

CONSERVATORIO DI MUSICA LUCA MARENZIO

DIPARTIMENTO DI DIDATTICA DELLA MUSICA



Biennio di Didattica della Musica - Tecnologie per la didattica della Musica

SOUND SPACE EXPLORER: APPLICAZIONE IMMERSIVA PER UNA NUOVA DIDATTICA DEL SUONO

Relatore: Prof.ssa Marcella Mandanici

Tesi di Laurea di:
Giuseppe Bergamino
Matr. Nr. 6417

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*“Music is sounds, sounds around us whether we’re in or out
of concert halls.”*

John Cage

*“There is no end to this project, just the continuous struggle
to beautify the world in whatever ways people
with good ears can imagine.”*

Raymond Murray Schafer

Abstract

This thesis explores a new approach to music education, transitioning from a traditional focus on musical execution to an inclusive and interdisciplinary perspective centered on sound as a cultural, environmental, and artistic phenomenon. Grounded in the pedagogical principles of Raymond Murray Schafer's book *A Sound Education: 100 Exercises in Listening and Sound-making*, the proposed framework seeks to integrate sound education into contemporary curricula, emphasizing active listening, critical engagement, and ecological awareness.

Central to this work is the development of a digital educational system, the *Sound Space Explorer* (SSE), which leverages auditory augmented reality and binaural spatialization to immerse students in rich sonic environments. The SSE system allows students to interact with natural soundscapes, fostering a deeper understanding of spatial perception and ecological sustainability.

The thesis is structured across five chapters: the first provides a theoretical foundation, tracing the evolution from traditional music education to sound education, supported by national curricular guidelines and the objectives of the United Nations' 2030 Agenda. The second chapter outlines the technological design of the SSE system, detailing the hardware and software components developed. The third chapter presents tailored educational proposals for integrating SSE into schools, aligned with STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics) methodologies. The fourth chapter proposes experimental protocols to evaluate the system's pedagogical impact, emphasizing criteria such as usability, engagement, and ecological awareness. The final chapter discusses the system's potential contributions to the field of education and future directions for implementation.

*a Chiara,
al suo amore,
alla sua pazienza.*

Indice

Abstract	ii
Indice	iv
Introduzione	1
1 Dalla musica al suono	4
1.1 L'educazione musicale nei curricoli scolastici ministeriali	5
1.1.1 La scuola dell'infanzia	6
1.1.2 La scuola del primo ciclo	7
1.1.3 Licei musicali e coreutici	9
1.1.4 Musica e Agenda 2030	10
1.2 Verso un'educazione al suono	11
1.2.1 Paesaggio sonoro e Soundscape Ecology	13
1.2.2 I 100 esercizi di ascolto di Schafer	14
1.2.3 Integrazione STEAM	15
1.3 Tecnologie e approcci didattici	16
1.3.1 Coding Musicale	17
1.3.2 Laboratori musicali digitali	18
1.3.3 Tecnologie Immersive	19
2 Design per la realtà aumentata uditiva	21
2.1 La realtà aumentata	22
2.1.1 La realtà aumentata uditiva	23

2.1.2	L'ascolto binaurale	24
2.1.3	Plug-Ins IEM e Reaper	27
2.1.4	Head-Dynamic Binaural Synthesis System	28
2.2	Sviluppo di un modulo head-tracker	30
2.2.1	Inertial Measurement Unit	31
2.2.2	Il sensore MPU-9250	33
2.2.3	Implementazione software e test	34
2.3	Scambio dati wireless	37
2.3.1	La board ESP32 Lolin32 Lite	39
2.3.2	Lo standard Wi-Fi	40
2.3.3	Creazione di un network locale	41
2.3.4	Audio wireless multicanale	44
2.4	Design immersivo in Reaper	45
2.4.1	Gestione dati dei sensori	47
2.4.2	Codifica Ambisonics e routing	48
2.4.3	Decodifica binaurale	50
3	Il progetto Sound Space Explorer	52
3.1	Il sistema MISMO	53
3.1.1	Design hardware	54
3.1.2	Design software	56
3.1.3	Gestione IoT	61
3.2	Composizione di soundscapes per il Sound Space Explorer	62
3.2.1	Elementi di estetica nel soundscape	64
3.2.2	Soundscape Vetta	65
3.2.3	Soundscape Bosco	66
3.2.4	Soundscape Lago	67
3.2.5	Soundscape Fiume	68
3.2.6	Tabella riassuntiva	68
3.3	Metodologia e obiettivi pedagogici	69
3.3.1	Metodologia didattica	70
3.3.2	Obiettivi pedagogici	71

3.3.3	Criteri di valutazione	73
3.3.4	Strategie di implementazione	74
3.4	Proposte per percorsi didattici	75
3.4.1	Scuola dell'infanzia	76
3.4.2	Scuola primaria	77
3.4.3	Scuola secondaria di primo grado	79
3.4.4	Scuola secondaria di secondo grado	80
3.5	Sintesi e riflessioni	82
4	Sperimentazione Sound Space Explorer	83
4.1	Metodo sperimentale	84
4.1.1	Design Based Research	85
4.1.2	Action Research	86
4.1.3	Between Subjects Design	87
4.2	Protocollo sperimentale	89
4.2.1	Valutazione dei risultati	91
4.2.2	Assegnazione punteggio	92
4.3	Valutazione User Experience	93
4.3.1	System Usability Scale (SUS)	95
4.3.2	Questionari UX personalizzati	96
5	Conclusioni	98
5.1	Sintesi del progetto	98
5.2	Impatto e contributi	99
5.3	Limiti	100
5.4	Sviluppi futuri	102
Bibliografia		110
Appendice		112
A Tabella di analisi dei 100 Esercizi		113
B Tabelle per la didattica		131

C Questionari System Usability Scale	135
D Questionari User Experience	139

Introduzione

Il mondo contemporaneo è caratterizzato da un’evoluzione tecnologica in rapida e costante crescita. La digitalizzazione ha trasformato ogni aspetto della nostra società, dall’educazione al lavoro, rendendo indispensabile l’acquisizione di nuove competenze, in particolare per giovani studenti e docenti. In questo contesto, l’innovazione tecnologica non può essere separata dalla riflessione pedagogica: l’integrazione tra tecnologia e didattica rappresenta una sfida e al tempo stesso un’opportunità per sviluppare approcci educativi innovativi e multidisciplinari. Metodi come l’educazione STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics) stanno guadagnando sempre più spazio nelle scuole italiane grazie a finanziamenti pubblici e politiche educative mirate. Tuttavia, in ambiti specifici come l’educazione musicale, mancano ancora strumenti tecnologici accessibili e metodologie didattiche adeguate per affrontare le sfide contemporanee.

Parallelamente, la musica ha vissuto trasformazioni epocali grazie all’introduzione di strumenti tecnologici sempre più avanzati. Nonostante ciò, l’insegnamento musicale nelle scuole continua a privilegiare un approccio centrato su aspetti tonali, ritmici ed esecutivi, trascurando altri parametri musicali fondamentali come il timbro, la densità, l’energia, e soprattutto la spazialità. Quest’ultima, in particolare, rappresenta un elemento di straordinario potenziale espressivo e didattico, capace di stimolare una percezione più profonda del suono e una maggiore consapevolezza ecologica e culturale.

Questa tesi propone un nuovo approccio all'educazione al suono, fondato sull'utilizzo di tecnologie immersive basate su realtà aumentata uditiva e sulla progettazione di un sistema didattico chiamato *Sound Space Explorer*. Il sistema, integrando tecniche di spazializzazione binaurale e tracciamento della testa, offre agli studenti un'esperienza educativa unica, volta a migliorare la comprensione della tridimensionalità del suono e a promuovere un ascolto più attento e consapevole.

La struttura della tesi si sviluppa in cinque capitoli principali:

- Il Capitolo 1 analizza le basi teoriche del progetto, concentrandosi sulla transizione dall'educazione musicale tradizionale all'educazione al suono. Viene discusso il contributo delle Indicazioni Nazionali, dell'Agenda 2030, e dell'approccio educativo STEAM, con un focus particolare sulle opere di Raymond Murray Schafer.
- Nel Capitolo 2 viene descritto il design tecnologico del sistema proposto, sia dal punto di vista hardware che software, con particolare attenzione alla realtà aumentata uditiva e alla spazializzazione binaurale.
- Il Capitolo 3 presenta le proposte didattiche e pedagogiche del progetto *Sound Space Explorer*, articolate in percorsi educativi specifici per diversi ordini e gradi scolastici.
- Il Capitolo 4 propone un approccio sperimentale per la validazione del sistema, descrivendo protocolli, criteri di valutazione e strumenti come tabelle di analisi e questionari.
- Infine, il Capitolo 5 sintetizza i risultati ottenuti, analizza i limiti del progetto e propone sviluppi futuri per la ricerca e l'applicazione del sistema SSE.

Gli obiettivi principali di questo lavoro sono:

- Esplorare le potenzialità della realtà aumentata con tecnica binaurale e tracciamento della testa nell'educazione musicale.

- Progettare un sistema di ascolto immersivo con finalità pedagogiche basate sul libro *Educazione al suono: 100 esercizi per ascoltare e produrre il suono* di Raymond Murray Schafer.
- Definire un framework metodologico per testare e valutare l'efficacia di questo sistema in contesti scolastici.

Attraverso questo approccio, la tesi mira non solo a proporre un nuovo paradigma educativo, ma anche a contribuire al dibattito su come le tecnologie immersive possano arricchire l'esperienza didattica e sensibilizzare le nuove generazioni all'importanza del suono e del paesaggio acustico nel mondo contemporaneo.

Capitolo 1

Dalla musica al suono

Questo primo capitolo affronta l’evoluzione dell’educazione musicale verso un approccio più ampio e inclusivo, che riconosce il suono come elemento fondamentale del nostro ambiente e strumento educativo trasversale. Tradizionalmente percepita come un’esperienza estetica o performativa, la musica viene qui riletta in una prospettiva che intreccia aspetti creativi, ecologici e pedagogici, considerando il suono non solo come materia d’arte, ma anche come mezzo per stimolare la percezione critica e la consapevolezza ambientale.

Partendo dalle Indicazioni Nazionali per l’educazione musicale[1], il capitolo esamina come le istituzioni educative italiane possano strutturare e promuovere l’insegnamento della musica nei diversi gradi scolastici, dalla scuola dell’infanzia ai licei musicali. Questi curricoli rappresentano la base normativa e operativa su cui si innesta la riflessione proposta all’interno della tesi.

Successivamente, viene analizzato uno degli aspetti centrali di questo lavoro: il passaggio dall’educazione musicale tradizionale a una più ampia educazione al suono, esplicitando le implicazioni pedagogiche di una distinzione tra suono e musica. Particolare attenzione è riservata al concetto di ascolto critico e attivo, ispirato dal lavoro di autori come Raymond Murray Schafer[2], che ha posto le basi per una nuova sensibilità verso il paesaggio sonoro. In questa prospettiva, si collega l’educazione sonora agli obiettivi di sviluppo sostenibile dell’Agenda 2030[3], sottolineando l’importanza di promuovere una consapevolezza ecologica e

culturale.

Infine, il capitolo esplora le potenzialità dell'integrazione dell'educazione sonora nell'approccio *STEAM* (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics). Questa sinergia tra discipline scientifiche e artistiche non solo arricchisce i percorsi educativi, ma stimola negli studenti una visione interdisciplinare, fondamentale per affrontare le sfide della contemporaneità.

Nel contesto normativo e curricolare italiano, è essenziale comprendere come le Indicazioni Nazionali abbiano strutturato l'insegnamento della musica e del suono nei diversi livelli scolastici. La prossima sezione analizzerà nel dettaglio questi documenti, mettendo in luce le opportunità e le criticità esistenti per una nuova educazione sonora.

1.1 L'educazione musicale nei curricoli scolastici ministeriali

L'educazione musicale in Italia si basa su un quadro normativo delineato dalle Indicazioni Nazionali[1], stabilite nel decreto ministeriale del 16 novembre 2012, n. 254, che definisce le linee guida per l'insegnamento della musica nella scuola dell'infanzia e nel primo ciclo di istruzione. Questo documento rappresenta un punto di riferimento fondamentale per la progettazione educativa nelle scuole italiane, attribuendo alla musica un ruolo centrale nello sviluppo delle competenze trasversali degli studenti. In particolare, l'educazione musicale è riconosciuta come un elemento chiave per promuovere la cittadinanza globale, favorendo l'inclusione, la comprensione interculturale e la sensibilità ecologica, tutti elementi essenziali in un contesto educativo sempre più globalizzato e connesso. Si evidenzia come la musica non solo supporti lo sviluppo delle capacità espressive e creative degli studenti, ma contribuisca anche alla maturazione di competenze fondamentali per una cittadinanza consapevole, quali l'ascolto attivo, la cooperazione, il rispetto per la diversità e la valorizzazione delle differenze culturali. La musica, in questo senso, diventa un veicolo privilegiato per la trasmissione di valori etici e civili, rafforzando il legame tra arte, educazione e partecipazione sociale [1].

Il successivo aggiornamento del 2018[4] ha introdotto un ulteriore approfondimento sull'importanza delle competenze di apprendimento permanente (*lifelong learning*)[5] e sull'approccio *learning to learn* (imparare a imparare)[6], riflettendo un cambiamento significativo nella concezione dell'educazione musicale e allineandosi al Quadro Europeo delle Qualificazioni (EQF)[7] e agli obiettivi dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile[3]. Non si tratta più di un ambito scolastico relegato a una funzione estetica, ma di un'area che contribuisce in maniera sostanziale alla formazione di cittadini critici e consapevoli, in grado di affrontare le sfide di un mondo in continua evoluzione. L'educazione musicale, quindi, non ha solo l'obiettivo di trasmettere competenze tecniche, ma di formare persone più consapevoli della propria identità culturale e del contesto globale in cui vivono [8].

L'analisi delle Indicazioni Nazionali e del loro aggiornamento mette in luce l'importanza di ridefinire l'educazione musicale in chiave interdisciplinare e innovativa. Questo passaggio, approfondito nel Paragrafo 1.2, trova nella transizione verso un'educazione al suono un punto cardine per ampliare il ruolo della musica, superando i limiti di una visione puramente esecutiva e tonale.

1.1.1 La scuola dell'infanzia

Le Indicazioni Nazionali del 2012 sottolineano l'importanza delle discipline artistiche, in particolare la musica, per il pieno sviluppo della personalità del bambino e della bambina. Come evidenziato nel documento (Sezione 1, p.12): *L'educazione artistica contribuisce alla formazione di individui capaci di esprimersi in modo creativo e di apprezzare consapevolmente il valore dei beni artistici, culturali e ambientali*[1]. L'arte diventa - dunque - uno strumento cruciale non solo per l'espressione individuale, ma anche per favorire la partecipazione sociale e culturale fin dalla prima infanzia.

In questo contesto, la musica è descritta come *"un'esperienza universale che si manifesta in modi e generi diversi, tutti di pari dignità"* e viene affermato esplicitamente che *"Il bambino, interagendo con il paesaggio sonoro, sviluppa le proprie capacità cognitive e relazionali, impara a percepire, ascoltare, ricercare e discriminare i suoni all'interno di contesti di apprendimento significativi"* (2012,

Sezione 2, p. 14)[1]. Questo approccio supera la concezione tradizionale della musica legata esclusivamente alla prassi esecutiva, promuovendo invece un ascolto critico e attivo che favorisce lo sviluppo cognitivo, emotivo e relazionale.

L’ascolto del paesaggio sonoro non è un’attività passiva, ma un’esperienza esplorativa che accresce la fiducia del bambino nelle proprie capacità espressive e simboliche. Attraverso il corpo, la voce e oggetti di uso quotidiano, i bambini vengono incoraggiati a sperimentare e a creare combinazioni sonore che riflettono il loro ambiente acustico. Come sottolineato da Raymond Murray Schafer, *”L’ascolto e la percezione del suono sono chiavi di accesso al mondo che ci circonda”*[9]. L’interazione con il paesaggio sonoro diventa quindi uno strumento fondamentale per stimolare la creatività e la comprensione culturale dei bambini. Le Indicazioni Nazionali evidenziano inoltre che *”I bambini dovrebbero sviluppare un interesse crescente per la musica, seguendo con curiosità spettacoli musicali e teatrali e scoprendo il paesaggio sonoro attraverso attività di percezione e produzione musicale.”* In questo senso, viene suggerito che l’uso di alfabeti musicali informali, per codificare e riprodurre i suoni, rappresenta un primo passo verso una comprensione più strutturata della musica, pur mantenendo la spontaneità tipica dell’età infantile [1].

1.1.2 La scuola del primo ciclo

Nella scuola del primo ciclo¹, le Indicazioni Nazionali enfatizzano il ruolo delle discipline artistiche, inclusa la musica, nel promuovere lo sviluppo globale della persona. L’educazione musicale si configura come un elemento chiave per il potenziamento delle competenze cognitive, espressive e sociali degli alunni, contribuendo a una maggiore consapevolezza del paesaggio sonoro e del patrimonio culturale in cui essi vivono.

Attraverso la sua funzione critico-estetica, l’educazione musicale stimola negli studenti una sensibilità artistica che si basa sull’interpretazione di messaggi sonori e sull’analisi critica delle opere d’arte, promuovendo autonomia di giudizio e una fruizione consapevole del patrimonio culturale. Posizione sostenuta anche da

¹Comprendente la scuola primaria e la scuola secondaria di primo grado

Hargreaves et al. (2012)[10], che sottolineano come l’interazione tra musica e altre forme artistiche possa amplificare le capacità di riflessione critica.

La scuola primaria Nella scuola primaria, le Indicazioni Nazionali pongono particolare attenzione allo sviluppo di competenze di base legate all’ascolto e alla discriminazione dei suoni, sia in termini qualitativi che spaziali, e alla loro relazione con le fonti sonore. Gli alunni sono incoraggiati a esplorare diverse possibilità espressive attraverso la voce, oggetti sonori e strumenti musicali. Le attività includono l’utilizzo di forme di notazione, tanto informali quanto codificate, per creare combinazioni timbriche, ritmiche e melodiche, utilizzando il corpo, la voce e strumenti musicali, anche tecnologici.

Un aspetto centrale è rappresentato dall’improvvisazione creativa, che permette agli alunni e alle alunne di sperimentare materiali sonori e tecniche musicali, sviluppando una padronanza progressiva dei suoni e dei silenzi in modo libero e autonomo. Questo approccio stimola non solo la creatività, ma anche la capacità di ascolto attivo e collaborativo, rafforzando la consapevolezza del ruolo del suono nel contesto quotidiano e culturale.

La scuola secondaria di primo grado Nella scuola secondaria di primo grado, l’educazione musicale assume una struttura più approfondita, introducendo gli alunni a esperienze strumentali e vocali provenienti da generi e culture diverse. Come indicato nelle Indicazioni Nazionali, *”L’alunno partecipa attivamente alla realizzazione di esperienze musicali, acquisisce familiarità con diversi sistemi di notazione e viene incoraggiato a ideare e realizzare messaggi musicali e multimediali, anche attraverso l’improvvisazione e la collaborazione collettiva.”*[1] Queste attività consentono agli studenti di confrontarsi con modelli appartenenti al patrimonio musicale globale, sviluppando una riflessione critica sui contesti storico-culturali di riferimento.

Gli alunni sono inoltre invitati a sviluppare capacità critiche nell’analisi di opere musicali, materiali e eventi sonori, mettendoli in relazione con la propria esperienza personale. L’integrazione tra musica e altre discipline artistiche amplia il loro orizzonte esperienziale, fornendo strumenti per utilizzare codici avanzati,

inclusi quelli digitali. Il contatto diretto con il paesaggio sonoro e il patrimonio musicale locale e globale promuove una sensibilità estetica, una consapevolezza culturale e una coscienza ecologica, in linea con gli obiettivi educativi dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile [3].

1.1.3 Licei musicali e coreutici

Il sistema educativo italiano riconosce l'importanza dell'educazione musicale nei percorsi scolastici, ma nel secondo ciclo di istruzione la musica è spesso assente dalla maggior parte dei curricoli, con la preziosa eccezione espressa dai licei musicali e coreutici. Questi istituti, istituiti dal Decreto numero 89 del Presidente della Repubblica (15 marzo 2010)[11], rappresentano un'opportunità unica per gli studenti che desiderano intraprendere un percorso educativo mirato alla musica o alla danza. L'articolo 13 del decreto definisce tali percorsi come strumenti fondamentali per sviluppare competenze nei linguaggi musicali e coreutici, con particolare attenzione alla composizione, interpretazione, esecuzione e rappresentazione, integrando questi aspetti con una solida base estetica, teorica e culturale.

Le Indicazioni Nazionali per i Licei Musicali, definite dal Decreto Ministeriale numero 211 (7 ottobre 2010)[12], enfatizzano il ruolo delle Tecnologie Musicali come componente essenziale del percorso formativo. Nel corso del quinquennio, gli studenti dovrebbero acquisire competenze avanzate nell'uso delle tecnologie informatiche e multimediali, inclusi software di editing sonoro, notazione musicale e gestione di studi di registrazione. Queste competenze li preparano non solo per la produzione musicale tradizionale, ma anche per la creazione di progetti multimediali e compositivi che combinano suono, immagini e testo, sviluppando un approccio interdisciplinare alla musica.

Al termine del percorso liceale, gli studenti dovrebbero essere in grado di:

- Utilizzare consapevolmente le tecnologie digitali per acquisire, organizzare e manipolare segnali sonori.
- Sviluppare progetti compositivi e performativi integrando tecnologie audio-video.

- Esplorare l’evoluzione della musica elettronica e informatico-digitale.
- Gestire autonomamente uno studio di registrazione domestico.

Come osservato da Greenfield (2019)[13], l’integrazione delle tecnologie digitali nell’educazione musicale amplia significativamente le possibilità creative, fornendo agli studenti strumenti per affrontare il panorama contemporaneo. Questa formazione, dunque, non solo prepara gli studenti a carriere nel campo musicale, ma offre anche competenze trasferibili in altri ambiti creativi e tecnologici, come il sound design, la programmazione audio-video e la produzione multimediale. Tuttavia, nonostante l’attenzione dedicata alle tecnologie nei licei musicali, resta ancora limitata l’integrazione di metodologie innovative legate alla spazializzazione del suono e alla percezione tridimensionale dello spazio acustico.

1.1.4 Musica e Agenda 2030

Con l’integrazione delle Indicazioni Nazionali del 2018, emerge una connessione significativa tra educazione musicale e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell’Agenda 2030[3], in particolare l’*Obiettivo 4*, che mira a garantire un’educazione di qualità, equa e inclusiva per tutti². La musica, in quanto linguaggio universale, rappresenta uno strumento di inclusione e coesione sociale, capace di superare barriere culturali e linguistiche. Inoltre, l’educazione musicale e ancor più l’educazione al suono, possono sensibilizzare gli studenti su temi centrali per l’Agenda 2030, come l’*Obiettivo 11*, che promuove città e comunità sostenibili³, e l’*Obiettivo 15*, che riguarda la protezione degli ecosistemi terrestri e della biodiversità⁴.

La musica e il suono, in questo contesto, diventano strumenti potenti per esplorare e comprendere i paesaggi urbani e naturali, stimolando negli studenti una riflessione critica sulle sfide della sostenibilità ambientale. Attraverso l’ascolto attento e consapevole dell’ambiente sonoro, gli studenti possono sviluppare un approccio più rispettoso nei confronti del mondo circostante e rafforzare il loro senso

²<https://sdgs.un.org/goals/goal4>

³<https://sdgs.un.org/goals/goal11>

⁴<https://sdgs.un.org/goals/goal15>

di appartenenza alle comunità locali e globali. Questo processo educativo potrebbe contribuire alla formazione di cittadini attivi e responsabili, capaci di affrontare le sfide future con un'attenzione particolare alla sostenibilità e al benessere delle comunità.

Le scuole italiane, attraverso le Indicazioni Nazionali e i successivi aggiornamenti, sono quindi invitate a valorizzare l'educazione musicale come parte integrante del curricolo. La musica diventa uno strumento privilegiato non solo per lo sviluppo delle competenze artistiche, ma anche per promuovere una cittadinanza attiva e consapevole, intrecciando discipline artistiche, educazione civica e sostenibilità ambientale. Come sottolineato nel Documento Ministeriale *"Educazione ambientale e alla sostenibilità"*(2021)[14], questo approccio multidisciplinare consente agli studenti di comprendere meglio le connessioni tra arte, ambiente e comunità, preparando una generazione in grado di contribuire positivamente al futuro.

In questo contesto, l'educazione musicale può essere vista come un primo passo verso una più ampia educazione al suono, che abbraccia la totalità dei fenomeni sonori e il loro impatto sugli individui e sulle comunità. Questo approccio supera i confini della musica tradizionale per includere tutte le manifestazioni sonore che ci circondano: dal suono naturale a quello artificiale, dalle tecnologie alla percezione ecologica del paesaggio sonoro. Come evidenziato da Gnoni (2024)[15], un simile approccio non solo amplia la comprensione del suono, ma stimola anche un ascolto più critico, attivo e consapevole del mondo acustico.

Questo passaggio dalla musica al suono rappresenta il cuore del lavoro di questa tesi, che si propone di esplorare come un'educazione al suono possa integrare metodologie innovative e tecnologie immersive per promuovere un ascolto critico ed ecologicamente consapevole, in linea con gli obiettivi dell'Agenda 2030.

1.2 Verso un'educazione al suono

L'educazione musicale nelle scuole italiane, come descritto nei paragrafi precedenti, pone l'accento su competenze e capacità che spaziano dall'ascolto critico alla

produzione musicale, riconoscendo il valore della musica come forma di espressione culturale e personale. Tuttavia, la transizione dall'educazione musicale tradizionale verso un'educazione al suono non è scontata e richiede un cambiamento di prospettiva: non più solo un'attenzione alla musica intesa come esecuzione, ma una riflessione più ampia sul suono come fenomeno culturale, ambientale e artistico. L'approccio proposto in questo lavoro di tesi intende estendere l'orizzonte educativo, permettendo agli studenti di interagire con il suono non solo come fenomeno musicale, ma anche come elemento fondamentale dell'ambiente e del paesaggio sonoro. Come sottolineato da Krause (2012), l'ascolto attivo e consapevole del paesaggio sonoro consente una comprensione più completa e profonda del mondo che ci circonda [16]. Il titolo stesso di questo capitolo *Dalla musica al suono* non è pensato per creare contrapposizione tra tradizione consolidata e approccio innovativo. La distinzione tra suono e musica non è intesa con accezione critica, ma come opportunità per allargare la comprensione di ciò che è sonoro e di come esso possa essere percepito, utilizzato ed esplorato in contesti educativi più flessibili e inclusivi. L'approccio all'educazione musicale deve evolversi, integrando la percezione del suono con quella dei suoi molteplici aspetti ambientali e sociali, promuovendo una visione che consideri il suono come un fenomeno complesso, multidimensionale e multidisciplinare. In questo lavoro di tesi, l'educazione al suono è presentata come un'opportunità per ripensare l'approccio educativo alla luce delle trasformazioni tecnologiche e culturali contemporanee. Attraverso l'integrazione di concetti provenienti da discipline come l'acustica, la bioacustica e l'ecologia, si intende promuovere una visione olistica del suono, che abbracci tanto la sua dimensione estetica quanto quella ambientale e scientifica. Il suono deve diventare un mezzo per esplorare, riflettere e contribuire alla costruzione di una nuova coscienza ecologica [17].

Questo passaggio richiede, tuttavia, strumenti e metodologie adeguati. Nei paragrafi seguenti, si esploreranno i tre aspetti che si è ritenuto fondamentale considerare e studiare a fondo.

1.2.1 Paesaggio sonoro e Soundscape Ecology

Il concetto di *paesaggio sonoro* (*soundscape*) viene definito da Michael Frank Southworth nel 1967[18] e successivamente ampliato e divulgato da Raymond Murray Schafer. Questo termine si riferisce all'insieme dei suoni che caratterizzano un determinato ambiente, naturale o urbano, e che costituiscono l'esperienza uditiva di chi lo vive[19]. Ogni paesaggio sonoro racconta una storia unica, intrecciando elementi sonori naturali, come il canto degli uccelli o il rumore del vento, con quelli prodotti dall'uomo, come il traffico o le attività industriali. Comprendere e analizzare il paesaggio sonoro significa esplorare come i suoni definiscano l'identità di un luogo, influenzino il nostro comportamento e modellino la nostra percezione dell'ambiente.

La *soundscape ecology* amplia questa visione[20], indagando l'interazione tra i suoni, gli ecosistemi e le attività umane. Questa disciplina si concentra non solo sul riconoscimento dei suoni che compongono un paesaggio, ma anche sull'analisi di come essi influenzino l'equilibrio ecologico e riflettano i cambiamenti ambientali. Truax (2001) descrive la soundscape ecology come una disciplina che *"si occupa di studiare e progettare il paesaggio sonoro in modo da migliorare l'ambiente umano e naturale"*[17].

L'autore di questa tesi ritiene che l'assonanza di questi concetti con le Indicazioni Nazionali e l'Agenda 2030 sia talmente armoniosa da ritenere imprescindibile la loro integrazione, per evitare di perdere un'importante opportunità didattica e metodologica: il paesaggio sonoro e la soundscape ecology offrono una prospettiva educativa unica, che unisce dimensioni artistiche, scientifiche ed ecologiche. Al fine di tradurre questa riflessione personale in una pratica didattica efficace si è ricercata una metodologia esistente per sviluppare concretamente attività educative che stimolino l'ascolto critico e consapevole degli studenti. Questo tema verrà approfondito nella sezione successiva.

1.2.2 I 100 esercizi di ascolto di Schafer

Il lavoro di Raymond Murray Schafer rappresenta un punto di riferimento fondamentale nel campo dell'educazione al suono e dell'ecologia acustica. Nel suo libro *L'educazione al suono: 100 Esercizi per ascoltare e produrre il suono*[2], Schafer propone una serie di attività pratiche che invitano gli studenti a esplorare e comprendere il suono nel suo contesto quotidiano, andando oltre i limiti della teoria musicale tradizionale. Gli esercizi sono pensati per affinare la percezione uditiva e promuovere una maggiore sensibilità verso i paesaggi sonori che ci circondano.

