



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

**“Studio ed implementazione di un sistema di
caratterizzazione acustica per idrofoni low-cost”**

**“Study and implementation of an acoustic characterization system for
low-cost hydrophones”**

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Scaradozzi David**

Tesi di Laurea di:

Marziali Eric

Correlatore: Chiar.mo

Dott. **De Marco Rocco**

A.A. 2022 / 2023

INDICE

1 INTRODUZIONE.....	4
2 STATO DELL'ARTE.....	7
2.1 Introduzione.....	7
2.2 Caratterizzazione PAM.....	7
2.2.1 Vocalizzazione Delfini.....	8
2.3 Campionamento.....	8
2.4 Idrofoni.....	9
2.5 Caratteristiche principali degli idrofoni.....	11
2.5.1 Sensibilità.....	11
2.5.2 Direttività.....	11
2.5.3 Signal to Noise Ratio (SNR).....	12
2.5.4 Distorsione Armonica Totale (THD).....	12
2.5.5 Gamma Dinamica e Linearità del Livello.....	13
2.5.6 Risposta in Frequenza.....	13
2.6 Pre-amplificazione.....	14
2.7 Calibrazione.....	15
2.8 Considerazioni Complessive.....	16
3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	18
3.1 Microfoni.....	18
3.1.1 Microfono a Condensatore.....	18
3.1.2 Sea Monkey.....	19
3.1.3 H2a Acquarian.....	19
3.1.4 Microfono Stampato.....	20
3.2 Amplificatori.....	21
3.2.1 bucek_speak_v1.8.....	21
3.2.2 Sound sensor grove.....	21
3.2.3 Amplificatore Costruito.....	22
3.3 Struttura di Acquisizione e di Analisi.....	23
3.3.1 myRIO-1900.....	24
3.3.2 mini-pc & picoscope 2204a.....	24
3.3.3 Raspberry Pi zero 2w.....	26
3.4 Programmi Utilizzati.....	26
3.4.1 LabVIEW.....	27

3.4.2 Python.....	28
3.5 Strumenti Aggiuntivi.....	29
3.6 Disposizione dell'Attrezzatura.....	30
4 FASE DI ACQUISIZIONE.....	31
4.1 Acquisizione Dati.....	31
4.1.1 Metodo picoscope.....	33
4.1.2 Generazione del Segnale.....	33
4.2 Analisi dei Dati.....	33
4.2.1 Tempo.....	33
4.2.1 FFT e Analisi dello Spettro.....	34
4.3 Calcolo delle Caratteristiche dell'Idrofono.....	37
4.4 Descrizione Programmi.....	37
4.4.1 Programma Picoscope.....	37
4.4.2 Programma Bode, THD e SNR.....	39
4.5 Ambiente di Studio dell'Idrofono.....	41
5 RISULTATI DELLE MISURAZIONI.....	43
5.1 Tempo e Spettro.....	43
5.1.1 Amplificatore Bucck e Microfono a Condensatore.....	43
5.1.2 Amplificatore Bucck e Idrofono Acquarian.....	44
5.1.3 Amplificatore Bucck e Idrofono Sea Monkey.....	45
5.1.4 Amplificatore Bucck e Idrofono Piezoelettrico.....	45
5.1.5 Conclusioni Amplificatore buccak.....	45
5.1.6 Amplificatore Grove e Microfono a Condensatore.....	45
5.1.7 Amplificatore Grove e Idrofono Acquarian.....	46
5.1.8 Amplificatore Grove e Idrofono Sea Monkey.....	46
5.1.9 Amplificatore Grove e Microfono Piezoelettrico.....	46
5.1.10 Conclusioni Amplificatore Grove.....	46
5.1.11 Amplificatore Costruito e Microfono a Condensatore.....	47
5.1.12 Amplificatore Costruito e Idrofono Acquarian.....	48
5.1.13 Amplificatore Costruito e Idrofono Sea Monkey.....	48
5.1.14 Amplificatore Costruito e Idrofono Piezoelettrico.....	49
5.1.15 Conclusioni Amplificatore Costruito.....	50
5.1.16 Conclusione degli Esperimenti nel Tempo e nello Spettro.....	50
5.2 Risposta in Frequenza.....	51
5.2.1 Microfono a Condensatore.....	53

5.2.2 Idrofono Acquarian.....	55
5.2.3 Idrofono Sea Monkey.....	58
5.2.4 Idrofono Piezoelettrico.....	62
5.2.5 Risposta in Frequenza: Fase.....	65
5.2.6 Conclusioni Risposta in Frequenza.....	65
5.3 SNR e THD.....	66
6 CONCLUSIONI.....	68
7 APPENDICE A.....	70
8 APPENDICE B.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	90

1 INTRODUZIONE

“Quando viene catturato, il delfino, non appena si accorge di essere finito nelle maglie della rete, rimane fermo senza agitarsi; e per giunta è felice, perché si rimpinza senza alcuno sforzo con l'enorme quantità di pesci impigliati nella rete. Quando infine è in prossimità della terraferma, rosicchia la rete e ne sguscia fuori”. Così scriveva Plutarco nel suo trattato sull'intelligenza degli animali (*De Sollertia Animalium*, I-II d.C.), a testimonianza del fatto che le origini del conflitto tra attrezzi da pesca e cetacei risalgono probabilmente al primo tentativo dell'uomo di catturare un pesce tramite delle reti.

A oggi, le interazioni dei cetacei con le attività antropiche sono ampiamente documentate, sia in letteratura scientifica che nei fatti di cronaca provenienti da gran parte delle marinerie italiane. I delfini per alimentarsi possono interferire con le attività di pesca, con il rischio di essere catturati (il cosiddetto *by-catch*, cattura accessoria o accidentale) e quindi annegare, o di ferirsi gravemente (lesioni o difficoltà nel nuoto) o in maniera letale. Inoltre, il contatto attivo con reti/attrezzi da pesca può provocare effetti sub-letali e a lungo termine, tra cui diminuzione della capacità riproduttiva, lesioni debilitanti, alterazioni comportamentali, compressione gastrica e/o strangolamento della laringe, dovuti all'ingestione di attrezzi da pesca o frammenti. [1]

Negli ultimi anni, il tursiope comune (*Tursiops truncatus*) è diventato la specie più coinvolta nelle interazioni con la pesca, probabilmente anche a causa del crescente depauperamento delle risorse ittiche che induce pescatori e delfini a condividere aree e risorse. Il tursiope è una delle specie di delfini maggiormente conosciute e studiate a livello mondiale, nota particolarmente per le capacità cognitive e di adattamento alle attività antropiche.

Questa specie infatti ha modificato le proprie abitudini comportamentali per sfruttare le nuove opportunità di alimentazione legate alle attività di pesca, portando a forme di interazioni “trofiche”, come il commensalismo e la depredazione. In buona sostanza, delfini e pescatori possono essere considerati in competizione per le stesse prede, in maniera diretta o indiretta, da cui entrambi dipendono. I delfini seguono i pescherecci in maniera opportunistica, in quanto reperiscono più facilmente il cibo; questo però si traduce per i pescatori in perdite economiche dovute alla ridotta quantità e/o qualità delle catture, al danneggiamento degli attrezzi da pesca, alla riduzione della performance di pesca (i banchi di pesci spaventati dalla presenza dei delfini possono anche sfuggire alle reti), all'interruzione del lavoro in caso di cattura accidentale e ai danni alle attrezzature professionali.

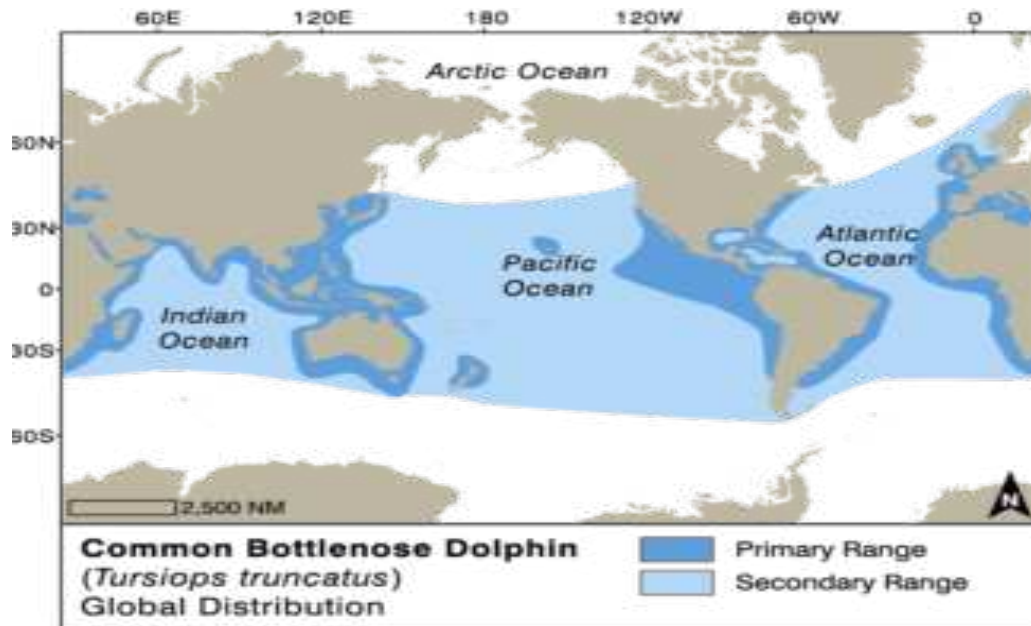


Figura 1: Distribuzione mondiale del delfino tursiopo

Nella pesca con reti fisse passive, in diverse aree del Mediterraneo, sono state segnalate prove di predazione da parte di delfini tursiopi su attrezzi fissi (vale a dire reti da imbrotto e tramagli). Nella pesca a strascico, il “*trawler foraging*” è una strategia ben documentata, adottata da *T. truncatus* in tutto il bacino del Mediterraneo: consiste nel seguire i pescherecci per nutrirsi di organismi all'interno della rete, impigliati nelle maglie o scartati dai pescatori. In misura minore, sono state segnalate interazioni conflittuali nella pesca con reti a circuizione, palangari e lenze a mano. La probabilità di interazione varia a seconda degli attrezzi e delle stagioni, con alcune attività di pesca (ad es. reti fisse) più colpite di altre (ad es. reti a strascico), soprattutto in termini di perdita economica (1000-10.000 €/anno in media). I tassi di cattura accessoria di delfini sono generalmente bassi; tuttavia, ciò è un fatto non trascurabile. [1]

Una delle principali soluzioni tecniche per affrontare le interazioni tra i delfini e la pesca risiede nell'uso di dispositivi di deterrenza acustica sugli attrezzi da pesca, come i “*pinger*”. Il principio alla base di questi dispositivi è quello di creare un suono di allarme, un avvertimento che distraiga abbastanza da allontanare gli animali dalle vicinanze degli attrezzi da pesca.

Generalmente, sono costruiti come una capsula affusolata, a volte appiattita da un lato, lunga una quindicina di centimetri, con un guscio di plastica o metallo, eventualmente ricoperto di teflon, e funzionano trasmettendo una varietà di segnali acustici, a seconda delle specifiche del marchio del produttore, da frequenze medie ad alte (10–180 kHz) a intensità relativamente bassa (livello di pressione sonora < 150 dB re 1 μ Pa a 1 m). Per quanto riguarda *T. truncatus* nel Mediterraneo, finora non sono stati determinati risultati conclusivi; tuttavia, anche se i *pinger* non escludono

l'interazione con i tursiopi, possono aiutare a ridurre gli effetti. Di contro, questo strumento ha un costo non indifferente per i pescatori che devono utilizzarlo (varia dalle 250 € alle oltre 500 € l'uno) e la loro efficacia varia a seconda della zona e delle condizioni in cui vengono effettuati i test. [1]

Lo scopo di questo studio, pertanto, è quello di costruire, in collaborazione con altri studenti dell'università, un dissuasore low-cost. Il progetto è diviso in due parti: la prima consiste nel proporre un metodo di studio e implementazione di un sistema di caratterizzazione acustica per idrofoni low-cost (componente di ricezione ed emissione dei suoni), la seconda consiste nella programmazione della parte di analisi dei campioni catturati dall'idrofono, attraverso l'utilizzo di un algoritmo di machine learning.

Questa tesi verterà sugli esperimenti condotti sulla prima parte del progetto utilizzando vari idrofoni per la ricezione e l'analisi dei dati acquisiti con diversi setup, fino ad arrivare alla creazione di una prima impostazione del pinger, composto da *idrofono per la ricezione e la trasmissione di suoni, amplificatore del suono e scheda di analisi dei dati acquisiti.*



Figura 2: Dissuasore per delfini

2 STATO DELL'ARTE

2.1 Introduzione

Per capire meglio il procedimento svolto per la realizzazione del sistema di caratterizzazione, è necessario presentare un excursus sulle caratteristiche delle vocalizzazioni dei delfini e delle caratteristiche degli idrofoni.

Nel capitolo 2.2 sono presenti cenni sul monitoraggio dei cetacei e sullo studio dei loro segnali, mentre nel capitolo 2.3 si parla del campionamento di segnali. Nei capitoli 2.4, 2.5 e 2.6 sono descritti i metodi di costruzione dei vari idrofoni e le caratteristiche principali da considerare per la loro caratterizzazione. Infine, il capitolo 2.7 descrive i vari metodi di calibrazione e le loro problematiche.

2.2 Caratterizzazione PAM

La caratterizzazione dettagliata dei paesaggi sonori marini può contribuire a una migliore comprensione dei fattori ambientali che influenzano le condizioni di vita della fauna marina, facendo luce sui comportamenti delle diverse specie marine e sulle loro interazioni con le attività umane.

L'obiettivo principale delle attività di monitoraggio marino è raccogliere dati per archiviare, studiare e interpretare i segnali bio-acustici subacquei, in quanto la valutazione dei modelli spaziali e temporali di questi segnali potrebbe aiutare la descrizione del comportamento della maggior parte delle specie nel loro ambiente naturale. [\[2,3\]](#)

Il monitoraggio acustico passivo (PAM) è ampiamente riconosciuto come una tecnica adatta per identificare possibili fonti di segnali acustici subacquei. Il monitoraggio acustico passivo, o semplicemente "monitoraggio acustico", comporta il rilevamento e monitoraggio della fauna selvatica e degli ambienti mediante registratori di suoni (sensori acustici). Questi sono schierati sul campo, spesso per ore, giorni o settimane, registrando dati acustici su uno specifico programma. Dopo la raccolta, queste registrazioni vengono elaborate per estrarre utili dati ecologici, come rilevare i richiami delle specie animali di interesse, che vengono poi analizzati in modo simile ad altri tipi di dati di indagine. [\[2,3\]](#)

Questa tecnica viene solitamente impiegata per monitorare la presenza e il comportamento dei mammiferi marini in mare aperto, con un'intrusione minima nella loro vita quotidiana. Una delle specie di mammiferi marini più studiate è il tursiopo comune (*Tursiops truncatus*), una specie con una distribuzione mondiale alle latitudini tropicali e temperate. Questi cetacei sono noti per le loro

avanzate capacità comunicative e cognitive, rendendo questa specie particolarmente nota nel campo della comunicazione acustica.

Grazie a questi monitoraggi è possibile caratterizzare i vari suoni emessi da questi cetacei, dandoci così un insieme di dati da cui è possibile estrarre le proprietà delle loro vocalizzazioni in correlazione ai loro spostamenti e alle loro azioni. [3]

2.2.1 Vocalizzazione Delfini

Ogni specie di delfino produce suoni distinti. Le tipiche emissioni acustiche generate dai delfini tursiopi possono essere raggruppate in tre diverse categorie:

1. fischi modulati in frequenza a banda stretta;
2. treni di click di eco-localizzazione altamente direzionali;
3. varie tipologie di suoni pulsati burst a banda larga (principalmente ultrasonici).

I fischi sono interpretati come segnali di comunicazione e interazione sociale; sono tipicamente emessi per l'identificazione individuale, il contatto tra individui e il coordinamento delle attività e dei trasferimenti di gruppo. Le caratteristiche dei fischi sono solitamente quantificate valutando durata temporale e contenuto di frequenza; in particolare, lo spettro di frequenza dei fischi dei delfini è altamente informativo e facile da calcolare, facilitando l'analisi del segnale. L'intervallo di frequenza caratteristico dei fischi varia da 7 a 15 kHz.

I click sono funzionali all'eco-localizzazione; tuttavia, sono considerati difficili da classificare nelle registrazioni acustiche a causa delle loro caratteristiche: sono segnali altamente direzionali, formati da un contenuto acustico ad alta frequenza (da circa 40 fino a 130 kHz), che comporta un'attenuazione dell'ampiezza su distanze relativamente brevi. È stato riferito che l'energia nei click è strettamente focalizzata lungo l'asse longitudinale del delfino che esegue l'eco-localizzazione (all'aumentare dell'angolo asse-idrofono, il segnale viene sempre più attenuato); inoltre, le alte frequenze si attenuano più velocemente delle basse frequenze all'aumentare della distanza. Un altro problema nella classificazione è dovuto al fatto che i delfini sono abituati a muoversi in grandi gruppi e contemporaneamente a vocalizzare, sovrapponendo così i singoli suoni. La concomitanza di questi aspetti aumenta la variabilità dei click, il che rende molto complessa l'identificazione di questi segnali.

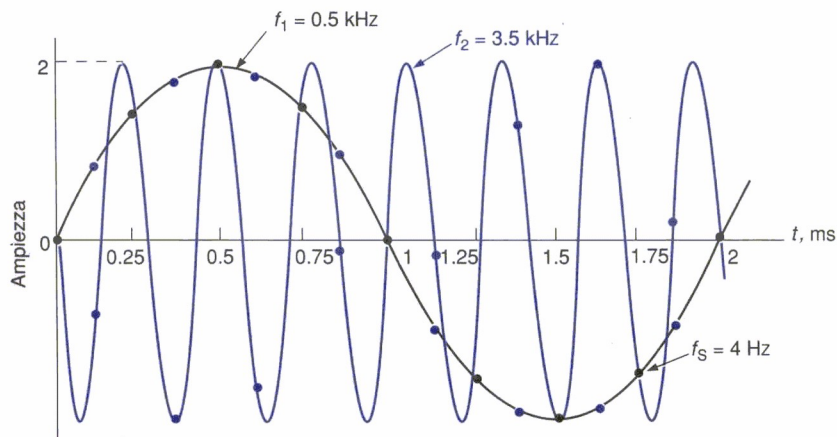
Infine, i segnali di *burst pulse* vengono rilevati principalmente durante eventi di foraggiamento e alimentazione, allarme e pericolo, comportamento aggressivo e interazioni pre-copulatorie. [2]

2.3 Campionamento

Si parla di campionamento quando si cerca di trasformare un segnale continuo nel tempo in un segnale discreto, valutandone l'ampiezza a intervalli temporali regolari.

Il teorema del campionamento garantisce la possibilità di ricostruire un segnale con una banda limitata da f_{max} , se questo viene campionato a frequenze maggiori o uguali alla cosiddetta frequenza di Nyquist, che è uguale a $2f_{max}$. Se nel campionare non si rispetta questa condizione, le componenti del suono a frequenza maggiore vengono sotto-campionate e, quindi, ricompaiono nel segnale campionato come elementi a componenti frequenziali più basse, secondo la seguente relazione:

$$f_{aliasing} = f_{Nyquist} - (f_{vera} - f_{Nyquist}) = 2 * f_{Nyquist} - f_{vera} \quad (1)$$



Esempio di aliasing. Le sinusoidi a 0.5 kHz (nera) e a 3.5 kHz (in colore) hanno la stessa ampiezza se queste forme d'onda vengono campionate ogni 0.25 ms (punti neri corrispondenti a una frequenza di campionamento di 4 kHz). Campionando invece ogni 0.125 ms (punti in colore corrispondenti a frequenza di campionamento di 8 kHz) si ottengono valori diversi per le ampiezze dei due segnali.

Figura 3: Esempio di aliasing dovuto ad onde di diversa frequenza

Se, per esempio, analizziamo al computer lo spettro di un segnale sotto-campionato "sweep", cioè un segnale con frequenza variabile in modo progressivo nel tempo, si può vedere come lo spettro salga fino a una determinata frequenza, per poi tornare indietro come se rimbalzasse su di essa. Il fenomeno appena descritto è noto col nome di aliasing. [4]

2.4 Idrofoni

Le onde acustiche sono semplicemente onde sonore in qualsiasi mezzo; in particolare, nell'acqua vengono trasmesse come onde causate dal movimento delle molecole d'acqua.

I parametri principali di un'onda acustica sono la pressione e la frequenza.

Nella PAM, per catturare segnali bio-acustici marini, di solito si utilizzano microfoni subacquei, noti come idrofoni. In condizioni normali, la maggior parte di questi dispositivi commerciali è di facile utilizzo e in grado di fornire prestazioni audio di alta qualità. Tuttavia, il loro costo potrebbe essere considerevole, soprattutto quando sono necessari contemporaneamente più idrofoni per l'analisi PAM. [3,4]



Figura 4 : idrofono a condensatore

Un idrofono è uno strumento che permette di rilevare le onde acustiche in un liquido attraverso un fenomeno fisico misurabile, indotto dalle onde nel mezzo di rilevazione.

Dal punto di vista elettrico, gli idrofoni hanno un'alta impedenza e generano segnali elettrici molto deboli. Il circuito di Front-End deve quindi avere un'elevata impedenza di ingresso (generalmente maggiore di 1 Mega Ohm) e una ridottissima corrente inversa. Tali segnali elettrici devono essere amplificati di un fattore 300 circa per entrare nel range 0-5V tipico dei convertitori Analogico Digitali. Un'impedenza di ingresso elevata può causare problemi di offset che portano alla saturazione l'uscita del pre-amplificatore. Alcuni idrofoni analogici sono di tipo attivo: includono cioè al loro interno un circuito di pre-amplificazione che ne migliora le performance, semplificando l'interfacciamento con il convertitore ADC.

Gli idrofoni analogici attivi devono essere alimentati e, in genere, richiedono una tensione elettrica bipolare ($\pm 5V$, $\pm 10V$...). Gli idrofoni analogici che garantiscono il rapporto segnale/rumore (SNR) maggiore sono di tipo differenziale. In questo tipo di idrofoni, il segnale elettrico è rappresentato dalla differenza di potenziale tra due poli diversi dalla massa; in questo modo, un eventuale disturbo presente nel cavo di collegamento si presenterebbe, in modo uguale, su entrambi i poli di collegamento e verrebbe eliminato dall'operazione di differenza. Tali idrofoni richiedono un ingresso differenziale anche dal lato ADC. [4,8]

Gli idrofoni commerciali utilizzano, per la rilevazione, sensori piezo-elettrici che permettono di trasformare la pressione esercitata dall'onda acustica in segnale elettrico. Essi impiegano un cristallo di sale di Rochelle o un elemento di titanato di bario (ceramico) che generano un potenziale elettrico quando vengono sottoposti a pressioni meccaniche. Tra i materiali piezo-ceramici, i composti di piombo zirconato titanato (PZT) sono frequentemente utilizzati nei trasduttori acustici subacquei, in quanto migliorano la sensibilità acustica e di conseguenza la risposta acustica degli idrofoni. Gli idrofoni piezo-elettrici in commercio costano qualche migliaio di euro, ma è possibile costruirli a partire da un dischetto di materiale piezo-elettrico e da un moulding adeguato. Gli

idrofoni auto-costruiti, tuttavia, devono essere attentamente calibrati prima di essere utilizzati; tale procedura non è sempre facile da eseguire (scopo di questa tesi). [2]

Oltre gli idrofoni piezo-elettrici esistono altri tipi di idrofono, come l'idrofono a condensatore, nel quale vengono sfruttate le variazioni di capacità di un condensatore dovute alla pressione esercitata dai suoni. Ogni piccola variazione della distanza fra le armature, dovuta alla vibrazione di una membrana, provoca una variazione della capacità che produce una variazione di tensione. [9]

Gli idrofoni attuali più sensibili sono capaci di misurare suoni d'intensità molto più piccola di quelli emessi dai cetacei.

2.5 Caratteristiche principali degli idrofoni

I microfoni sono caratterizzati da diversi parametri acustici che descrivono alcuni dei loro aspetti tecnici, quali sensibilità, direzionalità, SNR, gamma dinamica, risposta in frequenza e THD (distorsione armonica totale). Alcuni di questi valori sono uguali sia per i microfoni standard che per gli idrofoni.

2.5.1 Sensibilità

La sensibilità è il segnale elettrico di uscita prodotto dal microfono a una data pressione acustica in ingresso. La sensibilità di un idrofono è tipicamente descritta in mV o dB, con riferimento un segnale acustico di 1 Pascal o 94 dB SPL (livello di pressione sonora dB) alla frequenza di 1kHz. I valori tipici per la sensibilità vanno da -220 a -150. Valori più negativi rappresentano una sensibilità inferiore.

$$Sensitivity = 20 \log \left(\frac{Output\ Voltage}{Sound\ pressure} \right) \quad (2)$$

2.5.2 Direttività

La direttività è il pattern di sensibilità di un microfono in funzione della direzione, solitamente rappresentato come un diagramma polare dove la lunghezza del raggio in qualsiasi direzione fornisce la risposta in dB del microfono.

Di solito questa risposta viene misurata per varie frequenze, i cui risultati possono essere combinati in un unico diagramma, poiché in molti casi è auspicabile un'uniformità di risposta su un ampio intervallo di frequenze.

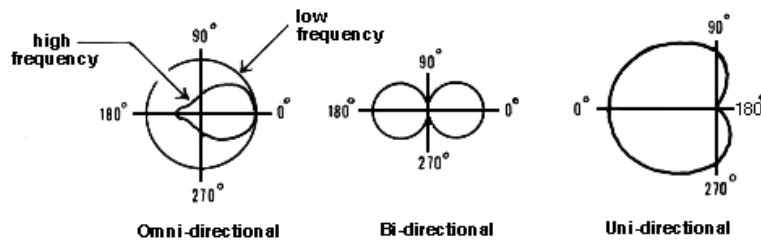


Figura 5 : esempi di direzionalità del microfono

La direttività è anche chiamata schema di campo, schema polare o caratteristica direzionale, e i principali tipi di microfoni sono:

1. cardioide o unidirezionale: dotato di massima sensibilità anteriormente, solo parzialmente ai lati e scarsa posteriormente;
2. bidirezionale o figura di otto: con la massima sensibilità davanti e dietro, ma poco ai lati, solitamente utilizzato per le interviste;
3. omnidirezionale: sensibilità pressoché uguale in tutte le direzioni;
4. fucile: sensibilità altamente focalizzata o "appuntita" in una sola direzione.

2.5.3 Signal to Noise Ratio (SNR)

SNR o rapporto segnale/rumore specifica la differenza in dB tra il segnale di riferimento e la quantità di rumore residuo dell'uscita del microfono (il segnale di riferimento è una pressione acustica di 94 dB SPL a 1kHz). Il segnale di rumore è il rumore residuo misurato in ambiente anecoico. Questo tipo di rumore viene generalmente calcolato come livello globale su una banda da 20 Hz a 20 kHz con un filtro ponderato A; questo tipo di filtro acustico include un fattore di correzione che corrisponde alla sensibilità dell'orecchio umano al suono a diverse frequenze. Per quanto riguarda gli idrofoni, questi parametri includono il rumore proveniente sia dall'idrofono che dal pre-amplificatore. e il rumore auto-generato è una delle più importanti specifiche per loro, in particolare per i sistemi che misurano i rumori nell'acqua. Esso influenza direttamente il livello di densità spettrale di pressione acustica equivalente e la gamma dinamica del sistema di misura dell'acustica subacquea. [\[3,4,6\]](#)

2.5.4 Distorsione Armonica Totale (THD)

La distorsione armonica totale più il rumore (THD + N) è il livello della distorsione in uscita rispetto a un dato tono puro in ingresso. Questa specifica è data in valore percentuale; è espressa dal rapporto tra la potenza delle N armoniche successive più la potenza del rumore e la potenza della fondamentale:

$$THD+N (\%) = \frac{\sum_{n=1}^N Potenza(Armoniche) + Potenza(Rumore)}{Potenza(Fondamentale)} \quad (3)$$

Viene mostrato THD +N, anziché solo THD, perché a un'ampiezza acustica inferiore è quasi impossibile distinguere la distorsione misurata dal rumore di fondo del microfono. [6]

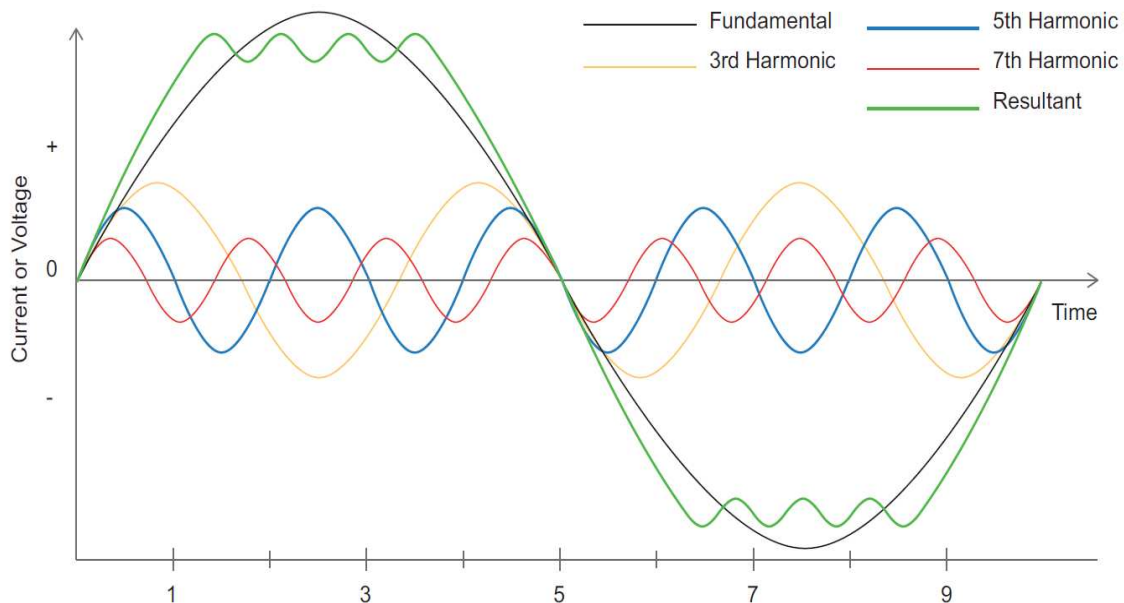


Figura 6 : Onda sinusoidale e componenti armoniche

2.5.5 Gamma Dinamica e Linearità del Livello

La gamma dinamica è la differenza tra il segnale minimo e massimo che il microfono è in grado di generare mantenendo la sua risposta lineare. Il segnale minimo è il segnale più piccolo che il microfono può generare distintamente dal rumore che si chiama EIN. Il segnale massimo è il segnale più grande che il microfono può generare con una piccola distorsione (10 %), così come l'AOP. La linearità del livello è la funzione che descrive quanto è lineare il Lp letto dal microfono tra la gamma dinamica.

2.5.6 Risposta in Frequenza

La risposta in frequenza di un microfono indica la variazione di sensibilità in dB rispetto alla frequenza del segnale sinusoidale variabile in input. Tipicamente esiste una banda di frequenza in cui la risposta è lineare e due regioni di deviazione: una a bassa frequenza e una ad alta frequenza.

I diagrammi di Bode sono due rappresentazioni grafiche della risposta in frequenza di un sistema lineare tempo invariante:

1. diagramma delle ampiezze: rappresenta il modulo $|G(j\omega)|$ in funzione della pulsazione ω . Sia il modulo $|G(j\omega)|$ che la pulsazione ω vengono espressi in scala logaritmica. Tipicamente per i moduli $|G(j\omega)|$ si usano i “db” ($A \text{ db} = 20 \log_{10} A$), mentre per la pulsazione ω si usa la scala logaritmica in base 10.
2. diagramma delle fasi: rappresenta la fase $\arg G(j\omega)$ in funzione della pulsazione ω . In questo caso la fase $\arg G(j\omega)$ viene espressa in scala lineare, mentre la pulsazione ω viene espressa in scala logaritmica base 10.

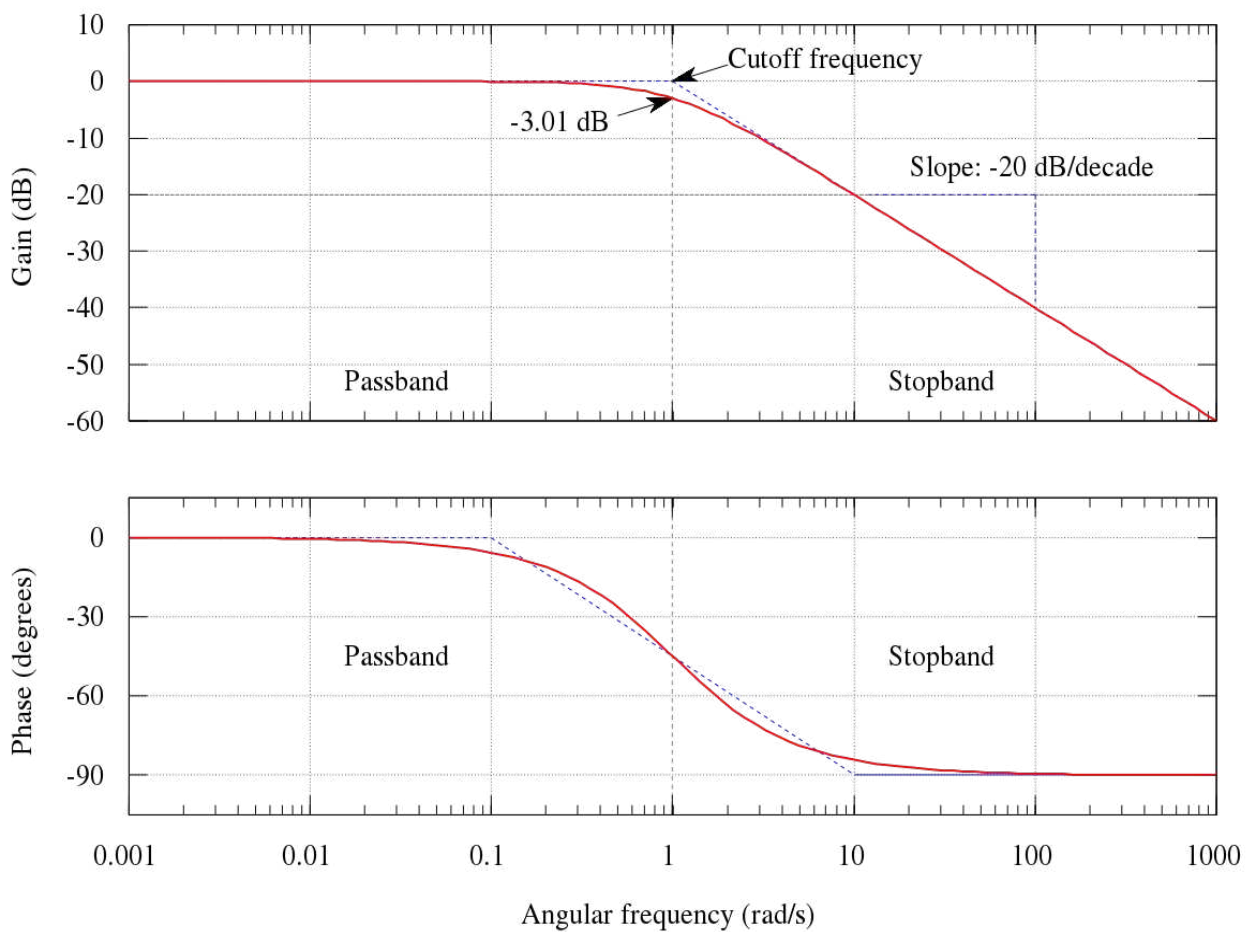


Figura 7 : grafici di guadagno e fase di Bode

2.6 Pre-amplificazione

La pre-amplificazione del microfono dipende sia dalla tecnica costruttiva del microfono sia dalla distanza; permette di correggere l'intensità del segnale senza apportare disturbi significativi e viene principalmente utilizzato per evitare che il segnale venga rovinato dal rumore di trasmissione dello stesso. Inoltre, la pre-amplificazione permette di correggere l'intensità del volume in base alla

distanza in quanto, a seconda del tipo di posizionamento, è necessario amplificare più o meno il volume, per evitare che il microfono risulti sordo.

Le problematiche della pre-amplificazione sono principalmente causate dalla distanza tra il microfono e la sorgente da campionare.

I pre-amplificatori possono essere integrati insieme al microfono, oppure sono componenti aggiuntive che vengono inserite tra il microfono e lo strumento di acquisizione; in quest'ultimo caso, devono essere alimentati per poter operare. Nel caso di amplificatori esterni, ve ne sono di diversi tipi: tubi, transistor o circuiti integrati.

I più utilizzati sono quelli a circuiti integrati, composti da vari componenti elettronici, i quali amplificano la potenza del segnale elettrico che li attraversa. Molti di questi sono muniti di un guadagno regolabile. [9,10]

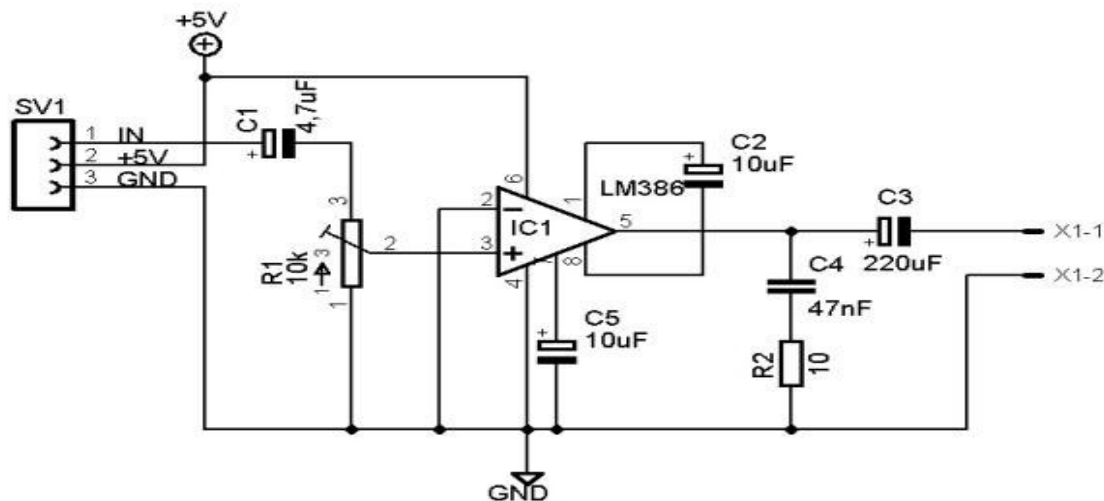


Figura 8 : esempio dello schema di un amplificatore con i suoi componenti

2.7 Calibrazione

I principali metodi standard per la calibrazione del microfono sono descritti dalla Commissione elettrotecnica internazionale (IEC): questa società elabora i regolamenti che devono essere seguiti per certificare un microfono. Per esempio, descrive il tipo di microfoni che devono essere utilizzati, le specifiche dell'ambiente in cui effettuare la misurazione, il tipo di sorgente sonora che deve essere adottata, il suono che deve essere generato, ecc... . Per tutte queste situazioni essenzialmente tutti i microfoni standard di misura e di riferimento comunemente usati sono microfoni a condensatore.

Tipicamente, il suono viene misurato in molti luoghi diversi e i campi sonori possono essere molto diversi, ma ci sono tre situazioni standard di base: campo sonoro prodotto all'interno di cavità, le cui dimensioni sono inferiori a circa un quarto della lunghezza d'onda del suono Denizione; campo

sonoro generato all'interno di una stanza anecoica, o vasca anaerobica per gli idrofoni, o all'esterno in un grande spazio aperto, dove il suono può propagarsi liberamente senza riflettere oggetti, che si chiama campo libero; campo sonoro generato in una camera riverberante con pareti riflettenti, che prende il nome di campo di uso. [8,9]

Tra questi tipi di situazioni led esistono due tipologie principali di tarature microfoniche: taratura primaria per reciprocità e taratura secondaria per confronto. La differenza principale è che una calibrazione primaria non richiede un microfono di riferimento ed è la procedura più accurata per calibrare un microfono da laboratorio. La calibrazione per confronto necessita di un microfono di riferimento, che deve essere preventivamente calibrato con la calibrazione primaria. [8,9]

Tra queste diverse tecniche, quelle che possono essere utilizzate per calibrare gli idrofoni sono la reciprocità, i metodi di sostituzione, la scansione planare, la spettrometria a ritardo temporale (TDS), il metodo della colonna vibrante e l'interferometria ottica. Ogni metodo ha i suoi vantaggi e svantaggi, per quanto riguarda precisione, fornitura di una determinazione diretta o indiretta, velocità, gamma di frequenza e se richiede un ambiente in campo libero o solo un serbatoio di laboratorio. [4,5,8,9]

2.8 Considerazioni Complessive

Dopo aver parlato del lavoro svolto finora, è possibile fare un punto della situazione.

Per garantire una registrazione fedele dei segnali è necessario conoscere la sensibilità dell'idrofono, ciò significa che è richiesta la risposta di fase così come la risposta di ampiezza.

