

Protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule, dotate di impianto elettroacustico, del patrimonio edilizio dell'Università di Bologna

Matteo Spinelli^{a*} | Luca Barbaresi^a | Alessia Nora^a | Virginia Tardini^a

^a Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Bologna,
Viale del Risorgimento, 2, 40136 Bologna

* Autore di riferimento:
matteo.spinelli5@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2025

Accettato: 22/5/2025

On line first: 18/9/2025

DOI: 10.3280/riaof-2025oa19516

ISSN: 2385-2615

Vi è una consolidata letteratura scientifica sui parametri e sugli indicatori acustici idonei a descrivere la qualità di un ambiente scolastico ed in particolare di aule universitarie. L'acustica di una sala dipende dalle caratteristiche geometriche, architettoniche, dalla disposizione di materiali e, se presente, dall'impianto di amplificazione. Raramente quest'ultimo componente viene considerato in fase progettuale, ma risulta fondamentale per garantire il comfort acustico in aule di grandi dimensioni. Il lavoro presenta l'elaborazione di un protocollo, sviluppato in itinere dalla misura di 17 aule dell'università di Bologna. Lo scopo è l'analisi degli impianti elettroacustici presenti all'interno delle aule dell'ateneo. Dai risultati si evince che solo una minoranza delle stesse siano conformi ai requisiti di intelligibilità. Il protocollo risulta un utile strumento per la valutazione di grandi plessi didattici, in un'ottica di programmazione degli interventi di ammodernamento degli impianti elettroacustici.

Parole chiave: intelligibilità del parlato, impianti elettroacustici, acustica delle aule universitarie

Experimental protocol for the evaluation of speech intelligibility in classrooms, equipped with PA systems, of the University of Bologna heritage buildings

There is well-established scientific literature on acoustic parameters and indicators suitable for describing the quality of educational environments and in particular university classrooms. The acoustics of a room depends on geometric and architectural features, the arrangement of materials, and, if present, the amplification system. The latter component is rarely considered in the design phase, but it is crucial to ensure acoustic comfort in large classrooms. The paper presents the elaboration of a protocol, developed during the measurement of 17 classrooms at the University of Bologna. The purpose is the analysis of the electroacoustic systems present within the university's classrooms. The results show that only a minority of them comply with speech intelligibility requirements. The protocol turns out to be a useful tool for the evaluation of large teaching halls, with respect to the planning of electroacoustic system upgrades.

Keywords: speech intelligibility, public address systems, acoustic of university classrooms

1 | Introduzione

La corretta valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule scolastiche è un'esigenza di primaria importanza, specialmente in un contesto in cui la diversità linguistica degli studenti richiede condizioni acustiche ottimali per l'apprendimento. Un'aula con una scarsa intelligibilità del parlato favorisce l'incremento della *Student Activity*, il rumore prodotto dagli studenti durante le lezioni [1]. Ciò comporta un incremento dello sforzo vocale da parte del docente [2, 3] e una maggiore difficoltà di comprensione per gli studenti, in particolare per quelli non madrelingua [4]. Pertanto, la progettazione dell'acustica di tali ambienti risulta fondamentale per garantire un'esperienza didattica inclusiva ed efficace.

Il presente articolo descrive le fasi di sviluppo e validazione di un protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule. L'idea è quella di fornire un metodo sistematico e replicabile per valutare le caratteristiche degli impianti elettroacustici presenti all'interno di un consistente

numero di aule del patrimonio edilizio dell'Alma Mater Studio-
rum Università di Bologna. Per fare ciò si è partiti dal misurare 17 aule della facoltà di Ingegneria, suddivise nei plessi Bertalia e Risorgimento. Queste aule presentano differenze sia nelle caratteristiche geometriche, sia nella disposizione e tipologia degli impianti elettroacustici installati.

La valutazione delle aule è stata effettuata attraverso una campagna di misure, il più possibile in linea con le norme vigenti internazionali, come la ISO 3382-2 [5], la IEC 60268-16 [6] e nazionali, ovvero la UNI 11532-2 [7]. Tuttavia, le aule misurate sono aule in uso, attualmente utilizzate per la didattica universitaria; questo riduce notevolmente il tempo a disposizione per svolgere le misure. Si è reso necessario individuare una metodologia di misura più snella rispetto a quelle delineate nelle normative sopracitate. L'intenzione è quella di creare uno strumento che possa affiancarsi a quelli già presenti nel panorama normativo, fornendo una metodologia per la valutazione degli impianti elettroacustici installati in aule in uso.

Il protocollo sperimentale descritto in questo lavoro di tesi si basa su una serie di rilievi in opera per acquisire le caratteristiche geometriche delle aule, fornire una descrizione degli impianti tecnologici installati, individuare i trattamenti acustici presenti all'interno dell'aula ed infine concentrarsi sulla caratterizzazione dell'impianto elettroacustico.

L'introduzione di questo protocollo sperimentale si colloca in un contesto più ampio di sensibilizzazione verso l'importanza della qualità acustica negli ambienti educativi [8,9]. In un periodo in cui l'innovazione tecnologica sta trasformando la didattica, con l'introduzione di strumenti digitali e multimediali è fondamentale garantire che tali dispositivi siano progettati e installati in modo corretto per migliorare l'intelligibilità del parlato. A questo proposito, il lavoro approfondisce le problematiche legate alla corretta installazione degli impianti elettroacustici, un aspetto cruciale per ottimizzare il comfort acustico di un'aula [10, 11].

La finalità del protocollo, una volta applicato su larga scala all'interno dell'Ateneo, è quella di identificare le aule che hanno necessità di un intervento prioritario rendendo possibile la stesura di un cronoprogramma e una corretta pianificazione economica degli interventi stessi.

2 | Cenni teorici

Lo Speech Transmission Index o indice di trasmissione del parlato, STI, è una grandezza fisica che rappresenta la qualità della trasmissione del parlato, il percorso acustico o elettroacustico tra oratore ed ascoltatore, in relazione all'intelligibilità. Esso varia tra un valore minimo di 0 ad un massimo di 1. La normativa internazionale di riferimento per l'applicazione di questo parametro è la IEC 60268-16 [6]. La normativa italiana UNI 11532-2 [7] prescrive, per aule con un volume superiore ai 250 m³, la verifica dell'indice di trasmissione del parlato, in particolare il limite inferiore di accettabilità per aule con impianto di amplificazione elettroacustico è 0.6.

Lo *Speech Transmission Index* rappresenta un modello idealizzato di comunicazione verbale, in cui l'oratore utilizza un profilo vocale standardizzato basato su uno spettro tipico del parlato maschile, caratterizzato da un'articolazione chiara e da una velocità nominale compresa tra 3 e 4 sillabe al secondo. L'impiego della voce maschile nel modello è motivato dal fatto che essa è mediamente meno intellegibile della voce femminile. Si assume inoltre che l'ascoltatore e l'oratore siano madrelingua con capacità uditive normali. Il parlato presenta rapide variazioni temporali, dette modulazioni, che si manifestano come fluttuazioni dell'involuppo dell'intensità del segnale. Le modulazioni lente sono associate a strutture linguistiche maggiori, come parole e frasi, mentre quelle rapide corrispondono ai singoli fonemi. Lo STI si fonda su evidenze empiriche che attribuiscono a tali modulazioni il trasporto delle informazioni più rilevanti per l'intelligibilità del parlato [12-14].