Questi esercizi, classificabili in macro-temi e temi più specifici, spaziano dall'osservazione dei suoni presenti nell'ambiente alla loro classificazione secondo criteri qualitativi (ad esempio, intensità, frequenza o timbro), fino ad attività più creative come l'improvvisazione e la produzione intenzionale di suoni. L'approccio di Schafer si basa sull'idea che l'ascolto consapevole sia il primo passo per sviluppare una comprensione profonda del rapporto tra suono, ambiente e cultura.

La tabella di analisi allegata in Appendice B fornisce una panoramica strutturata di tutti i cento esercizi, organizzandoli in categorie tematiche e valutandone l'adattabilità a diversi contesti educativi. Questo personale lavoro di classificazione rappresenta uno strumento prezioso per avere una visione globale sulla metodologia sviluppata da Schafer e verrà organicamente sfruttato per il progetto proposto nel Capitolo 3 di questo lavoro di tesi.

Gli esercizi di Schafer offrono, dunque, un modello didattico versatile, in grado di stimolare la riflessione critica e la creatività degli studenti, contribuendo allo sviluppo di competenze trasversali come l'ascolto attivo, la collaborazione e la sensibilità ecologica. Essi rappresentano un punto di partenza ideale per integrare l'educazione sonora nei curricoli scolastici, fornendo un metodo innovativo per collegare la musica all'ambiente e alla sostenibilità.

In un contesto educativo sempre più caratterizzato dall'uso di strumenti digitali e approcci multidisciplinari, gli esercizi di Schafer potrebbero trarre ulteriore vantaggio dalla loro trasposizione in ambienti didattici moderni. Si ritiene che la possibilità di tradurre queste attività in piattaforme digitali e di intergrarle con metodologie contemporanee, offrirebbe nuove opportunità per arricchire il percorso

educativo.

L'adattamento degli esercizi di Schafer alle necessità e agli strumenti educativi moderni rappresenta, dunque, un'occasione per ripensare l'educazione sonora in modo più dinamico e interattivo, rispondendo alle esigenze di una generazione di studenti sempre più immersa in ambienti tecnologici. Le possibilità di integrazione di questi esercizi con il mondo contemporaneo saranno approfondita nella sezione successiva.

1.2.3 Integrazione STEAM

Tra le varie metodologie educative esistenti, l'approccio *STEAM* (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics) si configura come quello più affine alle idee fondanti di questo lavoro di tesi. Questo approccio integra scienza, tecnologia, ingegneria, arte e matematica in modo coeso e multidisciplinare, utilizzando le discipline artistiche – tra cui la musica – non solo come strumenti espressivi, ma anche come veicoli per comprendere e applicare principi scientifici e tecnologici [21]. La metodologia STEAM si propone di sviluppare competenze trasversali che spaziano dalla creatività alla risoluzione di problemi, promuovendo un apprendimento pratico che supera i confini tradizionali delle singole discipline.

Nel contesto dell'educazione musicale, l'uso della musica per insegnare concetti scientifici ha dato vita a progetti personalmente ritenuti rilevanti. Il programma *EarSketch* di Mahadevan et al. (2015), ad esempio, utilizza la programmazione per creare musica digitale, dimostrando come l'integrazione della musica con la tecnologia possa stimolare l'interesse degli studenti verso la scienza informatica [22]. Un altro esempio è fornito dal *Music Entertainment Technology Lab* (METLab)⁵, che ha sfruttato la musica per insegnare acustica e sintesi del suono, mostrando che la combinazione tra arte e scienza facilita la comprensione di concetti scientifici complessi in modo pratico e coinvolgente [23].

Nonostante questi evidenti benefici, si ritiene che l'integrazione della musica come contenuto principale in un contesto STEAM è ancora poco esplorata, soprattutto nel panorama educativo italiano. Il collegamento tra musica, scienza e

⁵<https://www.met-lab.org/>

tecnologia deve essere preso in particolare considerazione per lo sviluppo di metodologie didattiche innovative, come quelle esplorate in questo lavoro di tesi. Gli esercizi di Schafer, con la loro natura esplorativa e creativa, si prestano a essere reinterpretati attraverso l'ottica STEAM, creando un terreno fertile per collegare l'educazione sonora alle discipline scientifiche e tecnologiche.

La realizzazione di questi scenari educativi richiede, tuttavia, l'impiego di tecnologie adeguate che possano supportare l'integrazione tra suono, ecologia e scienza. Nel prossimo paragrafo verranno analizzate le principali tecnologie disponibili e i relativi approcci didattici, evidenziando le potenzialità di questi strumenti per promuovere un'educazione sonora moderna e interdisciplinare.

1.3 Tecnologie e approcci didattici

L'educazione al suono e musicale beneficia oggi di tecnologie che supportano l'approccio STEAM, promuovendo un apprendimento multidisciplinare e lo sviluppo di competenze trasversali. In questa sezione vengono analizzate le principali tecnologie didattiche rilevanti per il tema di questa tesi, organizzate in tre categorie:

- **Coding musicale:** unisce creatività e programmazione per creare un ponte tra musica e scienze informatiche, favorendo lo sviluppo di competenze logiche e creative.
- **Laboratori musicali digitali:** ambienti interattivi che consentono agli studenti di esplorare concetti musicali e scientifici in modo ludico ed esperienziale, utilizzando software e dispositivi digitali.
- **Tecnologie immersive:** strumenti come la realtà virtuale e aumentata, che offrono nuove modalità di esplorazione tridimensionale del suono e del paesaggio sonoro, favorendo un ascolto critico e consapevole.

Questa suddivisione permette di evidenziare come le tecnologie possano essere integrate nell'educazione musicale, valorizzando al contempo la creatività, la

scienza e la tecnologia. Nei paragrafi successivi, ciascuna di queste categorie verrà approfondita, evidenziandone le potenzialità e i limiti nell'ambito didattico.

1.3.1 Coding Musicale

Nel 2015, il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) ha introdotto il Piano Nazionale Scuola Digitale[24], che ha promosso l'adozione del *coding* come disciplina curricolare nelle scuole primarie. Il *coding*, inteso come pratica di scrittura con linguaggi informatici, rappresenta uno strumento potente per sviluppare competenze logiche, creative e collaborative fin dall'infanzia. Applicato all'educazione musicale, il coding consente di esplorare il suono e la musica attraverso linguaggi di programmazione, integrando creatività e scienze informatiche in un unico processo educativo.

Uno degli strumenti più utilizzati come introduzione al coding è *Scratch*, un linguaggio di programmazione grafico sviluppato dal MIT Media Lab e ispirato ai linguaggi *LOGO*⁶ e *Squeak*⁷. *Scratch* utilizza una logica di programmazione a blocchi, che elimina la necessità di conoscere la sintassi o le strutture algoritmiche avanzate, rendendo la programmazione accessibile e intuitiva anche per i più giovani.

All'interno di *Scratch*, la categoria Suono offre funzionalità specifiche per la produzione musicale. Gli utenti possono organizzare, registrare, riprodurre e modificare suoni già presenti nella libreria integrata o importarli liberamente. Questi strumenti consentono di creare sequenze sonore e semplici composizioni musicali, sviluppando la comprensione di concetti musicali come ritmo, melodia e timbro.

Un altro strumento significativo per il coding musicale è *Sonic Pi*⁸, un linguaggio di programmazione *open-source*⁹ sviluppato per creare musica elettronica attraverso il codice. *Sonic Pi* offre un'interfaccia accessibile che consente agli studenti di esplorare tecniche avanzate come la sintesi sonora, il campionamento e la manipolazione del suono in tempo reale. La natura testuale di *Sonic Pi*,

⁶<https://el.media.mit.edu/logo-foundation>

⁷<https://squeak.org>

⁸<https://sonic-pi.net/>

⁹Gratuito nell'utilizzo e liberamente modificabile

sebbene più complessa rispetto a Scratch, permette agli studenti più avanzati di approfondire la programmazione musicale in un contesto STEAM.

Questi strumenti dimostrano come il coding musicale possa trasformare il modo in cui gli studenti percepiscono e creano la musica, integrando principi scientifici e tecnologici con l'espressione artistica.

1.3.2 Laboratori musicali digitali

I laboratori musicali digitali rappresentano spazi educativi interattivi dove gli studenti possono esplorare concetti musicali e scientifici attraverso strumenti tecnologici. Questi ambienti di apprendimento uniscono creatività ed esperienza pratica, spesso mediando tra aspetto ludico e didattico.

Un esempio significativo è *EarSketch*[22], una piattaforma sviluppata per insegnare programmazione informatica attraverso la creazione musicale. *EarSketch* non solo stimola l'interesse per la scienza informatica, ma permette anche di comprendere concetti musicali fondamentali come la struttura, il ritmo e l'armonia. La piattaforma si distingue per il suo approccio inclusivo, progettato per essere accessibile anche a studenti privi di competenze musicali pregresse.

Un'altra iniziativa laboratoriale rilevante è quella del *Music Entertainment Technology Lab* (METLab)¹⁰. Tra i progetti sviluppati dal METLab spiccano applicazioni interattive che utilizzano la musica per insegnare concetti di acustica, sintesi sonora e interazione uomo-computer.

Un'altra risorsa particolarmente popolare è il *Chrome Music Lab*¹¹, una collezione di esperimenti musicali interattivi sviluppata da Google. Questa piattaforma, accessibile direttamente dal browser, offre strumenti per esplorare concetti musicali come melodia, armonia, ritmo e frequenza. Gli studenti possono creare sequenze ritmiche, visualizzare onde sonore e interagire con suoni in tempo reale, imparando attraverso l'esperienza pratica e il gioco. La semplicità dell'interfaccia rende il *Chrome Music Lab* uno strumento ideale per introdurre i più giovani alla musica digitale.

¹⁰<https://drexel.edu/excite/innovation/met-lab/>

¹¹<https://musiclab.chromeexperiments.com/>

1.3.3 Tecnologie Immersive

Le tecnologie immersive rappresentano un’innovazione significativa nell’ambito dell’educazione, in grado di offrire esperienze di apprendimento coinvolgenti e multidimensionali. Con il termine *immersivo* si fa riferimento a sistemi che consentono agli utenti di sentirsi completamente coinvolti in un ambiente digitale, grazie all’utilizzo di tecnologie che stimolano i sensi, in particolare la vista e l’udito[25].

In ambito educativo, l’uso delle tecnologie immersive permette di superare i limiti dell’aula tradizionale, creando ambienti simulati in cui gli studenti possono esplorare concetti complessi in modo esperienziale[26]. In particolare, nell’educazione al suono e alla musica, queste tecnologie aprono nuove possibilità per lo studio del paesaggio sonoro e della percezione spaziale, rendendo l’apprendimento più dinamico e accessibile. Come esempio rappresentativo si riporta il progetto italiano *MusicARte*¹² che unisce l’apprendimento musicale ai tecnologie immersive, utilizzando carte interattive che, attraverso un’app dedicata, attivano segmenti musicali di grandi autori del passato.

La connessione con il lavoro di Schafer Come discusso nei paragrafi precedenti, gli esercizi di Schafer si concentrano sull’affinamento dell’ascolto critico e sull’interazione con il paesaggio sonoro. Digitalizzare queste proposte didattiche utilizzando tecnologie immersive rappresenta un’opportunità unica per ampliare l’efficacia del metodo, rendendolo più accessibile e adattabile alle necessità delle scuole moderne. Grazie alla possibilità di simulare ambienti sonori complessi e di integrare il movimento come parametro educativo, le tecnologie immersive permettono di trasportare i principi di Schafer in una dimensione didattica innovativa e multidisciplinare.

Verso il capitolo successivo Le potenzialità offerte dalle tecnologie immersive rappresentano uno dei cardini di questo lavoro di tesi. Nel Capitolo 2, verranno approfonditi gli aspetti tecnici e progettuali di un sistema didattico basato su realtà aumentata uditiva, progettato per tradurre gli esercizi di Schafer in un

¹²<https://www.scuoladirobotica.it/>

ambiente digitale immersivo. Questo sistema non si propone solo come un mezzo per innovare l'educazione al suono, ma anche come una piattaforma per esplorare nuove frontiere nella didattica musicale contemporanea.

Capitolo 2

Design per la realtà aumentata uditiva

Il secondo capitolo di questo lavoro di tesi si dedica allo sviluppo tecnologico di un sistema per la fruizione immersiva di paesaggi sonori, esplorando le intersezioni tra innovazioni tecniche e opportunità per l'educazione musicale. Il primo aspetto che verrà indagato è quello della realtà aumentata¹, definito nel *Continuum Reality-Virtuality*, un modello proposto da Paul Milgram e Fumio Kishino nel 1994 [27]. Questo modello posiziona l'AR come una fusione di elementi reali e virtuali che coesistono nello stesso spazio fisico, offrendo nuove modalità di interazione con ambienti che possono essere sia completamente artificiali che una miscela di elementi reali e digitali.

L'autore di questo lavoro di tesi ritiene che l'abilità dell'AR di manipolare e arricchire l'ambiente rende questa tecnologia particolarmente adatta per esperienze educative immersive. Il presente capitolo dettaglia la tecnologia hardware e software sviluppata, illustrando come queste componenti collaborino per realizzare un sistema efficace per le strategie didattiche discusse in dettaglio nel Capitolo 3.

¹In inglese *Augmented Reality*, spesso abbreviata con l'acronimo AR

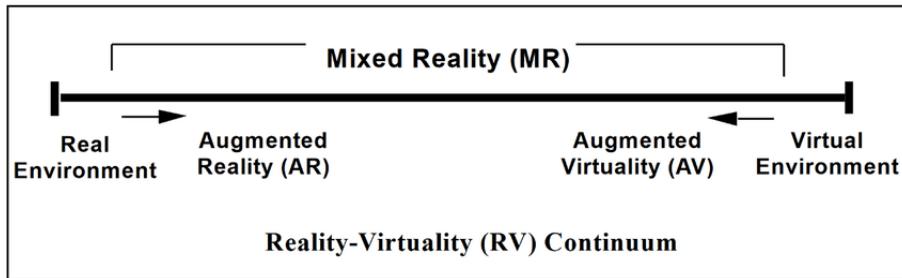


Figura 1: Il Continuum tra ambiente reale e ambiente virtuale. Tratto da Milgram e Kishino (1994) [27]

2.1 La realtà aumentata

La Realtà Aumentata, comunemente abbreviata con AR², è un'innovazione tecnologica che intensifica l'esperienza di un ambiente fisico mediante l'ampliamento dei suoi elementi percettivi. Questo ampliamento viene ottenuto attraverso l'aggiunta di input sensoriali digitali — visivi, uditivi, tattili e olfattivi — che arricchiscono la percezione dell'utente[28]. In tale contesto, il termine **multimodale** assume particolare rilevanza: a differenza di *multimediale*, che si concentra sui mezzi tecnici utilizzati per raggiungere un obiettivo, *multimodale* si riferisce ai canali comunicativi e sensoriali impiegati per veicolare un messaggio. Ad esempio, cinema, televisione e social media possono essere considerati strumenti multimodali, poiché combinano immagini, suoni e testo per comunicare; al contrario, la radio è un medium monomodale, poiché si basa esclusivamente sulla componente acustica.

Un sistema AR è, per definizione, esplicitamente multimodale, stabilendo una stretta relazione tra l'ambiente reale, artificiale e i sensi del frutto. Tutte le entità sono monitorate digitalmente per acquisire informazioni sulle reciproche influenze, generando elaborazioni che rendono le manipolazioni esperienziali quanto più integrate possibile nel mondo reale. Idealmente, la realtà aumentata dovrebbe raggiungere qualità immersive tali da fondersi senza soluzione di continuità con l'ambiente fisico, creando una forma gestaltica capace di sovrapporsi alle percezioni

²Augmented Reality

sensoriali[29]. Quando, invece, un sistema tende a generare elementi completamente surrogati o artefatti, si avvicina alla definizione di Realtà Virtuale (VR)³, in cui il mondo fisico è quasi totalmente sostituito da una simulazione.

Sviluppata inizialmente nei primi anni '90 per applicazioni militari, la tecnologia AR ha trovato una vasta adozione civile, in particolare nell'industria dei videogiochi, a partire dagli anni 2000. Con l'avanzamento delle tecnologie mobili, specialmente grazie all'evoluzione degli smartphone, l'AR ha raggiunto una diffusione capillare. I dispositivi mobili moderni, dotati di sensori avanzati e fotocamere ad alta definizione, facilitano la sovrapposizione di elementi virtuali al mondo reale, rendendo l'AR accessibile a un pubblico sempre più ampio[30].

Nel contesto di questa tesi, l'Augmented Reality (AR) non viene esplorata nel suo tradizionale impiego visivo, ma piuttosto per il suo potenziale nell'arricchire l'educazione musicale e sonora attraverso l'ampliamento dell'esperienza uditiva. Questo approccio mira a sovrapporre elementi audio digitali all'ambiente fisico, creando un layer sonoro arricchito che può essere manipolato e percepito dagli utenti in modo immersivo.

2.1.1 La realtà aumentata uditiva

Personalmente si ritiene che la realtà aumentata possa diventare didatticamente efficace quando il design del sistema privilegia l'integrazione con il mondo reale piuttosto che la completa immersione in esso. In questo contesto, è fondamentale che il layer degli elementi aumentati lasci ampio spazio al mondo fisico, evitando un coinvolgimento sensoriale eccessivamente multimodale, soprattutto per quanto riguarda la propriocezione. Un'applicazione didattica troppo immersiva, infatti, potrebbe isolare il discente dall'ambiente circostante, concentrando l'attenzione sull'apparato tecnologico utilizzato, a discapito dell'idea pedagogica che ne guida l'utilizzo. Questo aspetto diventa ancora più rilevante in situazioni in cui più studenti interagiscono contemporaneamente con il sistema: un'azione multisensoriale troppo intensa sul singolo rischierebbe di compromettere la capacità di collaborazione e di interazione tra i partecipanti[31].

³Comunemente indicata con il termine inglese Virtual Reality

Per queste ragioni, nel progetto descritto in questo lavoro di tesi si è scelto di coinvolgere principalmente il senso dell'udito e della propriocezione, ovvero la percezione della posizione del proprio corpo nello spazio rispetto a una o più sorgenti sonore. Questo approccio si discosta dalla spazializzazione classica, in cui l'attenzione è focalizzata sulla localizzazione di eventi provenienti da elementi fisicamente statici (ad esempio, altoparlanti), e i suoni sono composti in funzione di una prospettiva acustica predeterminata. Nel sistema proposto, invece, gli eventi sonori rimangono statici nello spazio, e sono gli utenti a muoversi fisicamente per esplorare l'ambiente sonoro aumentato.

Questo orientamento si basa sulla distinzione tra multimedialità e multimodalità e ha implicazioni sia didattiche, approfondite nel Capitolo 4, che tecnologiche, in relazione alle scelte di sensoristica, elaborazione e riproduzione. L'obiettivo è sviluppare un sistema in grado di posizionare paesaggi sonori virtuali all'interno di un ambiente reale, consentendone la percezione attraverso l'esplorazione fisica di uno spazio digitalmente aumentato[32].

Attualmente, le cuffie rappresentano l'unico dispositivo capace di garantire una prospettiva sonora strettamente personalizzata in relazione alla posizione e all'orientamento del corpo di ogni utente. Sebbene tali dispositivi possano apparire poco pratici in contesti didattici, sono stati adottati in questo progetto per le loro potenzialità nel supportare la realtà aumentata uditiva (da qui in avanti definita con l'acronimo inglese AAR⁴).

2.1.2 L'ascolto binaurale

L'ascolto binaurale è una tecnica di diffusione sonora stereo progettata per ricreare un panorama acustico tridimensionale, utilizzando specifici microfoni o algoritmi DSP⁵. Questa tecnologia, ottimizzata per l'ascolto in cuffia, consente di simulare con precisione le caratteristiche spaziali del suono[33].

Dal punto di vista dell'acquisizione, una registrazione binaurale si definisce tale quando il sistema microfonico è progettato per riprodurre fedelmente i fenomeni

⁴Auditory Augmented Reality

⁵Digital Signal Processing

fisici che consentono all'orecchio umano di localizzare una sorgente sonora. La localizzazione può essere descritta attraverso tre coordinate spaziali principali:

- **Azimuth:** Determinato dalla differenza temporale di arrivo del suono alle orecchie (*interaural time difference*), dalla differenza di ampiezza tra i canali (*interaural level difference*) e dal filtraggio delle alte frequenze causato dal corpo, dalla testa e dai padiglioni auricolari.
- **Elevazione:** Influenzata dalle riflessioni e dai filtraggi che si verificano nel padiglione auricolare, che creano sfasamenti e alterazioni spettrali.
- **Distanza:** Percepita tramite l'attenuazione delle alte frequenze nel fronte d'onda e, in ambienti chiusi, dal rapporto tra suono diretto e riverberato.

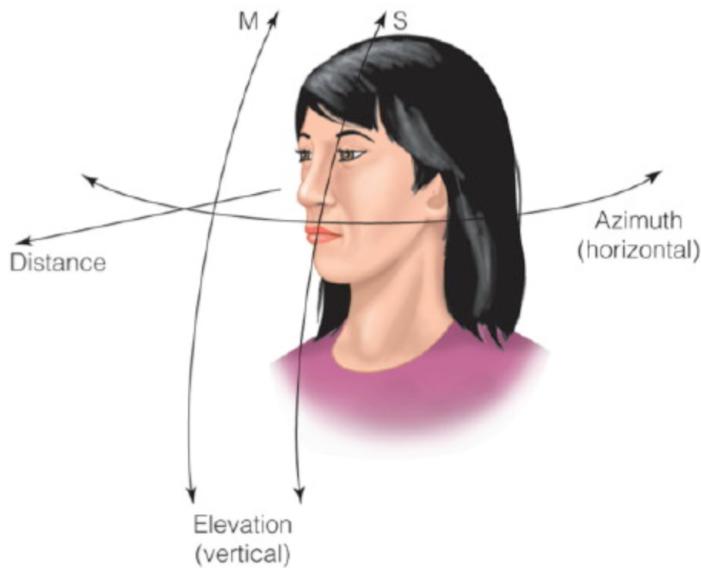


Figura 2: Rappresentazione grafica delle coordinate spaziali di Azimuth, Elevazione e Distanza. Tratto da *Audiology - A Curriculum for Excellence* (Scottish Sensory Centre): <https://www.ssc.ed.ac.uk/courses/deaf/dnov10i.html>

Le registrazioni binaurali utilizzano due microfoni (omnidirezionali o cardioidi) separati da una distanza di 17-19 cm, montati su una testa artificiale (*dummy-head*) che simula le caratteristiche anatomiche umane. Questa configurazione permette di ottenere un’esperienza sonora altamente immersiva, riproducendo fedelmente le caratteristiche acustiche della testa e del busto. Un esempio è il modello KU100 prodotto da Neumann, rappresentato in Figura 3.



Figura 3: Dummy-head prodotta dall’azienda Neumann, modello KU100. Tratto dal sito ufficiale <https://en-de.neumann.com/ku-100>

Una componente fondamentale dell’ascolto binaurale è la *Head-Related Transfer Function* (HRTF), una funzione matematica che descrive come il suono viene filtrato dalla testa, dal busto e dalle orecchie prima di raggiungere i timpani. La HRTF, ottenuta dalla trasformata di Fourier della *Head-Related Impulse Response* (HRIR), permette di simulare la spazialità sonora applicando filtri digitali a sorgenti non binaurali. Questo approccio è particolarmente utile per la sintesi binaurale digitale, che consente di posizionare virtualmente qualsiasi suono in uno spazio acustico tridimensionale generato digitalmente.

La sintesi binaurale rappresenta uno strumento cruciale nello sviluppo di sistemi di realtà aumentata acustica, poiché consente di ricreare panorami sonori

virtuali con una precisione tale da garantire un’esperienza uditiva naturale e plausibile. In questo contesto, l’ascolto binaurale non si limita a migliorare la qualità del suono, ma diventa un mezzo per arricchire l’apprendimento, permettendo agli utenti di esplorare e interagire con ambienti sonori digitalmente aumentati.

2.1.3 Plug-Ins IEM e Reaper

Per il presente progetto di tesi, è stata selezionata la libreria open-source⁶ sviluppata dall’Institute of Electronic Music and Acoustic (IEM) presso l’Università di Graz⁷. Questo pacchetto software, ottimizzato per la codifica di sorgenti audio in *Ambisonics* fino al settimo ordine[34], offre una vasta gamma di plug-in dedicati alla spazializzazione sonora e alla manipolazione tridimensionale dei segnali acustici. Tra i numerosi strumenti disponibili, i plug-in impiegati per questo lavoro sono: *StereoEncoder*, *SceneRotator* e *BinauralDecoder*⁸.

Un segnale Ambisonics di settimo ordine è composto da 64 canali audio. Per garantire una gestione efficiente di tale complessità, si è scelto *Reaper*⁹ come *Digital Audio Workstation* (DAW) di riferimento, grazie alla sua capacità di supportare bus audio multicanale su singola traccia e al suo utilizzo gratuito. Il routing minimo in Reaper prevede:

- Creazione di bus da 64 canali per ogni traccia, su cui viene applicato il plug-in *StereoEncoder* per spazializzare sorgenti sonore (mono o stereo) nella sfera Ambisonics di settimo ordine.
- Manipolazione del segnale con plug-in della libreria IEM, come il *SceneRotator*, che consente di modificare dinamicamente gli angoli di *Yaw*, *Pitch* e *Roll*¹⁰, mantenendo costanti le distanze relative tra le sorgenti sonore.

⁶<https://plugins.iem.at/>

⁷<https://iem.kug.ac.at/en/>

⁸<https://plugins.iem.at/docs/plugindescriptions>

⁹<https://www.reaper.fm/>

¹⁰In italiano rispettivamente imbardata, beccheggio e rollio, termini mutuati dall’aeronautica

- Invio del segnale al master, dove il plug-in *BinauralDecoder* converte la codifica Ambisonics multicanale in un segnale binaurale stereo, ottimizzato per l’ascolto in cuffia.

Sebbene questo sistema permetta di costruire uno spazializzatore efficace, la sua applicazione per la realtà aumentata acustica presenta alcune limitazioni. Ad esempio, un suono posizionato sul lato destro del panorama binaurale rimarrà statico in quella posizione anche se l’ascoltatore ruota la testa in quella direzione. Questo comportamento è in contrasto con la percezione naturale di una sorgente fisica reale, che viene percepita come frontale quando l’ascoltatore orienta il capo verso di essa.

Per ovviare a questa limitazione, è necessario monitorare costantemente l’orientamento della testa del fruitore, modificando in tempo reale il panorama sonoro digitale. I parametri di *Yaw*, *Pitch* e *Roll* del *SceneRotator* possono essere associati ai dati acquisiti in real-time da sensori posizionati sulle cuffie. Questi dati consentono di ruotare dinamicamente il panorama Ambisonics in base ai movimenti dell’utente, prima che il segnale sia decodificato in binaurale e riprodotto in cuffia. Questo approccio garantisce una percezione sonora più naturale e coerente con i movimenti dell’ascoltatore, rendendo il sistema più idoneo per applicazioni di realtà aumentata acustica.

2.1.4 Head-Dynamic Binaural Synthesis System

Un *Head-Dynamic Binaural Synthesis System*¹¹ è un sistema che integra sensori, algoritmi di motion capture, elaborazione sonora e sintesi binaurale per garantire una riproduzione in cuffia in cui la percezione delle sorgenti acustiche virtuali sia sempre coerente con la posizione del corpo e l’orientamento della testa dell’utente[35]. Questa tecnica si basa su diverse componenti chiave:

- Monitoraggio dei 6 gradi di libertà (*Degrees of Freedom*, DoF) di un ascoltatore libero di muoversi nello spazio, comprendendo 3 gradi di rotazione e 3 di spostamento.

¹¹Traducibile con *Sistema di sintesi binaurale con dinamica riferita alla testa*

- Algoritmi per calcolare in tempo reale gli angoli di provenienza e la percezione della distanza delle sorgenti sonore rispetto all'ascoltatore.
- Una catena di DSP (Digital Signal Processing) che associa questi dati a un modello parametrico di spazializzazione binaurale per la sintesi audio in tempo reale.

Per acquisire i dati relativi ai 6 DoF, è necessario combinare un sistema di tracciamento della testa, da qui in poi definito utilizzando il termine inglese *head-tracker*, per rilevare la rotazione della testa con un sistema di mappaggio volumetrico per monitorare lo spostamento nello spazio[36]. Tuttavia, in questo lavoro di tesi si è scelto di semplificare il tracciamento alla sola rotazione della testa, riducendo il sistema a 3 gradi di libertà (3 DoF). Questa scelta è motivata dalla necessità di snellire lo sviluppo software e i processi di elaborazione, un approccio comune nelle applicazioni di realtà virtuale[37].

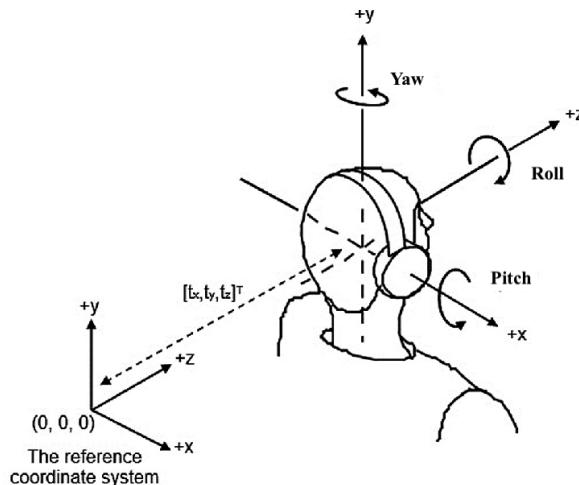


Figura 4: Schema semplificato di un Head-Dynamic Binaural Synthesis System con riproduzione in cuffia. Tratto da Deldjoo et al. (2016)[36]

Si ritiene che tale semplificazione non comprometta la qualità dell'esperienza sonora proposta, mantenendo il focus sull'integrazione dei dati di rotazione con i parametri di spazializzazione binaurale. La successiva sezione si concentrerà sullo sviluppo del modulo head-tracker utilizzato in questo lavoro di tesi.

