POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DEL SUONO DI UN SISTEMA HVAC NELLA CABINA DI UN TRATTORE CONTEST IMMERSIVI

Original
VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DEL SUONO DI UN SISTEMA HVAC NELLA CABINA DI UN TRATTORE CONTEST IMMERSIVI / Favaretto, M., Shtrepi, L., Guastamacchia, A., Riente, F., Di Tonno, M., Astolfi, A.. - ELETTRONICO. - (2024). (50° Convegno Nazionale AIA Taormina 29-31 maggio 2024).

Availability:
This version is available at: 11583/2990321 since: 2024-07-03T13:34:38Z

Publisher:
Associazione Italiana di Acustica (AIA)

Published
DOI:

Terms of use:

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

Publisher copyright

(Article begins on next page)

30 October 2026

Associazione Italiana di Acustica
50° Convegno Nazionale
Taormina, 29-31 Maggio 2024

VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DEL SUONO DI UN SISTEMA HVAC NELLA CABINA DI UN TRATTORE CON TEST IMMERSIVI

Marco Favaretto (1), Louena Shtrepi (1), Angela Guastamacchia (1), Fabrizio Riente (1) Massimo Di Tonno (2), Arianna Astolfi (1)

1) Politecnico di Torino, s305982@studenti.polito.it, louena.shtrepi@polito.it, angela.guastamacchia@polito.it, fabrizio.riente@polito.it, arianna.astolfi@polito.it
2) DENSO Thermal Group, m.ditonno@eu.denso.com

SOMMARIO

La ricerca sul rumore di sistemi HVAC all'interno della cabina dei trattori è molto limitata. Questo studio ha come obiettivo quello di presentare dei modelli predittivi per valutare i parametri della qualità acustica. La ricerca ha seguito tre fasi: un'indagine sullo sviluppo di modelli predittivi in letteratura; misurazioni acustiche in campo e test percettivi in laboratorio utilizzando realtà immersiva in un ambiente ambisonico e test d'ascolto binaurali. I risultati mostrano come l'ambiente immersivo produca una migliore stima del suono in termini di Annoyance Roughness.

1. Introduzione

Nel mondo dinamico delle macchine agricole, i trattori sono strumenti indispensabili che lavorano per lunghe ore in ambienti diversificati e impegnativi. Con la crescente domanda di cabine di trattori ergonomiche e tecnologicamente avanzate, c'è un urgente bisogno di affrontare la qualità del suono in questi ambienti. Nonostante le cabine dei trattori incorporino tipicamente misure come l'isolamento acustico per ridurre rumore e vibrazioni causati dal motore, pochi studi si sono specializzati nella ricerca di un modello di predizione per la qualità sonora della cabina di un trattore [1,2], mentre nessuno ha analizzato il disturbo da rumore di un sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditoning) in cabina, i modelli di predizione relativi al rumore di sistemi HVAC in letteratura analizzano la qualità sonora all'interno di ad auto a combustione [3,4].
Questo studio è stato fatto seguendo tre fasi: un'indagine sullo sviluppo di modelli predittivi in letteratura; misurazioni acustiche in campo e test percettivi in laboratorio utilizzando realtà immersiva in un ambiente ambisonico e test d'ascolto binaurali.

2. Metodologia

Una prima parte dello studio ha avuto un focus sulla ricerca bibliografica. L'obiettivo è stato quello di individuare lo sviluppo dei modelli di predizione sonora del rumore HVAC all'interno della cabina di un trattore. La ricerca è stata effettuata sulla piattaforma Scopus, utilizzando il metodo PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcome). L-SPL (Linear Sound Pressure Level), A-SPL (A-weighted Sound Pressure Level), Loudness, Sharpness, Roughness, Fluctuation Strength e Tonality sono i parametri oggettivi più utilizzati per lo sviluppo dei modelli di predizione. Le valutazioni soggettive vengono effettuate con ascolto in cuffia. La scala di valutazione da 1 a 10 in termini di "Annoyance" o "Discomfort" è largamente raccomandata ed utilizzata [1,2,4,6,7], seguita dal "Semantic Differential Method" [3]. La ricerca ha evidenziato che le due principali metodologie di modellazione si basano sull'utilizzo di reti neurali [1,2,4] e sull'applicazione della regressione lineare multipla [3].