Se la risposta di fase dell'idrofono non è piatta, possono essere introdotti ritardi di fase nelle diverse componenti di frequenza del segnale, portando a distorsioni nell'aspetto della forma d'onda nel dominio del tempo. Per una riproduzione ad alta fedeltà del segnale acustico, è necessario utilizzare un idrofono con una risposta piatta, oppure il segnale misurato deve essere corretto utilizzando tecniche di deconvoluzione. Per quest'ultimo caso, la sensibilità dell'idrofono deve essere nota in termini di risposta a valori complessi (ampiezza e fase), e quindi deve essere misurata la risposta di fase. Inoltre nel caso del tursiope comune la sensibilità deve essere tale da poter coprire tutto lo spettro di emissioni, in particolare deve essere in grado di captare suoni ad alte frequenze fino a 100 kHz.

L'altro aspetto importante è la necessità di un sensore acustico subacqueo a basso costo ed efficiente dal punto di vista energetico, che raggruppi non solo l'elemento di rilevamento, ma anche l'elettronica richiesta (ad es. pre-amplificatore, ADC, microcontrollore, ecc.), per produrre un segnale di uscita digitale, adatto per la trasmissione a lunga distanza. In questo modo, il sensore potrà essere posizionato sott'acqua come un dispositivo autonomo, dando la possibilità di analizzare

i segnali ricevuti e ottenere maggiori informazioni sulla sorgente sonora, la sua posizione e la sua frequenza.

Partendo dalle informazioni ottenute e da esperimenti già condotti dai quali è stato costruito un idrofono capace di captare segnali fino a 35 kHz, l'obiettivo principale di questa tesi è presentare la progettazione e lo sviluppo di un sistema di caratterizzazione acustica che coinvolga tutti i componenti (elemento sensibile, elettronica, software di calibrazione), utilizzando componenti a basso costo. Il sistema prevede diverse impostazioni sperimentate, ognuna con le sue caratteristiche, per la cattura dei suoni attraverso un idrofono a basso costo, stampato con stampante 3D, di cui non si conoscono le specifiche, al fine di trovare le specifiche del nuovo modello, attraverso l'utilizzo di altri idrofoni già caratterizzati.

3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Il dissuasore per delfini ha una struttura divisa in più parti: il microfono recettore, l'amplificatore del segnale, la struttura di acquisizione, la struttura per l'analisi dei dati e il microfono emettitore. Per la realizzazione del pinger, la struttura può essere progettata dividendo la struttura principale in sottoclassi, proseguendo alla costruzione di tutte le parti e infine mettendole insieme nel prodotto finale.

Lo scopo principale di questa tesi è di creare un impianto low-cost in grado di essere prodotto in serie limitandone i costi; per fare ciò, bisogna auto-costruirsi i microfoni necessari e caratterizzarli in modo da ottenere degli strumenti adeguati allo scopo.

Una volta creati, dobbiamo utilizzarli per raccogliere dati e usare questi campionamenti per definire le proprietà della struttura. Di conseguenza, abbiamo bisogno di un calcolatore in grado di raccogliere i dati e analizzarli.

Nel seguente capitolo saranno elencati tutti i microfoni, tutti gli amplificatori e i dispositivi utilizzati per la raccolta dei dati e l'analisi di questi ultimi. Ciò verrà poi utilizzato per la costruzione finale e come base per determinare quale struttura di analisi utilizzare per il prodotto definitivo.

3.1 Microfoni

La prima parte del pinger è composta dallo strumento di ricezione, ovvero l'idrofono. Per la progettazione abbiamo utilizzato diversi microfoni e idrofoni, in modo tale da avere un ampio spettro della caratterizzazione e del funzionamento dello strumento.

A partire da questi dispositivi abbiamo costruito, utilizzando una stampante 3D, il nostro microfono piezo-elettrico che funzionerà da fondamenta per sviluppi futuri.

3.1.1 Microfono a Condensatore

Il primo microfono utilizzato è stato un semplice microfono a condensatore di tipo commerciale, impiegato per testare i nostri programmi e il corretto funzionamento dell'amplificatore. Questo ha le seguenti caratteristiche:

- Sensibilità: $-55 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$;
- Direttività: cancellazione del rumore;
- Impedenza: $< 2,2 \text{ k}\Omega$;
- Alimentazione standard a 1,5 V;
- Risposta in frequenza: da 50 Hz a 16 kHz;
- S/N: più di 36 dB.



Figura 9 :
microfono a
condensatore

3.1.2 Sea Monkey

Il Sea Monkey è un idrofono piezo-elettrico fatto a mano e di alta qualità, robusto e durevole, con 4,5 metri di cavo di alta qualità; può essere utilizzato come microfono a contatto. Per prestazioni ottimali dovrebbe essere utilizzato con un ingresso Hi-z o con un trasformatore di impedenza.



Figura 10 : Sea monkey

3.1.3 H2a Acquarian

L'H2a Acquarian incorpora un sensore abbinato e un gruppo di pre-amplificazione buffer FET, che produce un'uscita elettricamente equivalente a microfoni a condensatore elettretici. Questo tipo di microfono è il più comune utilizzato dai consumatori di elettronica, rendendo l'H2a un idrofono estremamente versatile con molte opzioni di compatibilità. L'uscita dell'H2a è dual mono: entrambi i canali stereo sinistro e destro provengono dalla stessa fonte. Questa configurazione è abbastanza versatile, perché l'idrofono guiderà entrambi i canali stereo al dispositivo. La connessione ad anello della spina di uscita dell'H2a non viene utilizzata quando è collegato a un dispositivo monofonico, come un trasmettitore radio, ma l'idrofono dovrebbe funzionare altrettanto bene. È possibile che alcuni jack di ingresso mono cortocircuitino l'uscita di H2a.

Le specifiche sono le seguenti:

- Sensibilità: -180dB re: 1V/ μ Pa (\pm 4dB 20Hz-4KHz);
- Range di operabilità : <10 Hz a > 100 kHz;
- Omnidirezionale;
- Impedenza di uscita: 2 k Ω ;
- Alimentazione a 0,3 mA;
- Attacco jack 3,5 mm.



Figura 11 : H2a Acquarian

3.1.4 Microfono Stampato

Si tratta dell'idrofono oggetto del nostro studio, costruito con tecnologia piezo-elettrica. La struttura esterna è stata stampata con stampante 3D; sfrutta poi due tweeter collegati alla struttura su due lati adiacenti per captare il suono: questo lo rende multidirezionale. Esso sfrutta un cavo con connettore XLR per la trasmissione del segnale, collegato poi con un convertitore aux.



Figura 12 : microfono stampato

	Microfono a condensatore	Sea Monkey	H2a Acquarian	Microfono stampato
Sensibilità	-55 dB ± 2 dB	-202 ± 4 dB	-180 dB ± 4 dB	?
Range di operabilità	50 Hz – 16 kHz	50 Hz – 40 kHz	10 Hz – 100 kHz	?
Direzionalità	Omnidirezionale	Omnidirezionale	Omnidirezionale	Bidirezionale

3.2 Amplificatori

Per rendere possibile la raccolta dati subacquea l'idrofono deve essere affiancato da un amplificatore di segnale, per fare in modo che il segnale captato sia analizzabile, in quanto l'acqua attenua l'intensità delle onde sonore che la attraversano.

Nei nostri esperimenti, abbiamo usato tre diversi tipi di amplificatori, due già esistenti e l'ultimo costruito da noi, per osservare il processo e l'intensità di amplificazione, così da avere le caratteristiche necessarie per dare forma a una struttura per il prodotto finale.

Di seguito, vengono illustrati gli amplificatori usati.

3.2.1 buccak_speak_v1.8

Si tratta di un pre-amplificatore commerciale per sistemi audio, alimentabile fino a 10 V, con ingresso e output jack 3,5mm di tipo stereo; in alternativa, può essere collegato attraverso pin direttamente al terminale di input audio.

La scheda è equipaggiata con un nucleo accurato e di alta qualità con gain regolabile attraverso una vite, arrivando ad amplificare fino a 10 volte.

Viene preinstallato con un microfono a condensatore.

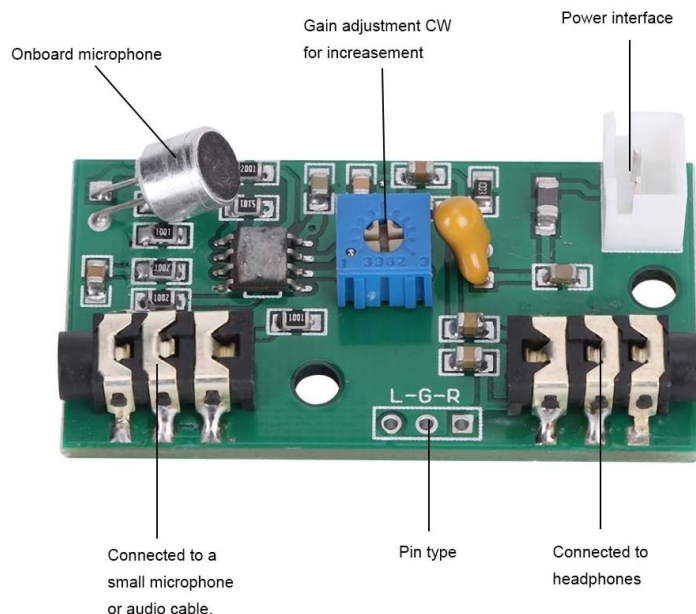


Figura 13 : amplificatore buccak_speak_v1.8

3.2.2 Sound sensor grove



Figura 14 : Sound sensor Grove

Si tratta di un microfono incorporato a un circuito di amplificazione, a cui abbiamo rimosso il microfono e saldato l'input per il nostro idrofono.

Alimentato con un ingresso da 5 V, la scheda di amplificazione nella figura 15, ha un gain di 26 dB corrispondente a un'amplificazione di 20 volte.

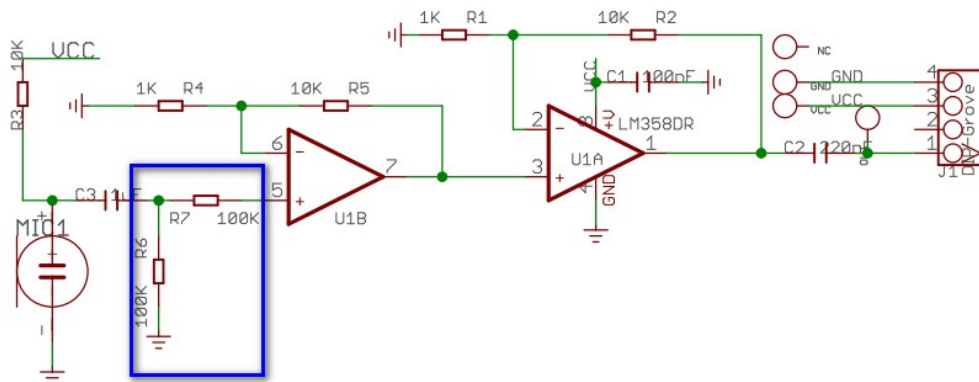


Figura 15 : schema scheda di amplificazione grove

3.2.3 Amplificatore Costruito

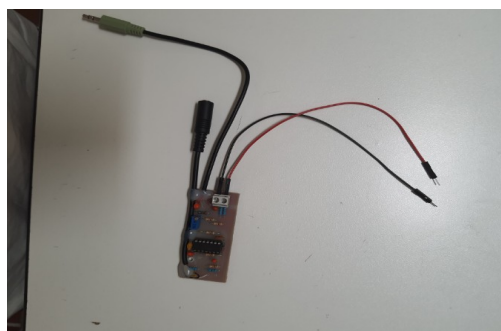


Figura 16 : amplificatore costruito

Per la realizzazione del pinger si è optato per la raspberry, in quanto performante, economica e facilmente personalizzabile; per quanto riguarda la caratterizzazione degli idrofoni, invece, si è preferito utilizzare la configurazione mini-pc e picoscope, per via delle caratteristiche di acquisizione migliori e per la migliore precisione nelle misurazioni.

Nei prossimi capitoli vi saranno anche informazioni generali sulla myRIO e la raspberry, in quanto strumentazione utilizzata. Informazioni maggiori e gli esperimenti condotti con la myRIO sono contenuti nell'Appendice A.

3.3.1 myRIO-1900

La myRIO-1900 è uno strumento per la didattica di una vasta gamma di discipline con un dispositivo RIO (Reconfigurable I/O). Dotato di I/O su entrambi i lati del dispositivo in forma di connettori MXP e MSP, include 10 ingressi analogici, 6 uscite analogiche, 40 linee I/O digitali, WiFi, LED, un accelerometro su scheda, un FPGA Xilinx e un processore dual-core ARM Cortex-A9.

Il processore viene preinstallato con un sistema operativo linux 32 bit real-time, che permette la programmazione della myRIO con Labview o C, mentre il modulo FPGA ha un clock interno di 40 MHz, quindi è in grado di acquisire ed effettuare elaborazioni a grande velocità.

Ci si può connettere alla scheda attraverso USB o WiFi.

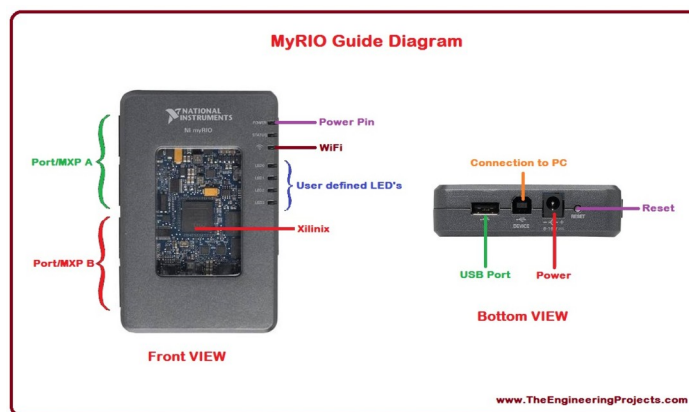


Figura 18 : Diagramma della macchina myRIO

3.3.2 mini-pc & picoscope 2204a

Il Picoscope è un oscilloscopio per pc creato dalla pico-tech, ed è una versione più compatta dei classici oscilloscopi. Esistono vari modelli, con specifiche differenti; quello che abbiamo utilizzato è il modello 2204^a, uno dei primi che sono stati prodotti.

Tutti gli oscilloscopi sono alimentati da una presa USB connessa al pc, dalla quale è possibile trasmettere i dati per lo streaming.

Ogni oscilloscopio ha delle porte BNC corrispondenti a entrate e uscite; il nostro modello ha due canali (ChA e ChB) per gli ingressi, e uno per l'uscita (AWG). Gli ingressi sono composti da una resistenza da 1 MΩ in parallelo con un condensatore da 14 pF, in grado di catturare in fast real-time fino a 100 MS/s, equivalente a 10 ns con un ingresso, 50 MS/s con entrambi gli ingressi. La risoluzione dei dati raccolti arriva a 12 bits e con un range di potenza in ingresso che va da 50 mV fino a 20 V. Se si vuole usare lo streaming dei dati, considerata la natura della connessione con il computer, il passaggio di dati è limitato a un totale di 1 MS/s, con un buffer interno di 8 kS, limitando così le sue prestazioni.

Il picoscope è anche in grado di generare un'onda che è possibile trasmettere attraverso la porta AWG. Il 2204a è in grado di generare diverse forme d'onda (sinusoidi, triangolari, rampe, ecc.) fino ad un massimo di 100 kHz con un'ampiezza peak to peak di 2 V, con opzione di sweep dell'onda e un'accuratezza in uscita di <0,01 Hz.

I driver vengono installati insieme all'applicazione della pico-tech, dalla quale è possibile osservare e operare l'oscilloscopio.

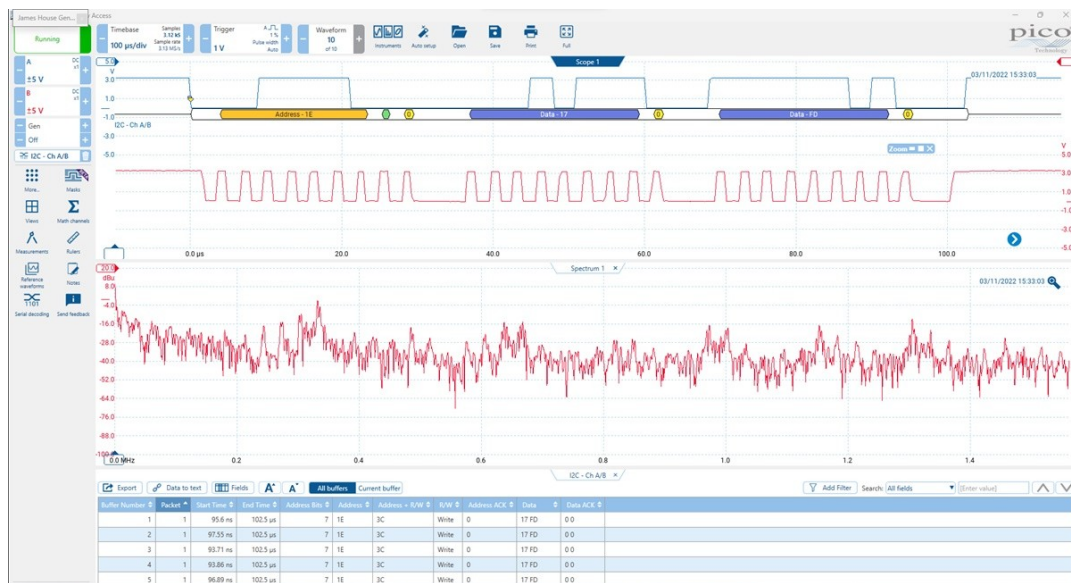


Figura 19 : Interfaccia del programma PicoScope 6

Per poter operare, però, è necessario l'utilizzo di un pc; per rendere facilmente trasportabile la struttura di analisi si è scelto di utilizzare un mini-pc, ovvero un computer compatto e facilmente trasportabile (11,94 x 4,83 x 1,78 cm). Esso è dotato di un sistema operativo windows 11 a 64 bit, 8 GB di ram DDR4, una ssd da 128 GB di memoria con un processore intel celeron J4125 da 2.00 GHz.

È possibile collegarlo attraverso le sue porte USB e alla presa HDMI a qualunque schermo e tastiera per poterlo utilizzare.



Figura 20 : mini-pc



Figura 21 : picoscope 2204a

3.3.3 Raspberry Pi zero 2w

La Raspberry Pi Zero 2 W si basa su RP3A0, un sistema in pacchetto personalizzato progettato da Raspberry Pi nel Regno Unito. Con un processore quad-core ARM Cortex-A53 a 64 bit con clock a 1 GHz e 512 MB di SDRAM, Zero 2 è fino a cinque volte più veloce dell'originale Raspberry Pi Zero. Per quanto riguarda la dissipazione del calore, Zero 2 W utilizza spessi strati interni di rame per allontanare il calore dal processore, garantendo prestazioni più elevate senza temperature più elevate. Il progetto si basa su un *system-on-a-chip* compatibile con tutti i sistemi di distribuzione Linux. In particolare, la Pi Zero ha anche un'antenna per Bluetooth 4.2 e wi-fi, slot per micro sd dove installare il sistema operativo, connettore per la camera e una micro usb per alimentarlo. Questa strumentazione è stata utilizzata come base per la costruzione finale del pinger, oltre alla registrazione delle vocalizzazioni dei delfini e alla loro analisi.

3.4 Programmi Utilizzati

In base alla configurazione usata, sono stati utilizzati programmi e linguaggi differenti. La descrizione dettagliata dei programmi creati e la loro funzionalità saranno approfondite nel prossimo capitolo; qui saranno presentati solamente i linguaggi usati per la loro creazione. Nella configurazione con la myRIO e quella con il picoscope è stato usato Labview, un linguaggio creato dalla National Instrument che utilizza un sistema a blocchi per la creazione del programma, invece della classica scrittura di righe di codice. Invece con la raspberry è stato utilizzato python.

3.4.1 LabVIEW



LabVIEW utilizza un'interfaccia grafica che consente di unire diversi elementi per fornire il flusso richiesto.

LabVIEW è essenzialmente un ambiente che consente la programmazione in G: si tratta di un linguaggio di programmazione grafica creato dalla National Instruments, inizialmente sviluppato per comunicare tramite GPIB, ma da allora notevolmente aggiornato. Al giorno d'oggi, G può essere utilizzato per applicazioni di test automatizzati, acquisizione dati generale, programmazione FPGA, ecc. LabVIEW è essenzialmente l'interfaccia utente per G. Con lo sviluppo del software, tuttavia, il termine LabVIEW è ora sinonimo del linguaggio G. LabVIEW fornisce inoltre una serie di altre funzionalità tra cui debug, multithreading automatizzato, interfaccia utente delle applicazioni, gestione dell'hardware e interfaccia per la progettazione del sistema. In questo modo, LabVIEW funge da portale per una varietà di strutture, riunendole sotto un unico elemento facile da gestire. LabVIEW funziona su piattaforme Windows, OS X (Apple) e Linux, rendendolo adatto alla maggior parte dei sistemi informatici.

All'interno di LabVIEW sono presenti diversi elementi e concetti fondamentali per il formato e il funzionamento dell'ambiente. Questi includono:

- Ambiente LabVIEW: costituito da LabVIEW VI manager (esploratore progetto), strumenti di programmazione, funzionalità di debug, modelli di esempio già pronti e una semplice interfaccia per i driver hardware;
- VI LabVIEW: è uno "strumento virtuale" che consente di costruire un'interfaccia utente e contiene il codice di programmazione;
- Programmazione LabVIEW G: questo è il linguaggio di programmazione grafica in cui gli algoritmi funzionali sono costruiti utilizzando tecniche di "drag and drop";
- Flusso di dati LabVIEW: questo è il concetto fondamentale che determina l'ordine di esecuzione del programma.

LabVIEW fornisce una potente piattaforma per realizzare un'ampia varietà di applicazioni diverse. Nasce come ambiente per la gestione della programmazione dei test, ma sin dalla sua nascita le applicazioni per le quali può essere utilizzato si sono notevolmente ampliate. Si è espanso

dall'essere un linguaggio grafico di gestione dei test a un ambiente di progettazione di sistemi grafici. Ciò significa che può essere utilizzato per un'enorme varietà di applicazioni interessanti e diverse. Può essere usato non solo per il controllo delle apparecchiature (incluso il controllo del grande collisore di adroni al CERN) e per una varietà di applicazioni di acquisizione dati (inclusa la simulazione dello sviluppo di automobili in cui viene effettuato il monitoraggio dei Big Data), ma anche nell'ambito della progettazione di sistemi in cui è stato utilizzato per lo sviluppo di progetti, dai circuiti RF, alle apparecchiature biomediche, alla tecnologia verde e molto altro.

3.4.2 Python



Python è un linguaggio di programmazione interpretato, orientato agli oggetti, di alto livello, con semantica dinamica, sviluppato da Guido van Rossum. È stato originariamente pubblicato nel 1991. Progettato per essere facile e divertente, il nome "Python" è un cenno al gruppo comico britannico Monty Python.

Python ha la reputazione di linguaggio adatto ai principianti, sostituendo Java come linguaggio introduttivo più utilizzato, perché gestisce gran parte della complessità per l'utente, consentendo ai principianti di concentrarsi sulla comprensione completa dei concetti di programmazione, piuttosto che sui dettagli più minuti.

Python viene utilizzato per lo sviluppo web lato server, lo sviluppo di software, la matematica e lo scripting di sistema, ed è popolare per lo sviluppo rapido di applicazioni e come linguaggio di scripting o di colla, per collegare componenti esistenti grazie alle sue strutture dati integrate di alto livello, tipizzazione dinamica e associazione dinamica. I costi di manutenzione del programma sono ridotti grazie alla sintassi facilmente apprendibile e all'enfasi sulla leggibilità. Inoltre, il supporto di moduli e pacchetti facilita i programmi modulari e il riutilizzo del codice.

Python è un linguaggio comunitario open source, quindi numerosi programmatori indipendenti creano continuamente librerie e funzionalità per esso.

Professionalmente, Python è ottimo per lo sviluppo web backend, l'analisi dei dati, l'intelligenza artificiale e il calcolo scientifico. Gli sviluppatori utilizzano Python anche per creare strumenti di produttività, giochi e app desktop.

Python è stato utilizzato principalmente per creare un sistema sulla raspberry per l'acquisizione dei dati e la produzione dello spettro, oltre alla formazione di una rete neurale per l'identificazione dei delfini attraverso la loro vocalizzazione. Per maggiori informazioni sulla parte di identificazione del pinger, è possibile controllare la tesi scritta da Nicolas Bravi, altro tesista nello stesso laboratorio, che ha trattato questa parte nella tesi "Metodi e tecnologie per il rilevamento di delfini in ambienti da pesca".

3.5 Strumenti Aggiuntivi

Nei test, oltre all'utilizzo nei nostri setup per constatare il corretto funzionamento e nei test preliminari, abbiamo utilizzato anche generatori di funzioni, oscilloscopi, sonde e alimentatori vari (batterie e power bank).

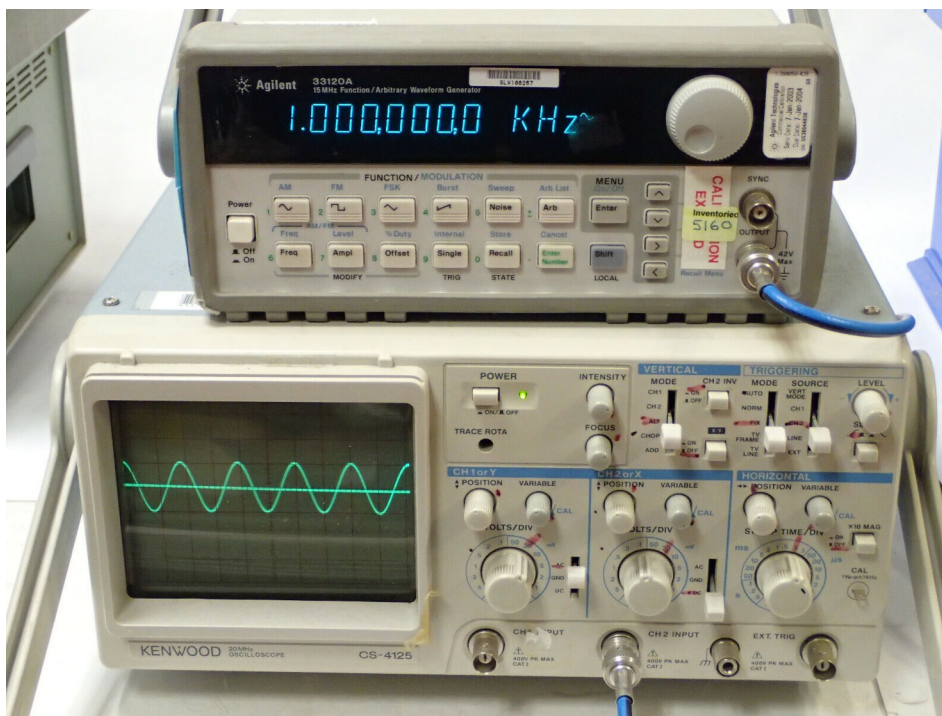


Figura 22 : In alto generatore di funzioni, in basso oscilloscopio

L'oscilloscopio è uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare, su un grafico bidimensionale, l'andamento nel dominio del tempo dei segnali elettrici ed effettuare misure a lettura diretta di tensione (rappresentata sull'asse verticale) e periodo (con il tempo rappresentato sull'asse orizzontale). Per mezzo di un oscilloscopio analogico è possibile ricavare la misura di grandezze quali corrente, potenza ed energia del segnale.

Un generatore di funzioni o formatore d'onda è uno strumento elettronico in grado di generare segnali di diversa forma. Solitamente le forme d'onda più comuni sono sinusoidale, simil-impulsiva, onda quadra, rettangolare, rampa, a dente di sega, triangolare, a gradini, ecc. Il generatore permette di agire su parametri quali la frequenza, l'ampiezza e l'eventuale duty cycle del segnale.



Figura 23 : Filtro rumori di loop

Oltre a questi strumenti, si è utilizzato un filtro hardware per le basse frequenze, soprattutto le frequenze del circuito stesso, un isolatore di rumore usato per eliminare il loop di massa dovuto alla massa comune.

3.6 Disposizione dell'Attrezzatura

Per svolgere i test abbiamo usato una vasca riempita d'acqua, in cui immergere l'idrofono, sulla quale è stato montato un tweter come emettitore di segnale.

Collegando la strumentazione attraverso il generatore di funzioni o il picoscopo, si generava un segnale che veniva emesso dal tweter e l'idrofono immerso captava il segnale e lo mandava al sistema di analisi.



Figura 24 : A destra è presente mini-pc, schermo con tastiera e powerbank di alimentazione, al centro la vasca con l'idrofono collegato al picoscopo

4 FASE DI ACQUISIZIONE

In questa sezione saranno elencate e discusse le metodologie utilizzate per l'acquisizione dei dati e la calibrazione del nostro microfono. Nel prossimo capitolo, saranno mostrati e discussi i risultati ottenuti.

4.1 Acquisizione Dati

Per il corretto funzionamento dei microfoni e dei loro pre-amplificatori, abbiamo bisogno di quattro segnali: alimentazione elettrica (VDD), la messa a terra (GND), clock (CLK) e la trasmissione dati. Per l'alimentazione e la messa a terra, il pre-amplificatore deve essere collegato a una fonte di energia, che può essere la connessione alla rete elettrica, batterie o power bank, mentre il microfono viene alimentato dallo stesso amplificatore. Per il trasferimento dei dati, il picoscopo riceve in input il segnale attraverso l'idrofono, e per osservare il suono catturato deve essere collegato a un computer, dal quale è anche possibile impostare il clock di funzionamento dell'impianto.

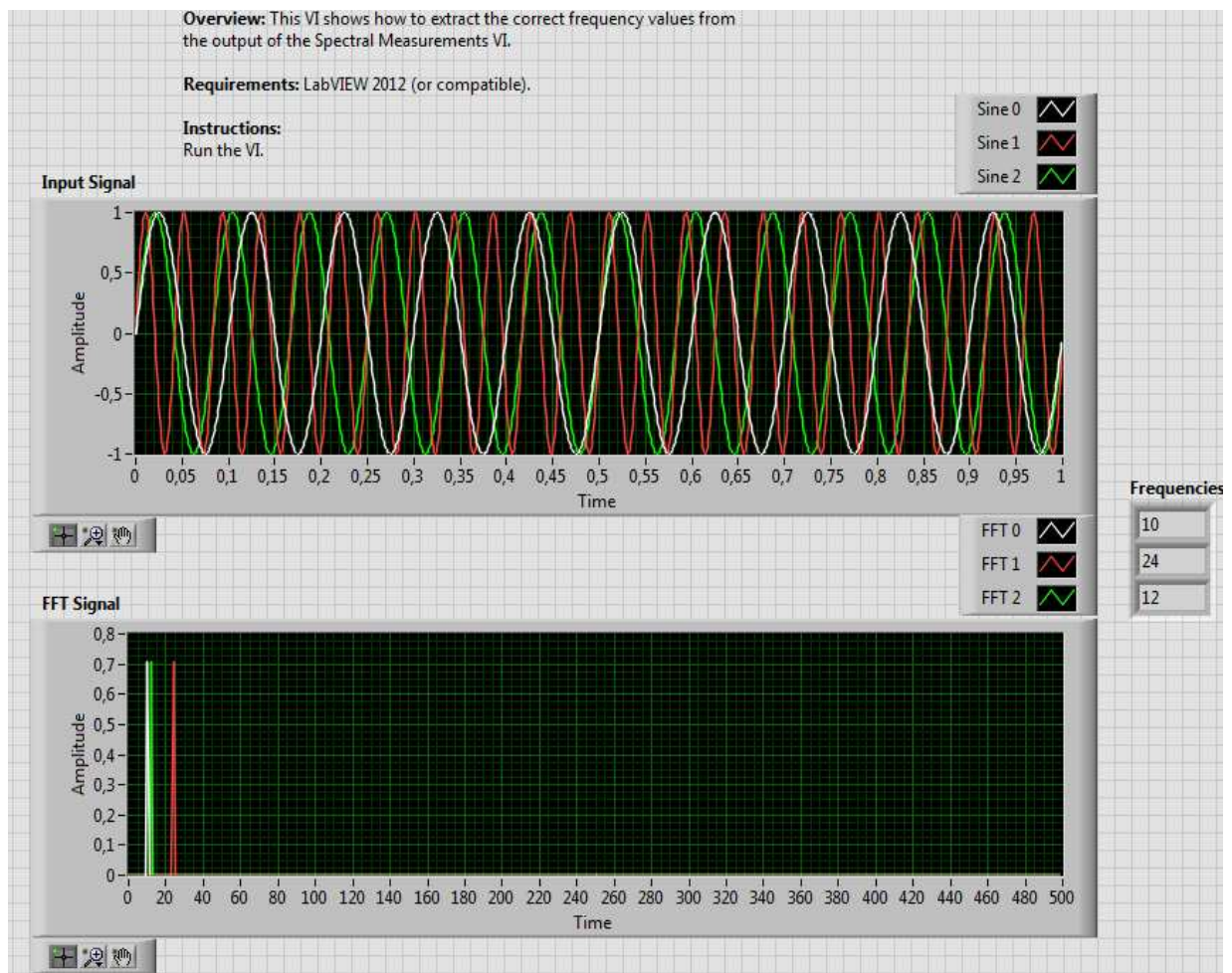


Figura 25 : Esempio studio nel tempo e con la FFT di segnali con LabVIEW

Per il funzionamento della strumentazione e la programmazione della stessa si è utilizzato LabVIEW; in particolare, per il mini-pc e picoscope si è usata la versione 2023 Q1 64bit, per il programma principale, e la versione 2021 P1 64bit, per lo studio dei diagrammi di bode, THD e SNR, usando gli addon Sound and Vibration (per lo studio dei suoni) e Model Analysis (lo studio dei modelli con lo studio della risposta in frequenza con Bode e Nyquist).

4.1.1 Metodo picoscope

Invece di utilizzare il programma della pico-tech, per la visualizzazione e l'analisi dei dati si è deciso di utilizzare LabVIEW, per renderla più semplice e per poter in seguito integrare il programma con estensioni utili per lo studio dei segnali.

Il mini-pc è stato alimentato attraverso un avviatore portatile Telwin drive 13000, il quale ha funzione di power bank, munito di uscite di alimentazione USB e una per laptop da 12/19 V, per testare i tempi di funzionamento di una configurazione portatile; inoltre l'alimentazione tramite batteria limita i disturbi dovuti alla connessione di rete. Per osservare e interagire con il pc, abbiamo utilizzato uno schermo integrato con tastiera e mouse.

Il picoscope veniva alimentato direttamente dal pc attraverso collegamento USB, dal quale avveniva anche la trasmissione di dati per lo streaming.

Il pre-amplificatore è stato alimentato attraverso cavo USB, da prima anch'esso attraverso il pc, in seguito cambiando collegamento di messa a terra, direttamente dalla stessa power bank, poiché per il corretto funzionamento, picoscope ed amplificatore debbono avere massa comune. Questo ha portato in principio all'alimentazione dalla stessa fonte, in seguito, compreso lo sbaglio di costruzione, si è potuto sistemare il problema e cambiare la fonte di alimentazione.

4.1.2 Generazione del Segnale

L'approccio utilizzato è quello della calibrazione per reciprocità: si genera un segnale che poi viene catturato dai vari microfoni, analizzato dal picoscope; infine, vengono messi a confronto i risultati. Per rendere tutto compatto, si è utilizzata la funzione di generazione dello stesso oscilloscopio: attraverso AWG viene emesso un segnale che viene cortocircuitato da una parte con un ingresso, in modo tale da osservare il segnale generato; l'altro ingresso viene collegato all'amplificatore con microfono per catturare il suono. In caso di accertamenti o per generare segnali maggiori di 100 kHz, si è utilizzato il generatore di funzioni.

4.2 Analisi dei Dati

Con la creazione dei programmi LabVIEW si è cercato di creare un analizzatore audio, che mostra il segnale catturato nel tempo e ne analizza lo spettro attraverso la FFT.

4.2.1 Tempo

I segnali tipici analizzati sono segnali stazionari e periodici come onde sinusoidali di tipo analogico, ovvero è un segnali sinusoidali continui nel tempo come in natura.

Dovendo essere digitalizzata, l'onda non può avere un numero infinito di punti che la costituiscono, quindi si deve parlare di risoluzione del segnale, definita come la più piccola variazione nel valore di un segnale di ingresso, che modifica il valore dell'uscita digitale di un conteggio. È il numero con cui vengono definiti i punti tra il massimo e il minimo; per il picoscopo la risoluzione è di 12 bit, ovvero esistono 2048 punti tra il massimo e il minimo. Il generatore di funzioni Tektroniz, invece, è di tipo digitale, ovvero il segnale viene generato come una sequenza di valori discreti che dipendono dal fondo scala.

Il segnale nel dominio del tempo è un'analisi importante per capire se il segnale è acquisito in modo corretto, in particolare è possibile vedere la saturazione con un'area ritagliata e l'influenza delle basse frequenze che modulano il segnale. Inoltre, tracciando l'intero segnale acquisito, è possibile vedere se sono presenti picchi di rumore. In genere, quando appare, questo tipo di rumore viene rimosso al termine del segnale prelevando meno campioni. Anche se comparisse a metà, la misura viene ripetuta. Possono essere presenti anche rumori dipendenti da fattori esterni, quali le riflessioni della vasca dovute alla frequenza di risonanza, rumori esterni derivati dagli altri laboratori oppure rumori del circuito elettrico stesso.

4.2.1 FFT e Analisi dello Spettro

La rappresentazione più comune dell'analisi del segnale acustico avviene attraverso l'analisi in frequenza. Questo viene fatto calcolando la Trasformata Veloce di Fourier (FFT) che è definita da:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2i\pi ft} dt \quad (4)$$

dove $X(f)$ è il segnale nel dominio della frequenza, $x(t)$ il segnale nel dominio del tempo. Per rendere la FFT più accurata esistono diversi tipi di finestatura.

Quando si usa la FFT per misurare la componente di frequenza di un segnale, si stanno basando le analisi su un insieme finito di dati. L'effettiva trasformazione FFT presuppone che si tratti di un set di dati finito, uno spettro continuo che è un periodo di un segnale periodico. Per la FFT, sia il dominio del tempo che il dominio della frequenza sono topologie circolari, quindi i due punti finali della forma d'onda del tempo vengono interpretati come se fossero collegati tra loro. Quando il segnale misurato è periodico e un numero intero di periodi riempie l'intervallo di tempo di acquisizione, la FFT risulta corretta così come se corrispondesse a questa ipotesi. Tuttavia, molte

volte, il segnale misurato non è un numero intero di periodi, quindi la finitezza del segnale misurato può risultare in una forma d'onda troncata con caratteristiche diverse da quelle del segnale originale a tempo continuo, e la finitezza può introdurre cambiamenti netti nel segnale misurato. Le transizioni nette sono discontinuità.

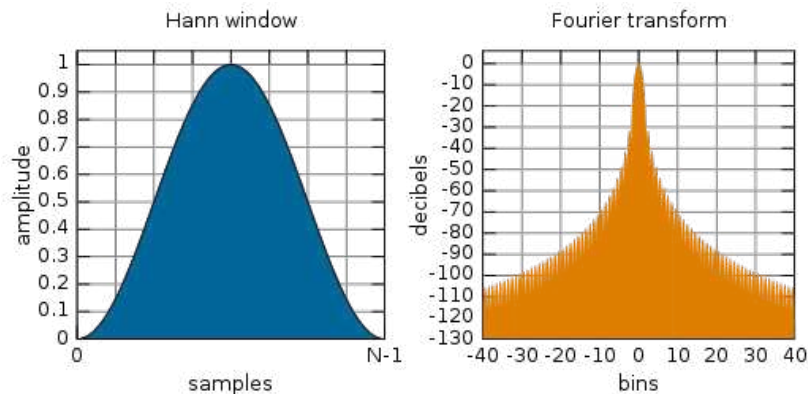


Figura 26 : finestatura hanning

Quando il numero di periodi nell'acquisizione non è un numero intero, gli end point sono discontinui. Queste discontinuità artificiali si presentano nella FFT come componenti in alta frequenza non presenti nel segnale originale. Queste frequenze possono essere molto più alte della Frequenza di Nyquist e sono allineate tra 0 e metà della frequenza di campionamento. Lo spettro ottenuto utilizzando una FFT, quindi, non è lo spettro reale del segnale originale, ma uno spettro imbrattato: sembra che l'energia di una frequenza si diffonda in altre frequenze. Questo fenomeno è noto come perdita spettrale, che provoca la diffusione delle sottili linee spettrali diffuse in segnali più ampi. E' possibile ridurre al minimo gli effetti dell'esecuzione di una FFT su un numero non intero di cicli utilizzando una tecnica chiamata finestatura. La finestatura riduce l'ampiezza delle discontinuità al livello dei confini di ciascuna sequenza finita acquisita dal digitalizzatore.