2.2 Sviluppo di un modulo head-tracker

Come introdotto in precedenza, un head-tracker è un dispositivo in grado di monitorare l'inclinazione della testa sui tre assi principali (*Yaw*, *Pitch* e *Roll*) e, in alcuni casi, anche lo spostamento nello spazio (6 gradi di libertà, *6 DoF*). Esistono diversi approcci per lo sviluppo di questi sistemi, classificabili in tre macro-categorie in base alla tecnologia impiegata: **tracking con videocamera**, **tracking con infrarossi** e **tracking con sensori inerziali**.

- **Tracking con videocamera:** Questa tecnologia utilizza videocamere integrate nei dispositivi, come webcam o fotocamere di smartphone, per acquisire dati sull'orientamento della testa. Il software installato elabora le immagini direttamente sul dispositivo, offrendo il vantaggio di non richiedere hardware aggiuntivo. Tuttavia, questo metodo richiede un'illuminazione ambientale ottimale e limita l'utente a una posizione quasi statica, con un notevole impatto sulle risorse della CPU. Tra i software che utilizzano questa tecnologia figurano: *ViewTracker*¹², *FaceTrackNoIR*¹³ e *OpenTrack*¹⁴.
- **Tracking con infrarossi:** Questa tecnica sfrutta emettitori (attivi o riflettenti) posizionati sulla testa del fruitore e un ricevitore che traccia i loro movimenti nello spazio. Offre vantaggi in condizioni di scarsa luminosità e scarica parte dell'elaborazione su hardware dedicato. Tuttavia, come il tracking tramite videocamera, richiede un ambiente relativamente controllato. Alcuni esempi di prodotti basati su questa tecnologia includono: *TrackIR*¹⁵, *Oculus Quest*¹⁶ e *TrackHat*¹⁷.
- **Tracking con sensori inerziali:** Questa soluzione combina unità di acquisizione dati inerziali con un microprocessore, integrati in un dispositivo

¹²<https://viewtracker.app/>

¹³<http://facetracknoir.sourceforge.net/home/default.html>

¹⁴<https://github.com/opentrack/opentrack>

¹⁵<https://www.naturalpoint.com/>

¹⁶<https://www.oculus.com>

¹⁷<https://www.trackhat.org/>

hardware montato direttamente sulle cuffie. I vantaggi principali includono l'assenza di dipendenze dall'ambiente esterno e la libertà di movimento per l'utente. Tuttavia, questi sistemi sono generalmente limitati ai 3 gradi di libertà (rotazione della testa), sebbene la posizione nello spazio possa essere ricavata con ulteriori accorgimenti software. Esempi di dispositivi commerciali includono: *Waves NX*¹⁸, *Quanum 3Axis*¹⁹ e *X-IO NGIMU*²⁰.

Per questo progetto di tesi, si è scelto di sviluppare autonomamente un modulo di head-tracking basato su sensori inerziali. Questa decisione è stata motivata dalla necessità di integrare personalizzazioni specifiche per le applicazioni di realtà aumentata uditiva (AAR), non sempre presenti nei prodotti commerciali disponibili. Il modulo sviluppato è progettato per garantire flessibilità e precisione nell'acquisizione dei dati, soddisfacendo le esigenze specifiche di questo lavoro di ricerca.

2.2.1 Inertial Measurement Unit

L'inerzia meccanica è la proprietà di un corpo che determina la sua resistenza alle variazioni dello stato di moto, quantificata come massa inerziale e descritta in fisica classica dalla prima legge di Newton. Accelerometri e giroscopi sono definiti sensori inerziali perché misurano rispettivamente una forza impressa alla massa del sensore (per ricavare l'accelerazione) e la sua velocità angolare (per determinare la rotazione).

Con *Inertial Measurement Unit* (IMU) si indica un dispositivo progettato per riportare dati di accelerazione, velocità angolare e orientamento di un corpo nello spazio, utilizzando una combinazione di accelerometri, giroscopi e magnetometri²¹. Questi dispositivi sono ampiamente utilizzati nell'industria aeronautica per il monitoraggio dei parametri di *Yaw*, *Pitch* e *Roll* di un veicolo, dedicando a ognuno dei tre assi principali una tripla dei sensori sopracitati. Storicamente, la loro prima

¹⁸<https://www.waves.com/hardware/nx-head-tracker>

¹⁹https://hobbyking.com/it_it/quanum-3-axis-no-drift-head-tracker.html

²⁰<https://x-io.co.uk/ngimu/>

²¹<https://www.xsens.com/motion-capture>

applicazione risale ai sistemi di navigazione dei missili balistici tedeschi V2 durante la Seconda Guerra Mondiale, per poi essere utilizzati nei progetti spaziali della NASA Apollo a partire dal 1961. Lo sviluppo tecnologico dagli anni Sessanta ha portato alla miniaturizzazione dei sensori in formato *MEMS*²², oggi integrati in molti dispositivi comuni, come *smartphones* e *wearables*²³.

Le tecnologie utilizzate nelle IMU miniaturizzate si basano su principi elettromeccanici distinti:

- **Accelerometri:** Basati su un sistema massa-molla, in cui un peso microscopico si sposta in una direzione se sottoposto a una forza (accelerazione). La variazione di capacità elettrica causata da questo movimento è tradotta in valori di accelerazione.
- **Giroscopi:** Sfruttano l'*effetto di Coriolis*, secondo il quale una massa in movimento osservata da un sistema rotante sembra essere soggetta a una forza perpendicolare al suo moto. La forza generata viene misurata come variazione di capacità elettrica e riportata in gradi al secondo (*degrees/sec*).
- **Magnetometri:** Misurano l'intensità del campo magnetico terrestre sfruttando l'*effetto Hall*, che genera una differenza di potenziale elettrico in un conduttore attraversato da corrente quando è immerso in un campo magnetico perpendicolare.

L'ampia versatilità delle IMU le rende particolarmente adatte per applicazioni nei sistemi di monitoraggio del movimento e della rotazione. Nel contesto di questa tesi, il modulo head-tracker sfrutta uno specifico sensore IMU per garantire un'acquisizione precisa dei dati inerziali, come verrà approfondito nella prossima sezione.

²²Micro Electro-Mechanical Systems

²³Termine inglese che identifica dispositivi tecnologici indossabili.

2.2.2 Il sensore MPU-9250

Tra le varie opzioni disponibili sul mercato, la scelta per lo sviluppo di una IMU è ricaduta sul sensore MPU-9250²⁴, che integra in una singola board economica un accelerometro con un giroscopio (MPU-6500)²⁵ e un magnetometro (AK8963)²⁶. Questa combinazione consente di acquisire i dati relativi ai tre assi principali di rotazione (*Yaw*, *Pitch* e *Roll*) con elevata precisione, rendendolo ideale per applicazioni di head-tracking. Il dispositivo permette la trasposizione in tempo reale dei valori di accelerazione, velocità angolare e intensità magnetica in gradi di inclinazione, utilizzando una serie di operazioni software dedicate.

Il sensore campiona i dati attraverso convertitori digitali a 16 bit e invia i valori in pacchetti da 8 bit tramite i protocolli I2C²⁷ o SPI²⁸. Inoltre, è dotato di un clock interno per la sincronizzazione, un sensore di temperatura per la calibrazione, pin di *interrupt* e un buffer FIFO (*First In First Out*) da 512 byte per la gestione dei dati e dei filtri digitali on-board.

Gyroscope Full Scale Range	Accelerometer Full Scale Range	Magnetometer Full Scale Range
+/- 250 (deg/s)	+/- 2 (g)	+/- 4800 (uT)
+/- 500 (deg/s)	+/- 4 (g)	
+/- 1000 (deg/s)	+/- 8 (g)	
+/- 2000 (deg/s)	+/- 16 (g)	

Figura 5: Range di valori acquisibili dai sensori in funzione della risoluzione. Tratto dal sito ufficiale InvenSense <https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-9250-datasheet/>

Una delle caratteristiche distintive del MPU-9250 è l'integrazione del firmware *Digital Motion Processor* (DMP)²⁹, che offre funzioni avanzate tra cui:

²⁴<https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/>

²⁵<https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6500/>

²⁶<https://dtsheet.com/doc/1236655/akm-ak8963>

²⁷<https://www.i2c-bus.org/>

²⁸<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>

²⁹<https://invensense.tdk.com/smartmotion/>

- Pre-calcolo degli angoli di Eulero, una formulazione matematica utile per descrivere l'orientamento di un corpo nello spazio.
- Filtri digitali per la pulizia dei dati.
- Routine di calibrazione per il giroscopio.
- Monitoraggio dell'orientamento.
- Funzionalità aggiuntive come un pedometro.

L'acquisizione dei dati è stata semplificata grazie alla libreria `MPU-9250.h`, disponibile su GitHub³⁰, basata sul lavoro di ricerca di Kris Winer³¹. Questa libreria consente una gestione più intuitiva delle funzioni built-in del sensore, come `getYaw()`, `getPitch()` e `getRoll()`, che restituiscono i valori di inclinazione della testa del fruitore in gradi [-180°, +180°].

Sebbene le funzioni siano ben progettate, è necessaria una calibrazione accurata per garantire letture affidabili. Mentre gli errori di giroscopio e accelerometro sono relativamente semplici da correggere, la calibrazione del magnetometro richiede una maggiore attenzione. Bisogna infatti considerare le interferenze generate da altri dispositivi elettronici e, soprattutto, la declinazione magnetica, ossia la differenza tra il Nord magnetico (rilevato dal sensore) e il Nord geografico. Questo scarto varia annualmente e dipende dalla posizione geografica. La funzione `setMagneticDeclination()` consente di tarare tale scompenso; nel caso specifico, è stato utilizzato il valore per la città di Brescia, pari a 3° 44' Est (gennaio 2025)³².

2.2.3 Implementazione software e test

Si è scelto di scrivere il software di elaborazione dati dell'head-tracker in ambiente Arduino³³, sfruttando il protocollo I2C per la comunicazione tra sensore e microcontrollore. Una delle funzioni che si è ritenuto fondamentale sviluppare

³⁰<https://github.com/hideakitai/MPU9250>

³¹<https://github.com/kriswiner/MPU9250>

³²<https://www.magnetic-declination.com/>

³³<https://www.arduino.cc/>

personalmente per questa applicazione è relativa alla compensazione dell'offset generato tra la normale posizione di quiete del sensore e la sua collocazione sulla testa del fruitore: è poco probabile che i valori [0, 0, 0] degli angoli rimangano tali anche quando il dispositivo è indossato, perché posizione e inclinazione delle cuffie varieranno necessariamente di un minimo, soprattutto nei gradi della direzione dello sguardo sul piano azimutale (Yaw). Dopo avere indossato le cuffie, viene lanciata una *routine* di circa 10 secondi, durante i quali bisogna rimanere quanto più fermi possibile, che calcola gli offset da sottrarre costantemente ai valori acquisiti. In questo modo gli assi di riferimento sono sempre coerenti con la posizione iniziale della testa, aspetto che risulterà fondamentale per il successivo sviluppo del sistema di tracking della posizione.

La funzione risulta più efficace prevedendo l'aggiunta di un calcolo della media ponderata dei valori acquisiti: il sensore MPU-9250 necessita di un certo tempo di stabilizzazione iniziale per ottenere letture non falsate, quindi è stato dato un peso temporalmente crescente ai termini dell'espressione. Questa inerzia numerica è anche causata dall'utilizzo di un filtro digitale Madgwick³⁴, specifico per dispositivi IMU, la cui finestra di analisi è impostata con `setFilterIterations()`. Si è riscontrato che 5 iterazioni siano il giusto compromesso tra responsività dei dati e rumore presente: in questo caso, l'errore generato nelle letture non eccede mai l'intervallo [-2.5°; +2.5°]; sebbene migliorabile, si ritiene che un'imprecisione massima di 5 gradi non sia percettivamente significativa in un panorama binaurale.

È rilevante notare come i valori del grafico rimangano prossimi allo zero, rumore considerato, nonostante i dati siano relativi a letture riportate dopo circa mezz'ora dalla taratura. La deriva temporale, in inglese *temporal drifting* del tracking basato su IMU è spesso uno dei problemi principali da affrontare nel design di questi sistemi: i valori di accelerazione sono costantemente soggetti all'operatore matematico integrale per calcolare velocità e posizione, ogni piccolo errore tenderà quindi a sommarsi nel tempo, generando una discrepanza tra informazione letta e inclinazione reale [38]. Un errore nei calcoli sull'accelerometro, ad esempio, si

³⁴<https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/filters/madgwick.html>



Figura 6: Finestra di letture di Yaw, Pitch e Roll nelle inclinazioni [0,0,0]. Il sensore è fermo e il rumore non eccede 5 gradi di escursione, visualizzati sull'asse y. L'asse x riporta il tempo in forma di numero di campioni graficati. Immagine dell'autore.

accumula linearmente sulla velocità e quadraticamente sulla posizione; in particolare, lo Yaw (come si nota anche dal plot sopra riportato) è il termine più soggetto a rumore e drift perché ottenuto dalla combinazione dei valori, e degli errori, di accelerometro, giroscopio e magnetometro³⁵. Il grafico dimostra una presenza pressoché nulla di drifting, validando così l'esattezza del processo di taratura e degli offset calcolati.

Di seguito sono riportati grafici di movimenti della testa di circa 180 gradi, con plot distinti per le 3 variabili yaw, pitch e roll.

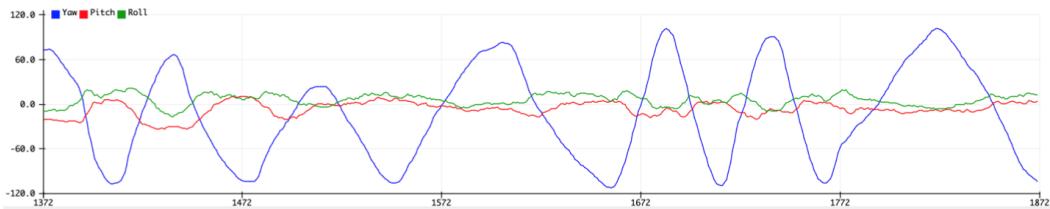


Figura 7: Letture ottenute tentando di muovere la testa solo da sinistra a destra e viceversa (yaw). Il movimento è stato eseguito a varie velocità, con una escursione di circa 200 gradi, tra [-100°, +100°].

³⁵Nel caso del sensore MPU-9250, la presenza di un magnetometro ben tarato garantisce un drift molto basso, avendo come riferimento costante il polo Nord magnetico

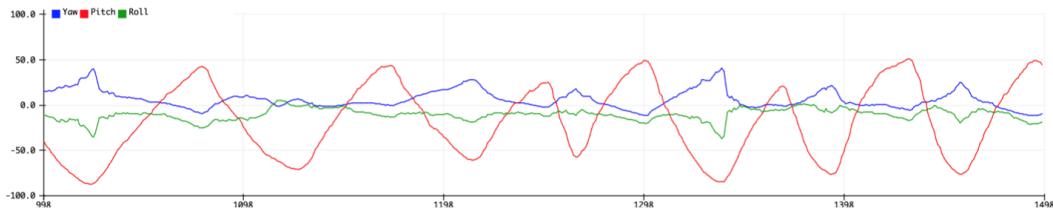


Figura 8: Letture ottenute tentando di muovere la testa solo dal basso verso l’alto e viceversa (pitch). Il movimento è stato eseguito a varie velocità, con un’escursione di circa 140 gradi, tra [-90°, +50°].

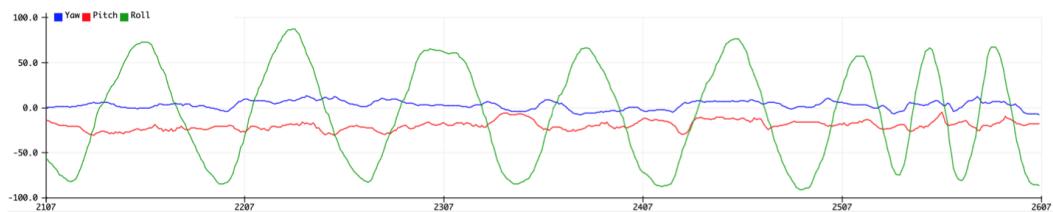


Figura 9: Letture ottenute tentando di muovere la testa verso le spalle (roll). Il movimento è stato eseguito a varie velocità, con un’escursione di circa 160 gradi, tra [-80°, +80°].

Si ritiene che le prove effettuate confermino che il sistema sia valido per un head-tracker sviluppato a scopi di realtà aumentata uditiva. In questo modo il fruitore è in grado di esplorare liberamente un soundscape binaurale attraverso l’inclinazione della testa: un suono virtuale posto - per esempio - in basso a sinistra rispetto alla sfera di riferimento, verrà percepito come frontale se si ruota lo sguardo nella sua direzione. Questa fase di implementazione e test del modulo head-tracker ha permesso di stabilire una solida base per integrare i dati acquisiti nel sistema di ascolto immersivo descritto nelle sezioni successive.

2.3 Scambio dati wireless

Gli studi fin qui descritti hanno definito un sistema sensoristico efficiente e adeguato allo sviluppo di applicazioni di realtà aumentata uditiva per la didattica

del suono. Tuttavia, un elemento cruciale per garantire un'esperienza realmente immersiva e pratica è l'implementazione di un sistema di scambio dati wireless. La presenza di cavi tra le cuffie sensorizzate e una postazione fissa comprometterebbe la libertà di movimento nello spazio, rendendo l'esperienza meno intuitiva e più scomoda per l'utente.

Per ovviare a questa limitazione, si è scelto di integrare su ogni paio di cuffie un microcontrollore della famiglia *ESP32*³⁶, basato sulla piattaforma *IoT*³⁷ *Nodemcu*³⁸. Questa soluzione offre un modulo completo di comunicazione wireless con supporto sia per Wi-Fi (2.4 GHz - 802.11 b/g/n) che per Bluetooth (v4.2). Oltre alla connettività, l'*ESP32* include le seguenti caratteristiche tecniche:

- CPU dual-core a 32 bit (160/240 MHz).
- Memoria: 320 KiB³⁹ di RAM e 448 KiB di ROM.
- 18 canali ADC da 12 bit, 2 canali DAC da 8 bit.
- Pin dedicati ai protocolli *I2C* e *I2S*⁴⁰.
- Altri pin multifunzione per espandibilità e personalizzazione.

Questa scelta tecnologica consente di ridurre significativamente l'ingombro fisico dei dispositivi, migliorando la praticità del sistema e garantendo una maggiore flessibilità nell'interazione con l'ambiente sonoro aumentato.

La prossima sezione si concentrerà sulla specifica board utilizzata per l'implementazione, l'*ESP32 Lolin32 Lite*, e sulle sue caratteristiche che la rendono adatta al progetto.

³⁶<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>

³⁷Internet of Things

³⁸http://www.nodemcu.com/index_en.html

³⁹Kilo Binary Byte

⁴⁰Inter-Integrated Circuit Sound

2.3.1 La board ESP32 Lolin32 Lite

Tutti gli algoritmi sviluppati nei paragrafi precedenti con l'IDE Arduino sono stati integrati in un unico codice e implementati sulla scheda ESP32 Lolin32 Lite⁴¹. Questa board è stata scelta tra le numerose opzioni disponibili per le sue caratteristiche tecniche, tra cui la possibilità di essere alimentata da batterie ricaricabili LiPo⁴² da 3.7 Volt, con una corrente di carica massima di 0.5 Ampere. Questa caratteristica elimina la necessità di un cavo di alimentazione per il microcontrollore e il sensore, riducendo significativamente l'ingombro fisico del sistema e migliorando la libertà di movimento dell'utente.

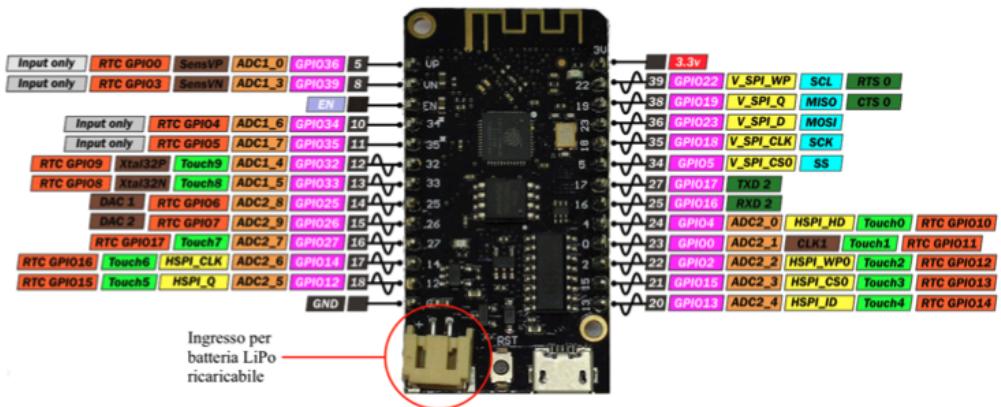


Figura 10: Schema di organizzazione e funzione dei pin presenti sulla board Lolin32. Tratto da https://docs.platformio.org/en/stable/boards/espressif32/lolin32_lite.html.

Grazie alle sue funzionalità integrate, la Lolin32 Lite si presta perfettamente per garantire una connessione wireless stabile e affidabile. La prossima sezione analizzerà lo standard Wi-Fi utilizzato nel sistema, evidenziandone le caratteristiche principali e il ruolo nel garantire una trasmissione dati efficiente.

⁴¹https://docs.platformio.org/en/stable/boards/espressif32/lolin32_lite.html

⁴²Accumulatore Litio-Polimero

2.3.2 Lo standard Wi-Fi

Il Wi-Fi (Wireless Fidelity) è uno standard di comunicazione senza fili per reti locali *WLAN*⁴³ che consente l’interconnessione tra dispositivi attraverso onde radio, con una distanza massima di 20 metri. Inoltre, permette l’accesso a Internet qualora sia presente un gateway predisposto. Nel contesto di questo progetto, il modulo Wi-Fi integrato nell’ESP32 e la libreria Arduino `WiFi.h` sono stati utilizzati per facilitare la creazione di una rete locale per lo scambio dati tra più dispositivi. Le principali modalità operative offerte sono descritte di seguito:

- `WiFi.mode(WIFI-STA)`: Configura l’ESP32 come *Station* (STA), rendendolo un nodo periferico che si connette a un *Access Point* (AP), solitamente un router. In questa modalità, all’ESP32 viene assegnato un indirizzo identificativo (IP)⁴⁴, rendendolo univocamente riconoscibile all’interno della rete. Questo consente lo scambio di dati tra l’Access Point e la Station. Se il nodo centrale dispone di accesso a Internet, l’ESP32 può connettersi al web per acquisire o inviare dati in tempo reale, ad esempio tramite API⁴⁵ o JavaScript.
- `WiFi.mode(WIFI-AP)`: Configura l’ESP32 come Access Point, trasformandolo nel nodo centrale di una rete. Il modulo genera una rete Wi-Fi visibile ai dispositivi configurati come `WIFI-STA` nelle vicinanze, permettendo la connessione di più ESP32 a questo punto unico. Questa configurazione è definita *soft Access Point* (sAP), in quanto non consente l’accesso a Internet.
- `WiFi.mode(WIFI-AP-STA)`: Configura l’ESP32 come Access Point e Station simultaneamente. Questa modalità è particolarmente utile per reti che richiedono la comunicazione diretta tra i nodi periferici, evitando che il nodo centrale svolga sempre il ruolo di intermediario.

La flessibilità delle modalità operative dell’ESP32 permette di progettare reti personalizzate per diversi scenari applicativi. Nel prossimo paragrafo, si illustrerà

⁴³Wireless Local Area Network

⁴⁴Internet Protocol

⁴⁵Application Programming Interface

la configurazione di un network locale utilizzato per il sistema di realtà aumentata uditiva sviluppato in questa tesi.

2.3.3 Creazione di un network locale

Per garantire una connessione dati wireless tra le cuffie e la postazione computer, è stato scelto il protocollo di comunicazione ESP-NOW⁴⁶, sviluppato appositamente per le board ESP32 dalla casa madre *Espressif*. Questo protocollo utilizza principi simili a quelli delle modalità Station e soft Access Point descritte in precedenza, ma senza appoggiarsi al protocollo ufficiale Wi-Fi. Ciò consente di ottenere i seguenti vantaggi:

- Trasmissione dati più veloce, con un limite massimo di 250 Byte per pacchetto, garantendo una latenza minima tra il movimento della testa e la conseguente modifica del panorama binaurale sintetizzato.
- Comunicazione bilaterale: sia le Stations che il soft Access Point possono inviare e ricevere dati indipendentemente dalla loro funzione primaria.
- Rete *peer-to-peer*: i nodi sono equivalenti (peer) e non organizzati gerarchicamente, migliorando la scalabilità della rete e prevenendo colli di bottiglia in caso di malfunzionamento di uno dei nodi.
- Pairing diretto tra dispositivi tramite indirizzo *MAC*⁴⁷, senza necessità di *handshaking* preventivo, riducendo i tempi di connessione e migliorando la stabilità della rete.
- Protocollo Wi-Fi non utilizzato: rimane disponibile per eventuali altre applicazioni del sistema.

Il primo passo nella configurazione del network locale consiste nell'identificare l'indirizzo MAC dell'ESP32 preposto alla trasmissione dati. Questo identificativo unico può essere ottenuto interrogando direttamente la scheda tramite la funzione `WiFi.macAddress()`.

⁴⁶<https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview>

⁴⁷Media Access Control

```

1 #include "Wifi.h"
2
3 void setup() {
4   Serial.begin(115200);
5   WiFi.mode(WIFI_MODE_STA);
6   Serial.println(WiFi.macAddress());
7 }
8
9 void loop() {
10 //nulla da fare nel loop
11 }
```

Listing 2.1: Codice per accedere all’informazione dell’indirizzo MAC di ogni ESP32

```

rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
configsip: 0, SPIWP:0xee
clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fff0018,len:4
load:0x3fff001c,len:1216
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40078000,len:9720
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40080400,len:6352
entry 0x400806b8
30:AE:A4:07:0D:64
```

Figura 11: Indirizzo MAC evidenziato nel rettangolo rosso.

Una volta acquisiti gli indirizzi MAC, è possibile definire una struttura logica del network. Ogni dispositivo (cuffie sensorizzate) è dotato di un identificativo numerico univoco (ID), assegnato manualmente nei codici di ciascun ESP32. Le informazioni trasmesse includono l’ID del sender e i valori di Yaw, Pitch e Roll. Questa struttura dati è dichiarata come **struct** in tutti i dispositivi, assicurando una facile interpretazione dei messaggi scambiati all’interno del network.

```

1 //indirizzo MAC del ricevente principale
2 //{0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF}
3 uint8_t broadcastAddress[] = {0x30, 0xAE, 0xA4, 0x15, 0xC7, 0xFC};
4
5 //Struttura dati da inviare
```

```

6 //Coincide con la struttura nota anche al ricevente
7
8 typedef struct struttura_messaggio {
9
10    byte id; //ID unico per ogni board sender
11    float Yaw;
12    float Pitch;
13    float Roll;
14
15 } struttura_messaggio;
16
17 //Creo struttura_messaggio datiMismo
18 struttura_messaggio datiMISMO;
19
20 //Definisco interfaccia peer
21 esp_now_peer_info_t peerInfo;

```

Listing 2.2: Definizione della struttura dati per lo scambio di informazioni all'interno del network

Nel dispositivo ricevente (collegato al computer), i dati vengono organizzati in un array **boardsStruct[]** la cui dimensione corrisponde al numero di dispositivi trasmettitori presenti nella rete. La funzione per la gestione dei messaggi in ingresso assegna i valori corretti ai parametri associati a ciascun nodo, garantendo una sincronizzazione precisa.

```

1 //funzione di callback da eseguire alla ricezione di un messaggio
2 void OnDataRecv(
3
4 //copio blocco di dati letti da incomingData in &myData
5 memcpy(&myData, incomingData, sizeof(myData));
6
7 boardsStruct[myData.id].Yaw = myData.Yaw;
8 boardsStruct[myData.id].Pitch = myData.Pitch;
9 boardsStruct[myData.id].Roll = myData.Roll;
10
11 }

```

Listing 2.3: Funzione di gestione dati in ingresso.

Questa configurazione, sebbene semplice, si è dimostrata efficace nel ridurre al minimo la latenza, garantendo una trasmissione dati stabile e precisa tra i sensori delle cuffie e il computer ricevente. Tutte le informazioni raccolte vengono poi

integrate nel sistema di realtà aumentata uditiva, che genera in tempo reale i paesaggi sonori binaurali personalizzati per ciascun utente.

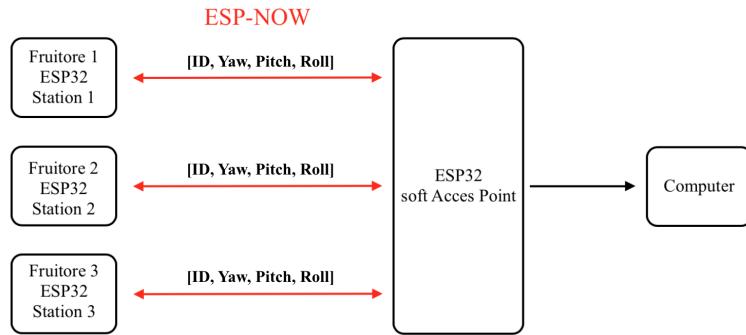


Figura 12: Schema riassuntivo della logica di trasmissione del network.

Nel prossimo paragrafo, si approfondirà il tema della trasmissione dell’audio wireless multicanale, un aspetto fondamentale per completare l’architettura del sistema proposto.

2.3.4 Audio wireless multicanale

La trasmissione audio senza fili rappresenta una sfida significativa, specialmente quando si vogliono utilizzare formati non compressi e latenze minime: la quantità di dati da distribuire nel network è rilevante e spesso è necessario bilanciare con attenzione la latenza del segnale e la qualità audio. Questo aspetto diventa ancora più critico quando, come nel caso di questo progetto, è richiesta la trasmissione di streaming audio multicanale verso più dispositivi, ciascuno con canali indipendenti. Il multicanale wireless è un campo di ricerca in continua evoluzione, e i sistemi più performanti disponibili sul mercato comportano costi elevati.

