fig. 9 – Tubo ad onde stazionarie adattato per la misura della resistività al flusso d'aria e le misure a bassa frequenza
Standing-wave tube adapted for airflow resistivity measurement and low-frequency measurements

Inoltre, la particolare forma del porta-provini con la chiusura dall'alto permette di inserire il provino senza deformarlo e assicurarne una condizione al contorno uniforme.

Per le misure in campo libero, è stata perfezionata una tecnica che permette di stimare, oltre che il coefficiente di assorbimento in campo libero, anche la pressione sonora e la velocità riflessa delle particelle per diversi angoli di incidenza [12], come riportato nella Fig. 10. Mediante questa tecnica si vuole evidenziare che è possibile anche effettuare una stima del reale angolo di riflessione del suono.

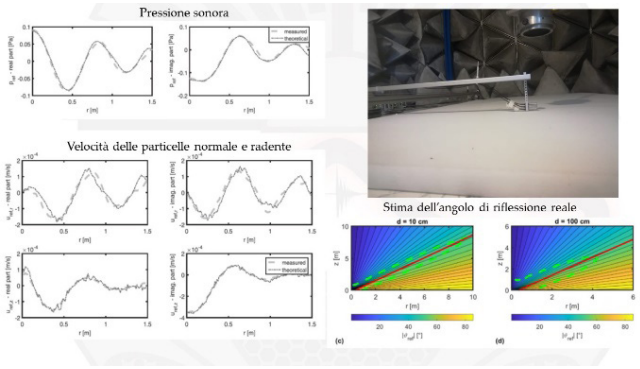


Fig. 10 – Misura automatizzata del campo di pressione e velocità sonora riflesse. Misura del reale angolo di riflessione
Automated measurement of reflected pressure and velocity fields. Measurement of the true reflection angle

Il sistema si compone di un braccio meccanizzato che può scorrere linearmente manovrato da un motore passo-passo azionato mediante un attuatore e comandato da un sistema della NI, programmato interamente presso il LAD. La misura viene effettuata mediante tre microfoni da ¼ della Grass.

4.3 | Dispositivi termoacustici

La Fig. 11 mostra una foto del primo prototipo di dispositivo termoacustico interamente realizzato dal LAD il cui obiettivo è quello di verificare sperimentalmente l'attendibilità delle funzioni termiche e viscose [4] quando in esso vengono utilizzati, come stack, materiali porosi aventi strutture non convenzionali.

Il dispositivo presenta una parte centrale, in cui viene alloggiato il campione da testare, realizzata con un materiale isolante e alle cui estremità deve essere realizzato il gradiente termico necessario per avviare il fenomeno termoacustico. A tale scopo è stata utilizzata una fascia riscaldante dotata di un controllo sulla temperatura e un misuratore di potenza. All'estremità opposta che, invece, deve essere mantenuta a temperatura ambiente, il tubo, per l'intera sua lunghezza è avvolto da una serpentina ad acqua equipaggiata di pompa e flussimetro a ultrasuoni (25FD-XC8R3) per la misurazione della portata. Termocoppie di tipo K e termoresistenze Pt100 sono posizionate in diversi punti per controllare l'andamento della temperatura lungo il dispositivo, mentre per le misurazioni di pressione vengono utilizzati dei microfoni da 1/4".