2.1 Misurazioni in cabina

I test di acquisizione del rumore coinvolgono l'uso di: un array microfonico a 19 canali Zylia ZM-1, una testa artificiale B&K 4128 con due tipi di microfoni binaurali (B&K 4101 e Siemens ABH04) e un microfono omnidirezionale NTi M2230. Tutti i microfoni sono stati posizionati ad un'altezza di 1.13 metri ± 0.05, a livello dell'orecchio dell'operatore. Vengono registrate varie velocità di funzionamento dell'HVAC, sia con il motore spento che con il motore acceso, con le modalità elencate di seguito (Tab. 1). Ogni registrazione ha durata di 60 secondi, dalla quale verranno estratti 10 secondi privi di rumori accidentali per calcolare i parametri psicoacustici relativi a LZ_{eq} (L-SPL), LA_{eq} (A-SPL), Loudness, Sharpness e Roughness. Le stesse registrazioni verranno proposte per i test soggettivi, in particolare, le registrazioni dello Zylia ZM-1 verranno utilizzate per il test immersivo, mentre le registrazioni effettuate con i microfoni B&K 4101 e Siemens ABH04 verranno utilizzate per il test di ascolto binaurale.

Tabella 1 – Modalità di funzionamento HVAC.

Misurazione	Abbreviazione
Rumore di fondo	BG
Motore spento, velocità 4	S4
Motore spento, velocità 7	S7
Motore spento, velocità 10	S10
Motore accesso, velocità 0	ES0
Motore acceso, velocità 4	ES4
Motore acceso, velocità 7	ES7
Motore acceso, velocità 7, compressore spento	ES7 Coff
Motore acceso, velocità 10	ES10

2.2 Test Soggettivi

Un totale di 20 persone normo udenti di età compresa fra i 24 e i 60 anni è stata sottoposta ad una valutazione del rumore. I test soggettivi prevedono l'ascolto di 10 secondi di registrazione per ogni modalità di funzionamento dell'HVAC (Tab. 1) e la successiva valutazione utilizzando una scala da 1 a 10 in termini di fastidio e 4 scale da 7 punti in termini di Annoyance, Loudness, Sharpness e Roughness. Le traduzioni in italiano dei parametri psicoacustici sono state effettuate utilizzando come riferimento lo studio condotto da Dal Palù et al. [5]. Per ciascuno dei due test di ascolto è stata condotta una calibrazione della catena psicoacustica, considerando le risonanze del canale uditivo, l'equalizzazione delle cuffie e il livello di pressione sonora misurato in cabina.

Associazione Italiana di Acustica, 2024
ISBN: 978-88-88942-69-8



Figura 1 – Annoyance Rating Scale 1-10

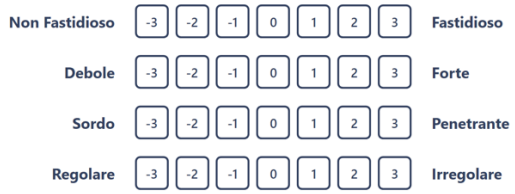


Figura 2 – Semantic Differential Method.

2.2.1 Test Immersivo

Il test è stato effettuato nell'Audio Space Lab del Politecnico di Torino, che permette la riproduzione delle tracce registrate con il microfono Zylia ZM-1 in audio ambisonico del 3° ordine. Il video della cabina è stato registrato con una videocamera 360 Insta One X2.



Figura 3 – Vista monoscopica della cabina del trattore.

2.2.2 Test Binaurale

Il test è stato condotto presso la camera anecoica del Politecnico di Torino, dove gli utenti hanno ascoltato i diversi suoni utilizzando le cuffie Sennheiser HD650 e successivamente li hanno valutati mediante il modulo SQala del software ArtemiS Suite prodotto da Head Acoustics.

2.3 Analisi

La regressione lineare multipla è stata utilizzata per sviluppare un modello predittivo iniziale, mirato a individuare i parametri psicoacustici che offrono le previsioni più accurate. Per ciascuna modalità di funzionamento dell'HVAC, è stata calcolata la media delle valutazioni soggettive relative alla 1-10 Annoyance Rating Scale e alle quattro scale del Semantic Differential Method. Successivamente, è stata esaminata la correlazione lineare tra i test soggettivi e i parametri psicoacustici. Come variabili indipendenti sono stati selezionati i parametri con la correlazione più elevata, evitando i raggruppamenti che presentano una multicollinearità significativa tra i membri.