Di seguito sono riportate le opzioni valutate per affrontare questa problematica:

- **Utilizzo di ricevitori ed emettitori radio commerciali:** Questi dispositivi, associati rispettivamente alle cuffie e ai canali separati della scheda audio collegata al computer, offrono una qualità audio elevata e una latenza minima. Tuttavia, l’acquisto di tali dispositivi comporta un investimento economico considerevole.

- **Sfruttare il modulo Bluetooth dell'ESP32:** Questa opzione prevede l'aggiunta di un DAC stereo I2S alle cuffie per ottenere un'uscita audio integrata. Sebbene il Bluetooth garantisca una bassa latenza nello streaming, il segnale viene compresso con algoritmi lossy, comportando una perdita di qualità audio. Inoltre, il protocollo non è progettato per gestire agilmente più di due canali indipendenti.
- **Sfruttare il modulo Wi-Fi dell'ESP32:** Rispetto al Bluetooth, il Wi-Fi consente di trasmettere audio non compresso, migliorando la qualità del segnale. Tuttavia, questo vantaggio è controbilanciato da una latenza più elevata, spesso nell'ordine delle centinaia di millisecondi, che risulta inaccettabile per applicazioni immersive in tempo reale.

Alla luce di queste considerazioni, per lo stato attuale del progetto si è scelto di adottare una soluzione commerciale già testata, utilizzando ricevitori ed emettitori radio stereo con streaming audio ad alta qualità. Nello specifico, la scelta è ricaduta sul trasmettitore *Ew IEM G4* dell'azienda Sennheiser⁴⁸, che garantisce una trasmissione stabile e performante.

Per il futuro, si prevede di sviluppare un sistema completamente autonomo per la gestione dell'audio wireless multicanale. L'obiettivo è integrare una soluzione on-board che offre un'uscita stereofonica con audio non compresso e a bassa latenza, consentendo l'utilizzo di qualsiasi modello di cuffie.

2.4 Design immersivo in Reaper

Il design di uno strumento didattico immersivo basato sulla sintesi binaurale richiede una gestione parametrica accurata dei dati di spazializzazione. Utilizzando la DAW Reaper, è possibile organizzare un sistema flessibile in cui i valori spaziali vengono aggiornati in tempo reale sulla base delle informazioni provenienti dai sensori integrati nelle cuffie. Questo approccio consente di integrare eventi

⁴⁸<https://www.sennheiser.com/en-us/catalog/products/wireless-systems/ew-iem-g4/ew-iem-g4-a-509609>

sonori precomposti con elementi dinamici, garantendo un’esperienza immersiva e personalizzata per ogni utente.

Dal punto di vista strutturale, il progetto è suddiviso in tre componenti principali:

- **Eventi sonori precomposti:** Sequenze statiche o con traiettorie predefinite sulla sfera ambisonica, utilizzate per creare un contesto sonoro di base e fornire uno sfondo coerente all’esperienza educativa.
- **Spazializzazione dinamica:** Mappata e modificata in tempo reale, questa componente riflette i movimenti dell’utente rilevati dai sensori, garantendo una percezione realistica e interattiva dello spazio. La flessibilità di questo approccio permette di adattare l’esperienza sonora alle azioni e alle posizioni del singolo utente.
- **Utilizzo multiutente:** Il sistema è progettato per consentire la fruizione simultanea da parte di più studenti, ciascuno dei quali può esplorare in modo indipendente il panorama sonoro. Questa funzionalità pone una sfida tecnica significativa, richiedendo una gestione efficiente delle risorse audio e garantendo che ogni utente riceva un’esperienza sonora coerente e priva di interferenze.

La flessibilità offerta da Reaper consente di implementare queste componenti in modo sinergico, gestendo il routing audio attraverso una combinazione di tracce multicanale e plug-in IEM. Nelle sezioni successive, si analizzeranno nel dettaglio i seguenti aspetti:

- **Gestione dati di head tracking:** Come i dati di rotazione della testa e di orientamento vengono acquisiti e integrati nel sistema per aggiornare la spazializzazione sonora.
- **Codifica Ambisonics e routing:** Configurazione dei canali multicanale in Reaper, con una particolare attenzione alla codifica Ambisonics e al flusso di dati tra le tracce.

- **Decodifica binaurale:** Processo di conversione del segnale Ambisonics in audio binaurale stereo, ottimizzato per l'ascolto in cuffia.

2.4.1 Gestione dati dei sensori

Nel paragrafo 2.3 è stato descritto lo sviluppo di un network locale di microcontrollori ESP32 per lo scambio wireless dei dati monitorati dai sensori integrati nelle cuffie. Questo network ha lo scopo di centralizzare tutte le informazioni in un ricevitore adiacente al computer, che è anche deputato alla conversione dei dati ricevuti in formati organizzati secondo i protocolli OSC⁴⁹ e MIDI⁵⁰, entrambi standard ampiamente riconosciuti e utilizzati in ambito audio.

Per valutare le differenze tra i due protocolli, si è scelto di implementarli parallelamente come test comparativo:

- **Protocollo MIDI:** Utilizzando la libreria `MIDI.h` integrata nell'IDE Arduino, sono stati generati messaggi *Control Change* (CC) specifici per ogni parametro da trasmettere a Reaper tramite la funzione `MIDI.sendControlChange()`. I dati sono stati inviati tramite cavo MIDI all'ingresso della scheda audio. Sebbene questo approccio abbia mostrato una latenza inferiore rispetto al protocollo OSC, il MIDI presenta un limite significativo: la sua risoluzione massima è di 128 valori per CC. Se scalata su un intervallo come lo yaw ($[-180^\circ, +180^\circ]$), questa risoluzione si traduce in incrementi approssimativi di 3 gradi per valore, risultando troppo grossolana per applicazioni precise.
- **Protocollo OSC:** Con la libreria `OSCMessage.h`⁵¹, i dati sono stati inviati tramite Wi-Fi utilizzando una serie di funzioni in cascata: `OSCMessage.add()`, `Udp.beginPacket()`, `OSCMessage.send()` e `Udp.endPacket()`. Progettato specificamente per applicazioni su network, il protocollo OSC offre numerosi vantaggi, tra cui una gestione semplificata dell'indirizzamento e del pairing tra dispositivi, oltre alla possibilità di inviare pacchetti di dati di tipo `float32`, garantendo una precisione molto maggiore rispetto al MIDI.

⁴⁹Open Sound Control <https://opensoundcontrol.stanford.edu/index.html>

⁵⁰Musical Instrument Digital Interface <https://midi.org/>

⁵¹<https://github.com/CNMAT/OSC>

Dopo un'attenta valutazione, si è deciso di integrare entrambi i protocolli nel codice finale, preferendo però il MIDI per la mappatura dei parametri nei plug-in di Reaper. Questa scelta è motivata dalla maggiore praticità e universalità del MIDI, nonostante la precisione numerica superiore offerta dall'OSC.

2.4.2 Codifica Ambisonics e routing

Al fine di variare la prospettiva sonora dei singoli fruitori mantenendo i processi di elaborazione della DAW entro un limite accettabile, il progetto è stato organizzato in Reaper seguendo questa configurazione:

- Ogni sorgente audio, mono o stereo, è codificata in Ambisonics di settimo ordine e spazializzata singolarmente tramite il plug-in *StereoEncoder*.

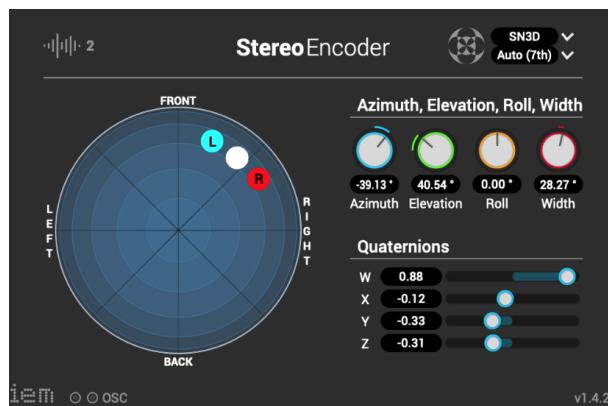


Figura 13: Schermata del plug-in *StereoEncoder* della suite IEM.

- Tutte le sorgenti relative a uno dei soundscapes sono inviate esclusivamente come send a un canale di gruppo dedicato.
- Su ogni gruppo è stato inserito un equalizzatore multibanda (*MultiEQ*) per gestire eventuali miglioramenti spettrali alla somma dei canali in ingresso.
- Ogni gruppo è ulteriormente inviato in parallelo a un numero di tracce send pari al numero di fruitori.

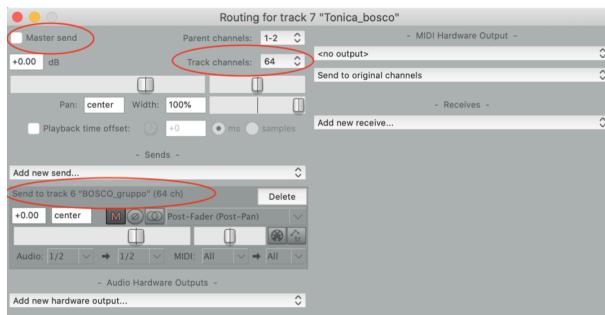


Figura 14: Schermata per il routing del singolo canale al gruppo di missaggio.

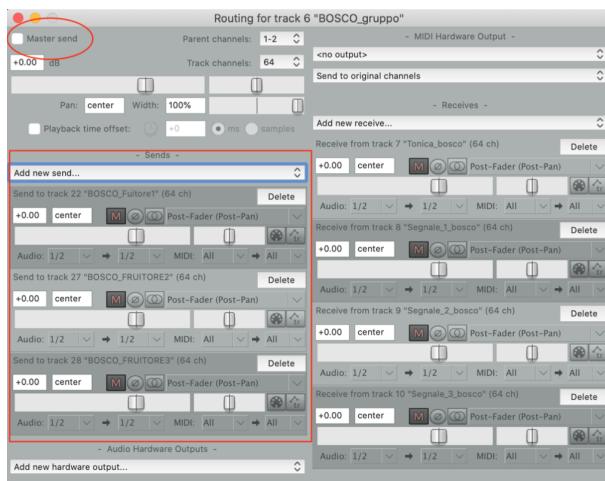
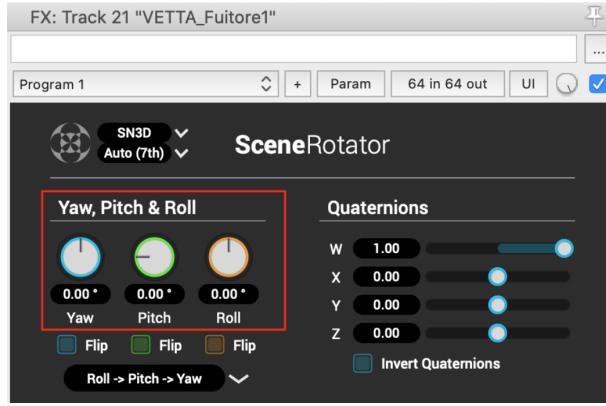


Figura 15: Schermata per il routing del gruppo inviato a un send relativo a ogni fruitore.

- Su ciascuna traccia send dedicata al fruitore è inserita una catena di plug-in comprendente *SceneRotator*⁵², al fine di creare una percezione spaziale coerente con la composizione. I parametri *Yaw*, *Pitch* e *Roll* sono mappati con i dati acquisiti dalla rotazione della testa.

Questa configurazione consente di integrare efficacemente i dati provenienti dai sensori con la gestione delle sorgenti sonore, garantendo un’esperienza immersiva personalizzata per ogni fruitore. Nella prossima sezione, verrà descritto il processo di decodifica binaurale, essenziale per tradurre i segnali multicanale in audio

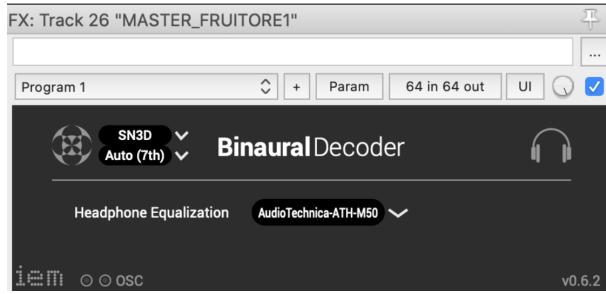
⁵²<https://plugins.iem.at/docs/scenerotator/>

Figura 16: Schermata del plug-in *SceneRotator*.

binaurale stereo ottimizzato per l’ascolto in cuffia.

2.4.3 Decodifica binaurale

Tutti i gruppi relativi al singolo fruitore sono infine inviati alla traccia deputata alla conversione dell’Ambisonics in binaurale; qui i segnali sono elaborati dal plug-in *BinauralDecoder*, sviluppato utilizzando le HRTF della *dummy-head* Neumann KU 100. Il plug-in offre anche un pratico tool di equalizzazione per adattare il segnale a diversi modelli di cuffie. L’obiettivo principale di questa elaborazione è ridurre il segnale Ambisonics di settimo ordine, composto da 64 canali, a soli due canali ottimizzati per la riproduzione binaurale.

Figura 17: Schermata del plug-in *BinauralDecoder*.

Nonostante l’efficacia di questo approccio, uno svantaggio significativo risiede nella tipologia di HRTF utilizzate. Sebbene la dummy-head Neumann KU 100

rappresenti un eccellente modello binaurale che riproduce fedelmente l'anatomia dell'orecchio umano, le HRTF fornite rimangono generiche e potrebbero non essere percepite con naturalezza da tutti gli ascoltatori.

Per ovviare a questo limite, IEM propone *AdaptiveBinauralDecoder*, un plug-in per il rendering binaurale ad alta risoluzione progettato per Ambisonics di primo ordine. Questo strumento si basa su elaborati algoritmi DSP [39] che consentono di riprodurre con maggiore precisione sia il suono diretto proveniente dalla sorgente più prominente che il suono diffuso. Altro aspetto interessante è che il plugin supporta l'uso di HRTF personalizzate in formato *SOFA* (Spatially Oriented Format for Acoustics)⁵³, offrendo così un ascolto più naturale e personalizzato in base alle caratteristiche anatomiche di ogni fruitore⁵⁴.

Con questa configurazione tecnica, si completa l'architettura del sistema immersivo proposto in questa tesi. Nel prossimo capitolo, verrà descritto il progetto pedagogico integrato *Sound Space Explorer*, che sfrutta le tecnologie sviluppate per offrire un'esperienza educativa immersiva, mirata a sensibilizzare gli studenti all'ascolto critico e alla percezione dello spazio sonoro.

⁵³[https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA_\(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics\)](https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA_(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics))

⁵⁴<https://plugins.iem.at/docs/adaptivebinauraldecoder/>

Capitolo 3

Il progetto Sound Space Explorer

L'intersezione tra tecnologia e pedagogia rappresenta il fulcro di questo lavoro di tesi, culminando nello sviluppo del progetto integrato *Sound Space Explorer*. Questo capitolo descrive in dettaglio l'idea progettuale, evidenziando come le soluzioni tecnologiche implementate nel capitolo precedente siano state pianificate per rispondere a specifiche esigenze educative. L'obiettivo principale è offrire un'esperienza didattica immersiva che coniungi l'innovazione tecnologica con una sensibilizzazione pedagogica verso il suono, favorendo lo sviluppo di un ascolto critico e consapevole.

Il nome *Sound Space Explorer* non è casuale: rappresenta metaoricamente l'idea di esplorare lo spazio sonoro come un vero e proprio territorio multidimensionale, in cui gli studenti possono immergersi, interagire e scoprire nuove prospettive percettive. Questa esplorazione si traduce in un percorso attivo e dinamico, dove la tecnologia diventa uno medium per valorizzare la percezione sonora e ampliare le capacità espressive degli studenti.

La struttura del capitolo è organizzata per descrivere le componenti principali del progetto:

- **Sistema MISMO:** Un'architettura hardware e software progettata per garantire un'integrazione fluida tra sensori, algoritmi e output sonoro.
- **Composizione dei soundscapes:** La progettazione e la creazione di paesaggi sonori dedicati, che rappresentano ambienti naturali e culturali in cui

gli studenti possono *muoversi* virtualmente.

- **Metodologia e obiettivi:** La descrizione di un metodo didattico che integra le tecnologie immersive con gli obiettivi pedagogici messi in luce da Raymond Murray Schafer nel suo libro *Educazione al suono: 100 esercizi per ascoltare e produrre il suono*.[2]
- **Proposte di percorsi didattici:** Adattamento del sistema per diverse fasce di età, gradi scolastici, obiettivi e percorsi educativi. Una gamma di opportunità per stimolare l'apprendimento attraverso la *digitalizzazione* degli esercizi di Schafer.

Con questa impostazione, il progetto *Sound Space Explorer* non solo sfrutta la tecnologia per migliorare la didattica, ma vuole porre anche le basi per una nuova modalità di apprendimento, in cui la realtà aumentata uditiva diventa il mezzo principale per connettere lo studente con il proprio ambiente e con gli altri.

3.1 Il sistema MISMO

MISMO è il nome scelto per il dispositivo sviluppato personalmente per essere posizionato sulle cuffie di ogni fruitore del progetto *Sound Space Explorer*. L'acronimo, che sta per *Mini Inertial System for Multimodal Operations*, vuole sintetizzare sia il principio tecnologico che le finalità didattiche del modulo. Il termine è stato selezionato anche per la sua precisa assonanza con la parola spagnola *mismo*, traducibile con *uguale*. Questo rimanda simbolicamente all'obiettivo del sistema: creare una relazione diretta e lineare tra i movimenti dell'utente e la conseguente modifica e percezione di un panorama binaurale in realtà aumentata uditiva.

Per offrire una panoramica sintetica del dispositivo, sono elencate di seguito le principali caratteristiche di MISMO:

- Capacità di head tracking grazie al sensore MPU-9250 e a specifici algoritmi di elaborazione.

- Scambio dati wireless a bassissima latenza, reso possibile dal microcontrollore ESP32 Lolin Lite e dal protocollo ESP-NOW.
- Pairing automatico tra più unità, attualmente testato per 5 moduli MISMO utilizzati contemporaneamente.
- Invio dati a qualsiasi DAW o hardware musicale tramite i protocolli MIDI e/o OSC.
- Modulo Wi-Fi 2.4 GHz e modulo Bluetooth integrati.
- Modulo esterno DAC stereo a 16 bit e 44.1 kHz, basato sul protocollo I2S.
- Due LED RGB con colori personalizzati per ogni fruitore e pattern luminosi che indicano lo stato di connessione.
- Pulsanti capacitivi touch, associabili a diversi parametri. Attualmente, uno di questi è configurato per attivare la funzione di taratura della posizione, da eseguire subito dopo aver indossato le cuffie (2.2.3).
- Alimentazione tramite batteria LiPo da 3.7 V e 2000 mAh, ricaricabile tramite USB, con un'autonomia energetica di circa 6 ore per un assorbimento medio, sovrastimato, di 300 mA.

Questa configurazione rende MISMO un dispositivo versatile e altamente adattabile, progettato per offrire un'esperienza immersiva e personalizzata. Nella prossima sezione, verranno descritte in dettaglio le scelte di design hardware che hanno permesso di integrare queste funzionalità in un sistema compatto e funzionale.

3.1.1 Design hardware

Allo stato attuale dello sviluppo, non si è ritenuto necessario produrre un circuito stampato dedicato per l'organizzazione del cablaggio. Tutte le connessioni sono state realizzate manualmente tramite saldature con cavi di lunghezza e spessore adeguati. Di seguito è riportato lo schema a blocchi del circuito, che illustra le principali componenti hardware e il flusso dei dati:

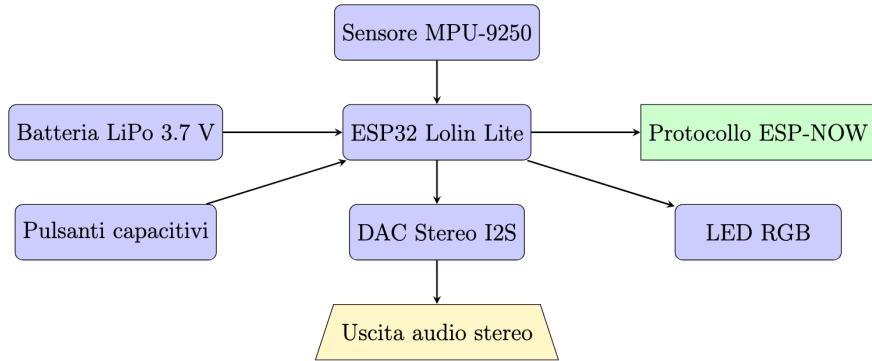


Figura 18: Lo schema a blocchi rappresenta il flusso dati e l'integrazione hardware del sistema MISMO. Allo stato di sviluppo attuale l'uscita audio stereo rimane inutilizzata.

Per proteggere il circuito, è stato personalmente progettato un box, poi realizzato tramite stampa 3D¹. Le dimensioni sono state ottimizzate per garantire un ingombro minimo, mantenendo comunque un accesso facile ai tasti capacitivi e all'interruttore di accensione. Spessore e pattern di riempimento interno delle pareti sono stati scelti prevedendo cadute multiple durante l'utilizzo in contesti scolastici. Il box presenta tre fori principali:

- Alloggiamento per i LED RGB.
- Mini-jack stereo per le cuffie.
- Ingresso micro USB, necessario sia per ricaricare la batteria che per aggiornare il software.

Il box è composto da tre parti distinte, assemblate con bulloni e dadi M3, consentendo una facile apertura tramite cacciavite per eventuali interventi sull'hardware. Per fissare il dispositivo alle cuffie, sono state progettate due asole che permettono l'ancoraggio tramite un nastro elastico velcrato.

¹Si è utilizzato il polimero chiamato Acido Polilattico (PLA), fuso e modellato con tecnica di stampa additiva

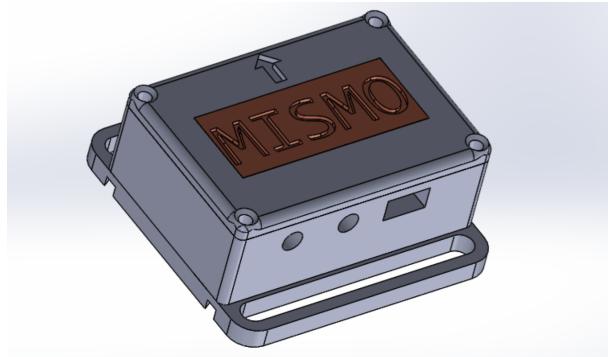


Figura 19: Rendering del box stampato in 3D.

Il design hardware di MISMO rappresenta la base tecnica del progetto, su cui si innesta un software personalizzato per garantire l'integrazione tra sensori, rete wireless e ambiente sonoro. La prossima sezione approfondisce gli aspetti relativi allo sviluppo del codice.

3.1.2 Design software

Il sistema software di MISMO è suddiviso in due parti principali, ciascuna progettata per gestire uno specifico ruolo del dispositivo. Di seguito sono riportati i dettagli, il primo blocco di codice fa riferimento alle unità MISMO utilizzate come dispositivi di head-tracking, il secondo al MISMO deputato alla ricezione dei dati e al loro invio al computer.

```

1 #include "MPU9250.h"
2 #include <Wire.h>
3 #include <esp_now.h>
4 #include <WiFi.h>
5
6 MPU9250 mpu;
7
8 #define SDA_PIN 16
9 #define SCL_PIN 4
10
11 // MAC address del ricevitore
12 uint8_t broadcastAddress[] = {0x78, 0xE3, 0x6D, 0x19, 0x4C, 0x50};
13
14 // Struttura pacchetto dati
15 typedef struct struct_message {

```

```
16     byte id;
17     int yaw;
18     int pitch;
19     int roll;
20 } struct_message;
21
22 struct_message datiMISMO;
23
24 // Interfaccia nodi peer
25 esp_now_peer_info_t peerInfo;
26
27 // Callback invio pacchetto
28 void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
29     digitalWrite(26, status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? HIGH : LOW);
30 }
31
32 float Yaw, Pitch, Roll;
33 int int_Yaw, int_Pitch, int_Roll;
34 float offset_yaw, offset_pitch, offset_roll;
35 int touch_1, touch_2;
36 bool tasto_1, tasto_2, tasto_1_pre, tasto_2_pre;
37 int soglia_tasto = 55;
38
39 void setup() {
40     pinMode(26, OUTPUT);
41     pinMode(27, OUTPUT);
42     digitalWrite(27, HIGH);
43
44     Serial.begin(115200);
45     Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN);
46
47     WiFi.mode(WIFI_STA);
48     if (esp_now_init() != ESP_OK) return;
49
50     esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
51     memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
52     peerInfo.channel = 0;
53     peerInfo.encrypt = false;
54
55     if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) return;
56
57     if (!mpu.setup(0x68)) while (1) delay(5000);
58     mpu.setMagneticDeclination(3.34);
59     mpu.setFilterIterations(5);
60     taratura_offset();
61 }
62 }
```

```
63 void loop() {
64     if (mpu.update()) {
65         static uint32_t prev_ms = millis();
66         if (millis() > prev_ms + 25) {
67             Yaw = mpu.getYaw() - offset_yaw;
68             Pitch = mpu.getPitch() - offset_pitch;
69             Roll = mpu.getRoll() - offset_roll;
70
71             Yaw = fmod(Yaw + 180.0, 360.0);
72             if (Yaw < 0) Yaw += 360.0;
73             Yaw -= 180.0;
74
75             int_Yaw = round(Yaw);
76             int_Pitch = round(Pitch);
77             int_Roll = round(Roll);
78
79             datiMISMO.id = 0;
80             datiMISMO.yaw = int_Yaw;
81             datiMISMO.pitch = int_Pitch;
82             datiMISMO.roll = int_Roll;
83
84             esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &datiMISMO, sizeof(
85                                         datiMISMO));
86
86         touch_1 = touchRead(32);
87         touch_2 = touchRead(33);
88         tasto_1 = touch_1 < soglia_tasto;
89         tasto_2 = touch_2 < soglia_tasto;
90
91         if (tasto_1 && tasto_2 && !tasto_1_pre && !tasto_2_pre) {
92             // taratura_offset();
93         }
94
95         prev_ms = millis();
96         tasto_1_pre = tasto_1;
97         tasto_2_pre = tasto_2;
98     }
99 }
100 }
101
102 void taratura_offset() {
103     const int numero_lettura = 20;
104     float somma_lettura_yaw = 0.0, somma_lettura_pitch = 0.0, somma_lettura_roll =
105         0.0;
106     for (int i = 0; i < numero_lettura; i++) {
107         if (mpu.update()) {
108             somma_lettura_yaw += mpu.getYaw();
```

```

108         somma_lettura_pitch += mpu.getPitch();
109         somma_lettura_roll += mpu.getRoll();
110         delay(25);
111     }
112 }
113 offset_yaw = somma_lettura_yaw / numero_lettura;
114 offset_pitch = somma_lettura_pitch / numero_lettura;
115 offset_roll = somma_lettura_roll / numero_lettura;
116 }
```

Listing 3.1: Codice per il modulo MISMO come head-tracker

Il nodo centrale raccoglie i dati trasmessi dai moduli head-tracker, li organizza e li invia alla DAW Reaper tramite protocollo MIDI. Il codice sviluppato è il seguente:

```

1 #include <esp_now.h>
2 #include <WiFi.h>
3 #include <MIDI.h>
4
5 MIDI_CREATE_INSTANCE(HardwareSerial, Serial2, DIN_MIDI);
6
7 // Struttura dati per la ricezione
8 typedef struct struct_message {
9     byte id;
10    int yaw;
11    int pitch;
12    int roll;
13 } struct_message;
14
15 struct_message datiMISMO;
16
17 // Strutture per memorizzare i dati di ogni scheda
18 struct_message board1, board2, board3, board4;
19 const byte numero_sender = 4;
20
21 // Array di strutture per i sender
22 struct_message boardsStruct[numero_sender] = {board1, board2, board3, board4};
23
24 // Variabili per il mapping MIDI
25 int cc_yaw[numero_sender], cc_pitch[numero_sender], cc_roll[numero_sender];
26
27 // Funzione callback per ricezione dati
28 void OnDataRecv(const uint8_t * mac_addr, const uint8_t *incomingData, int len) {
29     memcpy(&datiMISMO, incomingData, sizeof(datiMISMO));
30     boardsStruct[datiMISMO.id].yaw = datiMISMO.yaw;
31     boardsStruct[datiMISMO.id].pitch = datiMISMO.pitch;
```

```

32     boardsStruct[datiMISMO.id].roll = datiMISMO.roll;
33 }
34
35 void setup() {
36     Serial.begin(115200);
37     DIN_MIDI.begin(MIDI_CHANNEL_OMNI);
38
39     WiFi.mode(WIFI_STA);
40
41     if (esp_now_init() != ESP_OK) {
42         Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
43         return;
44     }
45     esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
46 }
47
48 void loop() {
49     // Mappaggio dati in range MIDI
50     for (byte i = 0; i < numero_sender; i++) {
51         cc_yaw[i] = map(boardsStruct[i].yaw, -180, 180, 0, 127);
52         cc_pitch[i] = map(boardsStruct[i].pitch, -180, 180, 0, 127);
53         cc_roll[i] = map(boardsStruct[i].roll, -180, 180, 0, 127);
54
55         cc_yaw[i] = constrain(cc_yaw[i], 0, 127);
56         cc_pitch[i] = constrain(cc_pitch[i], 0, 127);
57         cc_roll[i] = constrain(cc_roll[i], 0, 127);
58     }
59
60     // Invio dati MIDI
61     for (byte i = 0; i < numero_sender; i++) {
62         DIN_MIDI.sendControlChange(0, cc_yaw[i], i + 1);
63         DIN_MIDI.sendControlChange(1, cc_pitch[i], i + 1);
64         DIN_MIDI.sendControlChange(2, cc_roll[i], i + 1);
65     }
66
67     delay(25);
68 }
```

Listing 3.2: Codice per il modulo MISMO come nodo centrale per la ricezione e conversione in MIDI

Il software rappresenta il cuore del sistema MISMO, traducendo i dati acquisiti in output utili per la suite Ambisonics in Reaper.