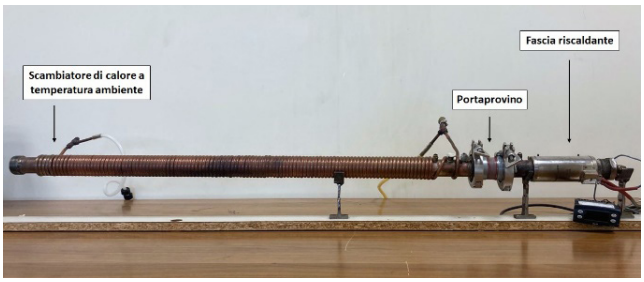


Fig. 11 – Prototipo di dispositivo termoacustico
Thermoacoustic device prototype

5 | Attività di ricerca presso aziende ed all'estero

Negli ultimi decenni il LAD ha intrapreso numerose collaborazioni con i più prestigiosi enti di ricerca all'estero come testimoniato da diversi lavori scientifici: l'Institute for Hearing Technology and Acoustics dell'RWTH di Aachen in Germania [10], il MSME – (Laboratoire Modélisation et Simulation Multi-Echelle) dell'Université Gustave Eiffel in Francia [11], la Tallin University of Technology in Estonia [12]. Inoltre, sono stati stretti accordi per tirocini curriculari extramoenia presso il LAUM – Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans in Francia e di collaborazione scientifica con l'Universidade Federal of Itajuba in Brasile. Negli anni sono stati svolti numerosi seminari tematici ai quali hanno preso parte le più prestigiose aziende nel settore industriale quali: DENSO Thermal System, l'ex FCA, Capgemini Engineering presso Maserati, McLaren, Ferrari, Akkodis e ZLAB.

Bibliografia

[1] R. Dragonetti, C. Ianniello, R.A. Romano, The "Teatro di San Carlo" in Naples and its smaller clone "Teatro Verdi" in Salerno, Article in The Journal of the Acoustical Society of America (2008). https://doi.org/10.1121/1.2932948.

[2] R. Dragonetti, M. Ponticorvo, P. Dolce, S. Di Filippo, F. Mercogliano, Pairwise comparison psychoacoustic test on the noise emitted by DC electrical motors, Applied Acoustics 119 (2017) 108-118. https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2016.12.016.

[3] E. Di Giulio, M. Napolitano, R.A. Romano, A. Scofano, R. Dragonetti, INFLUENCE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY ON THE ACOUSTIC PERFORMANCE OF METAMATERIALS, (n.d.). https://doi.org/10.61782/fa.2023.1004.

[4] R. Dragonetti, M. Napolitano, S. Di Filippo, R. Romano, Modeling energy conversion in a tortuous stack for thermoacostic applications, Appl Therm Eng 103 (2016) 233-242. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.04.076.

[5] E. Di Giulio, F. Auriemma, M. Napolitano, R. Dragonetti, Acoustic and thermoacoustic properties of an additive manufactured lattice structure, J Acoust Soc Am 149 (2021) 3878-3888. https://doi.org/10.1121/10.0005085.

[6] R. Dragonetti, A. Lepore, S. Di Filippo, F. Mercogliano, R.A. Romano, Statistical considerations on stationary-random noise propagating through a solid medium, Https://Doi.Org/10.1177/1077546316662168 24 (2016) 1505-1517. https://doi.org/10.1177/1077546316662168.

[7] Y. Salissou, R. Panneton, O. Doutres, Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones, J Acoust Soc Am 131 (2012) EL216. https://doi.org/10.1121/1.3681016.

[8] B.H. Song, J.S. Bolton, A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials, J Acoust Soc Am 107 (2000) 1131. https://doi.org/10.1121/1.428404.

[9] R. Dragonetti; C. Ianniello; R. A. Romano, Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method, J Acoust Soc Am 129 (2011) 753-764.

[10] E. Di Giulio, M. Napolitano, A. Di Meglio, R.A. Romano, R. Dragonetti, Low frequency acoustic method to measure the complex density of porous materials, J Acoust Soc Am 152 (2022) 2220. https://doi.org/10.1121/10.0014762.

[11] M. Napolitano, E. Di Giulio, F. Auriemma, R.A. Romano, R. Dragonetti, Low frequency acoustic method to measure the complex bulk modulus of porous materials, J Acoust Soc Am 151 (2022) 1545–1556. https://doi.org/10.1121/10.0009767.

[12] R. Dragonetti; M. Napolitano; R.A. Romano, A study on the energy and the reflection angle of the sound reflected by a porous material, J Acoust Soc Am 145 (2019), 489–500.

[13] E. Di Giulio, C.T. Nguyen, C. Perrot, R. Dragonetti, Wire mesh stack and regenerator model for thermoacoustic devices, Appl Therm Eng 221 (2023) 119816. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119816.