Le distorsioni introdotte al canale di trasmissione vocale, quali riverbero, eco, auto-gain, compressione e *limiting*, unitamente al rumore di fondo, alterano il segnale vocale originale,

compromettendone l'intelligibilità. Il degrado delle modulazioni è direttamente correlato alla potenziale intelligibilità del parlato, ed è proprio su questa relazione che si basa il modello STI, il quale valuta quanto efficacemente tali modulazioni vengano preservate. L'effetto del canale sull'involuppo di intensità del segnale vocale è descritto dalla *Modulation Transfer Function*, MTF, (eq. 1), che quantifica la capacità del sistema di trasmettere le fluttuazioni di ampiezza del segnale.

$$m(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi f_m \frac{T}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-\rho}{10}}} \quad (1)$$

Dove:

- f è la frequenza di centro banda;
- f_m è la frequenza di modulazione;
- T è il tempo di riverberazione (s);
- ρ è il rapporto segnale rumore SNR (dB).

Il segnale di test STI completo, *full STI*, è composto da segnali di rumore rosa distribuiti su sette bande di ottava, che vanno da 125 Hz a 8 kHz. Questi segnali, chiamati portanti di rumore, *noise carriers*, sono modulati con una o più frequenze di modulazione, da 0.63 Hz a 12.5 Hz. In totale, si ottengono 98 valori, che corrispondono alle 14 frequenze di modulazione e alle sette bande di ottava. Ogni banda di frequenza contribuisce all'intelligibilità del parlato con un peso specifico. L'indice STI complessivo viene calcolato come somma ponderata degli indici di trasmissione delle singole bande [15].

La Modulation Transfer Function (MTF, eq. 1) descrive la riduzione delle modulazioni del parlato originale in funzione della frequenza di modulazione. Tali modulazioni sono definite dall'involuppo di intensità del segnale, poiché è in questo dominio che fenomeni come il rumore di fondo e la riverberazione agiscono riducendo l'ampiezza della modulazione sinusoidale, senza alterarne la forma [16].

Il segnale di test per la misura dello STI può essere semplificato escludendo le bande di ottava correlate tra loro. Questa semplificazione consente la modulazione simultanea e l'elaborazione parallela delle bande, riducendo significativamente i tempi di misura, ma limitando al contempo la capacità del sistema di rilevare alcune forme di distorsione non lineare [17].

Il metodo STIPA, *Speech Transmission Index for Public Address systems*, è validato solo per lo spettro vocale maschile, esso risulta adatto per la misurazione parlato sia naturale in ambiente che con l'ausilio di impianti elettroacustici. La durata della misurazione deve essere di circa 18 secondi, con un intervallo raccomandato tra 15 e 25 secondi, questo permette di ridurre notevolmente i tempi di misura rispetto al *full STI* che richiede circa 15 minuti.

3 | La metodologia di campionamento

La difficoltà principale riscontrata durante la campagna di misure è stata la disponibilità ridotta delle aule. Infatti, in condizioni di aula attiva, raramente è possibile avere le suddette

a disposizione per più di 45 minuti effettivi. Tale esigenza ha posto la base per la valutazione di un protocollo di misure più speditivo che potesse essere in linea con il calendario didattico dell'ateneo, senza interferire con le attività.

In base alla superficie calpestabile dell'aula da campionare si è scelto di utilizzare una griglia 3x3 o una 4x3, per creare la mappa delle posizioni di misura. Si ottengono quindi o 9 o 12 acquisizioni distinte, rappresentanti una soluzione intermedia tra i requisiti della UNI 11532-2 che ne prevede almeno 5 e la ISO 3382-2 che ne prevede 12 per le misure effettuate seguendo lo standard *precision*. In aule irregolari o con le posizioni centrali come zona di passaggio si è sfalsata la griglia in modo da avere comunque una certa regolarità, mantenendo le posizioni di misura nei punti effettivi in cui gli studenti siedono. Si sono utilizzati più punti di misura dell'indice di trasmissione del parlato rispetto a quelli prescritti dalla normativa italiana con l'intento di verificare l'uniformità, in termini di scarto tipo, del valore misurato.

Si è incluso nella griglia di misura anche la posizione con più alto rumore di fondo, spesso locata vicino al proiettore o in prossimità degli impianti di climatizzazione.

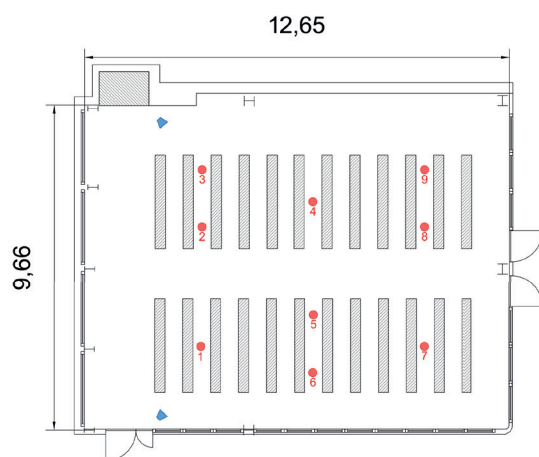


Fig. 1 – Esempio di un'aula con campionamento sfalsato, in rosso le posizioni di misura, in blu i diffusori acustici

An example of a classroom with staggered sampling is in red, and the measurement positions and the acoustic speakers are in blue

La capsula del microfono è stata posta ad una distanza di 1.2 metri da terra che corrisponde all'altezza dell'orecchio di un uomo medio in posizione seduta.

Prima di procedere con le misure dei parametri acustici è necessario rilevare alcune caratteristiche geometriche fondamentali all'indagine, quali, l'altezza media della stanza e la superficie calpestabile.

La strumentazione utilizzata durante le misure è composta da:

- Fonometro analizzatore NTI XL2;
- Generatore di segnale NTI Minirator;
- Calibratore classe 1.

Il generatore di segnale è collegato all'impianto elettroacustico installato nell'aula in uno degli ingressi del centro di regolazione dei livelli (mixer o preamplificatore a seconda del caso).

È stata rilevata una evidente non standardizzazione delle tipologie dei canali di input e controllo dei sistemi di amplificazione.

Si è poi controllato che il guadagno del preamplificatore non fosse troppo elevato, questo infatti, comporterebbe una distorsione del segnale in ingresso e invaliderebbe la misura. Si è poi passati alla verifica e all'eliminazione, ove possibile, dei controlli di tono, in quanto anche questi influenzano negativamente la prova [6]. Infine, si è regolato il volume dell'amplificatore integrato per raggiungere il livello di segnale scelto per l'esecuzione della misura.

