



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DI UNA
STANZA E DELLE FACCIATE FINESTRATE
MEDIANTE ARRAY MICROFONICI

ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF A ROOM
AND ITS WINDOW FACADES BY MEANS OF
MICROPHONE ARRAYS

Relatore:
Prof. Paolo Castellini

Tesi di laurea di:
Federico Villanova

Correlatori:
Prof. Milena Martarelli
Dott. Paolo Chiariotti

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

SOMMARIO

1 – INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	5
2 – TECNICHE DI BEAMFORMING	8
2.1 Conventional beamforming	8
2.2 Generalized inverse beamforming (GIBF)	11
3 – SIMULAZIONI DEI TEST VIRTUALI.....	16
3.1 Input della simulazione.....	17
3.2 Calcolo della RIR	23
3.3 Algoritmo di beamforming e mappatura acustica.....	25
3.4 Casi di studio	27
3.4.1 Simulazione con array planare random da 19 e 38 microfoni	30
3.4.2 Simulazione con array volumetrico random da 19 e 38 microfoni.....	36
3.4.3 Simulazione con array spirale da 21 e 41 microfoni	42
3.4.4 Simulazione con array circolare da 19 e 38 microfoni	48
3.5 Risultati e confronto delle simulazioni.....	58
3.5.1 Influenza della tipologia di array e numero di microfoni	59
3.5.2 Influenza della posizione della sorgente.....	63
3.5.3 Influenza della frequenza.....	66
3.6 Conclusioni e individuazione della configurazione ottimale.....	70

4 – MISURE SPERIMENTALI.....	74
4.1 Descrizione del setup sperimentale.....	76
4.1.1 Generatore di segnale e sistema di acquisizione.....	77
4.1.2 Amplificatore	78
4.1.3 Array di microfoni planare circolare	78
4.1.4 Microfoni a condensatore	80
4.1.5 Sorgente acustica	81
4.1.6 Software SimCenter TestLab.....	82
4.2 Prove sperimentali	85
4.3 Mappature acustiche ottenute dalle prove sperimentali	89
4.4 Confronto ed elaborazione dei risultati sperimentali.....	98
4.4.1 Influenza del numero di microfoni	99
4.4.2 Influenza della posizione della sorgente	100
4.4.3 Influenza della frequenza.....	101
4.5 Analisi dei risultati sperimentali.....	103
5 – CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	109
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	112
INDICE DELLE FIGURE	113

1 – INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di localizzare sorgenti acustiche sulla parete finestrata di una sala riunioni del laboratorio di misure dell'UNIVPM, sfruttando la tecnica beamforming (BF), che consiste nel tracciamento di sorgenti sonore utilizzando un certo numero di microfoni disposti in determinate geometrie spaziali, detti array microfonici.

Per capire l'obiettivo finale della ricerca è necessario introdurre e sviluppare il concetto di comfort acustico. In sostanza, questo può essere definito come quella condizione psicofisica per cui un individuo, immerso in un campo sonoro, si trova in condizioni di benessere, in relazione all'attività che sta svolgendo. Relativamente alla qualità acustica degli ambienti destinati all'ascolto della parola, come il caso della stanza presa in esame, è necessario garantire la buona ricezione e l'assenza di disturbo. Il raggiungimento di tali requisiti porta al conseguimento di condizioni ottimali di intelligibilità della parola, definita come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un parlatore.

La buona ricezione è legata alla presenza di un sufficiente livello sonoro nell'ambiente e alla percezione ottimale delle onde sonore dirette e riflesse, sia per quanto riguarda la loro composizione in frequenza, sia per quanto riguarda gli sfasamenti temporali che la caratterizzano.

Garantire l'assenza di disturbo significa invece ridurre qualsiasi rumore di fondo che mascheri il suono prodotto dal parlatore, e contenere quella sensazione uditiva sgradevole e fastidiosa prodotta da uno stato generale d'insoddisfazione verso l'ambiente acustico.

Il rumore di fondo può essere o dovuto ad apparecchiature interne all'ambiente o proveniente dall'esterno. Questi ultimi sono anche detti ponti acustici, vie preferenziali di passaggio della vibrazione meccanica e dell'energia sonora fra due

sistemi. Si parla quindi di un qualsiasi elemento debole della struttura edilizia attraverso il quale si trasmette rumore fra due sistemi, siano essi due ambienti o due componenti edilizi. Possono verificarsi ad esempio in presenza di un mancato assorbimento delle pareti, o essere dovuti a fenomeni di leakage, ma anche da un'interruzione della guarnizione su una finestra.

Il denominatore comune che lega le sorgenti di rumorosità interne ed esterne è la necessità di doverle localizzare all'interno dello spazio, per poi intervenire su di esse al fine di evitare discomfort acustico.

Esistono varie tecniche che ci permettono di localizzare sorgenti acustiche all'interno di uno spazio, e per questo tipo di applicazione la scelta è ricaduta sul BF acustico.

I vantaggi del BF sono svariati:

- Permette il campionamento del campo acustico lavorando a distanza rispetto alla sorgente.
- È molto rapido, richiede tempi di acquisizione relativamente bassi rispetto ad altre tecniche come intensimetria e olografia acustica.
- Le misurazioni sono effettuate prettamente con un software, quindi una tecnica che sfrutta algoritmi che consentono di ottenere delle ottime risoluzioni rispetto ad altre tecniche.

Questi sono punti di forza che rendono il BF il candidato ideale per applicazioni di questo tipo.

Nello specifico, in questo lavoro la tecnica BF è stata applicata per il rilevamento di mappe acustiche su una superficie finestrata di una sala riunioni.

Come prima cosa è stato necessario capire qual era la configurazione di microfoni ottimale affinché si potessero localizzare sorgenti posizionate sulla parete finestrata della stanza presa in esame. Per fare ciò è stato opportuno appoggiarsi ad un software che rappresentasse virtualmente la situazione reale, in modo tale da sapere già cosa aspettarsi in termini di accuratezza di localizzazione, ancora prima di effettuare le misure sperimentali. Le simulazioni sono state realizzate su Matlab, che è servito non solo a replicare virtualmente la geometria della stanza e del setup, ma anche per

usufruire dei suoi algoritmi di calcolo, grazie ai quali è stato possibile ottenere per ogni situazione studiata la mappatura acustica della facciata finestrata. Una volta constatato quale configurazione di microfoni (o array microfonico) permetteva di individuare al meglio le sorgenti sonore in ambiente simulato sulla base della valutazione delle relative mappe acustiche, si è proceduto con le misure sperimentali. Queste sono state effettuate al fine di valutare se i risultati conseguiti con le simulazioni si avvicinassero a quelli ottenuti nel caso reale, e se fosse possibile individuare una sorgente appositamente posta sulla parete vetrata che assuma il ruolo di un fittizio ponte acustico. La tecnica BF ci permette di individuare la posizione dei ponti acustici, sui quali poi si va ad intervenire, e di valutare il potere fonoisolante della parete, ossia la tendenza che essa ha di schermare la stanza da disturbi esterni.

Questo principio è stato adottato per la rilevazione di ponti acustici, ma può essere applicato potenzialmente a qualsiasi tipo di sorgente presente nell'ambiente.

In un'ottica futura di automazione del controllo del livello di comfort acustico all'interno di un ambiente, lo scopo finale è identificare la sorgente interna o esterna che sta determinando discomfort acustico ed andare ad agire in maniera puntuale su quella sorgente attraverso sistemi di monitoraggio che non richiedono l'intervento umano.

2 – TECNICHE DI BEAMFORMING

In questo capitolo verranno trattati i principali concetti teorici che stanno alla base delle di tecniche di misura per la localizzazione di sorgenti sonore.

Il beamforming (BF) è una delle molteplici tecniche utilizzate per la localizzazione spaziale di una sorgente sonora (fissa o dinamica) o per la trasmissione direzionale di onde. Visto che in questo lavoro di tesi l'interesse è quello di localizzare sorgenti acustiche fisse all'interno di un ambiente chiuso verrà preso in considerazione il beamforming atto alla ricezione di onde sonore. Nello specifico questa tecnica si basa sull'utilizzo di una serie di microfoni disposti in geometrie arbitrarie, ovvero array microfonici, che individuano la posizione spaziale della sorgente attraverso il calcolo del ritardo di fase tra un microfono e l'altro. Verranno di seguito mostrati i principi di funzionamento di due diverse tecniche di beamforming, il conventional beamforming (CBF) e il generalized inverse beamforming (GIBF). Il CBF è stato primo strumento di localizzazione di sorgenti sonore ed è basato su principio Delay & Sum, mentre il GIBF è un algoritmo basato su metodi di inversione.

2.1 Conventional beamforming

Il principio di conventional beamforming (CBF) può essere introdotto attraverso un'illustrazione della tecnica base di BF delay and sum. In figura 1 è rappresentata una disposizione lineare di tre microfoni posti ad una distanza "d" tra di loro.

Si consideri ora un'onda acustica cosinusoidale, il cui fronte d'onda proviene da tre direzioni differenti, e supponiamo di essere in condizioni di campo lontano. In base alla direzione del fronte d'onda, il segnale raggiunge i 3 microfoni a tre tempi diversi. Se il fronte d'onda è perpendicolare al piano dell'array, l'output viene creato sommando tutti i segnali temporali dei microfoni ottenendo l'ampiezza massima di

uscita, in quanto il fronte d'onda impatta ogni microfono allo stesso tempo, e i segnali risultano sincronizzati.

Se il fronte d'onda non risulta perpendicolare all'array, l'ampiezza di uscita dell'array è inferiore. Questo avviene se la sorgente è posizionata in modo tale da generare un fronte d'onda che impatta sull'array con un angolo di inclinazione θ , e ne consegue il fatto che al microfono più vicino alla sorgente arriverà per primo il fronte d'onda, mentre ai due microfoni seguenti arriverà con un certo ritardo, funzione della distanza tra i microfoni d e l'angolo di inclinazione θ .

Il ritardo Δ viene ricavato trigonometricamente ed è dato da:

$$\Delta(\theta) = \frac{d}{c} \cos \theta$$

dove “c” è la velocità del suono alle condizioni di misura. I relativi segnali di uscita registrati dai sensori vengono shiftati tra loro della stessa quantità Δ :

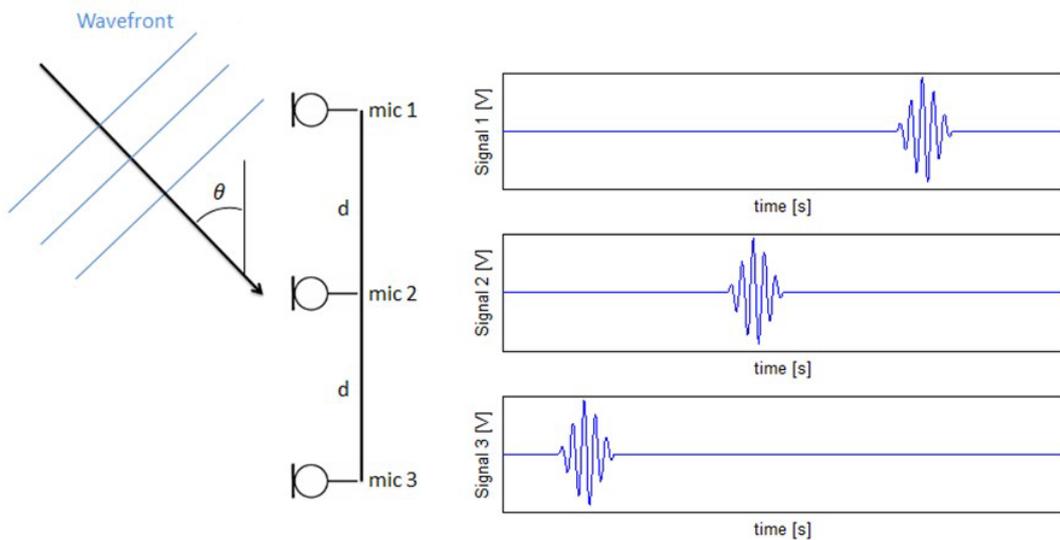


Figura 1, Beamforming D&S

In sostanza con la tecnica delay-and-sum, i segnali dai vari microfoni vengono allineati nel tempo per adattarsi ai ritardi causati dalle differenze di lunghezza del percorso tra la sorgente e ciascuno dei microfoni. Per allineare ciascun canale in un riferimento temporale comune viene comunemente selezionata una posizione del microfono come

punto di riferimento. I segnali allineati vengono quindi sommati insieme per ottenere la forma d'onda risultante registrata dall'array che fornisce una misura del livello di potenza totale (Figura 2).

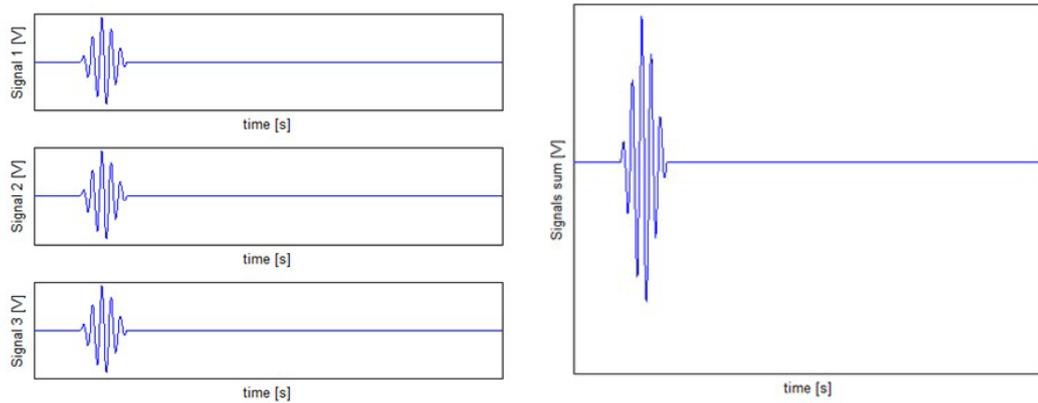


Figura 2, Somma di segnali microfonici shiftati

Questa procedura viene ripetuta per tutti i valori possibili di θ , valutando il livello di potenza totale in funzione della direzione teta in modo da spazzare l'area target alla ricerca della sorgente. La massima forma d'onda risultante sarà legata alla direzione teta da cui proviene il segnale e in questo modo sarà possibile localizzare la sorgente. Di norma l'intensità finale rispetto all'angolo di direttività viene tracciata in un grafico polare che fornisce una visione più chiara della direzione dell'origine del suono: in questo tipo di grafico (figura 3) si può notare il raggio che punta dal centro della matrice verso la posizione della sorgente.

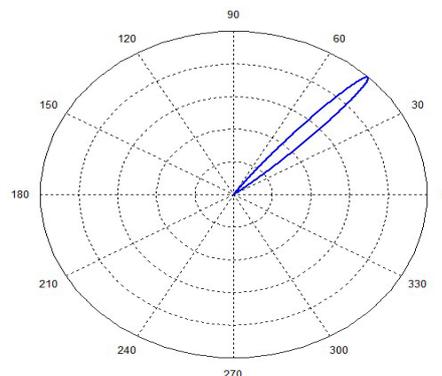


Figura 3, Esempio di diagramma polare

Nel metodo D&S, questi tempi di ritardo vengono valutati e utilizzati per riportare al tempo iniziale ogni segnale del microfono. In questo modo è possibile orientare numericamente l'antenna (piuttosto che cambiarne l'orientamento fisicamente) in direzioni diverse per gli stessi segnali registrati.

2.2 Generalized inverse beamforming (GIBF)

Ciò che è stato trattato in questo paragrafo è stato preso in riferimento a [1] e [2].

Il metodo GIBF è stato proposto da Suzuki nel 2008 e si basa sulla decomposizione della matrice dei crosspettri.

Questa è la tecnica di beamforming che è stato scelto di utilizzare per questo lavoro di tesi nella fase di processamento dei dati temporali dei microfoni ottenuti, sia in campo simulato che pratico. Il flusso logico di funzionamento dell'algoritmo viene illustrato in figura 4.

Il primo step di questo algoritmo è la realizzazione della CSM (matrice dei crosspettri) derivante dai segnali temporali acquisiti dai microfoni, che in questo lavoro è stata ottenuta direttamente con un algoritmo implementato in Matlab. La CSM C è una matrice quadrata $N_{mic} \times N_{mic}$, dove N_{mic} è il numero di microfoni.

Il prossimo step dell'algoritmo è la definizione del “*forward model*”, ovvero un modello matematico di collegamento tra i dati registrati dai microfoni e i modi propri del sistema ottenuti dalla decomposizione:

$$v_i = A a_i$$

Dove:

- v_i è l' i -esimo vettore dei modi propri del sistema
- a_i l' i -esimo vettore dell'ampiezza della sorgente
- A la matrice di trasferimento, che rappresenta il collegamento tra le ampiezze delle sorgenti e i segnali temporali misurati dai microfoni.

A racchiude tutta la fisica del fenomeno sonoro e la rappresentazione della realtà per l'algoritmo di beamforming. Questo la rende un parametro molto importante per l'accuratezza dei risultati, perché anche se l'algoritmo utilizzato e l'array risultano efficienti, una rappresentazione sbagliata di A porta a risultati inaccurati.

Si ottiene così v_i , prodotto dalla decomposizione della CSM. Quest'ultima può essere decomposta come segue:

$$C = U\Lambda U^\dagger$$

Dove:

- C è la matrice dei crosspettri,
- U è la matrice degli autovettori che contiene gli autovettori u_i ottenuti dalla relazione $u_i = \sqrt{\lambda_i} v_i$
- Λ è la matrice diagonale degli autovalori che contiene gli autovalori $\sqrt{\lambda_i}$
- U^\dagger la trasposta complessa coniugata di U .

L'obiettivo dell'algoritmo è quello di recuperare i vettori sorgente a_i che generano i modi v_i considerando gli aspetti fisici contenuti nella matrice A .

Per rintracciare l'ampiezza dei vettori sorgente sono utilizzate tecniche di inversione e regolarizzazione, rispettando i vincoli del forward model con una norma minima di \mathcal{L}^2 . Per risolvere tale problematica viene comunemente utilizzato il moltiplicatore Lagrangiano, attraverso il quale otteniamo:

$$a_i^* = \operatorname{argmin} \|a_i\|^2 + \lambda (v_i - Aa_i)$$

Dove λ è il moltiplicatore Lagrangiano. Il primo termine è relativo alla minima norma dell'ampiezza del vettore sorgente, mentre il secondo è dato dal vincolo del "forward model".

La soluzione analitica di questa equazione è data da:

$$a_i^* = A^\dagger(AA^\dagger)^{-1}v_i$$

Il prodotto AA^\dagger genera una matrice rigida (caratterizzata da un rapporto elevato tra l'autovalore più alto e più basso), e questo crea problemi al processo di inversione. Occorre dunque effettuare un processo di regolarizzazione per evitare questo problema. Questo può essere fatto con la regolarizzazione di Thkhonov, mediante la quale viene aggiunto un termine diagonale che fa sì che l'equazione diventi:

$$a_i^* = A^\dagger(AA^\dagger + \mu I)^{-1}v_i$$

Dove μ è il parametro di regolarizzazione e I è la matrice identità.

Il parametro μ può assumere un valore arbitrario, ma Suzuki consiglia di assegnare a μ un valore pari a circa il 5% del massimo valore di autovalore:

$$\mu = e \max(\text{eig}(AA^\dagger)) \quad \text{con } e = 0.05$$

Per rendere la mappa delle sorgenti acustiche maggiormente leggibile Suzuki propone di realizzare la minimizzazione con una norma \mathcal{L}^1 invece della precedente \mathcal{L}^2 , applicando lo stesso processo di minimizzazione effettuato precedentemente col metodo del moltiplicatore Lagrangiano ottenendo:

$$a_i^* = \text{argmin} \|a_i\|^1 + (v_i - Aa_i)$$

La soluzione a questa equazione è ottenuta con un processo iterativo che consiste nell'utilizzo dell'algoritmo IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares), che calcola il vettore sorgente di ampiezza con il seguente processo:

$$a_i^{n+1} = W^{(n)}A^\dagger(AW^{(n)}A^\dagger + \mu I)^{-1}v_i$$

Dove $W^{(n)}$ è la matrice diagonale che ha come componenti diagonali w_i dati dalla relazione $w_i = |a_i^{(n)}|$. Tale algoritmo occulta i side lobes e rafforza il segnale della sorgente. Questo viene ripetuto fino a quando la norma del vettore sorgente di ampiezza a inizia ad aumentare oppure il contatore delle iterazioni raggiunge un limite predefinito.

Suzuki inoltre applica un'ulteriore modifica all'algoritmo, introducendo un coefficiente di riduzione β , (con $0 < \beta < 1$) utilizzato per ridurre il vettore sorgente di ampiezza scartando i valori più bassi.

β viene utilizzato ad ogni interazione e determina una riduzione della matrice di trasferimento A , snellendo di molto il tempo di calcolo. L'algoritmo si ferma nel momento in cui il vettore raggiunge un predefinito valore impostato dall'utente.

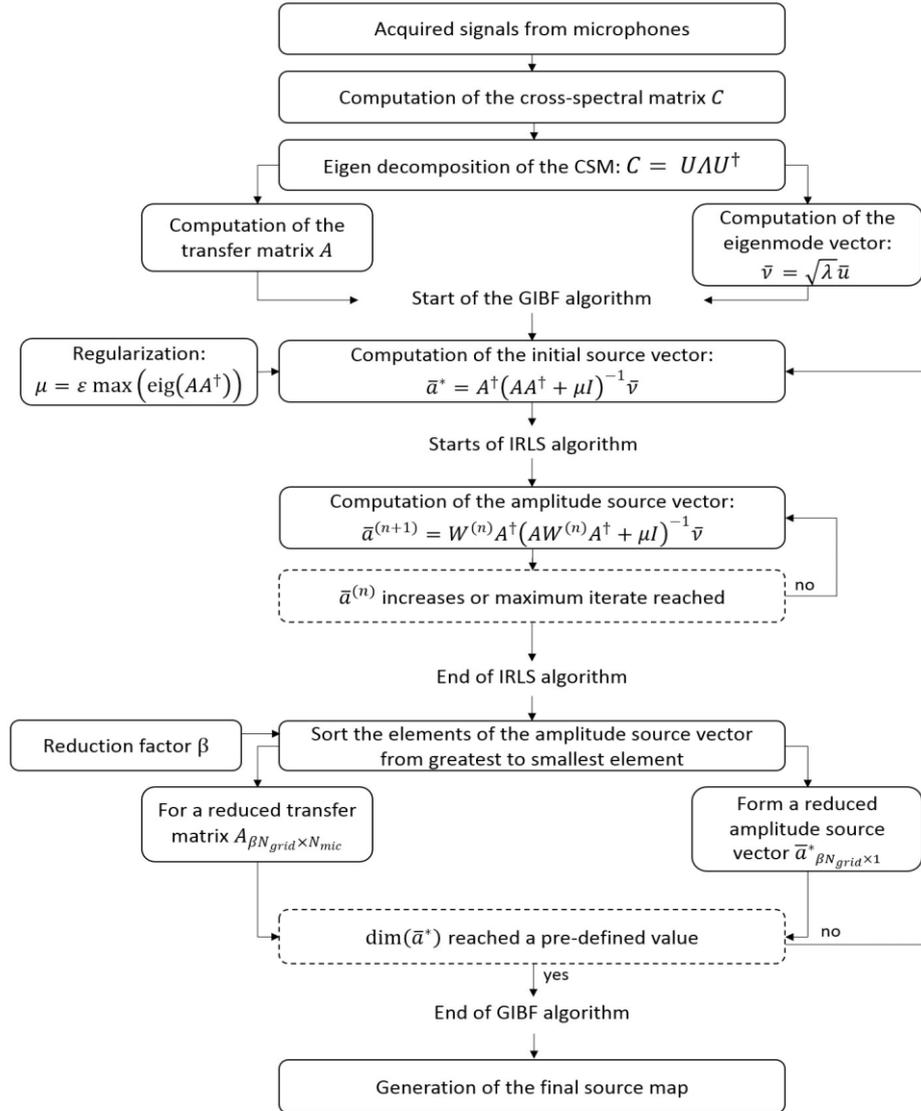


Figura 4, Flow chart dell'algorithmo GIBF

3 – SIMULAZIONI DEI TEST VIRTUALI

Come già anticipato nell'introduzione, l'obiettivo di tesi è individuare mediante array microfoniche la posizione di ponti acustici sulla parete finestrata di una stanza, nello specifico la sala riunioni del laboratorio di misure dell'UNIVPM.

Prima di realizzare tutto ciò nella pratica, risulta molto utile realizzare virtualmente su un software l'ambiente reale. La simulazione è uno strumento che offre la possibilità di effettuare un numero potenzialmente infinito di prove, e l'utilità dei test virtuali risiede nel fatto che danno modo di verificare che le configurazioni di microfoni scelte e l'algoritmo di calcolo utilizzato per il tracciamento delle sorgenti risultino adeguati. Una volta certificato che il sistema di misura fosse funzionante, è stata selezionata la configurazione migliore sulla base dei risultati di simulazione, ossia quella che localizza la sorgente con il minor errore alle varie frequenze di emissione sonora.

Gli output ottenuti da tale configurazione sono stati poi confrontati con i corrispettivi risultati procurati con l'unico array a disposizione in laboratorio nel periodo di tirocinio. Questo è servito a valutare, confrontando le due serie di dati, se fosse ragionevole o meno replicare sul campo le misurazioni effettuate virtualmente con l'array al momento disponibile. La parte di simulazione è stata svolta interamente su Matlab, facendo uso di algoritmi che hanno permesso:

- Di generare la geometria della sala riunioni contenente le configurazioni di microfoni e la sorgente;
- Di simulare la pressione acustica rilevata dai microfoni in un ambiente chiuso;
- Di generare mappe acustiche sulla parete finestrata, sulla base dei campionamenti virtuali dei microfoni.

3.1 Input della simulazione

Gli input sono stati inseriti mediante un codice Matlab che riporta in sequenza tutte le informazioni e dati necessari alla realizzazione dell'ambiente di simulazione.

Sorgente acustica Per prima cosa è stato inserito il segnale random emesso dalla sorgente con le seguenti caratteristiche:

- frequenza di campionamento 44.1 kHz
- durata del segnale 10 s
- livello di pressione acustica 100 dB
- segnale random con distribuzione di ampiezza gaussiana di 100 dB
- numero di linee spettrali per il passaggio dal dominio del tempo a quello della frequenza.
- funzione “pwelch” di Matlab, restituisce la stima della densità spettrale di potenza (PSD) del segnale di ingresso
- plot del segnale, grafica l'ampiezza del segnale in dB in funzione della frequenza

```
% Create a 1D vector of source signal data, e.g.: SrcSignalVec = wavread('s
fs = 44.1e3;
duration = 10;
ns=duration*fs;
pdB=100;
SrcSignalVec = 20e-6*10^(pdB/20)*randn(ns,1);
nfft=8192*2;
[pss,f1] = pwelch(SrcSignalVec,hanning(nfft),nfft*.75,nfft,fs,'power');
figure,plot(f1,20*log10(sqrt(abs(pss))/20e-6))
```

Figura 5, Codice Matlab - definizione della sorgente acustica

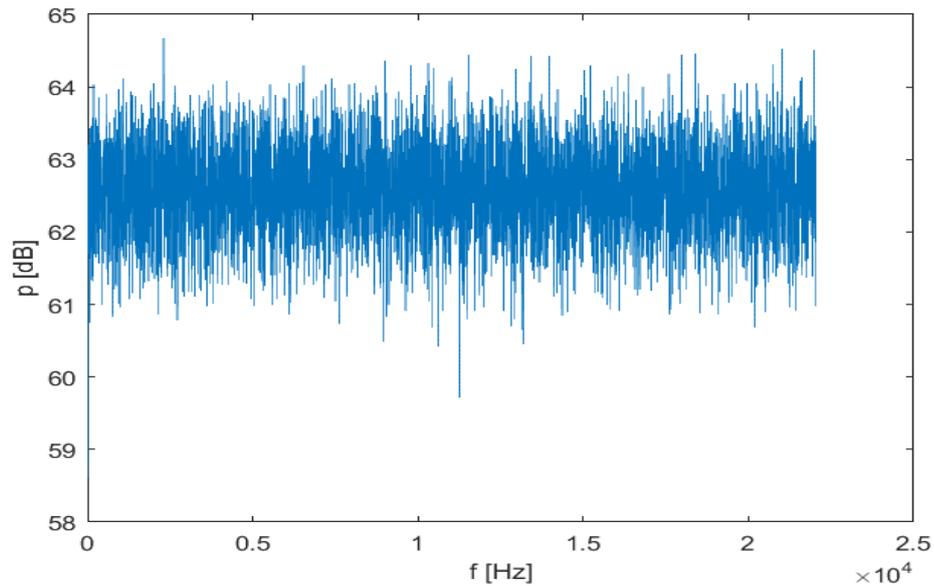


Figura 6, Rappresentazione in frequenza del segnale generato

Geometria della stanza Di seguito, vengono definite le dimensioni della stanza:

```
% define room geometry
room = [3.67 4.43 3.38-.74];
```

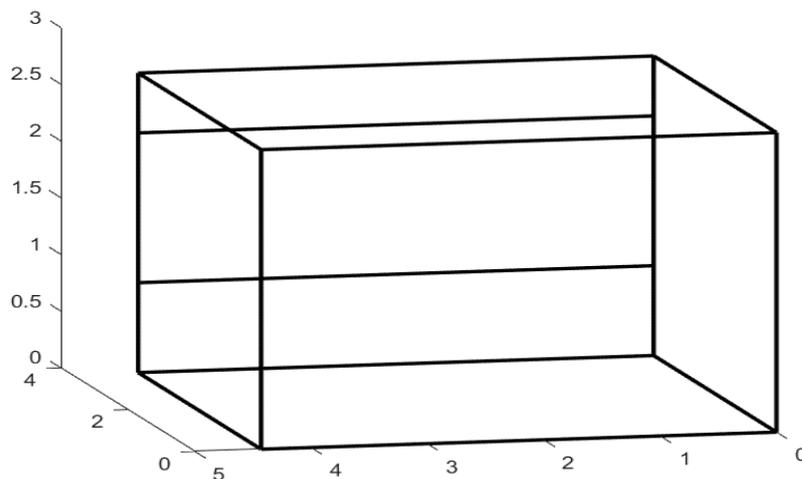


Figura 7, Codice e rappresentazione geometrica dell'ambiente studiato

Va fatta una precisazione relativamente ai dati di input delle dimensioni della stanza, ovvero che la coordinata z, è valutata a meno dell'altezza di un grande tavolo

all'interno dell'aula che può essere considerato, in termini di trattazione acustica, come un pavimento rialzato.

Posizione dei microfoni Il prossimo passo consiste nel definire la disposizione dei microfoni all'interno della stanza, con il vincolo che la distanza tra microfoni e muro sia minimo un metro, questo perché i microfoni se troppo vicini alle pareti risentono delle riflessioni che si verificano andando a compromettere i risultati. Come disposizioni sono state scelte:

- Array di microfoni disposti in maniera random su un piano

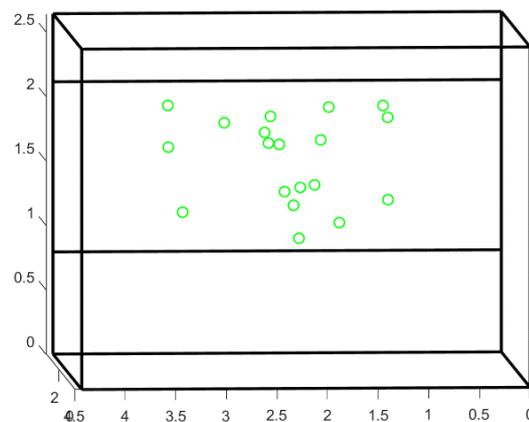


Figura 8, Array planare random

- Array di microfoni disposti in maniera random all'interno di un volume

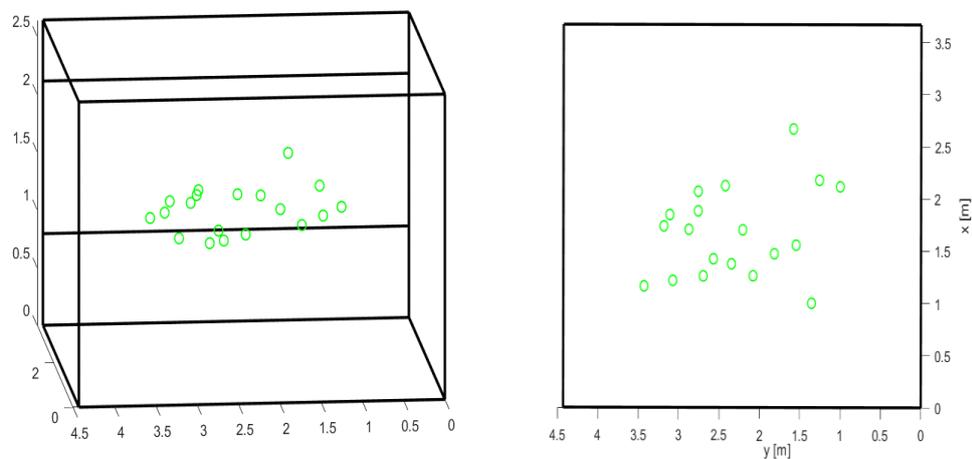


Figura 9, Array random volumetrico

- Array di microfoni disposti su una spirale

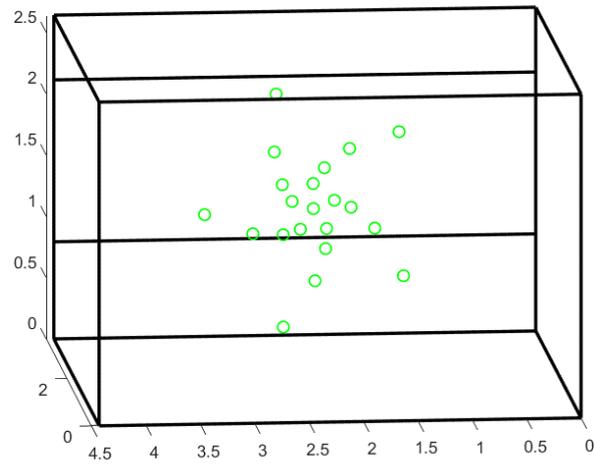


Figura 10, Array planare spirale

- Array di microfoni disposti su una circonferenza

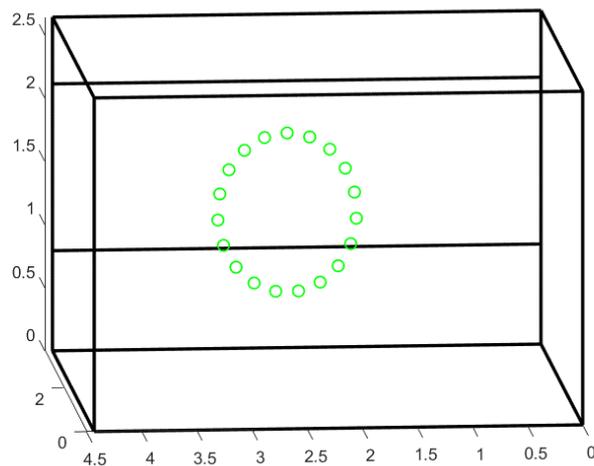


Figura 11, Array planare circolare

In base ai risultati, che vedremo in seguito, è stata individuata la configurazione migliore sia in termini di precisione di misura sia in termini di semplicità realizzativa.

Posizione della sorgente Le posizioni della sorgente sono state scelte in relazione al tipo di tecnica utilizzata per il tracciamento della sorgente, ossia il beamforming, la quale è più efficiente se la sorgente è posizionata sul piano della facciata vetrata. Per motivi di funzionamento del software è stato necessario posizionare la sorgente a un centimetro dalla parete. Le tre posizioni scelte sono:

- In posizione centrale (central)

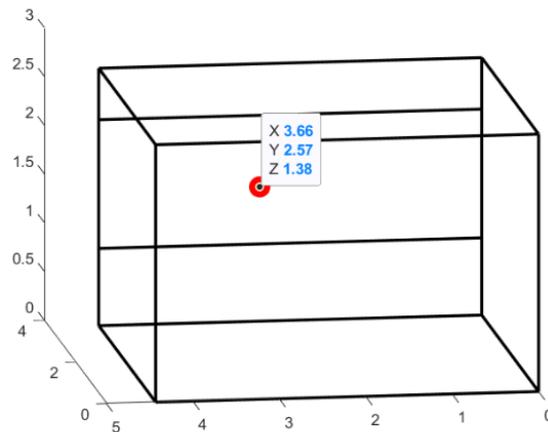


Figura 12, Sorgente centrale

- In posizione decentrata (offcentre)

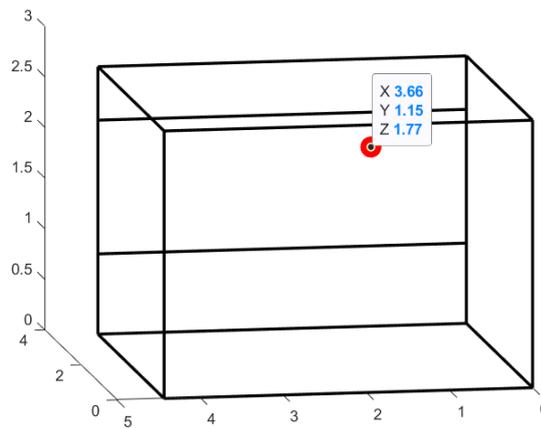


Figura 13, Sorgente decentrata

- in posizione rasente allo spigolo (border)

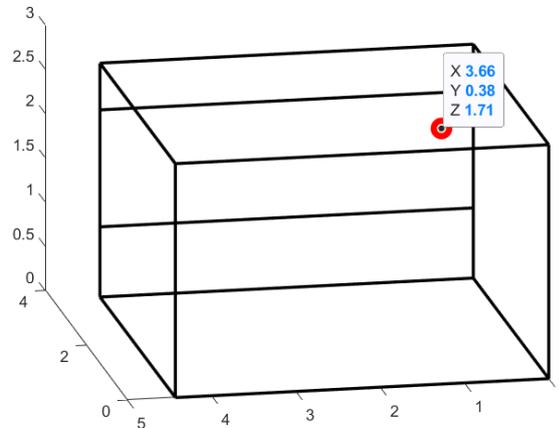


Figura 14, Sorgente al bordo

La scelta di posizionare le sorgenti anche nelle zone più critiche dal punto di vista acustico, come gli spigoli, è stata fatta poiché lo scopo è anche quello di capire se si può riuscire a localizzare con questo metodo ponti acustici in situazioni più complicate come angoli e spigoli, nonostante si verifichino fenomeni di scattering.