3.1.3 Gestione IoT

Il termine *Internet of Things (IoT)* rappresenta un'evoluzione del concetto di *Ubiquitous Computing* introdotto da Mark Weiser negli anni '90[40]. Secondo Weiser, la tecnologia dovrebbe integrarsi in modo trasparente nella vita quotidiana, diventando quasi invisibile, ma sempre presente per supportare l'interazione tra oggetti, ambienti e persone[41]. L'IoT riprende questa visione e ne approfondisce l'aspetto tecnico, definendo un ecosistema di dispositivi connessi in grado di raccogliere, elaborare e scambiare dati attraverso una rete, facilitando automazione, scalabilità e interoperabilità[42].

Nel contesto musicale, questa visione si concretizza nell'*Internet of Musical Things (IoMT)*, dove l'IoT viene applicato per l'ascolto, il controllo, la manipolazione e la trasmissione di informazioni musicali[43]. Il sistema sviluppato in questo lavoro di tesi può essere inserito in questa categoria, sfruttando unità MISMO come nodi intelligenti interconnessi per raccogliere dati di movimento, trasmetterli senza fili e integrarli in un panorama sonoro digitale.

Caratteristiche distintive del sistema IoMT:

- **Interconnessione wireless:** Utilizzo del protocollo ESP-NOW per una rete locale affidabile e a bassa latenza.
- **Elaborazione in tempo reale:** Conversione a bassa latenza dei dati di movimento in parametri sonori.
- **Scalabilità:** Capacità di gestire più unità MISMO simultaneamente, consentendo esperienze multiutente.
- **Applicazione educativa:** Trasformazione dei dati raccolti in output MIDI/OSC per ambienti sonori interattivi.

Nello schema seguente è rappresentata l'architettura del sistema IoMT, evidenziando i flussi di dati bidirezionali tra quattro unità MISMO, il nodo centrale e il panorama sonoro.

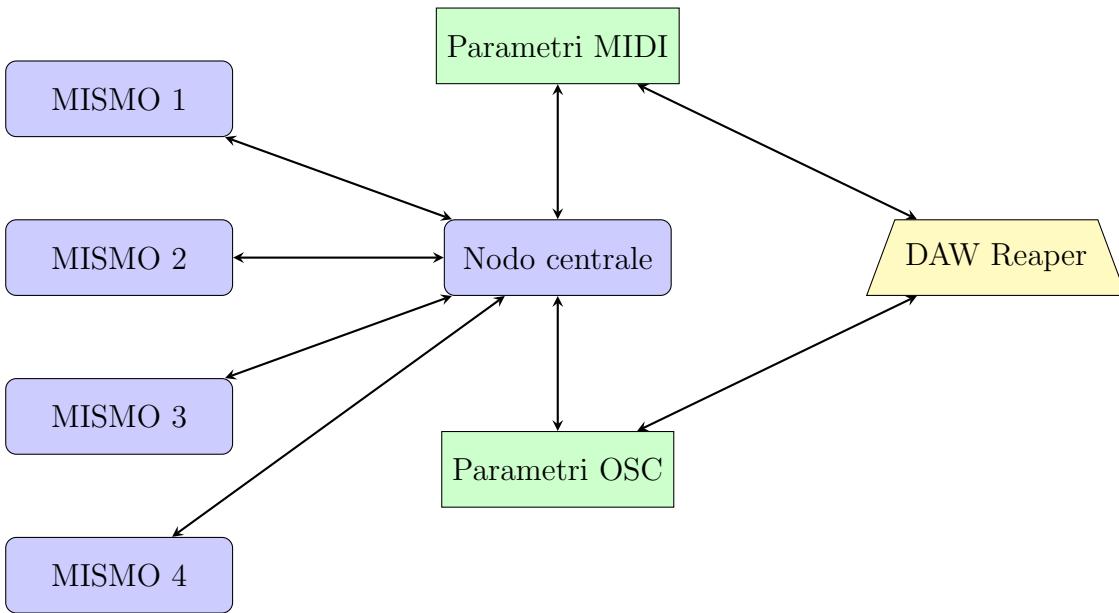


Figura 20: Schema a blocchi del sistema IoMT basato su quattro unità MISMO e un nodo centrale.

Questa infrastruttura IoMT non solo facilita l’interconnessione tecnologica, ma pone le basi per un’interazione più profonda tra studenti e il panorama sonoro digitale. Nella sezione successiva, verranno approfonditi i materiali sonori progettati per il *Sound Space Explorer*, elemento cardine dell’esperienza immersiva proposta.

3.2 Composizione di soundscapes per il Sound Space Explorer

La progettazione dei soundscapes rappresenta un elemento cruciale del *Sound Space Explorer*, poiché costituisce il contenuto esperienziale che gli studenti esplorano attraverso il sistema immersivo. I paesaggi sonori sono stati composti con particolare attenzione alla qualità estetica, alla loro *esplorabilità* e alla fruizione all’interno di contesti scolastici.

Ogni soundscape è stato progettato per rappresentare ambienti naturali e paesaggi riconoscibili, volutamente generici e quindi facilmente associabili a esperienze e luoghi personali. Tutte le registrazioni sono state acquisite personalmente all'interno del *Parco Regionale dei Monti Picentini*² e fanno parte di un progetto artistico personale avviato nel 2022 dal titolo *Monti Picentini Digitali*³.

I soundscapes hanno una durata di circa 6 minuti, sono pensati per essere messi in *loop*⁴ e posso essere selezionati dal docente attraverso l'interfaccia grafica sulla DAW Reaper. I paesaggi includono le seguenti ambientazioni:

- **Soundscape Vetta:** un ambiente che simula la percezione sonora a grandi altitudini, con elementi come il vento, il silenzio e occasionali richiami di fauna montana.
- **Soundscape Bosco:** un paesaggio immersivo che ricrea i suoni di una foresta, caratterizzato dal fruscio delle foglie, cinguettii di uccelli e suoni di insetti.
- **Soundscape Lago:** un'ambientazione sonora che include il movimento delle onde, richiami di uccelli acquatici e suoni umani.
- **Soundscape Fiume:** un panorama acustico dinamico che segue il flusso dell'acqua.

La composizione di un soundscape non è un semplice esercizio di registrazione sonora, ma un processo che richiede scelte estetiche e narrative consapevoli. Nel contesto del *Sound Space Explorer*, ogni soundscape è stato progettato per bilanciare realismo, esplorabilità e capacità di stimolare l'immaginazione degli studenti. Questo equilibrio è stato raggiunto seguendo tre principi chiave:

1. **Immersione e realismo** Un soundscape efficace deve favorire un'immersione sensoriale completa, ricreando paesaggi sonori che risultino credibili e coinvolgenti.

²<https://www.parcoregionalemontipicentini.it/Index.aspx>

³<https://giuseppebergamino.github.io/MontiPicentiniDigitali/>

⁴Ripetizione ciclica

2. Esplorabilità Ogni soundscape è stato pensato per incoraggiare l'esplorazione attiva da parte degli studenti. Gli eventi sonori sono distribuiti nello spazio in modo da creare traiettorie e punti focali che invitino il fruitore a muoversi fisicamente.

3. Narrazione e simbolismo I soundscapes integrano elementi narrativi che facilitano l'associazione personale e stimolano l'immaginazione. Ad esempio, il richiamo lontano di un uccello o il rumore di un fiume possono evocare ricordi, emozioni o connessioni culturali. Questi aspetti narrativi non sono imposti, ma emergono dalla libera interpretazione del fruitore.

Nella sezione successiva verranno descritti i criteri estetico-compositivi che hanno guidato la creazione di questi paesaggi sonori, ponendo particolare attenzione alle qualità ecologiche, spaziali, timbriche e narrative.

3.2.1 Elementi di estetica nel soundscape

La composizione dei soundscapes per il *Sound Space Explorer* trae ispirazione da due principali correnti: la *soundscape ecology* e il *paesaggio sonoro come pratica artistica*. Questi approcci forniscono i principi estetici e compositivi fondamentali per creare ambienti acustici che siano al contempo educativi, esplorabili e artisticamente validi.

1. Principi della soundscape ecology La *soundscape ecology* offre un quadro concettuale per analizzare e progettare paesaggi sonori, suddividendo i loro elementi in:

- **Geofonie:** Suoni generati da elementi non biologici, come vento, acqua o rocce.
- **Biofonie:** Suoni prodotti da organismi viventi, come uccelli, insetti o animali.
- **Antrofonie:** Suoni prodotti dall'attività umana, distinguibili in suoni intenzionali (musica, voce) e rumori indesiderati[20].

In questo contesto, i soundscapes sono stati progettati per enfatizzare la coesistenza di queste tre categorie, creando ambienti acustici bilanciati tra naturale e artificiale. La distinzione tra paesaggi sonori *Hi-Fi* (ad alta definizione spaziale e acustica) e *Lo-Fi* (sovraffollati di informazioni sonore) è stata utilizzata come guida per organizzare le traiettorie sonore e definire l'esperienza immersiva.

2. Paesaggio sonoro come pratica artistica Il concetto di *paesaggio sonoro* come pratica artistica segue una lunga e affascinante parabola storica, partendo dalla *Musique Concrète* di Pierre Schaeffer [44], passando per Luc Ferrari con il suo *Presque Rien, Numéro 1*⁵, per giungere ad autori come Krause, Schafer e Truax [45]. I principali elementi presi in considerazione sono:

- **Tonica:** la tonica nel soundscape è l'insieme di suoni che non sono necessariamente ascoltati coscientemente, ma che determinano la costante sonora, quasi un bordone, che caratterizza uno specifico ambiente.
- **Segnale:** I segnali sono suoni in primo piano, uditi coscientemente perché emergono facilmente dalla tonica, sia per qualità timbriche che energetiche.
- **Impronta sonora:** L'impronta sonora è un segnale che definisce inequivocabilmente una determinata area. Esiste solo in quel luogo e, proprio per questa sua unicità, possiede un elevato valore ecologico e culturale⁶.

Questi principi non sono stati applicati in modo rigido, ma hanno guidato il processo compositivo, permettendo di creare paesaggi sonori che oscillano tra il reale e l'immaginario. La fusione tra *soundscape ecology* e pratiche artistiche ha prodotto ambienti sonori capaci di stimolare un ascolto critico e consapevole, incoraggiando l'esplorazione attiva e la riflessione sul rapporto tra suono e ambiente.

3.2.2 Soundscape Vetta

Questo soundscape è composto dall'*editing* di registrazioni effettuate durante l'estate sulle principali vette dei Monti Picentini: Monte Mai, Pizzo San Michele,

⁵<https://www.maison-ona.com/catalog-00590NA>

⁶Da qui in poi verrà utilizzato l'equivalente inglese: *soundmark*

Monte Terminio, Monte Cervialto e Monte Accellica. Considerati i luoghi di acquisizione, la **tonica** del paesaggio sonoro è rappresentata dalla somma delle *geofonie* del vento e delle *biofonie* di grilli e altri piccoli insetti. I livelli di *antrofonie* sono invece minimi e riconducibili a eventi distanti e sullo sfondo, legati alle attività meccanizzate della vita rurale.

Le geofonie eoliche dominano frequentemente il soundscape, emergendo come segnali nettamente in primo piano e resi dinamici attraverso movimenti rapidi nella sfera ambisonica. Questi segnali si alternano con eventi sonori legati alla vita entomologica, come il frinire dei grilli e i veloci passaggi di insetti in volo. Altre biofonie meno frequenti, come i richiami di rapaci a caccia di piccoli roditori nascosti tra le rocce, sono state posizionate in alto e sullo sfondo per creare una maggiore profondità spaziale.

Questo paesaggio sonoro è stato composto per restituire un'immagine montana estiva, caratterizzata da venti impetuosi che si acquietano improvvisamente. Le vette, frequentemente brulle, bruciate dal sole e in apparenza prive di animali, rivelano invece una ricca vita sonora dominata da organismi minuscoli ma acusticamente molto attivi.

3.2.3 Soundscape Bosco

Questo soundscape propone un paesaggio estivo tipico dei sottoboschi montani, con *field recordings* acquisiti tra le colline in quota del Laceno, le pendici dell'Accellica e le valli ricche di ruscelli del Terminio. La **tonica** è rappresentata dalle *geofonie* prodotte dal fruscio delle fronde dei faggi e dal lento scorrere di corsi d'acqua, mentre i segnali principali sono *biofonie* derivanti dai vocalizzi di molteplici specie di uccelli. Le *antrofonie* sono pressoché assenti, limitate a rari eventi distanti e sullo sfondo.

L'ambiente è caratterizzato da una maggiore densità acustica rispetto al soundscape *Vetta*, offrendo una percezione di maggiore vicinanza e interazione. Sulla sinistra si distingue il placido scorrere di un ruscello, mentre una mandria di mucche al pascolo crea suoni sommessi in una conca distante. Il fruscio delle foglie, mosse

dalla brezza, avvolge l'ascoltatore, completato dalle attività sonore prodotte dal volo e dai richiami dell'aviofauna.

Questo soundscape è stato progettato per evocare l'immagine di un tipico bosco medio-montano in piena estate, con la quiete delle *biofonie* durante la stagione più calda. La composizione enfatizza l'equilibrio tra staticità e dinamismo, invitando l'ascoltatore a immergersi nella serenità e ricchezza del sottobosco.

3.2.4 Soundscape Lago

Questa composizione rappresenta un ideale paesaggio lacustre ottenuto combinando registrazioni effettuate in primavera presso l'invaso artificiale di Conza e il Lago Laceno. Tra tutti i soundscapes, questa è la composizione che si discosta maggiormente da una ricostruzione acustica verosimile, sperimentando con l'ibridazione di due ambienti sonori distinti. I due luoghi, infatti, presentano caratteristiche sonore abbastanza differenti, in particolare sul piano delle *antrofonie*.

L'invaso artificiale di Conza, essendo situato nei pressi di un insediamento urbano e costeggiato da una strada statale a scorrimento veloce, è caratterizzato dalla presenza di *antrofonie* legate a macchinari e al passaggio di mezzi pesanti. Al contrario, il Lago Laceno, collocato in un altopiano meno antropomorfizzato, offre un contesto sonoro dominato da *biofonie* e *geofonie* più naturali, come il canto degli uccelli e i campanacci delle mucche al pascolo⁷. Entrambi i luoghi condividono, tuttavia, una preziosa ricchezza di *biofonie*, che ha reso possibile un'ibridazione sonora bilanciata.

La composizione alterna nel tempo le **toniche** dei due luoghi, passando da un panorama dominato dalle *antrofonie* distanti di macchinari e traffico stradale a un ambiente più arioso e naturale, popolato da *biofonie* di anfibi in attività di corteggiamento primaverile, cinguettii di piccoli uccelli, guizzi di pesci e richiami di rapaci a caccia. I segnali principali emergono progressivamente, creando una narrazione acustica che rappresenta il contrasto e l'interazione tra Uomo e Natura.

⁷L'invaso artificiale di Conza (AV) è un'area naturale protetta, gestita dal WWF dal 1999.

L’obiettivo è quello di offrire un’esperienza sonora che riflette la complessità della convivenza tra ambienti naturali e antropizzati, stimolando una riflessione critica sul rapporto tra attività umane e habitat naturali.

3.2.5 Soundscape Fiume

Questa composizione celebra l’abbondante patrimonio idrico dei Monti Picentini attraverso *field recordings* catturati presso le sorgenti del Calore e del Sabato, del Raio della Tufara di Montella e del vallone Matruonolo del Terminio. Tutte le registrazioni sono state effettuate sul finire dell’inverno, periodo in cui le portate dei fiumi raggiungono il loro massimo livello grazie alle abbondanti precipitazioni stagionali e allo scioglimento dei nevai.

La **tonica** del soundscape è dominata dal vigoroso scorrere delle acque: si distinguono chiaramente una piccola cascata, diversi ruscelli e segnali provenienti dagli animali intenti nei preparativi per la primavera. Le *antrofonie* sono completamente assenti e, anche se presenti, sarebbero state facilmente mascherate dalla forza delle *geofonie idriche*, che emergono in primo piano.

Questo paesaggio sonoro è unico all’interno della serie, in quanto non include traiettorie artificialmente composte sulla sfera ambisonica. Considerato il flusso naturale e costante del fiume, si è scelto di posizionare le sorgenti sonore in punti statici, rispettando la loro configurazione originale. La composizione mira a sintetizzare in pochi minuti la ricchezza dei principali corsi d’acqua dei Monti Picentini, enfatizzando l’importanza di preservare questo patrimonio idrico.

3.2.6 Tabella riassuntiva

Questa tabella descrittiva può essere sfruttata anche come strumento per la verifica didattica, aiutando a comprendere come, cosa e quanto gli studenti abbiano ascoltato. Inoltre, i dati riportati possono fungere da riferimento pratico per progettare attività educative mirate, che spingano gli studenti ad analizzare il paesaggio sonoro in termini di componenti estetiche e percettive. Questi aspetti verranno approfonditi in paragrafi successivi.

Caratteristica	Vetta	Bosco	Lago	Fiume
Soundmark	Vento	Uccelli	Anfibi	Acqua
Stagione	Estate	Estate	Primavera	Inverno
Tonica	Raffiche e insetti	Vento tra le fronde	Uccelli, strada statale	Ruscelli
Segnali	Rapaci e insetti	Uccelli, insetti, mucche	Rane, camion, rapaci	Cascata
Geofonie	5/5	2/5	1/5	5/5
Biofonie	3/5	5/5	5/5	1/5
Antrofonie	2/5	1/5	4/5	1/5
Spazialità	Molto mobile	Poco mobile	Mobile	Molto statica

Tabella 1: Tabella riassuntiva delle caratteristiche principali dei soundscapes. La scala in 5 valori rappresenta la minore o maggiore presenza di Geofonie, Biofonie e Antrofonie

La comprensione dei soundscapes non è un semplice esercizio di ascolto passivo, ma una componente integrante di un percorso metodologico più ampio, mirato a stimolare un ascolto critico e consapevole. Tale metodologia sarà descritta nel dettaglio nella sezione successiva, insieme agli obiettivi pedagogici fondamentali del progetto *Sound Space Explorer*.

3.3 Metodologia e obiettivi pedagogici

Come introdotto nel Capitolo 1, questo lavoro di tesi fonda i propri principi metodologici e pedagogici sul pensiero di Raymond Murray Schafer, con particolare riferimento al suo libro *Educazione al suono: 100 esercizi per ascoltare e produrre*

il suono[2]. Il testo rappresenta un solido punto di riferimento, poiché, come affermato dallo stesso Schafer nella prefazione al libro: "[Riferendosi agli esercizi] Li ho già tutti praticati nel corso della mia attività di insegnante⁸, sia con bambini che con adulti."

Sebbene Schafer non espliciti un riferimento diretto, il suo approccio didattico, basato sull'ascolto attento, critico ed esplorativo, è fortemente affine al framework pedagogico del Costruttivismo, che vede lo studente come un attore attivo nel processo di apprendimento[46].

Senza dubbio sono presenti le seguenti caratteristiche:

- Apprendimento tramite esperienza diretta e osservazione[47].
- Indagine approfondita di un fenomeno, fondamentale per riorganizzare e trasformare le informazioni raccolte, generando conoscenza e nuove intuizioni[48].
- Creazione di un ambiente di apprendimento socio-culturale fondato sul confronto e la cooperazione tra pari[49].

Questi aspetti - pur se non dichiarati esplicitamente dall'autore - sono profondamente radicati nell'approccio didattico di Raymond Murray Schafer e risultano evidenti nell'analisi dei suoi *100 Esercizi*.

3.3.1 Metodologia didattica

L'autore di questa tesi ha svolto un approfondito lavoro di analisi sui 100 esercizi, presentato in dettaglio nella tabella riportata in Appendice A. Tale analisi ha costituito un pilastro fondamentale per la definizione della metodologia didattica del progetto *Sound Space Explorer*. Gli esercizi, concepiti per sviluppare una consapevolezza critica del paesaggio sonoro e dell'ascolto, sono stati analizzati e riorganizzati in relazione alla loro adattabilità e potenziale integrazione nel sistema immersivo del SSE. La metodologia si basa su una duplice strategia: da un lato, si valorizza l'approccio esperienziale proposto da Schafer, dall'altro si sfruttano le possibilità offerte dalla tecnologia immersiva per potenziarne l'efficacia. Gli

⁸Per circa 20 anni Schafer è stato docente presso la *Simon Fraser University* di Vancouver

esercizi sono stati adattati per sfruttare le potenzialità di strumenti come l'ascolto binaurale e il sistema di *head-tracking*, che consentono di rendere tridimensionali e dinamici gli ambienti sonori proposti.

Sintesi dell'analisi dei 100 esercizi Come evidenziato nella tabella analitica (Appendice A), gli esercizi sono stati suddivisi in categorie principali: *percezione sonora, produzione sonora, suoni e contesto sociale e creatività*. Questa classificazione riflette le diverse aree di competenza che il progetto intende sviluppare. Inoltre, ogni esercizio è stato valutato secondo il livello di adattabilità al SSE, utilizzando una scala qualitativa (*Alta, Media, Bassa, N/A*) corredata da motivazioni sintetiche.

Un'ampia percentuale degli esercizi è risultata altamente adattabile al SSE, in particolare quelli che stimolano la percezione sonora e la consapevolezza spaziale. Ad esempio:

- Gli esercizi dedicati all'esplorazione della tridimensionalità del suono, come il riconoscimento e la localizzazione di suoni mobili, si integrano perfettamente con il sistema immersivo del SSE.
- Attività che enfatizzano la sensibilizzazione al paesaggio sonoro, come quelle che invitano all'ascolto in ambienti specifici, possono essere potenziate tramite *soundscapes* realistici generati in ambiente immersivo.

Altri esercizi, invece, richiedono un maggiore adattamento per essere efficacemente implementati, come quelli che coinvolgono l'imitazione sonora vocale o la registrazione di suoni. In questi casi, il sistema può comunque offrire supporto fornendo esempi sonori, eventuali feedback visivi e spunti per l'elaborazione creativa. Un approfondimento su questo tema viene fornito nel Paragrafo 3.3.4.

3.3.2 Obiettivi pedagogici

Raymond Murray Schafer afferma, nell'introduzione al suo libro, che *"L'argomento di quest'opera è il suono, e il compito che ci prefiggiamo è proporre delle modalità attraverso le quali gli insegnati possano aiutare gli studenti ad ascoltare meglio. [...]*

ascoltare è importante in ogni esperienza educativa e tutte le volte che si scambiano messaggi verbali o acustici, [...] nulla è infatti più fondamentale dell'educazione dei sensi e, tra questi, l'udito è dei più importanti”[2]. Gli obiettivi pedagogici alla base del progetto *Sound Space Explorer (SSE)* si fondono sui principi delineati da Schafer, arricchiti dalle possibilità offerte dalla tecnologia immersiva e dall’approccio interattivo. Questo consente di integrare e potenziare le finalità originarie, offrendo un’esperienza didattica più coinvolgente e articolata. Gli obiettivi possono essere suddivisi in due categorie principali: primari e secondari.

Obiettivi primari

- **Educazione alla tridimensionalità del suono:** Sviluppare la capacità di percepire e comprendere il suono nella sua dimensione spaziale, utilizzando strumenti immersivi come l’ascolto binaurale e il sistema di *head-tracking*.
- **Sensibilizzazione all’ecologia acustica e ambientale:** Favorire una maggiore consapevolezza del paesaggio sonoro e dei suoi elementi, stimolando un atteggiamento critico verso l’inquinamento acustico e l’importanza della sostenibilità sonora.
- **Sviluppo di competenze critiche nell’ascolto:** Promuovere un ascolto attivo, analitico ed empatico, in grado di cogliere le sfumature e i significati dei suoni nel loro contesto.

Obiettivi secondari

- **Stimolare la creatività attraverso l’immaginazione sonora:** Incoraggiare l’uso del suono come strumento espressivo, attraverso esercizi che stimolino la fantasia e l’innovazione.
- **Favorire l’apprendimento collaborativo e l’inclusione:** Creare un ambiente di apprendimento che promuova la condivisione, la collaborazione e il rispetto reciproco, valorizzando le diversità e le competenze di ogni studente.

- **Promuovere il benessere attraverso il contatto con il paesaggio sonoro:** Offrire esperienze immersive che favoriscano il rilassamento, la concentrazione e una connessione più profonda con l'ambiente circostante.

3.3.3 Criteri di valutazione

Raymond Murray Schafer, già dal suo primo esercizio, sottolinea che "*Poiché l'ascolto è un'esperienza molto personale, [...] tutte le risposte saranno corrette*". Questo principio evidenzia l'importanza di valorizzare la soggettività di ogni studente nell'approccio all'ascolto.

Tuttavia, si ritiene utile definire dei criteri di valutazione generali per l'implementazione e l'utilizzo del sistema *Sound Space Explorer (SSE)*. Tali criteri possono essere adattati in base all'esercizio svolto, al contesto della classe e agli obiettivi specifici del docente. Essi hanno il compito di orientare e supportare il processo didattico, pur mantenendo la flessibilità necessaria per rispettare la natura personale dell'ascolto.

Criteri generali Per valutare l'efficacia dell'ascolto e il grado di coinvolgimento degli studenti, si possono adottare i seguenti criteri generali:

- **Concentrazione:** Capacità degli studenti di focalizzarsi sui dettagli del paesaggio sonoro senza distrazioni.
- **Ascolto critico:** Abilità di analizzare, interpretare e riflettere sui suoni percepiti.
- **Partecipazione attiva:** Livello di interazione e collaborazione con il sistema SSE e i compagni.
- **Creatività:** Capacità di immaginare, produrre e modificare scenari sonori in modo originale.

Criteri specifici Per esercizi particolari, i criteri possono essere personalizzati sulla base delle caratteristiche riportate nella Tabella 1 relativa alla composizione

dei soundscape. Tali caratteristiche possono fungere da riferimento per creare nuove tabelle da far compilare agli studenti.

La combinazione di criteri generali e specifici garantisce un approccio equilibrato, che rispetta sia l'esperienza personale dello studente sia la necessità di fornire un quadro strutturato per l'apprendimento e la valutazione.

3.3.4 Strategie di implementazione

L'Appendice A offre un quadro delle possibilità di implementazione degli esercizi proposti da Schafer nel contesto del *Sound Space Explorer*. Come detto, ogni esercizio è stato valutato secondo una scala di implementabilità (**Alta**, **Media**, **Bassa**, **N/A**), che tiene conto della coerenza dell'esercizio con le funzionalità immersive e interattive del sistema SSE.

Di seguito, un riepilogo delle strategie di implementazione basate sulle categorie di adattabilità:

- **Alta:** Questa categoria include esercizi che si adattano perfettamente alle funzionalità immersive del SSE. Ad esempio:
 - Esercizi **1, 4, 5, 28, 49, 66, 88, 99**: Questi esercizi sfruttano appieno la tridimensionalità sonora e la possibilità di creare soundscape dinamici e interattivi, favorendo un'esperienza di ascolto immersiva e attiva.
- **Media:** In questa categoria rientrano esercizi che necessitano di alcuni adattamenti o integrazioni per essere implementati efficacemente nel SSE. Ad esempio:
 - Esercizi **8, 13, 24, 62**: Questi esercizi richiedono la progettazione di soundscape specifici, strumenti aggiuntivi per simulare contesti realistici o registrazione audio in tempo reale.
- **Bassa:** Gli esercizi di questa categoria presentano difficoltà significative nell'implementazione, a causa della loro natura fortemente legata al contesto fisico o sociale. Ad esempio:

- Esercizi **9, 12, 58**: Questi esercizi richiedono ambienti fisici particolari o interazioni che non possono essere facilmente simulate nel sistema SSE.
- **N/A (Non Applicabile)**: Questi esercizi non risultano applicabili al SSE poiché non presentano una dimensione sonora o immersiva rilevante. Ad esempio:
 - Esercizi **14, 15, 17**: Sono attività riflessive o personali che non necessitano del supporto tecnologico fornito dal SSE.

Le strategie di implementazione permettono di massimizzare il potenziale educativo del SSE, concentrandosi sugli esercizi più adatti al sistema e adattando quelli di valore pedagogico, ma meno immediatamente implementabili. Alla luce di quanto esposto, è possibile strutturare percorsi educativi che integrino gli esercizi selezionati e adattati. Il paragrafo seguente propone una serie di percorsi educativi mirati a diversi ordini di scuola, con l'obiettivo di fornire linee guida concrete per l'uso del SSE in contesti didattici diversificati.

3.4 Proposte per percorsi didattici

Schafer afferma che: ”*[...] non penso affatto che questi esercizi debbano essere eseguiti in modo sistematico dall'inizio alla fine: essi sono destinati piuttosto a un'esecuzione casuale, a seconda dell'occasione.*” E specifica inoltre: ”*Adattate gli esercizi ai contesti in cui operate e aggiungetene altri, se lo riteneate opportuno. Non esistono limiti a questo progetto, esiste soltanto lo sforzo continuo di abbellire il mondo in tutti i possibili modi che persone dotate di buone orecchie riescono a immaginare.*”

Tutti i suoi esercizi sono, dunque, genericamente validi e adattabili a qualsiasi grado scolastico. *Sound Space Explorer (SSE)*, di conseguenza, è stato concepito come un dispositivo didattico quanto più duttile possibile, sia da un punto di vista tecnologico che pedagogico, per rispondere in modo efficace alle specifiche esigenze educative. Grazie alla sua natura flessibile, il sistema può essere adattato

a diverse fasce di età, gradi scolastici, obiettivi didattici e percorsi educativi, offrendo un'ampia gamma di opportunità per stimolare l'apprendimento attraverso la *digitalizzazione* degli esercizi di Schafer.

Di seguito sono riportate alcune idee di proposte educative per la scuola dell'infanzia, la scuola primaria, e la scuola secondaria di primo e secondo grado. Queste proposte sono contestualizzate rispetto alle *Indicazioni Nazionali*[1], al *Quadro Europeo delle Qualificazioni* (EQF)[7], alla didattica STEAM e agli obiettivi dell'*Agenda 2030*[3] esposti nel Capitolo 1.