Ogni giornata di misura, ed a ogni cambio di edificio si è proceduto alla calibrazione della catena fonometrica.

Per ogni posizione di misura si è campionato il tempo di riverberazione e lo STIPA. Il livello target del segnale STIPA è stato fissato a 70 dB(A) alla distanza di 1 metro dalla sorgente, o ad una di esse nel caso di diffusori multipli. Questo livello corrisponde alle normali condizioni d'uso dell'impianto secondo la normativa UNI 11532-2. Qualora l'impianto non fosse in grado di ottenere quel livello, si è utilizzato il livello massimo permesso dall'impianto.

Si sono effettuate due misure di L_{amb} per ogni aula; si è scelta la posizione con rumore più alto, valutata aula per aula e la posizione più centrale alla stanza. Le misurazioni con una deviazione massima, rilevata durante il periodo di misura, non superiore a 0,5 dB sono state ritenute accettabili; in caso contrario, la misurazione è stata ripetuta.

Per la misura del tempo di riverberazione è stata utilizzata la tecnica del rumore stazionario interrotto, con un minimo di tre decadimenti per ogni singola posizione; è stato utilizzato il livello massimo permesso dalla sorgente, evitando eventuali distorsioni. La risposta in frequenza dell'impianto elettroacustico installato influenza la misura del decadimento, in quanto alcuni degli impianti testati non hanno sufficiente energia a 125Hz per ottenere un decadimento utile. Inoltre, in diverse aule non è stato possibile ottenere il risultato per tutte le posizioni di misura. La direttività e il posizionamento della sorgente precludono la misura secondo gli standard *precision* e *engineering* della ISO 3382-2, tuttavia, la misura fornisce comunque un'indicazione di massima sul tempo di riverberazione.

Come strumentazione di misura è stato utilizzato il NTI modello XL2 conforme alle IEC 61672 [18] e che permette l'acquisizione di tutti i parametri sopra descritti.

3.1 | La campagna di misure

Durante la campagna di misura sono state campionate un totale di 17 aule, 9 alla Facoltà di Ingegneria plesso Risorgimento, una nella facoltà di Chimica Industriale e 7 al plesso Bertalia. Sono aule con un volume superiore ai 250 m³ che presentano un impianto elettroacustico la cui installazione non era però legata alle direttive della UNI 11532. Gli ambienti hanno diversa conformazione geometrica, vi sono aule rettangolari, a gradoni e ad anfiteatro.

Per il plesso Risorgimento si sono campionati le aule: 0.2, 0.5, 0.6, 1.3, 2.4, 2.7B, 2.9, 3.3 e AULA I a chimica industriale.

Per il plesso Bertalia si sono misurate tutte le aule che dispongono di un impianto elettroacustico per la trasmissione del parlato, ovvero: TA01, TA02, TA03, TA04, TA05, TA06 e TA11.

L'eterogeneità della forma delle aule, della disposizione delle sedute e della tipologia degli impianti elettroacustici è stata utile al fine di proporre un protocollo sperimentale che sia sufficientemente robusto e testato in diverse condizioni operative.

3.2 | Costruzione del report di prova

Lo sviluppo del protocollo è avvenuto in itinere durante le misure delle 17 aule oggetto di studio. L'obiettivo primario è stato quello di individuare una procedura di misura che si attenesse il più possibile alle normative, ma, che permettesse di completare la misura di un'aula in circa 30-40 minuti. Una volta definito il protocollo sono state rifatte le misure seguendo la procedura delineata dallo stesso, questo per verificare che il protocollo sia effettivamente applicabile alle aule già misurate e che i risultati siano comparabili.

Si è cercato di rendere il contenuto del report sintetico mediante l'utilizzo di schede precompilate.

Di seguito si elencano sinteticamente i contenuti del report:

- Caratteristiche geometriche delle aule;
- Tipologia di impianto termico;
- Tipologia di impianto elettroacustico;
- Problemi audio riscontrati per ispezione diretta;
- Trattamenti acustici presenti all'interno dell'aula;
- Indice di trasmissione del parlato STI;
- Tempo di riverberazione T_{20} ;
- Livello di rumore in ambiente L_{amb} .

I primi dati elencati nella scheda sono le caratteristiche geometriche come l'altezza della stanza, l'area calpestabile, il volume e la capienza. Sono dati fondamentali per la corretta classificazione dimensionale dell'aula. Altro fattore non trascurabile è la forma dell'aula, infatti, aule a gradoni o ad anfiteatro hanno, in media, performance acustiche migliori rispetto alle stanze/ambienti rettangolari [19].

Gli impianti termici in funzione all'interno della stanza sono molto importanti in quanto, se non sufficientemente silenziosi, incrementano il livello di rumore globale indotto dagli impianti a funzionamento continuo nell'ambiente. Influenzano, quindi, sia il rumore di fondo che l'intelligibilità del parlato [20]. Nella scheda sono elencate tutte le principali tipologie di impianti termici.

L'impianto elettroacustico presente all'interno dell'aula svolge un ruolo chiave all'interno di un'aula di grandi dimensioni. Oltre al numero di diffusori, la tipologia di configurazione (mono, stereo o con più diffusori), anche la tipologia costruttiva del diffusore è uno dei parametri importanti per la caratterizzazione della performance.

Nella scheda si è tenuto conto delle tre tipologie di impianto acustico principali, i diffusori tradizionali, i diffusori caricati a tromba e i *line array*. Solo le prime due tipologie di diffusore sono state riscontrate nelle prove in campo; tuttavia, anche in ottica di *future proofing* del protocollo si è scelto di includere i sistemi di diffusione più innovativi.

Nome aula	Fotografia della stanza	
Caratteristiche Geometriche		
Tipologia di impianto termico		
Tipologia di impianto elettroacustico	Pianta con posizioni di misura e disposizione dei diffusori	
Direttività sorgente		
Alimentazione sorgente		
Posizione	Tempo di riverberazione	STI
Problemi audio riscontrati		
Forma dell'aula		

Fig. 2 – Schema strutturale della prima pagina del report. I valori di STI sono misurati per ogni posizione, con valore medio STI_m e scarto tipo. Infine, si riportano i valori di tempo di riverberazione alle frequenze di 500 e 1000 Hz, sia per singola posizione, sia per il valor medio corredato da scarto tipo

Structural diagram of the first page of the report. STI values are measured for each position, with mean STI_m value and type deviation. Finally, reverberation time values at 500 and 1000 Hz frequencies are reported, both for individual positions and for mean values accompanied by standard deviation

Trattamenti acustici presenti:	Grafico livello di rumore in ambiente in bande di ottava
Controsoffitto	
Appesi	Tabella livello di rumore in ambiente
Parete	

Fig. 3 – Schema strutturale della seconda pagina del report
Structural outline of the second page of the report