[14] F. Auriemma, E. Di Giulio, M. Napolitano, R. Dragonetti, Porous Cores in Small Thermoacoustic Devices for Building Applications, Energies 2020, Vol. 13, Page 2941 13 (2020) 2941. https://doi.org/10.3390/en13112941

PRIN: Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale. OUTFIT – crOwdsoUrced daTa Feeding noise maps in dIgital Twins

Elena Ascari[a] | Pasquale Gorrasi[a]*

[a] Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i processi chimico-fisici Via Giuseppe Moruzzi, 1, 56124 Pisa
* Autore di riferimento: pasquale.gorrasi@pi.ipcf.cnr.it

Ricevuto: 20/9/2024
Accettato: 1/10/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18830
ISSNe: 2385-2615

Il progetto OUTFIT, finanziato dal bando PRIN 2022 prevedono la realizzazione prototipale di una mappa acustica dinamica del rumore stradale in un digital twin (DT). Il DT integrerà i dati crowdsourced alla base della mappa dinamica con i risultati dei livelli di rumore e ulteriori elaborazioni, consentendo una visione aumentata della situazione corrente e potenzialmente di relative misure di mitigazione favorendo la visione dei decisori politici e la consapevolezza dei cittadini.
Parole chiave: rumore stradale, mappa dinamica, dati crowd source, gemelli digitali

PRIN: Research Projects of Relevant National Interest. OUTFIT – crOwdsoUrced daTa Feeding noise maps in dIgital Twins
The OUTFIT project, funded by national PRIN 2022 aims at realizing a prototypal dynamic noise map of road traffic noise within Digital twin (DT). DT will include crowd source input data with output noise levels, allowing an enhanced view of actual noise levels and issues and potentially the effects of noise mitigation measures. This will boost the comprehension of current issues by policy makers and citizens.
Keywords: road traffic noise, dynamic map, crowd sourced data, digital twins

1 | Introduction

Il progetto OUTFIT è un progetto congiunto finanziato dall'Unione Europea tramite il bando PRIN 2022 in cui sono coinvolti l'istituto IPCF del CNR, il Dipartimento di Informatica dell'Università di Pisa ed il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento. Il progetto ha come obiettivo la rappresentazione dinamica del rumore stradale in un modello 3D Digital Twin attraverso l'ottimizzazione del flusso di dati relativo al rumore.

2 | Background

La stima del rumore del traffico stradale è normata sia a livello italiano che Europeo e la END fornisce i modelli di calcolo per le mappature, tuttavia negli anni è emersa la necessità di andare oltre gli indicatori medi con i quali solitamente si stabiliscono i piani di azione. La ricerca è andata verso la mappatura dinamica per poter intercettare bisogni dei cittadini non visibili con indicatori di lungo periodo e si è mostrato necessario fornire ai decisori politici un metodo di visualizzazione dei problemi e delle soluzioni che sia facilmente intuitivo e comprensibile.

Il Digital Twin urbano è uno strumento utilizzato per assistere i decisori nelle scelte riguardanti la pianificazione urbana, gli interventi di potenziamento della sostenibilità e l'ottimizzazione delle infrastrutture.

I dati utilizzati per sviluppare un rendering dinamico del rumore del traffico sono stati i dati crowd, cioè dati provenienti da fonti collettive, in particolare sono stati utilizzati i dati sui tempi di percorrenza forniti da Google Maps.

3 | Obiettivi

Gli obiettivi del progetto sono:

- Realizzazione di un database del traffico stradale ottenuto da dati crowdsourcing da utilizzare come input per lo sviluppo di un modello che stimi RTN.
- Ottimizzazione dei flussi di dati per permettere l'elaborazione dinamica dei dati del traffico e il rende-ring del rumore.
- L'output finale del progetto è un modello riproducibile tramite il quale sviluppare un Digital Twin in 3D con rendering dinamico del rumore e un sistema API per consentire l'interoperabilità degli open data del sistema OUTFIT.