Tempo di riverberazione $T_{60} = 0.6$ s, scelto in base alle dimensioni della stanza e all'uso a cui è finalizzato l'ambiente.

Coefficienti di assorbimento $abs_coef = [0.3 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.8 \ 0.3]$, ipotizzati in base ai materiali che compongono le sei facce della stanza considerata. I primi quattro valori fanno riferimento alle superfici verticali della stanza, il quinto al pavimento e l'ultimo al soffitto.

ISM setup questa è una funzione implementata direttamente su Matlab che serve per racchiudere tutti i parametri fisici ed acustici in un'unica funzione che potrà essere utilizzata come dato di input per il metodo delle sorgenti immagine (Image Source

Method, ISM), che fungerà da dato di input a sua volta per il calcolo della RIR, che verrà fatto sempre da una funzione implementata su Matlab.

```
function [SetupStruc] = ISM_setup(fs,room,mic_pos,src_pos,T60,abs_coef)
%ISM_setup Environmental parameters for image-source method simulation
%
% [SetupStruc] = ISM_setup()
%
% This function can be used as a template for the definition of the
% different parameters for an image-source method simulation, typically
% providing inputs to the functions 'ISM_RIR_bank.m' as well as
% 'fast_ISM_RIR_bank.m' (Lehmann & Johansson's ISM implementations). This
% function returns the structure 'SetupStruc' with the following fields:
%
%     Fs: sampling frequency in Hz.
%     room: 1-by-3 vector of enclosure dimensions (in m),
%           [x_length y_length z_length].
%     mic_pos: N-by-3 matrix, [x1 y1 z1; x2 y2 z2; ...] positions of N
%               microphones in the environment (in m).
%     src_traj: M-by-3 matrix, [x1 y1 z1; x2 y2 z2; ...] positions of M
%               source trajectory points in the environment (in m).
%     T20 or T60: scalar value (in s), desired reverberation time.
```

Figura 15, Codice Matlab per la generazione dell'ISM Setup

Una volta definite le condizioni al contorno e tutte le variabili necessarie per la realizzazione della simulazione si procede con il salvataggio del setup, e per ognuno dei casi sopra citati vengono calcolate le risposte impulsive della stanza.

3.2 Calcolo della RIR

ISM RIR Questa funzione genera una serie di risposte all'impulso della stanza (RIR) per una particolare configurazione della stanza definita tramite la funzione ISM Setup definita nel paragrafo precedente, utilizzando l'implementazione di Lehmann e Johansson del metodo della sorgente dell'immagine. [3]

Questa funzione restituisce in output un array di celle bidimensionali "RIR_CELL" contenenti le RIR per ogni traiettoria della sorgente e ciascun microfono, organizzato come segue:

RIR_CELL {mic_index, traj_index}.

```

function [RIR_cell] = ISM_RIR_bank(setupstruc,RIRFileName,varargin)
%ISM_RIR_bank Bank of RIRs using Lehmann & Johansson's image-source method
%
% [RIR_CELL] = ISM_RIR_bank(SETUP_STRUC,RIR_FILE_NAME)
% [RIR_CELL] = ISM_RIR_bank( ... , 'arg1',val1, 'arg2',val2,...)
%
% This function generates a bank of room impulse responses (RIRs) for a
% particular user-defined room setup, using Lehmann and Johansson's
% implementation of the image-source method (see: "Prediction of energy
% decay in room impulse responses simulated with an image-source model", J.
% Acoust. Soc. Am., vol. 124(1), pp. 269-277, July 2008). The input
% SETUP_STRUC is a structure of enviromental parameters containing the
% following fields:

```

Figura 16, Codice Matlab per la generazione di RIR

Questa funzione salva i risultati del calcolo direttamente su un file che poi viene utilizzato di seguito per il calcolo degli “AudioData”, un’altra funzione implementata su Matlab.

AudioData Questa funzione genera campioni di dati audio basati sulle risposte all’impulso precalcolate (RIR). Il secondo parametro di ingresso “SRC_SIGNAL” corrisponde al segnale unidimensionale di dati emesso dalla sorgente acustica. Questa funzione restituisce in output gli “AUDIO_DATA”, la matrice dei dati audio generati sui ricevitori. Tale matrice è disposta in modo che ciascuna colonna rappresenti il segnale ricevuto al sensore corrispondente. In sostanza con questa funzione viene sfruttata la RIR della stanza che vado a convolvere con il segnale generato virtualmente dalla sorgente. Questo servirà per andare a simulare la pressione che un microfono misurerebbe se posizionato all’interno di quella stanza con una sorgente in un certo punto. Per un dato sensore, ogni frame di segnale viene convoluto (ossia un’operazione tra due funzioni di una variabile che consiste nell’integrare il prodotto tra la prima e la seconda traslata di un certo valore) con la risposta all’impulso, e i risultati della convoluzione vengono combinati in modo additivo per generare il segnale del microfono. Questo processo viene ripetuto per ogni punto della traiettoria e ciascun microfono (metodo di sovrapposizione-aggiunta). Questo porta all’approssimazione implicita che la sorgente rimane stazionaria durante ogni frame.

```

function [AuData] = ISM_AudioData(RIR_FILE_NAME,SrcSignal,varargin)
%ISM_AudioData  Creates audio samples from a pre-computed RIR bank
%
% [AUDIO_DATA] = ISM_AudioData(RIR_FILE_NAME, SRC_SIGNAL)
% [AUDIO_DATA] = ISM_AudioData( ... , 'arg1', val1, 'arg2', val2, ...)
%
% This function generates samples of audio data based on a bank of
% pre-computed room impulse responses (RIRs). The input variable
% RIR_FILE_NAME determines the name of the .mat file where the bank of RIRs
% is stored (the .mat file must contain a cell array parameter named
% 'RIR_cell'). The parameter RIR_FILE_NAME can be a full access path to the
% desired file. If no access path is given, the function looks for the
% desired file in the current working directory. The second input parameter
% SRC_SIGNAL corresponds to a one-dimensional vector of signal data emitted
% by the acoustic source. The length of the source audio sample, together
% with the source trajectory defined by the RIRs in RIR_FILE_NAME, define
% the velocity of the speaker across the environment (constant velocity
% motion).

```

Figura 17, Codice Matlab per la generazione di AuData

3.3 Algoritmo di beamforming e mappatura acustica

Una volta ottenuto il principale dato in output per ogni configurazione, ovvero l'Audiodata, il passaggio successivo è quello di dare in pasto tale risultato ad un secondo algoritmo di calcolo, nel quale viene sviluppata la tecnica dell'inverse beamforming al fine di tracciare la sorgente nel piano preso in considerazione.

Nella prima sezione di questo algoritmo sono richieste le storie temporali dei microfoni che compongono l'array, abbinati all'ISM setup, in modo tale da ottenere la CSM (cross spectrum matrix) grazie alla funzione "csm_estimation", che stima la matrice degli spettri di potenza incrociata dei segnali temporali forniti come input, preservando l'energia dei segnali originali. Nella funzione è inclusa anche una finestrazione di tipo Hanning per non imbattersi in fenomeni di leakage.

```

function [CSM,freq,nblocks] = csm_estimation(X,win,noverlap,nfft,fs,nblocks)
%CSM_ESTIMATION This function estimate CSM from time data
% This function returns the Cross-Power Spectra Matrix of time signals
% given as input. The spectra are calculated preserving the energy of the
% original signals.
%
% INPUT:
% X      = time data matrix (each column must be a channel)
% win    = window vector should have a number of samples equal to nfft
% noverlap = number of samples of overlap
% nfft   = block size for Welch's method
% fs     = sampling frequency
% nblocks = number of blocks used for CSM estimation
%
% OUTPUT:
% CSM = Cross-Spectral-Matrix at all frequencies
% freq = frequency vector

```

Figura 18, Codice Matlab per la generazione della CSM

Dopodiché con la funzione “add_array_to_csm_file” viene abbinata la matrice CSM ottenuta in precedenza alle coordinate spaziali dell’array microfonico.

Nella seconda sezione si genera, attraverso la funzione “mesh_file_builder”, la griglia di punti nella quale voglio che avvenga il calcolo del beamforming, che in questo caso, come detto in precedenza, sarà una griglia di punti posta in un piano parallelo alla facciata finestrata e a un centimetro da essa.

Nelle sezioni seguenti vengono impostati come input i dati ottenuti nelle prime due sezioni, per poi impostare gli output finali dell’algoritmo, nel nostro caso il calcolo del beamforming nel range di frequenza di emissione sonora della sorgente.

```

%% Section 4 - Define output settings
% The structure "output_settings" can be created to set some (or all)
% output parameters. This setting structure is not strictly required for
% running calculation, but it serves to set how the output of calculation
% must be created and saved.
% Available output settings:
% - save_path      = full/absolute folder of result mat file.
% - frequency      = selection of spectral lines to process.
% - result_prefix = prefix of result mat file.
% NONE OF THEM IS REQUIRED, DEAFULT VALUES ARE SET IF NOT PROVIDED.
% THE ORDER OF SETTINGS IS NOT IMPORTANT.
save_path = fullfile(strcat('C:\Users\Federico\Desktop\Università\Tirocinio
% Initialize "output_settings"
output_settings = set_output();
% Set "save_path"
output_settings = set_output(output_settings, 'save_path', save_path);
% Set "frequency"
% Range method use here. Check the help for other methods.
output_settings = set_output(output_settings, 'frequency', [400 4500]);

```

Figura 19, Codice Matlab per il plot di mappe acustiche

Adesso che è stato definito l'intero setup virtuale sia dal punto di vista spaziale che dal punto di vista analitico, ciò che si ottiene da questo algoritmo può essere utilizzato infine per la mappatura acustica della parete, grazie ad un ultimo algoritmo.

Quest'ultimo non fa altro che fornirci una mappa della pressione acustica nella parete presa in considerazione, la quale ci può dare una conferma finale sulla bontà della misurazione fatta, seppur virtuale. Questo perché se il plot ottenuto con questo algoritmo evidenzia come il picco massimo di pressione acustica si trovi nella posizione in cui abbiamo posto la sorgente, significa che almeno virtualmente questa catena di misura è efficiente, e che si possono utilizzare i dati simulati sfruttandoli come base per un test in laboratorio.

3.4 Casi di studio

Una volta definiti gli input di simulazione e le ipotesi geometriche ed analitiche si è proceduto con le simulazioni vere e proprie, impostando i dati in input dei vari algoritmi di calcolo in base alle posizioni scelte della sorgente relativamente alle posizioni degli array. Le simulazioni sono state effettuate tenendo conto di alcune considerazioni:

- Le simulazioni sono state fatte con diverse configurazioni geometriche. L'array circolare in realtà non è la tipologia più adatta per misure acustiche in ambiente riverberante, ma le simulazioni sono state realizzate ugualmente sia

perché era la tipologia di array disponibile in laboratorio sia perché si è voluto andare a verificare in simulazione se con l'array circolare si potevano ottenere risultati paragonabili o comunque accettabili rispetto alle altre configurazioni più indicate per il caso preso in analisi. Infatti, sono state svolte simulazioni anche con l'array volumetrico, planare random e spirale, che generalmente danno dati migliori perché campionano il campo acustico su un piano più denso rispetto alla configurazione circolare, potendo posizionare i microfoni anche nella zona centrale dell'array. Questi ultimi non sono stati realizzati in laboratorio per motivi di tempo, ma è stato comunque possibile confrontare, almeno a livello di simulazione, i relativi risultati.

- Erano disponibili in laboratorio 20 microfoni, e l'idea iniziale era quella di sfruttarli tutti. È stato deciso di usarne 19 in modo tale da avere l'opportunità di utilizzare il ventesimo come microfono di riferimento per controllare la stazionarietà del campo acustico, nel caso in cui si fosse voluta fare una traslazione o rotazione dell'array per aumentare il numero di microfoni. Questo perché nel momento in cui viene spostato l'array dalla posizione iniziale, cambia anche la posizione reciproca array-sorgente, ed è grazie al microfono di riferimento, fisso tra una misura e l'altra, che è possibile concatenare i risultati di due diversi test, garantendo la stazionarietà del campo acustico.
- Per il caso di array planare random e circolare è stata quindi testata la possibilità di aumentare il numero di microfoni. Questo è stato fatto per il caso random traslando l'array da 19 microfoni lungo x e lungo z nel sistema di riferimento spaziale della stanza, per evitare sovrapposizioni; per il caso circolare sono state fatte due simulazioni, una ruotando l'array e una rototraslandolo. Queste simulazioni sono giustificate dal fatto che nelle misurazioni acustiche in ambienti tridimensionali è vantaggioso lavorare con array volumetrici, che si possono ottenere dalla sovrapposizione dello stesso array in due posizioni diverse.
- Le simulazioni sono state svolte per ogni tipologia di array sopra elencata con le tre posizioni delle sorgenti, centrale, decentrata e al bordo.
- Una misura fatta con 38 microfoni è molto più accurata ma anche più onerosa dal punto di vista realizzativo, questa doppia simulazione è stata fatta con lo

scopo di ridurre il numero di microfoni, ovvero di confrontare i risultati delle simulazioni, a parità di posizione della sorgente, per verificare se si può ottenere un risultato paragonabile o quantomeno accettabile anche con una configurazione da 19 microfoni, più facile da realizzare nella pratica. Un altro obiettivo è anche quello di constatare che spostando la sorgente mettendola nei punti critici, riesco comunque ad individuarla attraverso l'algoritmo di BF.

- Per ogni setup è stato analizzato il range di frequenza di emissione sonora della sorgente in banda di ottava, in quanto è quella che maggiormente si avvicina alla percezione dell'orecchio umano. Le frequenze studiate sono state quindi: 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.
- Per ogni configurazione vengono mostrate le mappature acustiche rilevate dall'algoritmo di BF, con evidenziato il picco massimo di pressione acustica rilevato; la legenda a lato della mappa acustica indica con un codice cromatico il livello di pressione sonora, che va dal bianco (minimo livello di pressione) al nero (massimo livello di pressione). Le mappe vengono poi confrontate con le immagini del setup per come è stato realizzato virtualmente, nelle quali è indicata la posizione spaziale della sorgente. Se la posizione del picco massimo di pressione coincide con la posizione della sorgente, significa che il metodo utilizzato è performante, e che quindi si possono utilizzare i dati virtuali come base per una misura sperimentale.

3.4.1 Simulazione con array planare random da 19 e 38 microfoni

Di seguito i risultati ottenuti dalle simulazioni utilizzando un array planare con distribuzione random dei microfoni. L'array da 19 microfoni è stato posizionato a 1,5 metri dalla parete vetrata rispettando i vincoli geometrici, per poi andarlo a traslare di 15 cm verso la parete finestrata e di 10 cm verso il soffitto, ottenendo 38 microfoni secondo il processo descritto precedentemente:

Array planare random, 19 microfoni, sorgente centrale

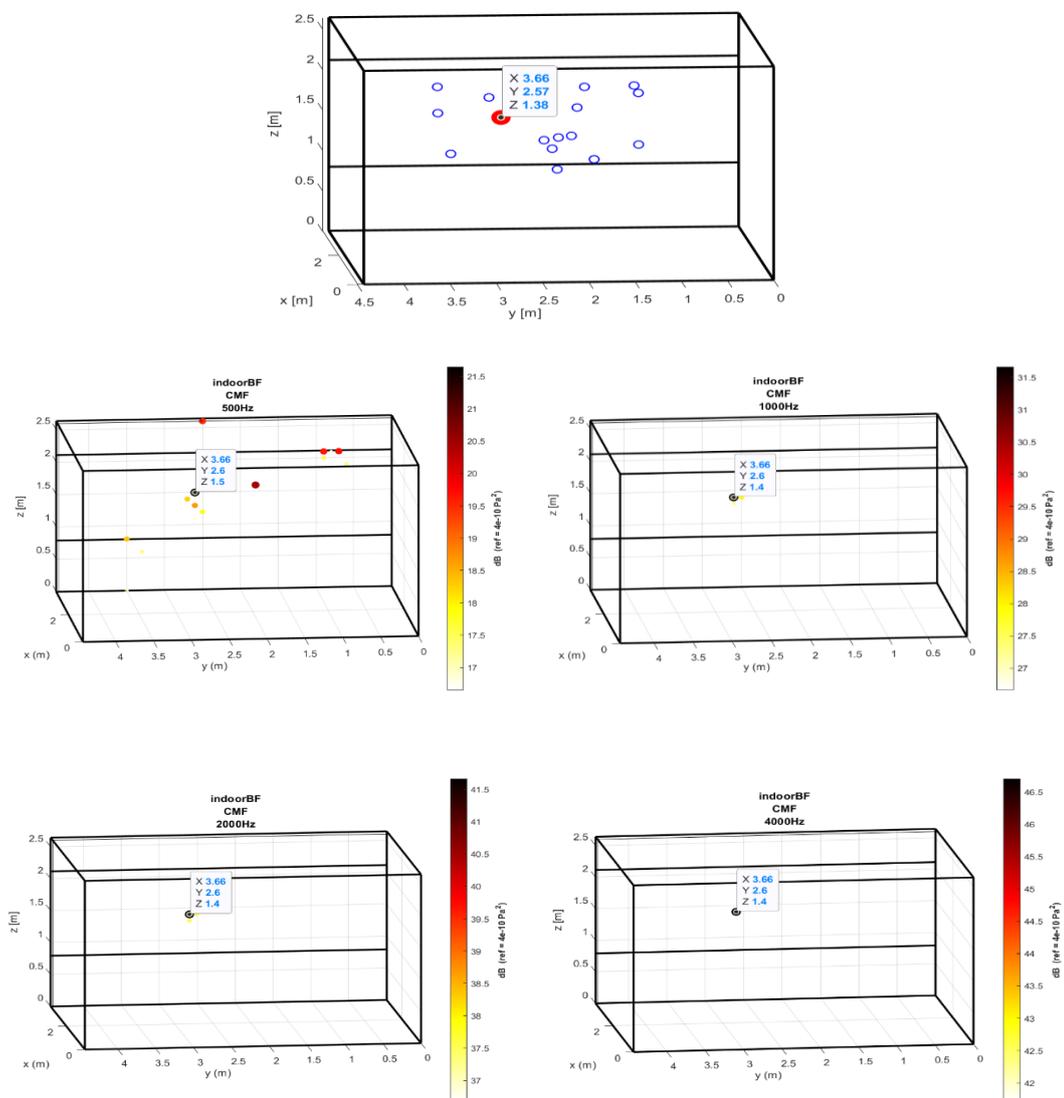


Figura 20, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare random, 19 microfoni, sorgente decentrata

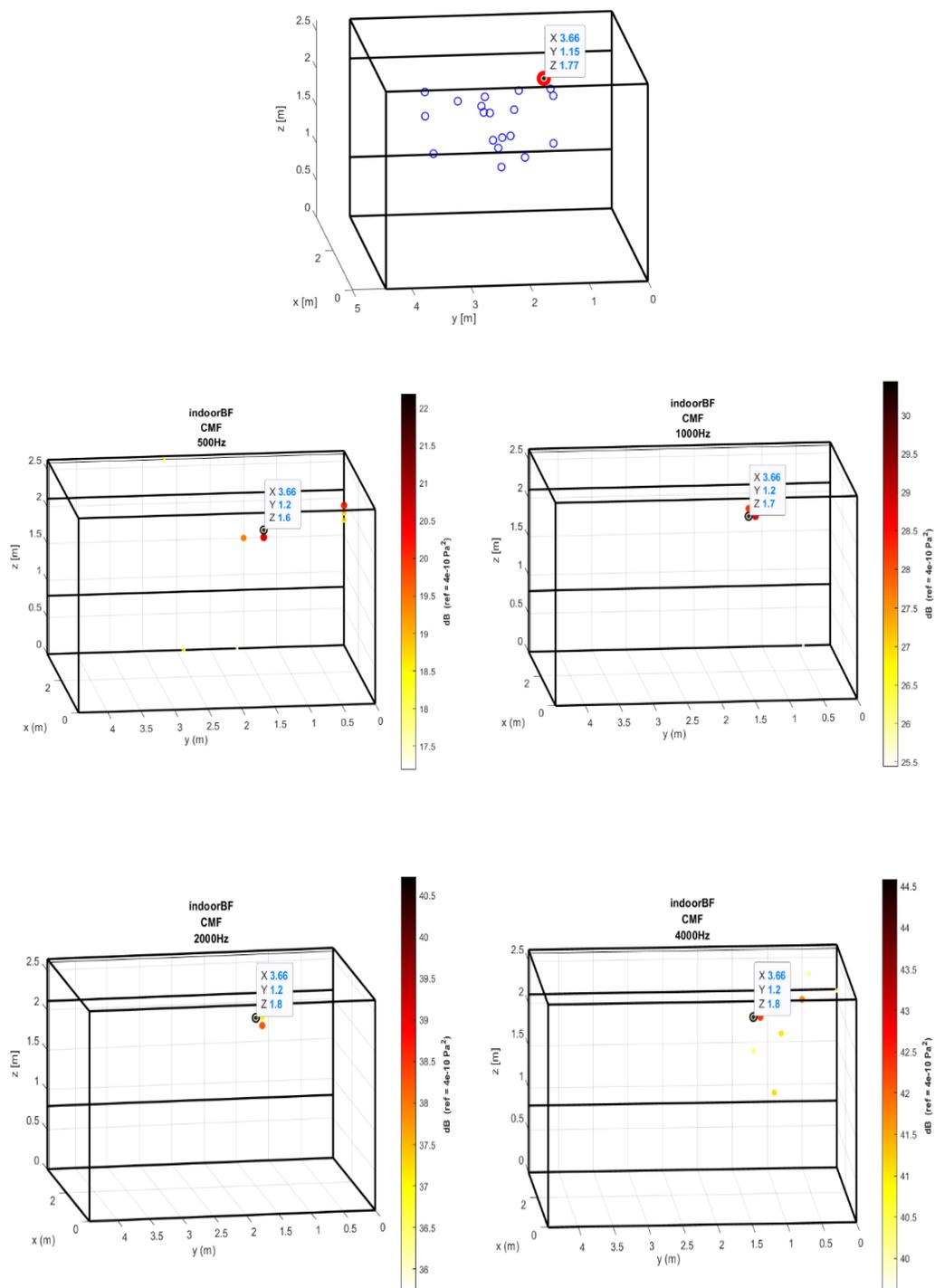


Figura 21, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare random, 19 microfoni, sorgente al bordo

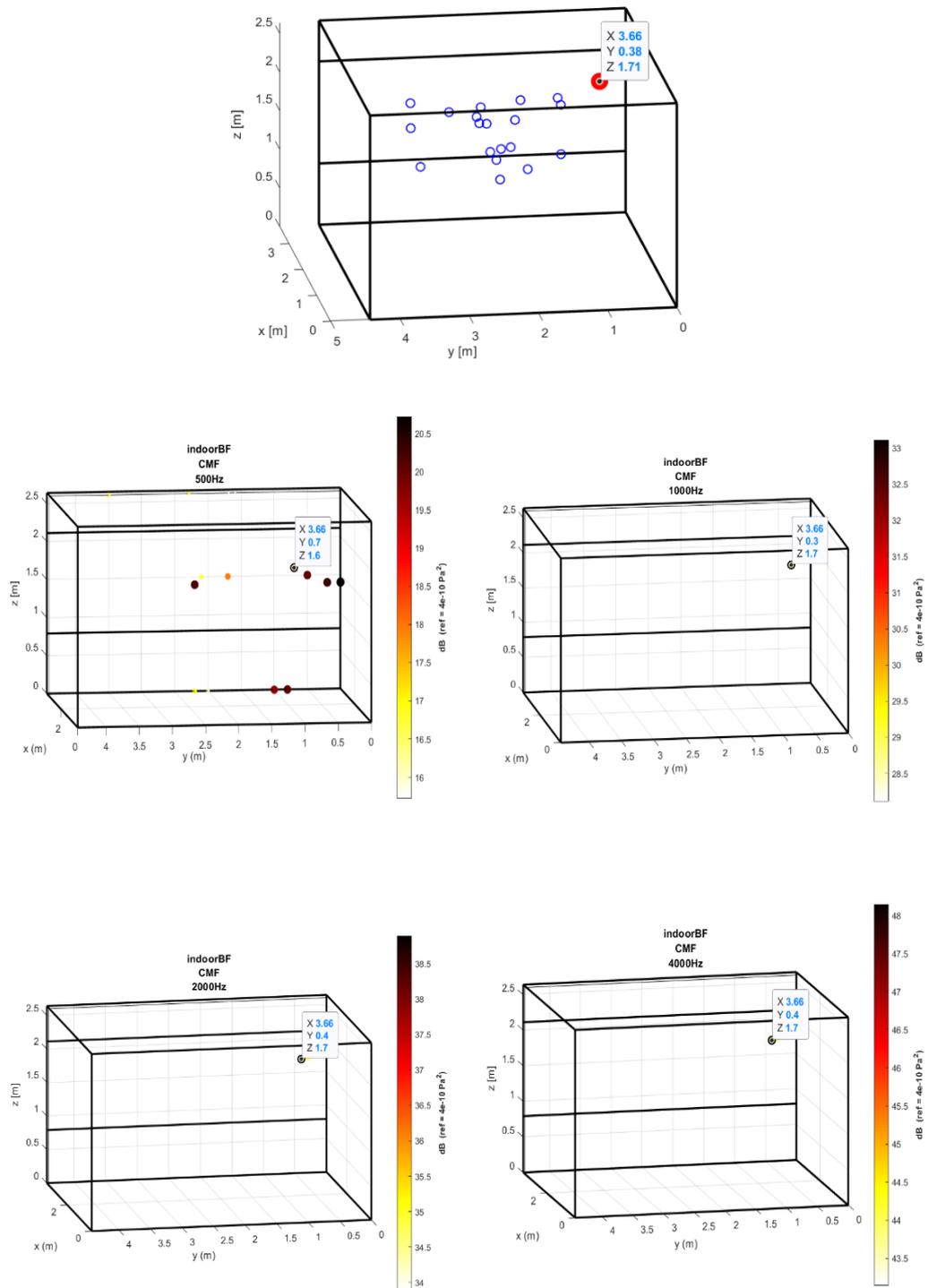


Figura 22, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare random traslato, 38 microfoni, sorgente centrale

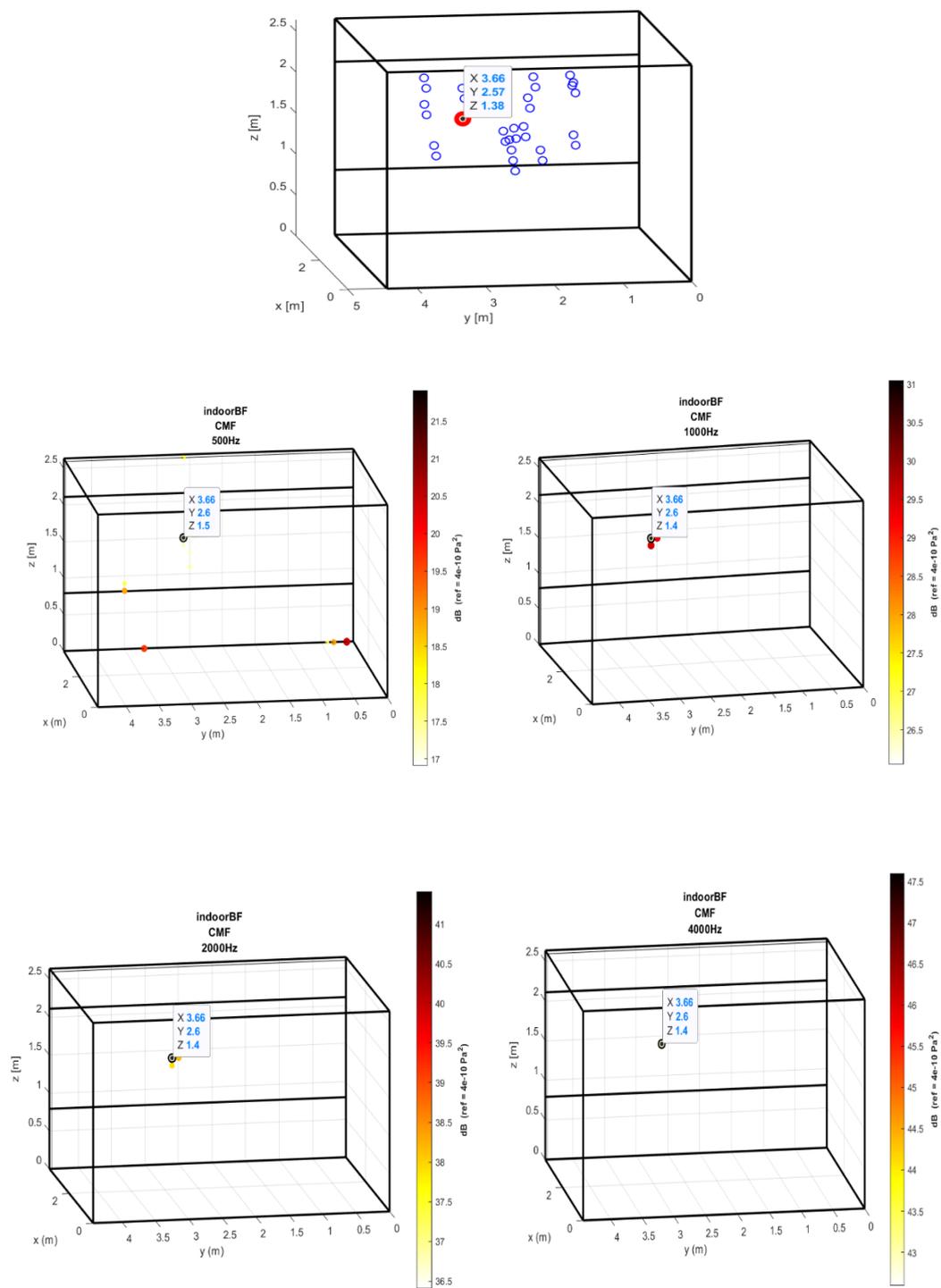


Figura 23, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare random traslato, 38 microfoni, sorgente decentrata

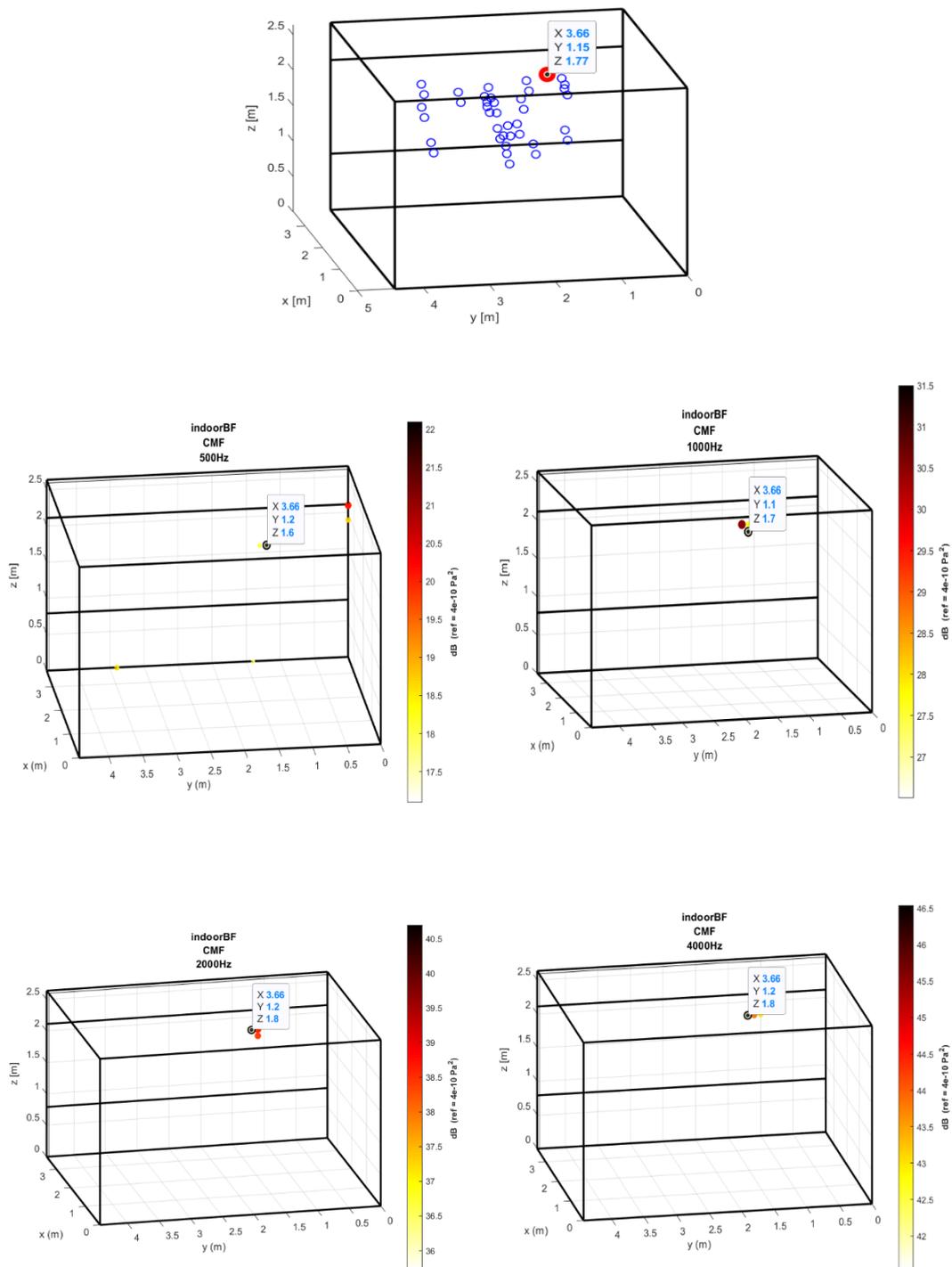


Figura 24, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare random traslato, 38 microfoni, sorgente al bordo