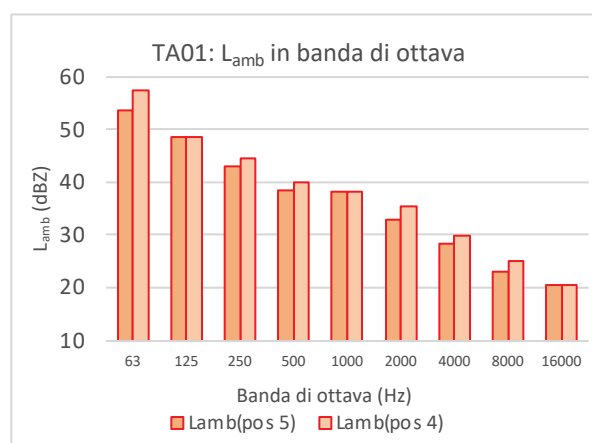


Fig. 4 – Esempio di grafico contenente il livello di rumore in ambiente, non ponderato, in bande di ottava
Example of a graph containing the ambient, unweighted noise level in octave bands

Tab. 1 – Esempio di valori di indice di trasmissione del parlato misurati all'interno di un'aula
Example of speech transmission index values measured inside a classroom

STI		
Media Aritmetica		0.48
Scarto tipo		0.03
Valore minimo		0.42
Valore massimo		0.53
Risultato: STIm- σ		0.45
Posizione	LAeq	Valore STI
1	69.3	0.53
2	69.3	0.49
3	69.1	0.50
4	69.0	0.49
5	68.6	0.47
6	68.7	0.46
7	67.4	0.47
8	68.8	0.48
9	67.2	0.42

Tab. 2 – Esempio di tabella riassuntiva per il livello di rumore in ambiente
Example of a summary table for ambient noise level

TA01 Rumore di fondo		
Posizione	L_{amb} (dBA)	Durata Misurazione (min)
4	46.1	2.00
5	46.9	2.00

Dalla definizione di funzione di trasferimento della modulazione (eq. 1) è possibile identificare le due grandezze che influenzano l'entità delle riduzioni delle modulazioni del discorso originale, in funzione della frequenza di modulazione.

Essendo p il rapporto segnale-rumore esso è direttamente influenzato dal livello di rumore in ambiente, mentre T è il tempo di riverberazione. Ciò giustifica l'inserimento nel report di prova di questi due parametri.

Il primo dei descrittori che si è campionato all'interno di ogni aula è il livello di rumore in ambiente L_{amb} . Questo parametro è espresso come media energetica spaziale dei valori ottenuti nelle posizioni di misura, rilevati come livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A.

La normativa specifica un tempo di misura pari a 30 minuti, tuttavia, non potendo fermare le attività didattiche, si è optato per un tempo di campionamento di 2 minuti, in quanto, si tratta principalmente di rumore derivato da impianti a funzionamento continuo che non presentano fluttuazioni temporali rilevanti. Il requisito risulta verificato in opera secondo la norma UNI 11532-2 [7] se il descrittore non supera i 41 dBA per le aule con un volume maggiore di 250 m³.

Il tempo di riverberazione è un descrittore importante per la valutazione del comfort acustico all'interno dell'ambiente, ed è il secondo parametro che influenza la funzione di trasfe-

rimento della modulazione. Anche se non si è effettuata una misura conforme alla normativa sopracitata, risulta comunque utile per valutare il contesto acustico in cui è installato l'impianto elettroacustico. Per contesto acustico si vuole intendere tutti quei fattori che, direttamente o indirettamente, influenzano il comportamento di un impianto elettroacustico installato all'interno di un ambiente confinato.

4 | Risultati

Lo scopo di questo capitolo sarà quello di analizzare le aule in funzione delle loro caratteristiche geometriche e della tipologia degli impianti tecnologici presenti. Saranno analizzati i dati raccolti durante la campagna di misure organizzati in tabelle e grafici che illustrino la situazione complessiva delle Facoltà. I confronti si basano sull'analisi dell'indice di intelligibilità del parlato, del tempo di riverberazione e del livello di rumore in ambiente.

Il protocollo delineato durante la campagna di misure ha permesso di caratterizzare la *performance*, in termini di indice di trasmissione del parlato, dell'impianto elettroacustico di 17 aule universitarie e di raccogliere tutta una serie di dati utili a capire il contesto in cui esso opera. Si è rispettato il tempo massimo di misura, 30-40 minuti, prefissato tra gli obiettivi del protocollo. Il protocollo risulta utile se si vuole operare una indagine, *survey*, sulla qualità degli impianti elettroacustici presenti all'interno di grandi plessi didattici. È possibile, infatti, effettuare le misure delineate nel protocollo senza interrompere le attività didattiche del plesso oggetto di indagine. È quindi uno strumento utile per pianificare lavori di adeguamento acustico degli impianti esistenti, intervento spesso di più facile esecuzione rispetto ai trattamenti acustici passivi, soprattutto in edifici storici o vincolati.

Da una prima analisi è evidente che le caratteristiche geometriche delle aule sono particolarmente eterogenee. La maggior parte hanno una geometria rettangolare, ma si segnala la presenza di quattro aule a gradoni nel plesso e quattro aule ad anfiteatro (Tab. 3).

Si riscontra una eterogeneità anche nel volume, si passa infatti da un minimo di 330 m³ a un massimo di oltre 1100 m³ e nella capienza nominale da un minimo di 80 persone ad un massimo di 250 (Tab. 3).

Per quel che riguarda la tipologia di impianto termico al plesso Bertalia tutte le aule sono servite da impianti di ventilazione centralizzata collegati ad una unica UTA. Nel plesso Risorgimento invece sono presenti diverse soluzioni (radiatori, ventilconvettori, impianti ad aria) probabilmente dovute a migliorie e opere di ammodernamento che hanno interessato solo alcune porzioni del plesso storico.

Dal punto di vista quantitativo si è rilevato che le aule del plesso storico sono dotate di sistemi di amplificazione elettroacustica con due o quattro diffusori, fatta eccezione dell'aula 2.7B in cui ne sono installati sei. La situazione del plesso Bertalia è differente, infatti sono utilizzati da 6 a 8 diffusori a soffitto per ciascuna aula.

Nonostante le diverse tipologie di impianti elettroacustici, la Tab. 3 evidenzia come ancora la quasi totalità dei diffusori sia con direttività tradizionale puntiforme, solo tre aule presentano altoparlanti caricati a tromba. Non sono stati rilevati

diffusori di nuova generazione del tipo *Line array* o a guida d'onda. Relativamente al posizionamento dei diffusori è possibile notare come la maggior parte degli stessi siano installati o a soffitto o sulle pareti laterali.