3.4.1 Scuola dell'infanzia

Per i bambini e le bambine della scuola dell'infanzia, l'obiettivo principale è quello di sviluppare una prima consapevolezza dei suoni e dell'ambiente sonoro attraverso attività ludiche e sensoriali, ponendo le basi per un ascolto attento e critico. Questo approccio è in linea con le *Indicazioni Nazionali per il Curricolo 2012*, che sottolineano l'importanza dell'esplorazione sensoriale e della scoperta guidata nei percorsi educativi di questa fascia d'età. Inoltre, queste attività si collegano agli **Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030**, in particolare l'*Obiettivo 4* (Educazione inclusiva e di qualità)⁹ e l'*Obiettivo 15* (Vita sulla Terra)¹⁰, promuovendo un primo contatto con l'ecologia acustica e il rispetto per l'ambiente.

Le proposte principali includono:

- **Esplorazione del suono:** Utilizzare esercizi come il numero **1** (*Elenco sonoro*) per far scoprire ai bambini i suoni dell'ambiente circostante in modo semplice e coinvolgente.
- **Imitazione sonora:** Sfruttare esercizi come il numero **43** (*Imitazioni vocali di ambienti*) per stimolare la creatività e la capacità di riprodurre suoni in maniera ludica.

⁹<https://sdgs.un.org/goals/goal4>

¹⁰<https://sdgs.un.org/goals/goal15>

- **Passeggiate sonore:** Proporre attività simili all'esercizio **13** (*Passeggiata d'ascolto*), trasformando semplici passeggiate in occasioni per ascoltare e riconoscere suoni.
- **Giochi di riconoscimento sonoro:** Ispirati all'esercizio **19** (*Suoni personali*), questi giochi permettono ai bambini di sviluppare la capacità di discriminazione sonora e la memoria acustica attraverso attività ludiche.

Parallelamente, l'integrazione STEAM potrebbe arricchire queste esperienze sensoriali e creative, introducendo i bambini a un primo approccio alla tecnologia e all'arte sonora. Le attività STEAM proposte includono:

- **Laboratorio sonoro interattivo:** Utilizzare dispositivi come tablet o microfoni per registrare e riascoltare i suoni raccolti durante le attività di esplorazione sonora.
- **Costruzione di strumenti sonori:** Basata sull'esercizio **74** (*Suoni con un foglio di carta*), questa attività utilizza materiali di recupero per promuovere la manualità e la creatività.
- **Esperimenti con il suono:** Ispirati all'esercizio **69** (*Effetti dell'ambiente sul suono*), permettono ai bambini di osservare come i suoni cambiano a seconda degli ambienti, sviluppando una comprensione intuitiva dell'acustica.
- **Arte sonora:** Collegate all'esercizio **40** (*Disegnare il suono*), queste attività stimolano i bambini a creare rappresentazioni grafiche di suoni ascoltati o immaginati, incoraggiando l'interazione tra arti visive e sonore.

3.4.2 Scuola primaria

Nella scuola primaria, l'obiettivo principale è ampliare la consapevolezza uditiva dei bambini e delle bambine e introdurre i concetti base legati all'ecologia acustica e alla tridimensionalità del suono, attraverso attività pratiche e collaborative. Le

proposte tengono conto delle Indicazioni Nazionali e dell'Agenda 2030, in particolare degli obiettivi legati all'educazione di qualità (Obiettivo 4¹¹) e alla vita sulla terra (Obiettivo 15¹²).

- **Esplorazione e classificazione dei suoni:** Sfruttare esercizi come il numero **2** (*Classificazione dei suoni*) per guidare i bambini a distinguere suoni naturali, tecnologici e umani, sviluppando competenze di ascolto critico e capacità di categorizzazione.
- **Suoni e narrazione:** Proporre esercizi come il numero **60** (*Raccontare storie sonore*) per stimolare la creatività e l'immaginazione, incoraggiando i bambini a creare brevi storie usando solo suoni.
- **Passeggiate sonore tematiche:** Organizzare attività basate sull'esercizio **13** (*Passeggiata d'ascolto*) in cui i bambini esplorano l'ambiente scolastico o naturale per identificare suoni legati a tematiche specifiche, come "suoni della natura" o "suoni della città".

Proposte per l'integrazione STEAM:

- **Creazione di soundscapes digitali:** Introdurre i bambini all'uso di strumenti semplici per registrare suoni e combinarli digitalmente¹³, seguendo un approccio interdisciplinare che integri tecnologia, arte e scienze.
- **Laboratori di ecologia acustica:** Sfruttare esercizi come il numero **83** (*Ecologia acustica e inquinamento*) per sensibilizzare i bambini sull'impatto del rumore sull'ambiente, coinvolgendoli nella progettazione di mappe sonore del quartiere scolastico.
- **Analisi del suono e delle onde:** Collegare le attività sonore a concetti scientifici di base, come la propagazione delle onde sonore, attraverso esperimenti semplici e intuitivi.

¹¹<https://www.un.org/sustainabledevelopment/education/>

¹²<https://www.un.org/sustainabledevelopment/biodiversity/>

¹³Un ottimo esempio è rappresentato dall'ambiente *BandLab*: <https://www.bandlab.com/studio>

3.4.3 Scuola secondaria di primo grado

Per la scuola secondaria di primo grado, l'obiettivo principale è approfondire l'ascolto critico e sviluppare una consapevolezza ecologica più avanzata, con un focus sulla tridimensionalità del suono e sull'impatto dell'inquinamento acustico. Le proposte si collegano alle Indicazioni Nazionali, che sottolineano l'importanza dell'educazione musicale come strumento per sviluppare competenze trasversali, e all'Agenda 2030, con particolare riferimento agli Obiettivi 4¹⁴, 11¹⁵ e 15¹⁶.

- **Analisi critica del paesaggio sonoro:** Utilizzare esercizi come il numero **78** (*Suoni del passato*) per discutere i cambiamenti del paesaggio sonoro e riflettere sull'importanza della conservazione dei *soundmarks*¹⁷.
- **Esplorazione della tridimensionalità del suono:** Proporre esercizi come il numero **4** (*Suoni in movimento*) e **21** (*Suoni nei quattro punti cardinali*) per sensibilizzare gli studenti sulla percezione spaziale del suono.
- **Mappe sonore collaborative:** Basandosi sull'esercizio **87** (*Identificazione dei soundmarks*), coinvolgere gli studenti nella creazione di mappe sonore del loro quartiere o città, integrando le osservazioni con ricerche storiche e culturali.

Proposte per l'integrazione STEAM:

- **Progettazione di soundscapes virtuali:** Introdurre software per la creazione di ambienti sonori immersivi e tridimensionali, per esplorare il potenziale della tecnologia nei contesti educativi.
- **Esperimenti sull'acustica:** Utilizzare esercizi come il numero **69** (*Effetti dell'ambiente sul suono*) per esplorare come l'ambiente modifica il suono, collegando l'esperienza all'analisi scientifica del fenomeno.

¹⁴<https://www.un.org/sustainabledevelopment/education/>

¹⁵<https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>

¹⁶<https://www.un.org/sustainabledevelopment/biodiversity/>

¹⁷Impronte sonore

- **Progetti di ecologia acustica:** Coinvolgere gli studenti in un'indagine quantitativa sull'inquinamento acustico, utilizzando esercizi come il numero **83** (*Ecologia acustica e inquinamento*) combinati a dispositivi scientifici come i fonometri e integrando dati raccolti sul campo con riflessioni sull'impatto ambientale e sociale del rumore.

3.4.4 Scuola secondaria di secondo grado

Per la scuola secondaria di secondo grado, l'obiettivo è sviluppare una comprensione approfondita del suono come fenomeno complesso, integrando conoscenze multidisciplinari e competenze critiche. Il sistema SSE può essere utilizzato per esplorare la tridimensionalità del suono, l'impatto dell'ambiente sulla percezione sonora e le implicazioni tecnologiche e culturali legate al paesaggio sonoro. Le proposte si allineano con le Indicazioni Nazionali, che sottolineano l'importanza delle competenze scientifiche, tecnologiche e umanistiche, e con gli Obiettivi dell'Agenda 2030, in particolare il 4¹⁸, il 9¹⁹ e l'11²⁰.

- **Esplorazione psicoacustica:** Utilizzare esercizi come il numero **62** (*Illusioni sonore*) e **63** (*Paradossi sonori*) per discutere fenomeni psicoacustici, collegandoli alla scienza e alla percezione del suono.
- **Progettazione di soundscapes:** Proporre attività basate sull'esercizio **94** (*Sculture sonore nel parco*) per sviluppare soundscapes immersivi che integrino dimensioni artistiche, ecologiche e tecnologiche.
- **Ecologia acustica avanzata:** Utilizzare l'esercizio **84** (*Sondaggi sociali sul rumore*) per condurre ricerche sull'inquinamento acustico locale, elaborando soluzioni sostenibili e innovative.
- **Studio dei soundmark culturali:** Basarsi sull'esercizio **87** (*Identificazione dei soundmarks*) per esplorare le connessioni tra i paesaggi sonori e la storia musicale, artistica e sociale di specifiche aree geografiche.

¹⁸<https://www.un.org/sustainabledevelopment/education/>

¹⁹<https://www.un.org/sustainabledevelopment/infrastructure-industrialization/>

²⁰<https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>

Proposte per l'integrazione STEAM:

- **Modifica del dispositivo SSE:** Coinvolgere gli studenti nell'analisi e nella modifica del sistema SSE, esplorando sensori, programmazione e circuiti. Questo approccio favorisce lo sviluppo di competenze tecnologiche avanzate, come l'utilizzo di DAW, la programmazione in linguaggi a stringa e l'uso di piattaforme per la prototipazione elettronica.
- **Analisi multidisciplinare:** Collegare il funzionamento del SSE a discipline come acustica, psicoacustica, fisica (principi del suono), geografia (analisi dei paesaggi sonori locali), storia (studio dei soundmarks legati alla musica popolare) e biologia (impatto del suono su flora e fauna).
- **Problemi di Aristotele:** Riproporre le questioni scientifico-filosofiche evidenziate dall'esercizio numero **64**.
- **Espperimenti scientifici:** Introdurre esercizi come il numero **69** (*Effetti dell'ambiente sul suono*) per dimostrare le variazioni sonore in diversi ambienti, utilizzando software per la visualizzazione e l'analisi delle onde sonore.
- **Progetti di gruppo:** Organizzare laboratori dove gli studenti collaborano per creare soundscapes immersivi, integrando strumenti digitali e riflessioni ecologiche. Le attività possono culminare in presentazioni interattive aperte al pubblico.
- **Educazione alla sostenibilità:** Proporre attività come l'esercizio **92** (*Analisi acustica di un parco*), collegandole alla progettazione di soluzioni per la riduzione dell'inquinamento acustico nelle città, con una prospettiva orientata alla sostenibilità.
- **Spiegazione del funzionamento del SSE:** Utilizzare il dispositivo come caso studio per spiegare concetti tecnologici complessi, quali il funzionamento dei sensori IMU, la trasmissione wireless, la codifica binaurale e il routing sonoro. Questa attività può essere integrata con laboratori pratici e discussioni interdisciplinari.

3.5 Sintesi e riflessioni

Il terzo capitolo ha esplorato le basi metodologiche e pedagogiche che fondano il progetto *Sound Space Explorer* (SSE), evidenziando come questo dispositivo educativo rappresenti un punto d'incontro tra le intuizioni di Raymond Murray Schafer e le potenzialità offerte dalle tecnologie immersive. Attraverso la classificazione e l'analisi dei *100 esercizi*, è stata delineata una struttura flessibile per la progettazione di percorsi educativi che abbracciano un'ampia gamma di obiettivi didattici, dai più specifici, come l'educazione alla tridimensionalità del suono, a quelli più generali, come la sensibilizzazione all'ecologia acustica e ambientale.

Le proposte educative presentate sono ipotesi su come il sistema SSE possa adattarsi a diverse fasce di età e contesti educativi, promuovendo un approccio multidisciplinare in linea con le Indicazioni Nazionali e gli obiettivi dell'Agenda 2030. Tuttavia, la reale efficacia del sistema richiede una validazione pratica che possa confermarne il potenziale educativo.

Nel capitolo successivo, si propone un approccio sperimentale per valutare l'impatto del sistema SSE sull'apprendimento e sull'esperienza degli studenti. Pur non disponendo di dati concreti per una sperimentazione completa, verranno definiti il metodo sperimentale, il protocollo e i criteri di valutazione che potrebbero guidare un futuro studio.

Capitolo 4

Sperimentazione Sound Space Explorer

Il presente capitolo propone un quadro sperimentale per la valutazione dell'efficacia del sistema Sound Space Explorer (SSE) come strumento didattico innovativo nell'educazione al suono. Sebbene non siano presentati dati empirici, l'obiettivo è fornire un framework metodologico chiaro e replicabile che possa essere utilizzato per future indagini sperimentali.

L'approccio delineato si basa su paradigmi metodologici consolidati come il *Design Based Research* (Paragrafo 4.1.1) e l'*Action Research* (Paragrafo 4.1.2), che offrono una struttura flessibile e iterativa per integrare l'innovazione tecnologica con le pratiche educative tradizionali. Particolare attenzione sarà dedicata all'analisi comparativa tra la modalità di esecuzione degli esercizi proposta da Schafer e la stessa adattata al sistema SSE. Questa analisi ha lo scopo di indagare i vantaggi offerti dalla tecnologia immersiva nell'ampliare le possibilità di ascolto, comprensione e interazione con il paesaggio sonoro.

Per simulare una sperimentazione concreta, si immagina l'applicazione del protocollo a due gruppi di studenti con caratteristiche simili per età, livello scolastico e background educativo. Uno dei gruppi seguirà un percorso basato sulla metodologia tradizionale di Schafer, mentre l'altro utilizzerà il sistema SSE come supporto tecnologico. Questa configurazione *between-subjects* consentirà di confrontare le

esperienze e i risultati ottenuti nei due contesti, valutando l'impatto del sistema sulla percezione sonora, sulle capacità critiche di ascolto e sull'apprendimento collaborativo.

Il capitolo si articola in diverse sezioni, iniziando dalla definizione dei metodi sperimentali adottati, seguita dalla descrizione del protocollo sperimentale, che include un set selezionato di esercizi di Schafer. Verranno infine presentati i criteri proposti per la valutazione dei risultati, con particolare attenzione alla dimensione qualitativa dell'esperienza e all'analisi dell'usabilità del sistema attraverso metriche di *User Experience* (UX).

4.1 Metodo sperimentale

L'adozione delle metodologie *Design Based Research (DBR)* e *Action Research* si basa sulla loro capacità di integrare teoria e pratica in contesti educativi reali, rendendole particolarmente adatte alla sperimentazione del sistema SSE. Questi approcci consentono di sviluppare e validare il sistema in modo iterativo e partecipativo, garantendo un costante allineamento con le esigenze degli studenti e degli insegnanti.

Il *Design Based Research (DBR)* permette di progettare e testare il sistema SSE in cicli iterativi, in cui ogni fase di progettazione è seguita da una valutazione empirica che fornisce indicazioni per miglioramenti successivi. Questo approccio è ideale per esplorare e ottimizzare l'integrazione della tecnologia immersiva nel contesto educativo. Parallelamente, l'*Action Research* si concentra sull'identificazione e la risoluzione di problemi pratici attraverso un processo collaborativo che coinvolge attivamente i docenti e gli studenti. Questo approccio consente di adattare il sistema alle dinamiche specifiche di ogni classe, promuovendo un ambiente di apprendimento inclusivo e partecipativo.

Di seguito vengono approfondite le caratteristiche principali di ciascuna metodologia.

4.1.1 Design Based Research

Il *Design Based Research (DBR)* è un approccio metodologico che combina ricerca teorica e applicazione pratica, ponendo l'accento sullo sviluppo iterativo di soluzioni testate sul campo. Secondo Wang e Hannafin (2005)[50], il DBR è un ottimo strumento per progettare interventi che non solo affrontino problemi educativi specifici, ma che contribuiscano anche allo sviluppo teorico in ambito pedagogico.

Nella sperimentazione del sistema SSE, il DBR sarà utilizzato per:

- Progettare e implementare soluzioni educative basate sulla tecnologia immersiva del sistema SSE.
- Valutare l'efficacia degli interventi attraverso osservazioni empiriche e feedback degli utenti.
- Migliorare progressivamente il sistema attraverso cicli di progettazione, sperimentazione e revisione.

Un elemento centrale del DBR è la collaborazione tra ricercatori, insegnanti e studenti, che permette di integrare prospettive diverse nel processo di progettazione. In questo contesto, gli esercizi di Schafer rappresentano un framework di riferimento ideale, poiché offrono una base consolidata per lo sviluppo di attività didattiche innovative, adattate al sistema SSE. Ogni ciclo del DBR sarà strutturato in quattro fasi principali:

1. **Identificazione** del problema educativo e definizione degli obiettivi.
2. **Progettazione e implementazione** dell'intervento.
3. **Raccolta e analisi** dei dati empirici.
4. **Revisione e miglioramento** dell'intervento.

Questa metodologia garantirà che il sistema SSE sia continuamente affinato, rispondendo alle esigenze educative reali e contribuendo al contempo all'avanzamento della ricerca in ambito pedagogico e tecnologico.

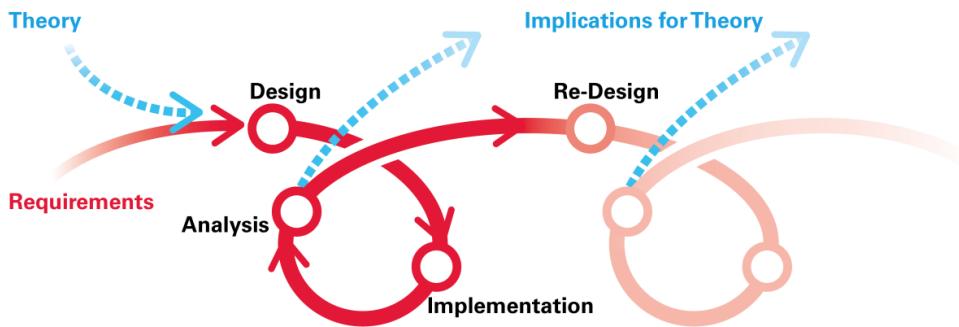


Figura 21: Rappresentazione grafica del processo iterativo alla base del DBR. Tratto da Fraefel (2014, p. 9)[51].

4.1.2 Action Research

L'*Action Research* rappresenta un approccio metodologico collaborativo orientato alla risoluzione di problemi pratici, che si integra perfettamente con il *Design-Based Research* (DBR). Mentre il DBR si concentra sullo sviluppo iterativo e sulla validazione del sistema SSE attraverso cicli strutturati, l'*Action Research* pone al centro gli attori del contesto educativo, coinvolgendo attivamente insegnanti e studenti nella pianificazione, implementazione e riflessione[52].

La complementarità tra i due approcci si manifesta nella loro capacità di operare a livelli differenti:

- Il **DBR** fornisce un quadro teorico e pratico per iterare e perfezionare il design del sistema SSE, con l'obiettivo di produrre risultati generalizzabili e replicabili.
- L'**Action Research**, invece, si concentra sull'adattamento del sistema SSE alle esigenze specifiche dei contesti educativi locali, valorizzando il contributo diretto degli attori coinvolti[53].

Nella sperimentazione proposta, l'*Action Research* consentirebbe di:

- **Identificare** criticità e opportunità di miglioramento del sistema SSE attraverso il feedback diretto degli utenti finali (insegnanti e studenti).

- **Promuovere** un approccio partecipativo, in cui gli insegnanti diventano co-progettisti delle attività didattiche basate sul sistema SSE.
- **Favorire** una riflessione collettiva sui risultati e sull'impatto del sistema SSE, stimolando un continuo miglioramento delle pratiche educative.

Questa sinergia metodologica non solo garantisce un'analisi approfondita dell'efficacia del sistema SSE, ma promuove anche la sua adattabilità a contesti educativi diversi, rispettando le specificità di ciascun ambiente di apprendimento. L'*Action Research*, in particolare, rende possibile un'esperienza educativa collaborativa, in cui alunni e docenti sono elementi attivi nel processo di miglioramento metodologico.

L'integrazione tra *Design-Based Research* e *Action Research* rende il framework sperimentale proposto particolarmente robusto, in grado di unire la ricerca teorica e pratica per ottenere risultati sia generalizzabili sia rilevanti per contesti specifici.

4.1.3 Between Subjects Design

Il *Between Subjects Design* prevede la suddivisione degli alunni in due gruppi indipendenti: un gruppo sperimentale, che utilizza il sistema SSE, e un gruppo di controllo, che svolge gli stessi esercizi di Schafer in modalità *tradizionale*. Questa metodologia è stata preferita rispetto al *Within Subjects Design*, che avrebbe previsto che gli stessi partecipanti sperimentassero entrambe le condizioni.

Il *Between Subjects Design* riduce il rischio di effetti di apprendimento, di abitudine o di noia, che potrebbero influenzare i risultati qualora i partecipanti eseguissero gli stessi esercizi in entrambe le modalità[55]. Ad esempio, i partecipanti che completano prima gli esercizi in modalità *tradizionale* potrebbero affrontarli con maggiore familiarità e sicurezza durante l'utilizzo del sistema SSE e viceversa, distorcendo così la valutazione dell'efficacia del sistema. Due gruppi distinti, con condizioni il più possibile omogenee (età, competenze pregresse, ambienti didattici e metodologia dell'insegnante), consentono di mantenere una chiara separazione tra le esperienze e di isolare meglio l'impatto del Sound Space Explorer.



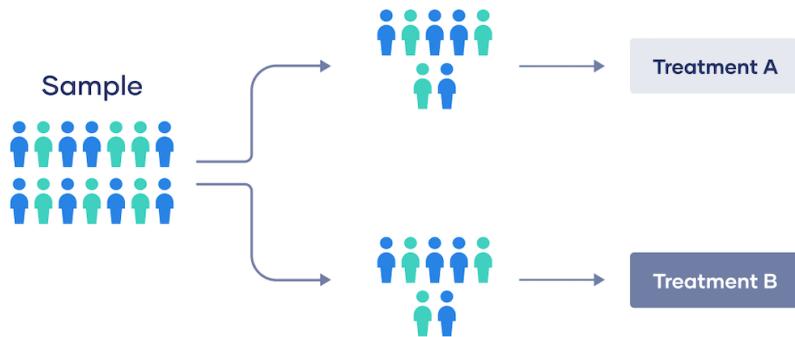
Figura 22: Rappresentazione grafica del processo ciclico alla base dell’Action Research[54]. Tratto da Interaction Design Foundation: <https://www.interaction-design.org/literature/topics/action-research>.

Il *Between Subjects Design* prevederebbe, nella sua applicazione canonica, un’assegnazione casuale dei partecipanti a ciascun gruppo. Tuttavia l’autore ritiene che in ambienti scolastici non sia la strategia migliore in quanto potrebbe interferire con il contesto socio-educativo delle classi stesse. In particolare, il mantenimento delle classi preesistenti garantisce una maggiore coerenza nelle dinamiche di gruppo e nei rapporti tra pari, elementi che possono influire positivamente sui risultati di esercizi collaborativi come quelli proposti da Schafer. Infine, questo adattamento metodologico permette una maggiore facilità di implementazione nell’ambiente scolastico reale, in cui la suddivisione dei partecipanti in gruppi misti potrebbe risultare logisticamente complessa e difficile da gestire per gli insegnanti.

In definitiva, il *Between Subjects Design* è stato adottato per la sua capacità di garantire una chiara distinzione tra le due modalità di intervento, preservando

al contempo l'integrità delle condizioni educative e delle dinamiche di gruppo nei contesti scolastici reali.

Between-subjects design



Within-subjects design



Figura 23: Immagine di confronto tra un design sperimentale con approccio tra gruppi o all'interno del gruppo. Tratto da Scribbr <https://www.scribbr.com/methodology/between-subjects-design/>.

4.2 Protocollo sperimentale

Per valutare l'efficacia del sistema SSE, il protocollo prevede l'utilizzo di due esercizi di Schafer, selezionati sulla base di criteri specifici:

- Elevata adattabilità al sistema SSE.

- Capacità di stimolare abilità trasversali come l'ascolto critico, la percezione spaziale e la consapevolezza sonora.
- Possibilità di essere svolti con modalità sia tradizionale sia immersiva senza richiedere uniformità negli elementi sonori utilizzati.
- Validità universale, indipendentemente dal grado scolastico dei partecipanti.

Gli esercizi selezionati sono i seguenti:

- **Esercizio 2** (*Classificazione suoni*): Gli studenti classificano i suoni in categorie come geofonie, biofonie e antrofonie, analizzandone le caratteristiche distintive. Questo esercizio sviluppa capacità di analisi critica e favorisce una comprensione strutturata del paesaggio sonoro.
- **Esercizio 4** (*Suoni in movimento*): Gli studenti identificano e differenziano i suoni in base alla loro posizione e al movimento (fissi, mobili o che si spostano molto velocemente), potenziando le abilità di percezione spaziale.

Entrambi i gruppi partecipanti seguiranno lo stesso percorso didattico per garantire coerenza metodologica, ma utilizzeranno modalità differenti:

- Il **gruppo sperimentale** utilizzerà il sistema SSE per esplorare paesaggi sonori immersivi, sfruttando le potenzialità della tecnologia per amplificare la percezione tridimensionale e la consapevolezza spaziale.
- Il **gruppo di controllo** svolgerà gli esercizi in modalità tradizionale, utilizzando paesaggi sonori preregistrati o naturali. Nel secondo caso, si consiglia di registrare il paesaggio sonoro a cui sono stati sottoposti gli alunni per favorire una comparazione oggettiva e per instaurare una discussione critica in classe durante la fase di valutazione.

Il protocollo è stato progettato per essere il più bilanciato possibile, con attività simili in termini di obiettivi e metodologia, ma diverse per modalità di esecuzione.

4.2.1 Valutazione dei risultati

La valutazione dei risultati si basa sull'utilizzo di due tabelle, una per ciascun esercizio selezionato (Esercizi 2 e 4), fornite in Appendice B. Questi template, progettati per essere compilati direttamente dagli studenti durante o al termine di ciascun esercizio, mirano a raccogliere dati sia qualitativi che quantitativi relativi alle esperienze di ascolto, classificazione e analisi dei suoni.

Ogni tabella è organizzata in sezioni che permettono agli alunni di documentare diversi aspetti sonori richiesti dagli esercizi, come l'origine, la ripetitività, il movimento, la direzione e altre caratteristiche specifiche.

Ruolo dei docenti I docenti dei rispettivi gruppi (sperimentale e di controllo) avranno il compito di introdurre e fornire questi template agli alunni, guidandoli nella loro compilazione. L'adozione di queste tabelle consente una raccolta di dati standardizzata, garantendo la possibilità di confrontare direttamente le performance tra i due gruppi.

Flessibilità e adattabilità delle tabelle Le tabelle, pur seguendo un formato standardizzato, si presentano come strumenti flessibili e personalizzabili. I docenti possono modificarle in base al grado scolastico dei partecipanti o agli obiettivi specifici della sperimentazione, mantenendo tuttavia l'uniformità necessaria per il confronto dei risultati.

Collegamento con il protocollo sperimentale I dati raccolti attraverso queste tabelle saranno anonimizzati e utilizzati per rispondere alle domande di ricerca poste da questo protocollo. In particolare, i dati permetteranno di:

- Analizzare la capacità generale degli studenti di identificare, classificare e descrivere i suoni percepiti.
- Valutare le differenze tra i due gruppi in termini di ascolto critico e percezione spaziale.

- Rilevare eventuali vantaggi o limiti nell'uso della tecnologia immersiva rispetto ai metodi tradizionali.

4.2.2 Assegnazione punteggio

La tabella dei soundscapes proposta nel Paragrafo 3.2.6 costituisce una risorsa fondamentale per valutare le performance del gruppo sperimentale, in quanto permette di confrontare le risposte degli studenti con parametri oggettivi legati alla spazializzazione sonora generata dal Sound Space Explorer. Inoltre, l'accesso alle registrazioni spazializzate fornisce un ulteriore vantaggio: la possibilità di riascoltare esattamente i suoni percepiti durante l'esercizio, garantendo un alto livello di coerenza e precisione nella valutazione.

Per quanto riguarda il gruppo di controllo, **la situazione risulta più complessa**. Sebbene sia auspicabile che i docenti abbiano registrato l'ambiente sonoro con una microfonazione almeno stereofonica, è probabile che tale condizione non venga facilmente soddisfatta in un contesto scolastico reale. Per ovviare a questa difficoltà, si propone che il docente compili personalmente la tabella di riferimento contemporaneamente agli studenti, utilizzandola come base per la valutazione.

Criteri per l'assegnazione del punteggio Per una valutazione oggettiva e standardizzata, si propone di assegnare il punteggio in base ai seguenti criteri principali:

1. **Accuratezza nella classificazione:** Verifica della corretta identificazione dei parametri richiesti dagli esercizi (tipologia, ripetitività, movimento, provenienza spaziale). Ogni parametro corretto può essere assegnato un punteggio specifico (1 punto per ogni cella compilata correttamente).
2. **Completezza:** Numero totale di suoni identificati e analizzati rispetto al totale percepibile nel soundscape (un punteggio percentuale calcolato in base ai suoni individuati su un totale definito).

3. **Coerenza nelle descrizioni:** Valutazione della capacità degli studenti di fornire descrizioni coerenti e pertinenti nei campi delle *note aggiuntive* o delle *osservazioni personali*.
4. **Percezione spaziale:** Per l'*Esercizio B* (Appendice B), valutazione della corretta identificazione di parametri come movimento e provenienza spaziale degli eventi sonori.

Valutazione tra i due gruppi La valutazione dovrà tenere conto delle diverse condizioni operative tra il gruppo sperimentale e quello di controllo:

- **Gruppo sperimentale:** La disponibilità delle registrazioni spazializzate garantisce una base oggettiva per valutare l'accuratezza e la percezione spaziale. In questo caso, i ricercatori possono verificare direttamente le risposte degli studenti rispetto ai parametri sonori generati dal sistema SSE.
- **Gruppo di controllo:** L'assenza di soundscapes riproducibili richiede un approccio più soggettivo, basato sull'esperienza diretta del docente. Le risposte degli studenti saranno confrontate con la tabella di riferimento compilata dall'insegnante.