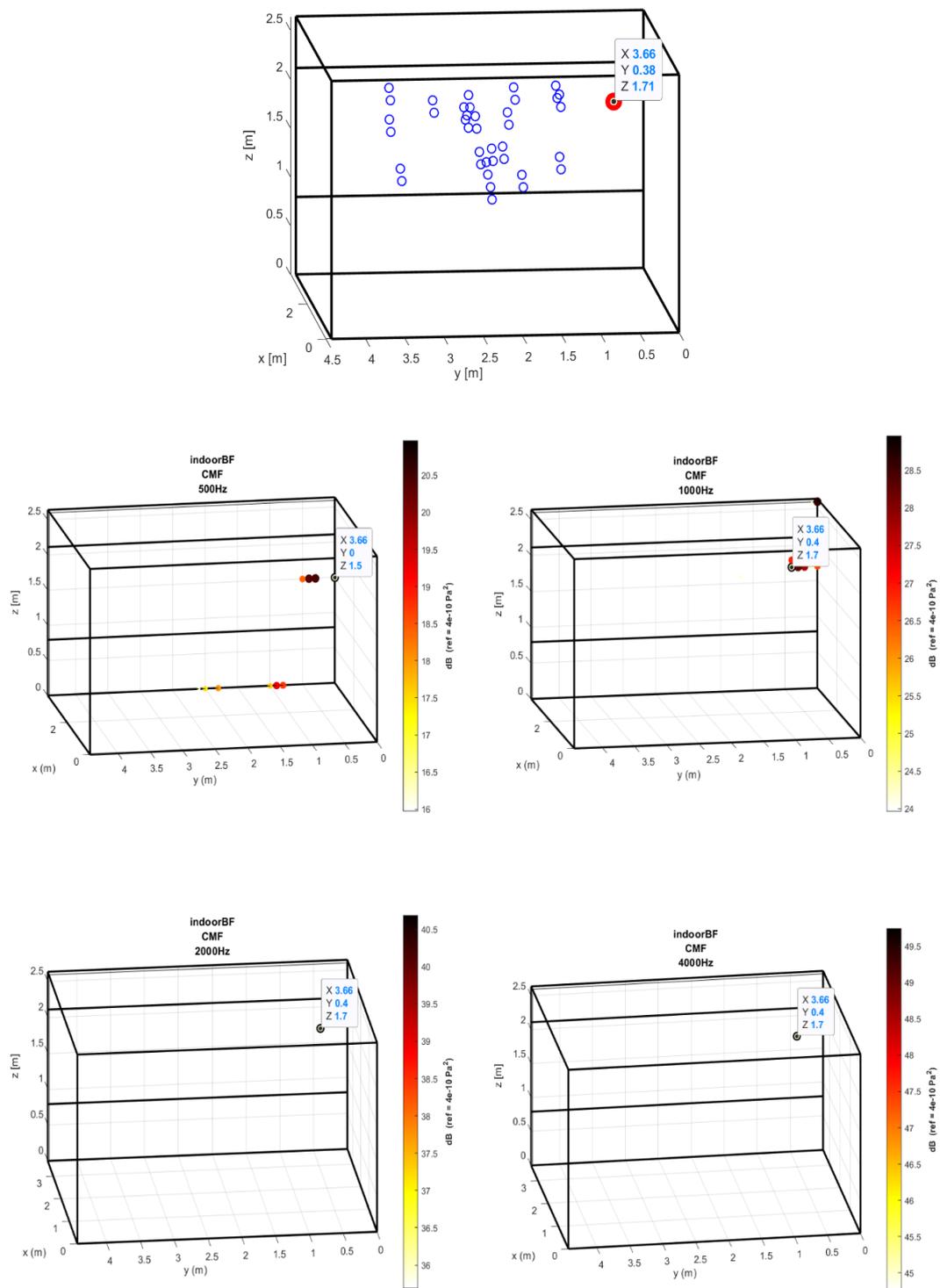


Figura 25, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

3.4.2 Simulazione con array volumetrico random da 19 e 38 microfoni

Array volumetrico random, 19 microfoni, sorgente centrale

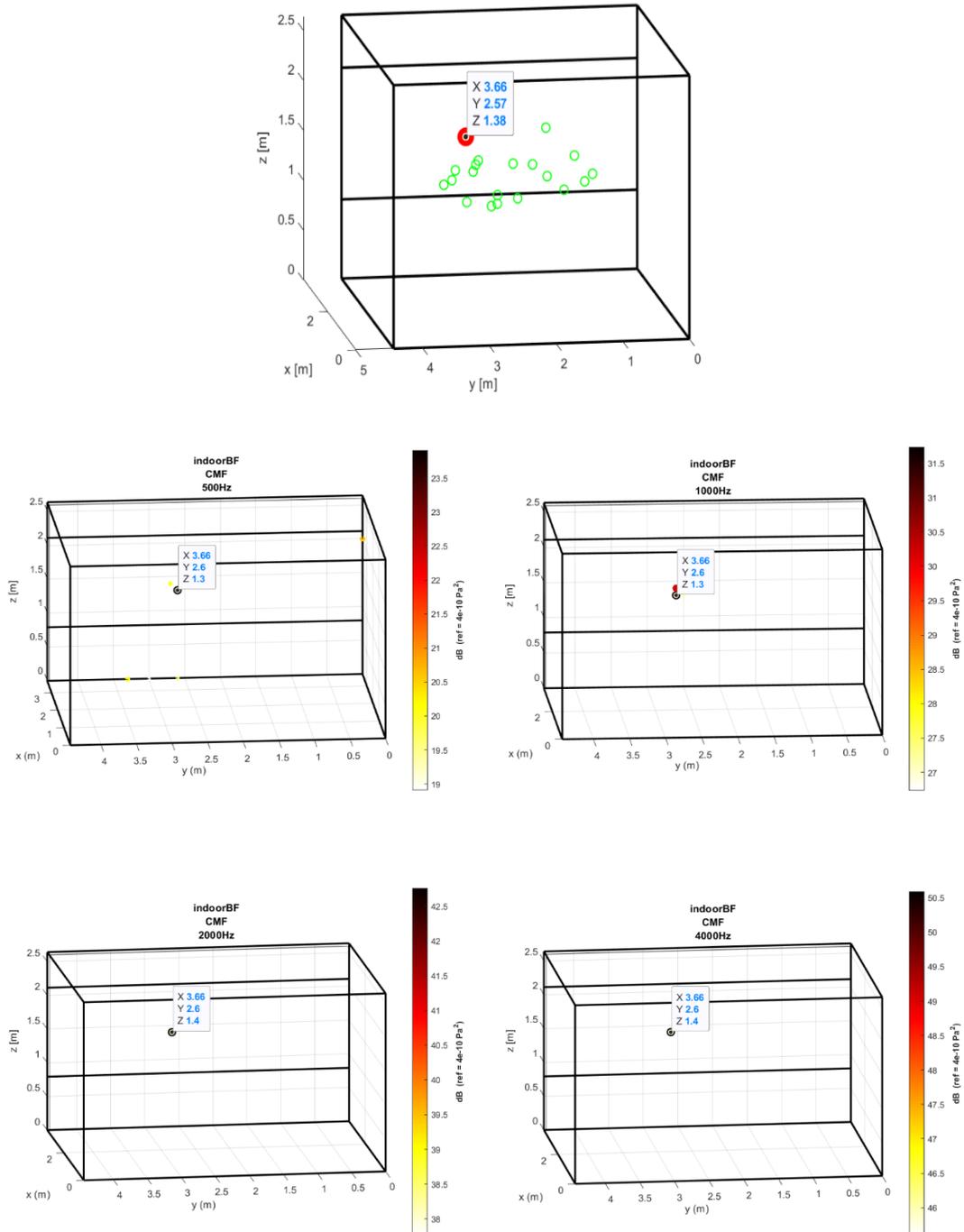


Figura 26, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array random volumetrico da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array volumetrico random, 19 microfoni, sorgente decentrata

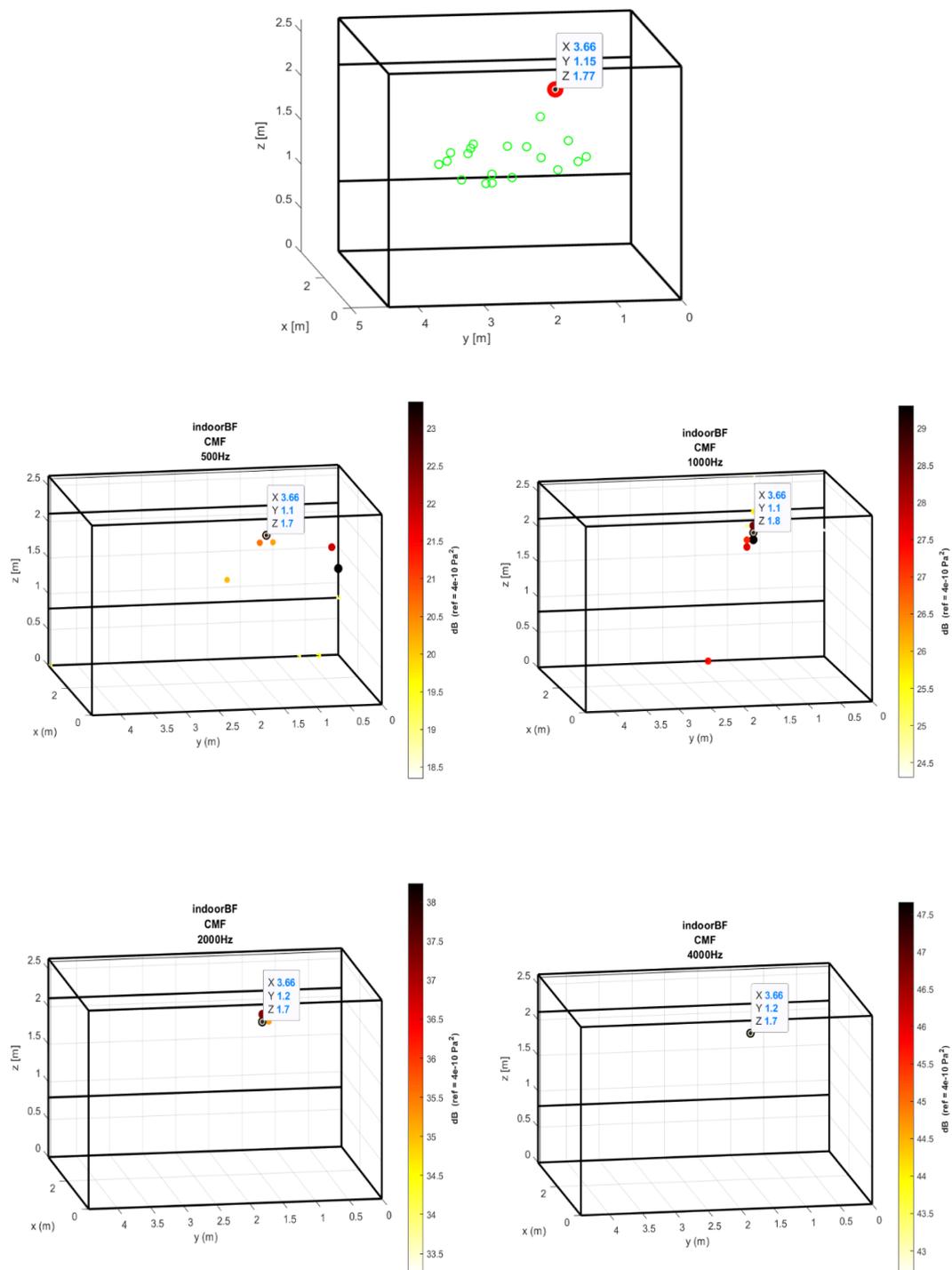


Figura 27, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array random volumetrico da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array volumetrico random, 19 microfoni, sorgente al bordo

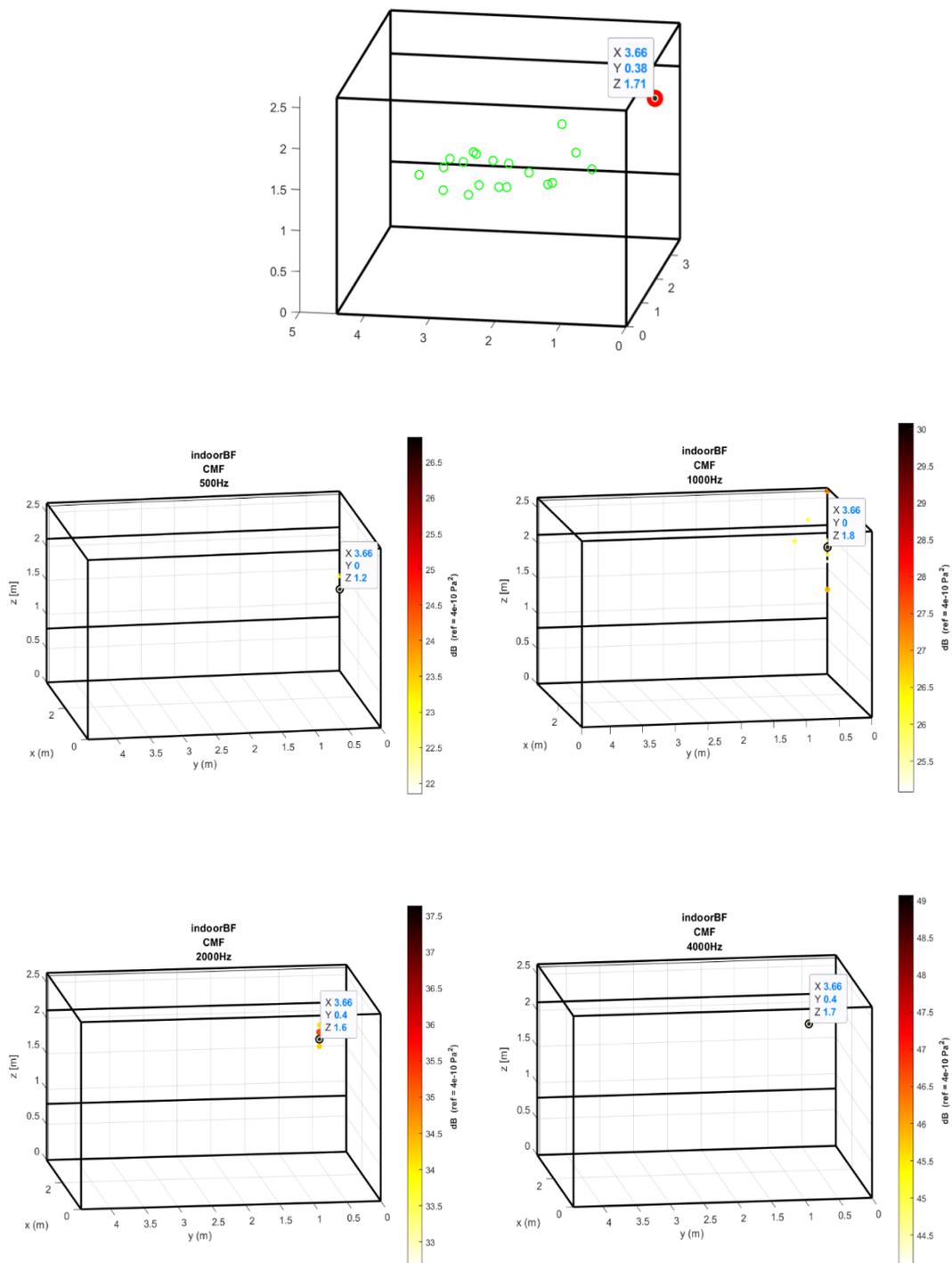


Figura 28, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array random volumetrico da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array volumetrico random, 38 microfoni, sorgente centrale

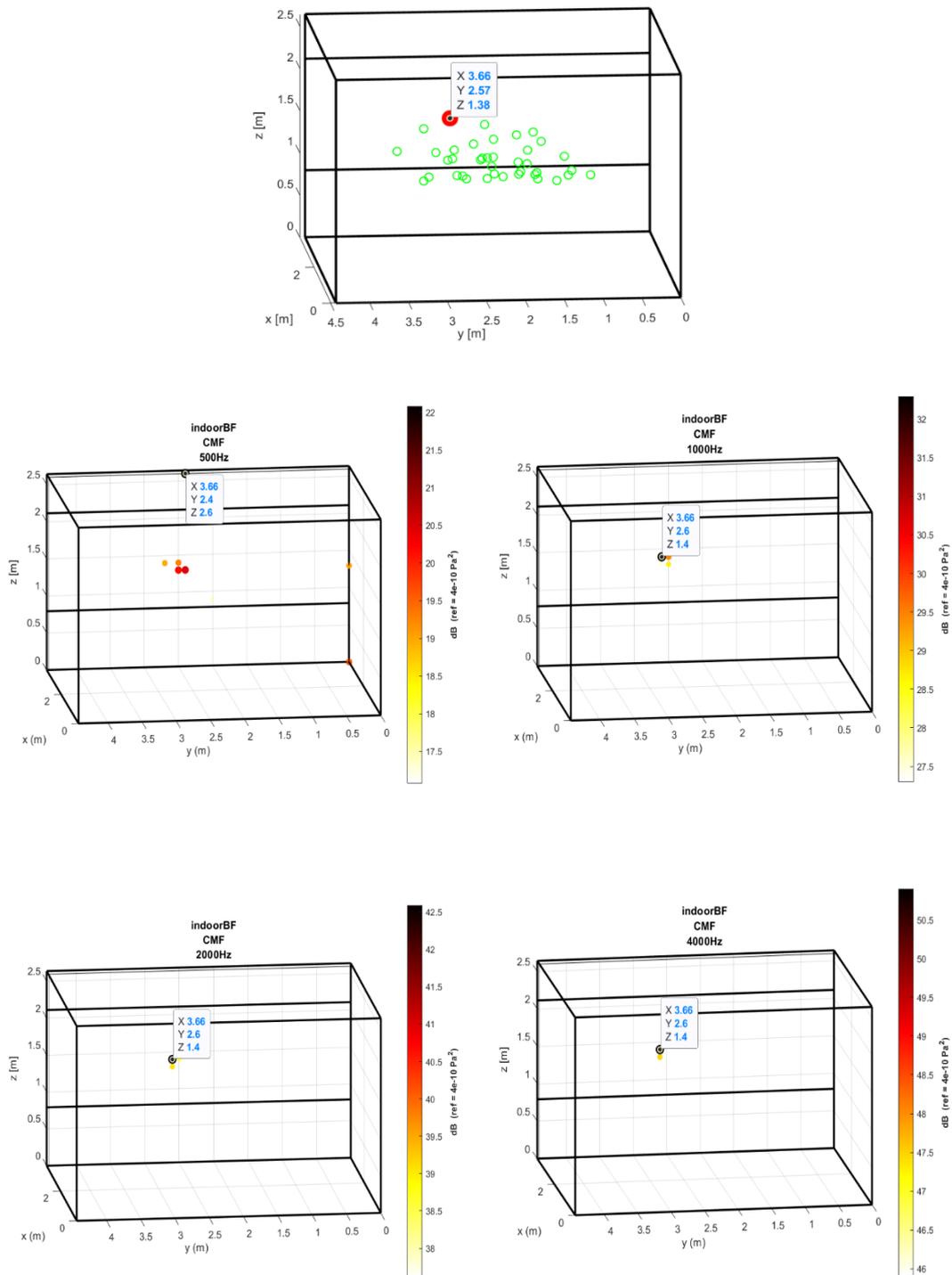


Figura 29, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array random volumetrico da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array volumetrico random, 38 microfoni, sorgente decentrata

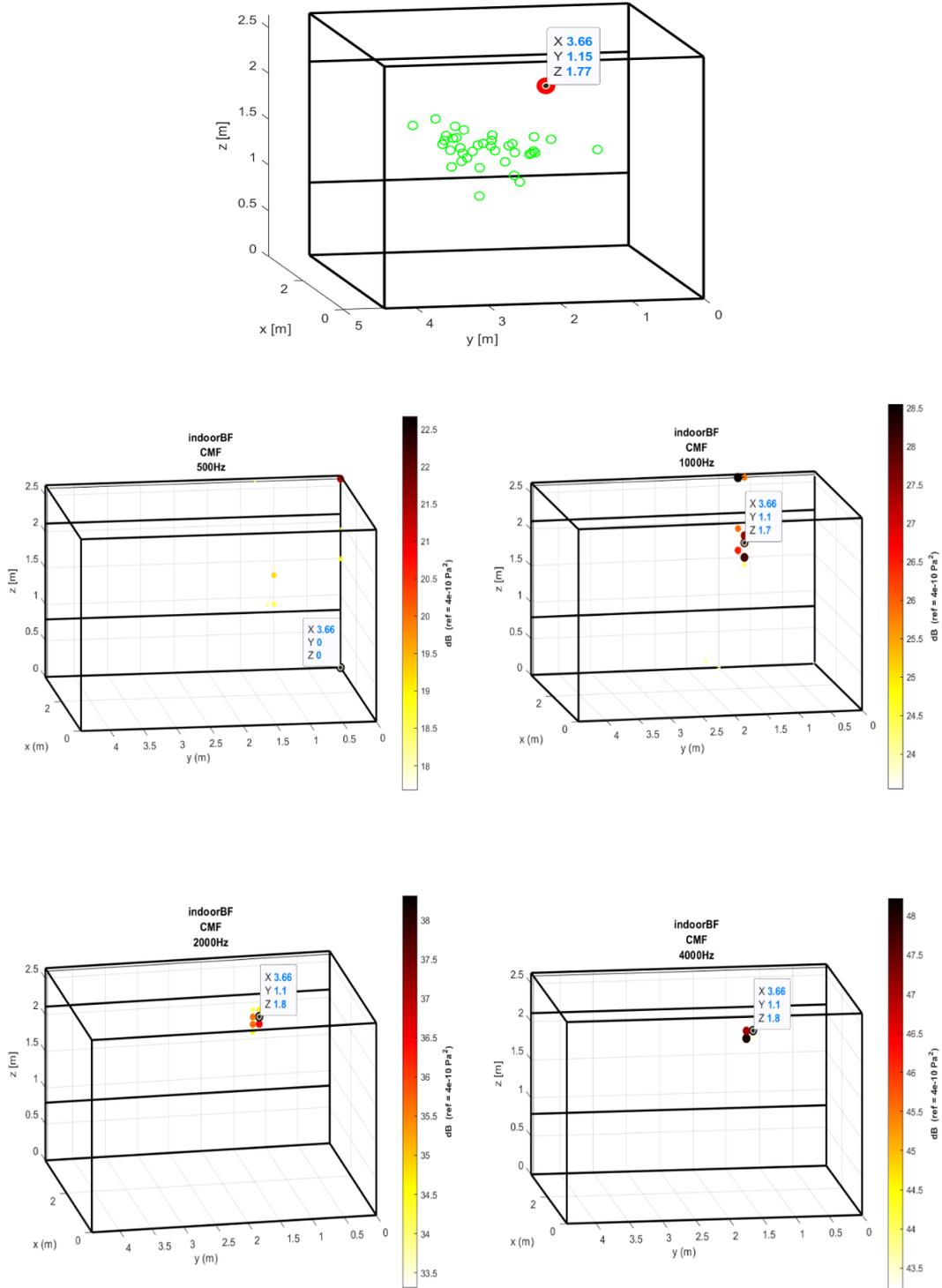


Figura 30, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array random volumetrico da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array volumetrico random, 38 microfoni, sorgente al bordo

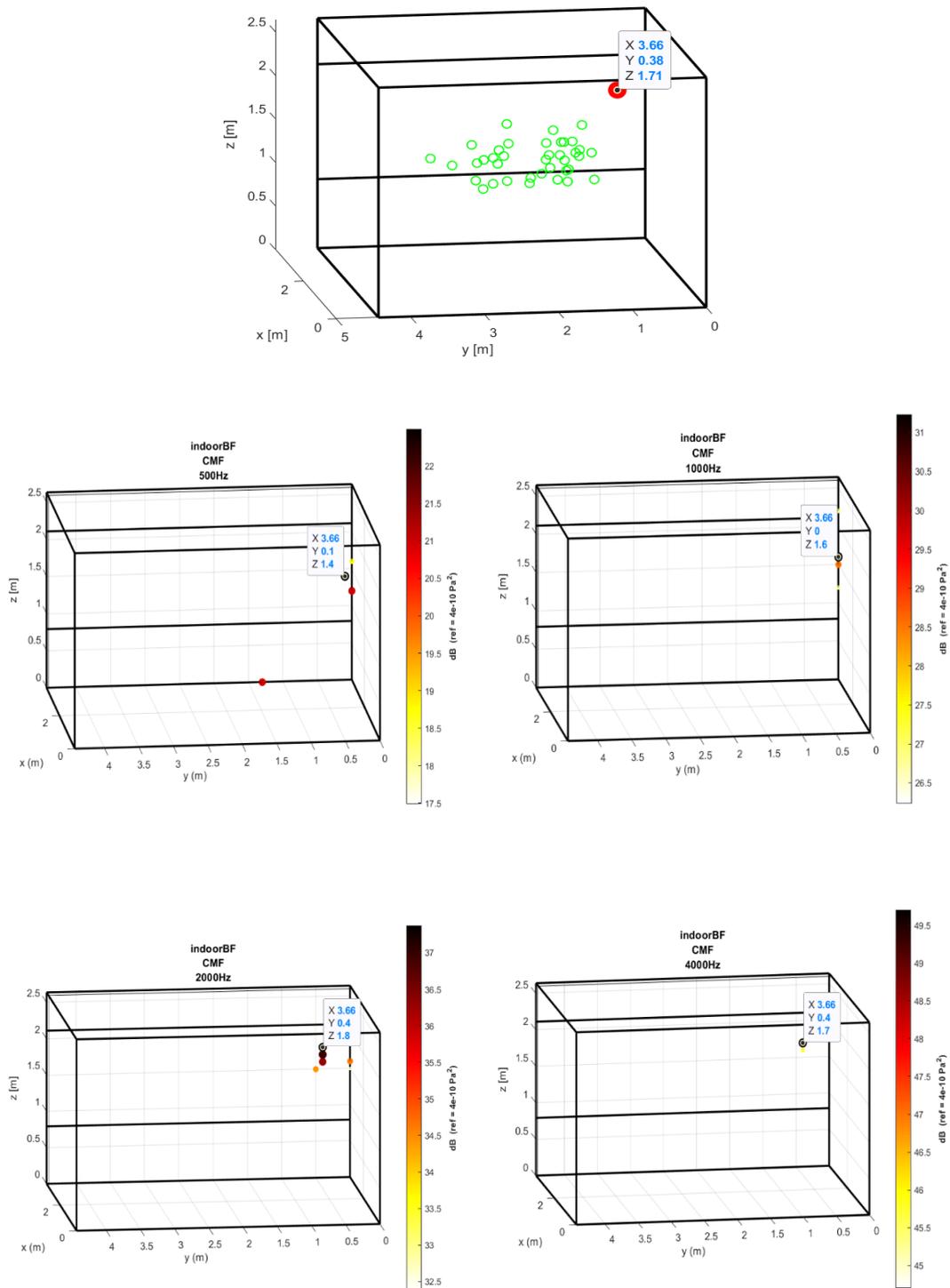


Figura 31, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array random volumetrico da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

3.4.3 Simulazione con array spirale da 21 e 41 microfoni

Per quanto riguarda l'array spirale vanno ribadite le considerazioni fatte nell'introduzione di questo paragrafo, ossia che si tratta di un array indicato per le misurazioni acustiche in ambienti chiusi, ed è interessante ai fini della trattazione valutare e confrontare i risultati prodotti con questa simulazione con le altre tipologie di array. Per una questione di bilanciamento geometrico è stato realizzato virtualmente l'array con 21 microfoni, distribuendo 5 microfoni sui 4 rami della spirale più un microfono centrale nel caso dell'array da 21 microfoni; stesso discorso per l'array da 41 microfoni, che è stato ottenuto raddoppiando il numero di microfoni in ogni ramo.

Array planare spirale, 21 microfoni, sorgente centrale

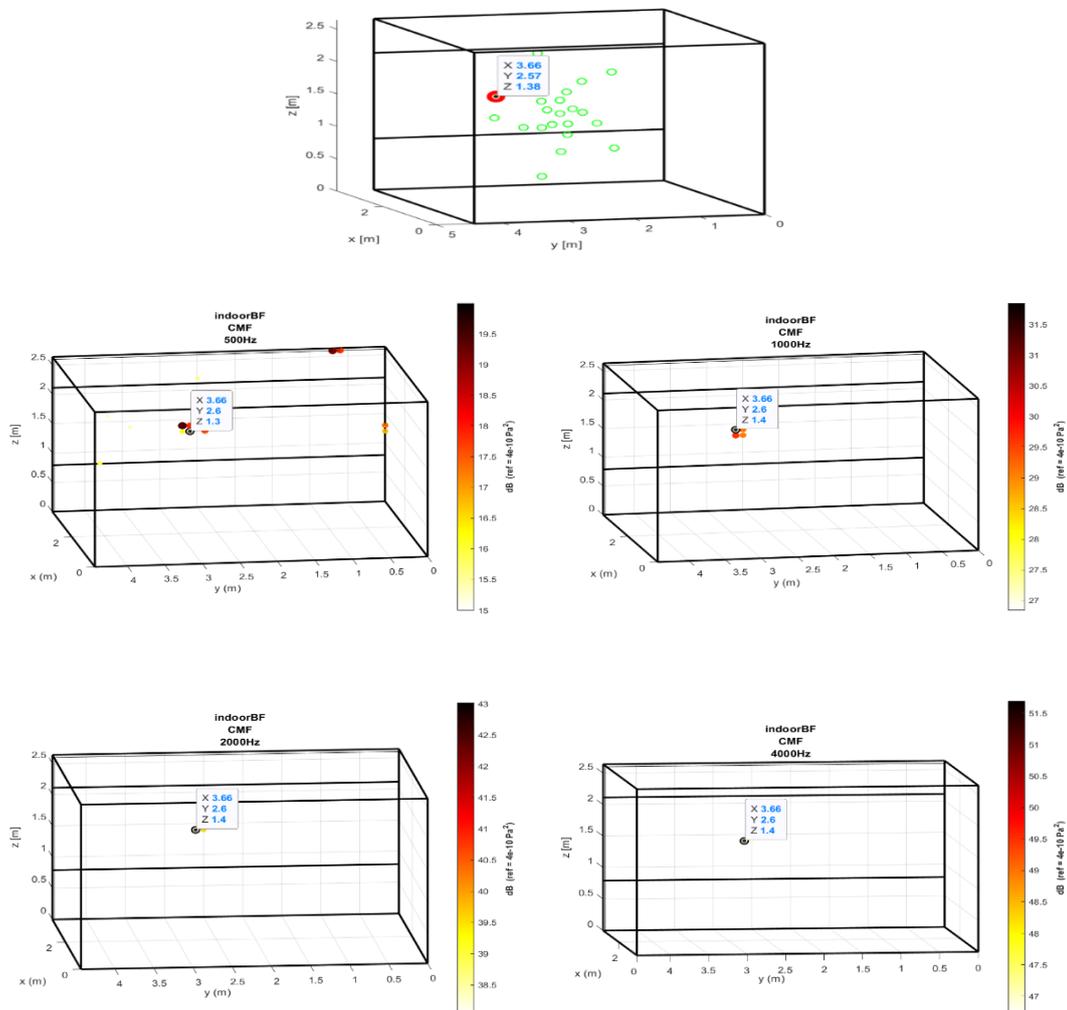


Figura 32, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare spirale da 21 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare spirale, 21 microfoni, sorgente decentrata

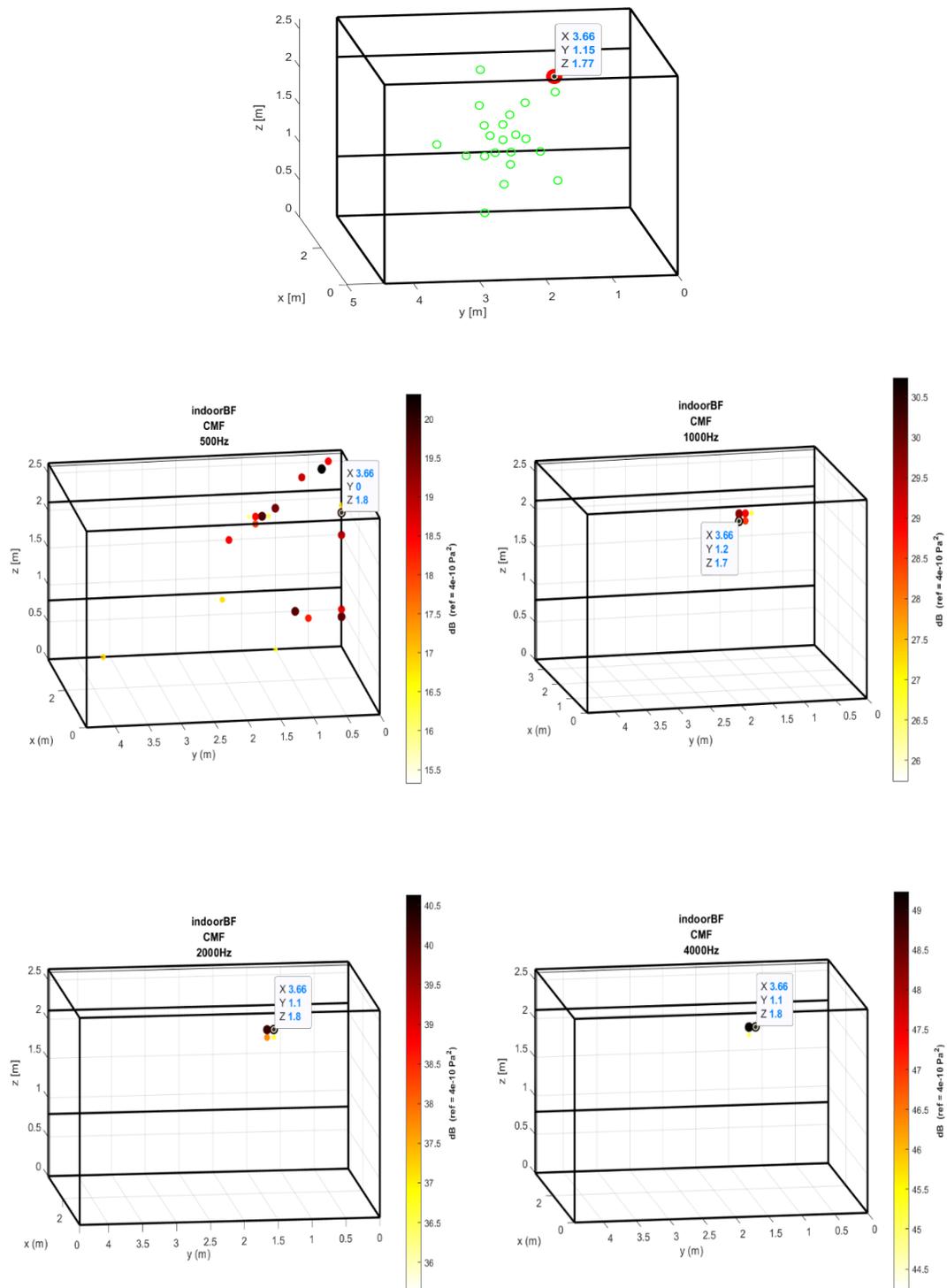


Figura 33, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare spirale da 21 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare spirale, 21 microfoni, sorgente al bordo

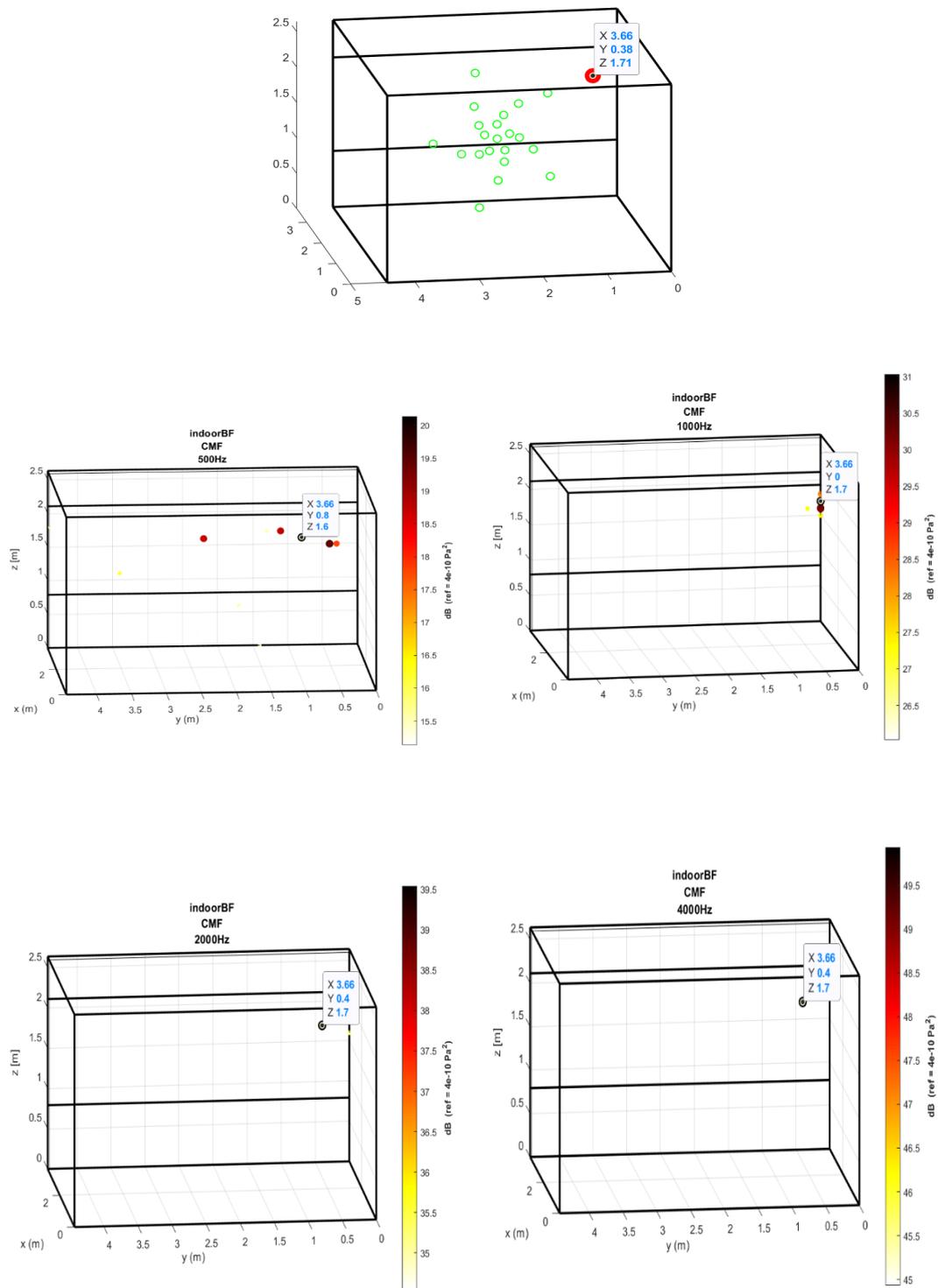


Figura 34, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare spirale da 21 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare spirale, 41 microfoni, sorgente centrale