Tab. 3 – Tabella riassuntiva con identificazione delle aule misurate, capienza, caratteristiche geometriche e descrizione dell'impianto termico ed elettroacustico

Summary table with identification of measured classrooms, capacity, geometric characteristics and thermal and electro-acoustic system

Aula	Plesso	Capienza (PAX)	Volume (m ³)	Geometria	Impianto termico	Configurazione altoparlanti	Tipologia altoparlanti	Posizione altoparlanti
I	Risorgimento	150	683	Ad Anfiteatro	Fancoil	Multipli	Tradizionale	Laterale
0.2	Risorgimento	142	456	Ad Anfiteatro	Radiatori	Stereo	Tromba	Laterale
0.5	Risorgimento	118	460	Rettangolare	Fancoil	Multipli	Tradizionale	Laterale
0.6	Risorgimento	97	427	Rettangolare	Fancoil	Stereo	Tradizionale	Laterale
1.3	Risorgimento	130	320	Ad Anfiteatro	Radiatori	Stereo	Tradizionale	Frontale
2.4	Risorgimento	190	799	Rettangolare	Radiatori	Multipli	Tromba	Laterale
2.7B	Risorgimento	145	709	Rettangolare	Radiatori	Multipli	Tradizionale	Laterale
3.3	Risorgimento	126	1132	Rettangolare	Radiatori	Multipli	Tromba	Laterale
5.6	Risorgimento	100	570	Rettangolare	UTA	Stereo	Tradizionale	Laterale
6.2	Risorgimento	250	1007	Ad Anfiteatro	UTA	Stereo	Tradizionale	Laterale
TA01	Bertalia	182	738	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA02	Bertalia	182	738	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA03	Bertalia	126	642	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA04	Bertalia	126	642	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA05	Bertalia	110	419	Rettangolare	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA06	Bertalia	110	419	Rettangolare	Fancoil	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA11	Bertalia	89	305	Rettangolare	UTA	Stereo	Tradizionale	Frontale

Tab. 4 – Tabella riassuntiva con qualificazione acustica delle aule misurate

Summary table with acoustic qualification of measured classrooms

Aula	STI _m	T ₂₀ 500Hz (s)	T ₂₀ 1000Hz (s)	T ₂₀ 2000Hz (s)	L _{amb} (dBA)
I	0.46	1.58	1.74	1.64	46.5
0.2	0.62	0.61	0.48	0.53	49.4
0.5	0.48	1.72	1.54	1.51	40.8
0.6	0.45	2.68	1.69	1.73	48.8
1.3	0.69	0.77	0.64	0.53	50.6
2.4	0.44	1.98	2.07	1.85	39.3
2.7B	0.44	2.42	2.13	1.91	35.6
3.3	0.61	1.03	0.83	0.89	37.8
5.6	0.63	1.01	0.94	1.08	43.7
6.2	0.48	1.97	1.7	1.57	49.5
TA01	0.63	1.17	0.94	0.89	41.9
TA02	0.55	1.2	1.05	0.99	50.5
TA03	0.63	1.2	0.91	0.92	43.2
TA04	0.63	1.09	1.05	0.98	42.4
TA05	0.7	0.82	0.79	0.74	39.1
TA06	0.73	0.82	0.81	0.72	39.6
TA11	0.58	1.6	1.24	1.02	43.3

4.1 | Qualificazione acustica

La situazione della Facoltà di Ingegneria, che conta due diversi poli con edifici costruiti in periodi diversi, è complessa

ed estremamente frammentata. Si vuole ora cercare di fornire un quadro complessivo dello stato di fatto verificato durante la campagna di misure. L'intelligibilità del parlato allo stato attuale è l'indicatore più importante per rispondere alle richieste dell'Ateneo, dal momento che è funzione sia del tempo di riverberazione sia del livello di rumore in ambiente.

È possibile ottenere un'indicazione approssimativa del rumore degli impianti a funzionamento continuo, presente all'interno dell'aula, utilizzando il livello di rumore in ambiente mediato tra le due posizioni campionate in opera. In figura 5 si riporta un grafico che illustra il descrittore L_{amb} all'interno delle aule misurate. Si nota come il 60% delle aule misurate eccedano il livello massimo previsto dalla normativa attuale, misurando principalmente il livello degli impianti; questo è un indicatore di un'eccessiva rumorosità all'interno degli ambienti, riducendo così il rapporto segnale rumore all'interno delle aule.

In merito al tempo di riverberazione, circa il 35% delle aule misurate presenta, tenuto conto dell'incertezza dovuta al metodo di misura, un valore probabilmente in linea con i requisiti normativi. La situazione è più sfavorevole soprattutto nelle

aule che non hanno almeno il controsoffitto fonoassorbente, come l'aula 2.7B (paragrafo 5.1); vi è anche da sottolineare come alcune aule trattate acusticamente, un esempio è l'aula 0.2 (paragrafo 5.1), presentano un valore di tempo di riverberazione contenuto rispetto al volume e alla capienza nominale delle stesse. Questi valori, sulla base dell'accuratezza della misura svolta, potrebbero indicare un valore inferiore ai limiti minimi calcolati secondo UNI 11532-2 [7].

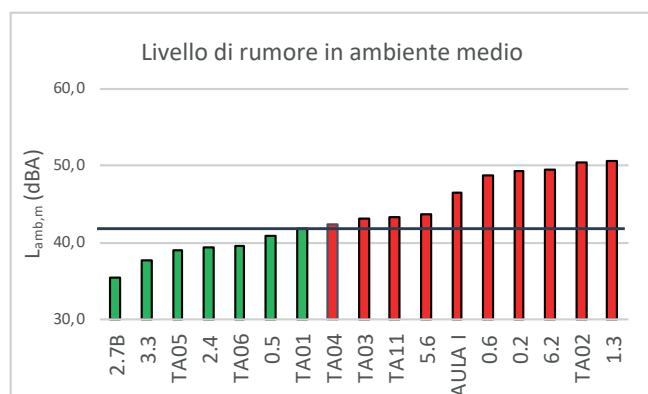


Fig. 5 – Grafico del livello di rumore in ambiente medio delle aule campionate durante la campagna di misure

Graph of the average ambient noise level of classrooms sampled during the measurement campaign

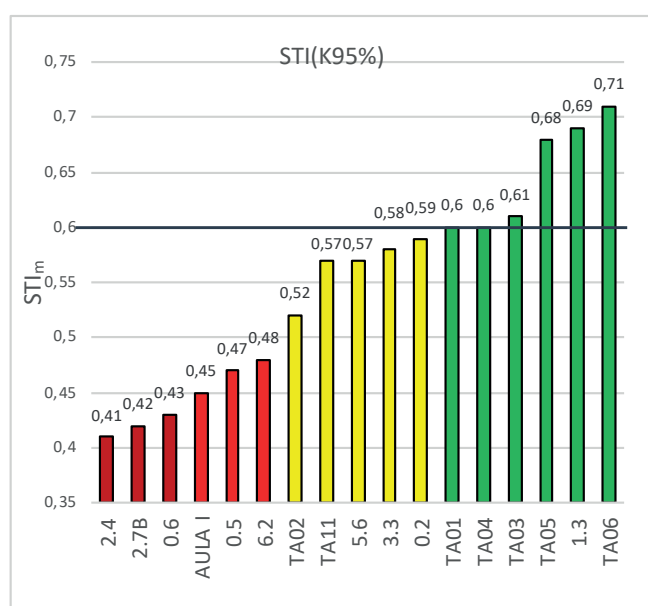


Fig. 6 – Grafico dell'indice di intelligibilità del parlato nelle aule campionate durante la campagna di misure