4 | Elaborazione del flusso di dati

Sono stati selezionati 97 archi stradali nel centro di Pisa ed è stato sviluppato un codice in linguaggio Python in grado di effettuare una richiesta di dati (chiamata API) temporizzata al servizio di Google API Direction per ottenere i tempi di percorrenza su ogni arco ed aggiornarlo ogni 10 minuti.

A partire da questi tempi di percorrenza abbiamo derivato le velocità ed i flussi equivalenti di auto/furgoni/moto. Servendoci del modello CNOSSOS-EU abbiamo elaborato una griglia di rumore che ci permette di calcolare il livello di rumore assorbito da ogni punto sulla base dei flussi dinamici acquisiti, applicando una matrice di attenuazione del rumore in dipendenza delle caratteristiche spaziali dell'area circostante alla sorgente di rumore calcolata a priori.

La stima del calcolo al ricevitore (vedi Fig. 1) è costituita dalla somma energetica di due contributi distinti, la stima della

potenza sonora degli archi che viene ottenuta dinamicamente e la stima della propagazione che viene ottenuta tramite matrice di abbattimento generata in software commerciale.

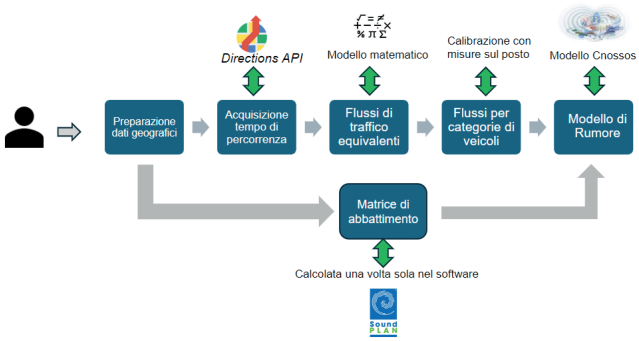


Fig. 1 – Flusso di dati dalla chiamata API ai livelli sonori
Data flow from API call to sound levels

Il risultato intermedio, prima dello sviluppo del Digital Twin, è quello di una mappa dinamica dei punti di ricezione del rumo-re stradale posti in facciata agli edifici nell'area urbana di Pisa. L'intensità del rumore assorbito da ogni punto è visualizzata attraverso una scala cromatica (vedi Fig. 2).

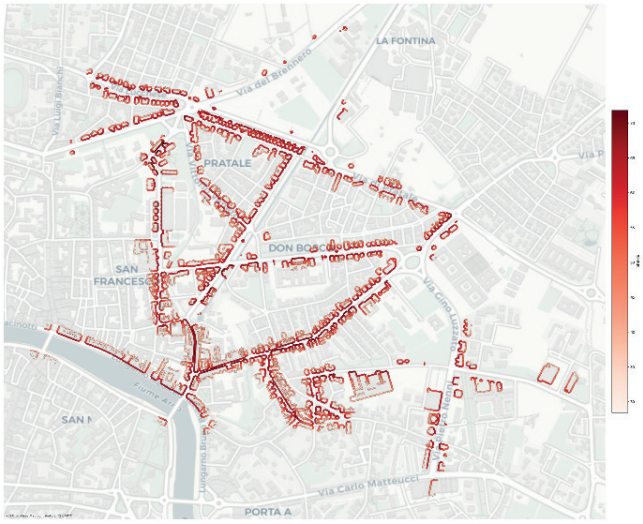


Fig. 2 – Esempio di istante temporale della mappa dei ricevitori
Example of a time instant of the receiver map

5 | Conclusioni e prospettive

Nell'area di Pisa sarà effettuata una misurazione dei flussi di traffico reali tramite l'installazione di dispositivi contatraffico e sensori basati su telecamere, necessari per calibrare il modello sviluppato finora ed avere un riscontro tra i livelli di rumore stimati partendo dai dati Google e quelli reali. La valida-zione del modello di traffico sviluppato nell'area di Pisa verrà poi effettuata nell'area urbana di Brindisi, dove l'Università del Salento ha progettato il Digital Twin.