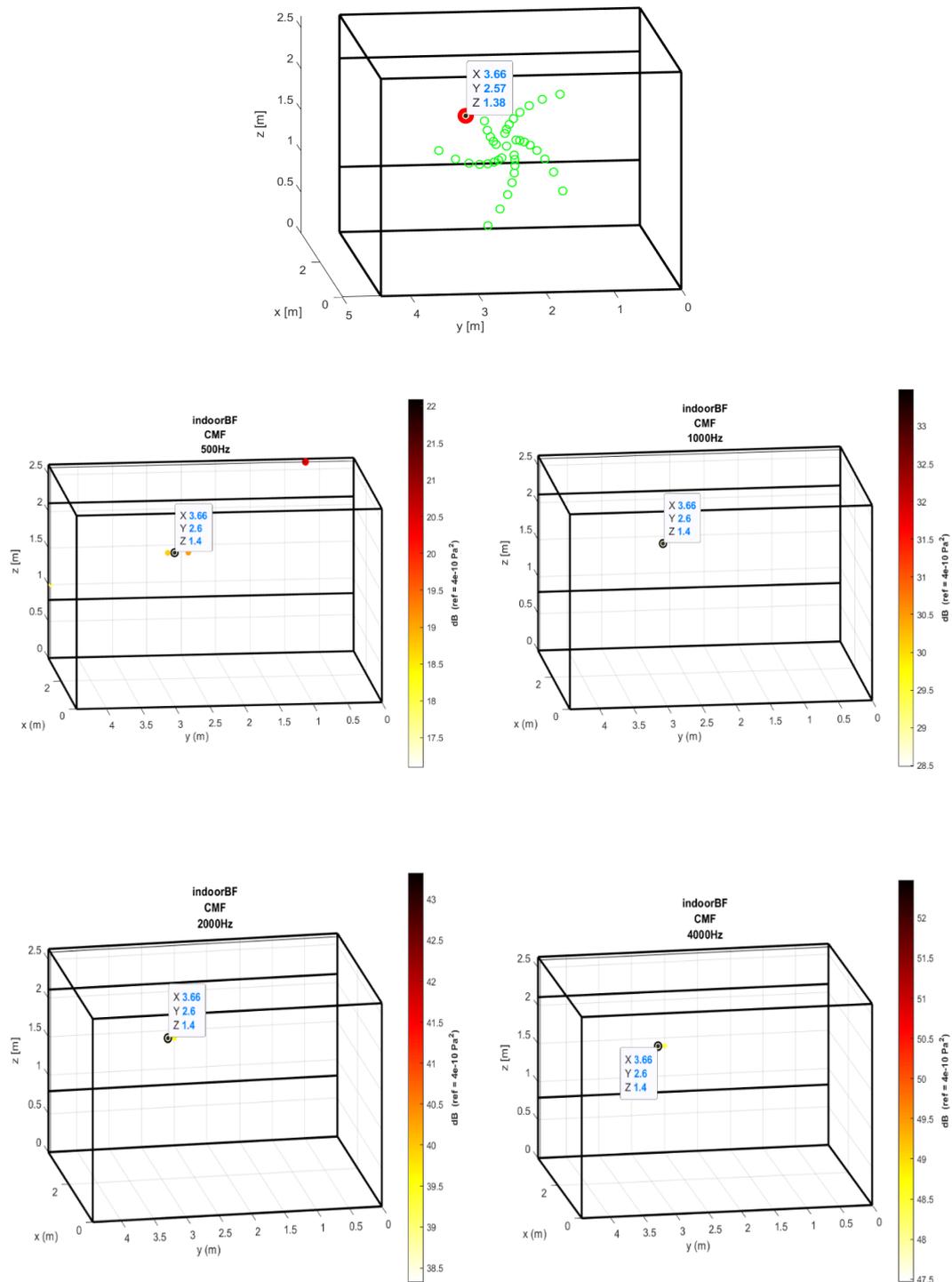


Figura 35, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare spirale da 41 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare spirale, 41 microfoni, sorgente decentrata

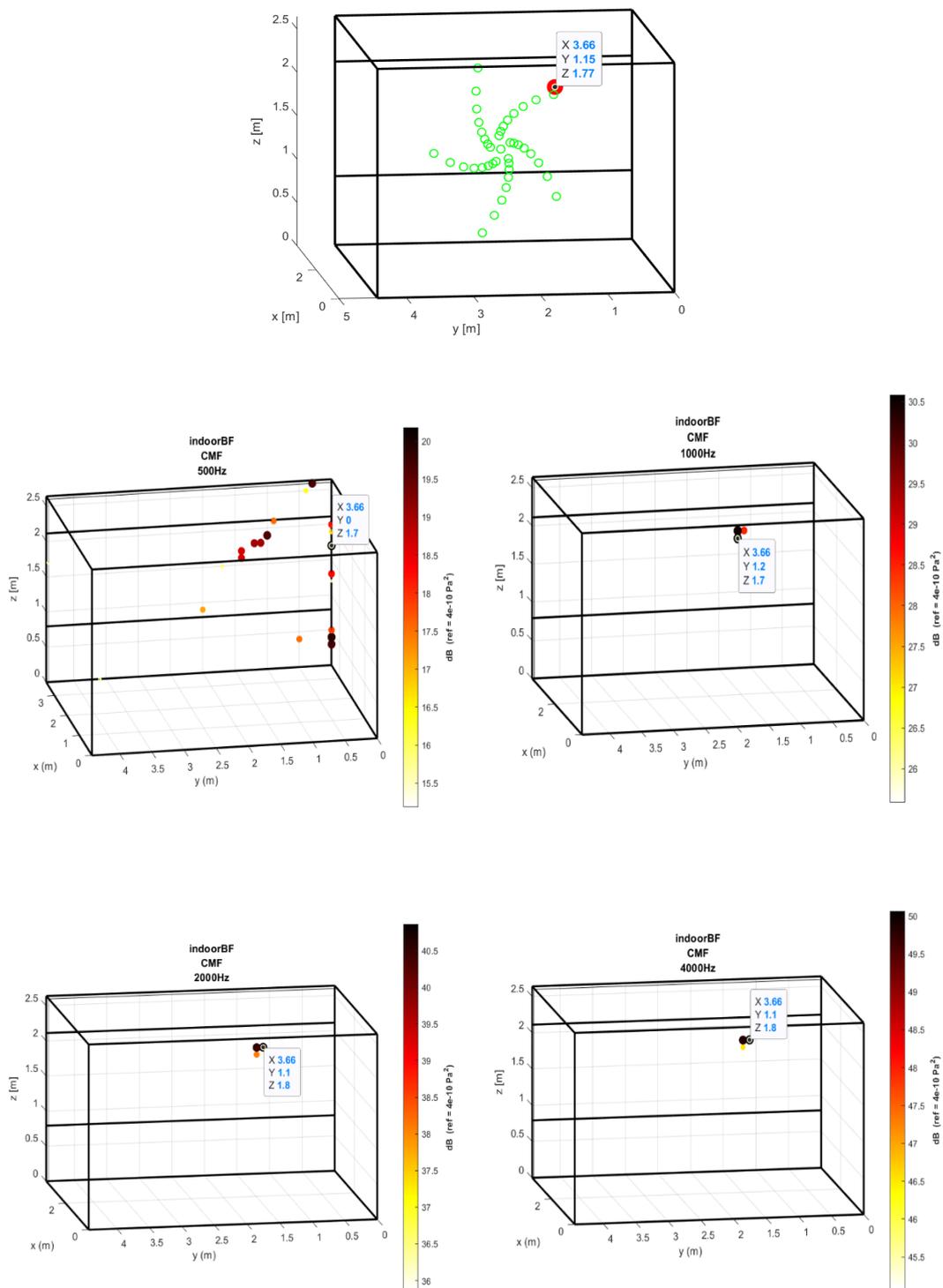


Figura 36, Mappa acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare spirale da 41 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare spirale, 41 microfoni, sorgente al bordo

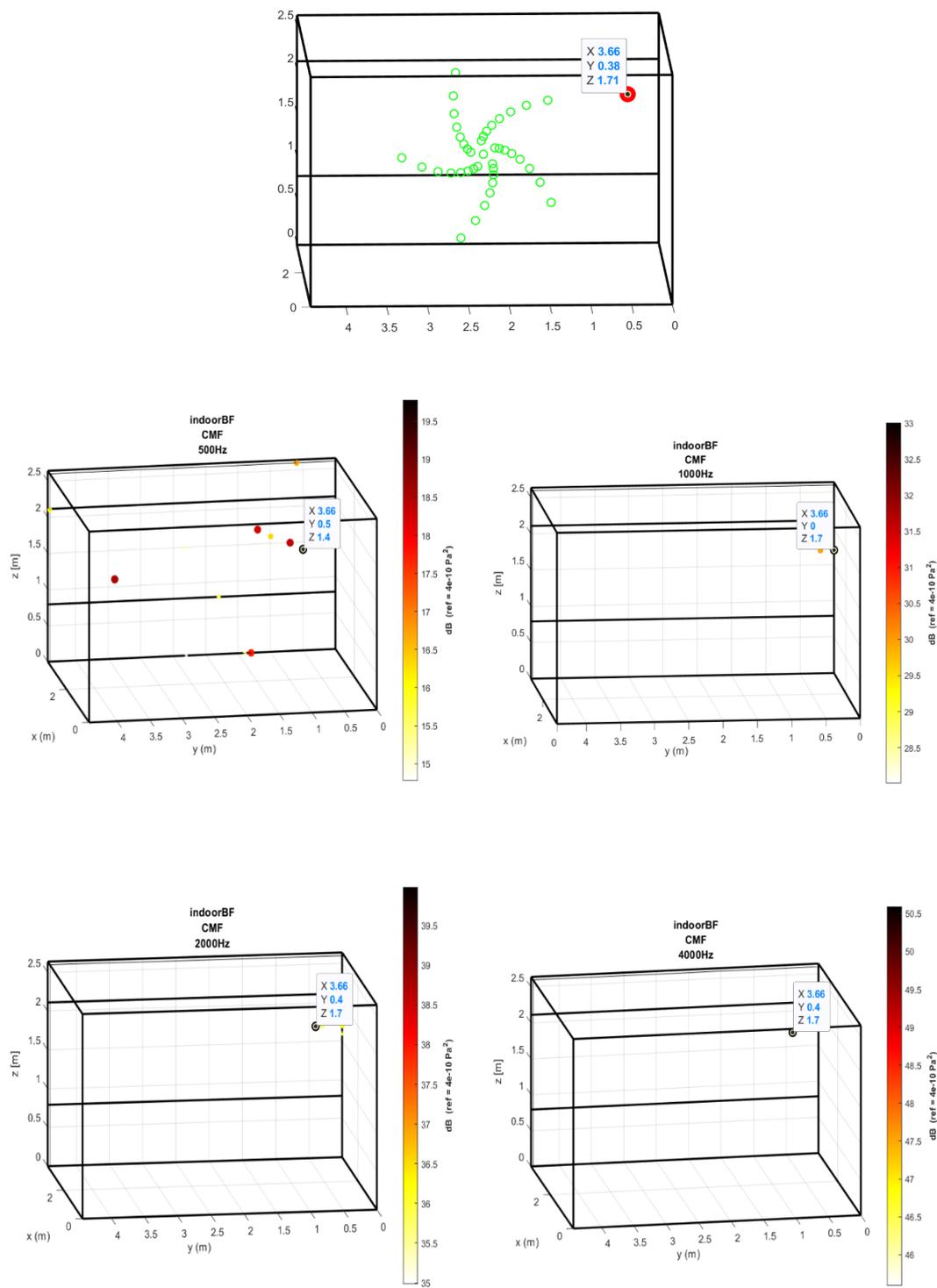


Figura 37, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare spirale da 41 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

3.4.4 Simulazione con array circolare da 19 e 38 microfoni

I 19 microfoni sono posizionati in un piano parallelo alla parete finestrata, distribuiti uniformemente su una circonferenza di raggio 62 cm, posizionando il primo microfono perpendicolarmente al centro della circonferenza e i restanti procedendo in senso orario con un passo angolare ottenuto dividendo i 360° della circonferenza per i 19 microfoni. Le dimensioni della circonferenza e dell'array stesso sono le stesse dell'array presente in laboratorio, per ottenere una congruenza dal punto di vista spaziale in previsione di una futura misura sperimentale. Le simulazioni con l'array circolare per i motivi descritti precedentemente sono state eseguite con diversi orientamenti:

- array circolare planare 19 microfoni;
- array circolare planare 19 microfoni ruotato dell'angolo corrispondente alla metà del passo angolare con il quale sono disposti i microfoni, pari a 9.47° ;
- array circolare planare 19 microfoni ruotato come descritto sopra e traslato rigidamente verso la parete finestrata di 15 cm;
- combinazione del primo e del secondo caso, ottenendo un array planare di 38 microfoni;
- combinazione del primo e del terzo caso, ottenendo un array volumetrico di 38 microfoni.

Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni svolte in base alle configurazioni qui sopra descritte.

Array planare circolare, 19 microfoni, sorgente centrale

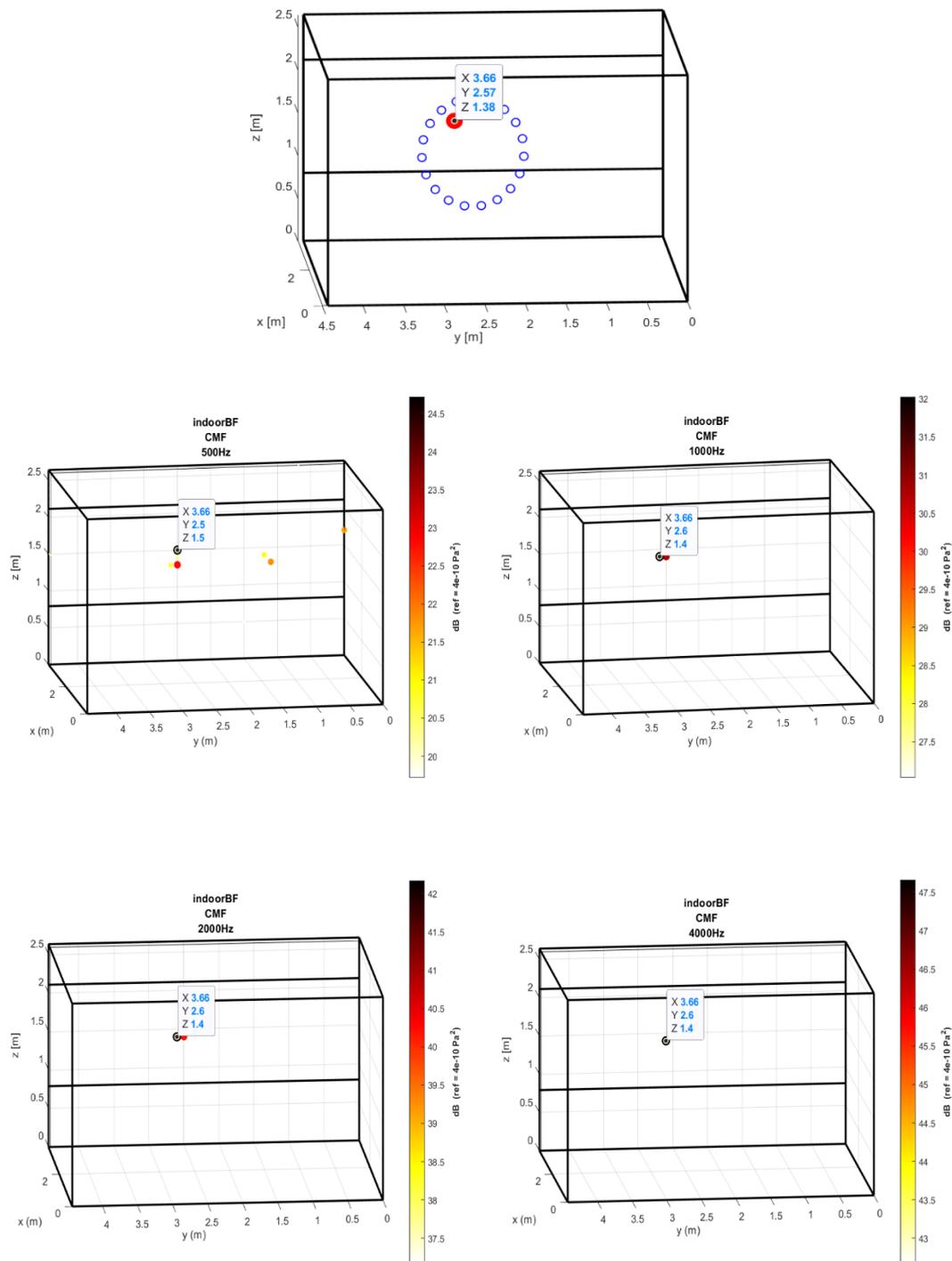


Figura 38, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare, 19 microfoni, sorgente decentrata

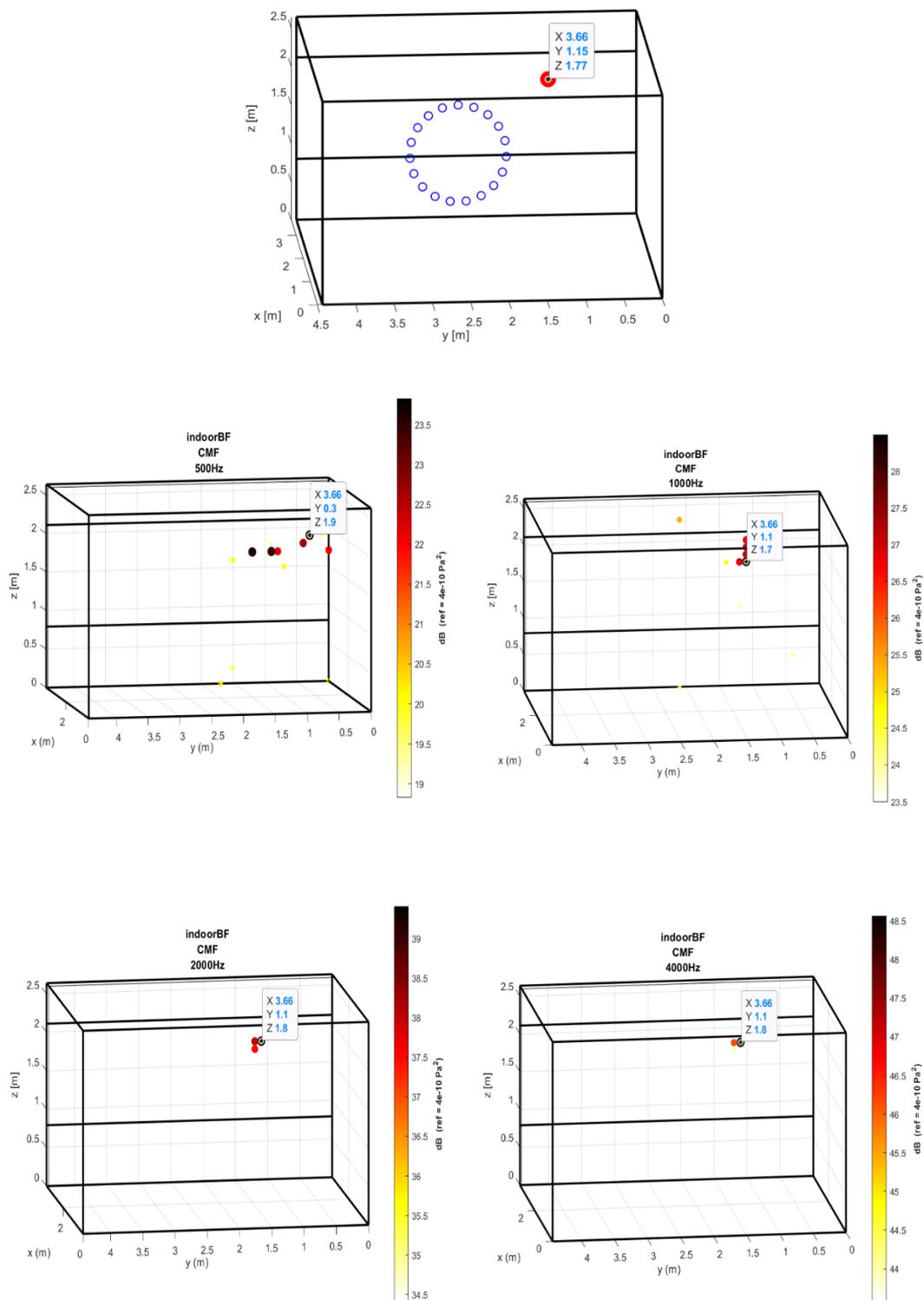


Figura 39, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare, 19 microfoni, sorgente al bordo

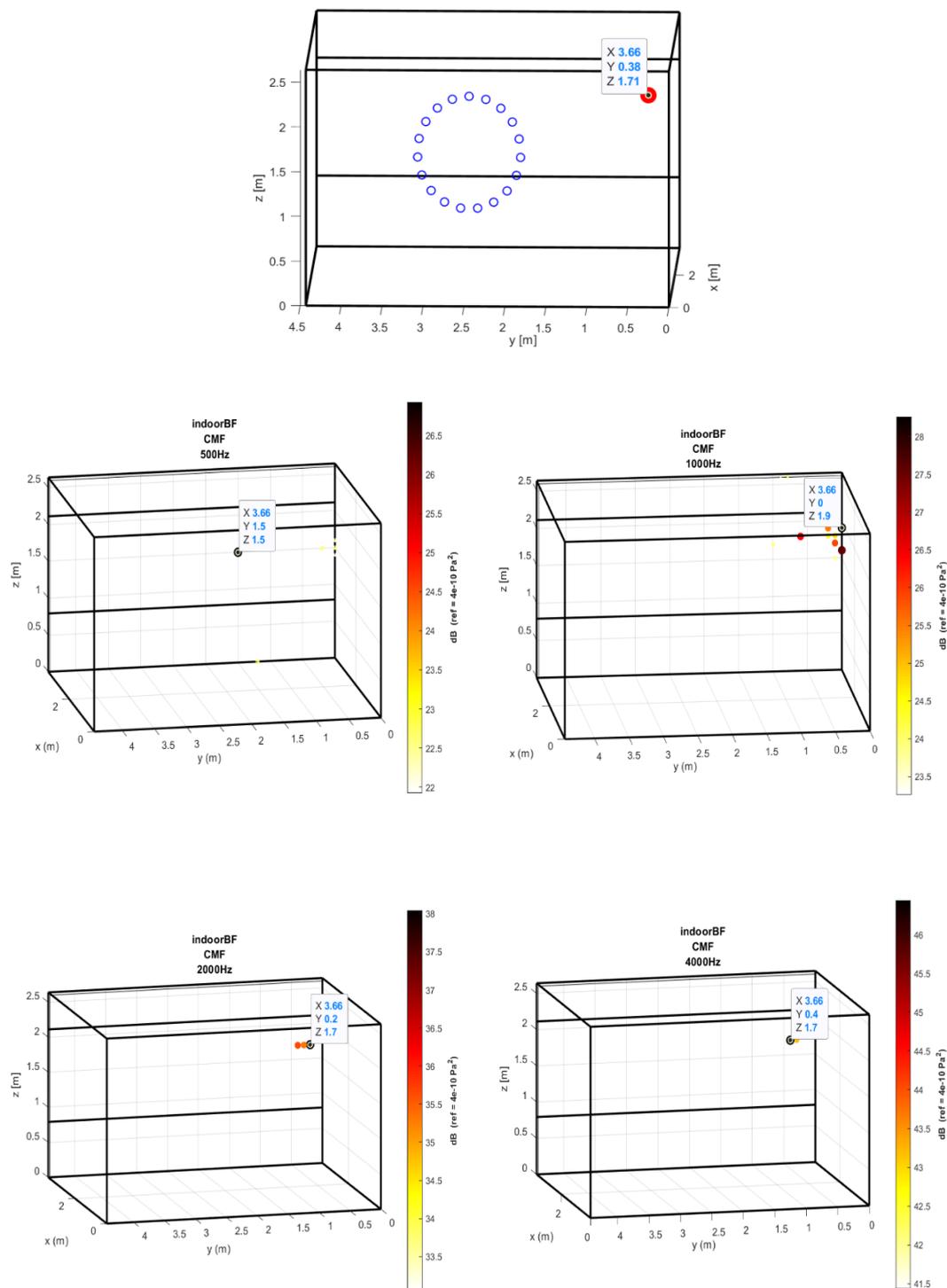


Figura 40, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare ruotato, 38 microfoni, sorgente centrale

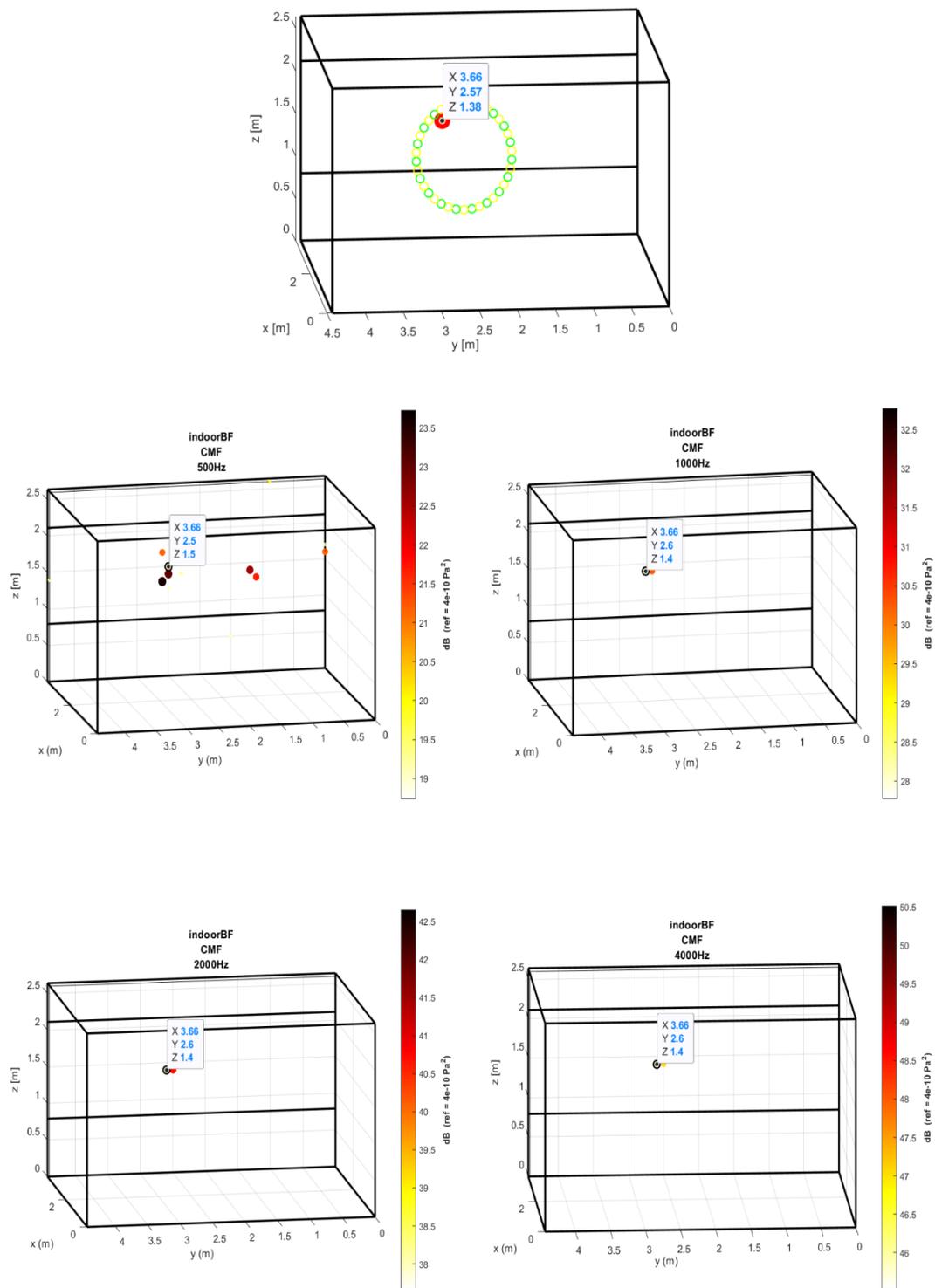


Figura 41, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare ruotato, 38 microfoni, sorgente decentrata

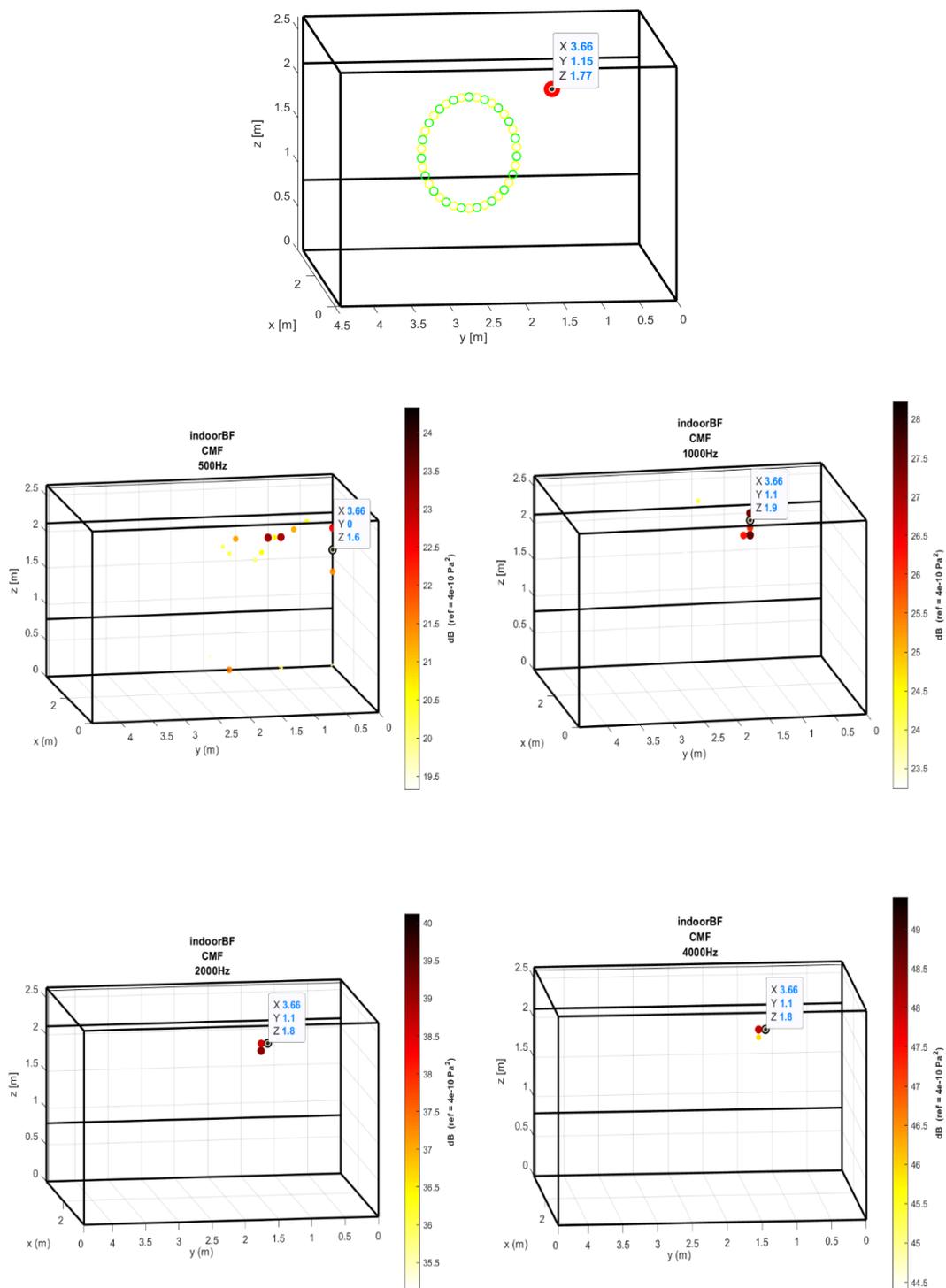


Figura 42, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare ruotato, 38 microfoni, sorgente al bordo

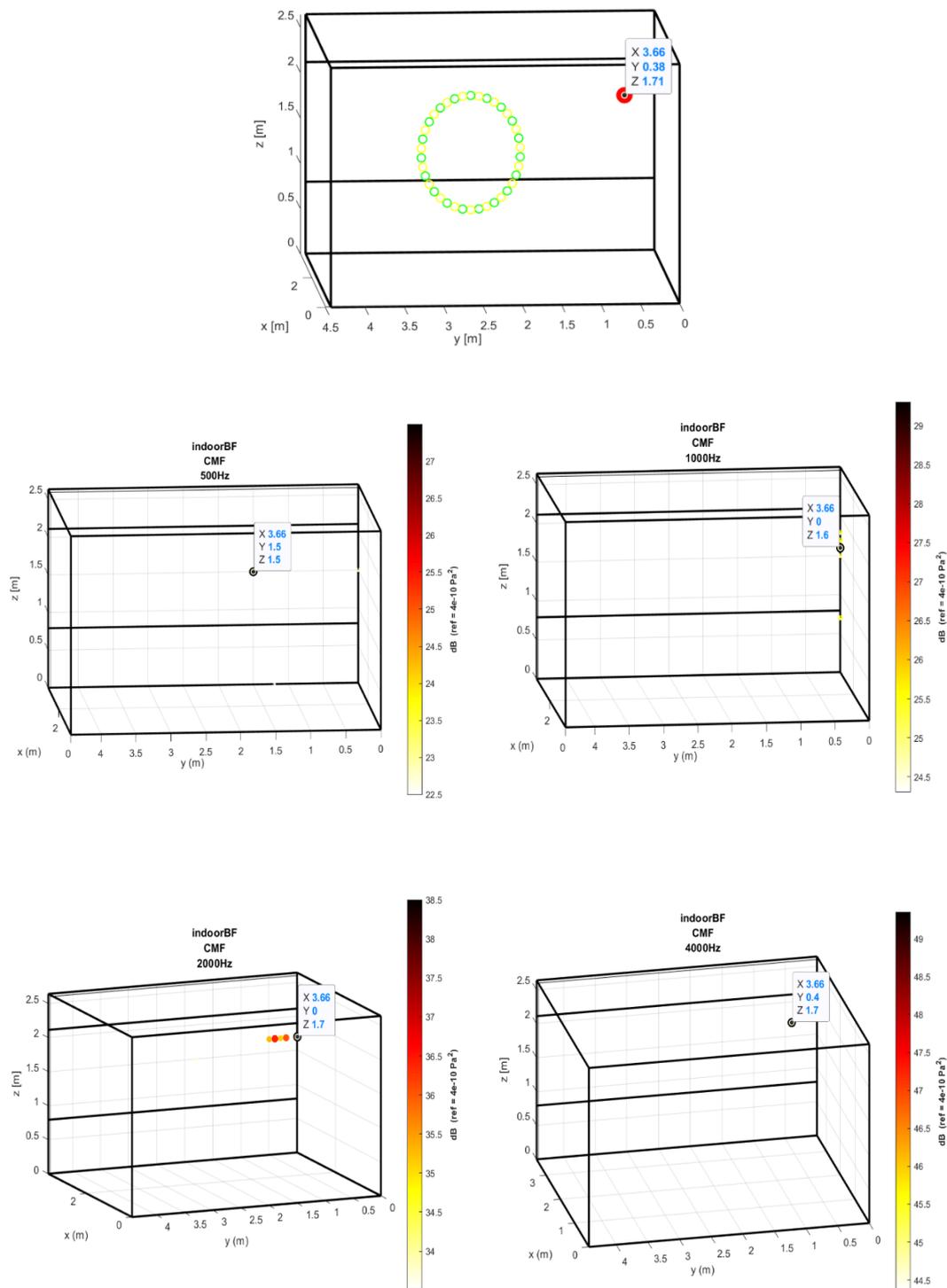


Figura 43, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare rototraslato, 38 microfoni, sorgente centrale

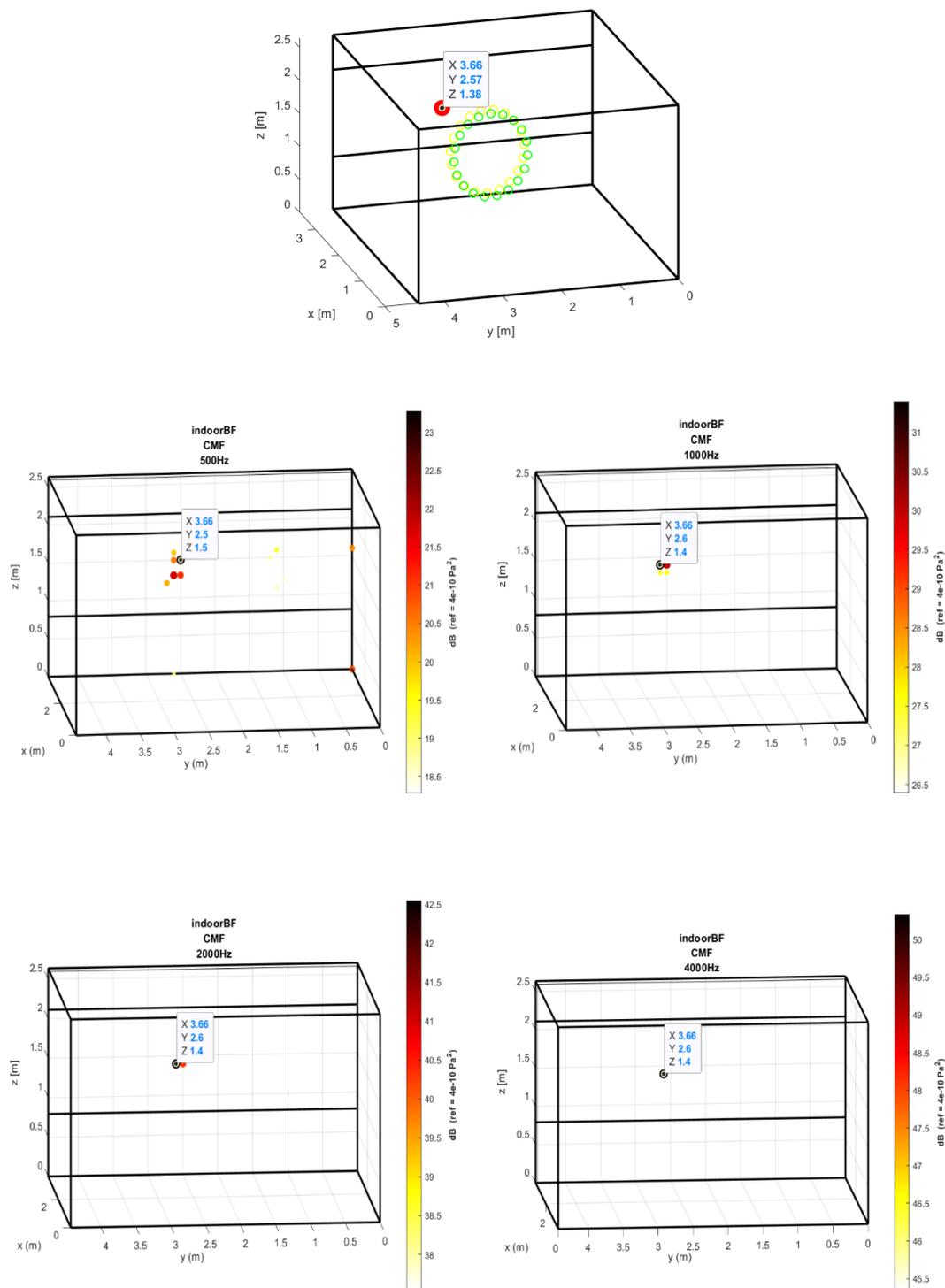


Figura 44, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare rototraslato, 38 microfoni, sorgente decentrata