Vantaggi del sistema SSE nella valutazione Emerge dunque uno dei principali punti di forza del Sound Space Explorer, cioè la possibilità di riprodurre fedelmente i soundscapes proposti agli studenti. Questo non solo consente una valutazione più oggettiva e replicabile, ma elimina anche gran parte delle variabili legate alla percezione individuale del docente.

4.3 Valutazione User Experience

La valutazione dell'esperienza utente (*User Experience*, comunemente abbreviata con *UX*) rappresenta un elemento centrale per comprendere non solo l'efficacia del sistema SSE, ma anche il modo in cui gli studenti e i docenti si approcciano alla metodologia didattica di educazione al suono proposta in questo lavoro di tesi. La

User Experience si riferisce alla qualità complessiva dell’interazione con un sistema o un prodotto, includendo aspetti quali usabilità, soddisfazione e coinvolgimento.

Nel caso specifico, l’obiettivo non è valutare il *Sound Space Explorer* in sé, ma piuttosto analizzare come vengono percepiti e vissuti gli esercizi svolti dai due gruppi (sperimentale e di controllo). Questo approccio garantisce uniformità nella raccolta dei dati e consente di identificare preferenze o differenze tra il metodo tradizionale e quello immersivo.

I parametri principali che si intende monitorare includono:

- Eventuali difficoltà o ostacoli riscontrati dai docenti durante lo svolgimento degli esercizi.
- Eventuali difficoltà o ostacoli riscontrati dagli studenti.
- Il livello di coinvolgimento percepito dagli studenti durante gli esercizi.
- Il grado di soddisfazione espresso dagli studenti e dai docenti al termine degli esercizi.
- La comparazione tra le esperienze percepite dai gruppi sperimentale e di controllo.

Per raccogliere queste informazioni, si propone una metodologia che integra strumenti sia quantitativi e che qualitativi:

- **Questionari strutturati**, come il *System Usability Scale* (Paragrafo 4.3.1), utili per misurare aspetti come la facilità d’uso e la soddisfazione generale.
- **Questionari UX personalizzati** (Paragrafo 4.3.2), progettati con domande specifiche relative agli esercizi svolti, per indagare più nel dettaglio le impressioni e il coinvolgimento dei partecipanti.

Entrambi gli strumenti saranno somministrati sia al gruppo sperimentale sia al gruppo di controllo, in modo da garantire una comparazione diretta tra i due approcci. Complessivamente, verranno proposti:

- Due questionari *System Usability Scale* (uno per gli studenti e uno per i docenti).
- Due questionari UX personalizzati (uno per gli studenti e uno per i docenti).

Questa combinazione consentirà di ottenere una visione completa dell'esperienza vissuta dai partecipanti, fornendo dati utili per l'ottimizzazione del sistema e per future sperimentazioni.

4.3.1 System Usability Scale (SUS)

Il *System Usability Scale*¹ (SUS) è un metodo sviluppato dal ricercatore americano John Brooke nel 1986 mentre lavorava presso l'azienda *Digital Equipment Corporation* [56]. Consiste in un questionario standardizzato composto da 10 domande a risposta chiusa con scala Likert a 5 punti²[57], progettato per valutare l'usabilità di un sistema in modo rapido ed efficace[58].

Il punteggio totale è calcolato con una formula matematica specifica, che consente di ottenere un risultato compreso tra 0 e 100, rappresentando il livello di soddisfazione degli utenti nell'interazione con un determinato apparato. Grazie alla sua versatilità, il SUS è spesso utilizzato anche per applicazioni in ambito educativo[59].

Le sue caratteristiche principali includono:

- Una struttura semplice e comprensibile, adatta a utenti senza competenze tecniche specifiche.
- La possibilità di applicazione trasversale, rendendolo idoneo sia per studenti che per docenti.
- Un'analisi sintetica che fornisce un'indicazione immediata sulla percezione generale del sistema.

¹In italiano, scala di usabilità del sistema

²I livelli di una scala Likert vanno tipicamente da *fortemente in disaccordo* a *fortemente d'accordo*. La scala è stata testata per validità psicométrica, dimostrando di essere uno strumento affidabile per misurare la percezione dell'usabilità.

Nel contesto del presente lavoro, verranno utilizzati due questionari SUS distinti:

- **SUS per gli studenti**, focalizzato su aspetti come coinvolgimento, semplicità e comprensibilità delle attività.
- **SUS per i docenti**, con un focus maggiore su usabilità didattica, integrazione nelle lezioni e facilità di gestione.

Entrambi i questionari saranno sottoposti ai partecipanti dei due gruppi (sperimentale e di controllo). I questionari SUS sono allegati in Appendice C, con le istruzioni per la compilazione e il calcolo del punteggio.

4.3.2 Questionari UX personalizzati

Nell'ambito della valutazione dell'esperienza utente (*User Experience*), oltre al *System Usability Scale* (SUS), vengono spesso impiegati questionari qualitativi creati ad hoc per specifici contesti o sistemi da valutare[60]. Questi strumenti sono progettati per raccogliere feedback dettagliati e riflessioni personali.

Le tipologie di domande utilizzate includono[60]:

- **Domande a risposta chiusa**, con scala Likert per misurare il grado di accordo o soddisfazione.
- **Domande a scelta multipla**, per raccogliere opinioni su preferenze o ostacoli.
- **Domande a risposta aperta**, che offrono agli utenti la possibilità di esprimere liberamente opinioni, critiche o suggerimenti.
- **Domande situazionali**, che chiedono di riflettere su aspetti specifici.

La progettazione dei questionari deve seguire criteri ben definiti, garantendo[60]:

- **Chiarezza e semplicità**, con un linguaggio comprensibile e domande accessibili.

- **Neutralità**, evitando domande che possano indurre risposte predefinite o *bias*.
- **Breve durata**, per garantire che la compilazione richieda al massimo 10-15 minuti, rispettando i tempi di attenzione senza affaticamento.
- **Equilibrio tra domande chiuse e aperte**, con una prevalenza di domande chiuse per facilitare l'analisi dei dati, affiancate da alcune domande aperte per raccogliere spunti qualitativi.

Struttura del questionario I questionari UX personalizzati per docenti e studenti si suddividono in tre sezioni principali:

1. **Feedback specifico sull'esercizio A**, focalizzato sui parametri sonori riportati nella Tabella A (Appendice B).
2. **Feedback specifico sull'esercizio B**, focalizzato sui parametri sonori riportati nella Tabella B (Appendice B).
3. **Suggerimenti e opinioni generali**, con spazio per commenti aperti e idee per migliorare gli esercizi e le metodologie didattiche.

L'utilizzo di questi strumenti dovrebbe garantire un'analisi completa dell'esperienza utente. Questo approccio non solo permette di valutare l'efficacia del Sound Space Explorer, ma offre anche spunti preziosi per miglioramenti futuri, collegando strettamente i risultati di questo paragrafo con il capitolo successivo dedicato alle *Conclusioni e Sviluppi Futuri*.

Capitolo 5

Conclusioni

Questo lavoro di tesi rappresenta la sintesi di un percorso accademico e personale che unisce diverse aree di interesse: l'arte immersiva basata sulla realtà aumentata¹, l'importanza culturale ed ambientale del paesaggio sonoro e della soundscape ecology, e l'obiettivo di promuovere una visione multidisciplinare e inclusiva nell'educazione musicale. L'elaborato si pone come contributo alla ricerca su metodologie didattiche innovative, proponendo un sistema che integra sia tecnologia che approcci più tradizionali per stimolare una consapevolezza critica del suono e della tridimensionalità acustica.

Il capitolo conclusivo ha l'obiettivo di sintetizzare i principali risultati teorici e pratici del progetto, valutare i limiti e le sfide incontrate durante il percorso, e delineare le prospettive future, con uno sguardo alle possibili evoluzioni del Sound Space Explorer nel contesto della didattica musicale e della ricerca educativa.

5.1 Sintesi del progetto

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di esplorare e proporre un nuovo approccio all'educazione musicale, basato sulla *digitalizzazione* e *aumentazione* delle idee didattiche espresse nel libro *Educazione al suono: 100 esercizi per ascoltare*

¹Per un approfondimento si rimanda alla pagina web dell'autore: <https://giuseppebergamino.github.io/Home/>

e produrre il suono[2] di Raymond Murray Schafer. Il sistema *Sound Space Explorer* rappresenta il cuore di questa proposta, un dispositivo pensato per unire le potenzialità delle tecnologie digitali con principi pedagogici classici e moderni.

Attraverso l'intero percorso, si è cercato di evidenziare come l'uso di tecnologie immersive possa non solo ampliare le possibilità educative, ma anche stimolare una maggiore consapevolezza ecologica e culturale. La sintesi tra tecnologia, pedagogia e *soundscape ecology* costituisce il valore principale di questo progetto.

5.2 Impatto e contributi

Sebbene non sia stato possibile condurre una sperimentazione sul campo durante la stesura di questa tesi, si ritiene che l'approccio proposto rappresenti un passo avanti nell'utilizzo delle tecnologie immersive applicate alla didattica musicale. I principali impatti e contributi del progetto sono qui sintetizzati:

Impatto educativo

- **Innovazione didattica:** L'integrazione del sistema SSE negli esercizi di Schafer offre una nuova modalità di apprendimento, trasformando attività tradizionali in esperienze interattive e coinvolgenti.
- **Accessibilità e inclusività:** La possibilità di personalizzare i percorsi educativi rende il sistema adattabile a diverse età, contesti scolastici e abilità degli studenti.
- **Sensibilizzazione ecologica:** Attraverso la soundscape ecology, il progetto stimola una maggiore consapevolezza dell'ambiente sonoro, promuovendo atteggiamenti sostenibili e una connessione più profonda con la natura.

Contributi tecnologici

- **Realtà aumentata uditiva:** Il design di tecnologia *head-tracking* a basso costo e open-source contribuisce ad ampliare le applicazioni della realtà

aumentata nel settore educativo.

- **Strumenti flessibili:** La progettazione del sistema SSE, sviluppata con software open-source e hardware accessibili, offre un modello replicabile e scalabile per ulteriori sviluppi tecnologici.

Contributi accademici

- **Metodologie sperimentali:** Il framework sperimentale proposto rappresenta una base solida per futuri studi empirici, facilitando la raccolta e l'analisi di dati sull'efficacia delle tecnologie immersive nella didattica.
- **Connessione tra teoria e pratica:** Il progetto unisce i principi pedagogici di Schafer con le moderne esigenze di digitalizzazione.
- **Interdisciplinarità:** L'approccio STEAM adottato collega musica, tecnologia, scienze e arte, favorendo un dialogo interdisciplinare nelle pratiche educative.

Impatto sociale e culturale

- **Valorizzazione del paesaggio sonoro:** Il progetto incoraggia una riflessione critica sul ruolo del suono nella nostra vita quotidiana e sulla necessità di preservare l'ecologia acustica, quindi l'ecosistema.
- **Promozione di un ascolto consapevole:** Le attività proposte favoriscono una relazione più profonda e riflessiva con il suono, arricchendo l'esperienza cognitiva personale.

5.3 Limiti

Questa proposta presenta alcuni limiti che meritano di essere considerati, soprattutto in vista di future implementazioni e sperimentazioni sul campo. Si ritiene che i principali aspetti critici includano:

- **Assenza di dati empirici:** Il presente lavoro di tesi si concentra esclusivamente sulla definizione di un framework teorico e metodologico. Sebbene i protocolli proposti siano replicabili, l'assenza di dati sperimentali limita la possibilità di validare concretamente l'efficacia del sistema SSE.
- **Dipendenza da infrastrutture tecnologiche:** L'utilizzo del sistema SSE richiede una dotazione tecnologica, nel complesso, relativamente costosa e avanzata. Questo potrebbe rappresentare un ostacolo per scuole con risorse economiche e tecnologiche limitate.
- **Complessità per i docenti:** L'introduzione di tecnologie immersive nella didattica implica una formazione specifica per i docenti. La mancanza di familiarità con tali strumenti potrebbe rappresentare una difficoltà iniziale e ridurre l'efficacia delle attività proposte.
- **Adattabilità degli esercizi:** Non tutti gli esercizi di Schafer si prestano facilmente a essere digitalizzati o implementati in un contesto immersivo. Alcuni potrebbero perdere parte della loro efficacia educativa o richiedere adattamenti significativi, alterandone la struttura originaria.
- **Tempi e organizzazione scolastica:** L'integrazione del sistema SSE all'interno dei programmi scolastici potrebbe richiedere tempi di pianificazione e svolgimento non sempre compatibili con la struttura tradizionale delle lezioni, riducendo l'efficacia o l'applicabilità delle attività.
- **Limitazioni nell'analisi comparativa:** Sebbene siano stati proposti protocolli per confrontare l'efficacia degli esercizi svolti con e senza SSE, le variabili contestuali (come età degli studenti, livello scolastico, preparazione dei docenti, ecc.) potrebbero influenzare significativamente i risultati, limitando la possibilità di generalizzare le conclusioni.
- **Sostenibilità tecnologica:** La rapidità con cui le tecnologie evolvono può rendere obsoleti alcuni elementi hardware e software utilizzati nel sistema SSE, richiedendo aggiornamenti costanti per garantirne la funzionalità e l'usabilità.

5.4 Sviluppi futuri

Il progetto *Sound Space Explorer* rappresenta una proposta che, se adeguatamente sviluppata e testata, potrebbe risultare rilevante in diversi contesti scolastici. Tuttavia, è necessario considerare una serie di sviluppi futuri per valorizzare ulteriormente il sistema e il suo potenziale educativo.

- **Sperimentazione sul campo:** La priorità è testare il sistema SSE in contesti scolastici reali di diverso ordine e grado, per valutarne l'efficacia con studenti e docenti. Le sperimentazioni dovrebbero essere condotte in ambienti eterogenei, includendo soprattutto scuole con risorse limitate, per verificare la scalabilità e l'accessibilità del progetto.
- **Adattamenti pedagogici:** Una volta raccolti i primi dati empirici, sarà fondamentale affinare il sistema e i protocolli didattici in base ai feedback ottenuti, seguendo gli approcci metodologici dell'*Action* e *Design Based Research*. Questo potrebbe includere la modifica sia del sistema che di alcuni esercizi di Schafer per adattarli meglio alle esigenze degli studenti e alle specificità dei diversi gradi scolastici.
- **Integrazione interdisciplinare:** Il sistema SSE offre un'opportunità per promuovere un approccio educativo interdisciplinare, in linea con il modello STEAM. L'implementazione futura potrebbe prevedere collaborazioni più strutturate con discipline come scienze, geografia, storia, arte e tecnologia per creare percorsi educativi integrati e multidimensionali.
- **Ampliamento del database di soundscapes:** Per garantire una maggiore varietà e personalizzazione delle esperienze sonore, sarebbe utile sviluppare un database esteso di soundscapes ambisonici, rappresentativi di diversi ambienti naturali, urbani e culturali. Questo potrebbe includere suoni locali o di ecosistemi a grave rischio di estinzione, per sensibilizzare ulteriormente gli studenti all'importanza dell'ecologia acustica.
- **Sviluppo di strumenti di analisi avanzata:** L'introduzione di algoritmi di intelligenza artificiale potrebbe facilitare l'analisi automatica dei dati

raccolti durante gli esercizi, permettendo una valutazione più oggettiva delle performance degli studenti e una personalizzazione delle attività in base alle loro esigenze.

- **Formazione per i docenti:** Per massimizzare l'impatto del sistema SSE, sarà necessario progettare percorsi di formazione specifici per i docenti, al fine di garantire un utilizzo consapevole e competente delle tecnologie immersive. La formazione potrebbe includere workshop pratici e materiali didattici.
- **Sviluppo di applicazioni mobili:** Un possibile sviluppo futuro potrebbe essere la creazione di una versione semplificata del sistema SSE accessibile tramite applicazioni mobili, per aumentare l'accessibilità e permettere l'utilizzo anche in contesti di apprendimento informale.
- **Estensione a contesti non scolastici:** Oltre al contesto educativo formale, il sistema SSE potrebbe essere utilizzato in contesti culturali, artistici e terapeutici, come musei, festival, laboratori artistici e programmi di musicoterapia, ampliando ulteriormente il suo raggio d'azione.
- **Collaborazioni internazionali:** Per ampliare l'impatto del progetto, sarebbe interessante promuovere collaborazioni con istituzioni educative e di ricerca internazionali, per condividere conoscenze, risorse e buone pratiche.

Questi sviluppi non solo rafforzerebbero l'impatto del sistema SSE nell'educazione al suono, ma potrebbero anche contribuire a ridefinire il ruolo delle tecnologie immersive nell'apprendimento, promuovendo un approccio educativo più inclusivo, sostenibile e orientato al futuro.

Bibliografia

- [1] Ministero dell’Istruzione dell’Università e della Ricerca. Indicazioni nazionali per il curricolo della scuola dell’infanzia e del primo ciclo d’istruzione, 2012.
- [2] Raymond Murray Schafer. *L’educazione al suono: 100 Esercizi per ascoltare e produrre il suono*. Ricordi, Milano, 1998.
- [3] United Nations. Agenda 2030 for sustainable development, 2015.
- [4] Ministero dell’Istruzione dell’Università e della Ricerca. Indicazioni nazionali per il curricolo della scuola dell’infanzia e del primo ciclo d’istruzione, 2018.
- [5] Marjan Laal and Peyman Salamati. Lifelong learning; why do we need it? *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 31:399–403, 2012.
- [6] Mike Rawson. Learning to learn: more than a skill set. *Studies in Higher Education*, 25(2):225–238, 2000.
- [7] Unione Europea. Quadro europeo delle qualificazioni, 2017.
- [8] Parlamento Europeo e Consiglio dell’Unione Europea. Raccomandazione del parlamento europeo e del consiglio del 23 aprile 2008 sulla costituzione del quadro europeo delle qualifiche per l’apprendimento permanente, 2008.
- [9] R. Murray Schafer. *The Tuning of the World*. Knopf, New York, 1977. Capitolo 4, p. 52.
- [10] David J Hargreaves. Musical imagination: Perception and production, beauty and creativity. *Psychology of music*, 40(5):539–557, 2012.

- [11] Presidenza della Repubblica. Decreto del presidente della repubblica 15 marzo 2010, n. 89. regolamento recante revisione dell'assetto ordinamentale, organizzativo e didattico dei licei, 2010. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 137 del 15 giugno 2010.
- [12] Ministero dell'Istruzione dell'Università della Ricerca. Decreto ministeriale 7 ottobre 2010, n. 211. schema di regolamento recante indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento per i licei, 2010. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 137 del 15 giugno 2010.
- [13] Patricia Greenfield. Technology and informal education: What is taught, what is learned. *Science (New York, N.Y.)*, 323:69–71, 02 2009.
- [14] Ministero dell'Istruzione dell'Università della Ricerca. Educazione ambientale e alla sostenibilità, 2021.
- [15] Giuliana Gnoni. Musica e sostenibilità: un percorso a partire da agenda 2030. *Eunomia. Rivista di Studi su Pace e Diritti Umani*, 13(1):213–228, 2024.
- [16] Bernie Krause. *The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places*. Little, Brown and Company, New York, 2012.
- [17] Barry Truax. Soundscape ecology: The use of sound in ecological research and education. *The Journal of Sound and Vibration*, 241:189–195, 2001.
- [18] Michael Frank Southworth. *The sonic environment of cities*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1967.
- [19] R.M. Schafer. *The Thinking Ear: Complete Writings on Music Education*. Arcana Editions, 1986.
- [20] Almo Farina. Soundscape and landscape ecology. *Soundscape ecology: Principles, patterns, methods and applications*, pages 1–28, 2014.
- [21] Institute for Arts Integration and STEAM. What is steam education in k-12 schools?, 2021.

- [22] S. Mahadevan et al. Earsketch: An innovative approach to teaching computer programming through music. *Computer Science Education*, 25:1–25, 2015.
- [23] B. Morton et al. Integrating music and engineering: A steam approach for secondary school students. *International Journal of Music Education*, 35(3):417–431, 2017.
- [24] Ministero dell’Istruzione dell’Università e della Ricerca. Piano nazionale scuola digitale, 2015.
- [25] Chenyan Zhang. The why, what, and how of immersive experience. *Ieee Access*, 8:90878–90888, 2020.
- [26] Péter Tamás Kovács, Niall Murray, Gregor Rozinaj, Yevgeniya Sulema, and Renata Rybárová. Application of immersive technologies for education: State of the art. In *2015 International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL)*, pages 283–288. IEEE, 2015.
- [27] Paul Milgram and Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, E77-D(12):1321–1329, 1994.
- [28] Fabio Arena, Mario Collotta, Giovanni Pau, and Francesco Termine. An overview of augmented reality. *Computers*, 11(2), 2022.
- [29] Jerri Lynn Hogg. Cognitive design considerations for augmented reality. In *EEE International Conference on e-Learning, e-Business, Enterprise Information Systems, and e-Government, Las Vegas, NV*, 2012.
- [30] Mark Billinghurst, Adrian Clark, Gun Lee, et al. A survey of augmented reality. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 8(2-3):73–272, 2015.

- [31] Lucio Tommaso De Paolis, Cecilia Gatto, Luigi Corthia, et al. Usability, user experience and mental workload in a mobile augmented reality application for digital storytelling in cultural heritage. *Virtual Reality*, 27:1117–1143, 2023.
- [32] Abhraneil Dam, Arsh Siddiqui, Charles Leclercq, and Myounghoon Jeon. Taxonomy and definition of audio augmented reality (aar): A grounded theory study. *International Journal of Human-Computer Studies*, 182:103179, 2024.
- [33] Henrik Møller. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36(3/4):171–218, 1992.
- [34] Richard Elen. Ambisonics: The surround alternative. In *Proceedings of the 3rd Annual Surround Conference and Technology Showcase*, pages 1–4, 2001.
- [35] Axel Plinge, Sebastian Schlecht, Oliver Thiergart, Tim Robotham, Olli Rummukainen, and Emanuel A. P. Habets. Six-degrees-of-freedom binaural audio reproduction of first-order ambisonics with distance information. In *Proceedings of the Audio Engineering Society Conference: 2018 AES International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality*, Redmond, WA, USA, 2018.
- [36] Yashar Deldjoo and Reza Ebrahimi Atani. A low-cost infrared-optical head tracking solution for virtual 3d audio environment using the nintendo wii-remote. *Entertainment Computing*, 12, 01 2016.
- [37] Ravish Mehra, Lakulish Antani, Sujeong Kim, and Dinesh Manocha. Source and listener directivity for interactive wave-based sound propagation. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 20(4):495–503, 2014.
- [38] Mathieu Falbriard, Frédéric Meyer, Benoît Mariani, Grégoire P Millet, and Kamiar Aminian. Drift-free foot orientation estimation in running using wearable imu. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8:65, 2020.

- [39] Schörkhuber Christian and Höldrich Robert. Linearly and quadratically constrained least-squares decoder for signal-dependent binaural rendering of ambisonic signals. *Journal of the Audio Engineering Society*, 22(22), march 2019.
- [40] Mark Weiser. Ubiquitous computing. In *ACM Conference on Computer Science*, volume 418, pages 197530–197680, 1994.
- [41] Mark Weiser and John Seely Brown. Designing calm technology. *Xerox PARC*, December 1995. Accessed: January 22, 2025.
- [42] Kevin Ashton et al. That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, 22(7):97–114, 2009.
- [43] Luca Turchet, Carlo Fischione, Georg Essl, Damián Keller, and Mathieu Barthet. Internet of musical things: Vision and challenges. *Ieee access*, 6:61994–62017, 2018.
- [44] Pierre Schaeffer. *La musique concrète*. PUF, 2020.
- [45] Curtis Roads. *Microsounds*. MIT Press, Cambridge, 2001.
- [46] Lieve Thibaut, Stijn Ceuppens, Haydée De Loof, Jolien De Meester, Leen Goovaerts, Annemie Struyf, Jelle Boeve-de Pauw, Wim Dehaene, Johan Deprez, Mieke De Cock, et al. Integrated stem education: A systematic review of instructional practices in secondary education. *European Journal of STEM Education*, 3(1):2, 2018.
- [47] John Dewey. Experience and education. In *The educational forum*, volume 50, 3, pages 241–252. Taylor & Francis, 1986.
- [48] Jerome S Bruner. The act of discovery. *Harvard educational review*, 1961.
- [49] Lev Semenovič Vygotskij. *Psicologia pedagogica: manuale di psicologia applicata all'insegnamento e all'educazione*. Edizioni Erickson, 2006.

- [50] Feng Wang and Michael J Hannafin. Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational technology research and development*, 53(4):5–23, 2005.
- [51] Urban Fraefel. Professionalization of pre-service teachers through university-school partnerships. In *Conference Proceedings of WERA Focal Meeting, Edinburgh*, 2014.
- [52] Stephen Kemmis, Robin McTaggart, Rhonda Nixon, Stephen Kemmis, Robin McTaggart, and Rhonda Nixon. Introducing critical participatory action research. *The action research planner: Doing critical participatory action research*, pages 1–31, 2014.
- [53] S Kemmis. The action research planner: Doing critical participatory action research, 2014.
- [54] Interaction Design Foundation. What is action research?, 2016.
- [55] Gary Charness, Uri Gneezy, and Michael A Kuhn. Experimental methods: Between-subject and within-subject design. *Journal of economic behavior & organization*, 81(1):1–8, 2012.
- [56] John Brooke et al. Sus-a quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194):4–7, 1996.
- [57] Ankur Joshi, Saket Kale, Satish Chandel, and D Kumar Pal. Likert scale: Explored and explained. *British journal of applied science & technology*, 7(4):396–403, 2015.
- [58] Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. Determining what individual sus scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies*, 4(3):114–123, 2009.
- [59] Prokopia Vlachogianni and Nikolaos Tselios. Perceived usability evaluation of educational technology using the system usability scale (sus): A systematic review. *Journal of Research on Technology in Education*, 54(3):392–409, 2022.

- [60] Jonathan Lazar, Jinjuan Heidi Feng, and Harry Hochheiser. *Research methods in human-computer interaction*. Morgan Kaufmann, 2017.

Elenco delle figure

1	Il Continuum tra ambiente reale e ambiente virtuale. Tratto da Milgram e Kishino (1994) [27]	22
2	Rappresentazione grafica delle coordinate spaziali di Azimuth, Elevazione e Distanza. Tratto da <i>Audiology - A Curriculum for Excellence</i> (Scottish Sensory Centre): https://www.ssc.education.ed.ac.uk/courses/deaf/dnov10i.html	25
3	Dummy-head prodotta dall'azienda Neumann, modello KU100. Tratto dal sito ufficiale https://en-de.neumann.com/ku-100	26
4	Schema semplificato di un Head-Dynamic Binaural Synthesis System con riproduzione in cuffia. Tratto da Deldjoo et al. (2016)[36]	29
5	Range di valori acquisibili dai sensori in funzione della risoluzione. Tratto dal sito ufficiale InvenSense https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-9250-datasheet/	33
6	Finestra di letture di Yaw, Pitch e Roll nelle inclinazioni [0,0,0]. Il sensore è fermo e il rumore non eccede 5 gradi di escursione, visualizzati sull'asse y. L'asse x riporta il tempo in forma di numero di campioni graficati. Immagine dell'autore.	36
7	Letture ottenute tentando di muovere la testa solo da sinistra a destra e viceversa (yaw). Il movimento è stato eseguito a varie velocità, con una escursione di circa 200 gradi, tra [-100°, +100°].	36
8	Letture ottenute tentando di muovere la testa solo dal basso verso l'alto e viceversa (pitch). Il movimento è stato eseguito a varie velocità, con un'escursione di circa 140 gradi, tra [-90°, +50°].	37

9	Letture ottenute tentando di muovere la testa verso le spalle (roll). Il movimento è stato eseguito a varie velocità, con un'escursione di circa 160 gradi, tra [-80°, +80°].	37
10	Schema di organizzazione e funzione dei pin presenti sulla board Lolin32. Tratto da https://docs.platformio.org/en/stable/boards/espressif32/lolin32_lite.html	39
11	Indirizzo MAC evidenziato nel rettangolo rosso.	42
12	Schema riassuntivo della logica di trasmissione del network.	44
13	Schermata del plug-in <i>StereoEncoder</i> della suite IEM.	48
14	Schermata per il routing del singolo canale al gruppo di missaggio. .	49
15	Schermata per il routing del gruppo inviato a un send relativo a ogni fruitore.	49
16	Schermata del plug-in <i>SceneRotator</i>	50
17	Schermata del plug-in <i>BinauralDecoder</i>	50
18	Lo schema a blocchi rappresenta il flusso dati e l'integrazione hardware del sistema MISMO. Allo stato di sviluppo attuale l'uscita audio stereo rimane inutilizzata.	55
19	Rendering del box stampato in 3D.	56
20	Schema a blocchi del sistema IoMT basato su quattro unità MISMO e un nodo centrale.	62
21	Rappresentazione grafica del processo iterativo alla base del DBR. Tratto da Fraefel (2014, p. 9)[51].	86
22	Rappresentazione grafica del processo ciclico alla base dell'Action Research[54]. Tratto da Interaction Design Foundation: https://www.interaction-design.org/literature/topics/action-research	88
23	Immagine di confronto tra un design sperimentale con approccio tra gruppi o all'interno del gruppo. Tratto da Scribbr https://www.scribbr.com/methodology/between-subjects-design/	89

Appendice A

Tabella di analisi dei 100 Esercizi

Gli esercizi proposti da R. Murray Schafer in *Educazione al suono: 100 esercizi per ascoltare e produrre il suono*[2] rappresentano un'ampia gamma di attività finalizzate allo sviluppo dell'ascolto critico, della creatività sonora e della consapevolezza ambientale. La seguente tabella fornisce un'analisi sintetica e organizzata di ciascun esercizio, indicando il tema principale, una breve descrizione, la categoria didattica di riferimento e una valutazione preliminare sull'adattabilità degli esercizi al sistema *Sound Space Explorer* (SSE).