Nell'ambito del Digital Twin potranno essere visualizzati:

- i dati di traffico acquisiti dal data stream;
- dati dei livelli di rumore stradale richiesti dalla normativa;
- le segnalazioni dei cittadini inerenti il rumore pro-venienti dai dati raccolti tramite social media e web data;
- elaborazioni di indicatori di salute legati all'inquinamento acustico nelle zone maggiormente esposte al rumore stradale.

Il progetto vuole definire potenzialità e limiti dell'approccio crowd ed è attualmente in una fase iniziale di sviluppo da parte dei partner coinvolti.



Fig. 3 – Logo di Programma e partners coinvolti
Program Logo. and partners involved

Acoustic performances of Test Cases developed within iclimabuilt project: an open innovation test bed for building envelope materials

Andrea Gerbotto[a]* | Louena Shtrepi[a] | Fabio Favoino[a] | Arianna Astolfi[a]

[a] Department of Energy,
Politecnico di Torino,
Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino
* Corresponding author:
andrea.gerbotto@polito.it

Ricevuto: 15/10/2024
Accettato: 4/11/2024

DOI: 10.3280/ria2-2024oa18830
ISSNe: 2385-2615

iclimabuilt project aims to form a cross-domain business ecosystem to support small and medium enterprises in scaling-up innovative sustainable building products and cope with the continuous rise of technological complexity by providing a single-entry point for necessary infrastructures and tools to test, validate and upscale new technological solutions. The consortium combines the capabilities of different experts, building the connection between technology suppliers and final users, based on the cooperation within interdisciplinary entities to support new product development/upscaling and testing, satisfy customer needs based on a case-by-case assessment of the underlying barriers of each technology, and eventually incorporate the next round of innovations in building envelope materials and technical systems into living labs.
Keywords: decarbonisation, sustainable building envelope technologies, testing, building performance simulations, validation in living labs

Prestazioni acustiche di componenti edilizi sviluppati nel progetto iclimabuilt, un laboratorio per l'innovazione per materiali dell'involucro edilizio
Il progetto iclimabuilt mira a formare un ecosistema aziendale interdisciplinare per supportare le piccole e medie imprese nello sviluppo di prodotti edilizi sostenibili innovativi e far fronte al continuo aumento della complessità tecnologica fornendo un punto di accesso unico per le infrastrutture e gli strumenti necessari per testare, convalidare e potenziare nuove soluzioni tecnologiche. Il consorzio unisce le capacità di diversi esperti, creando la connessione tra fornitori di tecnologia e utenti finali, sulla base della cooperazione all'interno di entità interdisciplinari per supportare lo sviluppo e il test di nuovi prodotti, soddisfare le esigenze dei clienti sulla base di una valutazione caso per caso delle barriere sottostanti di ciascuna tecnologia e infine incorporare il prossimo ciclo di innovazioni nei materiali dell'involucro edilizio e nei sistemi tecnici nei laboratori viventi.
Parole chiave: decarbonizzazione, tecnologie di involucro edilizio sostenibile, test, simulazioni delle prestazioni degli edifici, convalida in living labs

1 | Introduction

Buildings account for approximately 40% of total energy use and 36% of CO_2 emissions in Europe. According to the Recast Directive on the Energy Performance of Buildings (EPBD), all new buildings after 2020 should meet nearly zero-energy standards. This means they must have very low energy needs, primarily met by renewable energy sources. The EU's 2030 targets include at least a 40% reduction in greenhouse gas emissions (compared to 1990 levels), a 32% share of renewable energy, and a 32.5% improvement in energy efficiency, aiming to reduce greenhouse gas emissions by 80% by 2050.