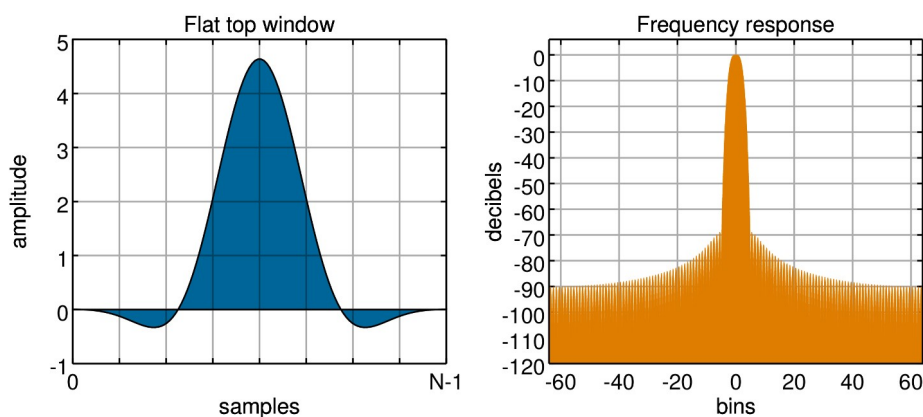


Figura 27 : finestatura flat-top

La finestatura consiste nel moltiplicare la registrazione del tempo tramite una finestra di lunghezza finita con un'ampiezza che varia dolcemente e gradualmente verso lo zero ai bordi. Ciò fa sì che i punti finali della forma d'onda si incontrino e, pertanto, produce una forma d'onda continua senza transizioni brusche.

Nei nostri esperimenti abbiamo usato la finestatura di Hanning e quella Flat-top.

La finestatura Hanning è caratterizzata da un lobo principale stretto e i successivi lobi laterali sono caratterizzati da un lobo con una pendenza veloce nell'ampiezza, che rende il filtro molto selettivo in frequenza. Questo tipo di finestra viene utilizzata per migliorare la precisione in frequenza e rimuovere le perdite spettrali; infatti tipicamente il segnale analizzato presenta un numero non intero di cicli nell'analisi del tempo: di conseguenza, le discontinuità ai confini causano perdite di energia in frequenza nel segnale originale. La finestra di Hanning riduce le discontinuità ai punti finali della forma d'onda, fornendo uno spettro più definito in frequenza.

Lo spettro della finestra Flat-Top è caratterizzato da un lobo principale quasi piatto che riduce l'errore massimo di ampiezza, perché rende il segnale indipendente dalla posizione del segnale in frequenza rispetto alla risoluzione spettrale; di conseguenza, viene raggiunta la precisione del valore di picco. La finestra Flat-Top è il filtro a finestra più utilizzato nella calibrazione dei microfoni, in quanto l'ampiezza di picco dello spettro è fondamentale per calcolare la risposta in frequenza.

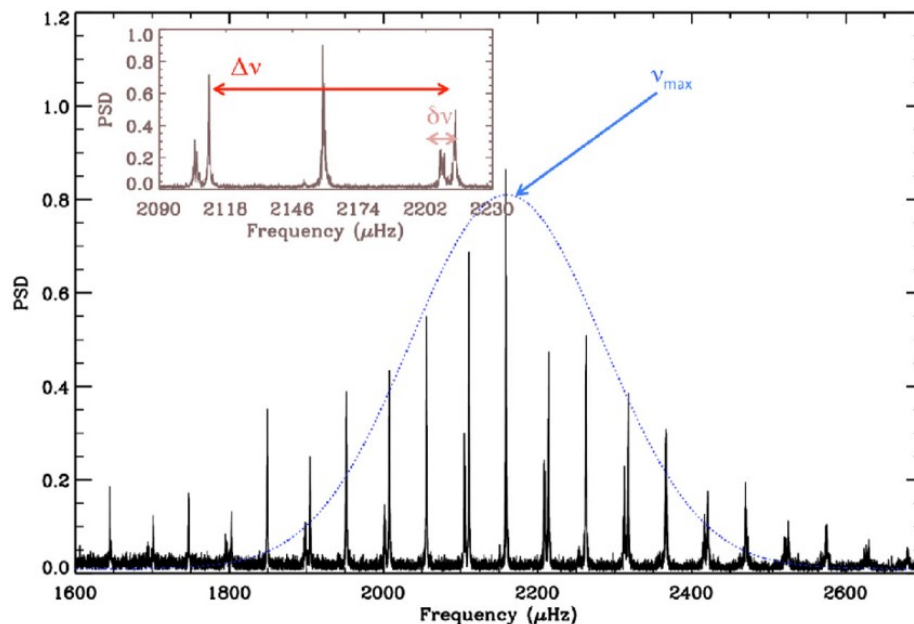


Figura 28 : Power spectrum di un segnale

La Densità di Potenza Spettrale (PSD) descrive quanta potenza di un segnale viene distribuita sulla frequenza. Converte la funzione FFT complessa nel dominio reale, perdendo informazioni sulla fase che non sono importanti nella calibrazione acustica. Per analizzare l'onda sinusoidale digitale e calcolare la sensibilità, è stata implementata nel programma una funzione di analisi che converte il

segnale direttamente nella sua FFT o nelle sua PSD. È stata sempre scelta la finestrata flat-top, in quanto la più adatta per la calibrazione. [7]

4.3 Calcolo delle Caratteristiche dell'Idrofono

Come accennato nei capitoli 2.4.3, 2.4.4, 2.4.6, la risposta in frequenza SNR e THD sono caratteristiche importanti per la calibrazione dei microfoni. Per lo studio di queste caratteristiche, abbiamo generato un segnale con incremento periodico da 10 Hz fino a 100 kHz, registrato sia in cortocircuito, sia attraverso l'idrofono, e salvato in dei file. Questi file poi sono stati analizzati dalla struttura analisi ricavando le caratteristiche.

4.4 Descrizione Programmi

Lo scopo dei programmi creati è quello di emettere e catturare un segnale, attraverso l'utilizzo del picoscope, programmato utilizzando LabVIEW, visualizzandone l'andamento e salvandone i dati, per poi analizzarli per ottenere delle caratteristiche necessarie alla caratterizzazione degli idrofoni.

4.4.1 Programma Picoscope

Il programma per la gestione del picoscope è molto articolato (figura 29), ma è possibile dividerlo in due parti. Per prima cosa si cerca di avviare il dispositivo, cercando di identificarlo, altrimenti viene segnalato un errore. In seguito all'apertura si genera un buffer. Da questo punto il programma si divide in due: nella parte superiore del programma viene avviata la generazione del segnale, seguendo le impostazioni configurate nel front panel, poi viene avviato lo streaming dei dati, i quali vengono salvati nel buffer creato all'avvio..

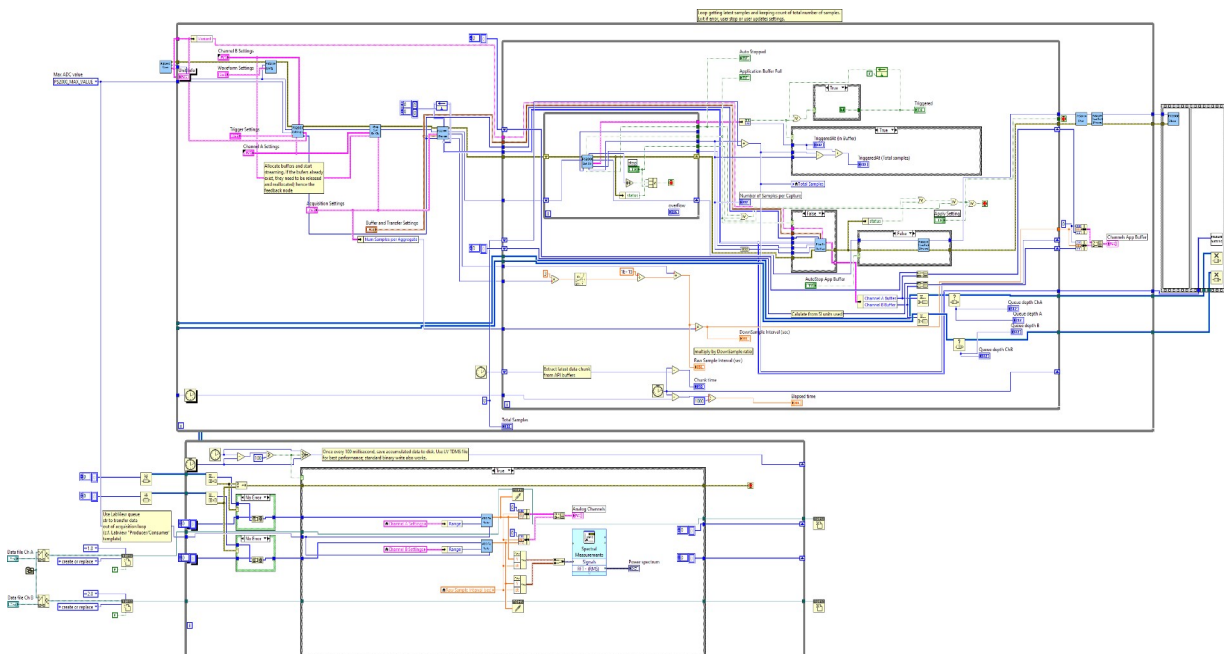


Figura 29 : struttura a blocchi del programma picoscope

Lo streaming si trova all'interno di un ciclo nel quale vi è un error handler, che controlla periodicamente se vengono rilevati errori; in caso positivo, si apre un pop up segnalando il tipo di errore riscontrato. Inoltre sono presenti interruttori che, se utilizzati, servono a determinate condizioni per fermare il programma (trigger vari, numero massimo di elementi da catturare, buffer overflow).

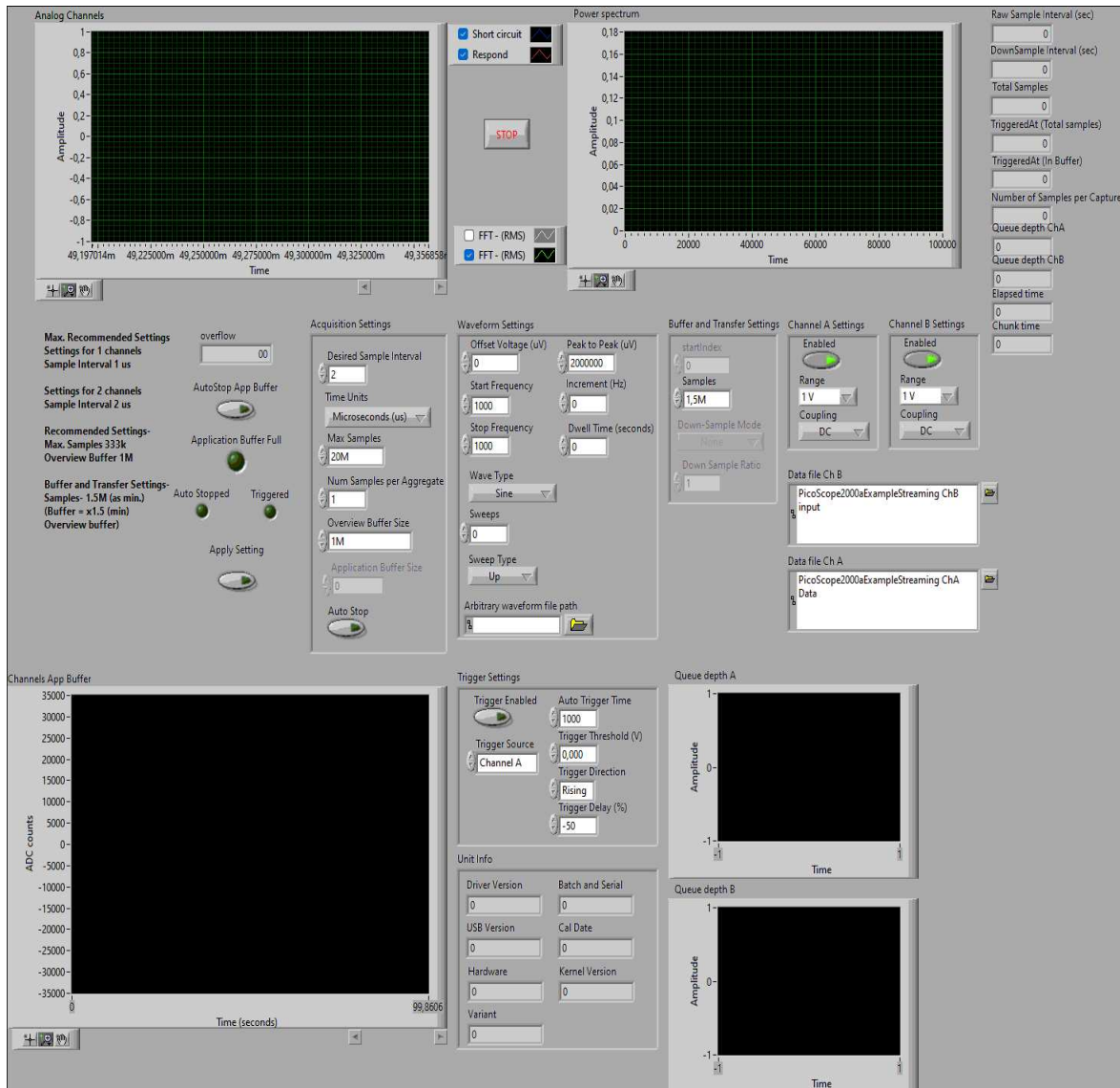


Figura 30 : front panel programma picoscope

Nella parte inferiore il programma estrae, ogni 100ms, i dati dal buffer; questi si convertono dalla scala digitale a quella analogica, e si salvano all'interno di un file tdms. Qui è presente anche la parte di graficazione del suono e il calcolo del power spectrum. Una volta interrotto il programma si chiudono i file, viene svuotato il buffer e viene chiuso il dispositivo.

Da qui è possibile osservare sia i suoni catturati, in base agli ingressi utilizzati, e il loro spettro. E' presente inoltre un tasto apposito per terminare il programma: se si volesse interrompere lo streaming è necessario utilizzare il tasto stop del programma e non quella di LabVIEW, in quanto questo non permette la chiusura dei file e del dispositivo portando ad errori di riconoscimento. Dal front panel (figura 30) possiamo inserire tutte le impostazioni che riguardano sia la generazione del segnale, sia la sua cattura (abilitare e definire la grandezza degli ingressi, grandezza del buffer, tipo di ingresso, frequenza di campionamento, ecc). È possibile anche abilitare il trigger dell'oscilloscopio, oppure scegliere di interrompere il programma una volta pieno il buffer.

4.4.2 Programma Bode, THD e SNR

Utilizzando il programma descritto in 4.4.1, abbiamo salvato in coppie di file le misurazioni del segnale emesso e quelle catturate da ogni combinazione di amplificatore e microfono; da queste, inserendole nel programma apposito, abbiamo ricavato sia Bode che THD e SNR. Per la precisione, usando il picoscopo si è generata un'onda sinusoidale con uno sweep, partendo da 10 Hz fino ad arrivare a 100 kHz, incrementando ogni 4 ms di 10 Hz per ottenere circa 20 MS.

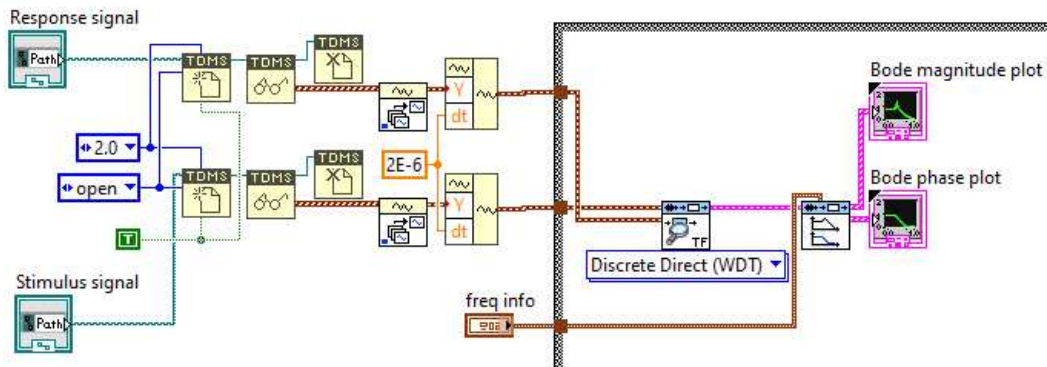


Figura 31 : programma per la costruzione del diagramma di Bode

Una volta ottenuti, i dati vengono inseriti in file nel front panel e si sceglie, attraverso uno switch, se ottenere i diagrammi di Bode o calcolare THD e SNR: nel primo caso, dalla coppia di file si stima la funzione di trasferimento del sistema, dalla quale è possibile calcolare Bode e ottenerne i diagrammi. Nel secondo caso, dalla sweep si cerca di dividere i dati salvati del segnale misurato nelle varie frequenze, in seguito viene calcolato il THD e il SINAD, dal quale è possibile ricavare THD+N di ogni frequenza. Da questi due parametri è possibile anche calcolare il SNR. In seguito i valori vengono trascritti in % per quanto riguarda il THD, mentre il SNR viene ricalcolato in dB.

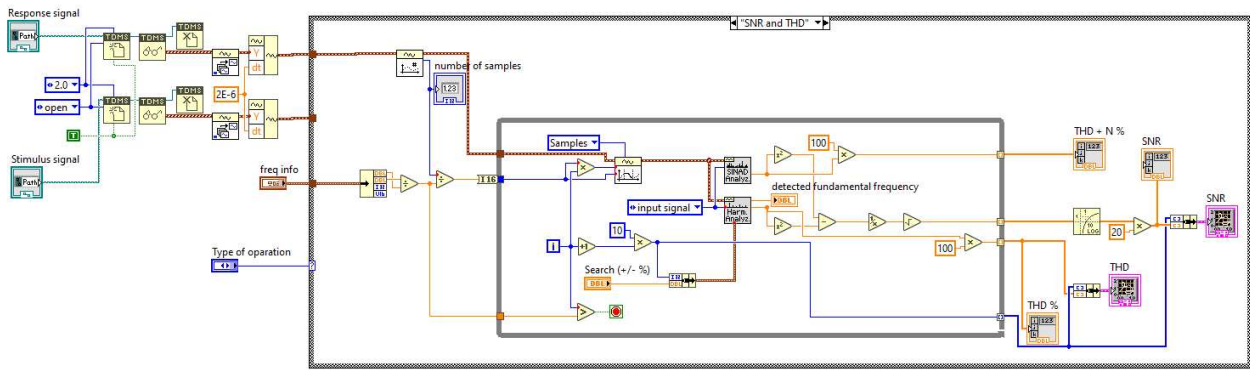


Figura 32 : programma per il calcolo di SNR e THD

Il calcolo del SNR sfrutta la relazione che c'è tra SINAD, THD e lo stesso SNR. SINAD è un parametro delle telecomunicazioni che rappresenta la qualità del segnale uscente da un dispositivo, ed è spesso definito come [6]:

$$SINAD = \frac{P_{segnale} + P_{rumore} + P_{distorsione}}{P_{rumore} + P_{distorsione}} \quad (5)$$

Esiste anche una relazione matematica che lega SINAD, THD e SNR. Nelle equazioni di seguito sono tutte espresse in dB:

$$SNR = 20 \log\left(\frac{S}{N}\right) \quad (6)$$

$$THD = 20 \log\left(\frac{S}{D}\right) \quad (7)$$

$$SINAD = 20 \log\left(\frac{S}{N+D}\right) \quad (8)$$

Le equazioni precedenti possono essere risolte per le frazioni come segue:

$$\frac{N}{S} = 10^{-SNR/20} \quad (9)$$

$$\frac{D}{S} = 10^{-THD/20} \quad (10)$$

$$\frac{N+D}{S} = 10^{-SINAD/20} \quad (11)$$

Siccome i denominatori delle frazioni sono tutte in S, la radice della somma del quadrato di N/S e D/S equivale a N+D/S come segue:

$$\frac{N+D}{S} = \sqrt{\left[\left(\frac{N}{S}\right)^2 + \left(\frac{D}{S}\right)^2\right]} = \sqrt{[10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}]} \quad (12)$$

Quindi è possibile definire $S/(N+D)$ come inverso, quindi:

$$SINAD = 20 \log\left(\frac{S}{N+D}\right) = -10 \log(10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10}) \quad (13)$$

Similarmente:

$$SNR = 20 \log\left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log(10^{-SINAD/10} - 10^{-THD/10}) \quad (14)$$

$$THD = 20 \log\left(\frac{S}{D}\right) = -10 \log(10^{-SINAD/10} - 10^{-SNR/10}) \quad (15)$$

Sapendo però che SINAD è il reciproco di THD + N, è possibile ricavare il SNR da questa formula:

$$SNR = \sqrt{\left(\frac{1}{(THD+N)^2} - THD^2\right)} \quad (16)$$

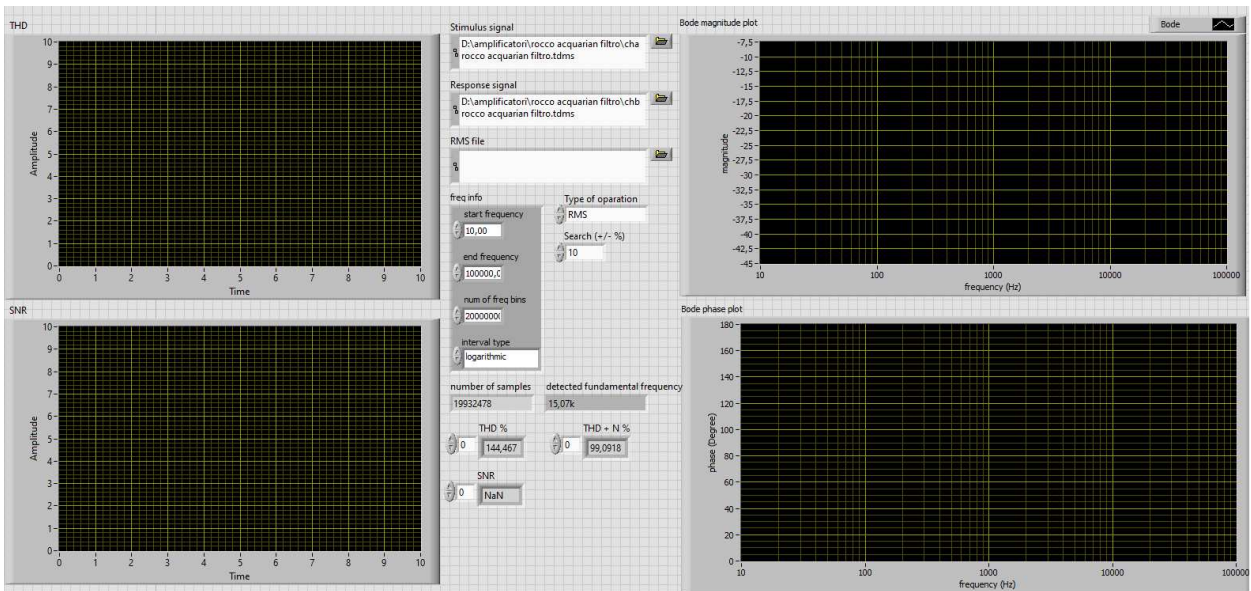


Figura 33 : Fornt panel Bode, SNR e THD

4.5 Ambiente di Studio dell'Idrofono

Per testare e calibrare il microfono è stata utilizzata una vasca in vetro riempita d'acqua, di dimensione 30x50x166, su cui è stato fissato un tweeter a circa 20 cm dal fondo su una delle facce laterali, il quale svolge la funzione di emettitore di segnale.

L'idrofono è stato immerso portandolo sotto il livello dell'acqua a una profondità pari a quella dell'emettitore a circa metà della vasca. Una volta collegato il tweeter al generatore di funzione o al picoscopo, viene emesso il suono e l'idrofono immerso in acqua lo capta, mostrandolo sul front panel del programma utilizzando un grafo per l'andamento temporale e un altro il power spectrum del suono captato.

Sono state generate varie funzioni a diversa ampiezza e diverse frequenze: partendo da onde sinusoidali, si è passati anche ad altre forme d'onda, si è scorso tutto lo spettro di frequenze utili al nostro esperimento passando da 10 Hz fino ad arrivare ai 100 kHz.

In principio è stato collegato il microfono a condensatore, insieme ai vari pre-amplificatori, uno a uno, per testare il comportamento del sistema e le varie amplificazioni, ottenendo così un punto di partenza per lo studio della caratterizzazione del nostro microfono. Ci si è poi spostati successivamente al sea monkey, al H2a e infine, dopo aver raccolto questi dati per la comparazione, è stato testato il microfono autocostruito.

Questo metodo presenta problematiche dovute alle dimensioni ridotte e alla mancata insonorizzazione, ma è stato un punto di partenza per la costruzione del nostro pinger.

5 RISULTATI DELLE MISURAZIONI

In questo capitolo saranno trattate tutte le misurazioni condotte come descritto nel capitolo precedente, con relative illustrazioni dei risultati.

Saranno mostrati i risultati ottenuti con tutti gli amplificatori e i microfoni, in seguito confrontati tra loro per trarne delle conclusioni.

5.1 Tempo e Spettro

Il primo passo è stato comprendere il funzionamento dei pre-amplificatori e il comportamento dei microfoni alle varie frequenze, attraverso il grafico nel tempo e l'analisi spettrale del segnale catturato dalle varie combinazioni delle componenti. In questo modo, si è stati in grado di capire l'andamento dell'amplificatore, comprendendone amplificazione, distorsione introdotta nel segnale, e range di frequenze di operatività dei vari idrofoni.

Sono stati condotti esperimenti, sia utilizzando il filtro per il loop di corrente, sia senza, in alcuni casi utilizzandolo principalmente come adattatore di impedenza, in quanto per costruzione alcuni idrofoni non riuscivano a interagire con gli amplificatori, in altri come componente per la riduzione dei rumori del circuito.

Sono state utilizzate onde a frequenze di 1 kHz e 10 kHz, in quanto frequenze di funzionamento di tutti gli idrofoni/microfoni, nei prossimi capitoli saranno discussi i risultati. E' possibile trovare tutte le immagini delle varie catture nell'[appendice B](#).

5.1.1 Amplificatore Bucck e Microfono a Condensatore

Il primo amplificatore utilizzato è il bucck con specifiche indicate nel capitolo 3.2.1, e il microfono a condensatore, come descritto nel capitolo 3.1.1. Si nota¹ che, oltre all'onda generata a 1 kHz sono presenti molte frequenze che alterano la forma d'onda, generando così rumore e disturbando il segnale; in questo caso, è stato utilizzato il filtro come adattatore per poter utilizzare il pre-amplificatore con il microfono, altrimenti si sarebbe venuti incontro a problematiche di impedenza: alcune informazioni del segnale sarebbero andate perse, "tagliando" il segnale e alterandone la forma.

Osservando più da vicino (figura 34), è possibile notare che l'onda mantiene la forma sinusoidale del segnale generato, ma l'amplificatore, aggiungendo armoniche a diversi livelli, produce armoniche che, sommandosi, introducono alterazioni di frequenza nell'onda visibili dal grafico.

1 Vedere [immagine A](#) appendice B



Figura 34 : onda sinusoidale catturata dal microfono a condensatore

Come nel caso precedente, anche con il segnale a 10 kHz vi sono tante frequenze di disturbo, ma è possibile notare la presenza dell'onda a 10 kHz, la quale predomina insieme ai rumori di fondo¹.

5.1.2 Amplificatore Buck e Idrofono Acquarian

Passando all'idrofono acquarian, è possibile notare che il segnale a 1 kHz si confonde insieme ai rumori del circuito, rendendo difficile la visualizzazione. Inoltre nel caso con il filtro, si può notare che i rumori del circuito sono accentuati, invece che ridotti, ma rendendo l'onda più ristretta e più conforme alla forma del segnale generato.

Come per l'onda a 1 kHz, ritroviamo lo stessa situazione catturando il segnale a 10 kHz: il filtro aggiusta la potenza delle frequenze, abbassando quelle parassitarie, ma aumentando il rumore elettrico. Questo è dovuto alla differenza di impedenza tra il circuito della scheda di amplificazione e quello del filtro: avendo una impedenza minore, vi è una riflessione della corrente del circuito che viene riflessa all'uscita.

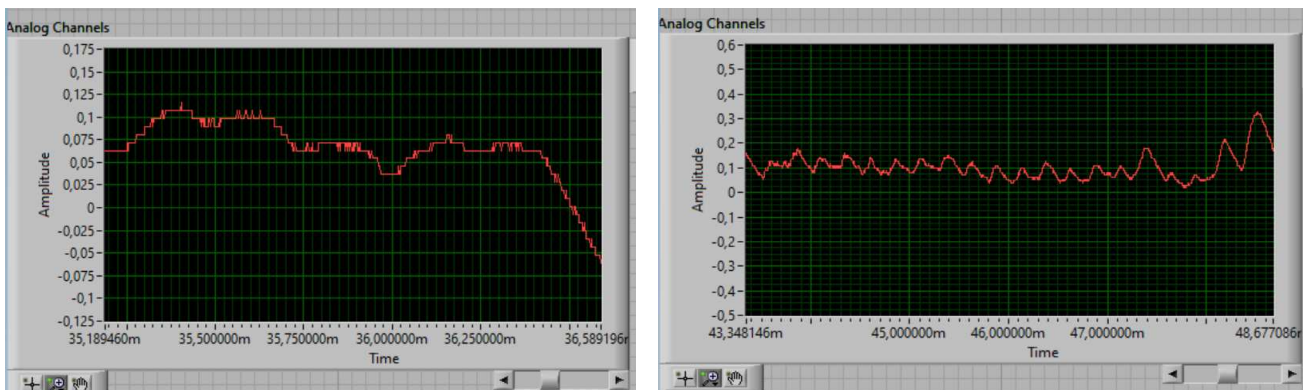


Figura 35 : (destra) cattura dell'onda sinusoidale senza l'uso del filtro, (sinistra) con il filtro

1 Vedere [immagine A](#) appendice B

L'onda sinusoidale, senza l'utilizzo del filtro, a causa delle armoniche inferiori, viene trasformata in un'onda triangolare con la perdita di informazioni dovuta all'interferenza.

Con l'aggiunta del filtro, parte delle armoniche viene eliminata, o attenuata, causando un raddrizzamento del segnale, riportandolo a uno stato sinusoidale¹.

5.1.3 Amplificatore Bucck e Idrofono Sea Monkey

Per l'idrofono sea monkey, come in tutti i casi precedenti, utilizzare il filtro incrementa i rumori del circuito di amplificazione, ma riduce al contempo le armoniche che disturbano il suono. Lo stesso accade anche a 10 kHz, mostrando il disturbo a 4 e 8 kHz, attenuato dal filtro¹.

5.1.4 Amplificatore Bucck e Idrofono Piezoelettrico

A differenza degli altri microfoni, con l'idrofono costruito, sia a 1 che a 10 kHz, senza l'utilizzo del filtro, non si riscontrano risposte dal microfono con l'amplificatore buccak; sono presenti soltanto i disturbi alle basse frequenze. Utilizzando il filtro rumore i disturbi vengono accentuati, in compenso l'idrofono riesce a individuare la frequenza fondamentale dell'onda¹.

5.1.5 Conclusioni Amplificatore buccak

In conclusione, per l'aspetto del segnale catturato e della potenza riscontrata, l'amplificatore buccak introduce rumori a basse frequenze che non sono eliminabili attraverso il filtro hardware; non vi è neanche grande amplificazione della frequenza fondamentale del segnale utilizzato. Inoltre è possibile constatare che l'onda catturata è la stessa per tutti i microfoni, rendendo l'amplificatore inadatto per i nostri scopi.

5.1.6 Amplificatore Grove e Microfono a Condensatore

La prima cosa che si nota dal grafico del tempo utilizzando l'amplificatore grove è che, senza filtro, il segnale contiene soltanto la parte positiva: la sinusoide viene, infatti, tagliata e ne viene mostrata solo la parte positiva. Questa caratteristica deriva dalla composizione hardware del circuito di amplificazione; come mostrato nella figura 15, R7 presenta un'impedenza di ingresso più elevata per l'amplificatore operativo e impedisce ai picchi di rumore negativo di polarizzare all'indietro l'amplificatore operativo. Grazie al filtro, questa resistenza viene adattata creando così un'onda completa (figura 36 confronto tra onda con e senza filtro). Nel caso senza il filtro la potenza rilevata si aggira intorno alla frequenza generata di 1 kHz, insieme a disturbi a basse frequenze, mentre con il filtro vengono aggiunti disturbi a 4 e 8 kHz e filtrati i rumori più bassi, distorcendo l'onda.

¹ Vedere [immagine A](#) appendice B

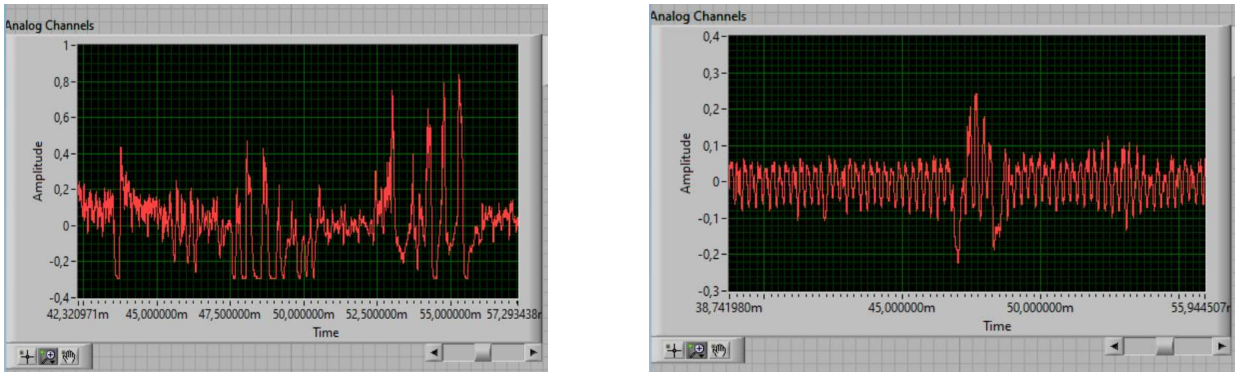


Figura 36 : (destra) cattura dell'onda sinusoidale senza l'uso del filtro, (sinistra) con il filtro

Come nel caso precedente, anche a 10 kHz, il segnale viene disturbato da fondamentali diverse, mostrando un andamento distorto, ma è possibile notare la presenza dell'onda generata².

5.1.7 Amplificatore Grove e Idrofono Acquarian

Anche l'idrofono acquarian, utilizzando la scheda grove, cattura un segnale molto disturbato dalle basse frequenze e soltanto il semiasse positivo; inoltre il filtro rimuove la frequenza a 50 Hz, tipica del rumore elettrico. In compenso, incrementa il disturbo generato dalle frequenze più alte. A differenza del microfono a condensatore, l'acquarian riesce a catturare potenze maggiori².

5.1.8 Amplificatore Grove e Idrofono Sea Monkey

Nel caso del sea monkey, la presenza o meno del filtro cambia poco l'andamento del segnale (: in entrambi i casi è possibile notare il segnale a 1 kHz, con la presenza di un disturbo a 4 kHz. Il filtro attenua semplicemente le frequenze intorno alla fondamentale.

A 10 kHz, la frequenza dell'onda è percepita in modo minimo, lasciando spazio solo ai rumori. Aggiungendo il filtro, scompaiono le frequenze superiori, lasciando soltanto le basse frequenze².

5.1.9 Amplificatore Grove e Microfono Piezoelettrico

Anche per il microfono piezoelettrico la presenza del filtro altera in modo minimo il segnale; in particolare non modifica molto la potenza dei rumori, ma altera la forma dell'onda, rendendola più compatta e più vicina al segnale generato, sia per le basse frequenze sia per le alte².

5.1.10 Conclusioni Amplificatore Grove

L'amplificatore grove ha un difetto principale: tronca il segnale lasciando soltanto la parte positiva; questo rende le cose più difficili per l'analisi del suono, in quanto l'analisi avviene in modo "visivo", utilizzando lo spettro dell'onda catturata: troncatura dell'onda ne potrebbe modificare lo spettro rendendola inutilizzabile. Inoltre dagli esperimenti condotti è emerso che, nonostante

² Vedere [immagine B](#) appendice B

un'amplificazione di 26 dB, il segnale percepito ad alte frequenze ha una potenza così ridotta da risultare ininfluente rispetto ai disturbi.

5.1.11 Amplificatore Costruito e Microfono a Condensatore

A differenza degli altri amplificatori, è possibile notare che la scheda che abbiamo costruito ha meno disturbi alle basse frequenze: i rumori sono più distribuiti lungo lo spettro, rendendo anche più semplice osservare la presenza dell'onda emessa. Nel caso del microfono a condensatore a 1 kHz, si nota la presenza dell'onda insieme a dei disturbi; oltre a quest'ultima, vi sono frequenze parassitarie a 20 e 30 kHz, molto probabilmente dovute a fattori esterni.

Come per le basse frequenze, le componenti del disturbo sono rimaste le stesse, anche se ridotte in potenza, mentre la frequenza emessa compare nello spettro. Gli esperimenti sono stati condotti solo con il filtro, in quanto l'amplificatore è stato costruito basandosi sul microfono piezoelettrico creato: ciò causa problemi di impedenza con gli altri microfoni, pertanto il filtro viene usato come adattatore.

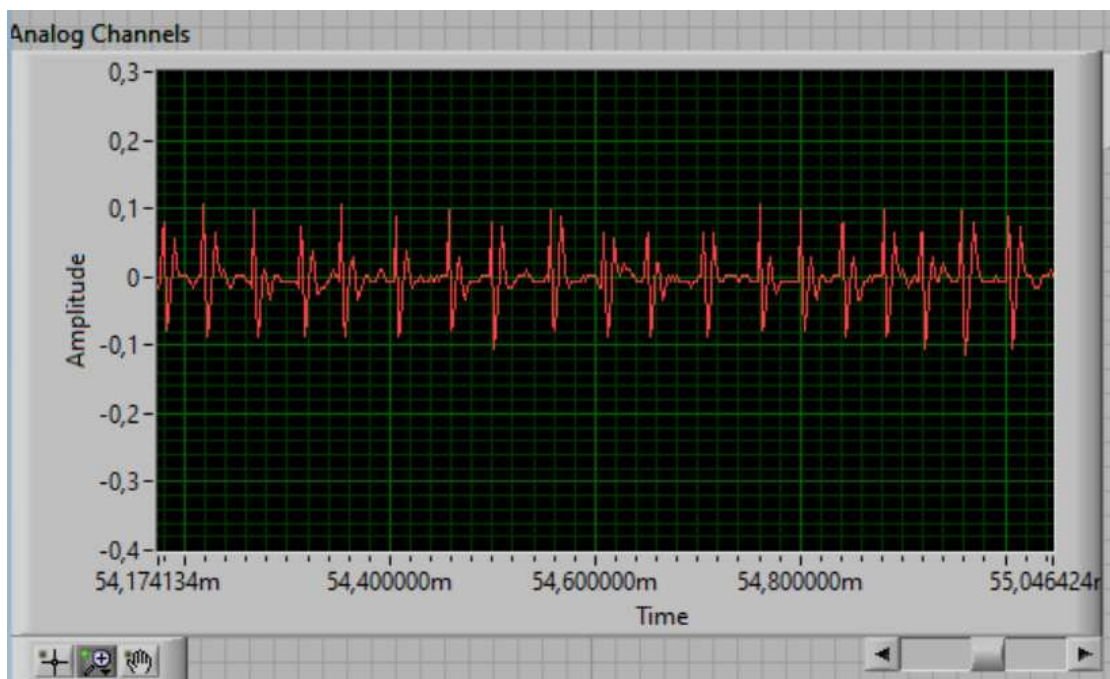


Figura 37 : onda percepita dal microfono a condensatore a 10 kHz

Con l'utilizzo di questo amplificatore, la forma d'onda del segnale percepito (figura 37) rimane molto sinusoidale, rendendo questo componente adatto ai nostri scopi futuri; tuttavia, introduce disturbi a frequenze maggiori degli altri, rendendo l'analisi successiva complessa nell'identificare, nello spettro, l'origine di una componente armonica³.

3 Vedere [immagine C](#) appendice B

5.1.12 Amplificatore Costruito e Idrofono Acquarian

Utilizzando l'idrofono acquarian, si ottiene una forma dell'onda molto simile a quella ottenuta con il microfono a condensatore, visto che anche l'acquarian è costruito utilizzando la tecnica a condensatore. A differenza del microfono, però, i rumori di fondo sono molto più accentuati, rendendo minima l'influenza della frequenza fondamentale.

In questo caso, oltre all'esperimento condotto con un segnale a 10 kHz, è stata generata anche una sinusoide a 70 kHz, per metterla a confronto con la cattura ottenuta con l'idrofono costruito, in quanto l'acquarian è l'unico idrofono utilizzato in grado di raggiungere i 100 kHz di frequenza. Nel caso della 10 kHz, il segnale nel tempo satura l'ingresso rendendo difficile la lettura; questo mostra che l'amplificatore, a differenza degli altri utilizzati, ha un guadagno stabile fino alle alte frequenze, rendendo l'onda catturata lineare lungo lo spettro. La frequenza, però, è poco visibile nello spettro in quanto sono presenti diversi disturbi che la coprono.

A 70 kHz, invece, prevale la frequenza fondamentale, e analizzando nel tempo si può osservare un guadagno inferiore, non satura l'ingresso, e l'onda comincia a perdere la sua forma sinusoidale, a causa del fatto che l'utilizzo del filtro limita la sensibilità ad alte frequenze³.