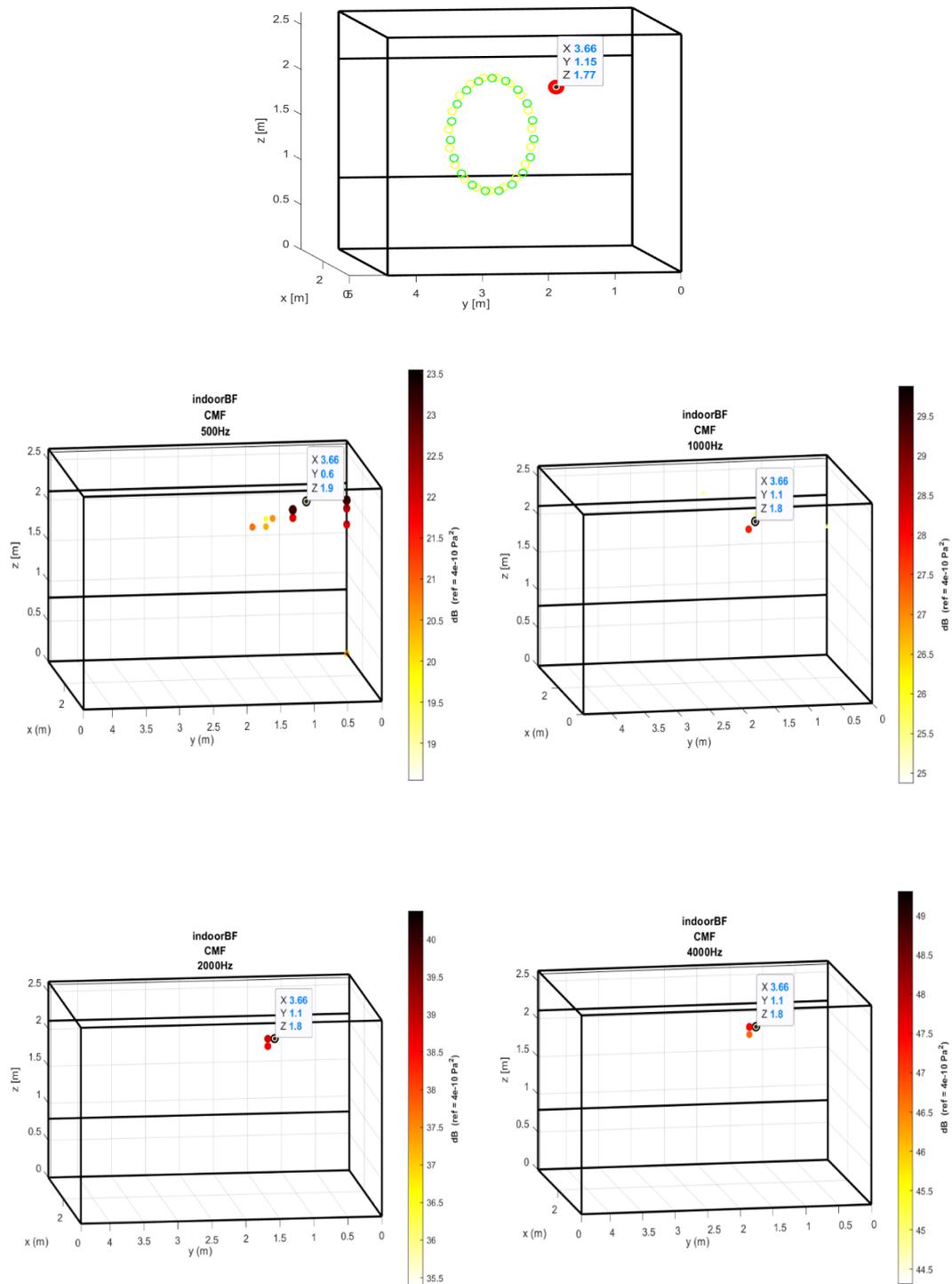


Figura 45, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare rototraslato, 38 microfoni, sorgente al bordo

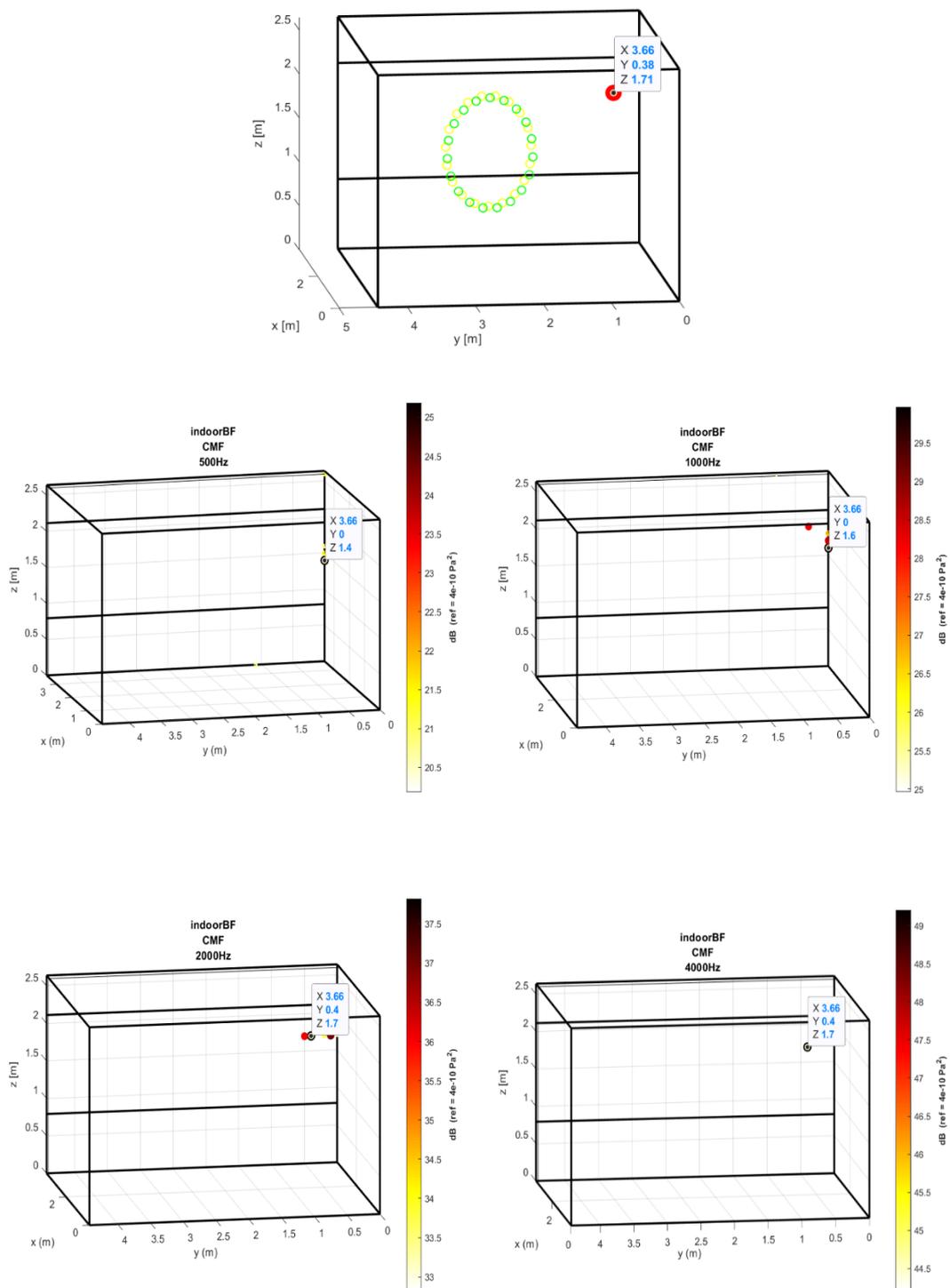


Figura 46, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

3.5 Risultati e confronto delle simulazioni

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati confrontati con la situazione reale tramite una serie di rappresentazioni grafiche in modo da comprendere, in funzione delle diverse variabili in gioco, il comportamento di ogni tipologia di configurazione studiata per il tipo di ambiente trattato. Ciò ha permesso una valutazione immediata dell'efficienza dell'algoritmo di calcolo, e di capire se effettivamente questo sistema consente di identificare la sorgente nella sua posizione.

Nel processo di rielaborazione dei dati è stata come prima cosa valutata la distanza spaziale tra la sorgente e la posizione del picco di pressione acustica rilevato dall'algoritmo, semplicemente facendo uso della funzione norma.

In secondo luogo, sono stati presi i suddetti valori e raggruppati in dei diagrammi a barre, e per avere una visione complessiva della situazione sono stati graficati in funzione:

- Della tipologia di array e numero di microfoni
- Della posizione della sorgente
- Della frequenza

La ripartizione realizzata è ottima per sintetizzare i risultati, in quanto dà la possibilità di visualizzare in maniera abbastanza immediata la soluzione migliore. In pratica si è andato a verificare a parità di numero di microfoni, di array, di posizione della sorgente e di frequenza come cambia il risultato. Questo è stato utile per suddividere il contributo che ognuna di queste variabili ha sul sistema, ma soprattutto per riconoscere quale, almeno in simulazione, è l'array che identifica al meglio la sorgente.

3.5.1 Influenza della tipologia di array e numero di microfoni

Array random planare

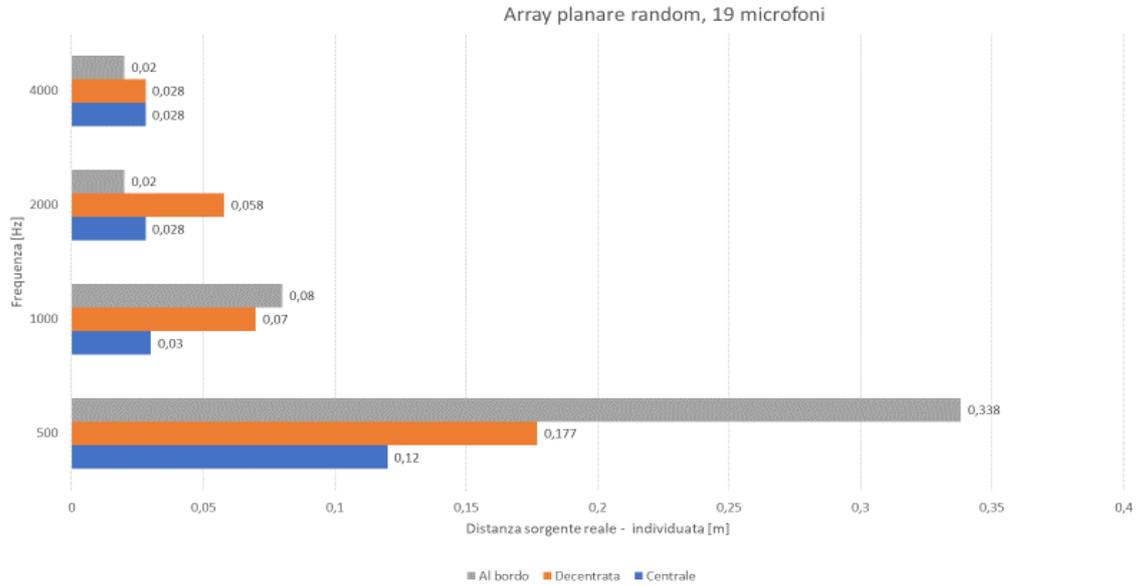


Figura 47, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random planare da 19 microfoni

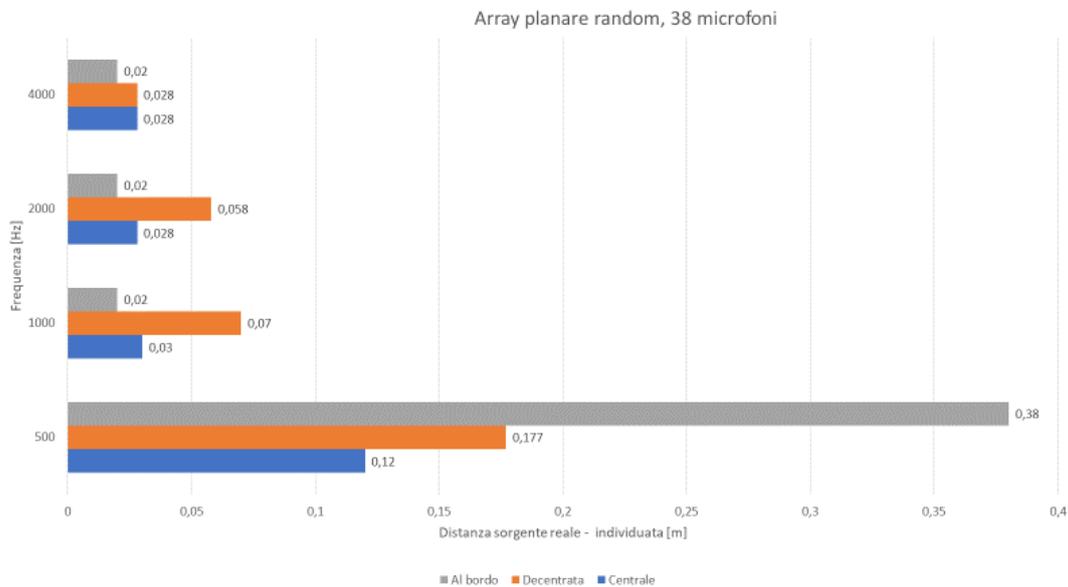


Figura 48, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random planare da 38 microfoni

Array random volumetrico

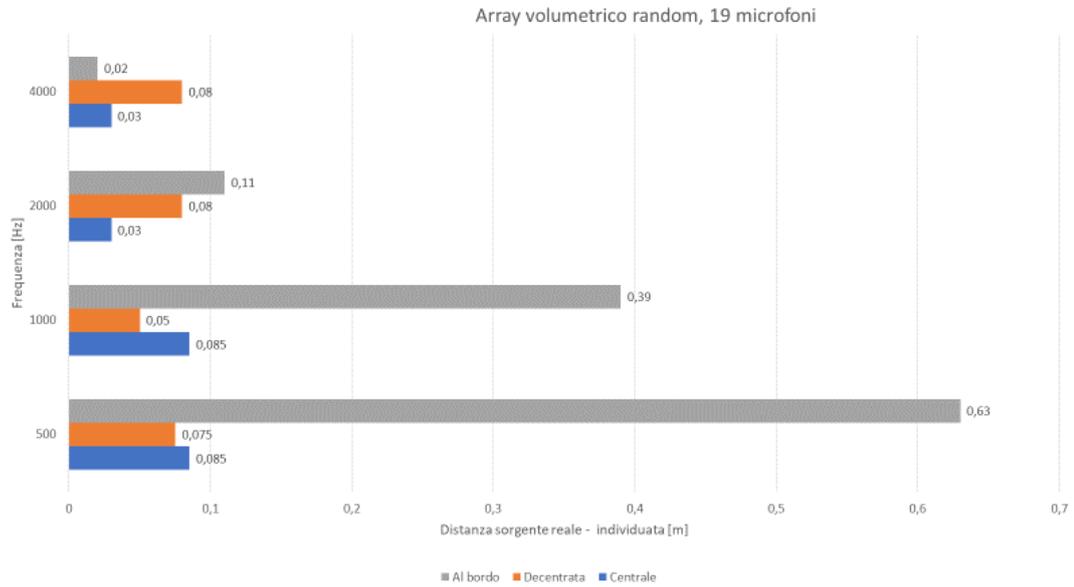


Figura 49, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random volumetrico da 19 microfoni

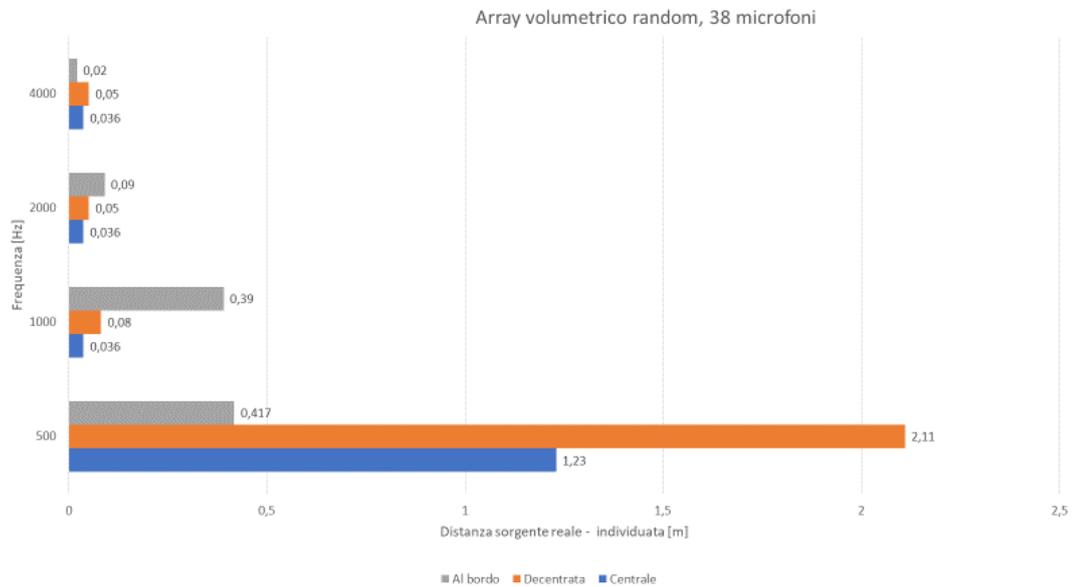


Figura 50, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random volumetrico da 38 microfoni

Array planare spirale

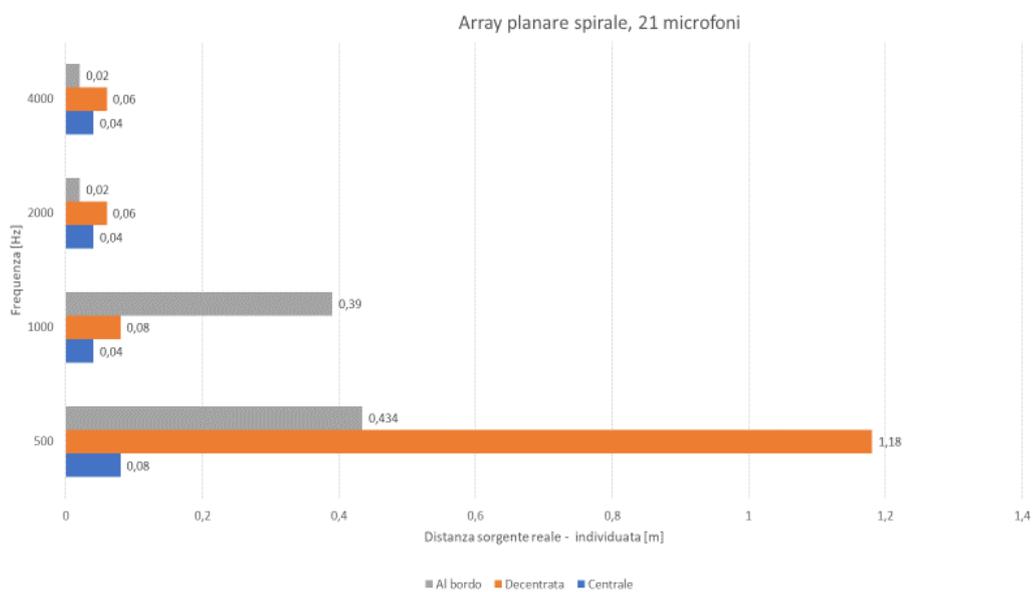


Figura 51, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array spirale planare da 21 microfoni

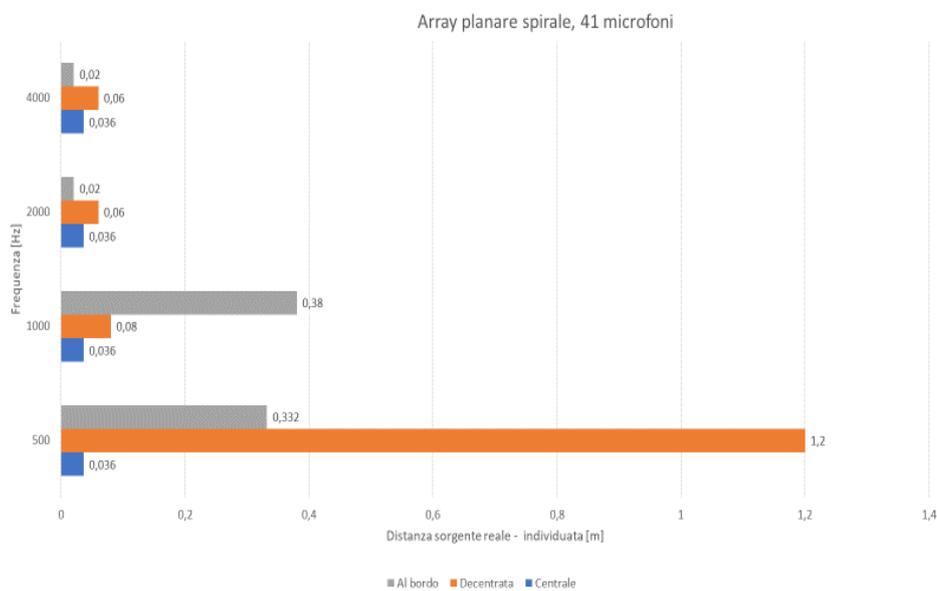


Figura 52, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array spirale planare da 41 microfoni

Array circolare

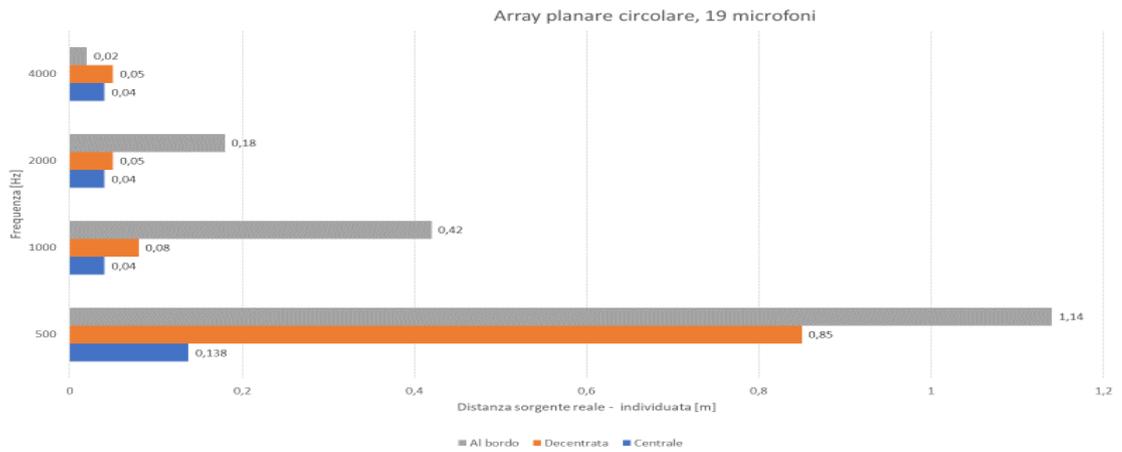


Figura 53, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array circolare planare da 19 microfoni

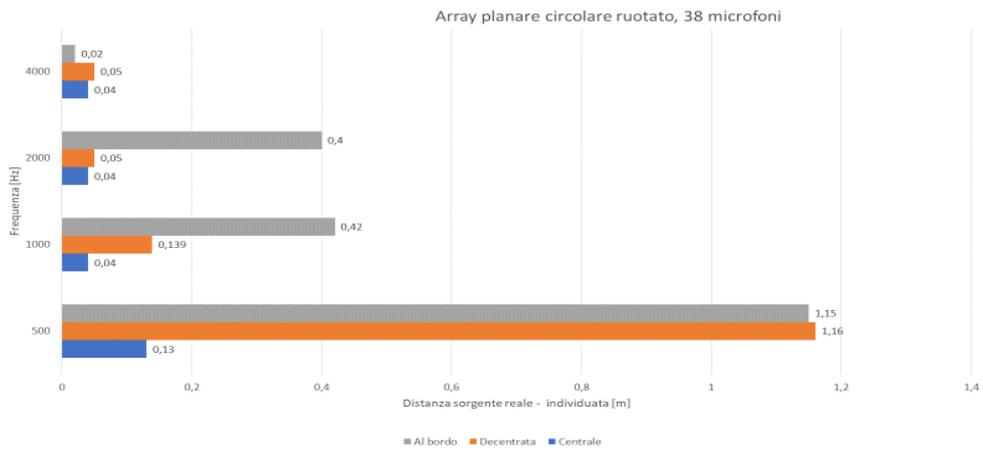


Figura 54, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array circolare planare ruotato da 38 microfoni

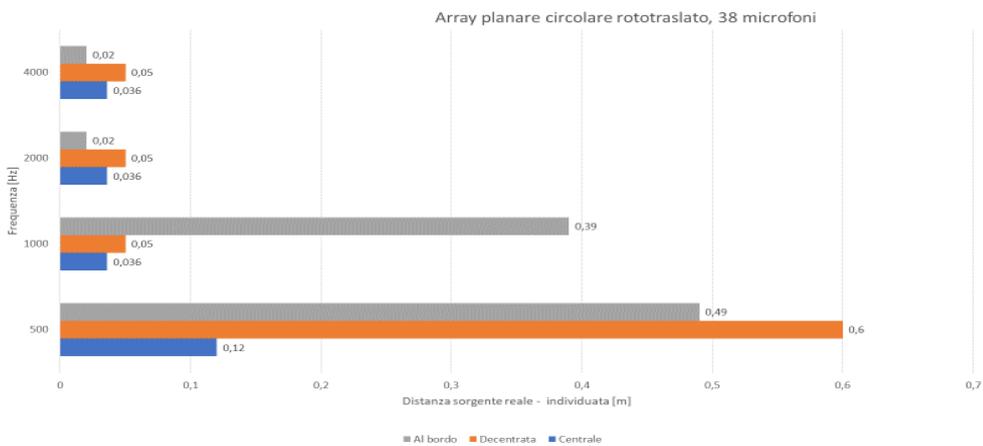


Figura 55, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array circolare planare rototraslato da 38 microfoni

Queste serie di dati ci dicono che almeno a livello di simulazione, il numero di microfoni non incide particolarmente sull'accuratezza della misura. Il tracciamento avviene per tutte le configurazioni studiate leggermente più preciso quando vengono utilizzati 38 microfoni, ma non si ottiene l'aumento di risoluzione che ci si può aspettare in seguito ad un raddoppio del numero di microfoni. È un dato tuttavia plausibile, considerando le radicali semplificazioni fisiche e geometriche che caratterizzano l'ambiente di simulazione.

3.5.2 Influenza della posizione della sorgente

Sorgente centrale

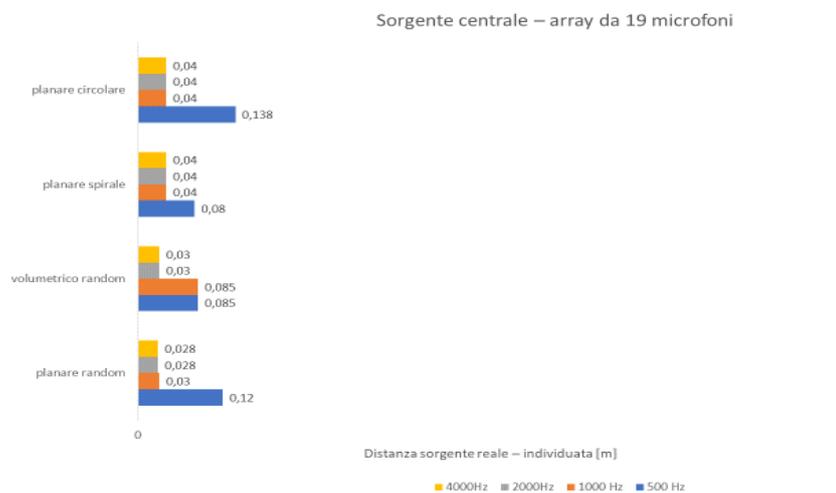


Figura 56, Influenza della posizione della sorgente. array da 19/21 microfoni, sorgente centrale

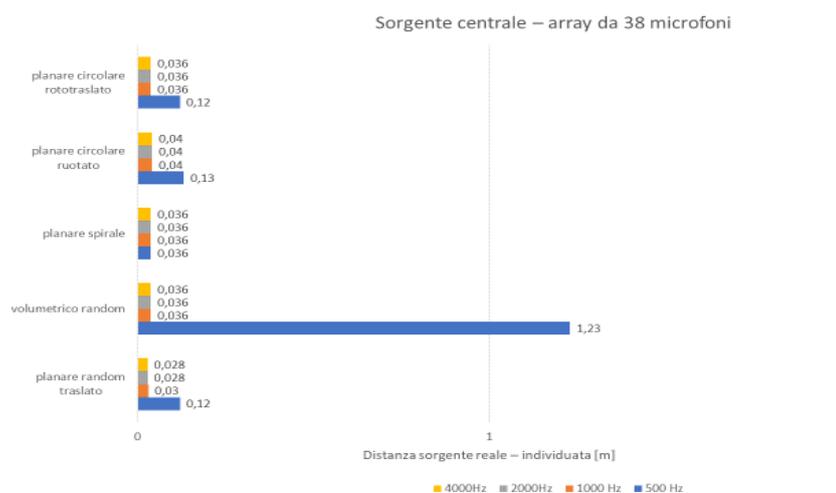


Figura 57, Influenza della posizione della sorgente. array da 38/41 microfoni, sorgente centrale

Sorgente decentrata

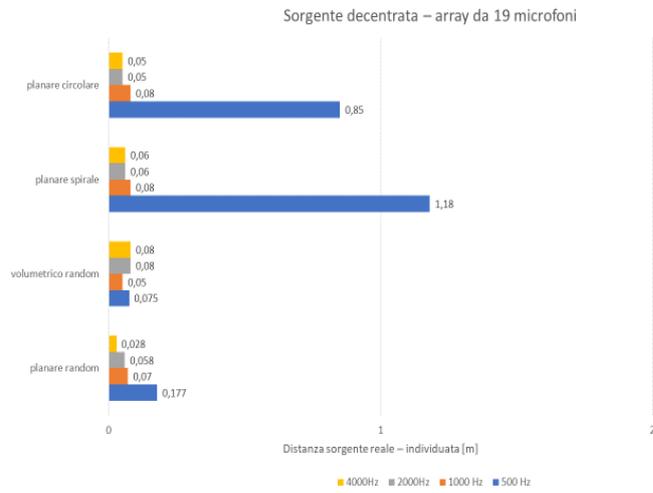


Figura 58, Influenza della posizione della sorgente. array da 19/21 microfoni, sorgente decentrata

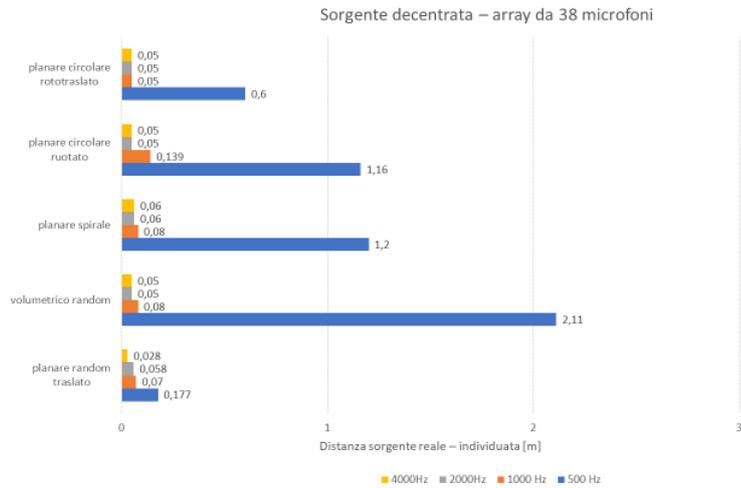


Figura 59, Influenza della posizione della sorgente. array da 38/41 microfoni, sorgente decentrata

Sorgente al bordo

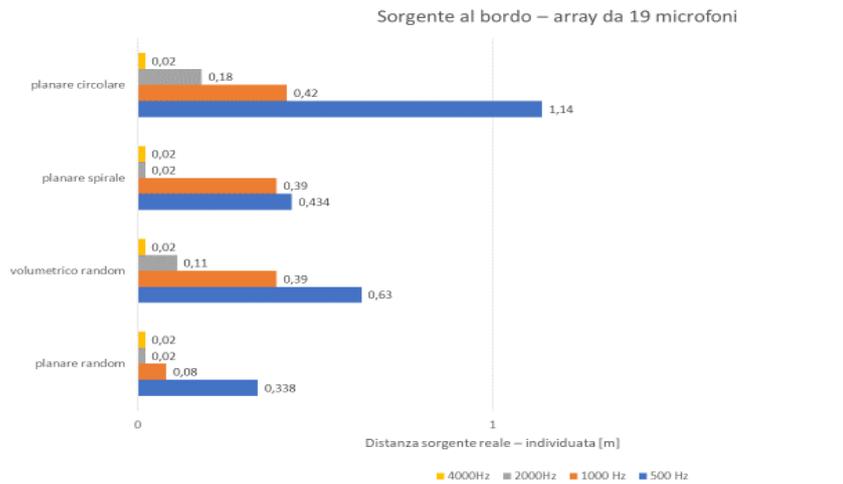


Figura 60, Influenza della posizione della sorgente. array da 19/21 microfoni, sorgente al bordo

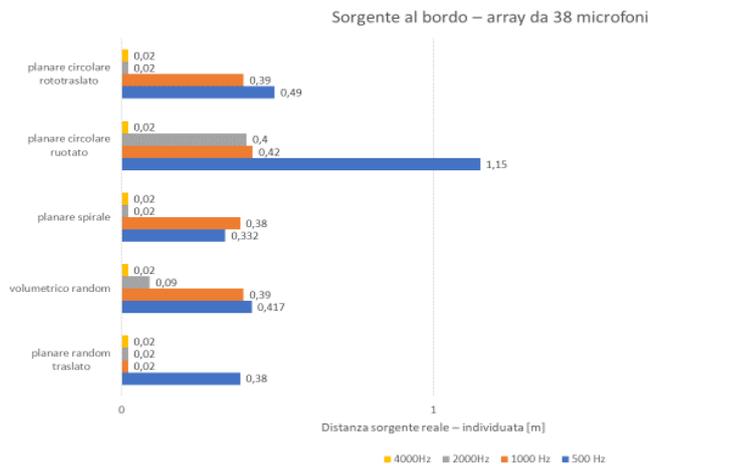


Figura 61, Influenza della posizione della sorgente. array da 38/41 microfoni, sorgente al bordo

Analizzando questa serie di dati che mostra come il rilevamento della sorgente sia influenzato dalla posizione della stessa, quello che emerge è una maggiore facilità da parte dell'algoritmo di simulazione nel rintracciare la sorgente centrale e quella decentrata, e questo vale sia con la configurazione da 19 microfoni che con quella da 38. Le sorgenti messe negli spigoli d'altronde sono quelle più complesse da gestire, in quanto eliminare completamente le riflessioni che si generano in queste zone non è semplice. È ragionevole quindi pensare che indipendentemente dall'array scelto, questo non sia molto performante nella rilevazione di queste sorgenti. Questo discorso vale per il campo simulato, e ancora di più per il campo pratico.