Graph of the speech intelligibility index in classrooms sampled during the measurement campaign

5 | Considerazioni generali in merito alle aule misurate

La tabella 4 mostra come non siano stati riscontrati diffusori di tipo *line array*, ciò dimostra come gli impianti installati, almeno nella loro concezione progettuale e/o tecnologica sia-

no obsoleti, anche se di recente installazione. Per le aule più grandi sarebbe auspicabile una tecnologia con diffusori *line array*, più adatto e performante all'interno di spazi di grande dimensione in quanto permette di proiettare il suono a una maggiore distanza dalla sorgente mantenendo una risposta in frequenza più lineare [21].

Un'altra criticità che riguarda gli impianti elettroacustici è la loro installazione non ottimale: delle 17 aule oggetto di misure soltanto due hanno i diffusori installati correttamente, sulla parete frontale alle spalle del docente. Infatti, gli articoli di Massaro et al. [22-24] suggeriscono di allineare la sorgente dei compiti visivi, *visual task*, ovvero, il parlatore, e dei compiti uditivi, *auditory task*. Nel caso di un'aula universitaria la *visual task* coincide con l'osservazione del docente e della lavagna da parte degli studenti, perciò, è consigliabile installare i diffusori acustici nella parete frontale conciliando il compito visivo con quello uditivo.

Anche nelle aule del plesso Bertalia, dove il requisito di indice di trasmissione del parlato è verificato con più frequenza, la disposizione dei diffusori a pioggia, (figura 14), risulta sfavorevole in termini di comfort acustico [25].

La seconda criticità rilevata in opera, del plesso Bertalia, è il rumore ambientale elevato causato principalmente dalle unità di trattamento aria. L'eccessivo livello di rumore è anche corresponsabile della diminuzione dell'indice di intelligibilità del parlato nell'aula TA02 [19]. Quest'aula, infatti, è "gemella" sia per caratteristiche geometriche che per la tipologia disposizione e numero di diffusori, dell'aula TA01 che ha l'indicatore STI conforme al requisito della UNI 11532-2, tuttavia, vi è una differenza tra le due aule nell'indice di trasmissione del parlato di circa 0.1.

5.1 | Casi specifici a confronto

Si illustrano di seguito alcune aule rappresentative delle 17 totali campionate nel corso della campagna di misure. Si riporta una mappa con l'indice di intelligibilità del parlato per ogni posizione.

Nel primo caso, l'aula 0.2 (figura 7 e 8) del Plesso Risorgimento, si osserva in foto (figura 8) la presenza di un controsoffitto poroso, che riduce il tempo di riverberazione. Inoltre, è possibile notare come la disposizione nelle pareti laterali di una coppia di diffusori, caricati a tromba, fornisca valori elevati di STI nelle posizioni che si trovano all'interno del campo sonoro diretto; mentre nelle zone non coperte dai diffusori si ha una diminuzione media di circa 0.1 STI. L'elevato valor medio del descrittore di intelligibilità può essere giustificato in parte dalle caratteristiche geometriche della stanza, infatti, si tratta di un'aula relativamente piccola rispetto alle altre aule campionate (456 m³) con forma ad anfiteatro ed un tempo di riverberazione contenuto, infatti, il valore, considerando i limiti di accuratezza della misura, risulta lontano dal valore minimo imposto dalla normativa. Il livello di rumore in ambiente risulta non accettabile secondo normativa, le possibili cause possono essere l'impianto

EVAC, che a causa di interferenze produce toni intermittenti, e lo scarso isolamento della facciata finestrata.

Si osservi ora la situazione dell'aula 2.7B (figura 10), si tratta di una sala con caratteristiche molto diverse dall'aula precedente, ha forma rettangolare ed un volume maggiore (709 m³). I diffusori presentano alcune problematiche, la prima è la collocazione degli stessi sulle pareti laterali, nella stanza in questione abbiamo sei diffusori tradizionali installati a circa tre metri di altezza e direzionati parallelamente al solaio. L'indice di intelligibilità del parlato risulta non conforme ai requisiti. Possibili fattori di riduzione dell'indicatore possono essere la non corretta inclinazione dei diffusori e la tecnologia costruttiva degli altoparlanti. Il livello di rumore in ambiente risulta contenuto.

Un'altra problematica dell'aula è il tempo di riverberazione elevato, la causa è da ricercarsi nella mancanza di qualsiasi materiale atto ad aumentare l'assorbimento acustico della stanza. Infatti, l'aula non presenta alcun trattamento fonoassorbente, ha pareti in muratura intonacate, una grande facciata vetrata e sedute in legno rigide.

L'aula TA02 è situata al plesso Bertalia, ha un volume (738 m³) simile alla 2.7B, ma una conformazione geometrica a gradoni. Anche la disposizione dei diffusori è differente, si tratta infatti di otto diffusori installati a soffitto; osservando la planimetria (figura 10, in rosso le posizioni di misura, in blu i diffusori a soffitto) è possibile notare come le prime sedute abbiano un valore inferiore rispetto alle altre, a causa della copertura dell'impianto elettroacustico non adeguata in queste posizioni.

Il tempo di riverberazione è in linea di massima conforme ai requisiti normativi. Il significativo livello di rumore in ambiente è dovuto all'elevata rumorosità dell'unità di trattamento aria.

Infine, l'indice di trasmissione del parlato risulta non conforme ai requisiti UNI 11532-2 [7], a causa dell'elevato rumore di fondo generato dalla ventilazione e dal posizionamento dei diffusori a pioggia, che non garantiscono una copertura adeguatamente omogenea della platea.