5.1.13 Amplificatore Costruito e Idrofono Sea Monkey

Anche per l'idrofono sea monkey è stato necessario utilizzare il filtro come adattatore di impedenza, ma rispetto agli altri idrofoni utilizzati il risultato ottenuto è molto migliore: non risultano armoniche di disturbo all'interno dello spettro e l'onda mantiene un andamento sinusoidale (figura 38).

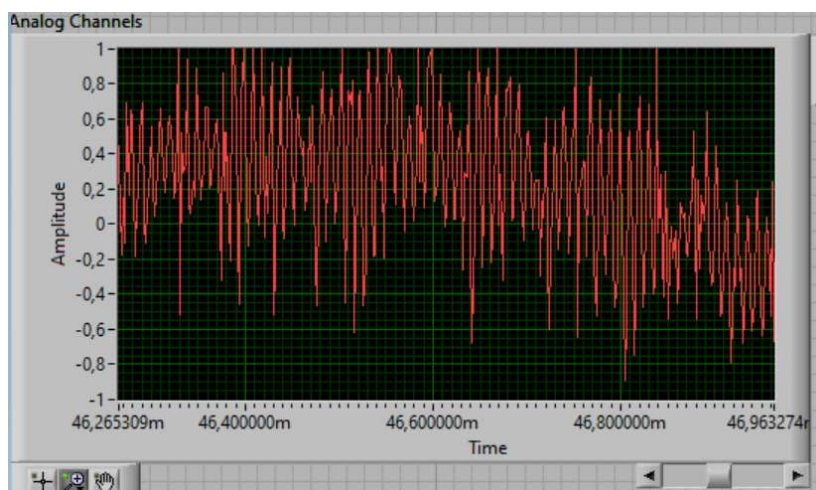


Figura 38 : onda percepita dall'idrofono sea monkey a 1 kHz

3 Vedere [immagine C](#) appendice B

Mentre frequenze maggiori cominciano a comparire distorsioni e la frequenza fondamentale si attenua³.

5.1.14 Amplificatore Costruito e Idrofono Piezoelettrico

L'amplificatore è stato costruito in modo da avere un maggior rendimento con l'idrofono da analizzare, di conseguenza i risultati ottenuti con questi esperimenti mostreranno segnali più fedeli che in tutti gli altri casi.

Come è possibile notare dallo spettro, la frequenza percepita dall'idrofono corrisponde alla frequenza fondamentale del segnale, con la presenza aggiuntiva di disturbi soprattutto dovuti alla 50 Hz, frequenza della corrente del circuito, e ad armoniche superiori. Il rumore del circuito elettrico fa in modo di generare una seconda sinusoide, che si aggiunge all'onda generata. Utilizzando il grafico del tempo, è possibile notare la presenza di due sinusoidi: la prima, la più esterna, corrisponde all'onda del circuito a 50 Hz; ingrandendo, si intravede una seconda sinusoide interna corrispondente all'onda a 1 kHz (figura 39).

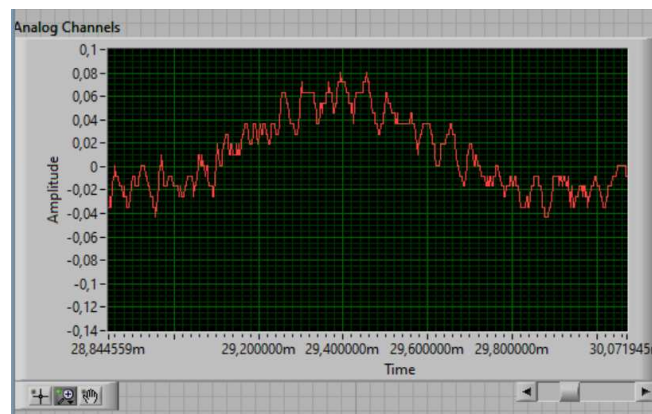


Figura 39 : onda percepita dal microfono piezoelettrico a 1 kHz

Aggiungendo il filtro, le basse frequenze vengono attenuate fino a scomparire, eliminando così l'onda generata e amplificando le armoniche superiori.

Anche a frequenze maggiori il comportamento dell'idrofono non cambia: la forma d'onda rimane sempre una doppia sinusoide, dovuta ai rumori di fondo del circuito, mentre la sinusoide interna concorda con il segnale generato³.

A differenza del caso precedente, l'utilizzo del filtro non rimuove la frequenza fondamentale del segnale, ma rimuovendo la 50 Hz elimina la seconda sinusoide raddrizzando l'onda.

Grazie alla linearità e alla coerenza di queste catture, si è utilizzato questo amplificatore per cercare di capire quali sono i limiti dell'idrofono costruito: utilizzando questa configurazione, si è emesso un segnale sempre crescente e si è osservata la forma d'onda per capire il range di operabilità

³ Vedere [immagine C](#) appendice B

dell'idrofono. Si è scoperto che, aumentando la frequenza oltre i 70 kHz, l'onda comincia a perdere potenza e informazioni, trasformando la sinusoidale in un'onda più rettangolare. Da questo abbiamo dedotto che il limite di acquisizione dell'idrofono, senza perdita di informazioni, è di circa 70 kHz (figura 40).



Figura 40 : onda percepita dal microfono piezoelettrico a 70 kHz

5.1.15 Conclusioni Amplificatore Costruito

La prima cosa da osservare è la poca compatibilità dell'amplificatore con i vari idrofoni: per utilizzarlo, a parte con l'idrofono stampato, è stato necessario usare un componente aggiuntivo per l'adattamento dell'ingresso con l'uscita del microfono, rendendolo poco compatibile. Da un altro punto di vista, il funzionamento dell'amplificatore con il soggetto del nostro studio ha dato risultati molto migliori rispetto agli altri amplificatori utilizzati, rendendolo, per questo componente specifico, la migliore soluzione.

In conclusione, tra tutti quelli utilizzati, l'amplificatore costruito ha dato risultati più soddisfacenti, rendendolo la soluzione migliore, anche se vi sono problemi che bisogna risolvere, come la presenza eccessiva del rumore di fondo che introduce una seconda onda al di fuori del segnale.

5.1.16 Conclusione degli Esperimenti nel Tempo e nello Spettro

Osservando tutti gli esperimenti condotti utilizzando la ricostruzione dello spettro e della forma d'onda nel tempo, è stato possibile constatare il range di frequenze di funzionamento dell'idrofono, in quanto superata una certa frequenza vi era perdita di informazione, risultando in un superamento del range di funzionalità.

Inoltre è stato constatato che, per ottenere misurazioni soddisfacenti, l'amplificatore migliore è quello che abbiamo costruito, in quanto la scheda grove elimina il semipiano negativo dell'onda, portando a una mancanza di dati e quindi a un'eventuale scorretta interpretazione del segnale.

L'amplificatore buck, nonostante l'amplificazione di 20 dB, funziona fino a una frequenza non maggiore di 50 kHz, troppo bassa per i nostri scopi, e introduce diverse armoniche di disturbo. L'amplificatore costruito ha una pessima compatibilità con componenti non specifiche; in aggiunta, introduce una componente di disturbo del circuito che modifica il comportamento dell'onda. In conclusione, si è riusciti a ottenere una risposta sia nel dominio del tempo, sia nel dominio delle frequenze, e a identificare il range di funzionalità dei microfoni. Il passo successivo consiste nell'utilizzare il programma per generare un segnale sinusoidale crescente, captarlo e salvarlo, per poi analizzarne la risposta in frequenza, la distorsione dovuta alle armoniche e al rapporto con il rumore.

5.2 Risposta in Frequenza

Come descritto nel capitolo 2.5.1, il rapporto tra la potenza del segnale rilevato dal microfono e la sua pressione, in dB, descrive la sensibilità.

Dal nostro sistema non è possibile conoscere con esattezza la pressione sonora, in quanto il suono viene prodotto da un'onda sinusoidale generata da un generatore di funzioni attraverso un tweeter, quindi non è possibile scegliere la pressione di emissione come in altri sistemi.

Nel capitolo 2.5.6 si parla della risposta in frequenza come la differenza di sensibilità tra i due segnali, di conseguenza è possibile ricavare la sensibilità degli idrofoni utilizzando la risposta in frequenza, per poi rapportarla con la sensibilità dataci dal produttore per ricavare, per correlazione, la sensibilità del nostro idrofono.

Prima di riportare i risultati, c'è da considerare che la sensibilità degli idrofoni è descritta come dB re V/ μ Pa, in quanto calcolata all'interno di un fluido, mentre quella del microfono in dB re V/Pa. Considerando che il tweeter si trova attaccato sulla parete della vasca nella parte esterna, è ragionevole considerare che, senza conoscere l'esatta pressione, il suono si propaghi in aria per poi trasmettersi in acqua; di conseguenza è opportuno convertire la sensibilità degli idrofoni in V/Pa per poi ritornare in μ Pa.

Quindi considerando che:

$$1 \text{ Pascal} = 1000000 \mu \text{ Pascal} \quad (17)$$

è possibile ricavare la sensibilità, attraverso le proprietà dei logaritmi:

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b) \quad (18)$$

quindi:

$$\text{Sensitivity} = 20 \log \left(\frac{\text{Output voltage}_V}{\text{Sound pressure}_{\mu Pa}} \right) \left[\frac{V}{\mu Pa} \right] \quad (19)$$

$$\text{Sensitivity} = 20 \log \left(\frac{\text{Output voltage}_V}{\text{Sound pressure}_{Pa}} \right) \left[\frac{V}{Pa} \right] \quad (20)$$

$$20 \log \left(\frac{\text{Output voltage}_V}{\text{Sound pressure}_{\mu Pa} * 1000000} \right) \quad (21)$$

$$20 \left[\log \left(\frac{\text{Output voltage}_V}{\text{Sound pressure}_{Pa}} \right) - \log \left(\frac{1}{1000000} \right) \right] \quad (22)$$

Così facendo sappiamo che la sensibilità dell'acquarian diventa -60 dB re V/Pa e quella del sea monkey -82 dB re V/Pa e, in questo modo, possiamo relazionare tutti gli strumenti utilizzati. Dai diagrammi sarà necessario considerare anche l'amplificazione portata dagli amplificatori, quindi occorrerà sottrarre il gain aggiunto dall'amplificazione, rimosso ogni volta nell'analisi dei dati.

5.2.1 Microfono a Condensatore

Partendo dal microfono a condensatore ci si aspetterebbe, considerando la sua sensibilità di -55 dB, una risposta piatta con un picco, a indicare una maggiore sensibilità intorno alla massima frequenza di funzionamento (16 kHz).

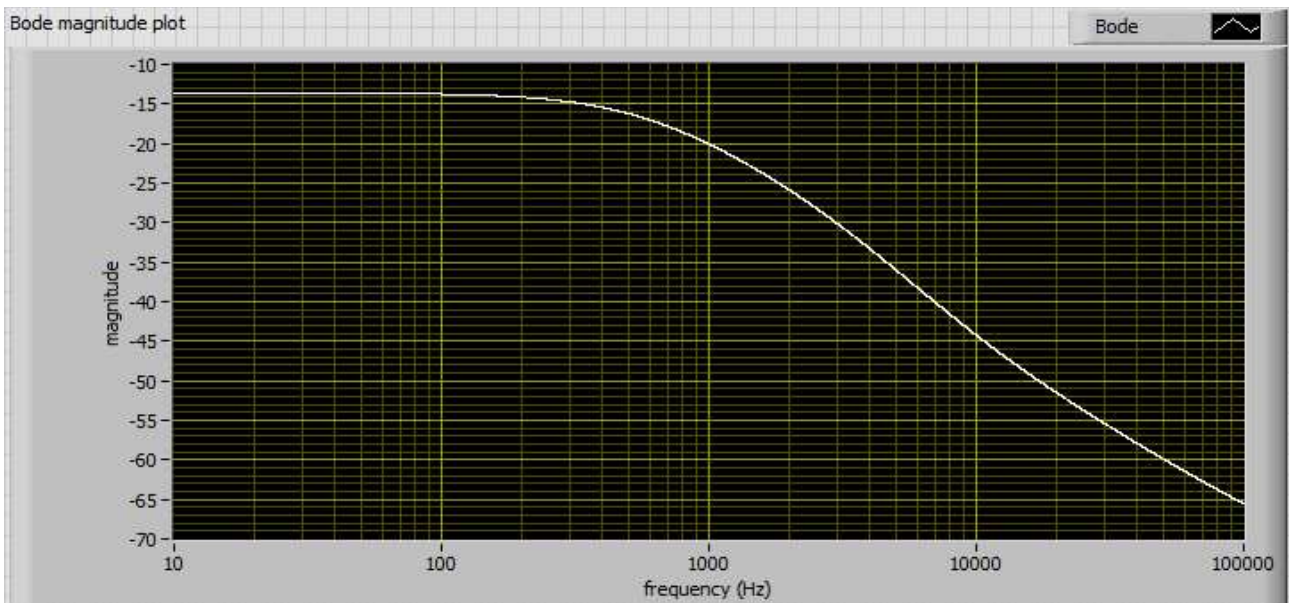


Figura 41 : Diagramma di Bode delle ampiezze del microfono a condensatore con amplificatore bucc e filtro

Dai grafici è possibile osservare che non ha questo tipo di comportamento. Partendo dal caso dell'amplificatore buck, con un gain di 20 dB, il microfono conserva un andamento lineare fino a circa 1 kHz, per poi decadere, partendo da una sensibilità di circa -35 dB, fino ad arrivare ad -90 dB (figura 41). Considerando il range di funzionamento, il comportamento oltre i 10 kHz è stimato nella costruzione della funzione di trasferimento, dovuto principalmente ai rumori di fondo. Di conseguenza, tenendo in considerazione i dati fino al range di funzionalità, si ottiene una sensibilità che varia da -35 fino a -65 dB; la maggiore sensibilità alle basse frequenze è dovuta all'aggiunta del filtro, il quale eliminando i disturbi ne migliora le prestazioni.

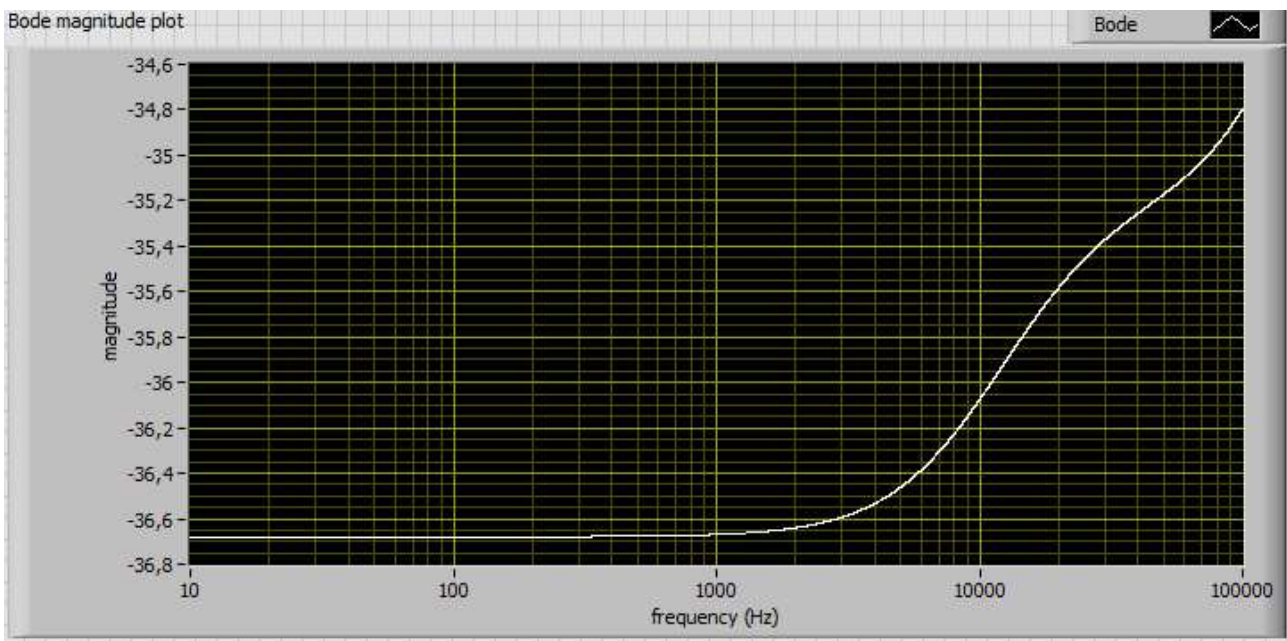
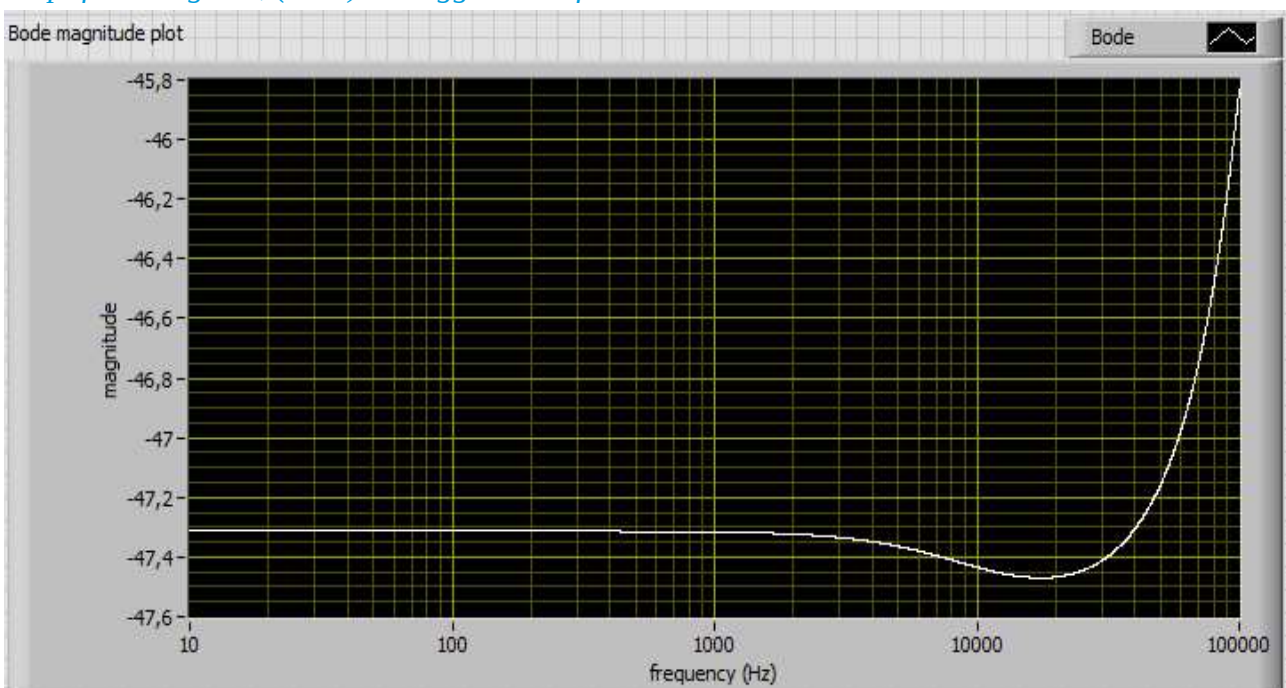


Figura 42 : Diagrammi di Bode delle ampiezze del microfono a condensatore (sopra) con amplificatore grove, (sotto) con aggiunta di filtro



Passando all'amplificatore grove, con un gain di 26 dB (figura 42), si osserva un comportamento differente: partendo da un andamento lineare, si ha un incremento della sensibilità alle alte frequenze. Ignorando i risultati oltre i 10 kHz si può osservare che, nel caso senza filtro, è stabile a circa -62,5 dB fino a 3 kHz, per poi aumentare fino ad arrivare a -62 dB, un lieve incremento presente anche nella descrizione del produttore. Utilizzando il filtro, si ha una maggiore stabilità: la sensibilità rimane costante per tutto il range utile, anche se ha perso sensibilità, in quanto rimane intorno ai -73,5 dB, un comportamento opposto a quello dell'amplificatore buck.

In ultimo l'amplificatore costruito, con un gain di 20 dB, mostra un comportamento simile a quello ottenuto con l'amplificatore grove, ovvero si ha un andamento lineare fino a circa 3 kHz, partendo da -72,5 dB, per poi aumentare, in modo più rapido del precedente amplificatore, fino ad arrivare a una sensibilità di circa -65 dB (figura 43).

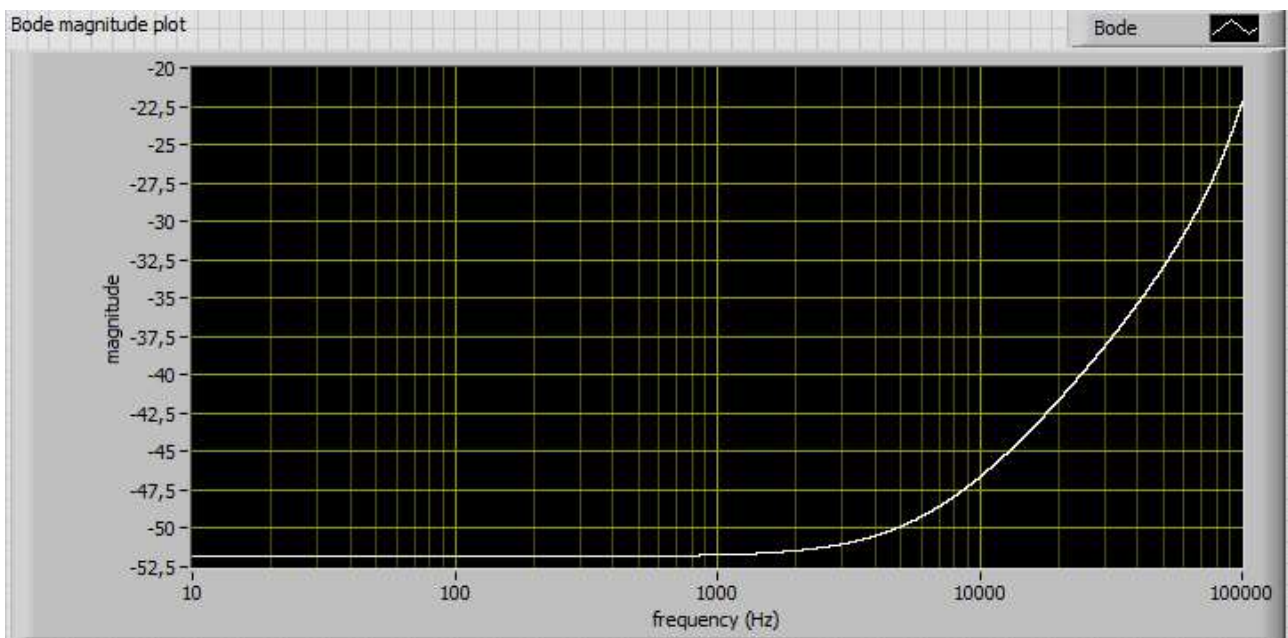


Figura 43 : Diagramma di Bode delle ampiezze del microfono a condensatore con amplificatore costruito e filtro

In conclusione il microfono a condensatore ha un comportamento molto simile a quello indicato dal costruttore; le differenze sono causate principalmente dall'utilizzo degli stessi amplificatori, i quali, pur incrementando la potenza del segnale in ingresso, introducono dei disturbi che, insieme al filtro, distorcono l'andamento della risposta del microfono.

Per dare una stima alla sensibilità del microfono, utile per comprendere la distorsione nelle letture, necessaria per la stima della sensibilità dell'idrofono costruito, possiamo utilizzare la media delle misurazioni, ottenendo una sensibilità di circa:

- 62 dB re V/Pa \pm 7 dB

5.2.2 Idrofono Acquarian

L'idrofono studiato successivamente è l'acquarian, con la sua sensibilità di -180 dB re $V/\mu\text{Pa}$, convertito in -60 dB re V/Pa . Il suo andamento, secondo i dati del produttore, dovrebbe essere lineare con una differenza di 4 dB tra i 20 Hz e i 4 kHz, quindi stabile ad alte frequenze.

Partendo dall'uso dell'amplificatore bucck, $+20$ dB, è possibile notare (figura 44), sia con l'utilizzo del filtro che in assenza di esso, una linearità fino ai 1000 Hz; successivamente vi è una caduta di sensibilità. In assenza di filtro, partendo da una sensibilità di -55 dB, si ha un incremento nell'area tra i 100 e i 1000 Hz di 5 dB, per poi cadere in modo lineare fino a -100 dB.

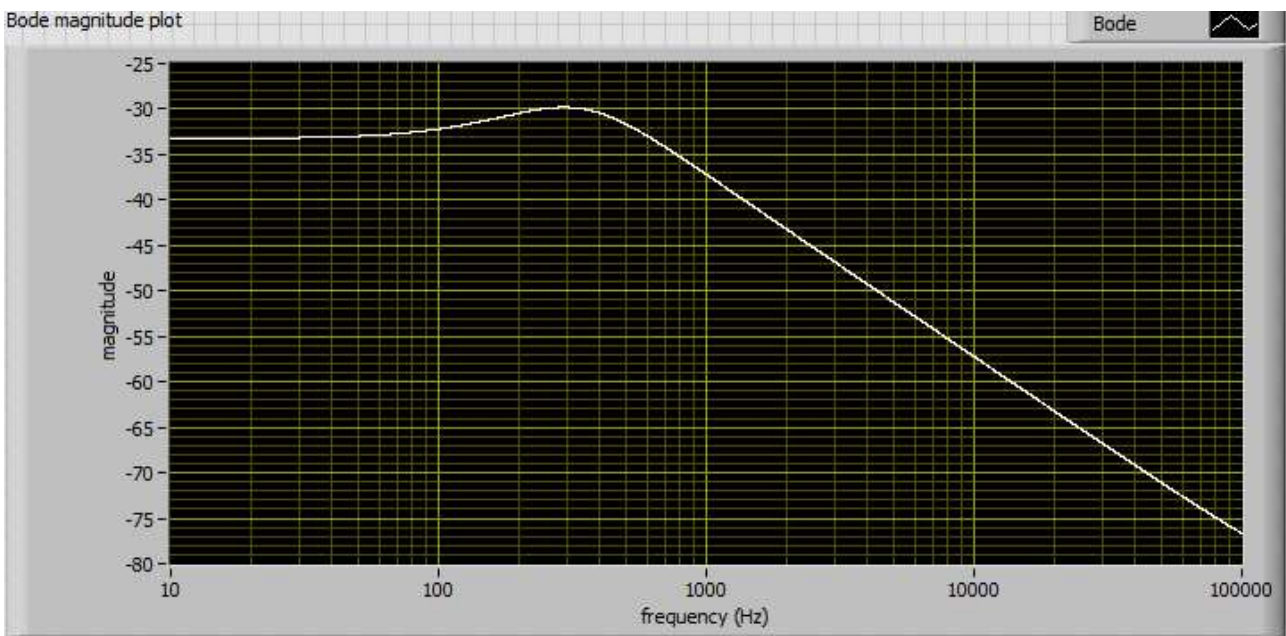
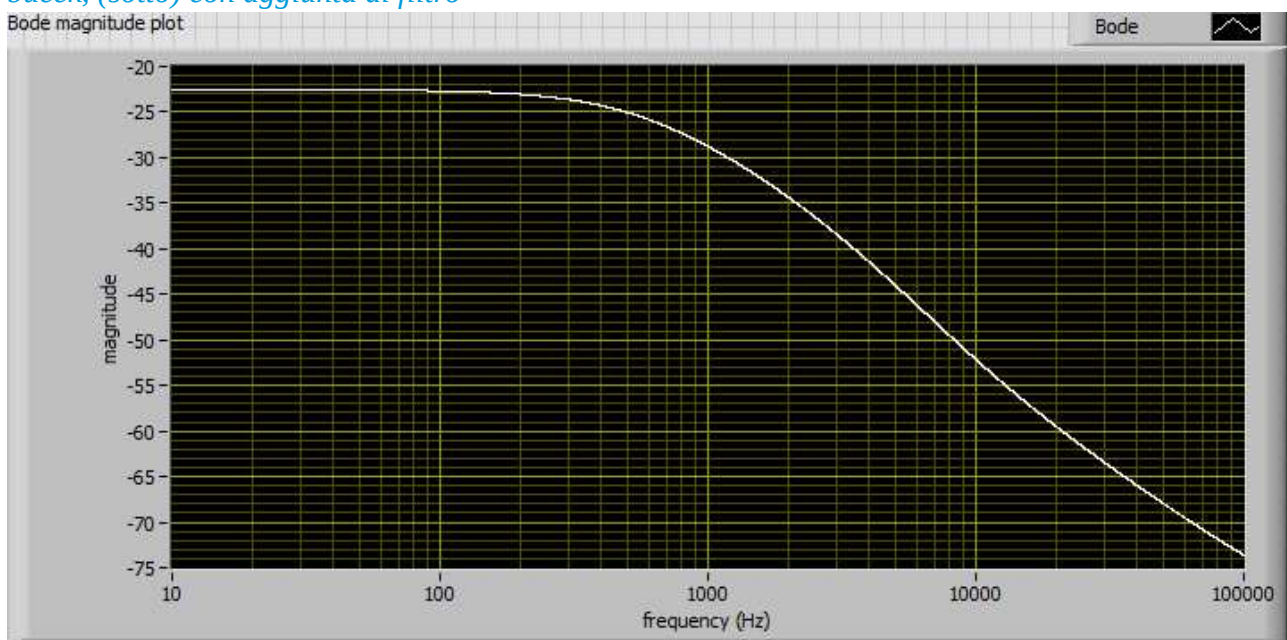


Figura 44 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono acquarian (sopra) con amplificatore bucck, (sotto) con aggiunta di filtro



Con il filtro invece vi è una sensibilità maggiore, come nei casi precedenti con il microfono a condensatore, partendo da -45 dB, ma all'altezza dei 1000 Hz si ha la stessa caduta di sensibilità fino ad arrivare a -95 dB.

Nel caso dell'amplificatore grove, gain 26 dB (figura 45), ci troviamo in una situazione differente rispetto agli esperimenti precedenti: nel caso del microfono a condensatore vi era un incremento della sensibilità del microfono alle alte frequenze, a differenza dell'idrofono acquarian.

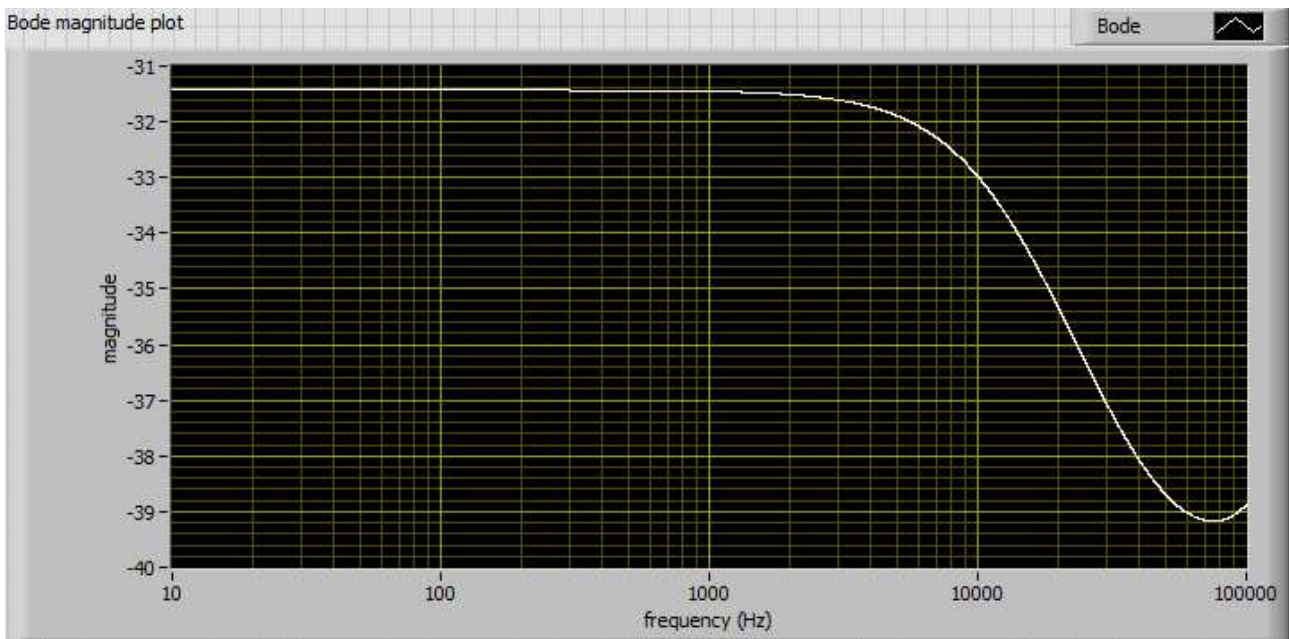
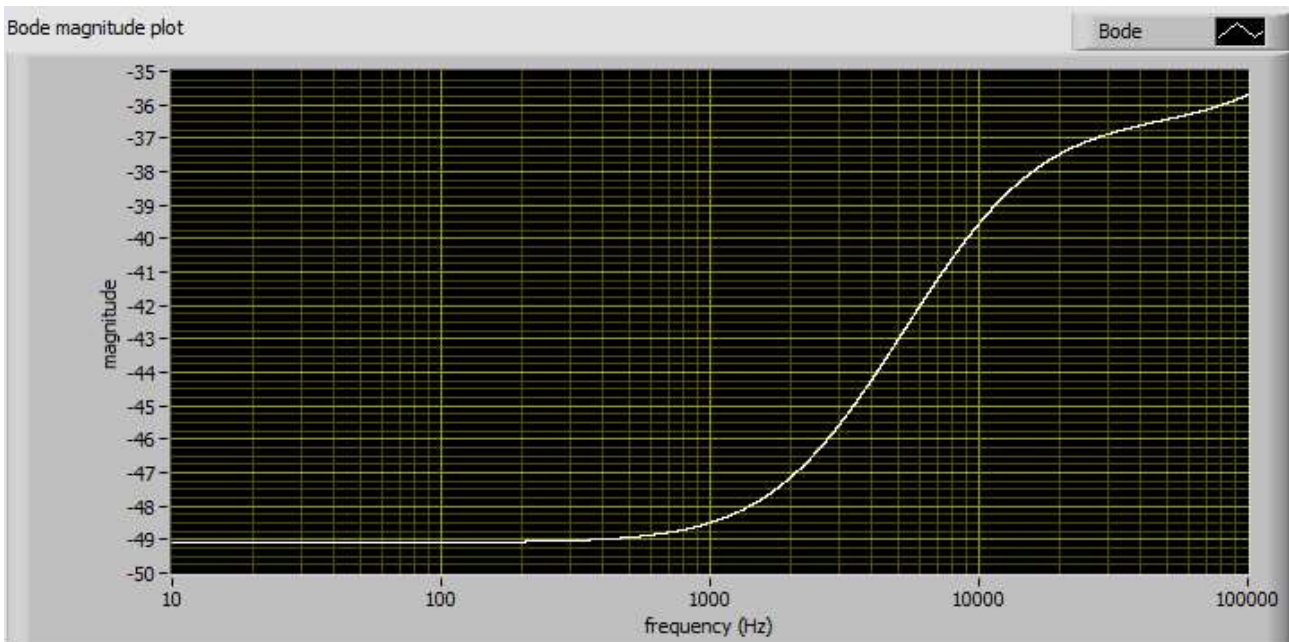


Figura 45 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono acquarian (sopra) con amplificatore grove, (sotto) con aggiunta di filtro



Senza utilizzare il filtro, si ha una sensibilità costante a -57 dB fino a circa 10 kHz, per poi decrescere in modo ripido fino a -66 dB, si ha una caduta di sensibilità tra 10 e 50 kHz. Questa

situazione può essere dovuta al range di amplificazione della scheda grove: essendo la scheda di un microfono, il range di frequenze tipico è tra i 100 Hz e i 20 kHz, portando l'amplificazione ad alte frequenze a essere non necessaria, di conseguenza vi sarà sempre una caduta oltre i 20 kHz di frequenza (tenendo sempre in considerazione che questi diagrammi sono ricavati da una stima della funzione di trasferimento). Utilizzando il filtro riscontriamo lo stesso comportamento, o molto simile, del microfono a condensatore: partendo da una sensibilità di -75 dB, è costante fino al 1 kHz per poi aumentare fino a -62 dB.

Nell'ultimo esperimento con l'acquarian, utilizzando l'amplificatore costruito, gain 20 dB, e il filtro, si ha linearità con -65 dB fino a 1 kHz, poi la sensibilità aumenta fino a raggiungere i -30 dB, rendendo l'idrofono più sensibile alle alte frequenze (figura 46).

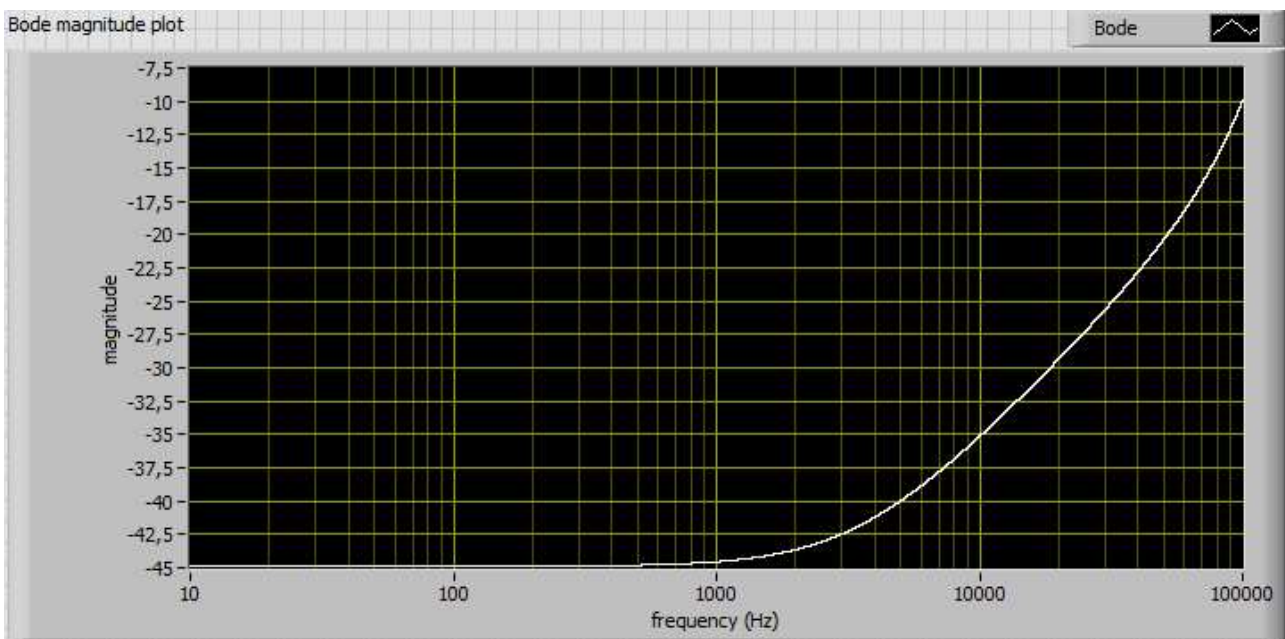


Figura 46 : Diagramma di Bode delle ampiezze dell'idrofono acquarian con amplificatore costruito con aggiunta di filtro

In conclusione l'idrofono acquarian ha mostrato un andamento, con il buck e l'amplificatore costruito, differente da quello datoci dal costruttore, dovuto principalmente all'utilizzo del filtro, che rimuovendo alcune frequenze fondamentali ne altera l'andamento, e agli amplificatori stessi che, in base al range di frequenze di amplificazione, possono rendere il segnale catturato più intenso, di conseguenza il microfono risulterà più sensibile.

Utilizzando i dati raccolti è possibile stimare la sensibilità in V/Pa dell'acquarin, per poi convertirlo:

-64 dB re V/Pa \pm 10 dB ovvero **-184 dB re V/ μ Pa \pm 30 dB**

5.2.3 Idrofono Sea Monkey

Il terzo idrofono utilizzato negli esperimenti è stato il sea monkey, di cui abbiamo pochi dati, visto che è venduto come idrofono artigianale. Conosciamo solo la sua sensibilità che corrisponde a -202 dB re V/ μ Pa, corrispondente a -82 dB re V/Pa, ma non siamo a conoscenza della sua risposta alle frequenze.