From 2010 to 2016, energy consumption in buildings increased from 33 PWh to 34.5 PWh, driven by the growing floor area, which outpaced reductions in energy intensity. Therefore, there is an urgent need for a deep market transformation by deploying efficient materials and technologies in the construction sector. This is essential to support the implementation of nearly zero-energy/emission and plus-energy buildings while maintaining high indoor environmental quality across Europe. Since energy consumption in buildings is highly influenced by climate and local weather conditions, additional factors, such as environmental, technical, user experience, and design aspects, must be considered when selecting materials and technical components to successfully implement nearly zero-energy buildings (nZEBs). Furthermore, this selection of materials and design must adopt a circular economy approach, considering environmental, economic, and social impacts across value chains. A transition from a linear to a circular economy, focusing on reuse, repair, and recycling, is vital for better utilization of resources and products. In this challenging and complex context, SMEs (Small and Medium Enterprises) in the construction sector, are facing different challenges in developing, upscaling and introducing into the market new building products and solutions that could help in the decarbonisation objectives. They would need to cope with (i) the rising of technological complexity and related charac-

terisation and testing of the performance required by the materials and systems developed; (ii) the ten-fold increase in investment needed to pass from a lower to higher Technological Readiness Level, especially passing from a small scale prototype (TRL 4) to a full-scale prototype demonstrated in relevant environment (TRL 6-7) [1]; (iii) the challenges posed by the digitalization, rising energy prices, and competition from non-European, low-labour-cost countries, which require additional investment and innovation strategies. To address these needs, the European H2020 iclimabuilt project aims to realize an Open Innovation Test Bed as an ecosystem to foster upscale innovative building envelope solutions within the building industry, by providing a single-entry-point for multi-services for SMEs, focused on:

- materials development (for improved performance of building envelope solutions);
- design and assembly of technical systems (customizable, flexible, modular and de-mountable designs);
- Virtual Performance testing (multi-physics and multi-scale building performance simulations);
- Sustainability and Health and Safety Assessment of materials and building envelope systems;
- monitoring and characterization strategies and services to support decision-making (fully monitored living labs and non-residential nZEBs);
- refined and expedited access to financing solutions to reinforce the competitiveness and extroversion of SMEs.

iclimabuilt goes beyond material-level advancements, supporting the energy transition of Europe's building stock. The project aims to take a holistic approach, viewing buildings as systems and maximizing energy-saving opportunities while using smart and energy-harvesting systems to meet the remaining energy demand as much as possible. Through this systematic approach and services, iclimabuilt aims to contribute to the cost-effective transformation of existing building stock into nearly zero-energy buildings. Among the tools and methodologies developed within the project, virtual retrofitting has been applied through Building Information Modeling (BIM) solutions, enabling the modelling of buildings and performing multiple analyses. This allows for energy performance predictions and comparisons of design alternatives, leading to better decision-making. Multiphysics simulations have been used to analyze building envelopes and predict material properties. Additionally, iclimabuilt has developed and verified robust monitoring approaches, tools, and methodologies for long-term, in-field monitoring. This helps demonstrate and validate the performance of different building envelope technologies in full-scale living laboratories.

These methods support product development for optimal building integration of smart materials and building envelope components, involving both iclimabuilt partners (as an internal validation of the eco-system) and external SMEs through an open call that was closed on Jan 24, with eight projects financed (as an external validation of the services of the eco-system).

2 | Test Cases – Acoustic performance

Within the project Politecnico di Torino was responsible for coordinating the laboratory testing of all the developed materials and building systems, to conduct thermal, solar and acoustic characterization at laboratory level, using simulation, and also in living lab scale, within their living lab. This section will focus on the description of the acoustic characterization activities.