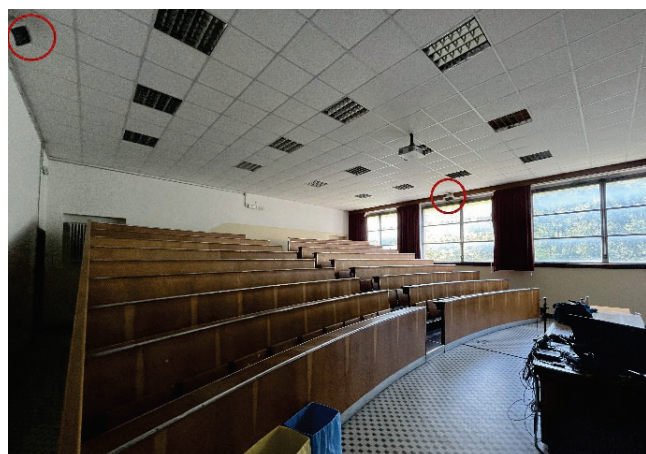


Fig. 7 – Aula 0.2, all'interno del cerchio in rosso i diffusori caricati a tromba
Classroom 0.2, inside the circle in red horn-loaded speakers

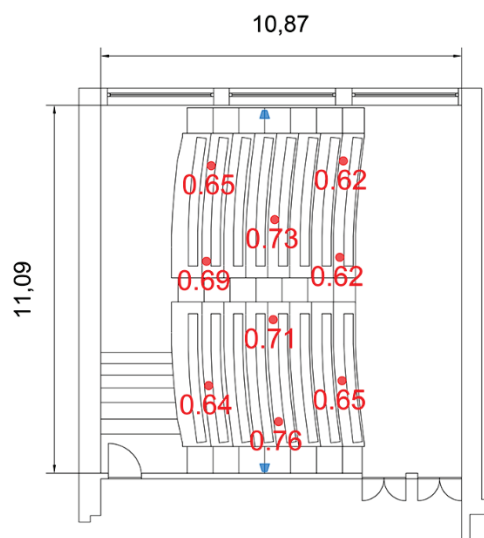


Fig. 8 – Mappa dell'indice di intelligibilità del parlato, misurato in 9 posizioni, dell'aula 0.2
Map of the speech intelligibility index, measured in 9 positions, classroom 0.2

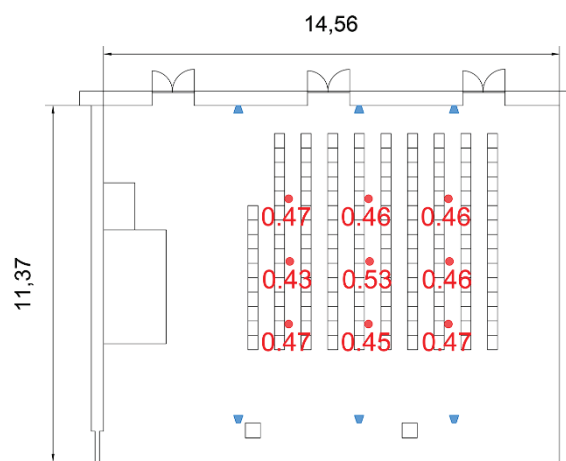


Fig. 9 – Mappa dell'indice di intelligibilità del parlato, misurato in 9 posizioni, dell'aula 2.7B
Map of the speech intelligibility index, measured in 9 positions, classroom 2.7B

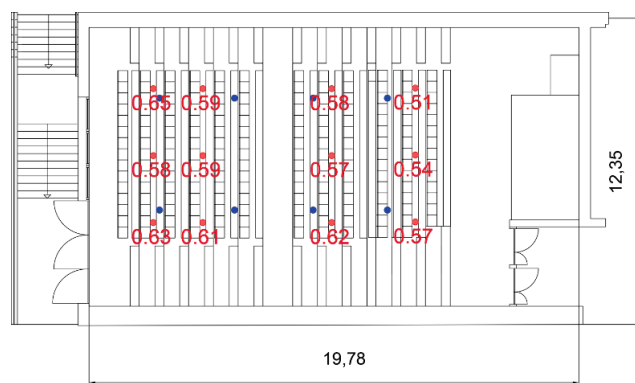


Fig. 10 – Mappa dell'indice di intelligibilità del parlato, misurato in 12 posizioni, dell'aula TA02. In rosso le posizioni di misura, in blu le sorgenti sonore
Map of the speech intelligibility index, measured in 12 positions, classroom TA02. In red measurement locations, in blue sound sources

5.2 | L'indice di trasmissione del parlato per ascoltatori non madrelingua

Negli ultimi anni il numero degli studenti non madrelingua che frequentano l'ateneo è aumentato. Sorge quindi la necessità di porre attenzione anche a questa categoria di studenti, che spesso si trovano svantaggiati rispetto ai compagni di corso madrelingua. La normativa IEC 60268-16 [5] dà indicazioni in merito nell'appendice H; per ottenere lo stesso livello di intelligibilità gli ascoltatori non madrelingua necessitano di un miglioramento del rapporto segnale rumore di 4-5 dB.

Wijngaarden et al. [4] suggeriscono che, in presenza di parlatore o di ascoltatori non madrelingua, sia necessario aumentare l'indice di intelligibilità accettabile di circa 0.13. Questo porterebbe l'indicatore da 0.6 a 0.73 valore che non è stato riscontrato in nessuna delle aule misurate. Si tratta di un valore elevato, ma, data la ricorrenza con cui questa casistica si presenta all'interno dell'università, si rende necessario portare particolare attenzione anche a questa criticità. L'innalzamento dei requisiti dell'indice di intelligibilità del parlato risulta necessario se si intende aumentare l'inclusività e l'internazionalizzazione della facoltà.

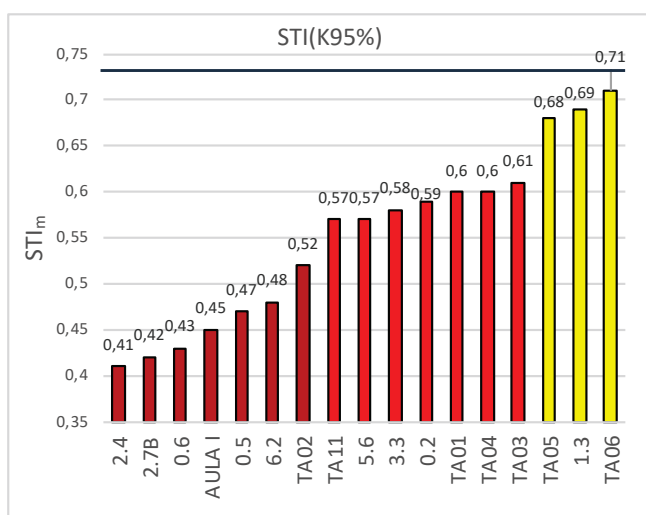


Fig. 11 – Grafico con indice di intelligibilità del parlato per persone non madre lingua, il valore minimo accettabile è stato alzato da 0.6 a 0.73

Graph with speech intelligibility index for non-native speakers, the minimum acceptable value was raised from 0.6 to 0.73

6 | Conclusioni

Il presente articolo descrive la realizzazione di un protocollo sperimentale che possa permettere ad un singolo operatore l'esecuzione delle prove atte a valutare le principali grandezze acustiche presenti all'interno della normativa UNI 11532-2.

Dalla misurazione di 17 aule della facoltà di ingegneria dell'università di Bologna si è sviluppato un protocollo sperimentale. Le aule in questione presentano caratteristiche eterogenee sia in termini di geometria, sia di impianti tecnologici

presenti all'interno delle sale, questo ha permesso di ottimizzare il protocollo per molteplici scenari.