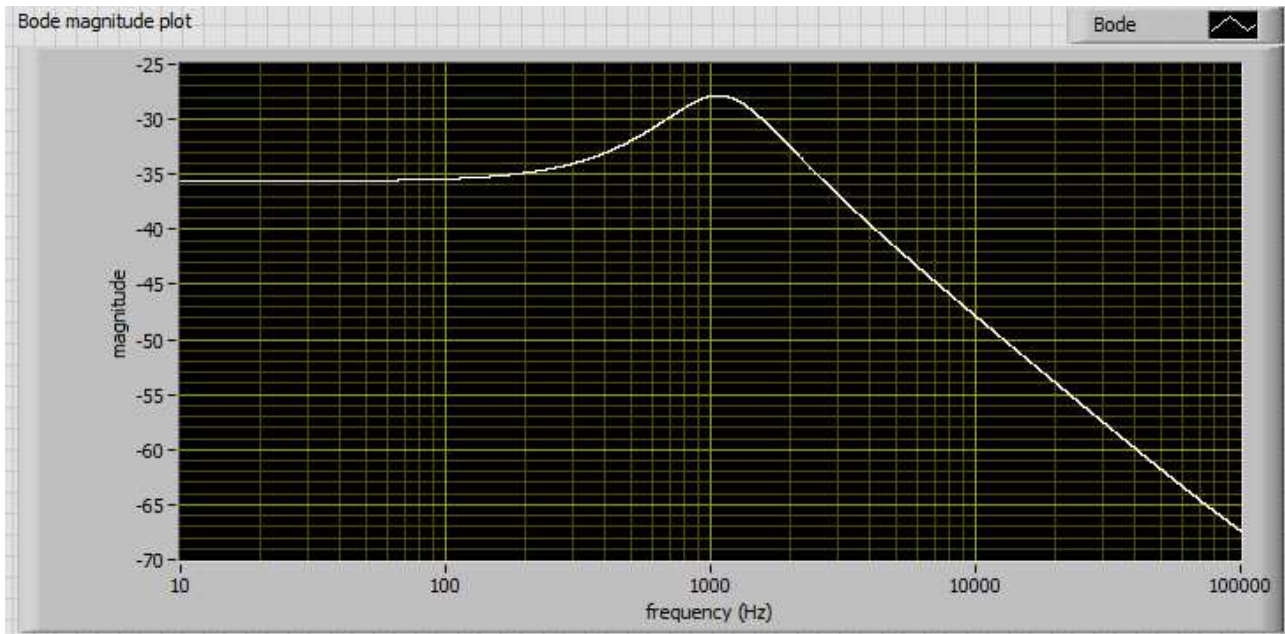
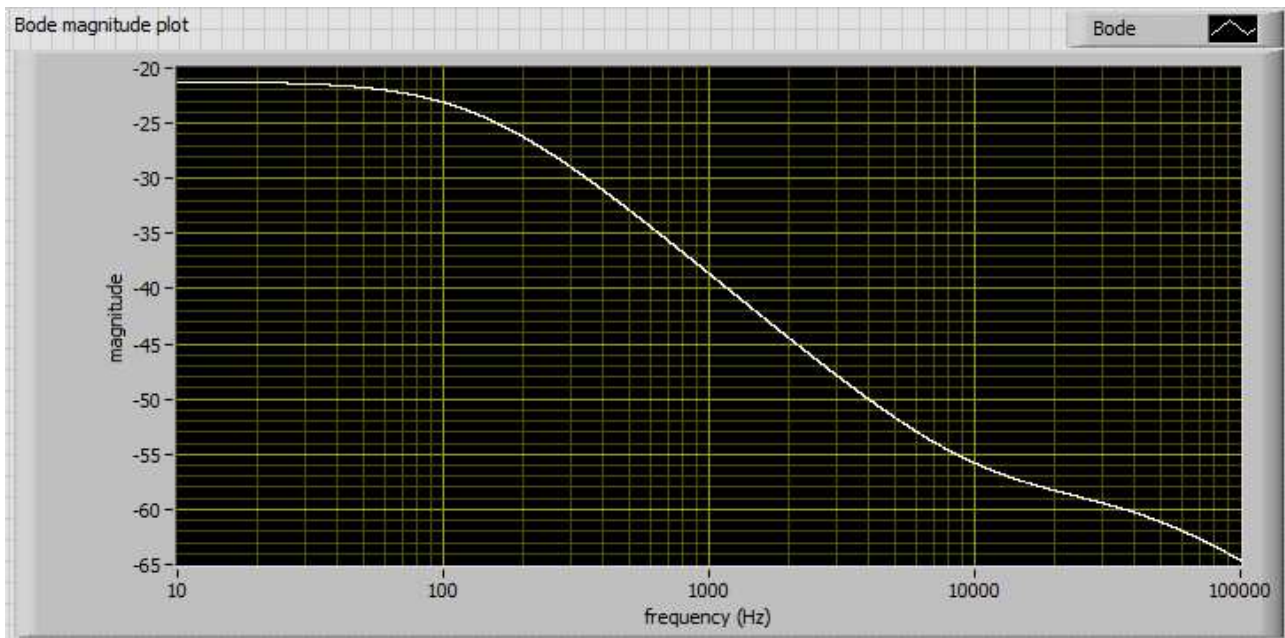


Figura 47 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono sea monkey (sopra) con amplificatore buck, (sotto) con aggiunta di filtro



Partendo dall'amplificatore buck, incrementato di 20 dB, si riscontra un'andatura leggermente diversa rispetto agli esperimenti precedenti. Nel caso senza filtro si ha una sensibilità costante a -55 dB fino a circa 400 Hz, poi c'è un aumento di quasi 10 dB tra i 400 e i 2000 Hz, per poi cadere

linearmente fino a -90 dB. Utilizzando il filtro questo comportamento scompare: dove prima vi era un incremento, si trova l'inizio della caduta di sensibilità, passando dalla sensibilità di -40 dB a quella di -85 dB (figura 47).

Da questi esperimenti si può constatare che l'amplificatore buck è costruito principalmente per sistemi audio a bassa potenza, in quanto in tutti i diagrammi non si riesce a mantenere la sensibilità costante oltre il 1 kHz; da questo è possibile estrapolare che anche nell'esperimento successivo con l'idrofono costruito si riscontrerà un comportamento simile a quelli già ottenuti.

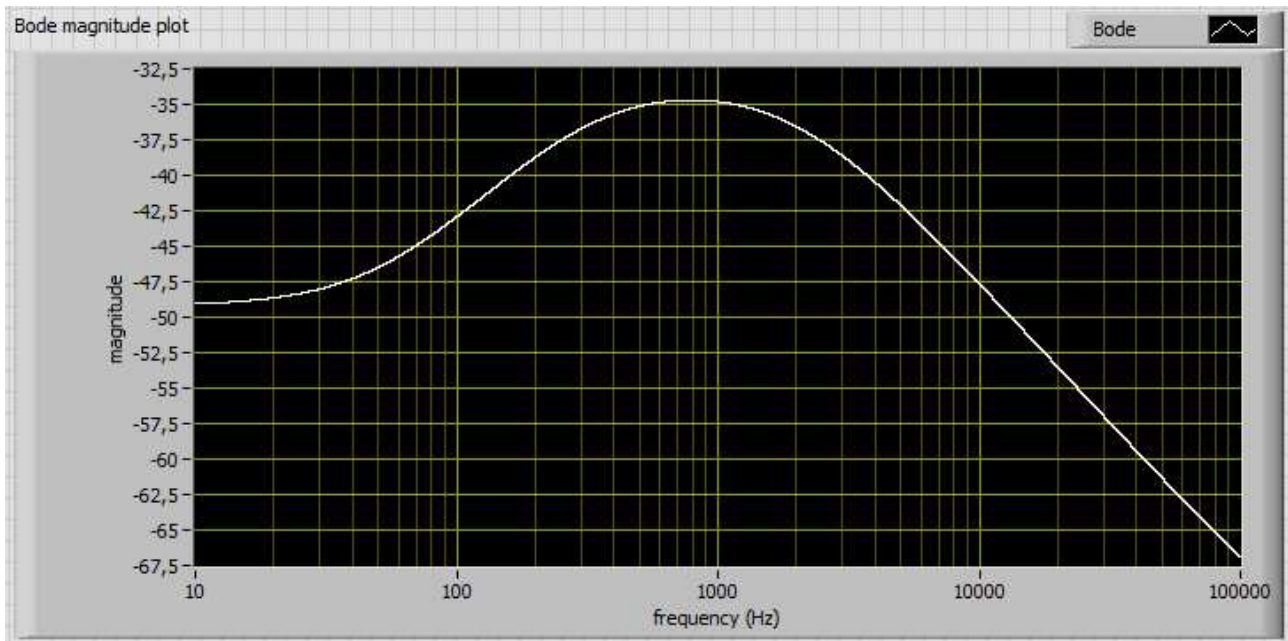
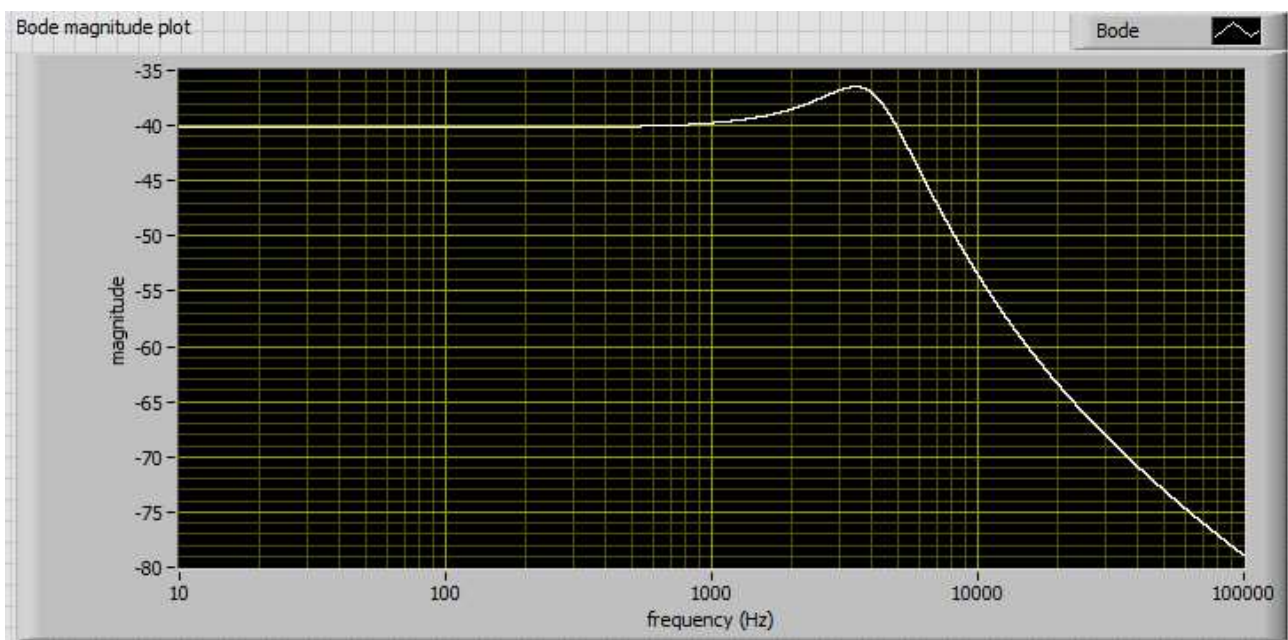


Figura 48 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono sea monkey (sopra) con amplificatore grove, (sotto) con aggiunta di filtro



Il sea monkey ha un comportamento totalmente differente rispetto ai precedenti con l'utilizzo della scheda grove, 26 dB (figura 48): riesce a mantenere una sensibilità costante, sia con l'utilizzo o meno del filtro. Partendo dal caso senza filtro ci troviamo davanti una sensibilità iniziale di circa -76 dB, poco dopo vi è una crescita tra i 30 Hz e i 10000 Hz, con un picco di -61 dB in corrispondenza dei 1000 Hz. Superati i 10 kHz la risposta continua la sua caduta arrivando a -93,5 al limite del segnale. Utilizzando il filtro invece il segnale mantiene la sensibilità costante a -60 dB fino 10 kHz, dove, per via del limite della scheda di amplificazione, inizia la caduta fino ad arrivare a -106 dB. Fino a ora si è visto che, pur distorcendo l'onda modificandone la forma, il sistema di amplificazione grove ha un range e una stabilità migliore di quello della scheda bucck, rendendolo migliore dal punto di vista energetico, ma peggiore per l'analisi sonora.

In ultimo abbiamo l'amplificatore costruito con il filtro, 20 dB; anche in questo caso, come nel precedente, l'idrofono ha un andamento costante a -62 dB fino a 200 Hz, per poi incrementare in sensibilità fino a circa -59 dB a 10 kHz, per poi diminuire fino a ritornare alla sensibilità precedente a 40 kHz, infine cadere a -67 dB.

Rispetto ad altri idrofoni il sea monkey, con l'amplificatore costruito, ha mantenuto una sensibilità costante sempre vicina ai -62 dB (figura 49).

In conclusione l'idrofono sea monkey ha una andamento per lo più costante alle basse frequenze, per poi avere un picco di sensibilità tra i 100Hz e i 10 kHz, per poi diminuire alle alte frequenze, superato il range di operatività del microfono.

Dai diagrammi la sensibilità stimata dell'idrofono:

-73 dB re V/Pa \pm 10 dB ovvero -193 dB re V/ μ Pa \pm 30 dB

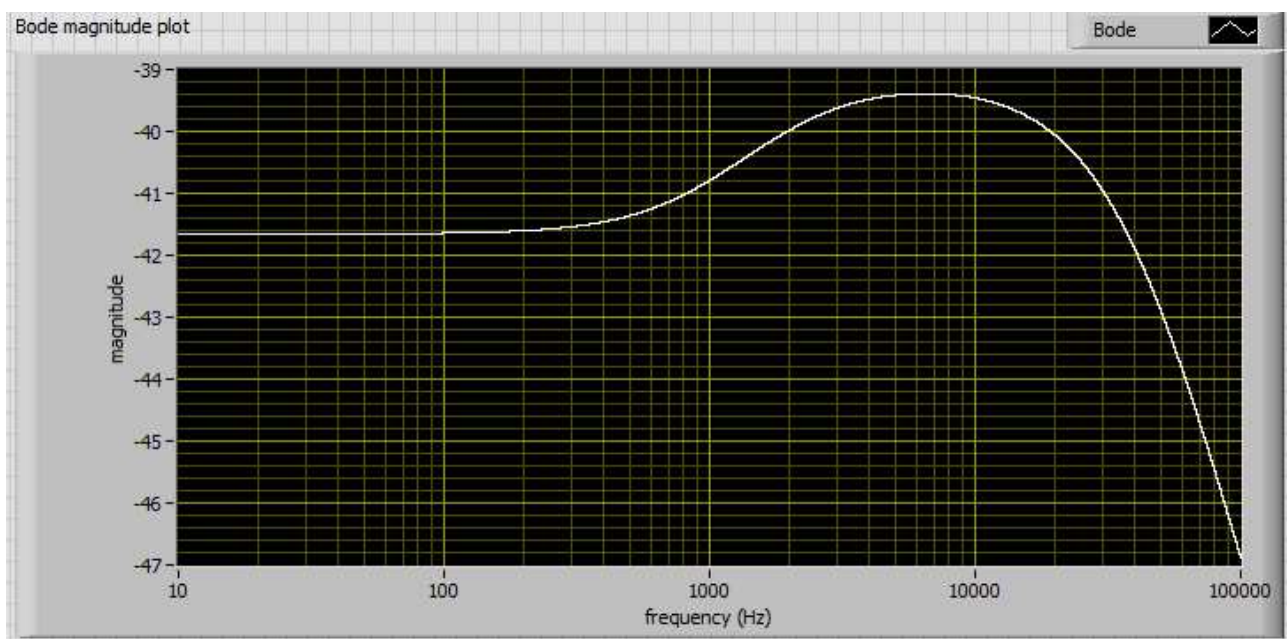


Figura 49 : Diagramma di Bode delle ampiezze dell'idrofono sea monkey con amplificatore costruito con aggiunta di filtro

5.2.4 Idrofono Piezoelettrico

L'ultimo caso da affrontare è quello dell'idrofono costruito. Dati gli esperimenti condotti finora è possibile cercare di identificare, come fatto per gli altri, la sensibilità del nostro idrofono in modo da caratterizzare anche questo aspetto. Di questo strumento non conosciamo nessuna caratteristica, quindi tutto ciò che verrà mostrato dovrà essere interpretato.

Partendo dall'amplificatore buck (figura 50) ci si aspetta un andamento lineare fino ai 1000 Hz per poi cadere in modo costante. Come mostrato in figura 74 è possibile notare che, con una sensibilità iniziale di -55 dB, ha un comportamento costante, per poi incrementare superati i 100 Hz con un picco a 1 kHz, per poi ritornare alla sensibilità di partenza a 4 kHz, proseguendo successivamente a cadere fino a -85 dB.

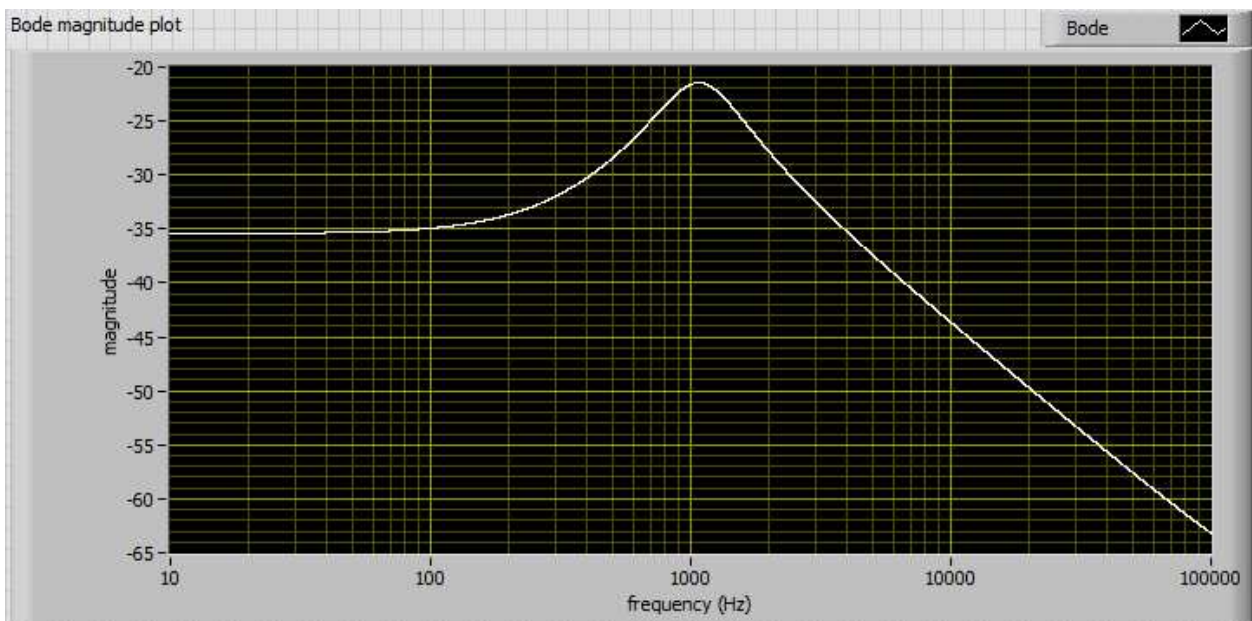
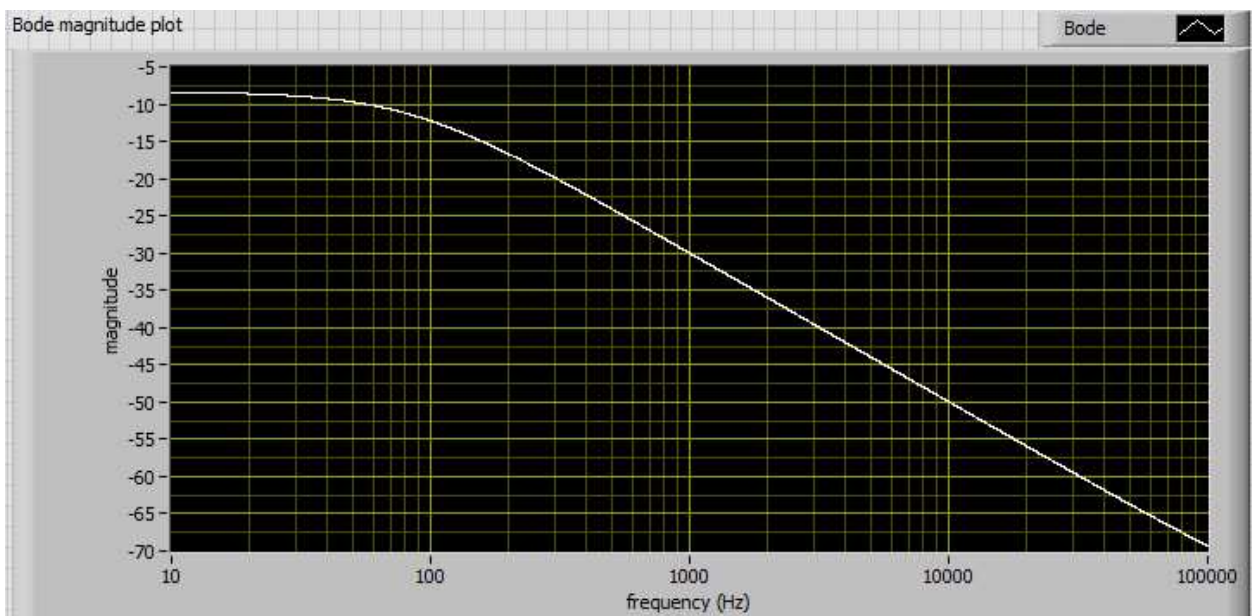


Figura 50 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono costruito (sopra) con amplificatore buck, (sotto) con aggiunta di filtro



Nel caso con il filtro, l'idrofono mantiene un comportamento simile agli altri componenti utilizzati: partendo da -30 dB superati i 100 Hz comincia la rapida caduta di sensibilità fino a -90 dB.

Nel caso dell'amplificatore grove il caso è diverso, ovvero, senza l'ausilio del filtro, il sistema ha una sensibilità che decade da subito partendo da -46 dB fino a -106 dB. Utilizzando il filtro, invece, mantiene una sensibilità costante di -61 dB fino ai 2000 Hz per poi diminuire fino ad arrivare a -106 dB (figura 51).

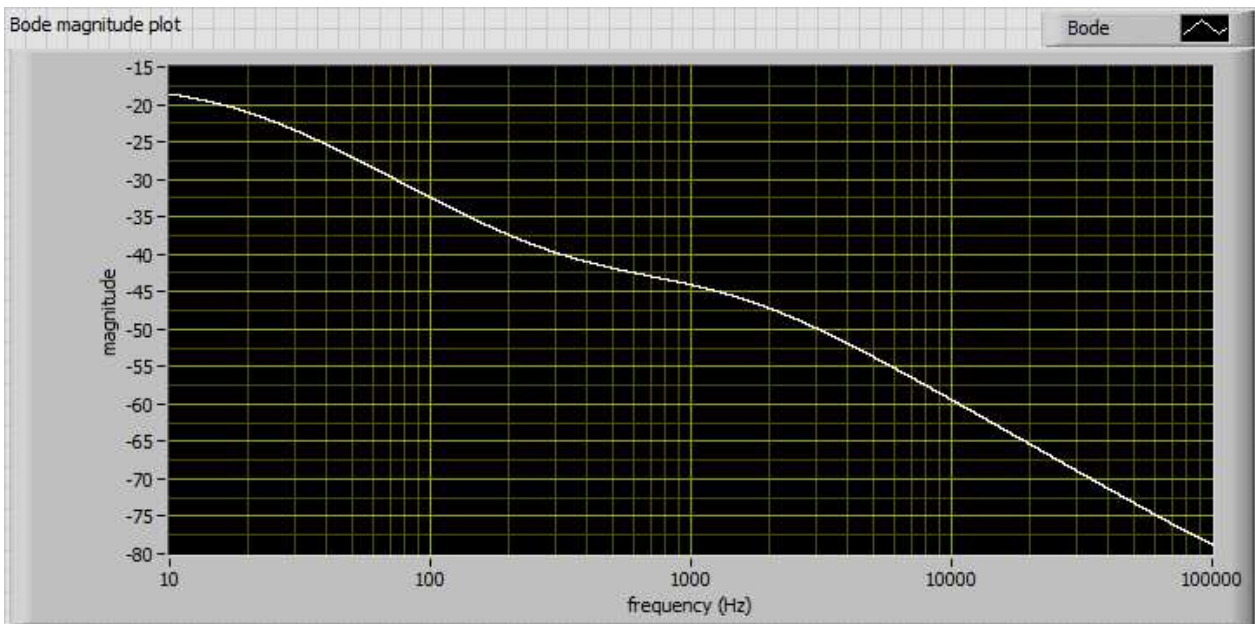
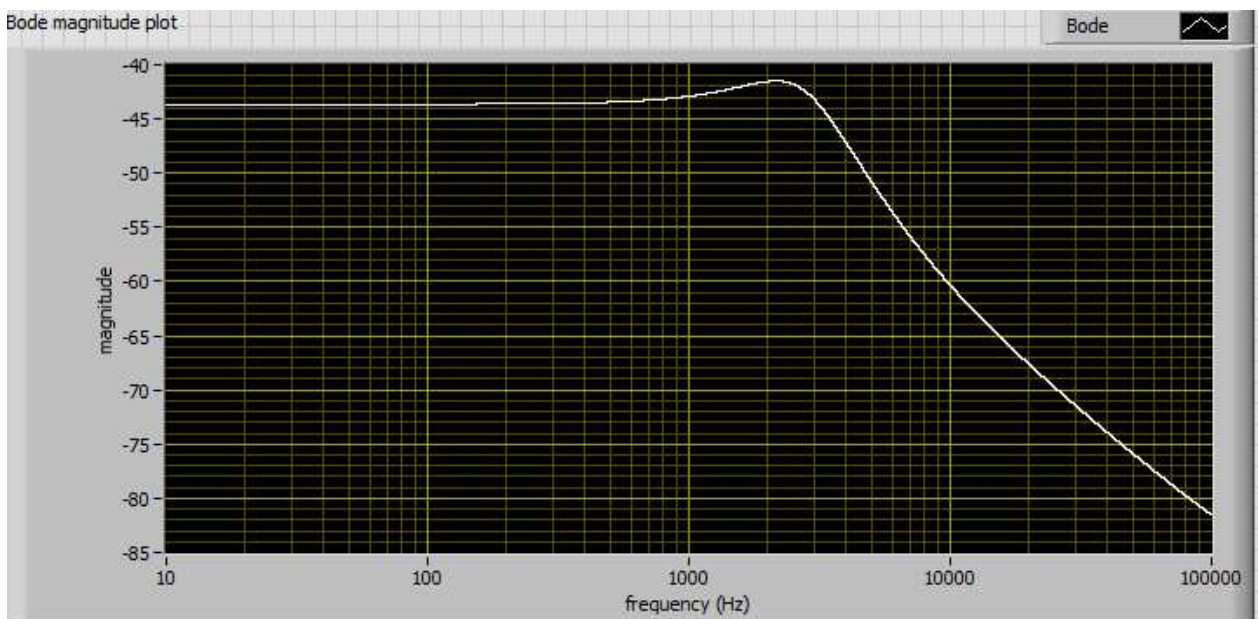


Figura 51 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono costruito (sopra) con amplificatore grove, (sotto) con aggiunta di filtro



Questo comportamento può essere indotto dal suo metodo di costruzione e dalla sua impedenza di uscita, le quali possono contribuire ad alterare la potenza di ingresso e ad aumentare i disturbi, così

da influire sulla costruzione della funzione di trasferimento e, successivamente, i diagrammi. Utilizzando il filtro, come già usato in precedenza, si cerca di adattare l'impedenza così da facilitare la comunicazione tra i componenti, in modo da rendere più stabile il sistema.

In ultimo vi è il caso con l'amplificatore costruito (figura 52). Come si vede in figura 77 la sensibilità, sia con il filtro sia senza, aumenta alle alte frequenze. Questo, in relazione con lo schema costruttivo dell'amplificatore e degli esperimenti precedenti, è dovuto al fatto che questo componente incrementa in modo stabile la potenza del segnale in ingresso, quindi, quando l'onda perde ampiezza con l'aumentare della frequenza, l'amplificatore mantiene stabile la potenza di uscita fino alla frequenza di funzionamento, comportando un incremento di sensibilità.

Per il caso senza filtro partendo da -58 dB, superati i 100 Hz si ha una salita di sensibilità fino a -38 dB a 10 kHz per poi stabilizzarsi. Utilizzando il filtro si parte da una sensibilità costante di -43 dB fino a 200 Hz per poi incrementare fino ai 10 kHz a -34 dB.

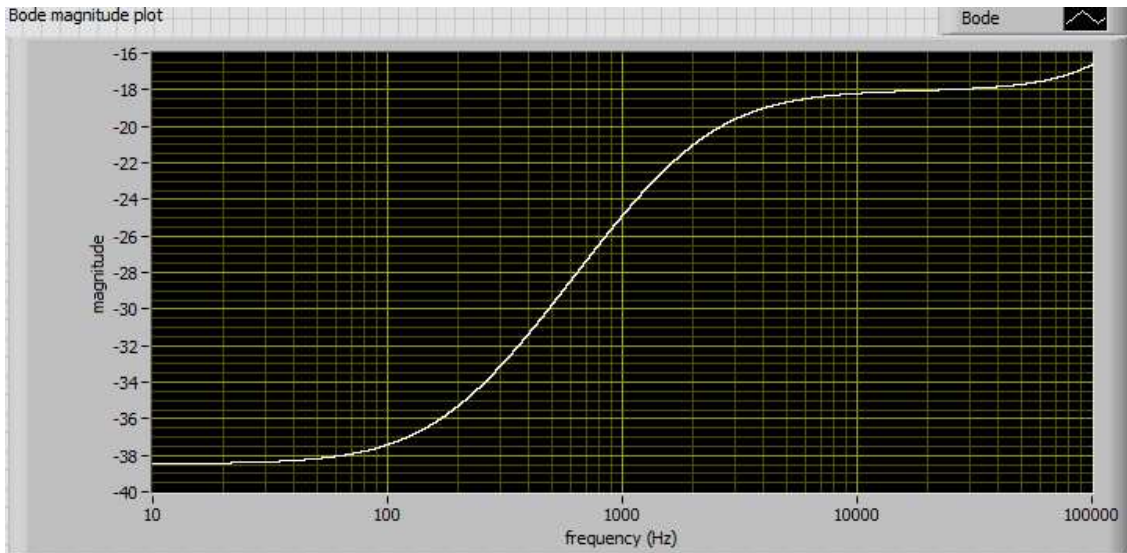
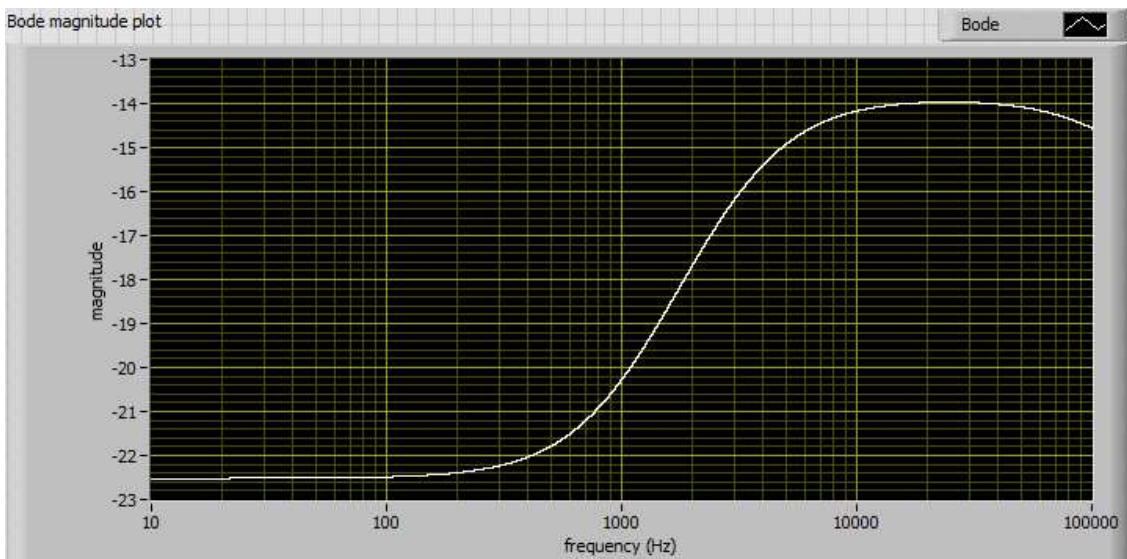


Figura 52 : Diagrammi di Bode delle ampiezze dell'idrofono costruito (sopra) con amplificatore costruito, (sotto) con aggiunta di filtro



In conclusione l'idrofono costruito ha una sensibilità costante per tutto il range di funzionamento, con un incremento di sensibilità alle alte frequenze, rendendolo particolarmente adatto alla cattura di suoni ad alte frequenze.

La sensibilità risulta:

-75 dB re V/Pa \pm 5 dB ovvero **-195 dB re V/Pa \pm 15 dB**

5.2.5 Risposta in Frequenza: Fase

Nella calibrazione acustica, la fase di un segnale non introduce informazioni necessarie allo studio del microfono, ma è opportuno citare cosa si è ottenuto durante gli esperimenti.

In tutte le combinazioni di idrofono e amplificatore, il segnale catturato parte sempre sfasato rispetto al segnale di riferimento, mantenendo un comportamento lineare fino a 100/300 Hz, punto di rottura; in seguito la differenza di fase tende a diminuire, sfasando ulteriormente i segnali, o tendendo a farli coincidere, in base al punto di partenza.

Partendo dall'amplificatore buck, il comportamento comune è quello di partire da uno sfasamento di 0° fino ad arrivare a uno sfasamento di -240/-300°. L'aggiunta del filtro rende semplicemente la pendenza più lineare. Nel caso dell'amplificatore grove e dell'amplificatore costruito, si parte da uno sfasamento di 180° per poi scendere, in base all'idrofono considerato, fino ad uno sfasamento compreso tra 40° e -120°. L'utilizzo del filtro, a differenza del caso buck, non stabilizza la discesa, ma ne altera semplicemente la pendenza, rendendola più ripida, o riducendo lo sfasamento finale.

5.2.6 Conclusioni Risposta in Frequenza

Osservando tutti gli esperimenti condotti, è possibile affermare che, considerando la presenza di rumori alle basse frequenze, distorsioni dovute alle condizioni di esecuzione delle prove svolte e presenza di componenti esterni in grado di alterare il funzionamento degli strumenti, i dati raccolti sono comparabili a quelli forniti dai produttori.

Come per lo studio del segnale nel capitolo 5.1, è possibile affermare che l'amplificatore buck ha un limite di amplificazione molto basso, 1-4 kHz, oltre il quale non riesce a integrare il segnale, rendendo lo strumento non adatto ai nostri scopi. Dall'altra parte, dal punto di vista di linearità nell'amplificazione, la scheda grove ha caratteristiche molto migliori, riuscendo a mantenere costante l'amplificazione fino a 10 kHz, ancora però troppo bassa per le nostre misurazioni. Infine l'amplificatore costruito riesce ad amplificare in modo lineare fino alle alte frequenze, quindi è in grado di aumentare la potenza del segnale ricevuto, in modo da consentire una corretta analisi.

Dagli esperimenti, siamo stati in grado di identificare anche il comportamento del nostro idrofono e stimare la sensibilità.

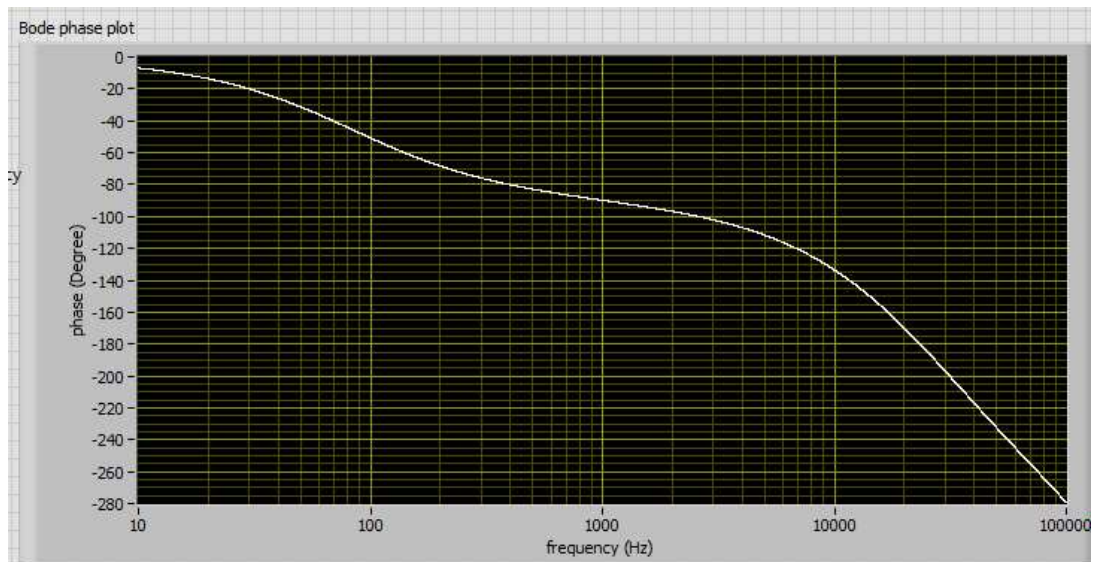
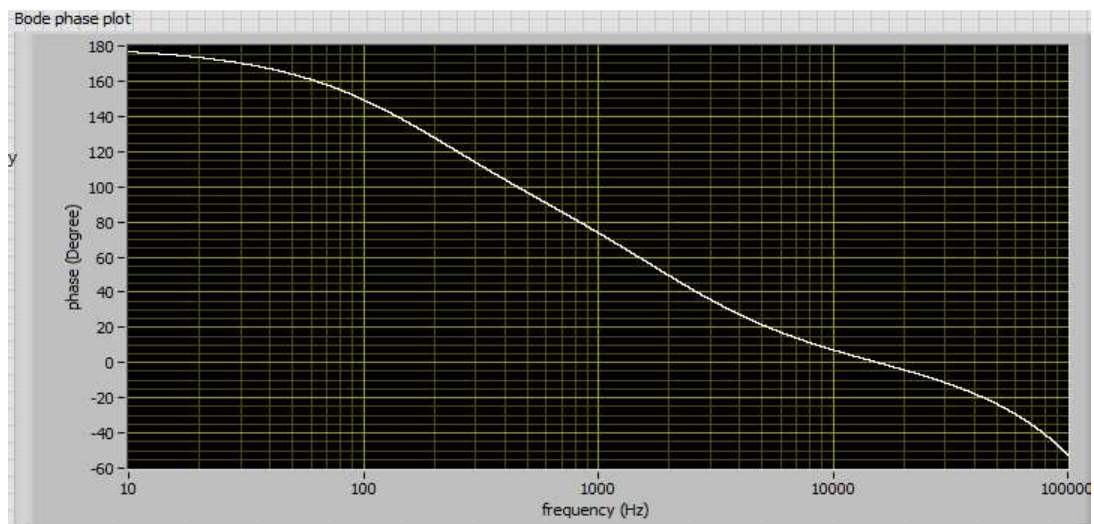


Figura 53 : (sopra) fase del microfono piezoelettrico con amplificatore buck, (sotto) fase microfono piezoelettrico amplificatore costruito



5.3 SNR e THD

Tenendo in considerazione gli esperimenti dei capitoli 5.1 e 5.2, è possibile prevedere che i valori della distorsione armonica e del SNR siano molto alti, vista la grande presenza di armoniche nel segnale. Per comprendere l'origine di queste distorsioni sono necessari altri esperimenti. Per il momento di seguito sono riportati i valori del THD e SNR di tutte le configurazioni. Nel caso del THD il valore è mostrato in percentuale e supera anche di molto il 100%, proprio per la presenza di molte armoniche che compongono il segnale ottenuto: dai calcoli risultano circa 19 armoniche. Di conseguenza, visto che il SNR è calcolato dal THD e THD+N, anche i suoi valori saranno molto alti. In alcuni casi si vedranno dei punti vuoti nel grafico, questo causato dalla presenza di un rumore negativo, il quale diminuisce il THD+N, facendo risultare un NaN dai calcoli. Le immagini relative a questi calcoli si trovano tutte nell'appendice B, immagine 78.

Come previsto, dato l'alto numero di armoniche, le distorsioni e il rumore sono molto alti in quasi tutte le combinazioni.

Fanno eccezione gli esperimenti condotti con l'amplificatore costruito: come si può osservare per la maggior parte, i disturbi sono presenti principalmente alle basse frequenze, dovuti alle frequenze di alimentazione, e tra i 30 e i 50 kHz, dovuti o alla risonanza della vasca oppure alla risonanza del microfono; essendo il microfono costruito stampato in 3D, è molto probabile che la scocca e la posizione delle membrane risuonino a determinate frequenze.

Per ottenere risultati migliori, sarebbe necessario condurre gli esperimenti in campo aperto, dove non vi sono risonanze con le pareti o disturbi esterni⁴.

4 Vedere [immagine D](#) appendice B

6 CONCLUSIONI

Dagli esperimenti condotti è possibile trovare la soluzione per due contesti: il programma per la caratterizzazione degli idrofoni e il sistema di acquisizione del dissuasore per delfini.

Partendo dalla prima problematica, questa tesi è stata stesa come tentativo di costruzione di un sistema per la caratterizzazione di idrofoni; dagli esperimenti condotti è possibile affermare che il metodo utilizzato è corretto.

Grazie all'utilizzo di strumentazione potente e accurata, è stato possibile realizzare un impianto di dimensioni ridotte e dal costo contenuto, in grado di trovare, attraverso la generazione e la ricezione di un segnale, le caratteristiche di un idrofono.