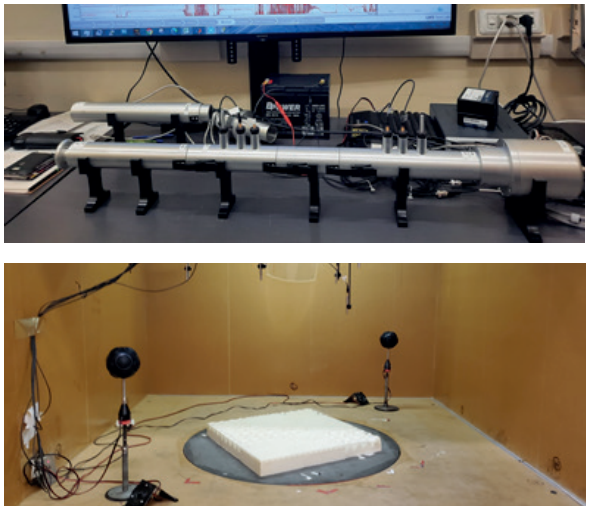


Fig. 1 – Acoustic characterization: transmission loss in impedance tube (a) absorption in scaled reverberant chamber (b)
Caratterizzazione acustica: fonoisolamento con tubo ad impedenza e assorbimento in camera riverberante in scala



Fig. 2 – Laboratory and in situ test of sound reduction index R
Misure in laboratorio e in situ del potere fonoisolante R

The designated partners developing the Pilot Lines, in collaboration with research centers and universities within the Consortium, have completely characterised raw materials. The characterizations have encompassed transmission loss, absorption, and scattering coefficients, employing various characterization techniques. The acoustic performance and characterization of the different building components developed within the iclimabuilt project (specifically building

panels and components of Multifunctional Composite Sandwiches, eco-friendly concrete-based and insulation materials, as well as the performance of 3D-printed components) have been assessed through laboratory testing for sound absorption and scattering in a scaled reverberation room at the Politecnico di Torino (POLITO) laboratoriescommon acoustic materials only offer limited options for customizable geometrical features, performance, and aesthetics. This paper focuses on the sound absorption performance of highly customizable 3D-printed Hybrid Acoustic Materials (HAMs. Additionally, sound insulation has been tested using impedance tubes at POLITO [2]common acoustic materials only offer limited options for customizable geometrical features, performance, and aesthetics. This paper focuses on the sound absorption performance of highly customizable 3D-printed Hybrid Acoustic Materials (HAMs and standard ISO 10140 procedures at the HTWK (Leipzig) lab, on a innovative heat harvesting ventilated window component.

Given the inherent challenges of in situ acoustic measurements (including scale and flanking effects) and the costs associated with laboratory tests, standard methods have been compared with more suitable methodologies for in-situ testing, such as sound intensity measurements or continuous monitoring. To validate these procedures, comparative testing has been conducted on specific test cases between two Living Labs [3] (Turin and Trondheim) and the HTWK lab, where the same test case has been evaluated using the sound intensity method and the standard ISO 10140 method.

Multiphysics simulations have also been conducted to create virtual prototypes for quantifying the acoustic performance of integrated building envelope components (such as wall blocks, sandwich panels, and window frames) under various facade integration and boundary conditions. This work has utilized general-purpose multiphysics software, such as COMSOL, alongside specific acoustic modeling tools like INSUL. These have been analysed following an integrated approach into building performance simulation (BPS) software at a larger scale using Grasshopper and Revit, with the Rhino Inside plug-in.

3 | Pilot Lines

Within the iclimabuilt project, different Pilot Lines are developed using the services of the ecosystem:

- Phase Change Materials (PCMs);
- Thermoelectric Generators (TEGs);
- Multifunctional Composite Sandwiches (MCS);
- Solar-active Envelope (SAE) materials and structures for Building Integrated Photovoltaics and Solar thermal systems;
- Customizable 3D-printed components for well-being;
- Advanced cement-based materials for wall facades;
- Insulation components from wastes;
- Aerogels (AGs);
- Omniphobic coatings.

All the selected technologies have reached innovation maturity and are among the most promising advanced materials with proven technical feasibility to provide viable efficient energy-efficient solutions for the buildings of tomorrow. They are fully characterized and integrated into building envelope components within the project.

4 | Living Labs

Validated material technologies and technical systems have been integrated into advanced climate-adaptive façades and used as demonstration cases to evaluate these new solutions in a controlled experimental environment. Pilot buildings, located at real residential and non-residential construction sites, have been identified across five climate zones in Europe to serve as evaluation sites for the developed solutions to test their effectiveness in close-to-reality use cases and involving final users (Living Labs). These sites are:

- Amposta, Spain;
- Manresa, Spain;
- Turin, Italy;
- Dresden, Germany;
- Trondheim, Norway.