3.5.3 Influenza della frequenza

500 Hz

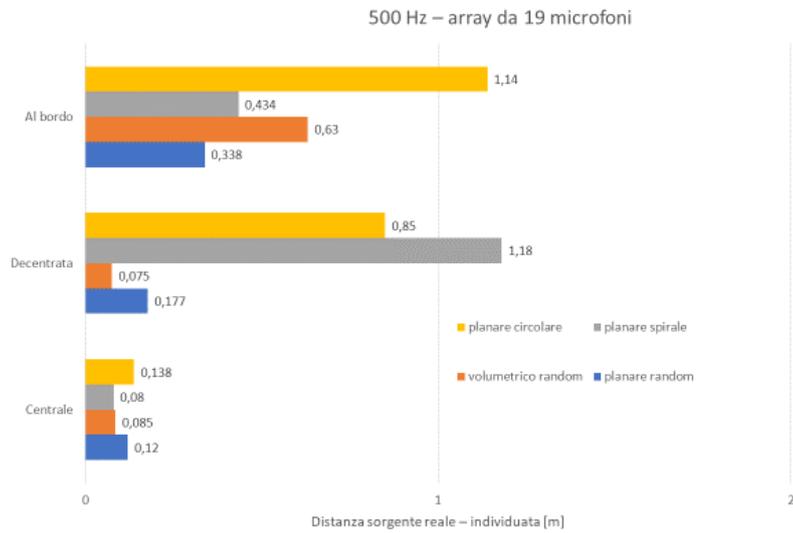


Figura 62, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 500 Hz

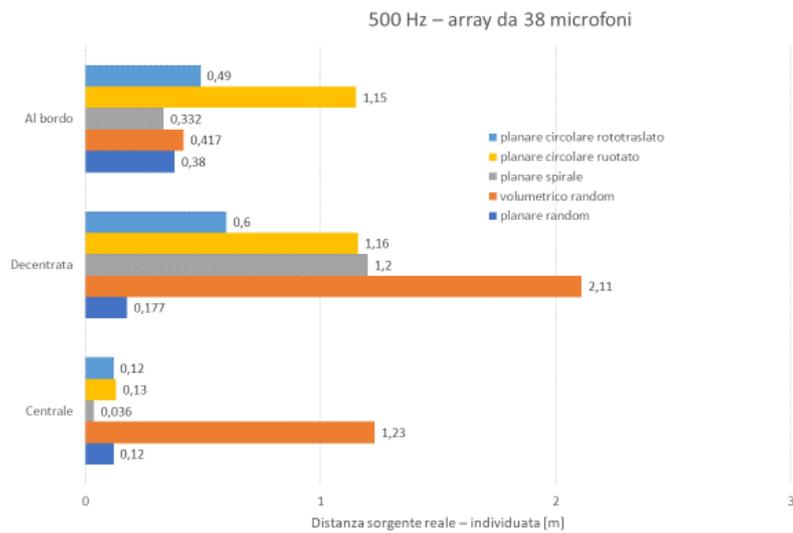


Figura 63, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 500 Hz

1000Hz

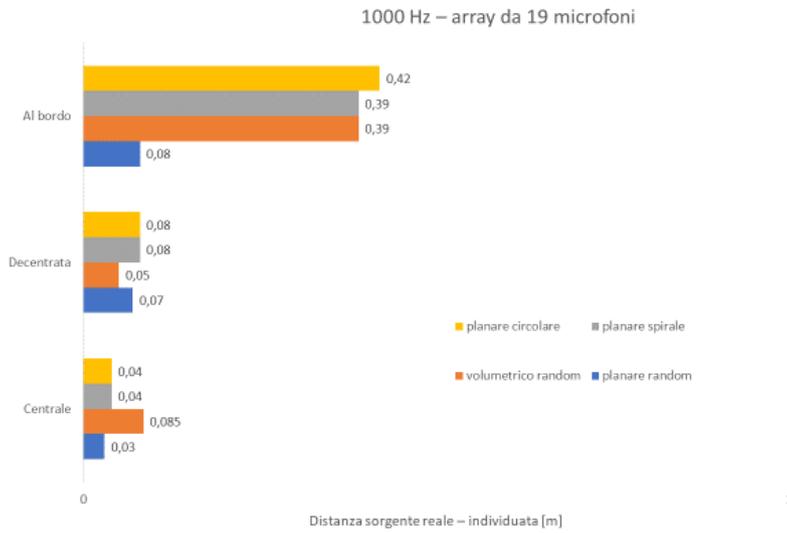


Figura 64, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 1000 Hz

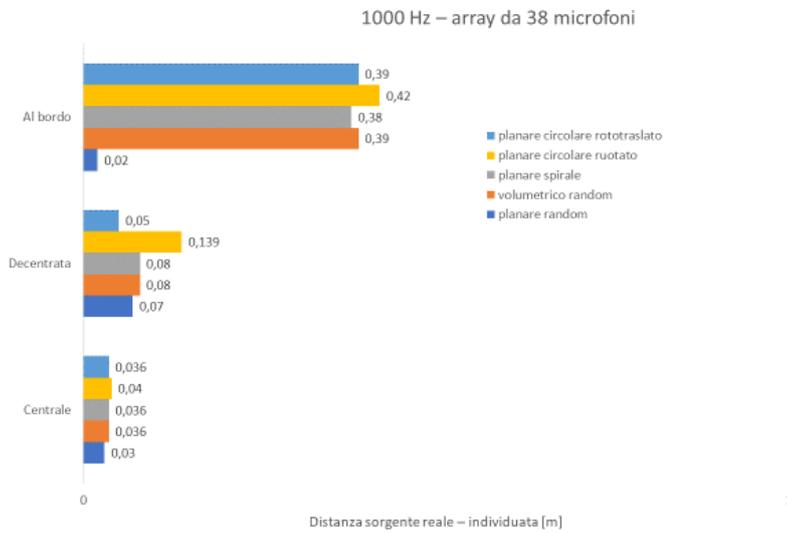


Figura 65, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 1000 Hz

2000 Hz

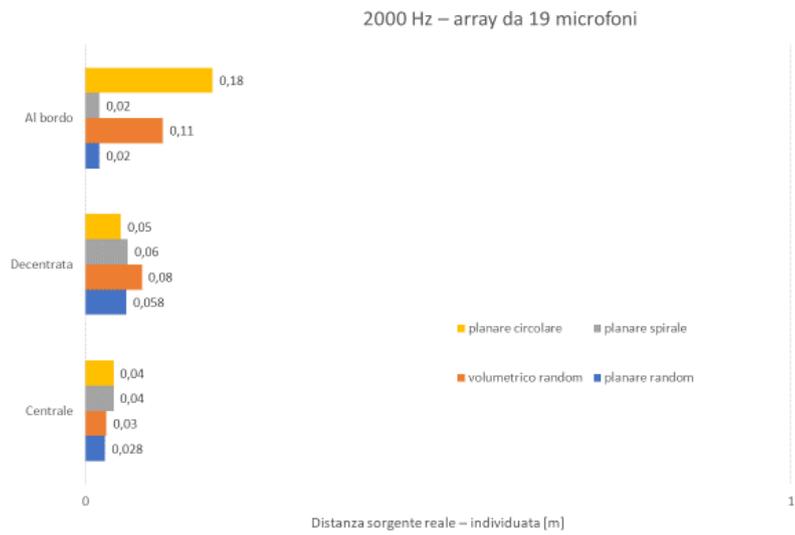


Figura 66, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 2000 Hz

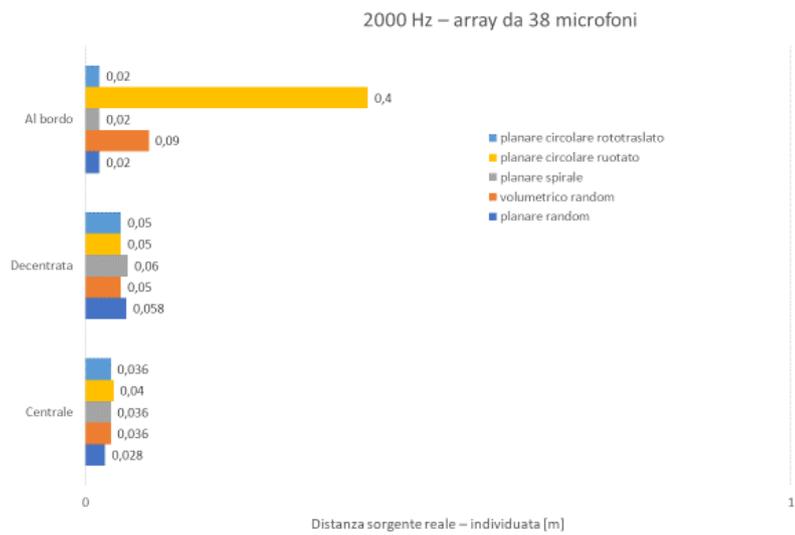


Figura 67, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 2000 Hz

4000 Hz

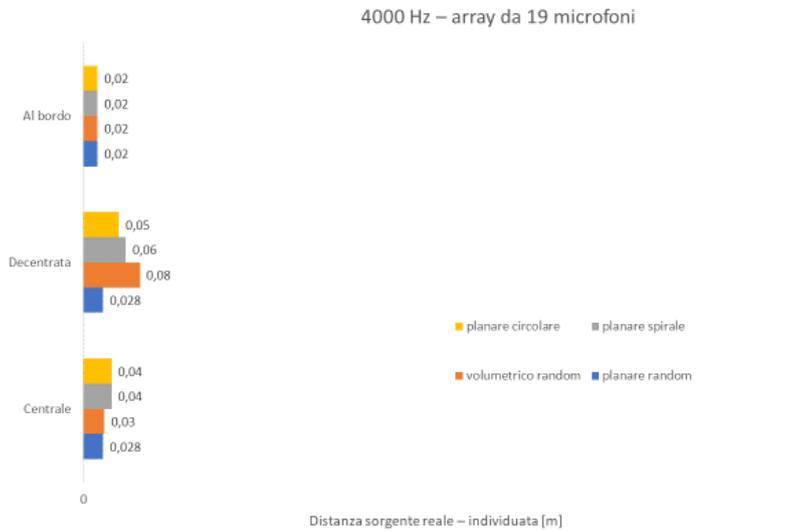


Figura 68, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 4000 Hz

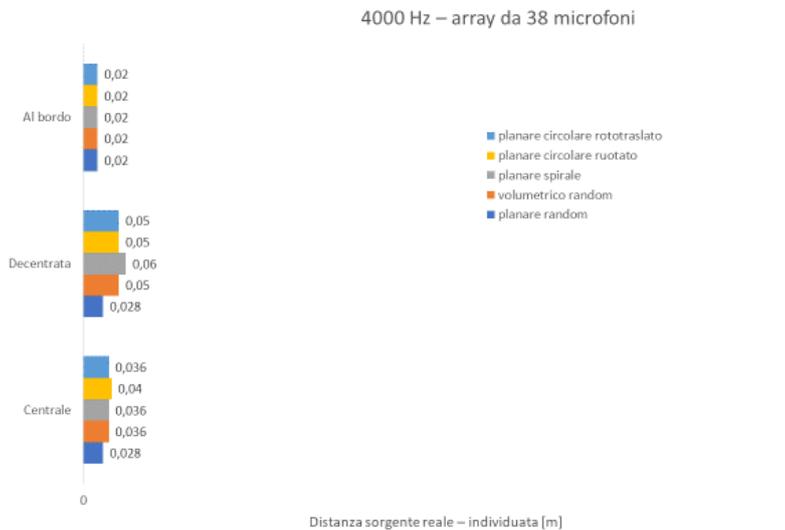


Figura 69, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 4000 Hz

L'analisi di quest'ultima serie di grafici evidenzia come tutte le configurazioni presentino una buona attitudine alla rilevazione della sorgente alle alte frequenze, specialmente a 2000 e 4000 Hz. Per le basse frequenze, soprattutto per il livello di

frequenza 500 Hz, tutte le configurazioni risultano poco performanti, i cui risultati denotano valori delle distanze sorgente reale – picco massimo individuato anche di 2 metri.

Questo diverso comportamento dell’algoritmo a basse frequenze può essere causato da diversi fattori:

- dalle dimensioni dell’array in primis, che sono troppo piccole per quelle frequenze, ma probabilmente anche dal fatto che il simulatore non riesca a replicare correttamente bassi livelli di frequenza.
- Il fatto che i risultati non siano convincenti per basse frequenze indipendentemente dalle variabili in gioco fa presupporre che la simulazione è influenzata dai modi della stanza, frequenze in corrispondenza delle quali l’ambiente contribuisce nell’alterare il normale percorso di propagazione della sorgente verso i microfoni dell’array.
- I modi della stanza influiscono molto meno in alta frequenza, sono meno energetici rispetto a quanto lo sono in basso. Essi agiscono come un equalizzatore sul suono emanato dalla sorgente: se questa emette un segnale a una certa frequenza che corrisponde a un modo della stanza, difficilmente riesco a rilevare la posizione della sorgente in maniera corretta.

3.6 Conclusioni e individuazione della configurazione ottimale

Al netto di tutte le informazioni estratte da questi diagrammi possiamo concludere che:

- Le configurazioni che presentano un elevato numero di microfoni, seppur di poco, rilevano con maggior precisione la sorgente.
- per posizioni centrali della sorgente, tutte le configurazioni presentano un buon comportamento. Maggiori difficoltà di tracciamento invece si riscontrano quando la sorgente si sposta in prossimità dello spigolo.
- Per motivi precedentemente elencati gli array non riescono a rilevare la sorgente quando essa emette un suono a 500 Hz. All’aumentare del valore di frequenza la localizzazione della sorgente avviene con precisione sempre maggiore.

In termini assoluti l'algoritmo di calcolo ha prodotto risultati soddisfacenti, si è dimostrato un buon metodo per la rilevazione di sorgenti sonore. Il fatto che risulti funzionante in simulazione ci porta a pensare che potrebbe esserlo anche nella pratica, tenendo però sempre presenti le enormi differenze che ci sono tra l'ambiente simulato e quello reale, che portano alla logica deduzione che ci sarà sicuramente discrepanza tra i due risultati. È in ogni caso interessante andare ad analizzare i dati ottenuti da una replicazione in campo pratico di quello che è stato realizzato virtualmente, e mettere a confronto i due output. Questo può portare eventualmente ad una validazione della bontà dell'algoritmo di simulazione, o viceversa contribuisce al processo di ottimizzazione del setup simulato, nel caso in cui i risultati reali si discostino di molto da quelli virtuali.

Tali test sono stati effettuati con l'array planare circolare, come preannunciato nell'introduzione di questo capitolo, sebbene la configurazione ottimale sembrerebbe essere l'array random planare. Essa mantiene, al variare dei parametri considerati, un errore di tracciamento della sorgente molto contenuto anche quando la sorgente è posizionata in zone critiche. Nella pratica non è stata realizzata la misura in laboratorio con questo array per motivi di tempo e di mancanza di materiale, ed è stato possibile verificare solamente il comportamento dell'array circolare, l'unico a disposizione al momento dell'attività di tirocinio. Ciò è stato fatto considerando che il tracciamento della sorgente eseguito mediante questa distribuzione di microfoni era tutto sommato soddisfacente in campo simulato, paragonabile a quello ottenuto con la configurazione ottimale.

I seguenti diagrammi illustrano un confronto diretto tra gli output ottenuti dalle due configurazioni che dimostrano come non ci sia un discostamento così grande tra le due famiglie di dati, e che è quindi ragionevole effettuare i test con l'array circolare, nonostante l'array planare random sia indiscutibilmente migliore.

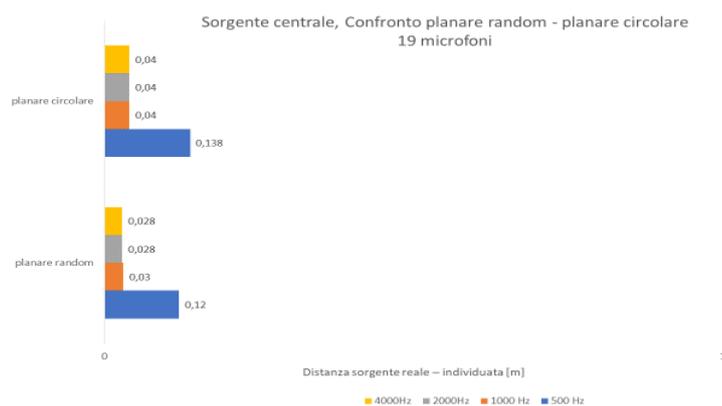


Figura 70, Confronto tra array planare random e circolare da 19 per la sorgente centrale, alle varie frequenze

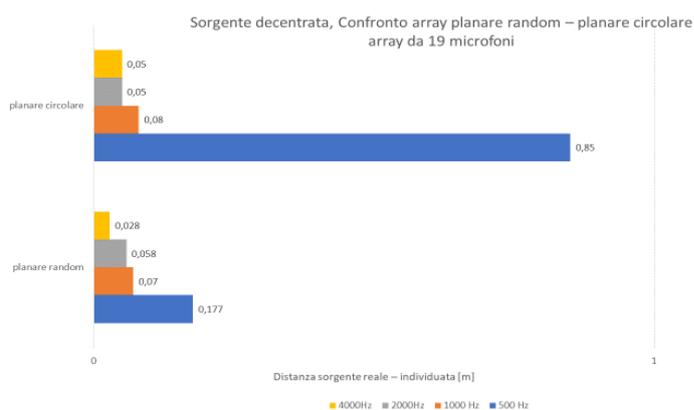


Figura 71, Confronto tra array planare random e circolare da 19 per la sorgente decentrata, alle varie frequenze

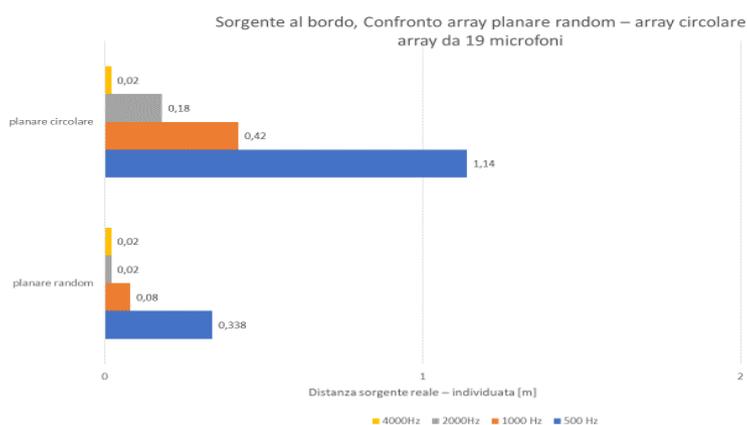


Figura 72, Confronto tra array planare random e circolare da 19 per la sorgente al bordo, alle varie frequenze

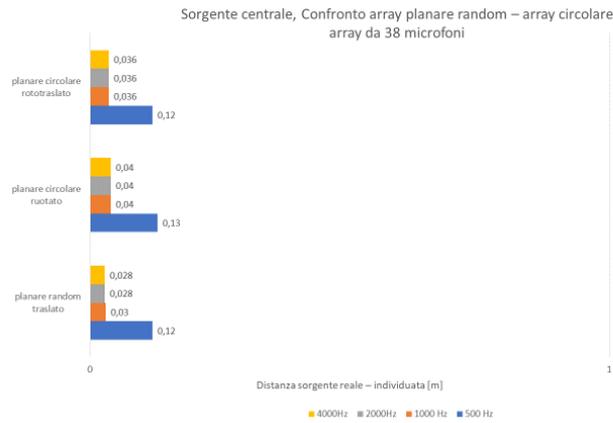


Figura 73, Confronto tra array planare random e circolare da 38 per la sorgente centrale, alle varie frequenze

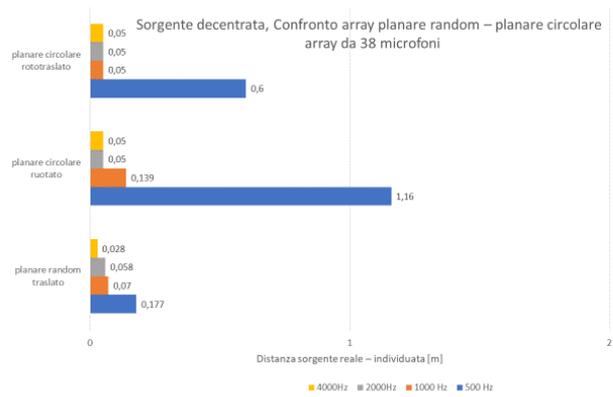


Figura 74, Confronto tra array planare random e circolare da 38 per la sorgente decentrata, alle varie frequenze

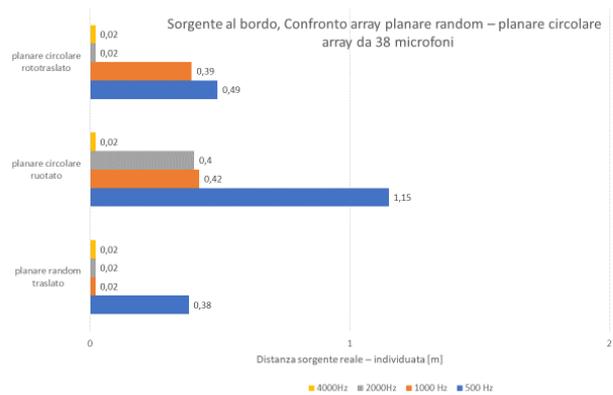


Figura 75, Confronto tra array planare random e circolare da 38 per una sorgente al bordo, alle varie frequenze

4 – MISURE SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno illustrate le prove sperimentali che sono state eseguite basandosi sui dati e considerazioni conseguiti in fase di simulazione.

Sul campo verrà testato il comportamento sul campo di un array con distribuzione circolare di microfoni negli orientamenti e nelle configurazioni illustrati in precedenza nel paragrafo 3.4.4, attraverso cui sono stati raggiunti risultati attendibili in termini di rilevamento della sorgente in campo simulato. Le prove sperimentali serviranno perciò a validare i risultati conseguiti in simulazione, fornendo o meno conferma della buona capacità di rilevazione della sorgente dimostrata in campo virtuale.

I test sono stati svolti in una sala adibita allo svolgimento di riunioni situata nel laboratorio del dipartimento di misure dell'UNIVPM, nella quale è stato allestito il setup sperimentale che verrà illustrato in seguito in questo capitolo.



Figura 76, Sala riunioni del laboratorio del dipartimento di misure dell'UNIVPM

Prima di entrare nel dettaglio è importante però introdurre un approfondimento riguardante l'ambiente studiato e il processo di misura. Tale premessa è connessa principalmente alle svariate fonti di incertezza che contraddistinguono l'ambiente di lavoro in relazione all'ambiente simulato. Le principali cause di incertezza fanno riferimento a questi fattori:

- La sala riunioni si trova all'interno del laboratorio di misure di un plesso universitario, il quale è frequentato quotidianamente da persone, e caratterizzato dalla presenza di diversi macchinari; questo si traduce in una presenza continua di rumore di fondo, che non è stata considerata in fase di simulazione.
- I modi dell'ambiente sono simulati per un ambiente diverso da quello reale; per semplicità è stata realizzata in Matlab una stanza con la geometria elementare di un parallelepipedo, ma nella realtà la sua conformazione è più complessa, e contiene al suo interno diversi oggetti, tra cui un grande tavolo che occupa più della metà della superficie calpestabile della sala che in fase di simulazione è stato considerato come un pavimento rialzato. Da ciò si deduce che non è plausibile che il simulatore di risposta impulsiva della stanza mi dia la stessa risposta impulsiva che potrei misurare direttamente, perché frutto di una semplificazione.
- Una ulteriore semplificazione è stata quella di conferire alle pareti, al pavimento e al soffitto dei valori ipotetici di coefficiente di assorbimento, che potrebbero essere azzeccati per i materiali che costituiscono le sei facce della stanza, ma non ve ne è certezza.
- Potrebbe esserci un'incertezza relativa al posizionamento dei microfoni nella stanza rispetto alle posizioni che gli sono state attribuite nella simulazione. Discorso analogo va fatto per la posizione della sorgente. Le misure sono state prese in entrambi i casi con un metro, e questi tipi di misurazione in un ambiente tridimensionale non sono banali.
- La generazione delle pressioni sintetizzate sulle posizioni microfoniche dell'ambiente di simulazione è stata realizzata facendo uso sempre dello stesso codice, e si suppone che l'eventuale incertezza associata a tale codice si distribuisca in maniera sufficientemente equa sulle varie simulazioni.

Le molteplici cause di incertezza appena evidenziate e associate alla simulazione fanno presupporre che i risultati reali possano differire da quelli virtuali. D'altra parte, considerato che i dati virtuali ottenuti sono frutto dello stesso processo di simulazione, è ragionevole pensare che quando verrà riprodotto fisicamente il setup di misura, i risultati conseguiti saranno coerenti a quelli del caso simulato.

4.1 Descrizione del setup sperimentale

I componenti utilizzati per effettuare i test sperimentali sono stati:

- Generatore di segnale e sistema di acquisizione
- Array di microfoni circolare
- Microfoni a condensatore
- Sorgente acustica omnidirezionale

La schematizzazione del setup sperimentale allestito è riportata in figura 77:

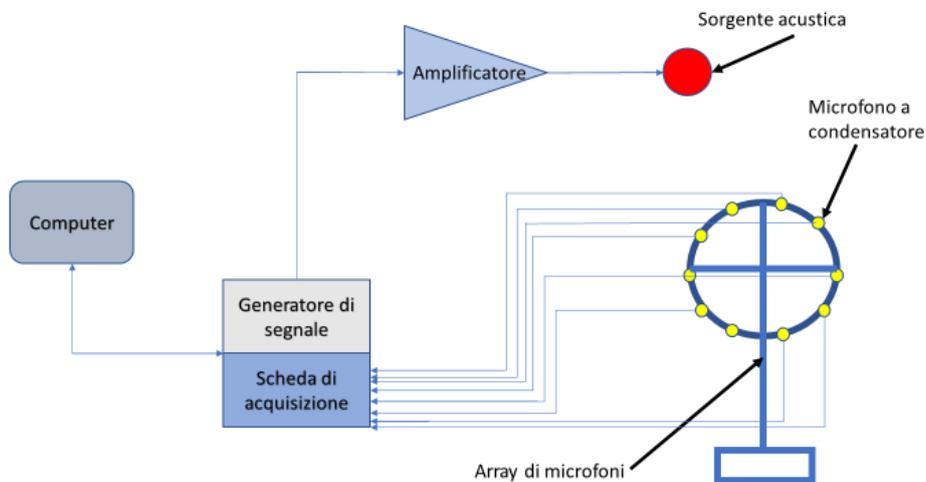


Figura 77, Catena di misura dei test sperimentali

Vengono di seguito analizzate le caratteristiche specifiche di ogni componente della catena di misura.

4.1.1 Generatore di segnale e sistema di acquisizione

L'acquisizione dei segnali dei microfoni è stata eseguita da un sistema di acquisizioni dati "Simcenter SCADAS Mobile", un dispositivo modulare utilizzato per acquisire segnali dinamici a una frequenza di campionamento che arriva fino a 204,8 kHz per ogni canale.



Figura 78, Sistema SCADAS Mobile

Di seguito i principali componenti:

- Schede di acquisizione dati da 8 a 24 canali di ingresso; a queste sono state connesse i 20 cavi che realizzano il collegamento con i 20 microfoni a condensatore.
- Controller Card Syscon; scheda di controllo che per questa applicazione è stata sfruttata per la generazione del segnale e per la connessione al Software di processazione dei dati SimCenter TestLab.

4.1.2 Amplificatore

L'amplificatore di segnale è un dispositivo elettronico impiegato per far variare l'ampiezza di un segnale elettrico in ingresso, in modo da aumentare il volume del segnale acustico e rendere più agevole il tracciamento.



Figura 79, Amplificatore di potenza

4.1.3 Array di microfoni planare circolare

L'array di microfoni circolare è stato realizzato nel laboratorio di misure dell'UNIVPM ed è composto da una struttura circolare metallica fissata ad un sostegno mobile. Sulla struttura circolare di raggio 62 cm è stato fissato con delle fascette il primo microfono in corrispondenza di uno dei supporti metallici dell'anello circolare, in modo da avere un riferimento fisso. Gli altri 18 microfoni sono stati fissati alla stessa maniera con un passo di 20,3 cm lungo la circonferenza, valore ottenuto tramite semplici calcoli geometrici. L'array è stato infine posizionato sul tavolo della sala riunioni, facendo sì che le posizioni dei microfoni coincidessero con quelle delle simulazioni effettuate. Il risultato finale è illustrato in figura 80.

Un ventesimo microfono è stato posizionato su di un cavalletto fisso nei pressi dell'array, ed è servito per controllare la stazionarietà del campo acustico in modo da avere la possibilità di concatenare due misurazioni non simultanee.

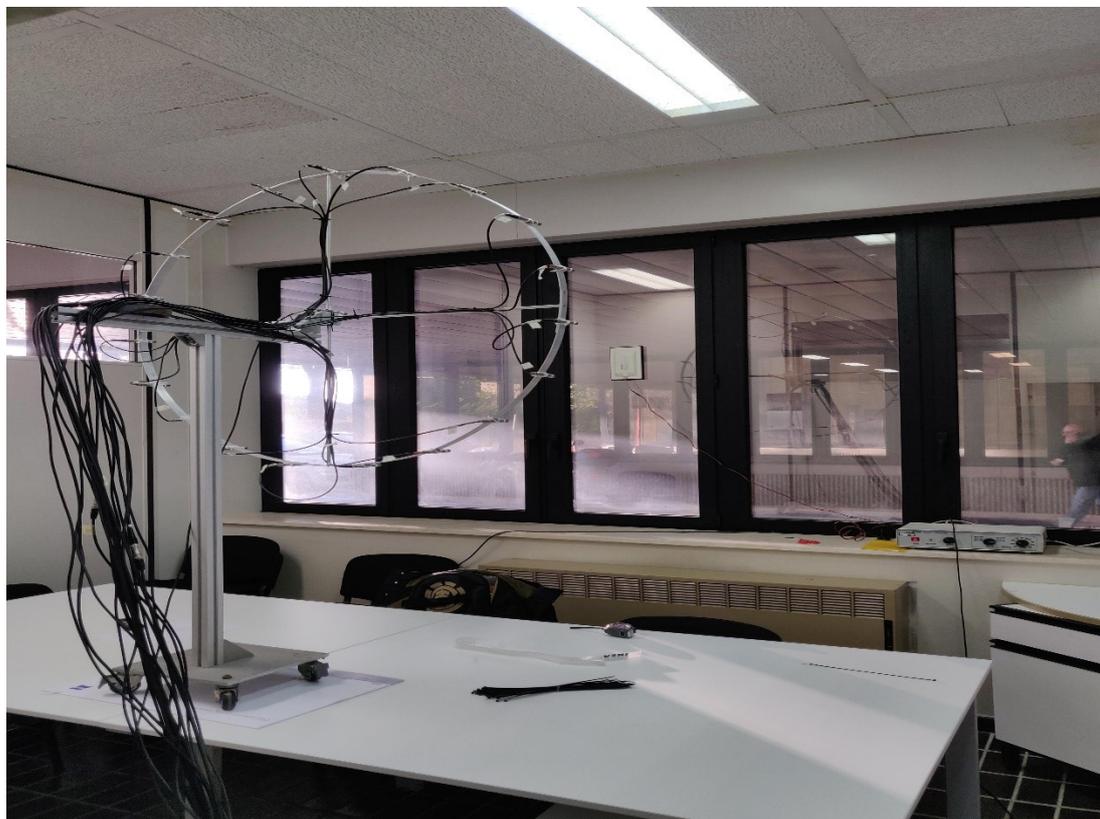


Figura 80, Array circolare realizzato per le prove in laboratorio

4.1.4 Microfoni a condensatore

I trasduttori scelti sono microfoni a condensatore “PCB Piezotronics” prepolarizzati da mezzo pollice; questi microfoni offrono un'elevata precisione e misurazioni acustiche affidabili e sono tipicamente utilizzati in applicazioni di ricerca e per test in laboratorio.



Figura 81, Microfono PCB Piezotronics

Seguono le specifiche tecniche:

Model Number	ICP MICROPHONE	
378B02	ENGLISH	SI
Performance	1/2"	1/2"
Nominal Microphone Diameter	Free-Field	Free-Field
Frequency Response Characteristic(at 0° incidence)	50 mV/Pa	50 mV/Pa [3]
Sensitivity	-26 dB re 1 V/Pa	-26 dB re 1 V/Pa [3]
Sensitivity(± 1.5 dB)	3.75 to 20,000 Hz	3.75 to 20,000 Hz
Frequency Range(± 2 dB)	7 to 10,000 Hz	7 to 10,000 Hz
Frequency Range(± 1 dB)	1.0 to 3.0 Hz	1.0 to 3.0 Hz
Lower Limiting Frequency(-3 dB)	15.5 dB(A) re 20 µPa	15.5 dB(A) re 20 [2]
Inherent Noise	µPa	µPa
Dynamic Range(3% Distortion Limit)	137 dB re 20 µPa	137 dB re 20 µPa [2]
TEDS Compliant	Yes	Yes [4]

Figura 82, Specifiche tecniche dei microfoni utilizzati

4.1.5 Sorgente acustica

La sorgente ideale per il funzionamento dell'algoritmo di beamforming e quindi quella scelta per l'esperimento, è di tipo omnidirezionale. La sorgente selezionata è un piccolo altoparlante che è stato dapprima collegato all'amplificatore per poi fissarlo con delle fascette all'estremità di un cavalletto telescopico. Grazie a questo strumento è stato possibile posizionare la sorgente con buon grado di precisione nelle tre posizioni studiate, al centro, decentrata e al bordo.



Figura 83, Sorgente omnidirezionale



Figura 84, Sorgente in posizione centrale



Figura 85, Sorgente in posizione decentrata



Figura 86, Sorgente al bordo

4.1.6 Software SimCenter TestLab

Per l'acquisizione dei segnali registrati dai microfoni è stato utilizzato, come già accennato, il software SimCentre TestLab, nel quale sono stati settati i valori dei parametri necessari per la registrazione dei dati.

Di seguito vengono illustrati i parametri di acquisizione con cui sono state effettuate le prove.

Scope Settings

Bandwidth: 20480.00 Hz

Spectral Lines: 16384

Resolution: 1.2500000 Hz

Acquisition time: 0.8000000 s

View Settings

Function: Time Frequency Octave

Display Unit: Elec. Unit Eng. Unit

Global Format and Limits

Format: Linear dB Log

Display Limit: Free Optimized Range

Sources Control

	Source	On/Off	Signal Type	Level (V)	More
1	Output1	<input checked="" type="checkbox"/>	Sine	1.0000	More
2	Output2	<input type="checkbox"/>	Sine	0.0000	More

Advanced Parameters

Acquisition Parameters | Acquisition Control | Averaging Parameters | Conditioning

Averaging

Number of averages: 30

Average type: Linear average

Exponential parameter: 50 %

Peak hold ref. channel: Point20:None (Pressure - Reference)

Accept Strategy

Overload Handling

No action

Auto reject with overload

Stop with overload

Figura 87, Parametri di acquisizione delle prove sperimentali

Le schede di acquisizione necessitano di un computer che registri i dati immagazzinati, e di uno schermo attraverso il quale sia possibile interfacciare col sistema. Per questo i canali di acquisizione sono stati gestiti dal software SimCenter TestLab, che restituisce in uscita i file relativi al campionamento del campo acustico da parte di ogni microfono.

Channel Setup														Save as Reference	Load Channel Setup...	Show On/Off	Show On
Status: Verification OK																	
PhysicalChannelID	On/Off	Reference	User channelID	ChannelGroupID	Point	Direction	Input mode	Coupling	Measured Quantity	Electrical Unit	Actual sensitivity	Transducer Type	Transducer Manic.	Serial number	Range		
1	Tacho1	<input type="checkbox"/>		Tacho	Tacho1	None	Voltage DC	Single Ended							24	V	
2	Input1	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point1	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	47.963555	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140349	0.158 $\frac{mV}{Pa}$	V
3	Input2	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point2	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	44.857028	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140419	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
4	Input3	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point3	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	49.208515	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140353	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
5	Input4	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point4	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	51.514782	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140101	0.158 $\frac{mV}{Pa}$	V
6	Input5	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point5	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	53.627906	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140102	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
7	Input6	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point6	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	49.710447	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140100	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
8	Input7	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point7	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	55.447575	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140107	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
9	Input8	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point8	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	49.977341	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140111	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
10	Input9	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point9	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	53.794955	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140108	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
11	Input10	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point10	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	47.582202	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140110	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
12	Input11	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point11	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	52.016029	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140104	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
13	Input12	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point12	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	52.920169	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140105	0.158 $\frac{mV}{Pa}$	V
14	Input13	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point13	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	51.145559	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140103	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
15	Input14	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point14	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	49.706147	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140351	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
16	Input15	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point15	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	52.429663	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140420	0.158 $\frac{mV}{Pa}$	V
17	Input16	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point16	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	46.923462	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140350	0.158 $\frac{mV}{Pa}$	V
18	Input17	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point17	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	39.375482	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140421	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
19	Input18	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point18	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	46.088561	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140109	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V
20	Input19	<input checked="" type="checkbox"/>		Acoustic	Point19	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	50.683903	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140106	0.158 $\frac{mV}{Pa}$	V
21	Input20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Acoustic	Point20	None	ICP	Single Ended	Pressure	mV	47.095096	mV/Pa	37882	PCB Piezotronics...	140352	0.079 $\frac{mV}{Pa}$	V

Figura 88, Setup dei microfoni sul software SimCenter TestLab

Attraverso il software è possibile inoltre trasmettere un segnale elettrico all'amplificatore (quindi alla sorgente), e di scegliere il tipo di segnale acustico da far emettere alla sorgente e a quale frequenza. Coerentemente al caso di studio come dati di input sono stati inseriti i quattro livelli di frequenza analizzati in fase di simulazione: 500, 1000, 2000 e 4000Hz con un segnale di tipo sinusoidale di ampiezza pari a 1 V, come illustrato in figura 89.