Grazie all'utilizzo del picoscopo e di LabVIEW è possibile, utilizzando tutte le porte disponibili dell'oscilloscopio, generare un'onda e, con un collegamento in cortocircuito, visualizzare il segnale emesso, insieme al segnale catturato dal microfono collegato all'ultima porta disponibile. Sul front panel è possibile scegliere la forma dell'onda, la sua frequenza e altre caratteristiche, per poi visualizzare sia nel dominio del tempo sia in quello delle frequenze in due grafi diversi, e confrontarli fra loro. Da questo è possibile trovare, come visto nei capitoli precedenti, la trasformazione che subisce l'onda dal sistema di acquisizione, e comprendere come il segnale è distribuito nello spettro.

Insieme a questo, utilizzando l'opzione di salvare i dati in un file, è possibile trovare anche la sensibilità e il rumore che compongono il segnale.

L'utilizzo di questi programmi ha permesso la caratterizzazione di un sistema di acquisizione, idrofono e pre-amplificatore, in modo semplice e compatto, così da essere in grado di osservare, grazie ai grafi, cosa succede utilizzando questo sistema.

Possiamo in questo modo passare alla seconda problematica: grazie al sistema di identificazione è stato possibile trovare le caratteristiche dell'idrofono che abbiamo stampato e del suo pre-amplificatore, le loro problematiche e ciò che va sistemato. Partendo da un idrofono con caratteristiche sconosciute e altri idrofoni di cui, invece, avevamo tutti i dati necessari, siamo stati in grado di ottenere le proprietà nascoste del nostro strumento comparandolo con gli altri, osservando che le caratteristiche dell'idrofono piezoelettrico che abbiamo costruito sono equiparabili a quelle di un idrofono professionale.

Per gli sviluppi futuri, la prima cosa da fare è ricondurre gli esperimenti in campo aperto o in una vasca anecoica, così da evitare disturbi dovuti a riflessioni o a rumori esterni; in seguito, va migliorato l'idrofono, in quanto non omnidirezionale, quindi è possibile che perda dei dati se direzionato male. Bisogna anche migliorare il range di funzionamento, in quanto i delfini emettono suoni fino a 150 kHz, ma il nostro idrofono oltre i 70 kHz perde dati. Infine va creato un

amplificatore che funzioni in modo lineare anche al altissime frequenze, altrimenti, oltre una certa distanza, vista la presenza di un liquido che attenua i segnali, non sarebbe possibile individuarli con esattezza. Per il programma, invece, bisognerebbe velocizzare l'esecuzione di alcune funzioni, insieme alla possibilità di utilizzare i programmi con un sistema Linux, oltre all'aggiornamento della distribuzione LabVIEW utilizzata.

In conclusione il programma create è un buon metodo per caratterizzare i microfoni/idrofoni, con caratteristiche facilmente comprensibili e migliorabili, inoltre grazie all'impianto utilizzato è possibile trasportarlo e utilizzarlo in qualunque luogo.

	Microfono a condensatore	Sea Monkey	H2a Acquarian	Microfono stampato
Sensibilità produttore	-55 dB \pm 2 dB V/Pa	-202 dB \pm 4 dB V/ μ Pa	-180 dB \pm 4 dB V/ μ Pa	—————
Sensibilità stimata	-62 dB \pm 7 dB V/Pa	-193 dB \pm 30 dB V/ μ Pa	-184 dB \pm 30 dB V/ μ Pa	-195 dB \pm 15 dB V/μPa
Range di operabilità	50 Hz – 16 kHz	50 Hz – 40 kHz	10 Hz – 100 kHz	100 Hz – 70 kHz
Direzionalità	Omnidirezionale	Omnidirezionale	Omnidirezionale	Bidirezionale

7 APPENDICE A

In questa appendice sono presenti informazioni aggiuntive sulla myRIO 1900 e sugli esperimenti condotti utilizzando questo strumento.

7.1 Informazioni aggiuntive

NI myRIO-1900 dispone di canali di ingresso analogici sui connettori A e B di tipo Expansion Port (MXP), connettore Mini System Port (MSP) C e un connettore di ingresso audio stereo. Gli ingressi analogici sono multiplexati su un singolo convertitore analogico-digitale (ADC) che campiona tutti i canali e limita il sample rate in ingresso a 500 kS/s.

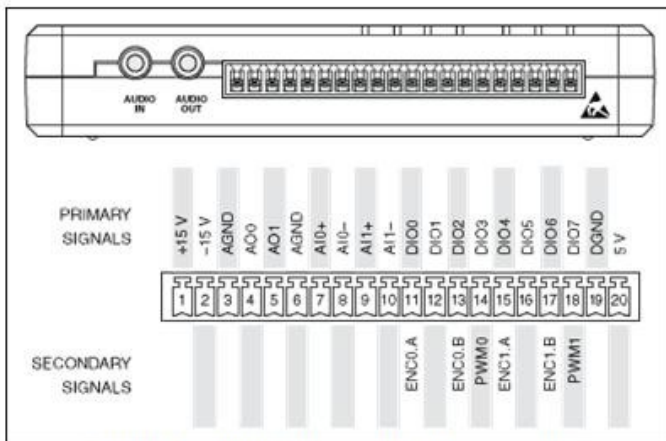


Figure 1 – minisystem port (MSP) connector

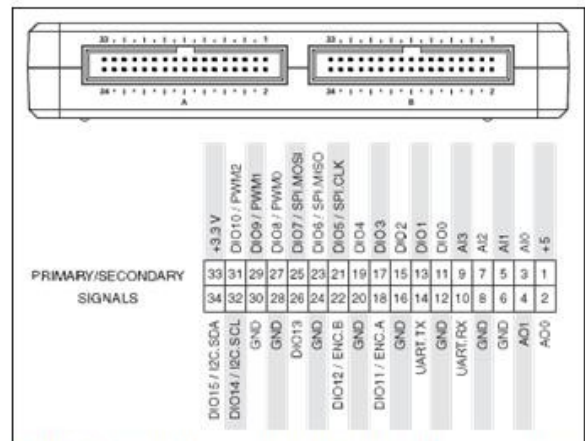


Figure 2 - myRIO Expansion Port (MXP) connector

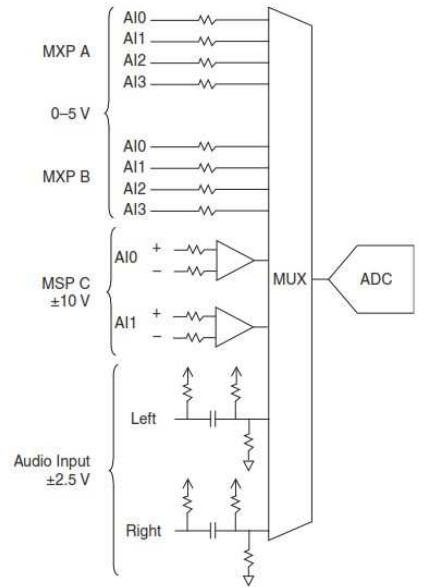
I connettori MXP A e B dispongono di quattro canali di ingresso analogici single-ended per connettore, AI0-AI3, che è possibile utilizzare per misurare segnali da 0-5 V. Il connettore C MSP ha due connettori ad alta impedenza, canali di ingresso analogici differenziali, AI0 e AI1, che è possibile utilizzare per misurare segnali fino a ± 10 V. Gli ingressi audio sono ingressi a livello di linea stereo sinistro e destro con una gamma di fondo scala di $\pm 2,5$ V.

NI myRIO-1900 dispone di canali di uscita analogici sui connettori myRIO Expansion Port (MXP) A e B, connettore Mini System Port (MSP) C e un connettore di uscita audio stereo.

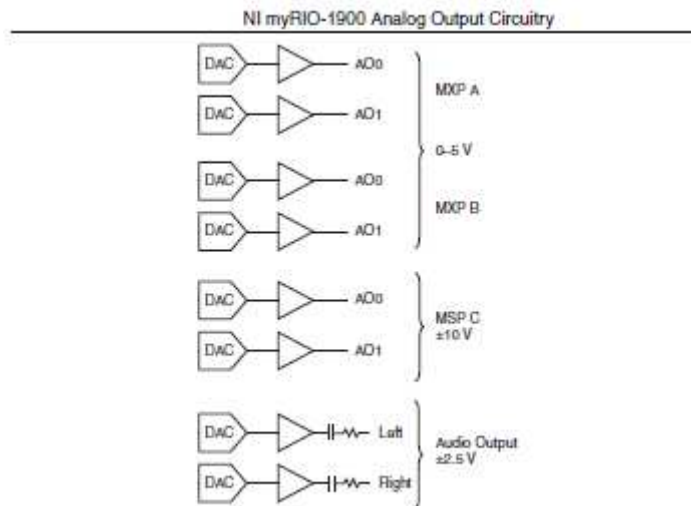
Ogni canale di uscita analogico ha un convertitore digitale-analogico (DAC) dedicato, quindi possono essere tutti aggiornati contemporaneamente.

I DAC per i canali di uscita analogici sono controllati da due bus seriali di comunicazione dall'FPGA. I connettori MXP A e B condividono un bus e il connettore MSP C e le uscite audio condividono un secondo bus. Pertanto, la frequenza di aggiornamento massima è specificata come cifra aggregata di 345 kS/s sia per i connettori MXP sia per quelli MSP.

Figure 5. NI myRIO-1900 Analog Input Circuitry



I connettori MXP A e B hanno due canali di uscita analogici per connettore, AO0 e AO1, che è possibile utilizzare per generare segnali da 0-5 V. Il connettore MSP C ha due canali di uscita analogici, AO0 e AO1, che è possibile utilizzare per generare segnali fino a ± 10 V. Le uscite audio sono sinistra e destra stereo a livello di linea in grado di pilotare le cuffie.



Il collegamento con il pc può essere fatto sia attraverso cavo USB, sia attraverso collegamento wi-fi alla stessa rete.

7.2 Collegamento attraverso Silverlight

Per poter accedere ad alcune informazioni della myRIO, come impostazioni wireless e bluetooth o per vederne i file, si deve utilizzare un'estensione di Internet Explorer, chiamata Silverlight, un

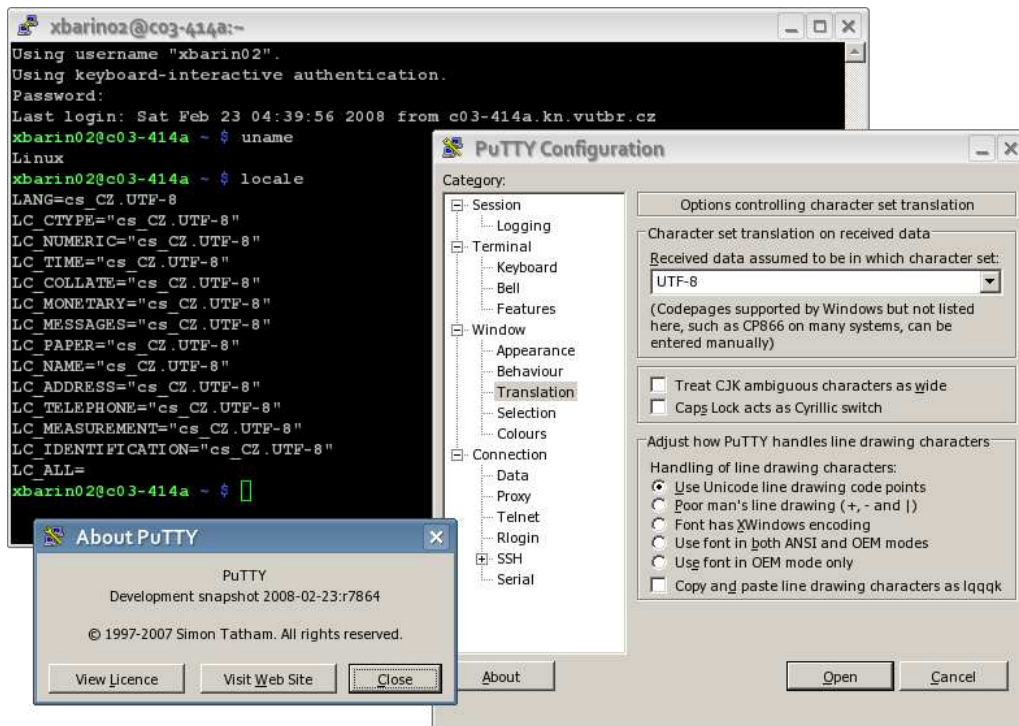
addon di Google per la programmazione interattiva attraverso il web. Esso dal 2021 non è più supportato da nessun browser, di conseguenza non sarebbe possibile configurare la myRIO attraverso internet. Esiste però un'opzione su Microsoft Edge, chiamata Modalità Explorer, che abilita la compatibilità dei vecchi siti web per Internet Explorer: in questo modo è stato possibile accedere a Silverlight e utilizzare il browser per impostare la myRIO. Da qui è possibile anche aggiornare il sistema e formattarlo.

7.3 Procedimento svolto con la myRIO

In principio si pensava di utilizzare la myRIO come base per la cattura dei dati e la successiva caratterizzazione dell'idrofono, in quanto si può utilizzare la parte FPGA per l'esecuzione delle operazioni di acquisizione e i calcoli più semplici, sfruttando l'alta velocità di clock. Volendo sfruttare l'ingresso audio, ci si è però accorti che il convertitore ADC costituiva un cono di bottiglia, limitando le prestazioni di esecuzione. Limitando l'ingresso a 500 kS/s ed essendo diviso in due ingressi, la FPGA lavorava soltanto a 250 kHz sui 40 MHz di clock.

Di conseguenza, si è pensato di integrare la myRIO con uno strumento esterno per l'acquisizione, il picoscopo, sfruttando la porta USB integrata nella macchina.

Utilizzando putty, programma SSH client con emulatore di terminale per la gestione in remoto di sistemi informatici, si è provato ad accedere al sistema operativo Linux, così da poter integrare i driver del picoscopo all'interno della myRIO.

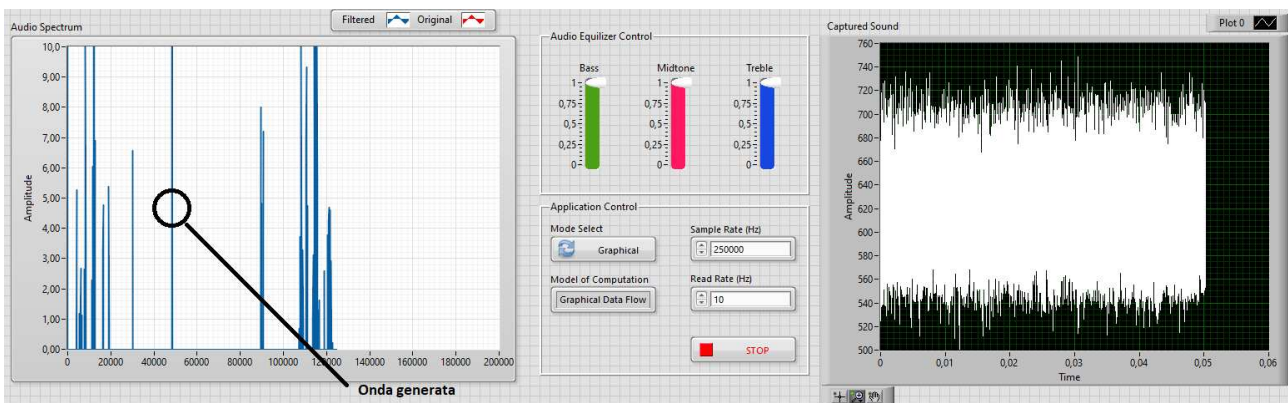


Questo sistema viene installato con Opkg, un gestore di pacchetti leggero in grado di funzionare su sistemi ridotti, con il quale abbiamo aggiornato tutti i pacchetti esistenti e, seguendo la guida sul sito della picotech, cercare di installare i driver del picoscope. Essendo però un sistema proprietario non siamo stati in grado di far funzionare le cose.

In seguito a vari esperimenti condotti con mini-pc e picoscope, si è provato a utilizzare un altro ingresso analogico per migliorare le prestazioni e abbiamo condotto degli esperimenti usando l'ingresso A1 della myRIO, ingresso differenziale.

Sfruttando il generatore di funzione fino ad arrivare a circa 250 kHz di frequenza, essendo la frequenza massima di campionamento disponibile 500 kHz, abbiamo studiato il comportamento dell'amplificatore e dell'idrofono che abbiamo costruito noi e dell'acquarian, sia con alimentazione della rete collegata con USB, sia con batteria e wi-fi, per limitare le correnti parassitarie.

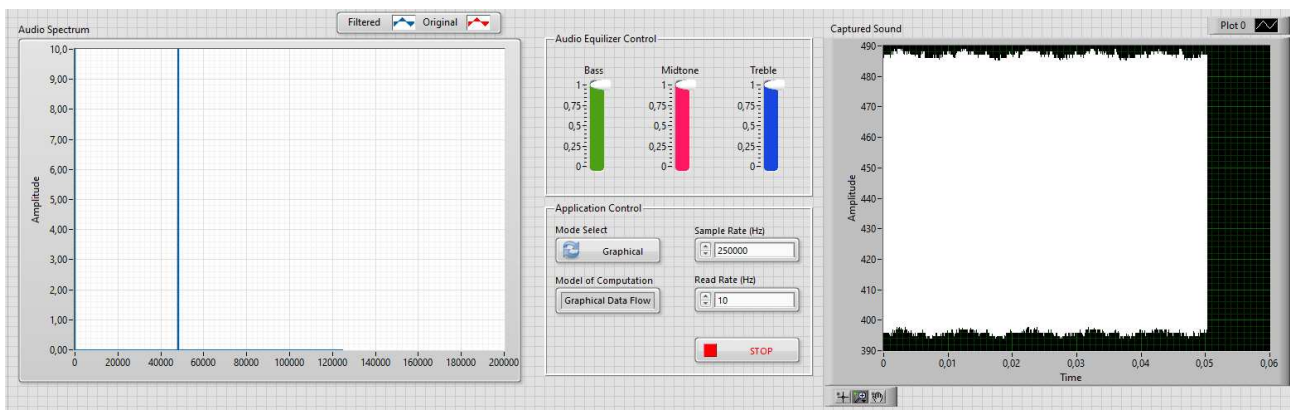
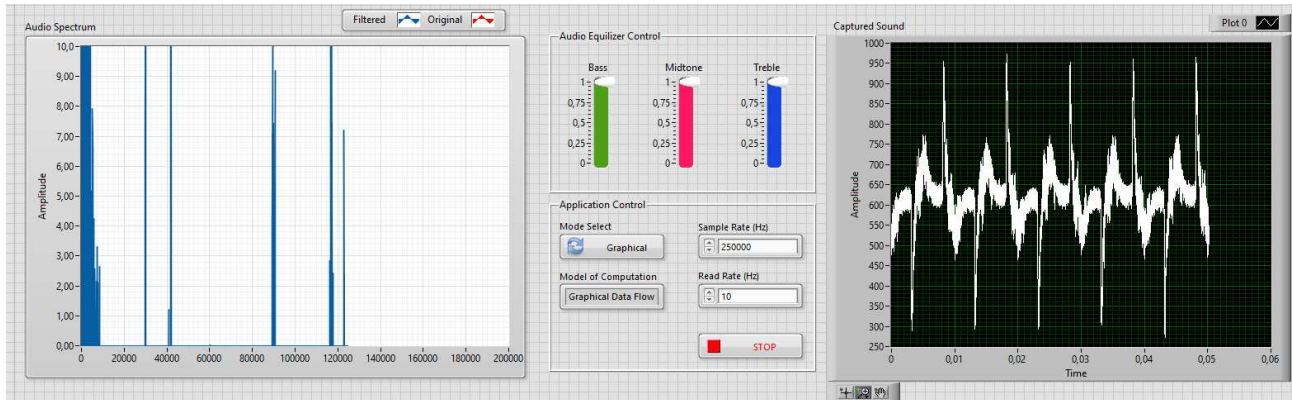
7.3.1 Risultati esperimenti



Per prima cosa abbiamo generato un segnale a 30 kHz, utilizzando l'amplificatore costruito e l'acquarian. Nella prima foto si ha collegamento con USB e alimentazione di rete, mentre nella seconda vi è alimentazione con power bank e collegamento wi-fi.

Nella prima sono presenti diversi rumori, causati alle correnti parassitarie dovute al pc e alla rete, mentre nella seconda sono assenti, ma in entrambe il segnale catturato non corrisponde a quello di 30 kHz ma a una frequenza di circa 50 kHz.

Successivamente si è collegato il microfono stampato e si è condotto lo stesso esperimento: segnale a 30 kHz prima con collegamento USB e alimentazione con la rete, successivamente power bank e wi-fi.



Come nel caso precedente, in presenza di collegamento alla rete e al pc, sono presenti tante frequenze dovute al rumore, oltre a essere visibile nel grafico del tempo la frequenza delle 50 Hz che distorce l'onda, mentre nel secondo caso sono del tutto assenti.

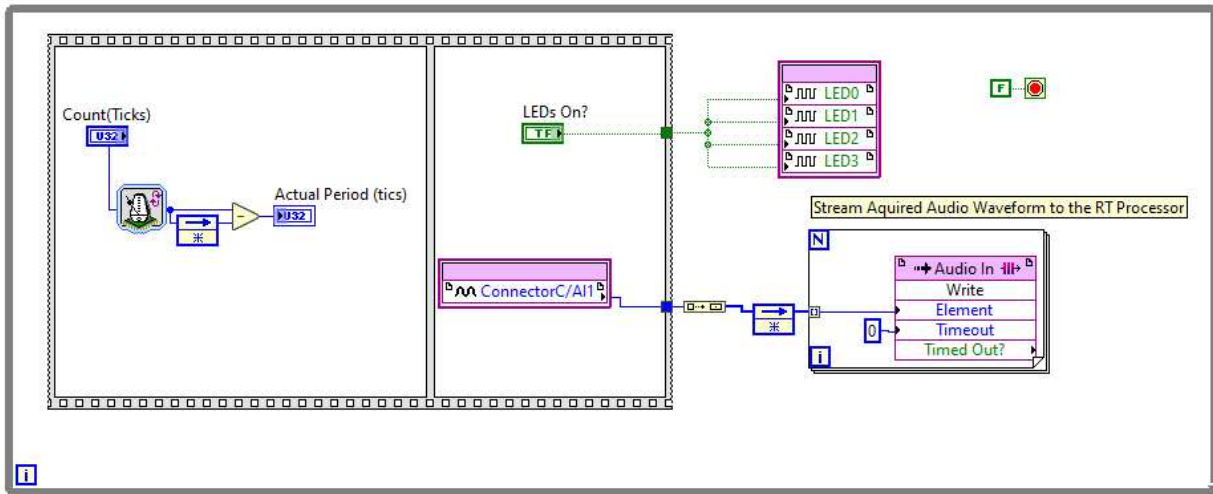
La frequenza percepita in ogni caso non è di 30kHz ma di 40 kHz.

7.4 Programma myRIO

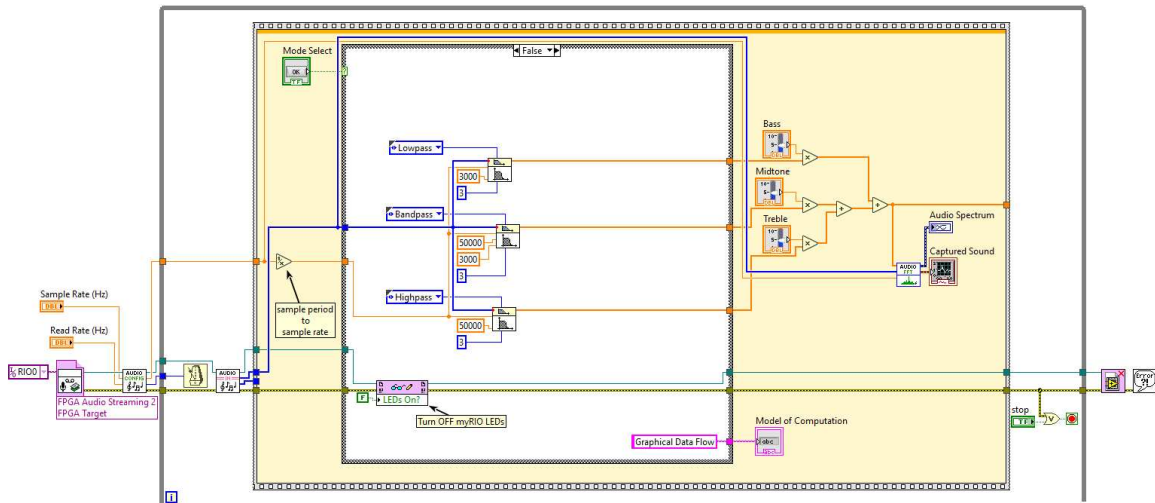
Il programma è diviso in due parti principali: la prima costituita da un programma per la sezione FPGA, la seconda dalla struttura primaria per il microcontrollore.

Gli esperimenti sono stati condotti alimentando sia la myRIO che il pre-amplificatore con una power bank. La parte FPGA è composta da un clock interno, regolabile attraverso la scelta del

sample rate nel front panel, il quale regola l'immissione di dati. La seconda parte è composta dalla configurazione dell'ingresso analogico, dal quale i dati raccolti vengono salvati in una coda FIFO.

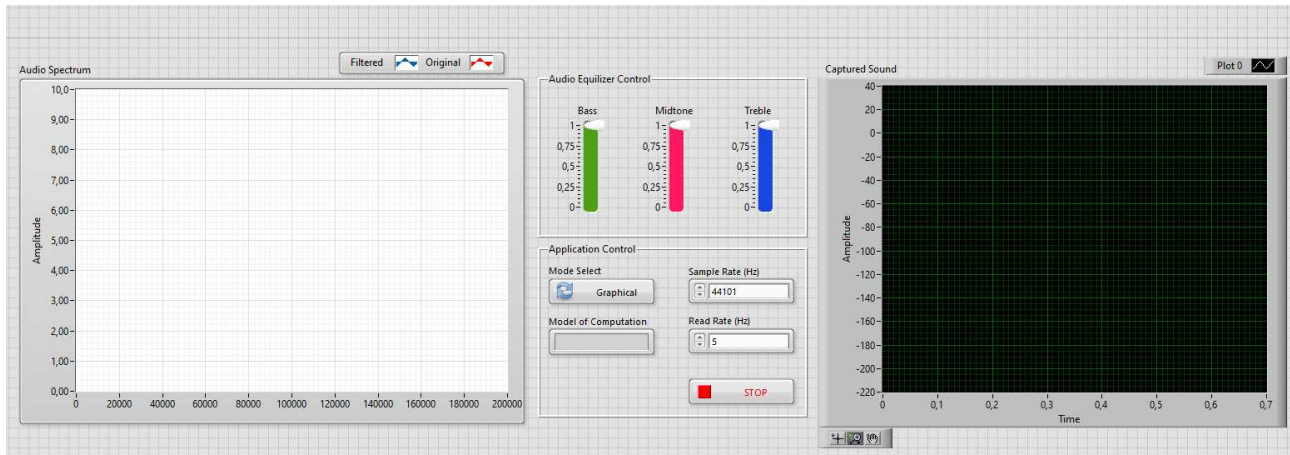


Il programma principale è diviso in diverse Sub VI ognuna delle quali svolge determinate azioni. La prima Sub VI setta il clock della parte FPGA, abilita l'ingresso analogico, configura la dimensione della coda e inizializza la funzione di lettura della coda. La seconda legge effettivamente la coda FIFO, la terza fa il grafico dell'ingresso e il suo power spectrum, l'ultima serve a chiudere la coda. Queste sono collegate tra di loro e vi è un ciclo principale in cui sono stati integrati dei filtri per regolare le varie frequenze.



Dal front panel del programma è possibile osservare sia il suono che viene catturato dall'ingresso analogico, sia la sua potenza spettrale. Da qui è possibile regolare la frequenza di campionamento, la frequenza di lettura ed è possibile “filtrare” il segnale con tre slider: questi servono per regolare

la potenza del segnale a determinate frequenze (basse, medie e alte). Vi è anche un tasto di stop in caso si voglia interrompere lo streaming.



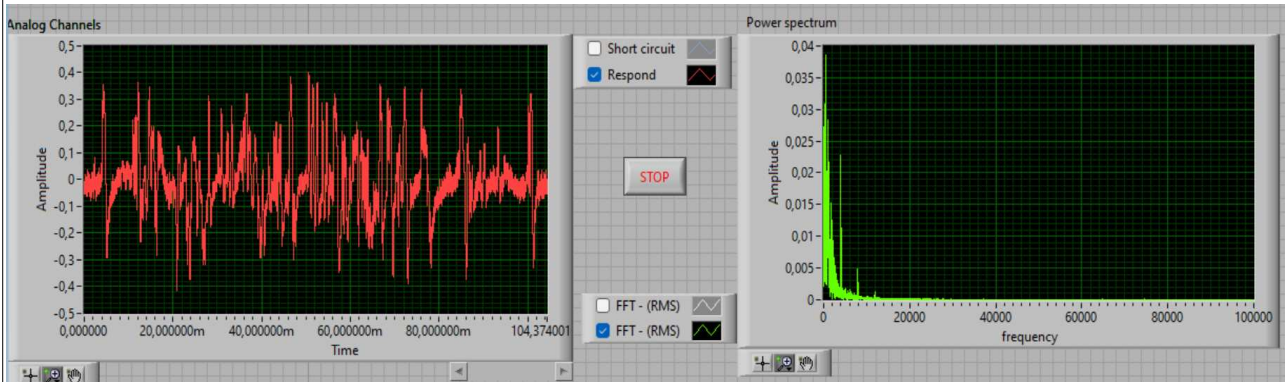
8 APPENDICE B

In questa appendice sono riportate tutte le immagini delle misurazioni avvenute nel [capitolo 5](#).

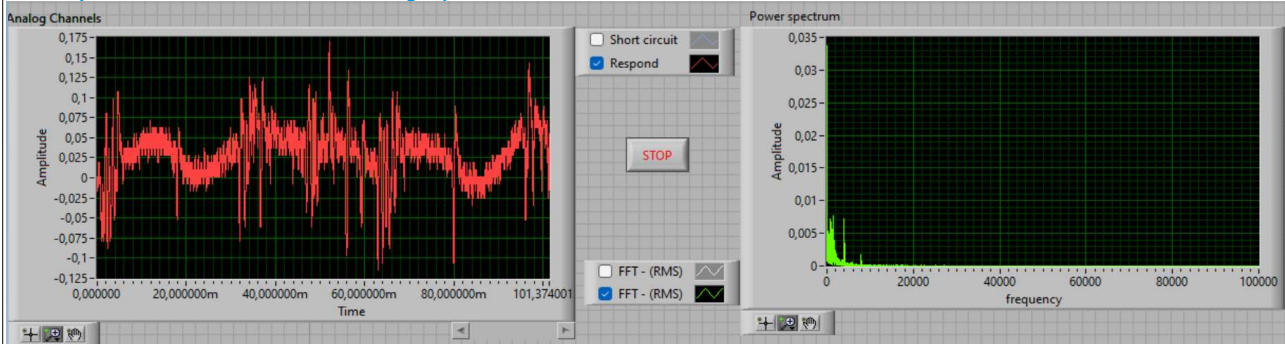
Immagine A : cattura di un'onda sinusoidale utilizzando amplificatore buck con i vari idrofoni



microfono a condensatore e amplificatore a 1 kHz



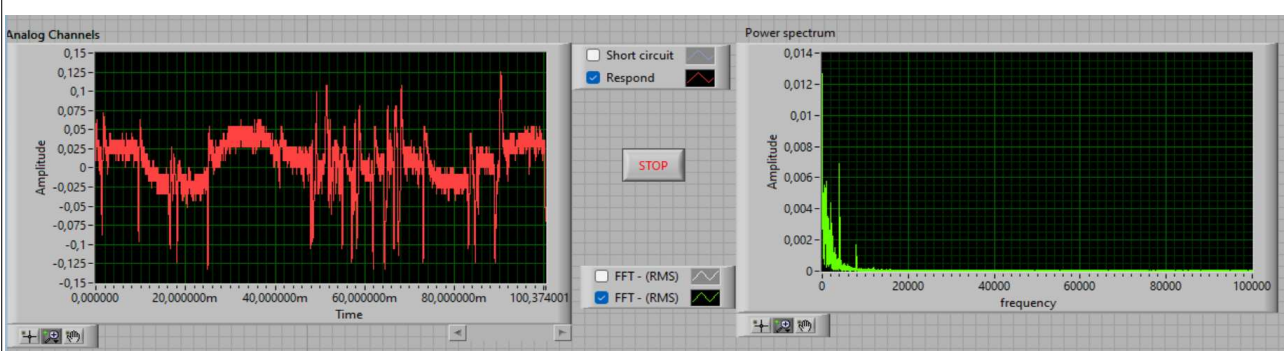
microfono a condensatore e amplificatore a 10 kHz