3. Risultati e conclusioni

Le successive tabelle presentano i risultati predittivi del Test Immersivo e del Test Binaurale attraverso la 1-10 Annoyance Rating Scale e le quattro scale del Semantic Differential Method. Tutti i valori R-squared dei modelli sono stati superiori a 0.88, con un massimo di 0.97, indicando una forte capacità predittiva attraverso le dimensioni percettive valutate. I risultati presentati nelle seguenti tabelle suggeriscono che il Test Immersivo (Tab. 2) abbia prestazioni predittive leggermente migliori rispetto al Test Binaurale (Tab. 3), specialmente nella stima di Annoyance, Loudness, e Roughness. Il Test Immersivo dimostra RMSE più bassi attraverso molteplici dimensioni percettive, inclusi Annoyance (R^2 0.97, RMSE 0.35), Loudness (R^2 0.97, RMSE 0.25), e Roughness (R^2 0.88, RMSE 0.38). Nessun modello è stato efficace nella previsione della Sharpness, che è un parametro importante nel campo del rumore degli impianti di condizionamento dell'aria e mette in evidenza una limitazione attuale nelle metodologie di valutazione della percezione del suono. Il Test Binaurale ha prodotto valutazioni soggettive più elevate rispetto al test Immersivo suggerendo differenze di percezione tra le due metodologie di test. Il Test Immersivo ha un notevole vantaggio nella riproduzione accurata delle basse frequenze, rendendolo particolarmente rilevante in scenari che coinvolgono fonti di rumore a bassa frequenza come i motori dei trattori. Analizzando le variabili independenti delle equazioni, LZ_{eq} (L-SPL) e Loudness sono i parametri psicoacustici più efficaci per prevedere l'Annoyance in questo studio. L'uso di LA_{eq} (A-SPL) al posto di LZ_{eq} ha portato ad una minor accuratezza di previsione, perciò non è stato incluso. Riducendo i precedenti parametri si migliorerà la qualità del suono HVAC all'interno della cabina. Tuttavia, per aumentare l'affidabilità delle previsioni, le ricerche future dovrebbero testare un numero maggiore di modalità operative dell'HVAC e condurre test sul campo con trattori in movimento in diversi scenari. Inoltre, l'uso di reti neurali potrebbe creare un modello non lineare più affidabile.

Tabella 2 – Risultati di predizione del test immersivo.

Scale	Regressione Lineare Multipla	R-squared	RSME
1-10 Ann	$\text{Ann} = -4.4705 + 0.1043 \times LZeq + 0.0844 \times Loudness$	0.97	0.35
SDM Ann	$\text{Ann} = -5.9915 + 0.1243 \times LZeq + 0.3222 \times Loudness - 48.5507 \times Roughness$	0.95	0.36
SDM Loud	$\text{Loud} = -6.0031 + 0.063 \times \text{LZeq} + 0.0773 \times \text{Loudness}$	0.97	0.25
SDM Rough	$\text{Rough} = -4.9950 + 3.5662 \times Roughness + 0.0529 \times LZeq$	0.88	0.27

Tabella 3 – Risultati di predizione del test binaurale.

Scale	Regressione Lineare Multipla	R-squared	RSME
1-10 Ann	$\text{Ann} = -3.9563 + 0.0956 \times LZeq + 0.1660 \times Loudness$	0.97	0.49
SDM Ann	$\text{Ann} = -6.32046 + 0.0758 \times LZeq + 0.0765 \times Loudness$	0.97	0.27
SDM Loud	$\text{Loud} = -6.1938 + 0.0613 \times LZeq + 0.1084 \times Loudness$	0.97	0.33
SDM Rough	$\text{Rough} = -9.1139 + 0.1548 \times LZeq - 12.3291 \times Roughness$	0.88	0.38

4. Bibliografia

[1] Zhipeng W., Yanyan Z., Liming S., *The Impact of Sound Pressure Level, Loudness, Roughness, Sharpness, Articulation Index, Hand Vibration, and Seat Vibration on Subjective Comfort Perception of Tractor Drivers*, Symmetry, 2023

[2] Chen P.; Xu L.; Tang Q.; Shang L.; Liu W., *Research on prediction model of tractor sound quality based on genetic algorithm*, Applied Acoustics, 2022

[3] Leite R.P.; Paul S.; Gerges S.N.Y., *A sound quality-based investigation of the HVAC system noise of an automobile model*, Applied Acoustics, 2009

[4] Back J.; Lee S.-K.; Min Lee S.; An K.; Kwon D.-H.; Park D.-C., *Design and implementation of comfort-quality HVAC sound inside a vehicle cabin, Applied Acoustics*, 2021

[5] D. Dal Palù; E. Buiatti, G. E. Puglisi, O. Houix; P. Susini; C. De Giorgi; A. Astolfi; *The use of semantic differential scales in listening tests: A comparison between context and laboratory test conditions for the rolling sounds of office chairs*, Appendix B, Applied Acoustics, 2017

[6] PD ISO/TS 15666:2021

[7] J1441, *Subjective Rating Scale for Vehicle Ride and Handling*, SAE, 2016