Successivamente si è realizzato un report di prova in grado di contenere tutte le informazioni necessarie a individuare le caratteristiche di una sala che influenzano il comportamento dell'impianto elettroacustico installato: descrizione geometrica della stessa, descrizione degli impianti tecnologici presenti all'interno e indice di intelligibilità del parlato, tempo di riverberazione e livello di rumore in ambiente.

La seconda parte dell'articolo espone e commenta i dati raccolti durante la campagna di misure, cercando di caratterizzare le aule misurate sia in base alla geometria delle stesse, sia per gli impianti elettroacustici al loro interno. A seguire si sono messe a confronto alcune aule rappresentative dello stato di fatto all'interno dei plessi oggetto di indagine, con particolare attenzione verso gli studenti non madre lingua. Questo nell'ottica di migliorare l'internazionalizzazione e l'inclusività all'interno della facoltà.

Dall'analisi dei dati risulta che il 35% delle aule rispettano i requisiti di indice di trasmissione del parlato.

Conclusions

This paper describes the development of an experimental protocol that can allow a single operator to perform tests designed to evaluate the main acoustic quantities present within the UNI 11532-2 standard.

An experimental protocol was developed from the measurement of 17 classrooms in the faculty of engineering at the University of Bologna. The classrooms in question have heterogeneous characteristics both in terms of geometry and technological systems present within the rooms, this allowed the protocol to be optimized for multiple scenarios.

Subsequently, a test report was produced that could contain all the information necessary to identify the characteristics of a room affecting the behavior of the installed electroacoustic system: geometric description of the room, description of the technological systems present inside and speech intelligibility index, reverberation time and ambient noise level.

The second part of the article sets out and comments on the data collected during the measurement campaign, attempting to characterize the measured classrooms both by their geometry and by the electroacoustic systems within them. This was followed by comparing some representative classrooms of the actual state within the surveyed plexuses with a focus on non-native language students with a view to improving internationalization and inclusiveness within the faculty.

Data analysis shows that 35% of the classrooms comply with STI requirements.

7 | Ringraziamenti

Gli autori voglio ringraziare Ruggero Giordano e Antonio Minerva del CESIA, area sistemi e servizi informatici dell'università di Bologna, per l'aiuto nell'organizzazione della campagna di misura e il supporto nell'interfacciarsi con gli altri organi dell'amministrazione universitaria.

Bibliografia

- [1] Hodgson, M., R. Rempel, and S. Kennedy (1999). Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105 (1), 226–233. DOI: 10.1121/1.424600.
- [2] Pelegrin-Garcia, D., B. Rasmussen, and J. Brunskog (2014). Classroom acoustics design for speakers' comfort and speech intelligibility: a european perspective. In *Proceedings of Forum Acusticum 2014*.
- [3] Pelegrín-García D, Brunskog J, Lyberg-Åhlander V, Löfqvist A. Measurement and prediction of voice support and room gain in school classrooms. *J Acoust Soc Am*. 2012 Jan;131(1):194-204. DOI: 10.1121/1.3665987.
- [4] Wijngaarden, S.J., Van, Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T. (2002). Quantifying the intelligibility of speech in noise for non-native listeners, *J. Acoust. Soc. Am*, DOI: 10.1121/1.1456928.
- [5] ISO 3382-2 Acoustic: Measurement of room acoustic parameters – Part 2 Reverberation time in ordinary rooms.
- [6] IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- [7] UNI 11532-2 Acustica in edilizia – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 2: Settore scolastico.
- [8] D'Orazio, D., Fratoni, G., & Tardini, V. (2025). The Italian standard on classroom acoustics UNI 11532-2: 2020 explained through case studies. *Applied Acoustics*, 231, 110498. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110498.
- [9] Fratoni, G., De Salvio, D., Tardini, V., Garai, M., Valdiserri, P., Biserni, C., & D'Orazio, D. (2025). Student Activity in Suboptimal Thermal and Acoustic Conditions: An In-Field Study in Active Classrooms. *Applied Sciences*, 15(6), 3119. DOI: 10.3390/app15063119.
- [10] De Salvio, D., & D'Orazio, D. (2022). Effectiveness of acoustic treatments and PA redesign by means of student activity and speech levels. *Applied Acoustics*, 194, 108783. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108783.
- [11] Fratoni, G., De Salvio, D., D'Orazio, D., & Garai, M. (2021). Acoustical comfort in university lecture halls: simulating the dynamic role of occupancy. In *17th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (BS 2021)* (pp. 3704-3711). DOI: 10.3390/app15063119.
- [12] Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., "Some applications of the Speech Transmission Index (STI) in auditoria", *Acustica* 51, 1982, p. 229-234.
- [13] Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., "A physical method for measuring speech transmission quality", *J. Acoust. Soc. Amer.* 67, 1980, 31, p.318-326.
- [14] Houtgast, T. and Steeneken, H.J.M., "The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility", *Acustica* 28, 1973, p.66-73.
- [15] Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., "Mutual dependency of the octave-band weights in predicting speech intelligibility," *Speech Communication* 28, 1999, p.109-123. DOI: 10.1016/S0167-6393(99)00007-2.
- [16] Houtgast, Tammo, and Herman JM Steeneken. "A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria." *The Journal of the Acoustical Society of America* 77.3: 1069-1077, 1985.
- [17] Steeneken, H.J.M., Verhave, J.A., McManus, S., and Jacob, K.D., (2001) "Development of an Accurate, Handheld, Simple-to-use Meter for the Prediction of Speech Intelligibility", *Proceedings IoA 2001, Reproduced sound* (17). Stratford-upon-Avon, UK.
- [18] CEI EN 61672-1, "Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications", 2013.
- [19] Bradley, John S. *Acoustical design of rooms for speech*. Ottawa, ON: Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, 2002. DOI: 10.4224/40002824
- [20] Murray Hodgson, Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms, *Applied Acoustics*, Volume 65, Issue 1, 2004, Pages 69-89, DOI: 10.1016/S0003-682X(03)00108-7.
- [21] Urban, Marcel, Christian Heil, and Paul Bauman. "Wavefront sculpture technology." *Journal of the Audio Engineering Society* 51.10 (2003): 912-932.
- [22] Massaro, D.W., & Warner, D.S. (1977). Dividing attention between auditory and visual perception. *Perception & Psychophysics*, 21(6), 569-574.
- [23] Massaro, D.W., & Simpson, J.A. (2014). Speech perception by ear and eye: A paradigm for psychological inquiry. *Psychology Press*. DOI: 10.4324/9781315808253.
- [24] Massaro, D.W., & Palmer Jr, S.E. (1998). Perceiving talking faces: From speech perception to a behavioural principle. *Mit Press*.
- [25] Lalonde, K., Werner, L.A. (2019). Infants and adults use visual cues to improve detection and discrimination of speech in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(10), 3860-3875, DOI: 10.1044/2019_JSLHR-H-19-0106.