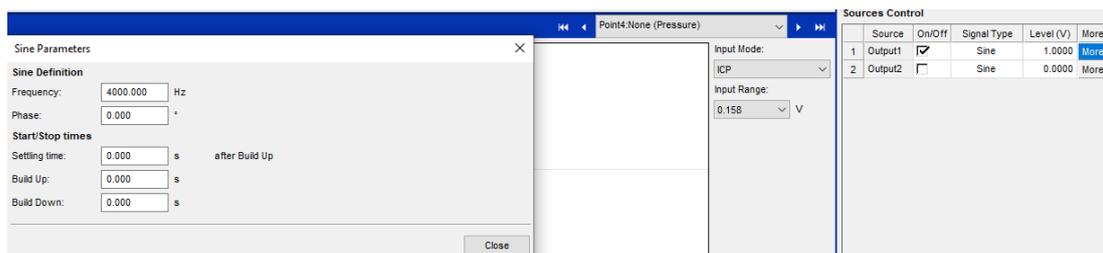


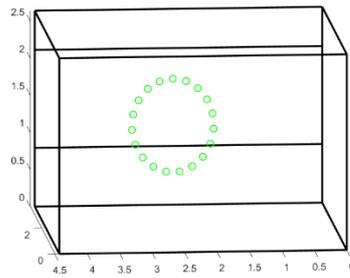
Figura 89, Generazione di onde sinusoidali sul software SimCenter TestLab

Dopo aver acquisito e salvato le storie temporali di ogni microfono per ognuna delle prove effettuate, questi sono pronti per essere inseriti in un codice Matlab di simulazione BF, che restituisce le mappe delle pressioni acustiche rilevate sul piano della parete finestrata per ogni configurazione studiata.

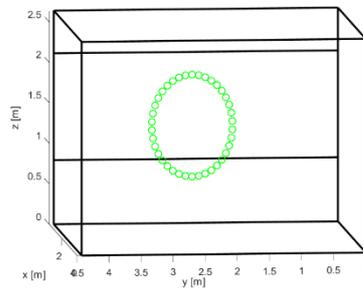
4.2 Prove sperimentali

Una volta allestito il setup di misura, il passo successivo è stato quello di compiere i test sperimentali, replicando le configurazioni realizzate nell'ambiente di simulazione, ovvero:

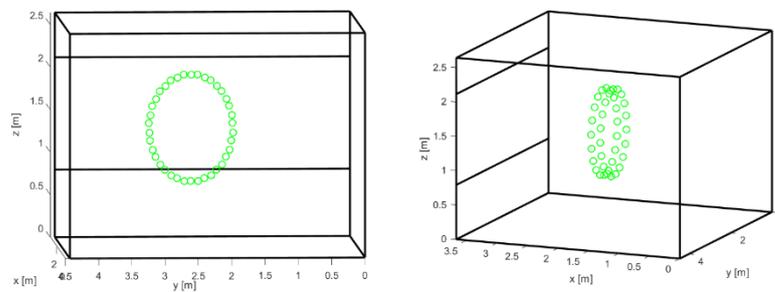
- *Configurazione 1*, Array planare circolare da 19 microfoni



- *Configurazione 2*, Array planare circolare ruotato da 38 microfoni



- *Configurazione 3*, Array planare circolare rototraslato da 38 microfoni



Le prove sono state eseguite su quattro livelli di frequenza (500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz), per le tre posizioni della sorgente (centrale, decentrata e al bordo) e per tre posizioni dell'array circolare, che per comodità vengono definite come posizione 1, 2 e 3:

- *Posizione 1*, array circolare planare parallelo alla facciata finestrata.
- *Posizione 2*, ottenuta ruotando la posizione 1 di un angolo pari alla metà del passo angolare con il quale sono distribuiti i microfoni lungo l'array. La rotazione avviene in senso orario posizionandosi spalle alla parete finestrata, ed è stata realizzata per mezzo di un filo a piombo.
- *Posizione 3*, ottenuta traslando rigidamente di 15 cm in direzione della sorgente la posizione 2. Tale traslazione è stata realizzata facendo passare il supporto mobile dell'array lungo una guida posta sul tavolo perpendicolarmente alla parete finestrata.

Si elencano di seguito le prove effettuate:

Posizione 1, sorgente centrale

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 2, sorgente centrale

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 3, sorgente centrale

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 1, sorgente decentrata

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 2, sorgente decentrata

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 3, sorgente decentrata

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 1, sorgente al bordo

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 2, sorgente al bordo

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Posizione 3, sorgente al bordo

- Misurazione a 500Hz
- Misurazione a 1000Hz
- Misurazione a 2000Hz
- Misurazione a 4000Hz

Per ognuno di questi 36 test sono state acquisite e memorizzate le storie temporali di ogni microfono per mezzo del software precedentemente descritto, che sono state poi date in pasto ad un algoritmo di calcolo del BF implementato in Matlab. Quest'ultimo è del tutto analogo a quello visto in campo di simulazione nel paragrafo 3.3, con la sola ma determinante eccezione che in simulazione i segnali registrati dai microfoni erano generati virtualmente, mentre in questo caso sono frutto di test di laboratorio. È importante precisare inoltre che per poter realizzare in campo pratico le configurazioni 2 e 3 occorrerebbero 38 microfoni, ma in laboratorio ne erano disponibili solo 20.

L'algoritmo in questione fornisce la soluzione a questo problema permettendo di concatenare i dati temporali dei microfoni nelle tre posizioni dell'array con le quali sono stati svolti i test, in modo da ottenere idealmente:

- un array planare circolare da 38 microfoni generato dalla rotazione di un array da 19 microfoni, combinando le posizioni 1 e 2.
- un array volumetrico circolare da 38 microfoni generato dalla rototraslazione di un array da 19 microfoni, combinando le posizioni 1 e 3.

Nel momento in cui vado a spostare l'array da una certa posizione, cambia anche la posizione reciproca array-sorgente. Grazie al microfono di riferimento che resta fisso tra una misura e l'altra viene garantita la stazionarietà del campo acustico, condizione per la quale abbiamo la possibilità di concatenare i risultati di due diversi test.

Tale algoritmo infine restituisce, con la stessa logica descritta nel paragrafo 3.3, la mappa delle pressioni acustiche rilevate sul piano della parete finestrata per ogni configurazione studiata.

4.3 Mappature acustiche ottenute dalle prove sperimentali

In questo paragrafo verranno illustrati gli output ottenuti dall'algorithmo che plotta le mappe acustiche rilevate sulla parete finestrata, sulla base dei dati temporali raccolti dai microfoni in fase sperimentale nelle tre posizioni precedentemente descritte.

Array planare circolare, 19 microfoni, sorgente centrale

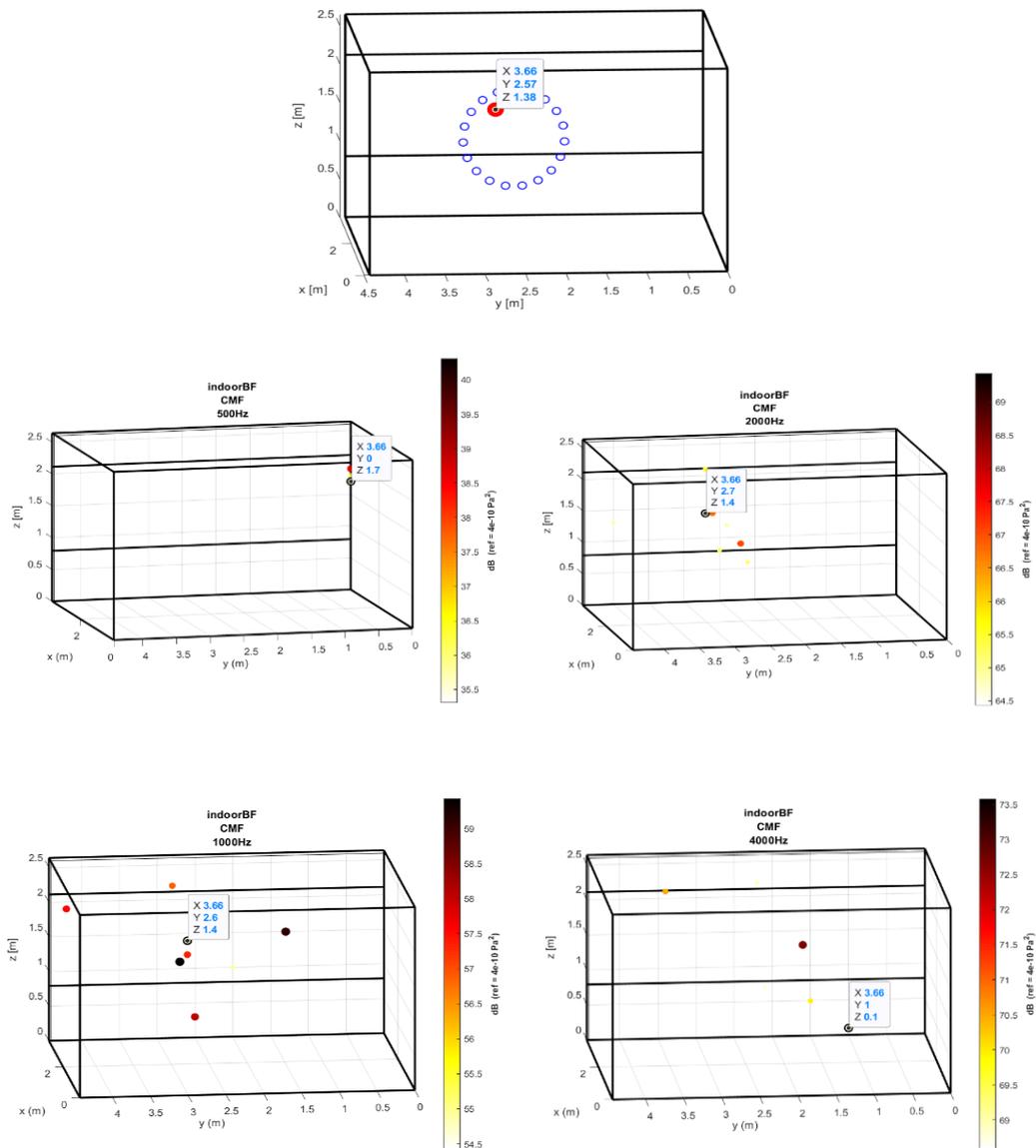


Figura 90, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente centrale da un array circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare, 19 microfoni, sorgente decentrata

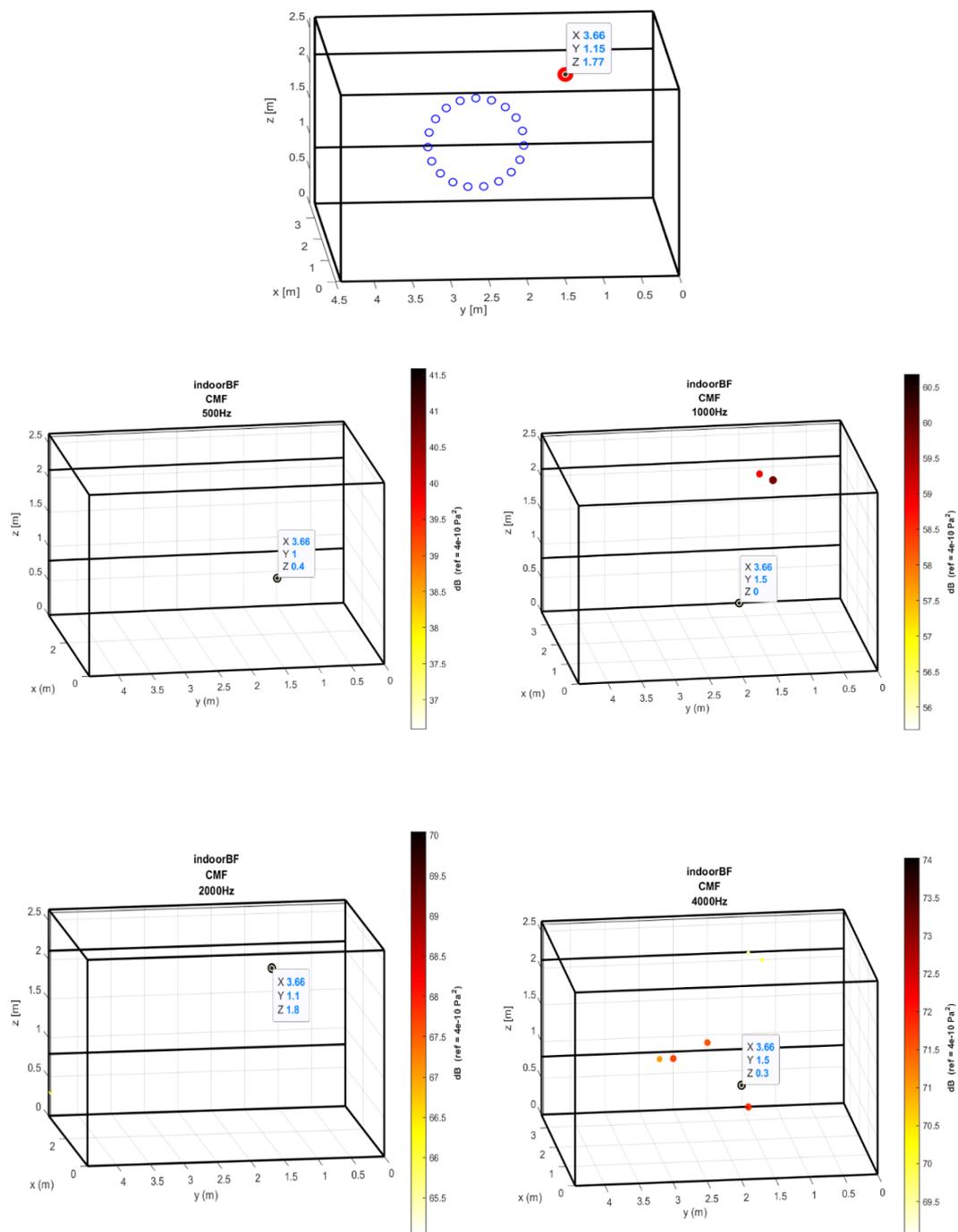


Figura 91, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente decentrata da un array circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare, 19 microfoni, sorgente al bordo

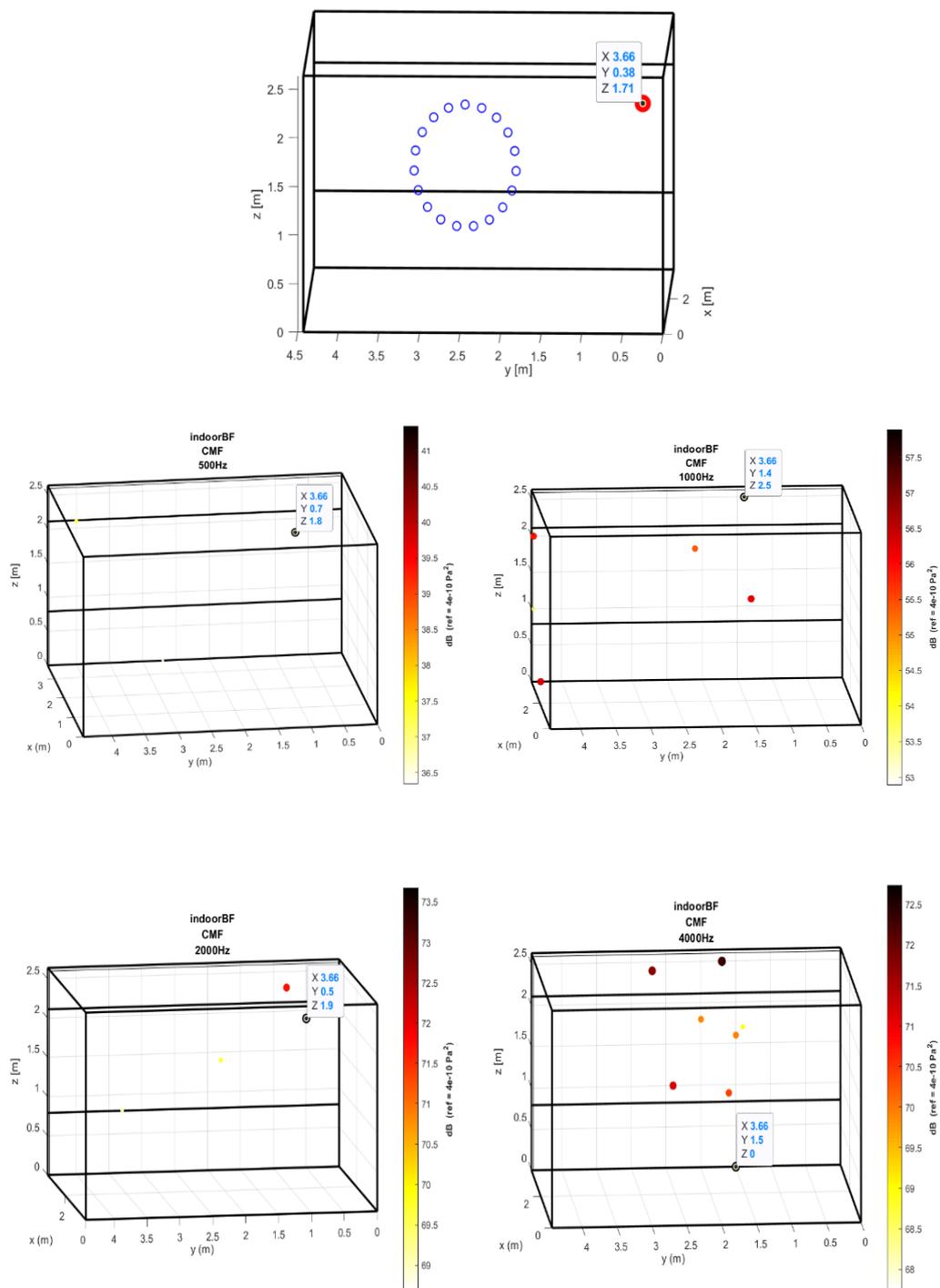


Figura 92, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente al bordo da un array circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare ruotato, 38 microfoni, sorgente centrale

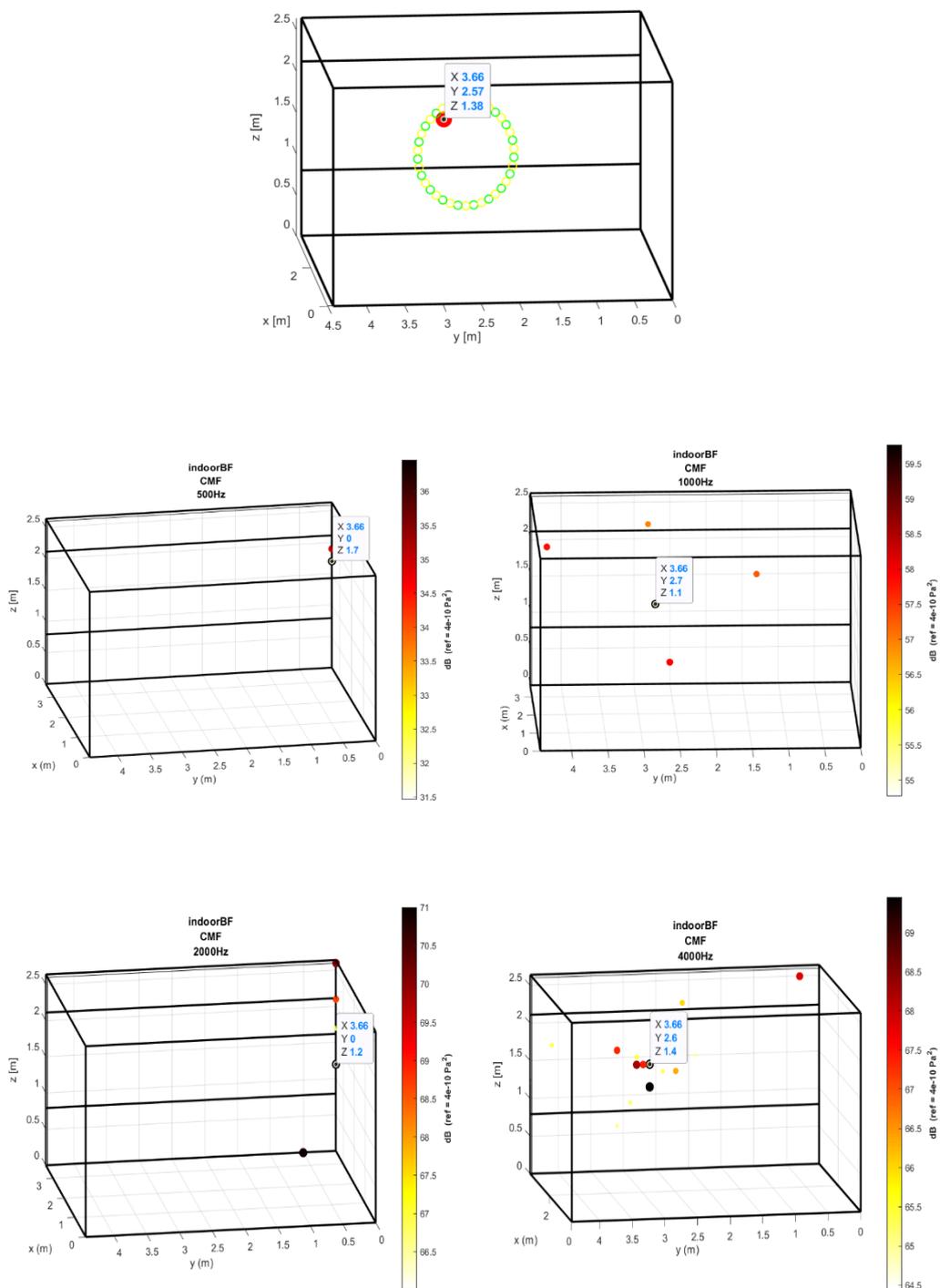


Figura 93, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente centrale da un array circolare ruotata da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare ruotato, 38 microfoni, sorgente decentrata

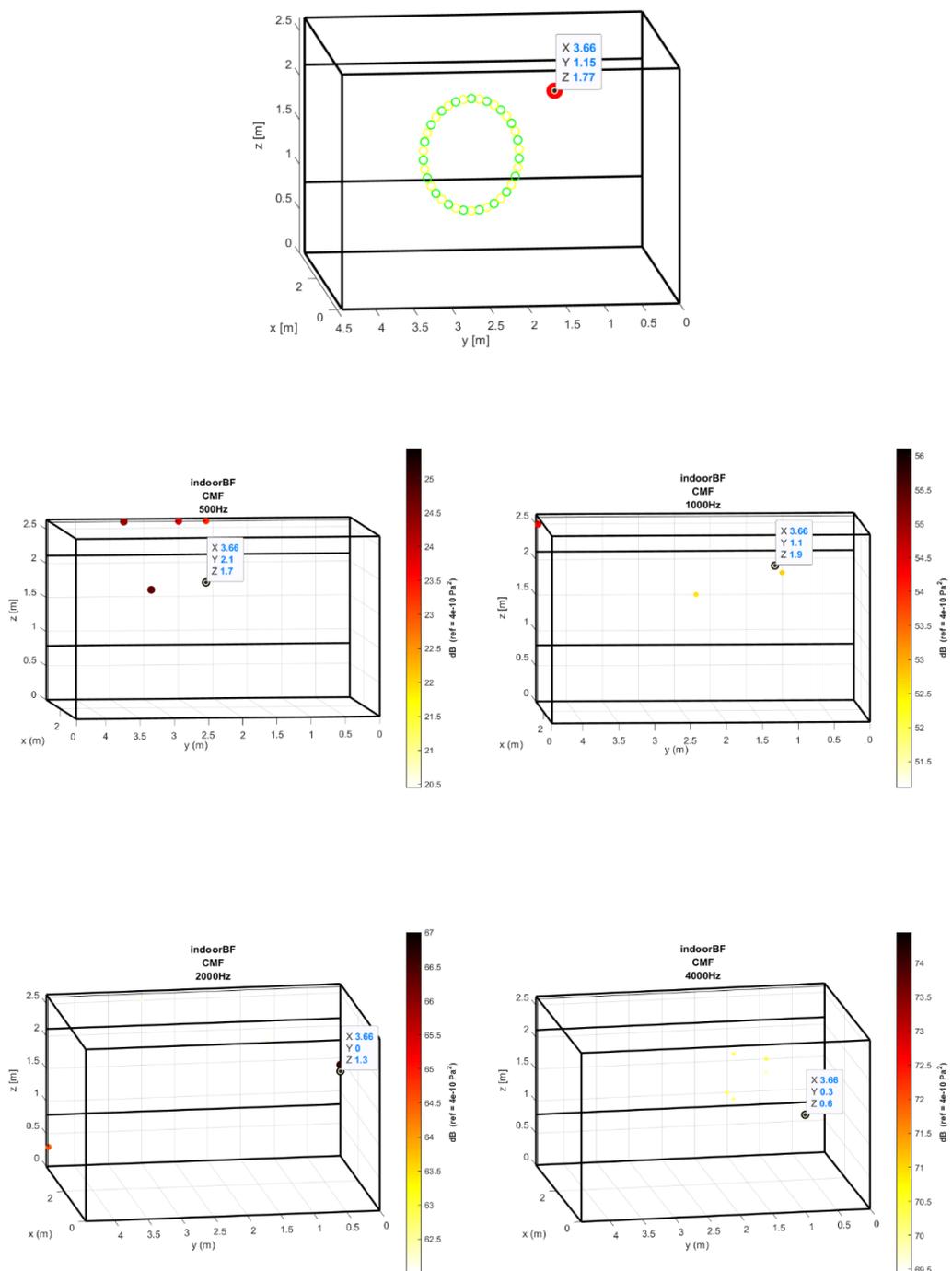


Figura 94, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente decentrata da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare ruotato, 38 microfoni, sorgente al bordo

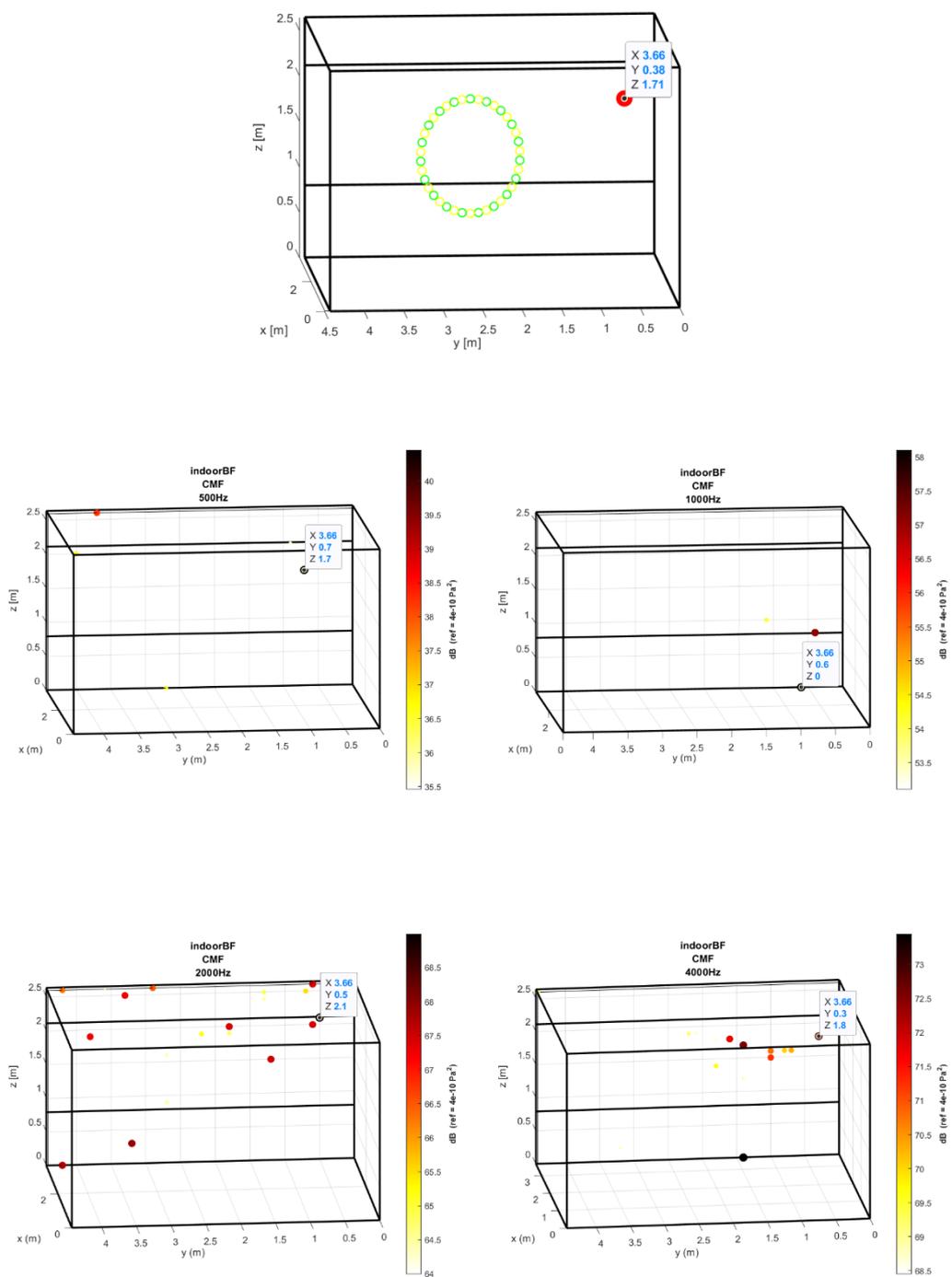


Figura 95, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente al bordo da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare rototraslato, 38 microfoni, sorgente centrale

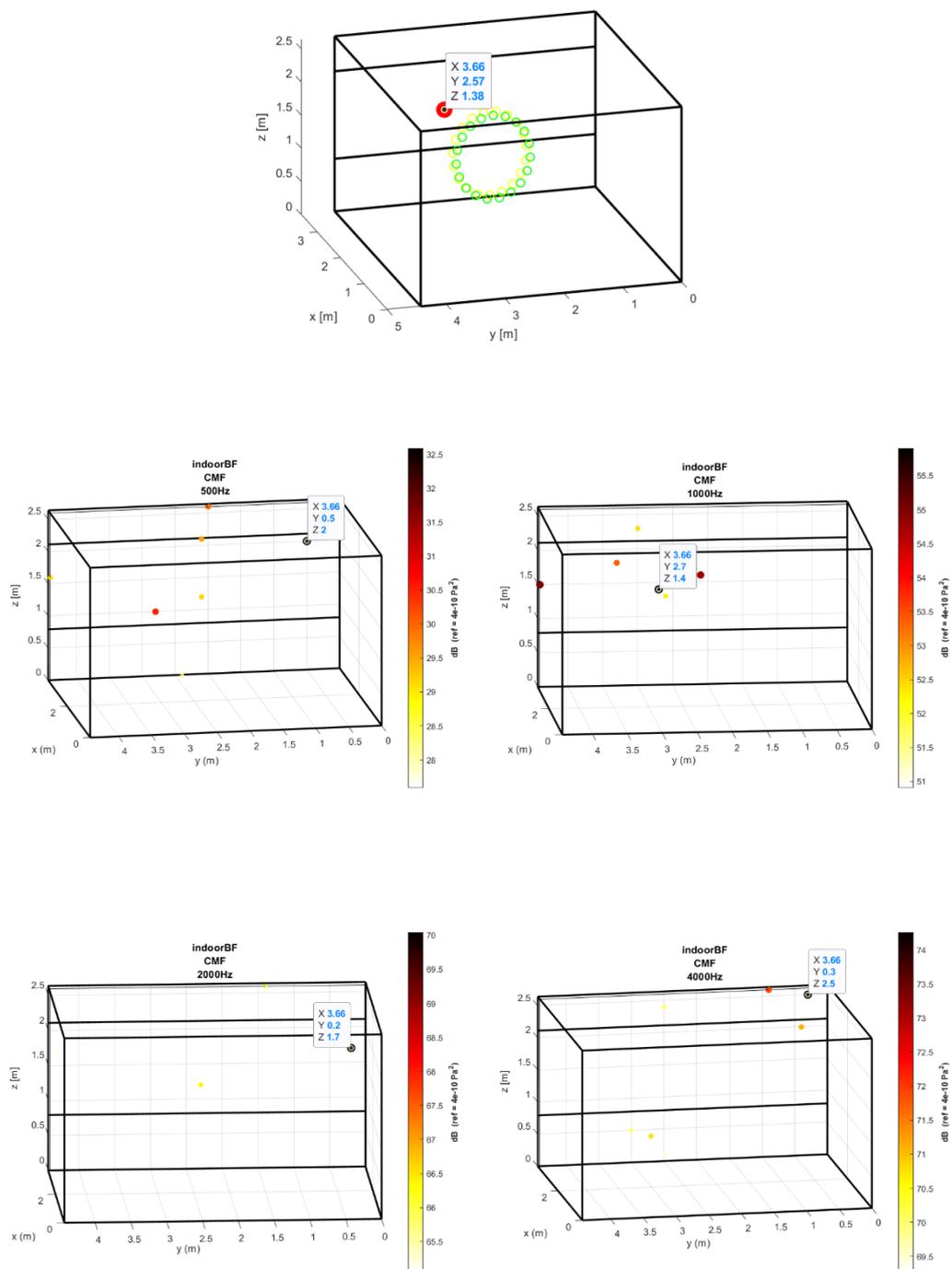


Figura 96, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente centrale da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare rototraslato, 38 microfoni, sorgente decentrata

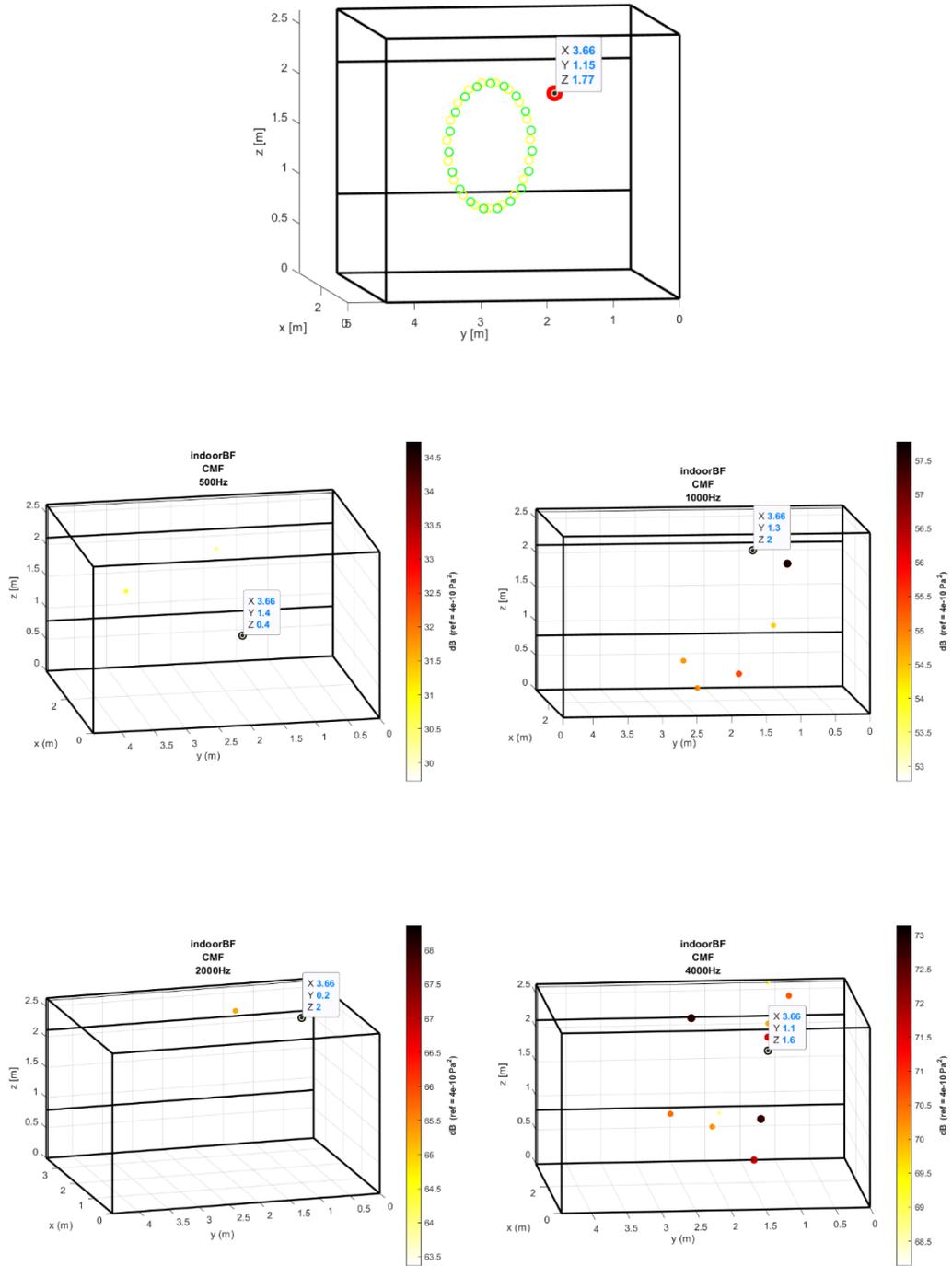


Figura 97, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente decentrata da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

Array planare circolare rototraslato, 38 microfoni, sorgente al bordo

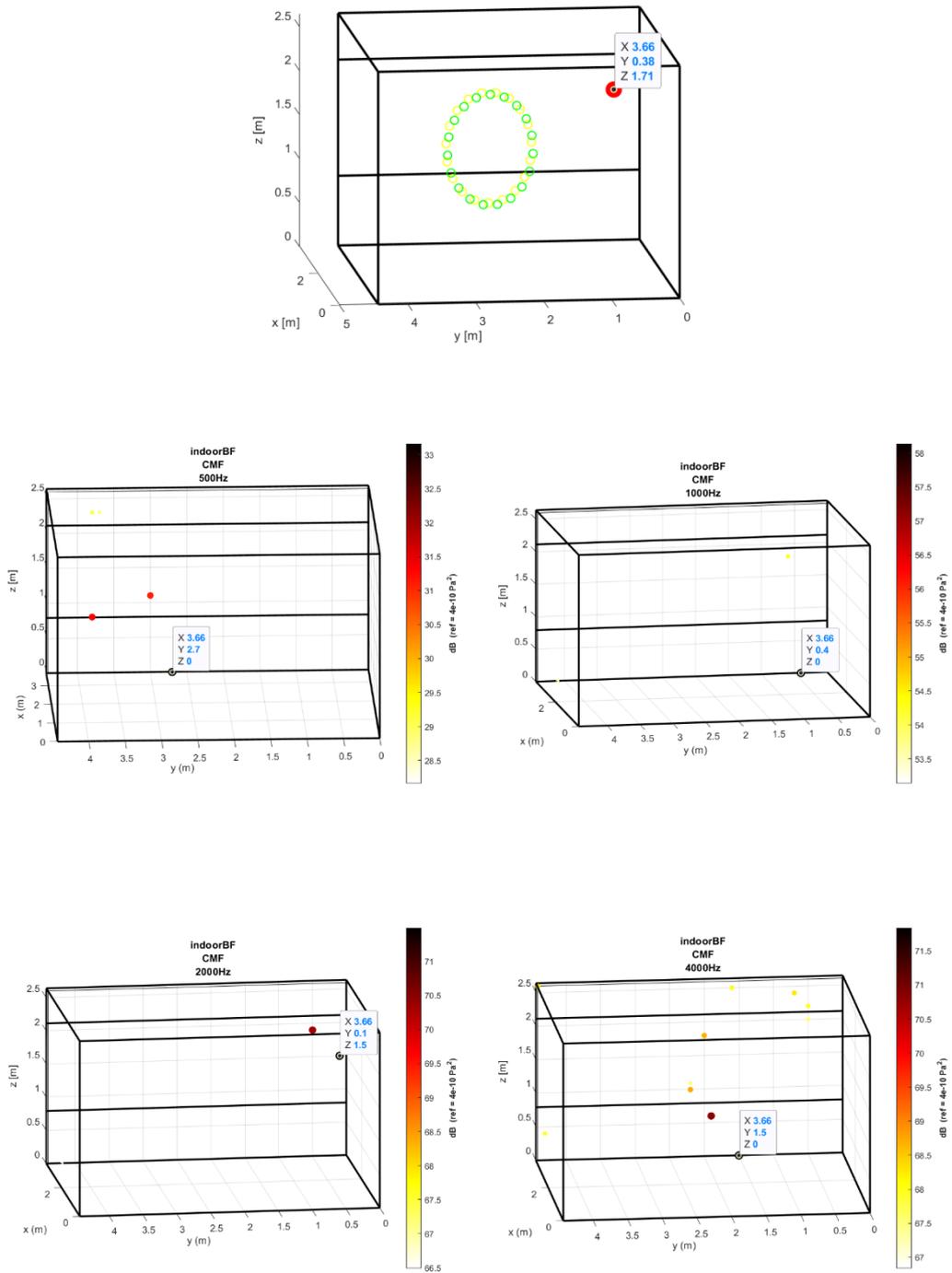


Figura 98, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente al bordo da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz

4.4 Confronto ed elaborazione dei risultati sperimentali

I risultati ottenuti dai test sperimentali sono stati confrontati utilizzando come nel caso simulato una serie di rappresentazioni grafiche in modo da comprendere, in funzione delle diverse variabili in gioco, il comportamento di ogni configurazione studiata. Ciò ha permesso una valutazione immediata dell'efficienza dell'algoritmo di calcolo, e di verificare se l'array circolare è effettivamente una geometria in grado di individuare con discreta precisione la sorgente come ha dimostrato di essere in simulazione.