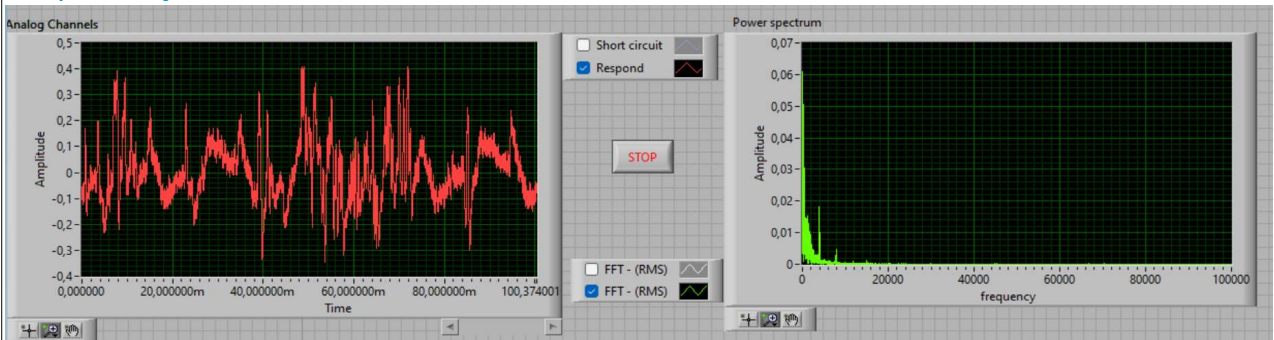
Idrofono acquarian 1 kHz



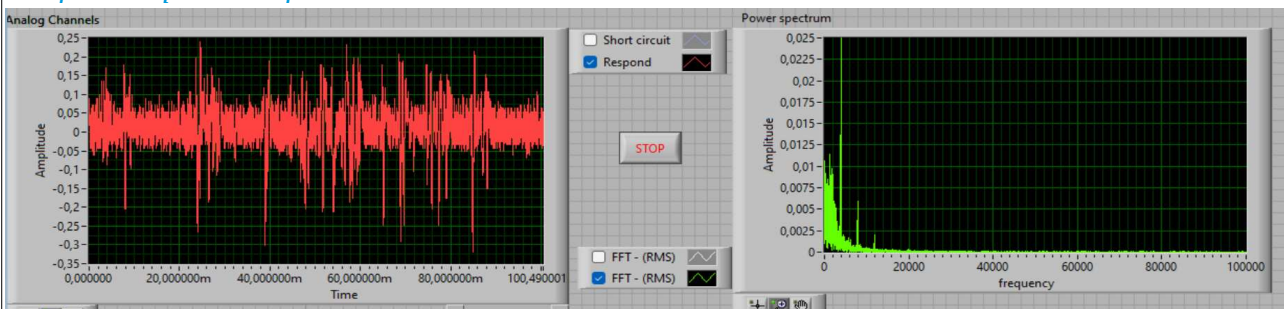
Idrofono acquarian e filtro 1 kHz



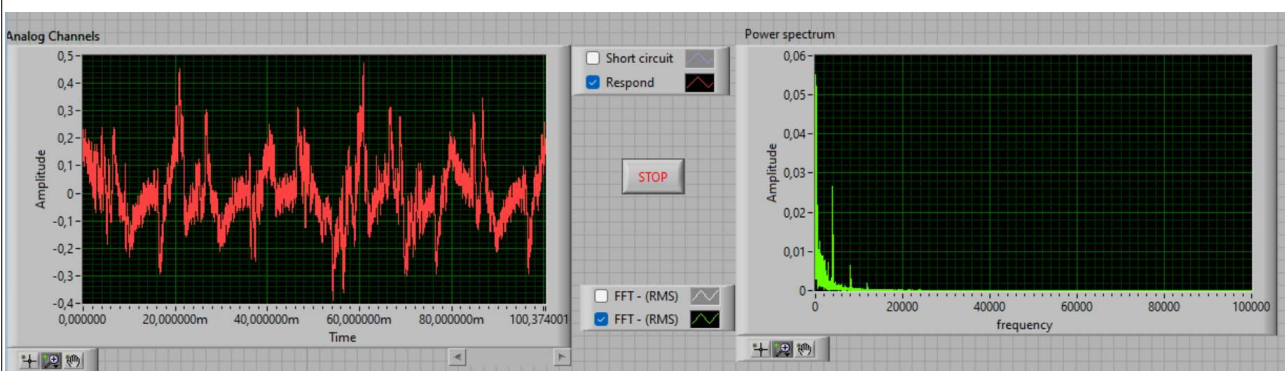
Idrofono acquarian a 10 kHz



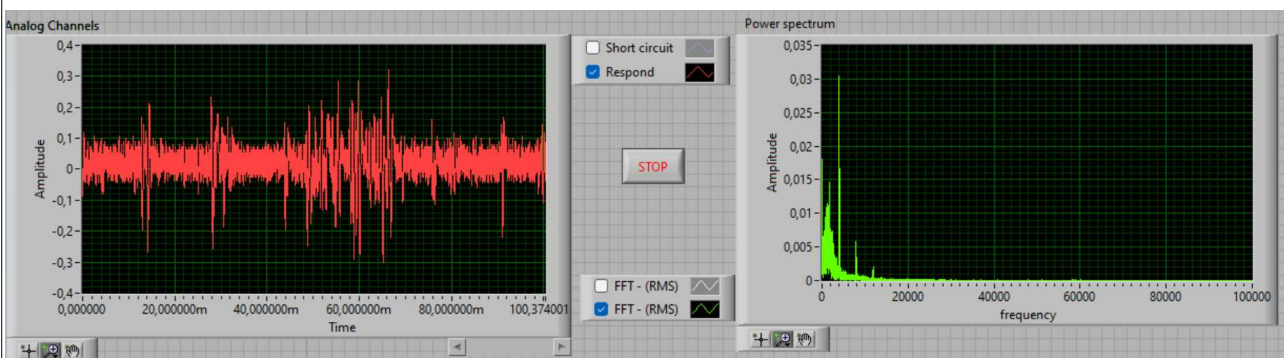
Idrofono acquarian e filtro a 10 kHz



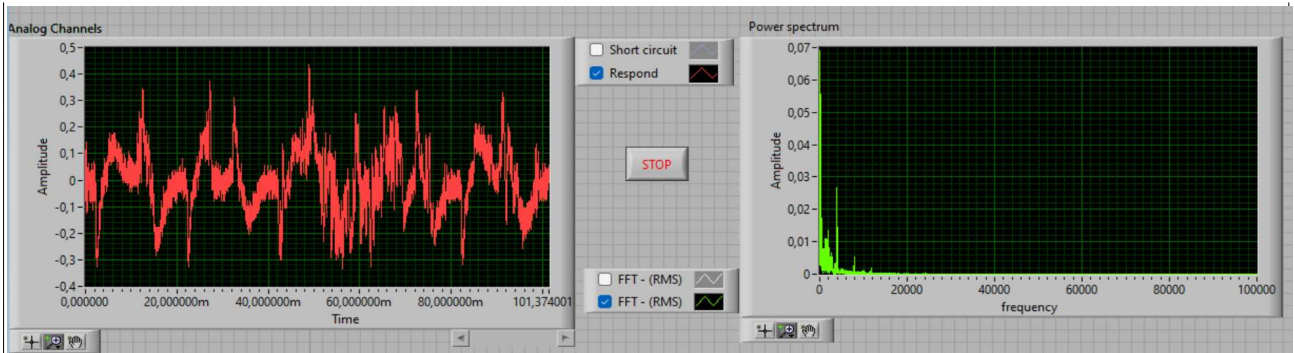
Idrofono sea monkey 1 kHz



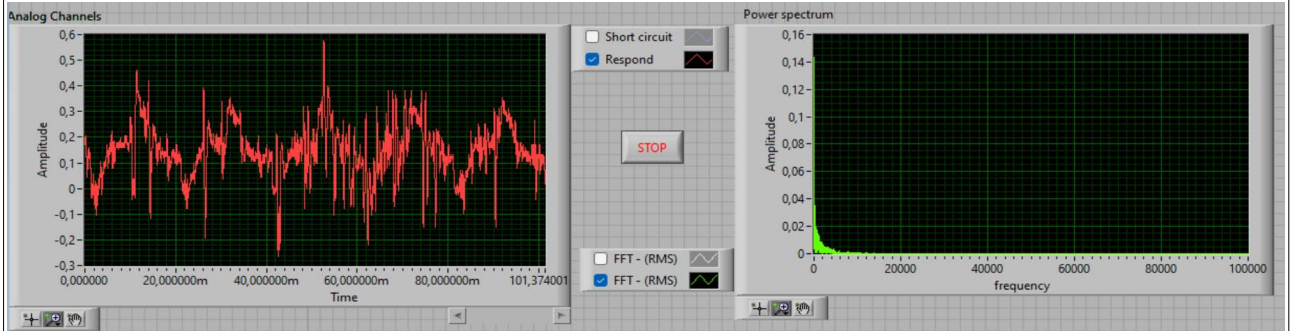
Idrofono sea monkey e filtro 1 kHz



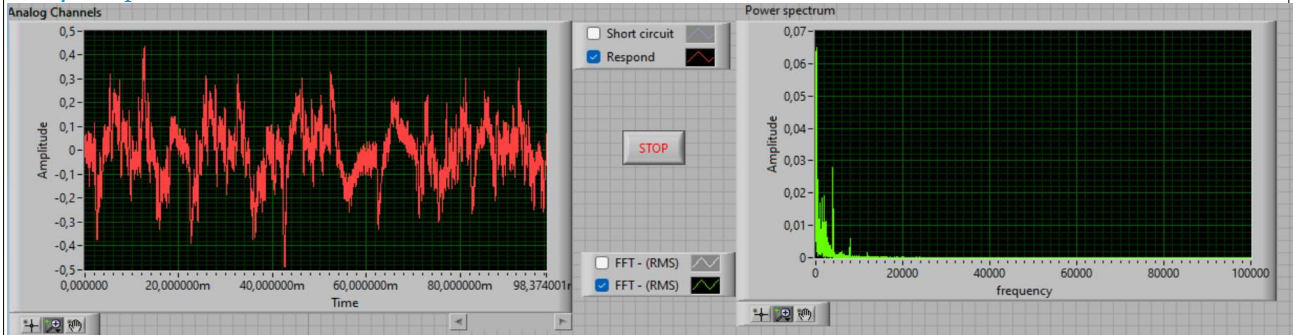
Idrofono sea monkey 10 kHz



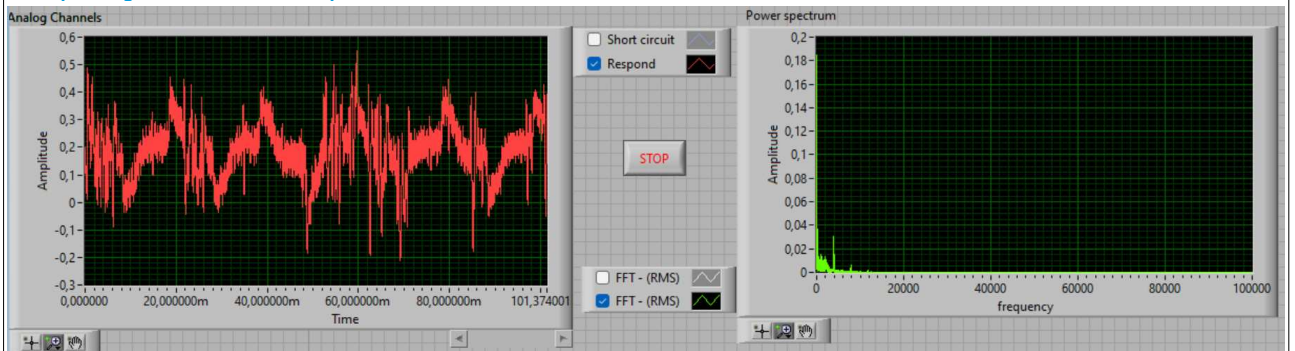
Idrofono sea monkey e filtro 10 kHz



Idrofono piezoelettrico 1 kHz



Idrofono piezoelettrico e filtro 1 kHz

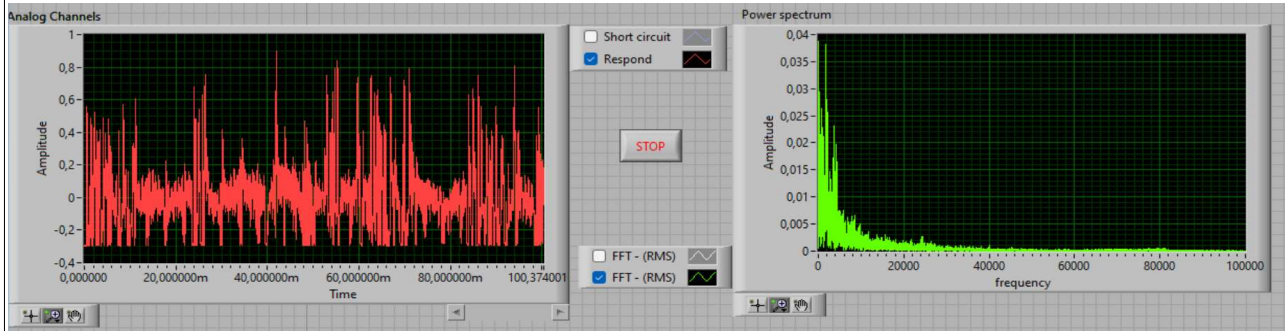


Idrofono piezoelettrico 10 kHz

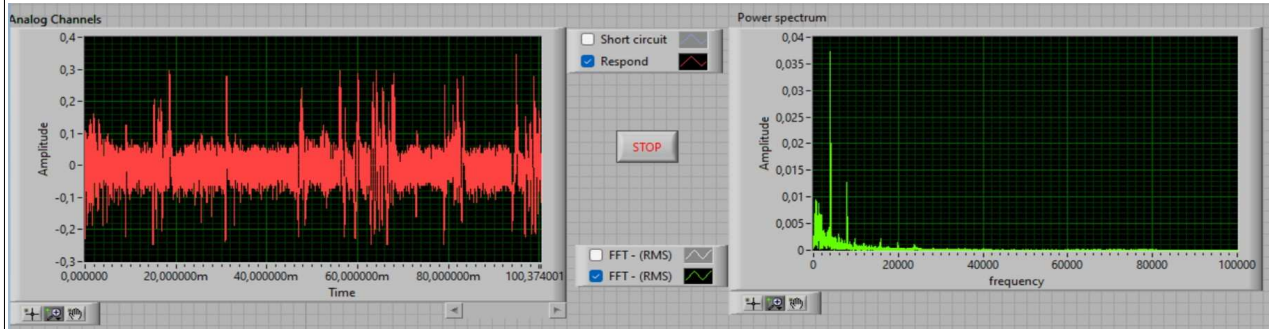


Idrofono piezoelettrico e filtro 10 kHz

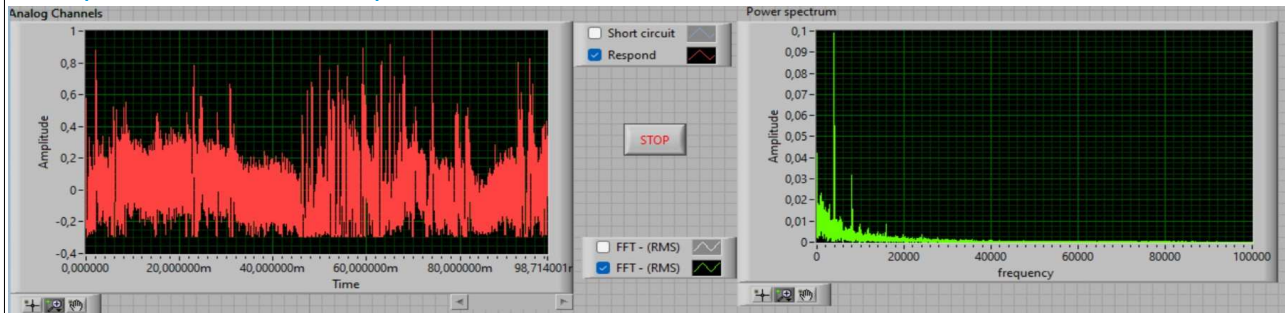
Immagine B : cattura di un'onda sinusoidale utilizzando amplificatore grove con i vari idrofoni



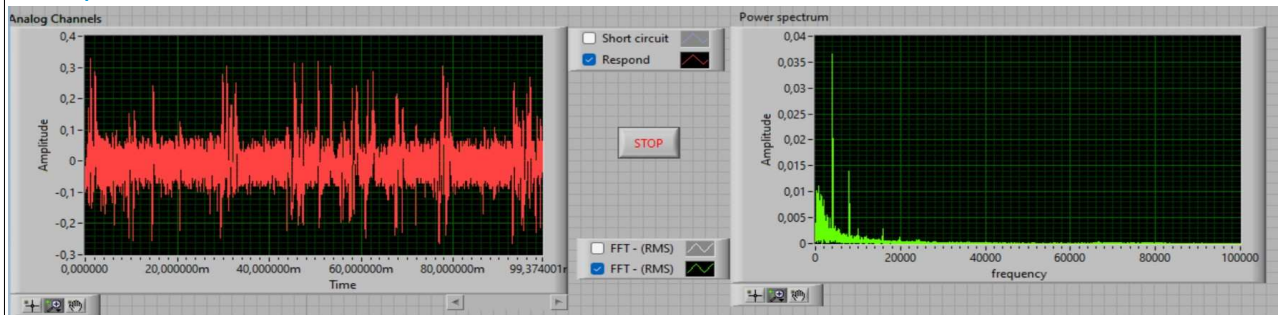
Microfono a condensatore 1 kHz



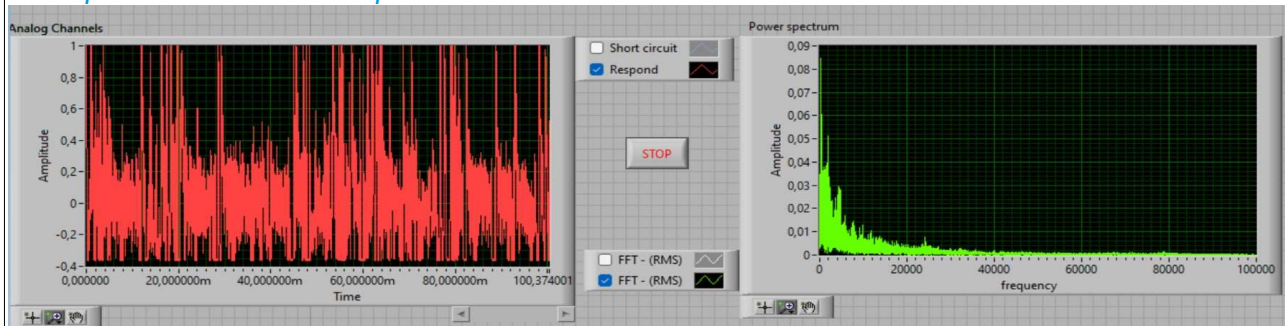
Microfono a condensatore e filtro 1 kHz



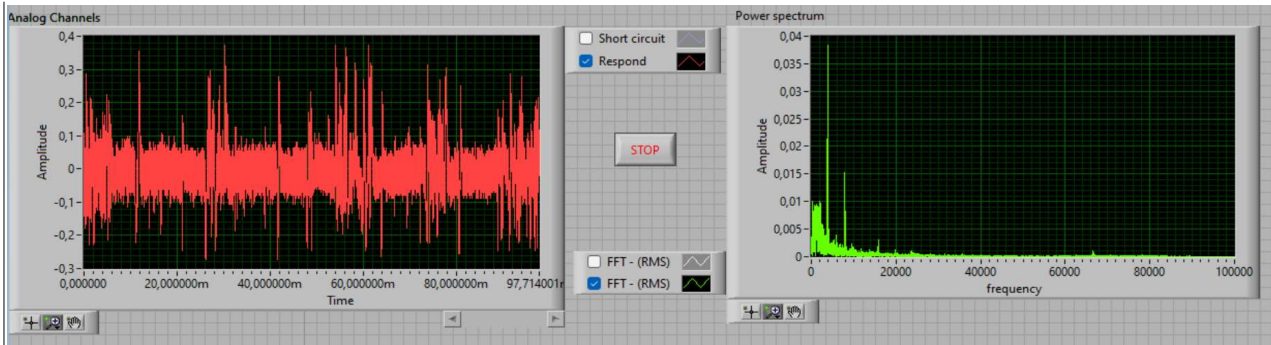
Microfono a condensatore 10 kHz



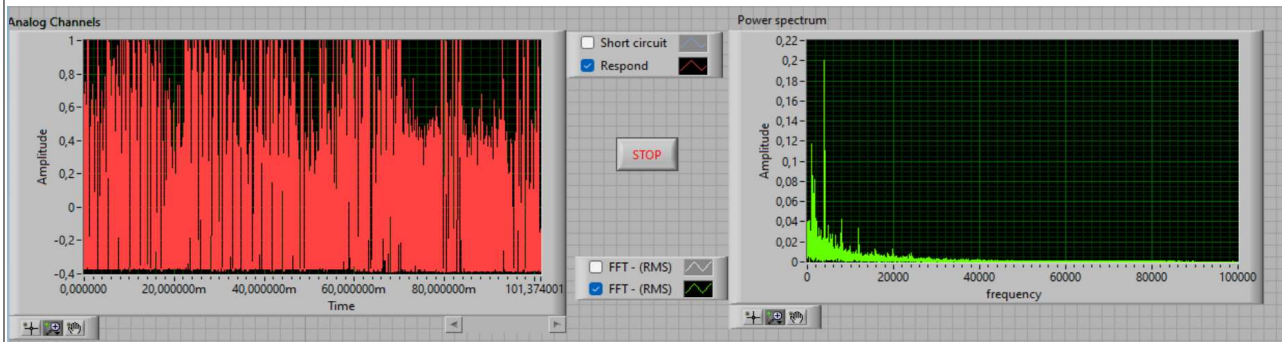
Microfono a condensatore e filtro 10 kHz



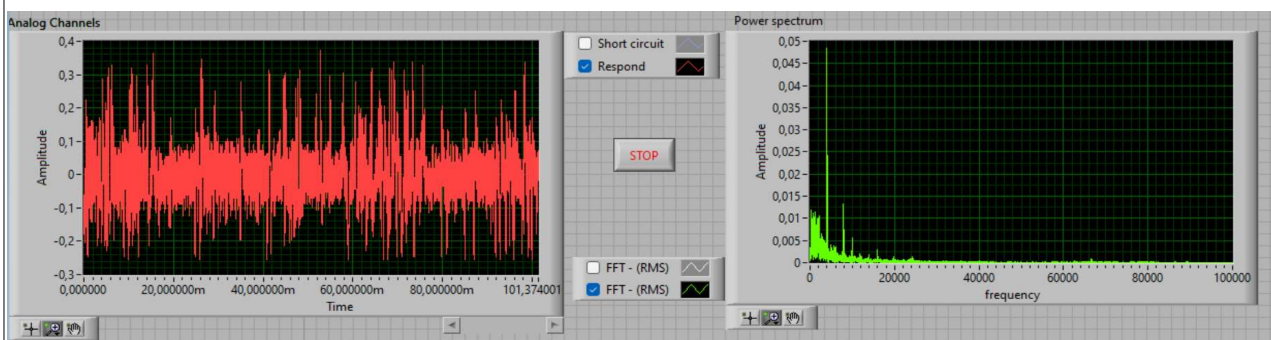
Idrofono acquarian 1 kHz



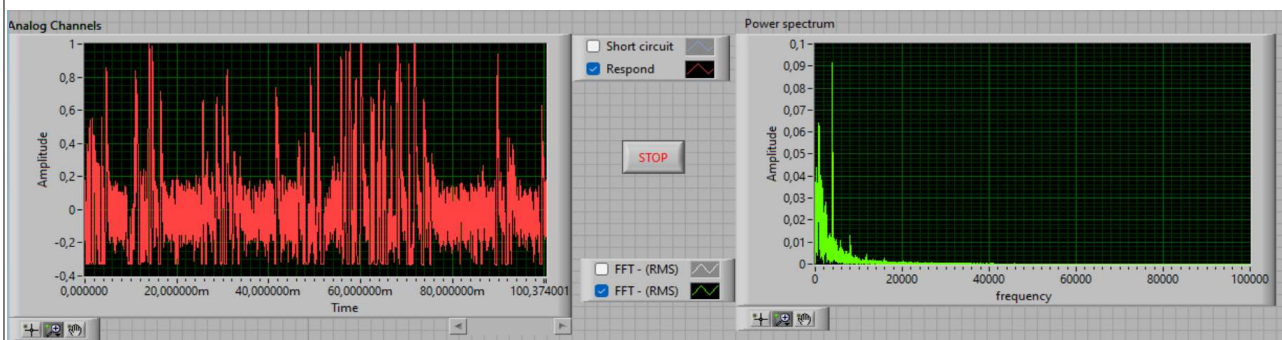
Idrofono aquarian e filtro 1 kHz



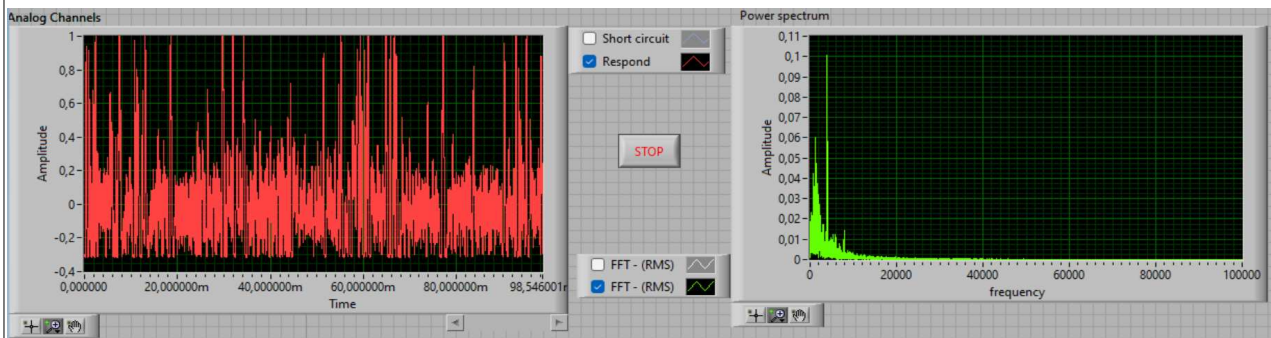
Idrofono aquarian 10 kHz



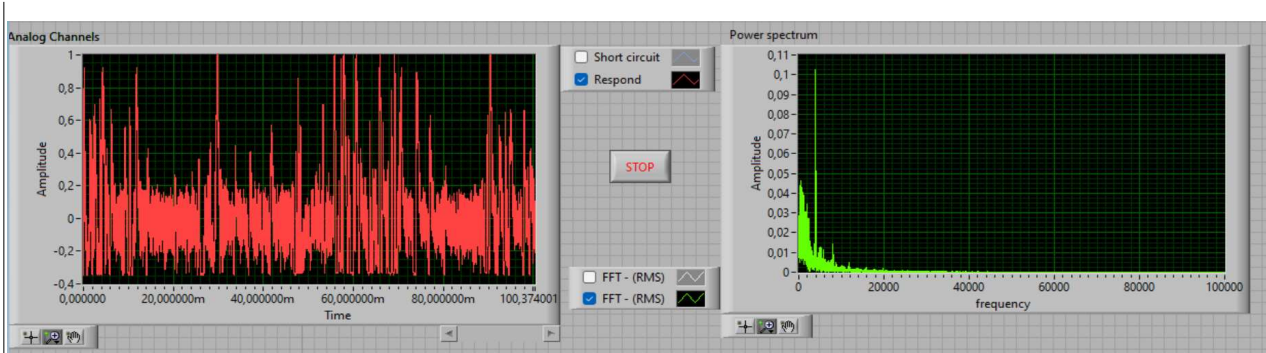
Idrofono aquarian e filtro 10 kHz



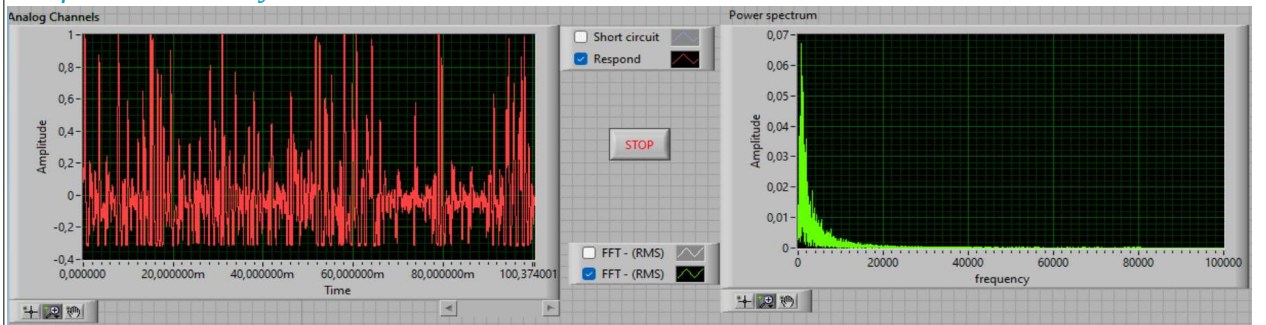
Idrofono sea monkey 1 kHz



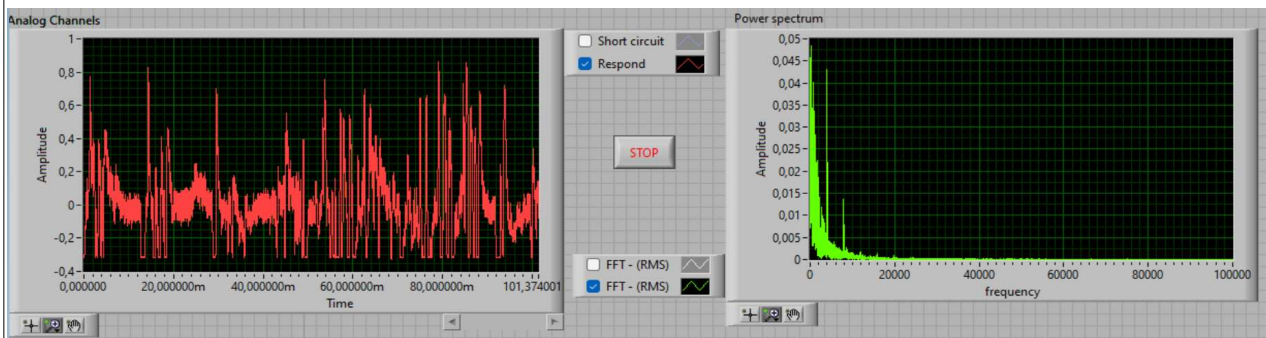
Idrofono sea monkey e filtro 1 kHz



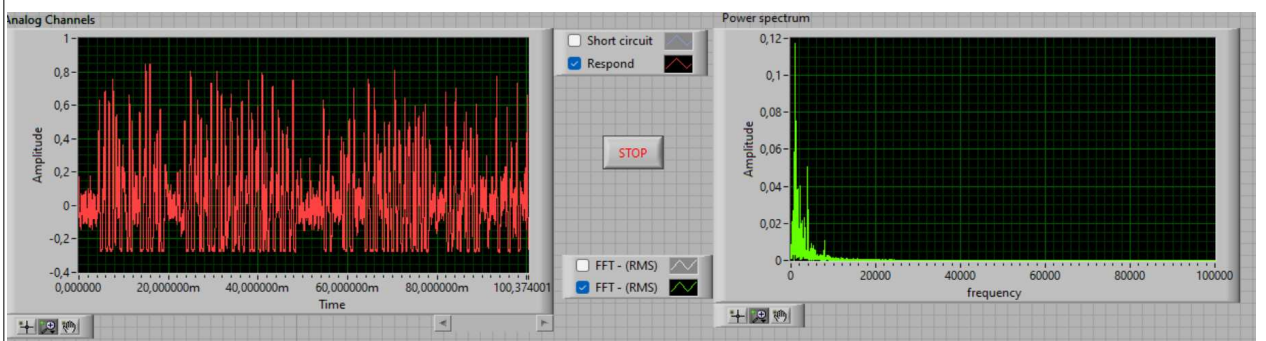
Idrofono sea monkey 10 kHz



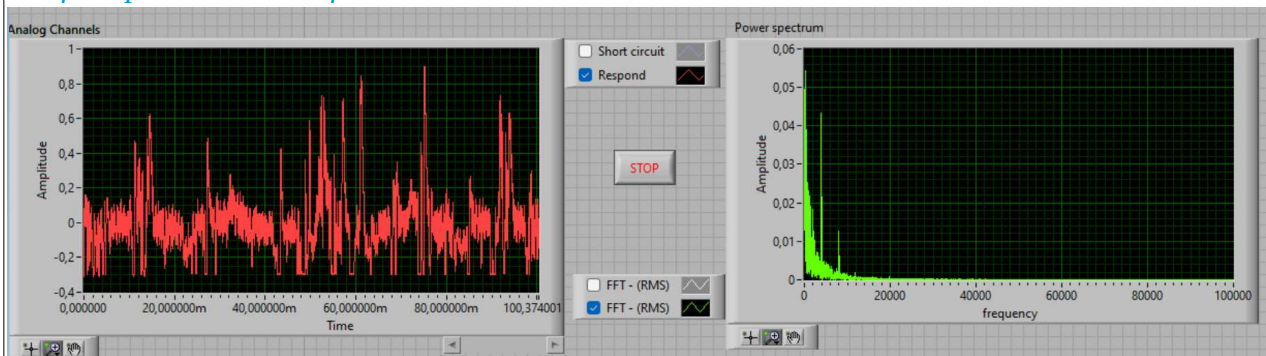
Idrofono sea monkey e filtro 10 kHz



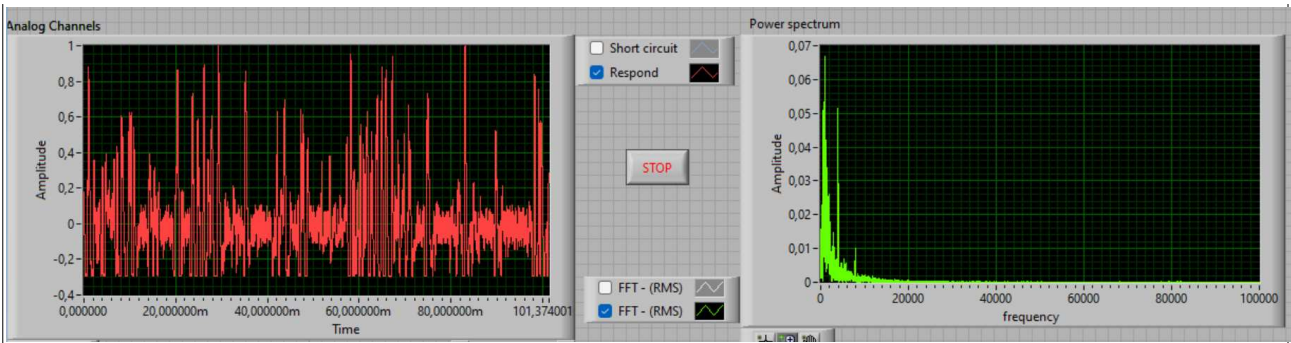
Idrofono piezoelettrico 1 kHz



Idrofono piezoelettrico e filtro 1 kHz

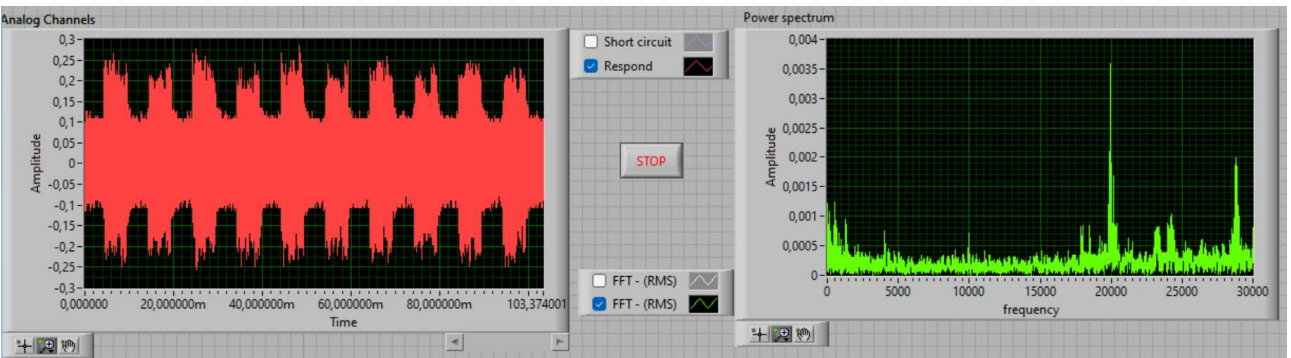


Idrofono piezoelettrico 10 kHz

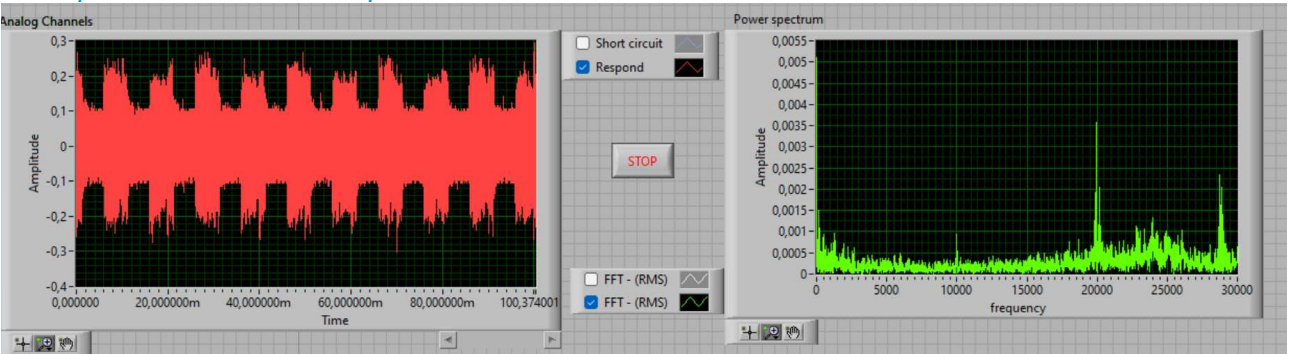


Idrofono piezoelettrico e filtro 10 kHz

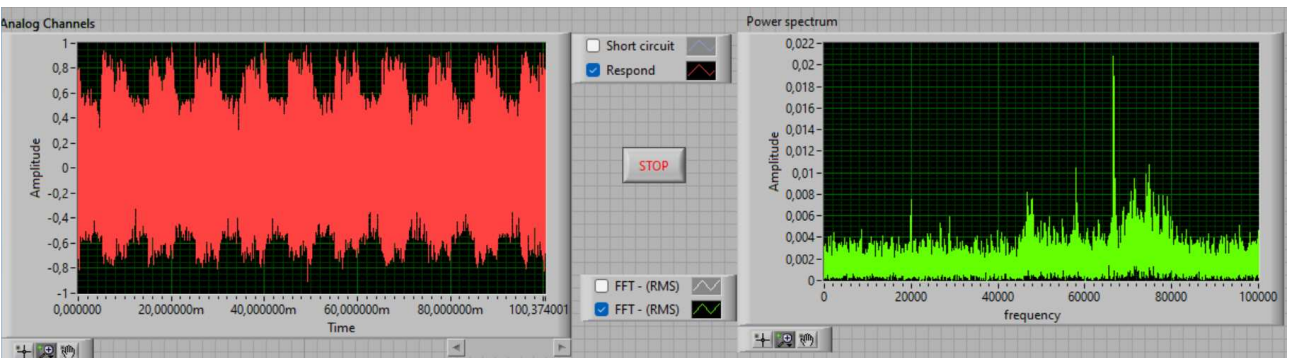
Immagine C : cattura di un'onda sinusoidale utilizzando amplificatore costruito con i vari idrofoni



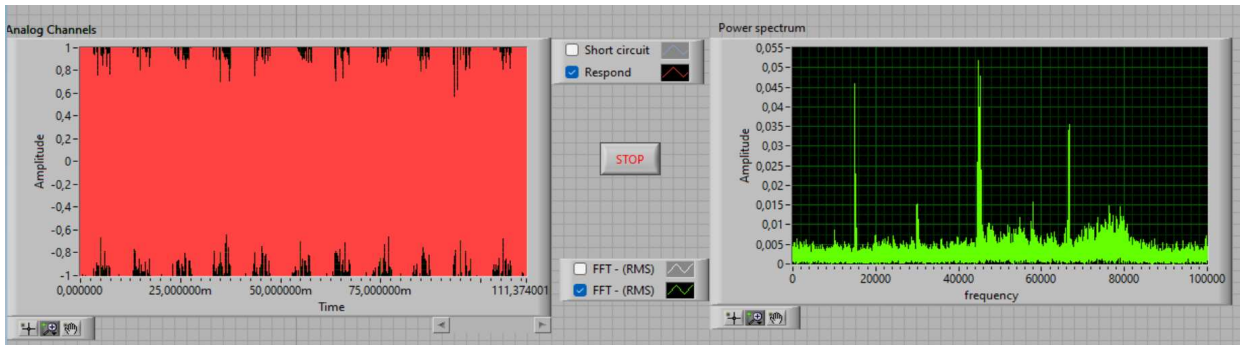
Microfono a condensatore e filtro 1 kHz



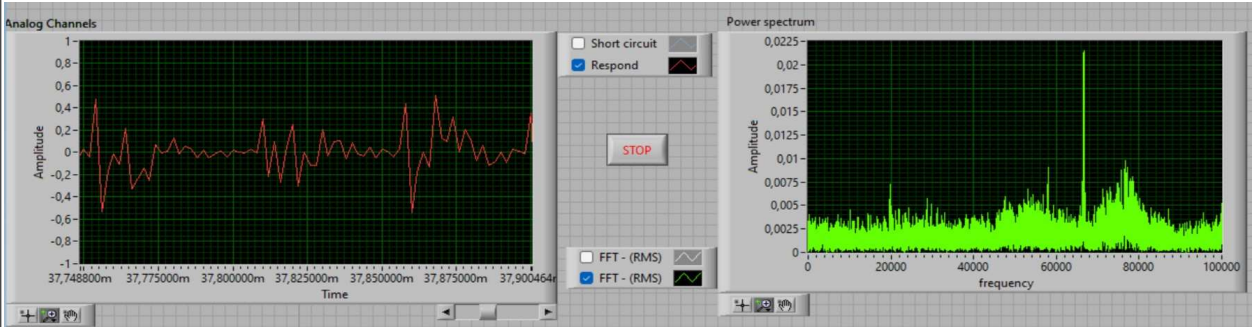
Microfono a condensatore e filtro 10 kHz