Each building site is a hub for material and component combinations tailored to specific climate and performance objectives. Energy performance assessments of the developed systems at both component and building scales have been conducted, considering energy efficiency improvements, thermal comfort, daylight, air quality and acoustic comfort improvements. Real-world impacts and feedback from residents on the demonstrated technologies have also been considered.

5 | Project partners

The project is coordinated by Costas Charitidis (National Technical University of Athens, Greece) and the partners (Fig. 3), from 14 EU countries, are 16 RTOs (Research and Technology Organisations), with 7 Universities, and 11 SMEs (Small and Medium-sized Enterprises), presented at https://iclimabuilt.eu/partners/



Fig. 3 – Partners map
Mappa dei partner

6 | Acknowledgements

The Authors would like to thank the partners of the project developing building materials and components, which were characterised from an acoustic point of view within the project, such as HTWK, INEGI, TUHH, BGTech, BioG3D and Rubitherm.

Bibliography

[1] J. Hensen, R. Loonen, M. Archontiki, M. Kanellis, Using building simulation for moving innovations across the “Valley of Death,” REHVA Journal 52 (2015) 58-62.

[2] V. Tsiokou, L. Shtrepi, E. Badino, A. Astolfi, A. Karatza, Exploratory Acoustic Investigation of Customizable 3D-Printed Hybrid Acoustic Materials (HAMs) through Interlaboratory Impedance Tube Measurements, Acoustics 5 (2023) 653-675. https://doi.org/10.3390/acoustics5030040.

[3] L. Shtrepi, A. Gerbotto, F. Favoino, A. Astolfi, Sound insulation characterisation of innovative natural ventilated façade in the context of living lab installations, Inter Noise 270 (2024) 10094-10102. https://doi.org/10.3397/IN_2024_4388.

Rivista Italiana di Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

EDITORIALE/EDITORIAL

La nuova Rivista Italiana di Acustica: un primo bilancio
Carletti et al.

ARTICOLI SCIENTIFICI/SCIENTIFIC PAPERS

The ECODRIVE Project: controlling and managing traffic for reducing noise from private road transport
Bellucci et al.

Ottimizzazione dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici: applicazione al Parco Regionale della Valle del Ticino
Guagliumi et al.

Rassegna dei metodi di analisi della sostenibilità applicabili alle misure di mitigazione sonora
Bellucci et al.

NOTE TECNICHE/TECHNICAL NOTES

Acoustic design of a modular studio box for use as control and mixing room for immersive audio
Cicero

Indagine sperimentale sul rumore intrinseco della strumentazione nelle misurazioni fonometriche e la misurazione a livelli sonori molto bassi
Cerniglia et al.

LETTERE ALL'EDITORE/LETTERS TO THE EDITOR

Lettera all'editore su "Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà"
Ponteggia

VITA DELL'ASSOCIAZIONE/LIFE OF THE ASSOCIATION

Resoconto del 50° Convegno Nazionale AIA
Licitra et al.

VIAGGIO NEI LABORATORI DI ACUSTICA/ACOUSTIC LABORATORY TOUR

Viaggio nei Laboratori di Acustica: Università di Napoli Federico II
Dragonetti et al.

PROGETTI DI RICERCA IN ACUSTICA/ACOUSTICS RESEARCH PROJECTS

PRIN: Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale. OUTFIT – crOwdsoUrced daTa Feeding noise maps in dIgital Twins
Ascari et al.

Acoustic performances of Test Cases developed within iclimabuilt project: an open innovation test bed for building envelope materials
Gerbotto et al.

FrancoAngeli
La passione per le conoscenze

Edizione fuori commercio
R9504.2024.2

FrancoAngeli srl. - Vle Monza 106 - 20127 Milano - Poste Italiane Spa - Sped. in Abb. Post. - D.L. 353/2003 (con. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1 DCB Milano
II semestre 2024 - v. 48, n. 2/2024