La colonna **Adattabilità SSE** utilizza la seguente scala di valutazione:

- **Alta:** L'esercizio è altamente compatibile con le funzionalità del sistema SSE e si presta facilmente a un'esperienza immersiva e interattiva.
- **Media:** L'esercizio può essere adattato al sistema SSE con alcune modifiche o con un livello medio di integrazione tecnologica.
- **Bassa:** L'esercizio presenta difficoltà significative nell'adattamento al sistema SSE o richiede un intervento strutturale importante.
- **N/A:** L'esercizio non è applicabile al sistema SSE per natura o obiettivi.

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
1	Elenco sonoro	Annotare tutti i suoni percepiti in un ambiente, riconoscendo che l'ascolto è un'esperienza personale.	Percezione sonora	Alta – Ideale per esplorare soundscapes differenti nel SSE.
2	Classificazione suoni	Dividere i suoni in categorie (geofonie, biofonie e antrofonie) e identificarne le caratteristiche.	Percezione sonora	Alta – Adattabile con soundscapes interattivi per allenare l'ascolto.
3	Rappresentazione visiva dei suoni	Disporre i suoni su una pagina secondo parametri come dinamica o distanza.	Percezione sonora	Media – Parzialmente adattabile, ma richiede strumenti esterni per visualizzazione.
4	Suoni in movimento	Identificare suoni fissi, mobili o che si muovono con l'ascoltatore.	Percezione sonora	Alta – Perfetto per dimostrare la spazialità nel SSE.
5	Localizzazione suoni mobili	Seguire suoni mobili con gli occhi chiusi, distinguendo diversi tipi di suoni.	Percezione sonora	Alta – Adattabile con head-tracking e soundscapes dinamici.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
6	Ascolto in strada	Esplorare il soundscape di un angolo di strada, notando suoni distanti e vicini.	Percezione sonora	Media – Richiede aggiunta di soundscapes urbani.
7	Conteggio suoni specifici	Contare quante volte un determinato suono (es. clacson) si verifica in un periodo di tempo.	Percezione sonora	Media – Adattabile con soundscapes preimpostati per analisi.
8	Concentrazione su suoni specifici	Ascoltare e identificare suoni particolari, come freni o cani che abbaiano.	Percezione sonora	Media – Utile per focalizzare l'attenzione, ma richiede soundscapes specifici.
9	Passi e calzature	Analizzare il suono dei passi e delle calzature in un ambiente chiuso.	Percezione sonora	Bassa – Richiede un contesto fisico o soundscapes molto dettagliati.
10	Controllo del tono	Individuare un suono continuo e mantenerlo durante un cammino, osservando variazioni tonali.	Produzione sonora	N/A – Inutile da implementare in SSE.
11	Ascolto nei negozi	Identificare ambienti con l'atmosfera sonora più tranquilla o caratteristica.	Percezione sonora	Bassa – Simulabile parzialmente con soundscapes specifici.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
12	Scale e suoni	Confrontare i suoni di persone che salgono e scendono le scale, notando differenze di volume e intensità.	Percezione sonora	Bassa – Adattabile con soundscapes specifici per scale.
13	Passeggiata d'ascolto	Camminare in fila ascoltando attentamente i suoni circostanti.	Percezione sonora	Media – Applicabile nel SSE, ma richiede simulazione del movimento.
14	Diario sonoro	Annotare quotidianamente suoni significativi o reazioni all'ambiente acustico.	Percezione sonora	N/A – Completamente soggettivo, non implementabile.
15	Domande flash sul diario	Rispondere a domande rapide sul diario sonoro, come il suono più forte o più bello della giornata.	Percezione sonora	N/A – non adatto al SSE.
16	Esperienza sonora memorabile	Scrivere un breve saggio su un ricordo sonoro significativo della propria vita.	Percezione sonora	N/A – Soggettivo.
17	Moratoria sul parlato	Rimanere in silenzio per un determinato periodo di tempo per migliorare l'ascolto.	Percezione sonora	N/A – Insensato per SSE.
18	Riconoscere le persone dai suoni	Identificare persone in base ai suoni che producono, come passi o movimenti.	Percezione sonora	N/A – Ha senso in contesti reali e non immersivi.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
19	Suoni personali	Riconoscere il proprio mazzo di chiavi ascoltandolo con gli occhi chiusi.	Percezione sonora	Bassa – Non implementabile agilmente.
20	Categorie sonore sociali	Creare liste di suoni tipici di diverse categorie sociali, come uomini e donne.	Suoni e contesto sociale	Bassa – Parzialmente adattabile per analisi sociale nei soundscapes.
21	Suoni nei quattro punti cardinali	Rimanere fermi in un parco finché non si percepiscono suoni provenienti da ciascun punto cardinale.	Percezione sonora	Alta – Eccellente per l'esplo-razione spaziale nei soundscapes del SSE.
22	Descrizione di ambienti sconosciuti	Ascoltare un ambiente sconosciuto con gli occhi bendati e descriverlo usando indizi sonori.	Percezione sonora	Alta – Ottimo per esercizi di immersione e percezione spaziale.
23	Navigazione sonora di persone cieche	Invitare una persona cieca a descrivere come si muove utilizzando indizi acustici.	Suoni e contesto sociale	Media – Interessante per inclusione sociale, ma dipende dalla presenza fisica.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
24	Suoni nascosti	Fare una lista di suoni che provengono da oggetti o luoghi non visibili.	Percezione sonora	Media – Richiede maggiore attenzione nel design dei soundscapes.
25	Suoni corporei	Rimanere immobili e ascoltare i suoni interni del proprio corpo.	Percezione sonora	N/A – Non ha senso simulare in un sistema digitale.
26	Contraddizioni sonore-visive	Identificare suoni attraenti che provengono da oggetti visivamente sgradevoli.	Percezione sonora	Bassa – Può essere adattato con aggiunta di video immersivi.
27	Contraddizioni visive-sonore	Identificare suoni sgradevoli che provengono da oggetti visivamente attraenti.	Percezione sonora	Bassa – Adattabile con scenari simulati visivi e sonori.
28	Suoni a lunga distanza	Elencare suoni che si possono sentire a grandi distanze rispetto alla loro fonte visibile.	Percezione sonora	Alta – Utilizzabile nei soundscapes del SSE per dimostrare profondità spaziale.
29	Contrasti sonori immaginari	Elencare esempi di oggetti che producono suoni contrastanti rispetto al loro aspetto.	Creatività	Media – Interessante per l'analisi di percezione sonora.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
30	Imitare suoni con la voce	Usare la voce per imitare suoni di una pala che scava in diversi materiali.	Produzione sonora	Bassa – Può essere integrato con feedback sonori interattivi nel SSE.
31	Differenza tra immaginazione e realtà	Immaginare e poi ascoltare il suono reale di un foglio di carta accartocciato.	Percezione sonora	N/A – Non ha senso simularla.
32	Complessità sonora di un'azione	Analizzare i suoni generati da un'azione complessa, come lanciare una palla di carta.	Percezione sonora	Bassa – Interessante ma richiede soundscapes dettagliati.
33	Suoni di ambienti specifici	Creare una lista dei suoni tipici di ambienti come uffici, cucine o parchi.	Creatività	Alta – Può essere usato per costruire soundscapes didattici.
34	Immaginare suoni	Visualizzare suoni evocati dalla mente, come il crepitio di un fuoco o il suono di una cascata.	Creatività	Bassa – Stimola la creatività, ma la simulazione è limitata.
35	Sogni acustici	Discutere di sogni o ricordi in cui i suoni hanno avuto un ruolo predominante.	Creatività	N/A – Soggettivo, non implementabile nel SSE.
36	Portare un suono interessante	Assegnare ai partecipanti di portare un suono ritenuto interessante per condividerlo con il gruppo.	Produzione sonora	Media – Richiede input esterni, ma adattabile.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
37	Suoni di specifiche qualità	Trovare suoni che rappresentano concetti come <i>tintinnio</i> o <i>gorgoglio</i> .	Produzione sonora	Alta – Può essere integrato per esplorare timbri sonori.
38	Parole onomatopeiche	Creare parole che imitano i suoni, come “splash” o “scricchiolio”.	Creatività	Media – Interessante per giochi interattivi nel SSE.
39	Suoni complessi	Cercare suoni che combinano caratteristiche specifiche, come un rumore che termina con un eco.	Produzione sonora	Alta – Ideale per analisi e creazione di soundscapes dettagliati.
40	Disegnare il suono	Creare rappresentazioni visive di suoni immaginati o reali.	Creatività	Media – Parzialmente adattabile per analisi multidisciplinari.
41	Colori dei suoni	Discutere quali colori possono essere associati a diversi suoni e perché.	Creatività	Media – Interessante per esercizi multidiplinari.
42	Suoni e forme	Associare suoni a forme e texture, come rotondo, triangolare, ecc.	Creatività	Media – Può stimolare la creatività degli studenti.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
43	Imitazioni vocali di ambienti	Usare la voce per imitare un ambiente sonoro conosciuto, urbano o naturale.	Produzione sonora	Alta – Ottimo per esercizi di interazione nei soundscapes del SSE.
44	Critica delle imitazioni	Analizzare e migliorare le imitazioni vocali di ambienti sonori create dal gruppo.	Produzione sonora	Alta – Adattabile per migliorare la comprensione della percezione sonora.
45	Trasmissione di suoni imitati	Insegnare e trasmettere un'imitazione sonora a un altro gruppo.	Produzione sonora	Alta – Esercizio utile per comprendere la trasmissione dei soundscapes.
46	Onomatopee inventate	Inventare parole con qualità onomatopeiche per descrivere suoni comuni.	Creatività	N/A – Interessante per la creatività ma non rilevante per il SSE.
47	Parole per suoni d'acqua	Creare parole onomatopeiche per rappresentare vari stadi dell'acqua (es. pioggia, fiume, cascata).	Creatività	Media – Utile per esplorare la varietà sonora nei soundscapes acquatici.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
48	Onomatopee degli animali	Elencare le onomatopee animali in diverse lingue e discuterne le differenze.	Suoni e contesto sociale	Media – Adattabile per esplorare variazioni culturali nei soundscapes.
49	Direzioni sonore vocali	Usare la voce per dare indicazioni o comandare azioni senza parole.	Produzione sonora	Alta – Ideale per esercizi interattivi nel SSE.
50	Nomi cantati	Creare melodie o modi unici di pronunciare il proprio nome.	Produzione sonora	N/A – Adattabile per esplorare l'espressione vocale, ma non centrale nel SSE.
51	Ripetizioni di nomi	Ripetere nomi in diversi stili (cantato, sussurrato, ecc.) per esplorare la modulazione vocale.	Produzione sonora	N/A – Interessante per variare il timbro, ma limitato nella simulazione SSE.
52	Risata personale	Ascoltare e analizzare la propria risata spontanea, esplorandone l'unicità.	Produzione sonora	N/A – Non applicabile al sistema SSE.
53	Animali e gruppi vocali	Ogni gruppo imita un animale con suoni vocali e cerca i membri del proprio gruppo.	Produzione sonora	N/A – Utile per esercizi di interazione sociale, ma poco rilevante per SSE.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
54	Conversazioni senza senso	Creare conversazioni in lingue inventate per esplorare la modulazione vocale.	Produzione sonora	N/A – Coinvolgente ma poco applicabile al SSE.
55	Interpretazioni vocali di oggetti	Usare la voce per rappresentare oggetti o concetti (es. fiore, macchina, sirena).	Produzione sonora	Bassa – Utile per esercizi di percezione creativa, ma con limitazioni nel SSE.
56	Imitazioni sonore con la voce	Usare la voce per imitare oggetti o suoni specifici (es. sveglia, giocattolo meccanico).	Produzione sonora	Alta – Ottimo per esplorare la varietà timbrica nei soundscapes.
57	Sincronizzazione vocale	Tentare di imitare perfettamente il timbro e l'intonazione della voce di un'altra persona.	Produzione sonora	N/A – Non applicabile al sistema SSE.
58	Suoni impossibili da imitare	Scoprire suoni semplici, come un battito di mani, che risultano difficili da imitare.	Produzione sonora	Bassa – Interessante per analisi percettive, ma limitato nel SSE.
59	Scambio di suoni	Ogni partecipante crea un suono e lo scambia con un altro partecipante.	Produzione sonora	Media – Utile per attività collaborative, necessità della registrazione.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
60	Raccontare storie sonore	Creare storie usando solo suoni e rumori vocali o corporei.	Produzione sonora	Media – Perfetto per integrare esercizi immersivi e narrativi nei soundscapes SSE.
61	Parola ripetuta	Ripetere una parola come "animale" più volte per percepirla il cambiamento sonoro.	Creatività	Bassa – Utile per percepire il cambiamento del suono ma non direttamente integrabile.
62	Illusioni sonore	Discutere suoni che sembrano provenire da luoghi sconosciuti o che contengono significati nascosti.	Creatività	Media – Interessante per sviluppare la percezione del suono nei soundscapes.
63	Paradossi sonori	Esplorare esempi di suoni che non corrispondono alle aspettative (es. una borsa di grano che produce un suono diverso da quello dei singoli chicchi).	Creatività	Bassa – Poco applicabile direttamente al sistema SSE.
64	Problemi di Aristotele	Testare fenomeni sonori descritti da Aristotele, come perché i suoni sono più udibili di notte.	Suoni e contesto sociale	Alta – Interessante per un'analisi scientifica STEAM.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
65	Echi e riverberi	Esplorare ambienti con eco o riverbero particolari, come cupole o scale.	Suoni e contesto sociale	Media – Adattabile per simulare ambienti acustici nel SSE.
66	Registrazione di suoni specifici	Registrare suoni chiari e specifici, come una campana o un treno.	Produzione sonora	Alta – Utile per integrare esempi sonori reali nel SSE.
67	Suoni in via di estinzione	Registrare suoni rari o in via di scomparsa per preservarli.	Produzione sonora	Alta – Utile per sensibilizzare gli studenti ma richiede strumenti avanzati.
68	Morfologia sonora	Registrare variazioni di un tipo di suono, come diversi tipi di porte che si chiudono.	Produzione sonora	Alta – Utile per studiare la varietà timbrica nei soundscapes.
69	Effetti dell'ambiente sul suono	Registrare la stessa voce o passo in diversi ambienti per confrontarne gli effetti.	Produzione sonora	Media – Interessante per esplorare l'integrazione tra suoni e spazio nel SSE.
70	Cosa significa il silenzio?	Esplorare il significato di "silenzio" attraverso risposte personali.	Suoni e contesto sociale	N/A – Stimolante per discussioni riflessive ma non integrabile.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
71	Movimento silenzioso	Alzarsi e sedersi senza fare rumore, analizzando i suoni involontari.	Produzione sonora	N/A – Interessante per esercizi di concentrazione ma inutile nel SSE.
72	Muovere oggetti senza rumore	Spostare una sedia fuori dalla stanza e riportarla senza fare alcun suono.	Produzione sonora	N/A – Stimolante ma non sensato per SSE.
73	Passaggio silenzioso di un foglio	Passare un foglio tra i partecipanti senza produrre rumore.	Produzione sonora	N/A – Utile per esercizi di attenzione sonora ma non rilevante nell'SSE.
74	Suoni con un foglio di carta	Creare vari suoni con un foglio di carta, come piegarlo o agitarlo.	Produzione sonora	Bassa – Adattabile per esplorare la varietà timbrica nel SSE.
75	Memoria uditiva dei nomi	Memorizzare e identificare voci o nomi dei partecipanti.	Produzione sonora	Bassa – Interessante ma poco applicabile ai soundscapes SSE.
76	Memoria di parole o ritmi	Ripetere parole o ritmi dopo intervalli di tempo variabili.	Produzione sonora	Bassa – Utile per esercizi di memoria ma non centrale nel SSE.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
77	Memoria del tono	Cantare o riprodurre un tono dato a distanza di tempo.	Produzione sonora	Bassa – Interessante per sviluppare la memoria sonora ma poco rilevante nel SSE.
78	Suoni del passato	Elencare suoni della propria giovinezza che non si sentono più.	Suoni e contesto sociale	Alta – Perfetto per creare un archivio storico sonoro nel SSE.
79	Interviste sugli ambienti sonori passati	Parlare con persone anziane dei suoni che ricordano del passato.	Suoni e contesto sociale	Alta – Utile per sensibilizzare gli studenti alla memoria storica sonora.
80	Documenti sonori nella letteratura o arte	Esplorare romanzi, dipinti o fotografie per identificare riferimenti sonori.	Suoni e contesto sociale	Media – Interessante per l'integrazione interdisciplinare ma non centrale nel SSE.
81	Primi ricordi sonori	Scrivere un breve saggio sui primi suoni ricordati dall'infanzia.	Suoni e contesto sociale	Alta – Utile per esplorare le connessioni personali con i soundscapes.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
82	Nuovi suoni nel soundscape	Elencare nuovi suoni entrati nella soundscape negli ultimi anni.	Suoni e contesto sociale	Alta – Rilevante per analisi contemporanee ed ecologiche.
83	Ecologia acustica e inquinamento	Esaminare l'impatto dell'inquinamento acustico sull'ambiente.	Suoni e contesto sociale	Alta – Adattabile per sensibilizzare sulle problematiche del rumore.
84	Sondaggi sociali sul rumore	Condurre indagini sociali sull'inquinamento acustico percepito.	Suoni e contesto sociale	Alta – Utile per contesti educativi estesi.
85	Creazione di leggi contro il rumore	Disegnare proposte di leggi sul controllo del rumore.	Suoni e contesto sociale	Alta – Utile per educazione civica.
86	Verifica delle percezioni sonore	Confrontare i dati raccolti con le percezioni dei partecipanti.	Suoni e contesto sociale	Media – Utile per analisi didattiche .
87	Identificazione dei soundmark	Identificare i suoni distintivi di una comunità e il loro significato.	Suoni e contesto sociale	Alta – Perfetto per esplorare e preservare identità sonore.
88	Creazione di un soundscape personale	Aggiungere suoni che migliorano l'ambiente domestico.	Creatività	Alta – Utile per personalizzare esperienze sonore nel SSE.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
89	Eliminazione di suoni indesiderati	Rimuovere suoni sgradevoli dall'ambiente domestico.	Creatività	Alta – Interessante per l'ecologia sonora.
90	Suoni personali positivi	Integrare suoni portabili che migliorano il benessere.	Creatività	Media – Utile ma limitato nel contesto dei soundscapes SSE.
91	Eliminazione di suoni personali negativi	Rimuovere suoni personali che disturbano gli altri.	Creatività	Bassa – Rilevante per riflessioni personali.
92	Analisi acustica di un parco	Esplorare un parco e analizzarne le attrazioni acustiche.	Suoni e contesto sociale	Alta – Adattabile per esperienze immersive di esplorazione nel SSE.
93	Varietà acustica in un parco	Valutare la diversità di ambienti sonori in un grande parco.	Suoni e contesto sociale	Alta – Perfetto per simulare ambienti diversificati nel SSE.
94	Sculture sonore nel parco	Progettare sculture sonore o giochi musicali per un parco.	Creatività	Alta – Ideale per attività creative e interattive nel SSE.
95	Progettazione di un parco	Creare un parco con caratteristiche sonore uniche e attrattive.	Creatività	Alta – Utile per esercizi creativi e interdisciplinari nel SSE.
Continua nella prossima pagina...				

Nr.	Argomento	Descrizione	Categoria	Adattabilità SSE
96	Riprogettazione di una strada	Ripensare una strada per migliorare la soundscape locale.	Creatività	Alta – Utile per esercizi creativi e interdisciplinari nel SSE.
97	Regolazione dei suoni nel tempo	Progettare un calendario per i suoni comunitari.	Suoni e contesto sociale	Media – Stimolante per riflessioni sociali.
98	Caccia al tesoro sonora	Creare una caccia al tesoro basata su suoni specifici.	Creatività	Alta – Perfetta per coinvolgere i partecipanti in esperienze interattive.
99	Camminata sonora	Creare un percorso basato su suoni che guidano i partecipanti.	Suoni e contesto sociale	Alta – Ideale per esperienze immersive e narrative nel SSE.
100	Sound mobile	Identificare e raccogliere suoni mobili in un'area urbana.	Suoni e contesto sociale	Alta – Adattabile per simulazioni interattive nei soundscapes SSE.

Appendice B

Tabelle per la didattica

Esercizio A La seguente tabella è un template che gli alunni dovranno compilare durante lo svolgimento del primo esercizio proposto (esercizio di Schafer numero 2). Essa permette di categorizzare i suoni percepiti secondo la loro origine (natura, uomo, tecnologia), la ripetitività (continuo, ripetitivo, unico) e fornisce ulteriori parametri di valutazione come volume (presenza sonora) e distanza. Gli alunni devono annotare ogni suono ascoltato e compilarlo seguendo le indicazioni del docente.

Esercizio A	Nome:	Cognome:	Classe:	Data:
Suono percepito	Origine N: Naturale U: Umana T: Tecnologica	Ripetizioni C: Continuo R: Ripetitivo U: Unico	Volume da 1: Molto basso a 5: Molto alto	Distanza da 1: Molto vicino a 5: Molto lontano
Esempio: cinguettio uccelli	N	C	3	2
Continua nella prossima pagina...				

Esercizio B La seguente tabella è un template che gli alunni dovranno compilare durante lo svolgimento del secondo esercizio proposto (esercizio di Schafer numero 4). Questo esercizio permette di identificare i suoni che circondano l'ascoltatore e di classificare il loro grado di movimento. Inoltre, il template include due colonne aggiuntive per indicare la provenienza sonora: orizzontale (destra, sinistra, avanti, dietro) e verticale (alto, basso). Gli alunni devono annotare ogni suono percepito e compilarlo seguendo le istruzioni fornite dal docente.

Esercizio B	Nome:	Cognome:	Classe:	Data:
Suono percepito	Movimento: Fermo Mosso Veloce	Provenienza A: Destra Sinistra Avanti Dietro	Provenienza B: Alto Medio Bass	Note aggiuntive
<i>Esempio: pioggia</i>	Fermo	Avanti	Alto	Cade sulla lamiera
<i>Esempio: bicicletta che passa</i>	Mosso	Dietro	Medio	Mi piace andare in bici
Continua nella prossima pagina...				

Appendice C

Questionari System Usability Scale

Questionario alunni - Istruzioni per la compilazione:

Questo questionario ha l'obiettivo di raccogliere il tuo parere sull'esperienza svolta durante gli esercizi. Leggi attentamente ogni frase e indica quanto ti senti d'accordo con quello che c'è scritto, selezionando una risposta nella colonna corrispondente. Utilizza la scala seguente:

- **1** = Fortemente in disaccordo
- **2** = In disaccordo
- **3** = Neutro
- **4** = D'accordo
- **5** = Fortemente d'accordo

Rispondi in modo sincero. Non ci sono risposte giuste o sbagliate.

Domande	1	2	3	4	5
1. Ho trovato facile seguire gli esercizi proposti.					
2. Gli esercizi erano interessanti e coinvolgenti.					

3. Ho avuto difficoltà a capire cosa dovevo fare.					
4. Gli esercizi mi hanno aiutato a riflettere sui suoni in modo nuovo.					
5. Mi sono sentito immerso nell'attività.					
6. Ho trovato difficile mantenere l'attenzione durante gli esercizi.					
7. Gli esercizi mi hanno dato una nuova prospettiva sull'importanza del suono.					
8. Mi sono divertito/a mentre svolgevo gli esercizi.					
9. Le istruzioni erano chiare e facili da seguire.					
10. Raccomanderei questi esercizi ai miei compagni.					

Calcolo del punteggio:

1. Sommare i punteggi delle risposte alle domande dispari (1, 3, 5, 7, 9), sottraendo 1 da ciascun valore selezionato.
2. Per le domande pari (2, 4, 6, 8, 10), sottrarre ciascun valore da 5 e sommare i risultati.
3. Moltiplicare la somma totale per 2,5 per ottenere un punteggio finale compreso tra 0 e 100.

Interpretazione del punteggio:

Un punteggio più alto indica un maggiore grado di soddisfazione e coinvolgimento percepito durante gli esercizi.

Questionario docenti - Istruzioni per la compilazione:

Questo questionario ha l'obiettivo di raccogliere il tuo parere sull'esperienza didattica durante gli esercizi proposti. Leggi attentamente ogni affermazione e indica il grado in cui sei d'accordo con essa, selezionando una risposta nella colonna corrispondente. Utilizza la scala seguente:

- 1 = Fortemente in disaccordo

- **2** = In disaccordo
- **3** = Neutro
- **4** = D'accordo
- **5** = Fortemente d'accordo

Rispondi in modo sincero. Non ci sono risposte giuste o sbagliate.

Domande	1	2	3	4	5
1. Gli esercizi proposti erano coerenti con gli obiettivi didattici prefissati.					
2. Ho trovato facile gestire gli esercizi in classe.					
3. Gli studenti hanno mostrato difficoltà a comprendere le attività proposte.					
4. Gli esercizi hanno stimolato l'attenzione e il coinvolgimento degli studenti.					
5. Gli esercizi hanno offerto un'esperienza di apprendimento significativa e coinvolgente per gli studenti.					
6. Ritengo che il tempo dedicato agli esercizi sia stato sufficiente.					
7. Gli esercizi mi hanno fornito nuovi spunti per l'educazione al suono.					
8. La documentazione fornita per lo svolgimento degli esercizi era chiara e completa.					
9. Gli esercizi erano ben strutturati e facilmente adattabili ai diversi livelli scolastici.					
10. Raccomanderei questi esercizi ad altri colleghi.					

Calcolo del punteggio:

1. Sommare i punteggi delle risposte alle domande dispari (1, 3, 5, 7, 9), sottraendo 1 da ciascun valore selezionato.

2. Per le domande pari (2, 4, 6, 8, 10), sottrarre ciascun valore da 5 e sommare i risultati.
3. Moltiplicare la somma totale per 2,5 per ottenere un punteggio finale compreso tra 0 e 100.

Interpretazione del punteggio:

Un punteggio più alto indica un maggiore livello di soddisfazione e un'esperienza più positiva nella gestione degli esercizi proposti.

Appendice D

Questionari User Experience

Questionario alunni - Istruzioni: Rispondi alle domande riportate nella tabella barrando con una **X** la casella che corrisponde maggiormente alla tua opinione. Leggi attentamente ogni frase e indica quanto ti senti d'accordo con quello che c'è scritto, selezionando una risposta nella colonna corrispondente. Utilizza questa scala:

- **1** = Fortemente in disaccordo
- **2** = In disaccordo
- **3** = Neutro
- **4** = D'accordo
- **5** = Fortemente d'accordo

Rispondi in modo sincero. Non ci sono risposte giuste o sbagliate. Completa anche le sezioni aperte con le tue riflessioni personali.

Il questionario è suddiviso in quattro parti: *Esercizio A*, *Esercizio B*, *Opinioni Generali* e *Domande aperte*. Non impiegherai più di 10 minuti per completarlo.

Domanda	1	2	3	4	5
Esercizio A: Classificazione dei suoni					
Hai avuto difficoltà nel distinguere i suoni secondo le categorie proposte (naturali, umani, tecnologici)?					
Hai trovato facile capire quante volte si ripete un suono?					
Hai avuto difficoltà nel decidere quanto fosse forte o debole (volume) un suono?					
Ti sei sentito/a in grado di valutare la distanza di un suono?					
Esercizio B: Suoni in movimento					
Hai trovato facile identificare se un suono fosse fermo, mosso o veloce?					
Ti sei sentito/a in grado di comprendere la provenienza di un suono (destra, sinistra, avanti, dietro)?					
Ti sei sentito/a in grado di comprendere la provenienza di un suono (alto, medio, basso)?					
L'esercizio ti ha aiutato a migliorare la tua percezione della provenienza dei suoni?					
Opinioni generali					
Quanto ritieni utile questo tipo di attività per migliorare la tua capacità di ascolto?					
Ti piacerebbe ripetere esperienze simili in futuro?					
Domande aperte					
Continua nella prossima pagina...					

Domanda	1	2	3	4	5
Qual è stato l'aspetto più interessante o divertente degli esercizi?					
Qual è stata la maggiore difficoltà che hai incontrato?					
Hai suggerimenti o idee per migliorare le attività?					

Questionario docenti - Istruzioni: Rispondi alle domande riportate nella tabella barrando con una **X** la casella che corrisponde maggiormente alla tua opinione. Leggi attentamente ogni affermazione e indica il grado in cui sei d'accordo con essa, selezionando una risposta nella colonna corrispondente. Utilizza la scala seguente:

- **1** = Fortemente in disaccordo
- **2** = In disaccordo
- **3** = Neutro
- **4** = D'accordo
- **5** = Fortemente d'accordo

Rispondi in modo sincero. Non ci sono risposte giuste o sbagliate. Completa inoltre le sezioni aperte con le tue riflessioni personali.

Il questionario è suddiviso in quattro parti: *Esercizio A*, *Esercizio B*, *Opinioni Generali* e *Domande aperte*. Non impiegherai più di 10 minuti per completarlo.

Domanda	1	2	3	4	5
Esercizio A: Classificazione dei suoni					
Gli studenti hanno avuto difficoltà a distinguere i suoni secondo le categorie proposte (naturali, umani, tecnologici)?					
Hai trovato semplice spiegare come classificare la ripetitività di un suono (continuo, ripetitivo, unico)?					
Hai avuto difficoltà a supportare gli studenti nel valutare il volume di un suono?					
È stato facile guidare gli studenti nel valutare la distanza di un suono?					
Esercizio B: Suoni in movimento					
Hai trovato semplice spiegare come capire se un suono fosse fermo, mosso o veloce?					
Gli studenti sono riusciti a comprendere la provenienza di un suono (destra, sinistra, avanti, dietro)?					
Gli studenti hanno compreso la provenienza verticale di un suono (alto, medio, basso)?					
Ritieni che l'esercizio abbia migliorato la capacità degli studenti di percepire la provenienza dei suoni?					
Opinioni generali					
Quanto ritieni utile questo tipo di attività per migliorare le capacità di ascolto critico degli studenti?					
Continua nella prossima pagina...					

Domanda	1	2	3	4	5
Proporresti attività simili in futuro ai tuoi studenti?					
Domande aperte					
Qual è stato l'aspetto più interessante o stimolante degli esercizi per te?					
Quali sono state le principali difficoltà nel guidare gli studenti durante queste attività?					
Hai suggerimenti o idee per migliorare le attività e renderle più efficaci?					