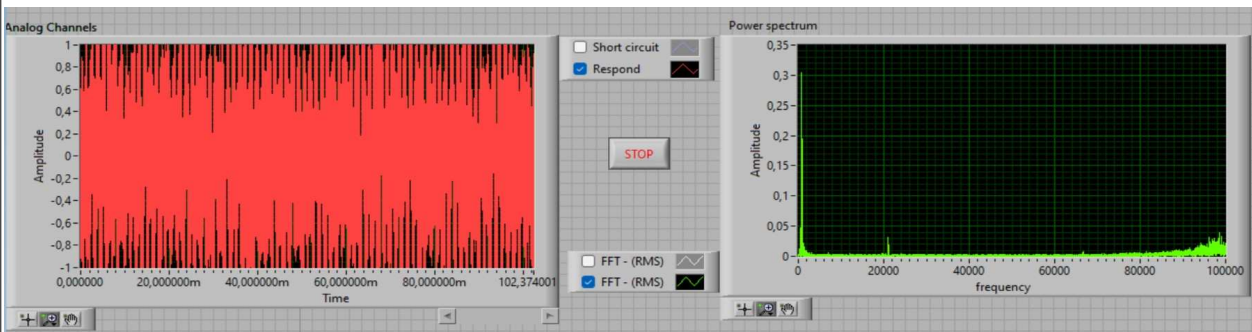
Idrofono acuarian e filtro a 1 kHz



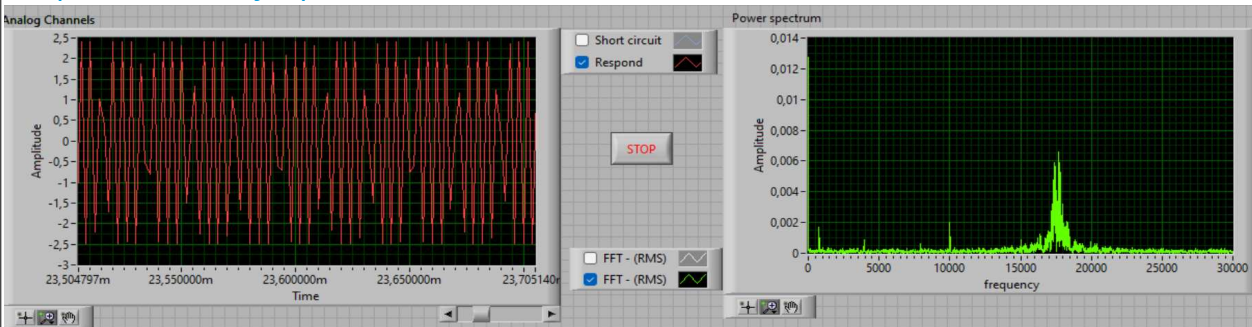
Idrofono acquarian e filtro 10 kHz



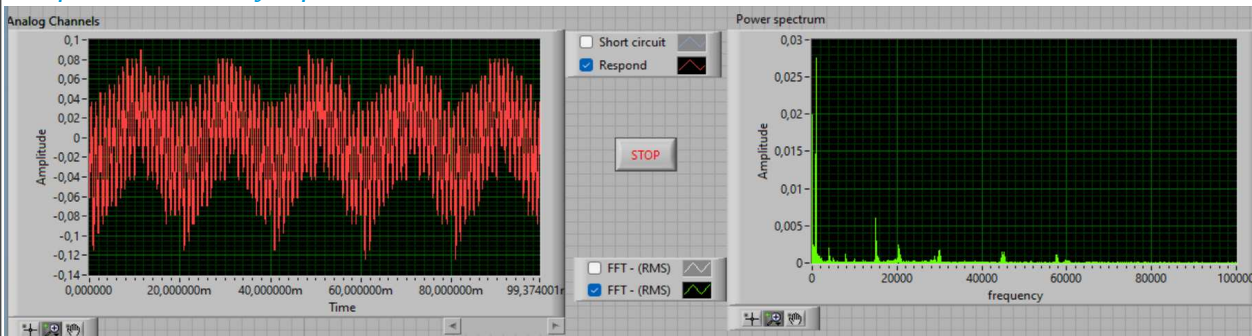
Idrofono acquarian e filtro 70 kHz



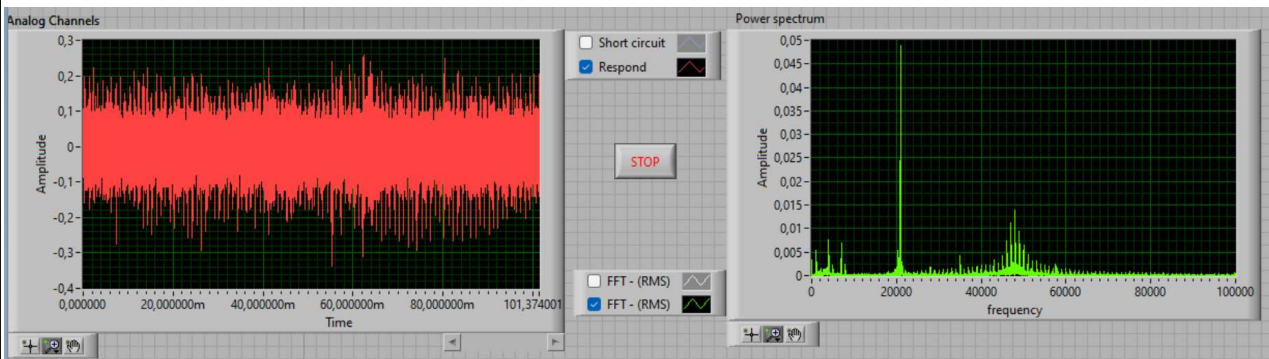
Idrofono sea monkey e filtro 1 kHz



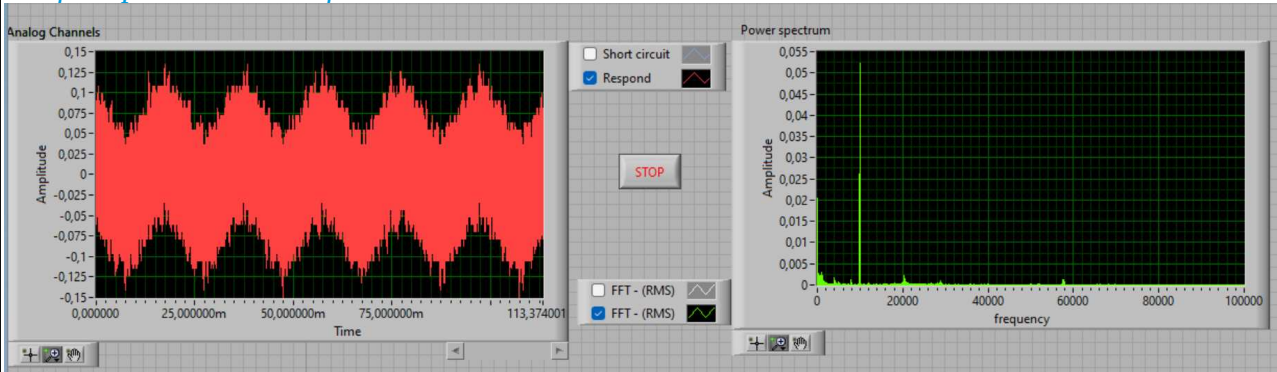
Idrofono sea monkey e filtro 10 kHz



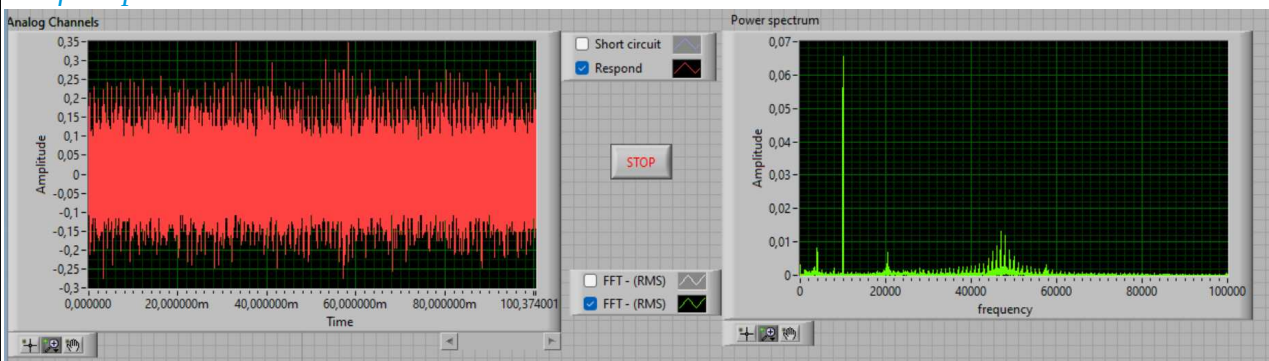
Idrofono piezoelettrico 1 kHz



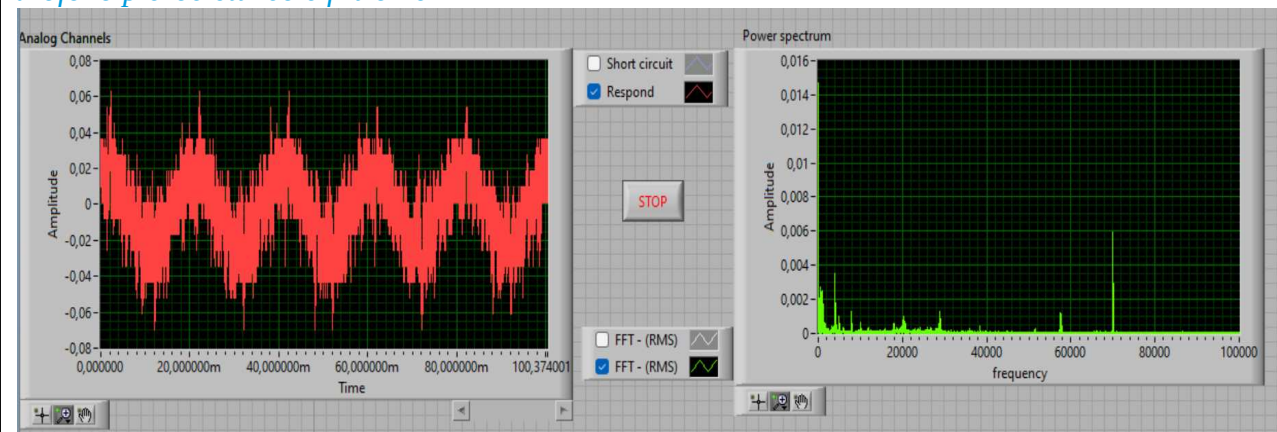
Idrofono piezoelettrico e filtro 1 kHz



Idrofono piezoelettrico 10 kHz

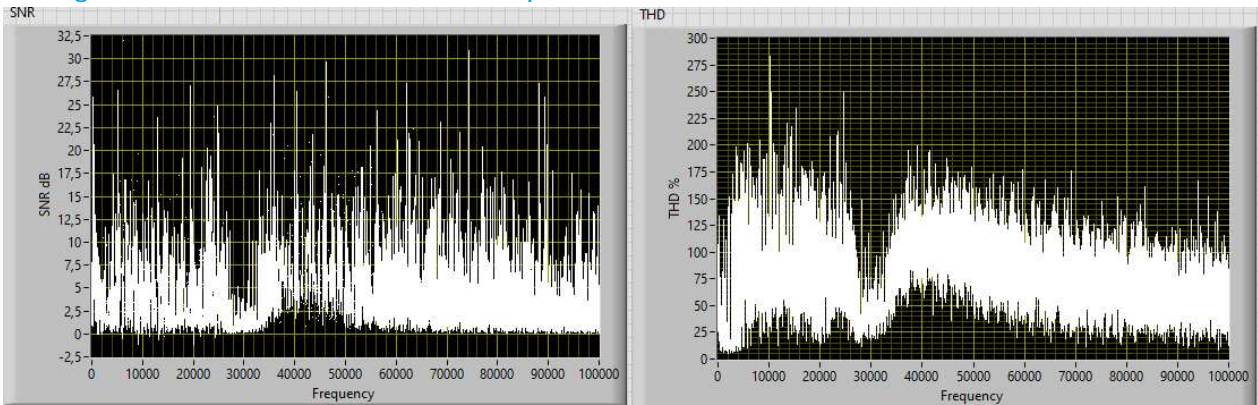


Idrofono piezoelettrico e filtro 10 kHz

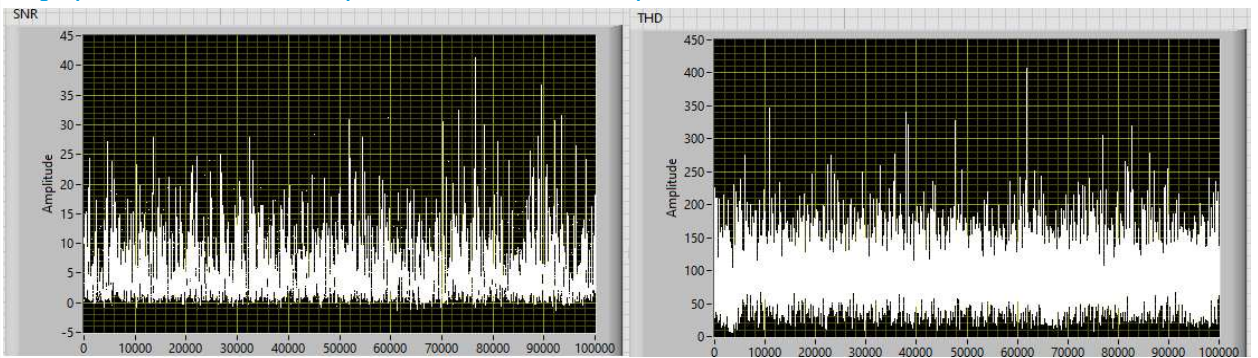


Idrofono piezoelettrico 70 kHz

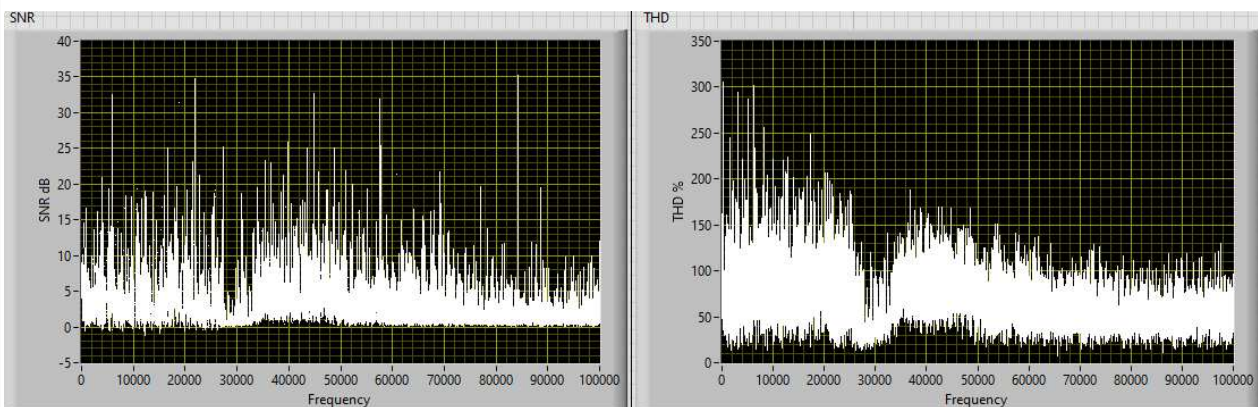
Immagine D : SNR e THD dei vari microfoni



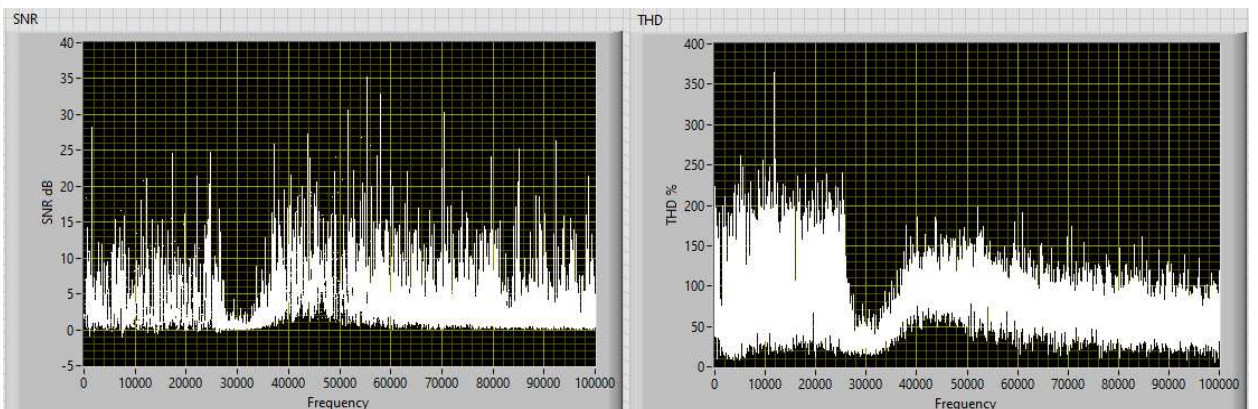
amplificatore bucck, microfono a condensatore e filtro



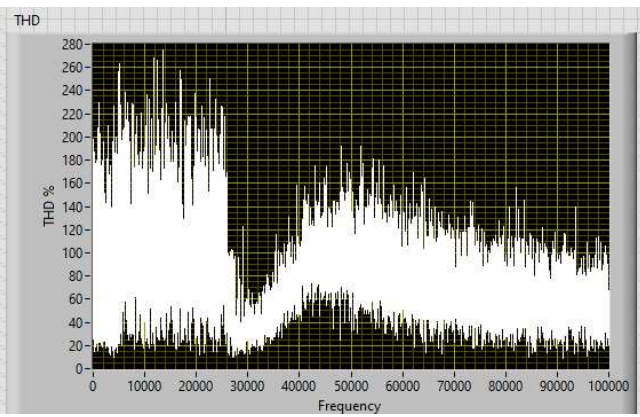
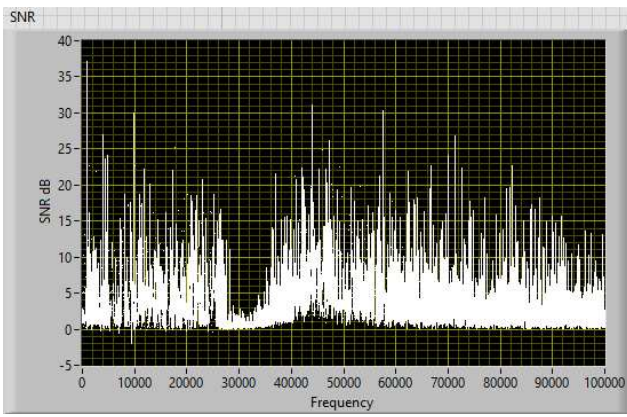
amplificatore bucck e idrofono acquarian



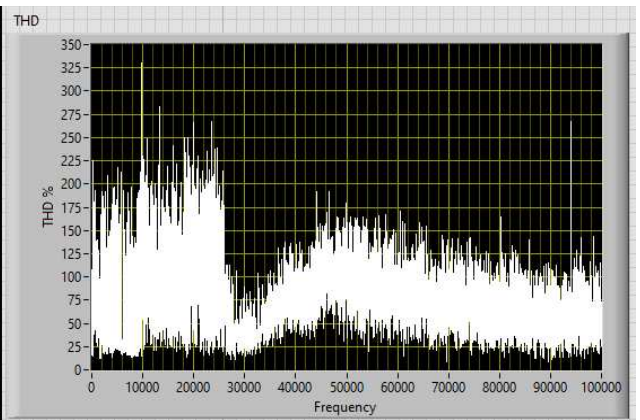
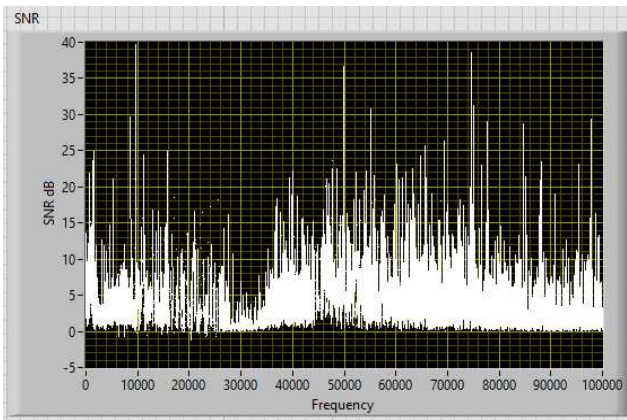
amplificatore bucck, idrofono acquarian e filtro



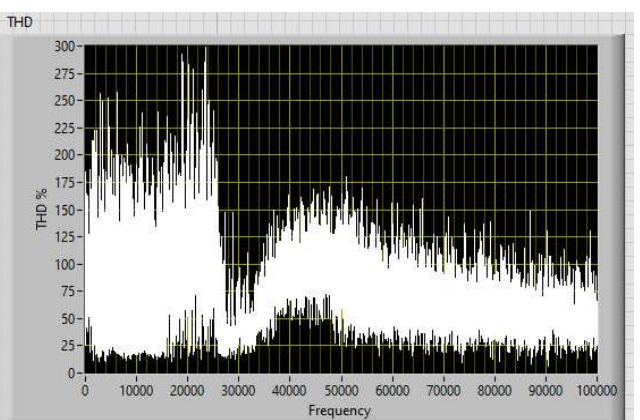
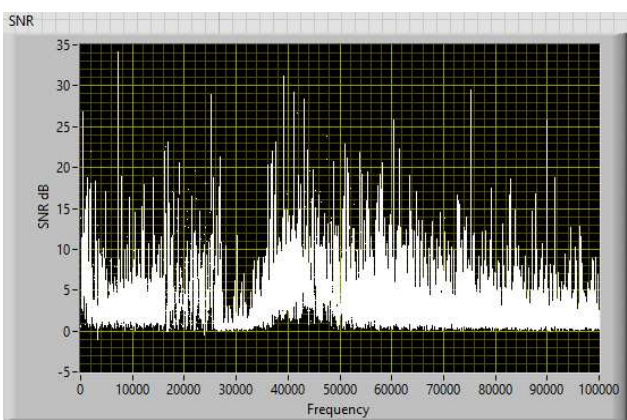
amplificatore bucck e idrofono sea monkey



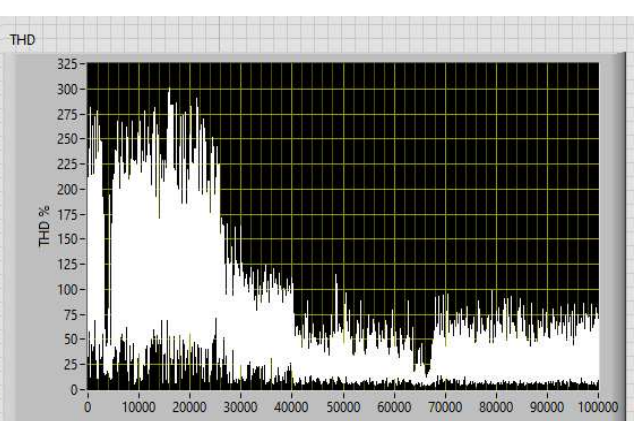
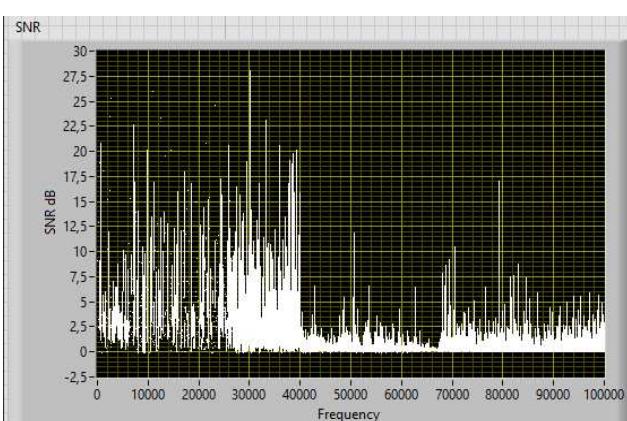
Amplificatore buck, idrofono sea monkey e filtro



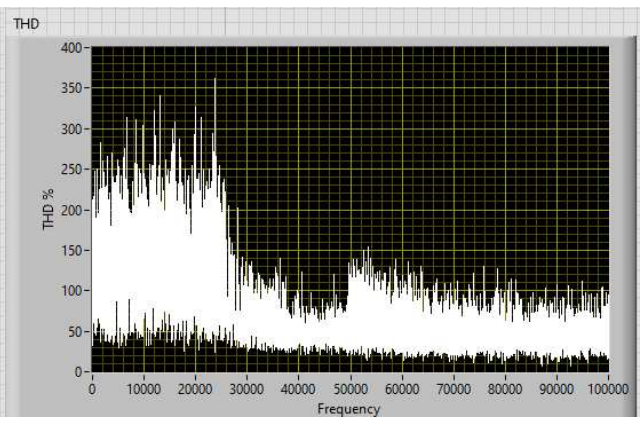
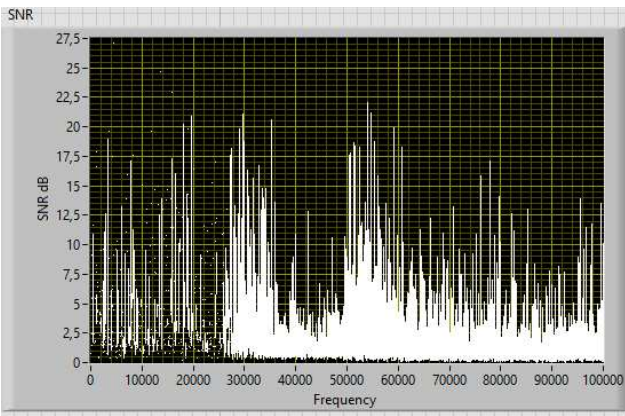
amplificatore buck e idrofono costruito



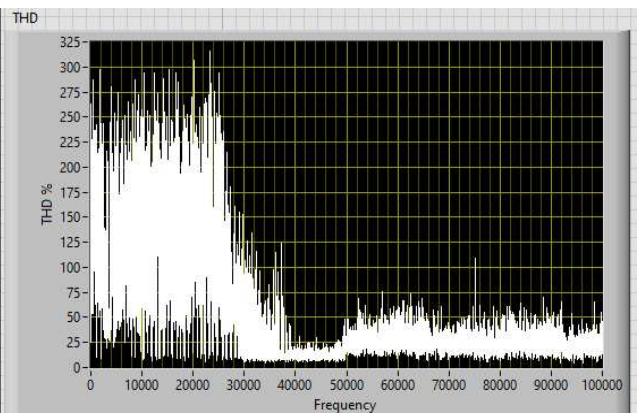
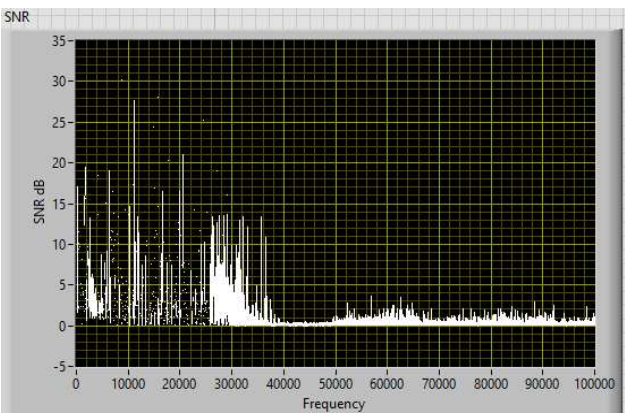
amplificatore buck, idrofono costruito e filtro



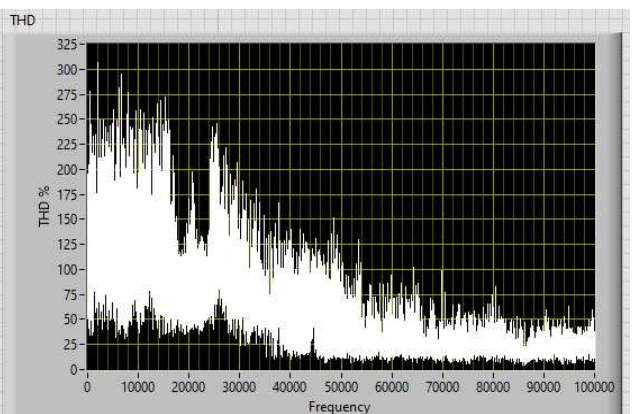
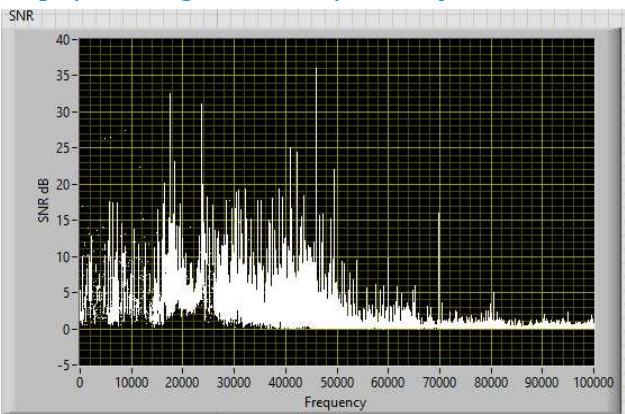
amplificatore grove e microfono a condensatore



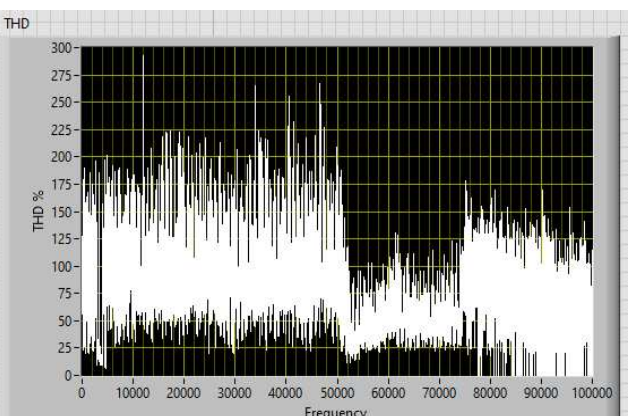
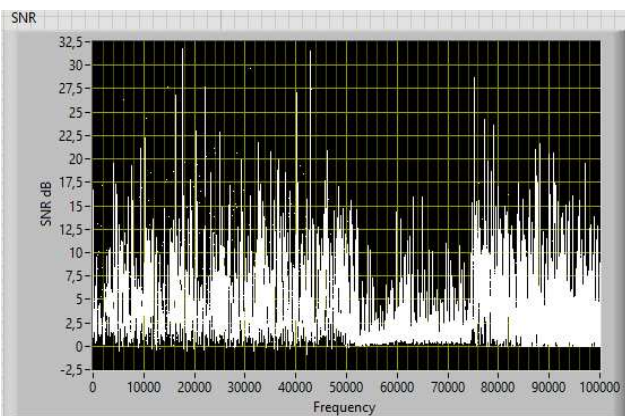
Amplificatore grove, microfono a condensatore e filtro



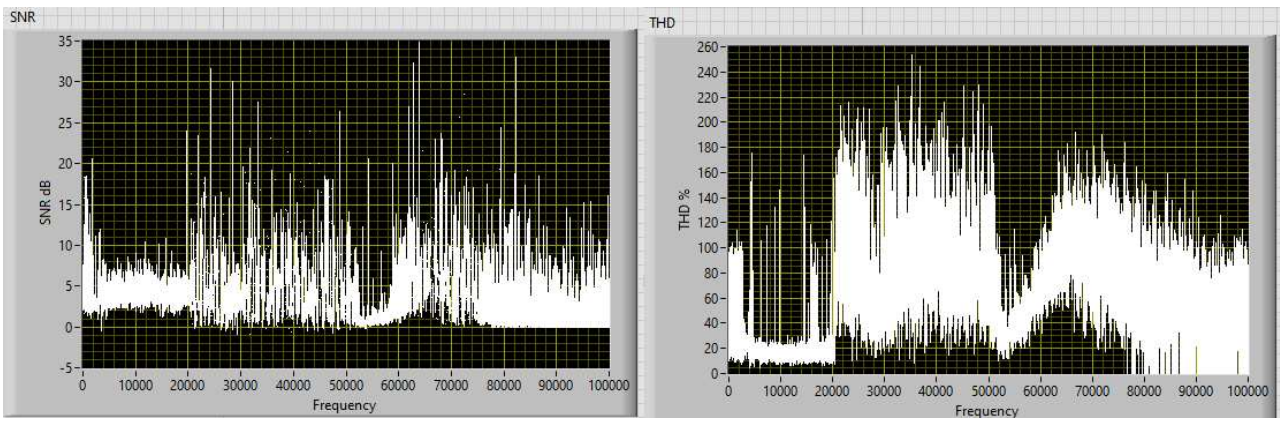
amplificatore grove e idrofono acquarian



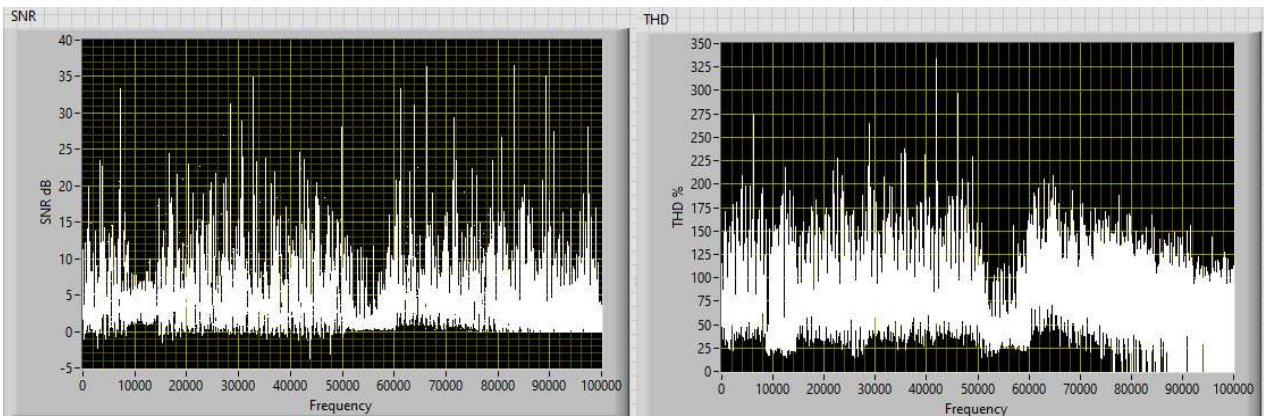
amplificatore grove, idrofono acquarian e filtro



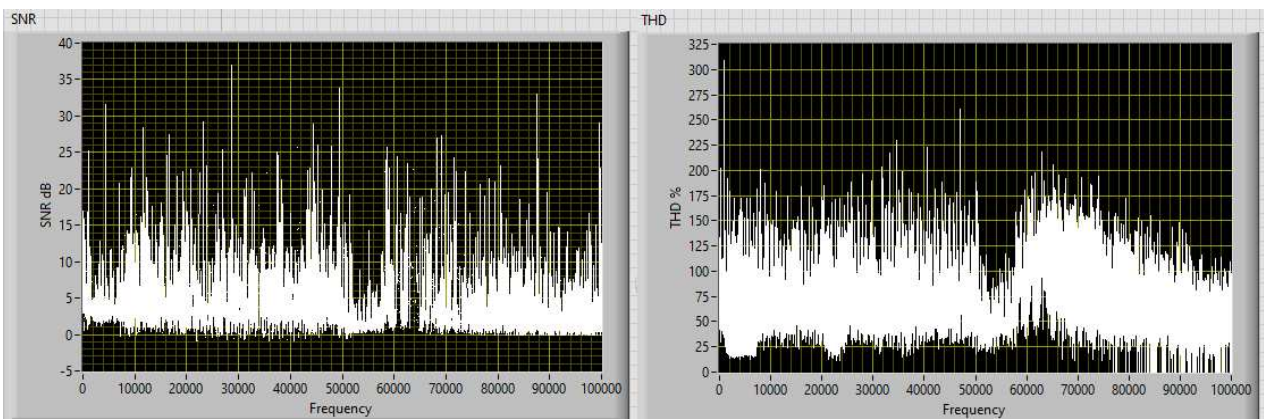
amplificatore grove e idrofono sea monkey



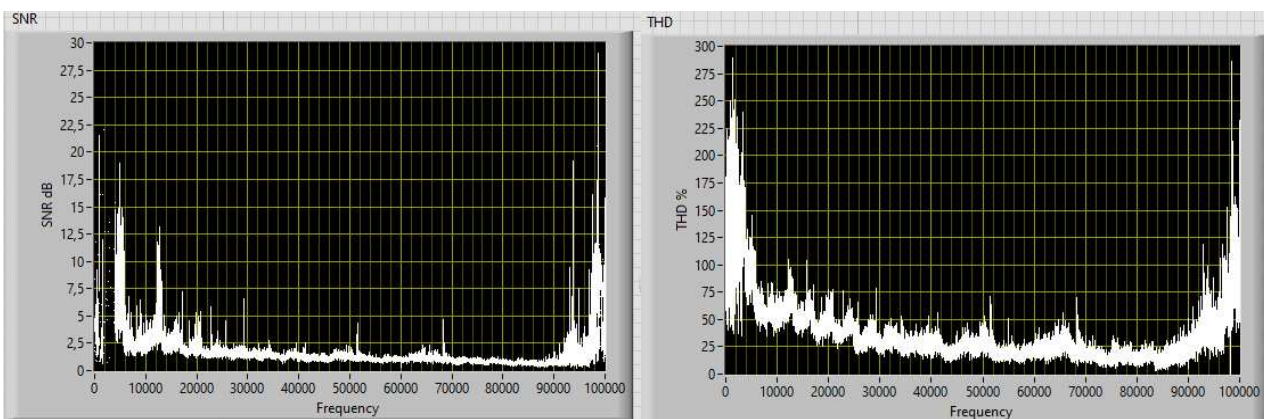
Amplificatore grove, idrofono sea monkey e filtro



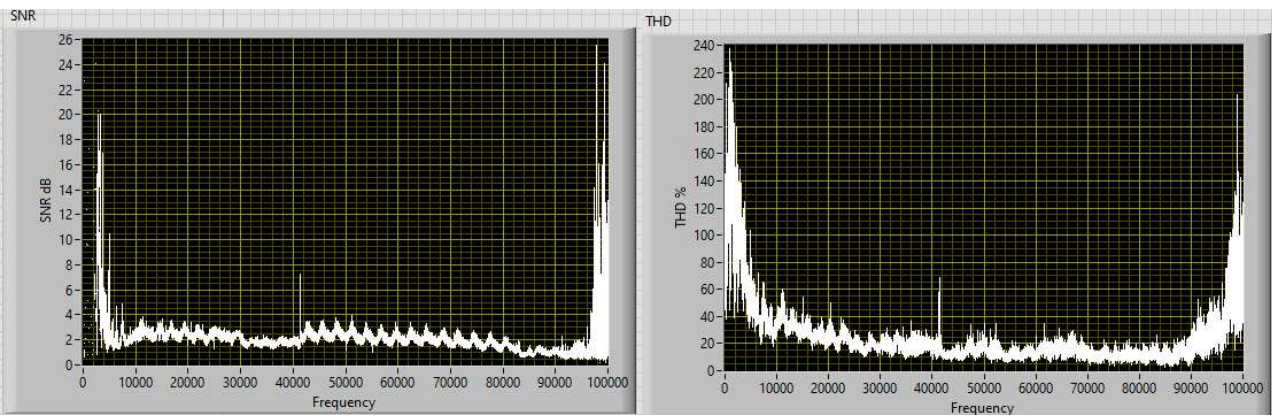
amplificatore grove e idrofono costruito



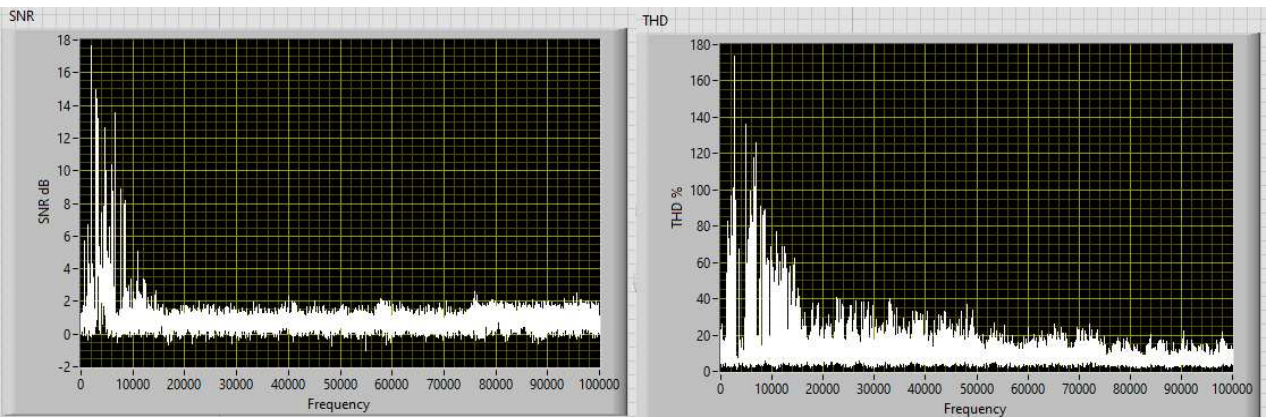
amplificatore grove, idrofono costruito e filtro



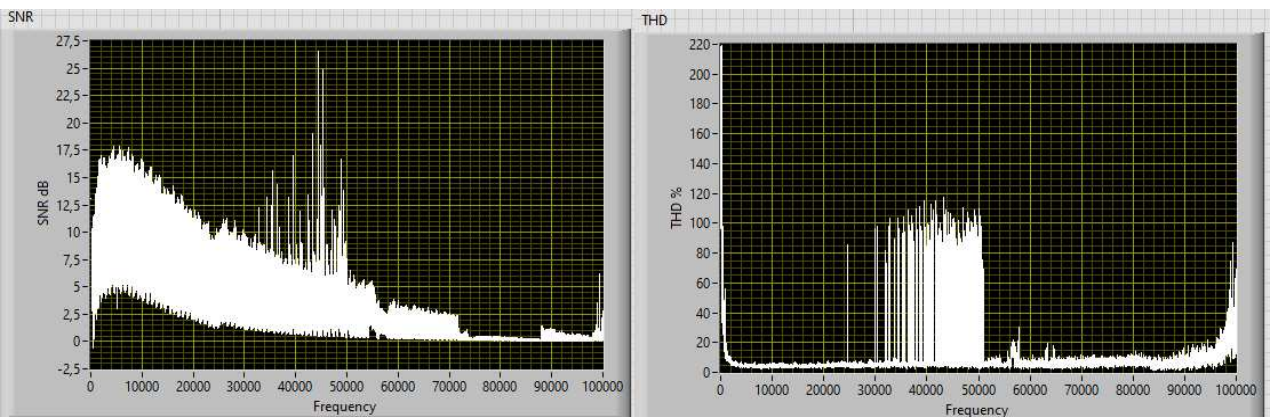
amplificatore costruito, microfono a condensatore e filtro



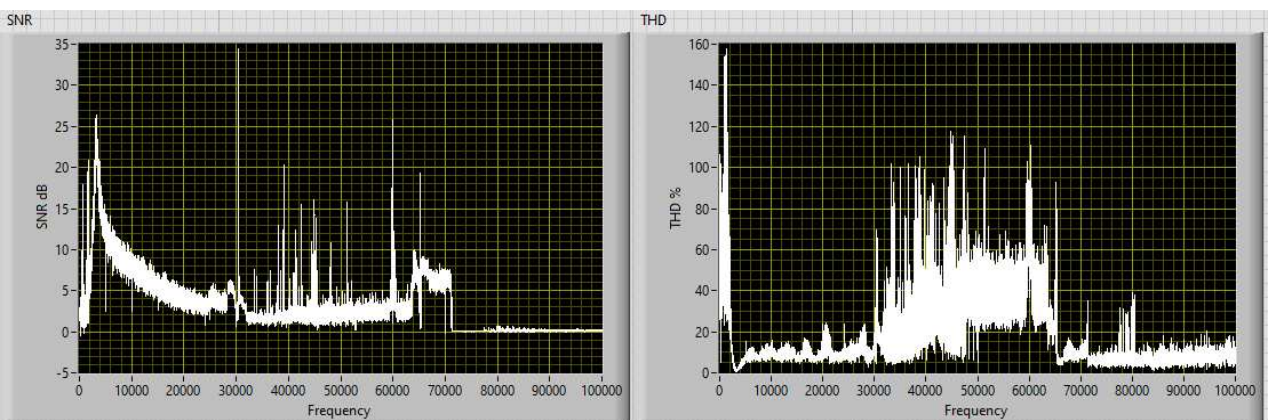
Amplificatore costruito, idrofono aquarian e filtro



amplificatore costruito, idrofono sea monkey e filtro



amplificatore costruito e idrofono costruito



amplificatore costruito, idrofono costruito e filtro

BIBLIOGRAFIA

1. A. Petetta *et al.*, “Fishers’ Perception on the Interaction between Dolphins and Fishing Activities in Italian and Croatian Waters,” *Diversity*, vol. 15, no. 2, p. 133, Jan. 2023, doi: 10.3390/d15020133.
2. R. De Marco *et al.*, “The development of a Low-Cost hydrophone for passive acoustic monitoring of dolphin’s vocalizations,” *Remote Sensing*, vol. 15, no. 7, p. 1946, Apr. 2023, doi: 10.3390/rs15071946.
3. S. R. P. -j. Ross *et al.*, “Passive acoustic monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions,” *Functional Ecology*, vol. 37, no. 4, pp. 959–975, Feb. 2023, doi: 10.1111/1365-2435.14275.
4. IAMC-CNR, “Sistema di monitoraggio acustico sottomarino - CNR Solar.”
<http://eprints.bice.rm.cnr.it/12944/>
5. G. Hayman and S. Robinson, “Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method in the frequency range 10 kHz to 400 kHz.,” *NPL Publication*, Sep. 2007, [Online]. Available: <https://eprintspublications.npl.co.uk/3981/>
6. Kester, Walt. (2009). Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor.
7. National instrument, *Understanding FFTs and Windowing*
<https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>
8. E. Frederiksen, “Acoustic metrology – an overview of calibration methods and their uncertainties,” *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 97–107, Jan. 2013, doi: 10.1051/ijmqe/2013045.
9. Kikiras, Panagiotis. (2023). European Defence Agency Scientific 2023 Scientific Paper Awards. 10.2836/568224.
10. K. Ryoo, M. Chilukuri and S. Jung, *A low power and low noise preamplifier circuit for hearing aid devices, 2016 IEEE Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS)*, Arlington, TX, USA, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/DCAS.2016.7791128.

Ringraziamenti

Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che di più, nell'arco di questi anni, e nella durata del mio percorso di studi, hanno contribuito, con il loro supporto, le loro opinioni, i loro consigli e il loro affetto, al raggiungimento di questo obiettivo.

In primis vorrei ringraziare infinitamente la mia famiglia e i miei amici, per il supporto, l'incoraggiamento e la loro vicinanza durante questo percorso.

Ringrazio mia madre per essere sempre stata la mia roccia, la mia confidente e la mia fonte di ispirazione per la persona che voglio e spero un giorno di diventare. Grazie per la tua comprensione, il tuo affetto, la tua vicinanza, che mai ho sentito mancare in tutti questi anni.

Ringrazio il mio relatore, il Prof. Scaradozzi per avermi accettato come tirocinante e tesista, grazie ha Lui ho intrapreso un viaggio dal quale ho imparato molto e grazie al quale sono arrivato dove sono adesso.

Ringrazio i ragazzi del laboratorio LabMACS, Giacomo, Laura, Veronica, Giulia, per la simpatia e l'ospitalità sempre fornita. . Inoltre li ringrazio ufficialmente anche per tutti i caffè che mi hanno offerto.