Il processo di rielaborazione dei dati segue lo stesso filo logico adottato in simulazione. È stata come prima cosa valutata la distanza spaziale tra la posizione effettiva della sorgente e la posizione del picco di pressione acustica rilevato dall'algoritmo.

I valori delle distanze ottenute sono stati riorganizzati in dei diagrammi a barre, e per avere una visione complessiva della situazione sono stati graficati in funzione:

- Della tipologia di array e numero di microfoni
- Della posizione della sorgente
- Dei livelli di frequenza

La ripartizione realizzata offre una panoramica chiara dell'influenza che hanno questi fattori sulla capacità dell'array di rintracciare la sorgente.

4.4.1 Influenza del numero di microfoni

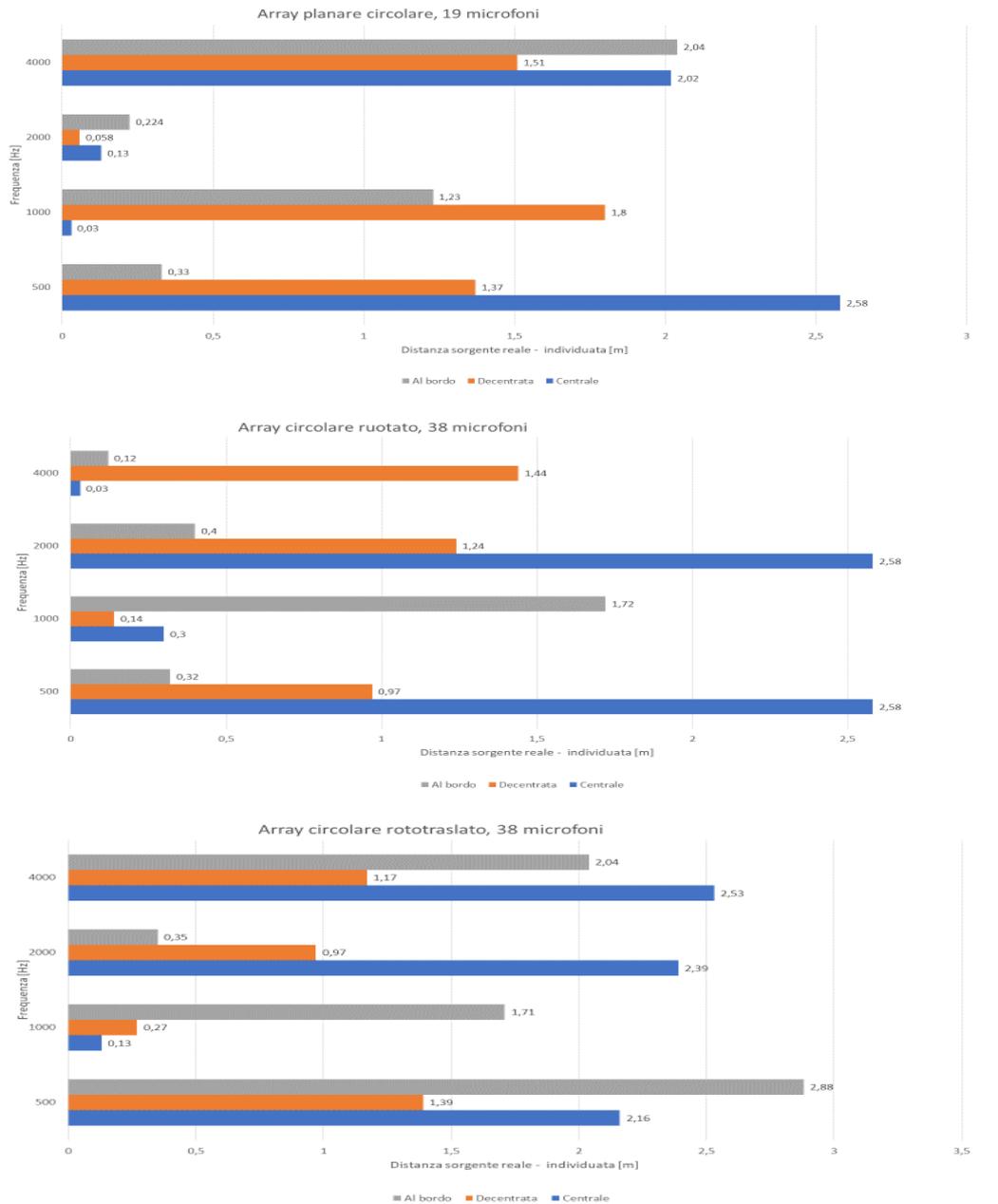


Figura 99, Influenza della tipologia di array e del numero di microfoni nei test sperimentali

Da questi grafici si denota in linea di massima una forte difficoltà da parte dell'algoritmo di calcolo di rilevare correttamente la posizione della sorgente. Questo accade sia alle alte che alle basse frequenze, eccetto per qualche caso isolato. D'altro canto, si nota anche una discreta capacità di tracciare la sorgente per valori di frequenza

di 1 kHz da parte dell'array circolare rototraslato. Indipendentemente dal livello di frequenza invece risulta complicato il tracciamento della sorgente al bordo della parete finestrata.

4.4.2 Influenza della posizione della sorgente

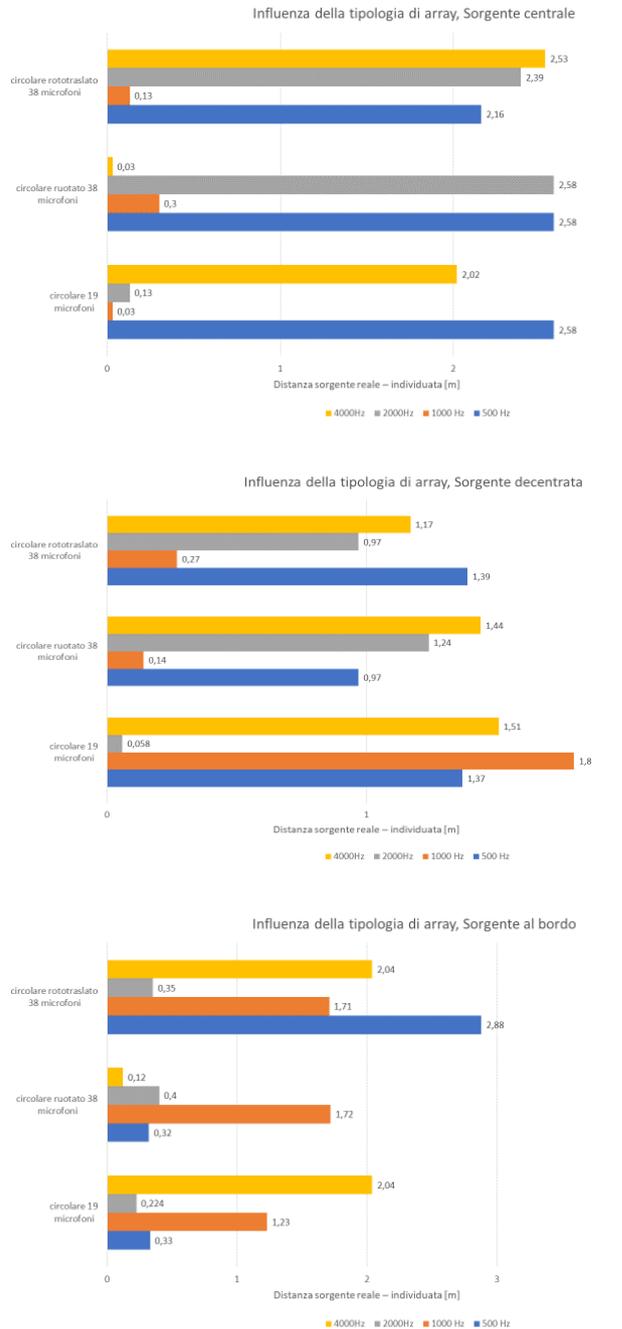


Figura 100, Influenza della posizione della sorgente nei test sperimentali

I grafici illustrati confermano che con queste configurazioni risulta complicato il tracciamento della sorgente, specialmente quando questa si allontana dalla posizione centrale.

4.4.3 Influenza della frequenza

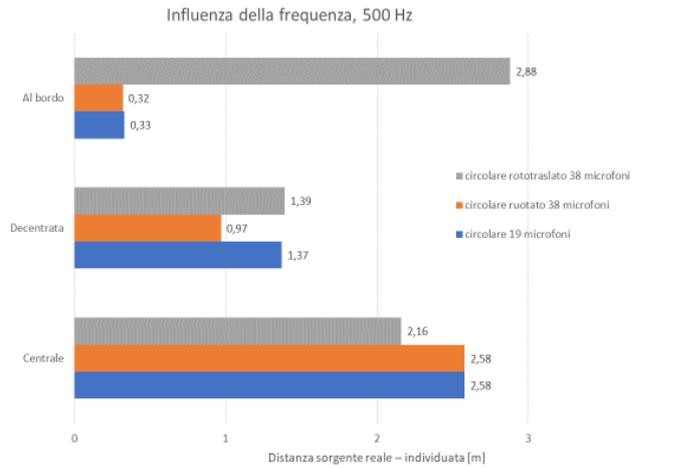


Figura 101, Influenza della frequenza del segnale acustico, 500 Hz

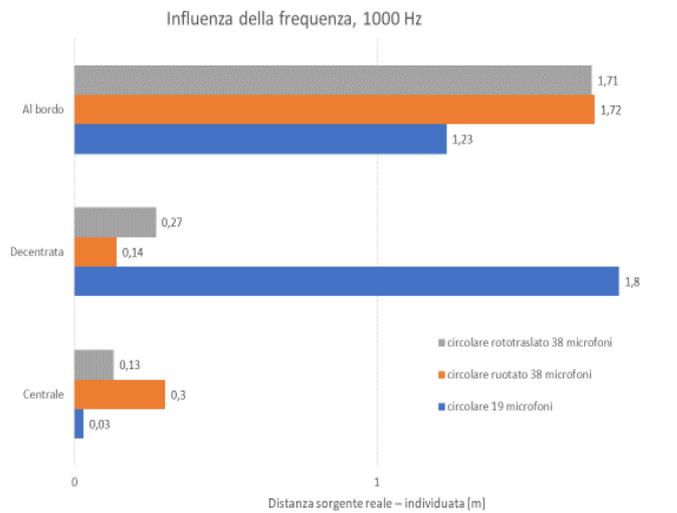


Figura 102, Influenza della frequenza del segnale acustico, 1000 Hz

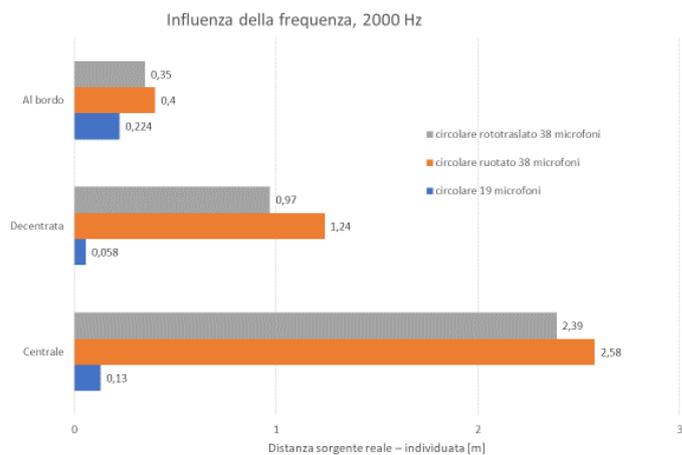


Figura 103, Influenza della frequenza del segnale acustico, 2000 Hz

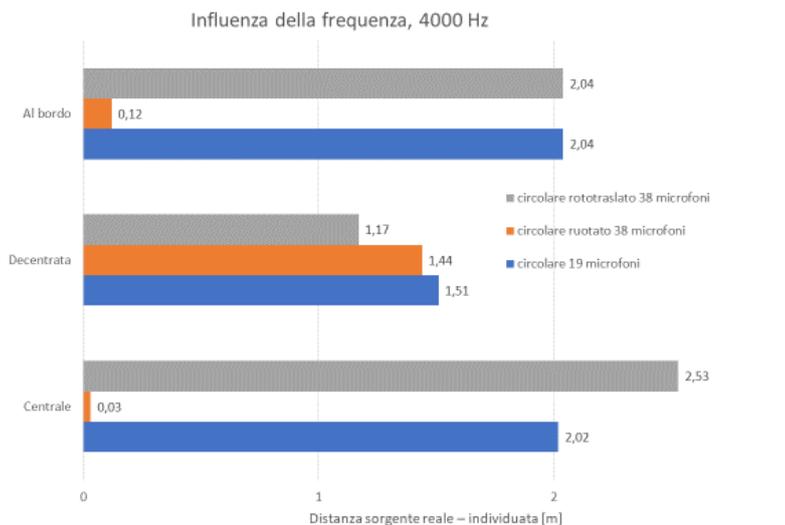


Figura 104, Influenza della frequenza del segnale acustico, 3000 Hz

Dal diagramma in figura 102 spicca una buona attitudine da parte di tutte le tipologie di array al tracciamento della sorgente nella posizione centrale quando essa emette un segnale a una frequenza di 1 kHz..

Per valori di frequenza diversi da 1 kHz in linea generale la sorgente non viene localizzata correttamente, eccetto in qualche caso aleatorio.

Per quanto riguarda la sorgente al bordo, il picco di pressione acustica viene rilevato nei pressi della sorgente per il valore 2 kHz, con errori di rilevamento massimo che

raggiungono i 40 cm, non abbastanza preciso da considerare l'array idoneo per la valutazione di questo tipo di posizionamento della sorgente.

Per i restanti valori di frequenza lo strumento di localizzazione non risulta efficace, in quanto vengono rilevate distanze sorgente effettiva – picco massimo rilevato anche di 3 m.

4.5 Analisi dei risultati sperimentali

Dall'analisi dei risultati spicca a primo impatto una netta discrepanza in termini di rilevamento della sorgente tra le mappe acustiche ottenute coi dati di simulazione e quelle ottenute coi dati di laboratorio. Era plausibile ottenere questo tipo di risultati, alla luce delle radicali semplificazioni che sono state fatte in fase di simulazione elencate all'inizio di questo capitolo, che rendono a tutti gli effetti l'ambiente reale e simulato fortemente diversi dal punto di vista del comportamento acustico.

D'altro canto, ci sono degli aspetti positivi che è giusto evidenziare:

- Per posizioni centrali della sorgente l'algoritmo di calcolo lavora meglio rispetto alle altre posizioni. Questo è certamente dovuto a complessità strutturali della sala riunioni non considerate in fase di simulazione. Un esempio pratico è dato dalla sorgente “border”. Essa è posizionata nella stanza in una cavità che non viene rappresentata nei dati geometrici di simulazione. La sorgente si affaccia su una parete rigida in calcestruzzo, e si verificano una serie di fenomeni acustici complessi che non sono facilmente riproducibili in simulazione. Viceversa, si può immaginare di ottenere dei risultati sufficientemente accettabili con la sorgente centrale, di fronte alla quale non sono presenti ostacoli, ed effettivamente è stato così.
- Le configurazioni di array studiate in laboratorio producono risultati soddisfacenti quando la sorgente è posizionata in una zona centrale della parete finestrata ed emette un suono a 1 kHz. Probabilmente la sorgente viene localizzata bene a tale frequenza per una questione di caratteristiche dell'array, che non riesce a gestire situazioni differenti in termini di frequenza e posizione della sorgente.

- È stata data quindi una condizione di funzionamento a questo array: esso funziona abbastanza bene quando la sorgente è nella posizione centrale ed emette un suono puro a 1 kHz. È importante capire per i diversi test che sono stati svolti con le diverse configurazioni dell'array reale come poter sfruttare questo array, e questo in corrispondenza di sorgenti centrali a 1 kHz è performante in termini di localizzazione, e questo è già un buon risultato.

Una verifica interessante che può esser fatta è quella relativa al confronto tra le mappe ottenute con la condizione di funzionamento ottimale emersa in fase sperimentale (sorgente centrale a 1 kHz), e la corrispettiva configurazione ottenuta in simulazione. In figura 105 vengono graficate le distanze calcolate tra la posizione della sorgente effettiva e quella del picco massimo di pressione acustica, in riferimento alle mappe acustiche ottenute con le tre configurazioni nel paragrafo 4.3. Questo ci dà modo di capire quanto si discosti il caso reale da quello virtuale.

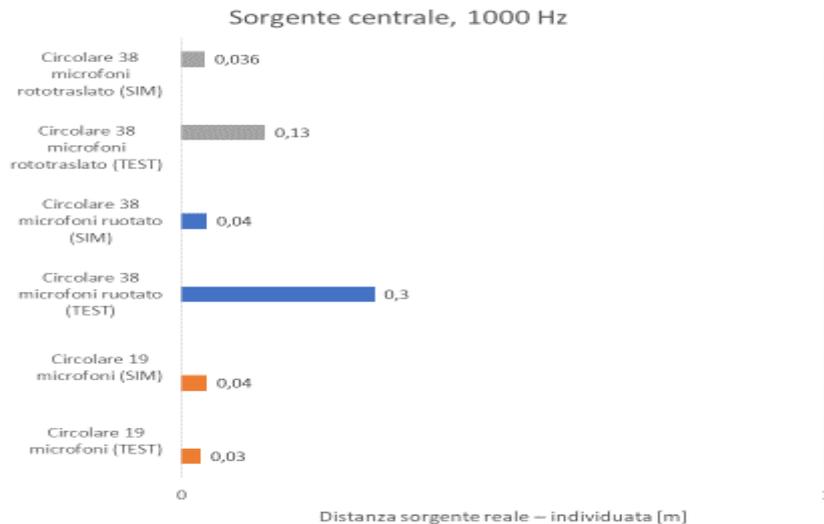


Figura 105, Confronto tra caso simulato e reale dei risultati ottenuti con l'array circolare, con sorgente centrale che emette un segnale a 1000 Hz

Si nota come:

- Per l'array da 19 microfoni i risultati sono praticamente sovrapponibili. Va però precisato che il picco di pressione che è stato considerato per il calcolo della distanza con la posizione della sorgente effettiva non è l'unico individuato, come si nota in figura 106.

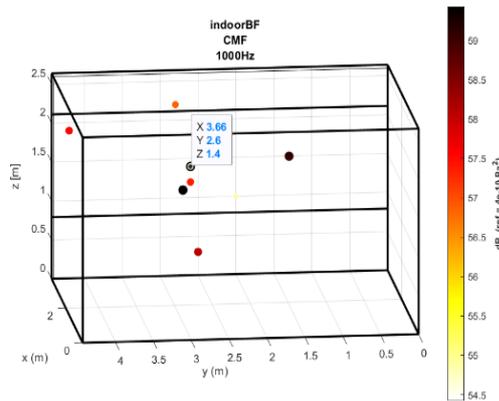


Figura 106, Mappa acustica, array circolare 19 microfoni, sorgente centrale a 1000 Hz

Infatti, quando sono stati marcati i picchi di pressione sono stati scelti quelli che più verosimilmente rispecchiavano la sorgente. Ma in realtà ne sono presenti altri nella mappa acustica, tale configurazione non individua in maniera univoca la sorgente.

- Per quanto riguarda l'array circolare ruotato i risultati discostano di circa 25 cm, nonostante l'algoritmo identifichi univocamente un picco di pressione nei pressi della sorgente centrale.

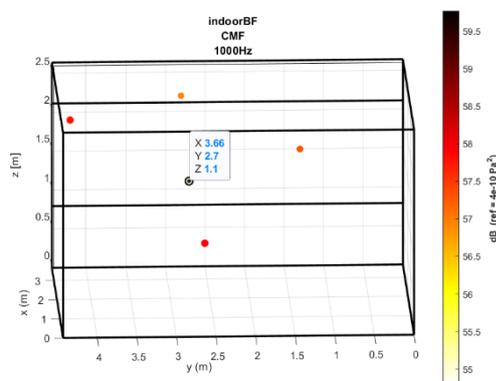


Figura 107, Mappa acustica, array circolare ruotato da 38 microfoni, sorgente centrale a 1000 Hz

- Il risultato migliore sembra essere quello ottenuto con l'array circolare rototraslato, sia in termini di precisione (i dati simulati e reali differiscono di soli 10 cm circa), sia in termini di pressioni rilevate. Il picco di pressione rilevato, contraddistinto dal colore nero nel codice cromatico della legenda, è unico, sono presenti altre sporadiche rilevazioni di pressione, ma modeste. Tutto ciò dimostra come sia evidentemente la configurazione “array circolare rototraslato” il set up che genera risultati che più si avvicinano al caso simulato. I migliori risultati sono probabilmente dovuti al fatto che un array con disposizione volumetrica di microfoni permette una risoluzione in ogni direzione dello spazio in cui è immerso.

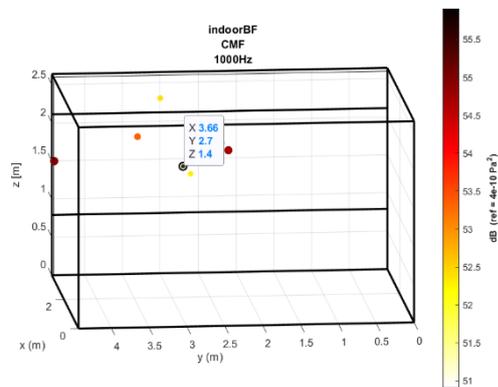


Figura 108, Mappa acustica, array circolare rototraslato da 38 microfoni, sorgente centrale a 1000 Hz

Limiti del setup di misura utilizzato

La tecnica di tracciamento impiegata in questo lavoro di tesi presenta tuttavia dei limiti fisici intrinseci che non è possibile eliminare completamente, in quanto altrimenti bisognerebbe adottare altri algoritmi di natura diversa. Al fine di ottenere una visione complessiva dei risultati ottenuti vengono qui indicati i principali limiti e cause di incertezza relative al setup di misura realizzato nella sala riunioni, che probabilmente hanno fatto sì che l'array, per determinate condizioni, non riuscisse a localizzare la sorgente.

- Il fatto che i risultati non siano convincenti per basse frequenze indipendentemente dalle variabili in gioco fa presupporre che il processo di rilevamento sia influenzato dai modi della stanza, ossia frequenze che interferiscono con il processo di misurazione alterando il normale percorso di propagazione della sorgente verso i microfoni dell'array. I modi della stanza influiscono molto meno in alta frequenza, sono meno energetici rispetto a quanto lo sono in basso.
- Si è potuto constatare che con la configurazione circolare, ad alte frequenze (2000 e 4000 Hz) l'array non riesce a rintracciare la sorgente. Ciò è probabilmente dovuto alle dimensioni e al numero di microfoni dell'array, che sono troppo ridotte per quei livelli di frequenza.
- Ci sono degli aspetti legati alla fisica del problema che consentono di dire che tendenzialmente un array più grande consente di abbassare il limite inferiore di funzionamento dell'array, viceversa un aumento del numero di microfoni mi consente di innalzare il limite superiore di funzionamento dell'array.

L'ideale sarebbe un array esteso con tanti microfoni, il che si può dimostrare con la simulazione eseguita con l'array planare random, che presenta tanti microfoni sparsi su un piano esteso che infatti restituisce dei risultati molto buoni.

- Un altro aspetto da sottolineare è che nella sequenza delle due prove dove l'array è stato ruotato e poi traslato, probabilmente non è stata garantita la stazionarietà del campo acustico, che è un aspetto molto importante nel processo di unione tra due segnali temporali provenienti da misure non

simultanee. Di conseguenza bisognerà trovare nuove strategie di processamento e pretrattamento dei dati più complesse di quelle che sono state adottate per approcciare un problema di questo tipo. Tali strategie potrebbero consistere nell'adottare delle procedure di rifasamento dei segnali che ci consentano in qualche modo di simulare un'acquisizione simultanea dei due test. Cosa che non è stata fatta in questo caso, e con tutta probabilità la condizione di stazionarietà è venuta meno nella sequenza di acquisizioni. Pertanto, non può essere adottato questo semplice merge di dati. Occorre valutare quindi se con un rifasamento dei segnali è possibile migliorare il risultato del test, e non fosse sufficiente neanche questo allora bisognerebbe pensare una alternativa al tipo di test effettuato.

5 – CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La localizzazione di sorgenti sonore sulla facciata finestrata della sala riunioni del laboratorio di misure dell'UNIVPM è stata trattata impiegando la tecnica beamforming per mezzo di un array di microfoni. Il primo step è stato quello di simulare la geometria dell'ambiente studiato e dell'intero setup di misura, sfruttando algoritmi di calcolo implementati in Matlab atti alla realizzazione virtuale delle prove, eseguite con diverse disposizioni dei microfoni. I risultati prodotti dalle varie configurazioni studiate hanno evidenziato che l'array con il quale la localizzazione della sorgente avviene con maggior precisione è quello caratterizzato da una distribuzione random di microfoni su un piano parallelo alla superficie analizzata. Le mappe acustiche prodotte da questo tipo di array, ovvero gli output restituiti dall'algoritmo di calcolo del BF, sono state confrontate con quelle prodotte da un array planare con distribuzione uniforme circolare di 19 microfoni, l'unica tipologia di array disponibile in laboratorio nel periodo di tirocinio. Dal confronto è emersa una discrepanza tra le due famiglie di dati, ma non tale da non considerare l'array circolare valido per questo tipo di applicazione. Pertanto, si è proceduto con la realizzazione del setup di misura sul campo, eseguendo dei test sperimentali nei quali è stato campionato il campo acustico per mezzo dell'array circolare. Le prove sono state eseguite con tre diverse posizioni dell'array, tre diverse posizioni della sorgente e quattro diverse frequenze di emissione sonora. I tre diversi orientamenti dell'array sono stati poi combinati per mezzo dell'algoritmo utilizzato in modo tale da dar vita ad un array planare circolare da 38 microfoni generato dalla rotazione dell'array originario, e un array volumetrico circolare da 38 microfoni generato dalla rototraslazione dell'array originario. I risultati ottenuti in termini di mappatura delle pressioni acustiche rilevate hanno evidenziato delle importanti difformità rispetto al caso simulato. Questa diversa condotta è riconducibile alle radicali semplificazioni che caratterizzano l'ambiente

simulato: in simulazione ad esempio non sono stati considerati i rumori di fondo che caratterizzano la sala riunioni, inoltre quest'ultima è rappresentata nel software come un parallelepipedo, non considerando le complessità geometriche reali che la caratterizzano. Ciò ha determinato che la risposta impulsiva generata virtualmente su cui si basa l'intero algoritmo di calcolo del beamforming sia risultata diversa da quella che si sarebbe potuta valutare direttamente sul campo, perché frutto di una semplificazione.

È stato comunque possibile riuscire ad identificare una configurazione che genera dei risultati plausibili rispetto alla posizione vera della sorgente nonostante l'ambiente fosse molto particolare. I dati dimostrano che per posizioni centrali della sorgente l'array volumetrico circolare da 38 microfoni restituisce delle mappe acustiche che sono totalmente paragonabili ai risultati ottenuti con la stessa configurazione in ambiente simulato, quando la sorgente emette un segnale acustico alla frequenza di 1 kHz.

Allo stesso tempo l'algoritmo di calcolo del BF ha dimostrato di non lavorare correttamente quando la sorgente emette segnali acustici diversi da 1kHz. Per bassi livelli di frequenza l'errore di funzionamento è da attribuire all'influenza dei modi della stanza, frequenze in corrispondenza delle quali l'ambiente va in risonanza contribuendo ad alterare il normale percorso di propagazione della sorgente verso i microfoni dell'array. Per alti livelli di frequenza invece l'errore di rilevamento può essere dovuto alle dimensioni dell'array circolare, troppo ridotte per il rilevamento di sorgenti che emettono segnali a quei valori di frequenza.

Un altro aspetto di cui bisogna tener conto è che, nel processo di concatenazione dei file temporali utilizzato per generare idealmente l'array volumetrico da 38 microfoni e l'array planare da 38 microfoni come se fossero frutto della stessa misura, la stazionarietà del campo acustico tra un campionamento e l'altro potrebbe non essere stata garantita. Per poter affrontare un problema di questo tipo sarà necessario andare ad adottare delle strategie più complesse di processamento e pretrattamento dei dati rispetto a quelle che sono state utilizzate. Tali strategie potrebbero consistere nell'uso di procedure di rifasamento dei segnali che ci consentano in qualche modo di simulare un'acquisizione simultanea dei due test. Occorrerà valutare quindi se con un

rifasamento dei segnali sia possibile migliorare i risultati dei test, e se questo non sarà sufficiente allora bisognerà pensare ad una alternativa al tipo di test effettuato.

In definitiva, si può concludere col dire che sono state date delle condizioni di funzionamento al setup di misura analizzato, e questo può essere considerato indubbiamente un buon punto di partenza. Lo step successivo sarebbe stato quello di studiare il comportamento in campo pratico della configurazione che ha fornito migliori performance in ambiente simulato, ovvero l'array random planare, ma non c'è stato modo di realizzarlo per motivi di tempo e mancanza di materiale.

Sarà possibile in futuro sfruttare i dati ottenuti in questo lavoro di tesi per conseguire la realizzazione di nuove prove di laboratorio con l'array planare random. Il lavoro svolto può essere visto come il primo passo di un processo di ottimizzazione del setup di misura realizzato per la rilevazione di sorgenti acustiche in ambienti chiusi, e dal momento che i dati ottenuti per certe condizioni sono promettenti, si continuerà ad indagare seguendo questa strada, tenendo presenti i risultati e le criticità illustrate in questo elaborato.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

R. Zamponi, Development of acoustic beamforming techniques for accurate wind-tunnel tests [1]

T. Suzuki, L1 generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/incoherent distributed and multipole sources [2]

<https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.2936367> [3]

<http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense00/ficarelli125358/ficarelli125358.htm> [4]

<http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architettu/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/Materiali-/Problematiche-acustiche-riguardanti-.pdf> [5]

http://www.inquinamentoacustico.it/_download/Assorbimento%20acustico.pdf [6]

http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architettu/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/Master-in-/sale_c.pdf [7]

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1, Beamforming D&S.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2, Somma di segnali microfonici shiftati.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3, Esempio di diagramma polare.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4, Flow chart dell'algoritmo GIBF.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5, Codice Matlab - definizione della sorgente acustica.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6, Rappresentazione in frequenza del segnale generato.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7, Codice e rappresentazione geometrica dell'ambiente studiato.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8, Array planare random.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9, Array random volumetrico.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10, Array planare spirale.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11, Array planare circolare.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 12, Sorgente centrale.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 13, Sorgente decentrata.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 14, Sorgente al bordo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15, Codice Matlab per la generazione dell'ISM Setup.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16, Codice Matlab per la generazione di RIR.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 17, Codice Matlab per la generazione di AuData.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 18, Codice Matlab per la generazione della CSM.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 19, Codice Matlab per il plot di mappe acustiche.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 20, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 21, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 23, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>33</i>

<i>Figura 24, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz..</i>	<i>34</i>
<i>Figura 25, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 26, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array random volumetrico da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 27, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array random volumetrico da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz..</i>	<i>37</i>
<i>Figura 28, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array random volumetrico da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 29, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array random volumetrico da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 30, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array random volumetrico da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz..</i>	<i>40</i>
<i>Figura 31, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array random volumetrico da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 32, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare spirale da 21 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 33, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare spirale da 21 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare spirale da 21 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 35, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare spirale da 41 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 36, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare spirale da 41 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 37, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare spirale da 41 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 38, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array planare circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>49</i>
<i>Figura 39, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array planare circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>50</i>

<i>Figura 40, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array planare circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>51</i>
<i>Figura 41, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 42, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 43, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array circolare ruotato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 44, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente centrale da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>55</i>
<i>Figura 45, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente decentrata da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>56</i>
<i>Figura 46, Mappe acustiche rilevate in ambiente simulato per una sorgente al bordo da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>57</i>
<i>Figura 47, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random planare da 19 microfoni.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 48, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random planare da 38 microfoni.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 49, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random volumetrico da 19 microfoni</i>	<i>60</i>
<i>Figura 50, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array random volumetrico da 38 microfoni</i>	<i>60</i>
<i>Figura 51, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array spirale planare da 21 microfoni.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 52, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array spirale planare da 41 microfoni.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 53, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array circolare planare da 19 microfoni.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 54, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array circolare planare ruotato da 38 microfoni.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 55, Influenza della tipologia di array nella rilevazione della sorgente, array circolare planare rototraslato da 38 microfoni.....</i>	<i>62</i>

<i>Figura 56, Influenza della posizione della sorgente. array da 19/21 microfoni, sorgente centrale</i>	<i>63</i>
<i>Figura 57, Influenza della posizione della sorgente. array da 38/41 microfoni, sorgente centrale</i>	<i>63</i>
<i>Figura 58, Influenza della posizione della sorgente. array da 19/21 microfoni, sorgente decentrata.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 59, Influenza della posizione della sorgente. array da 38/41 microfoni, sorgente decentrata.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 60, Influenza della posizione della sorgente. array da 19/21 microfoni, sorgente al bordo.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 61, Influenza della posizione della sorgente. array da 38/41 microfoni, sorgente al bordo.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 62, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 500 Hz.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 63, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 500 Hz.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 64, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 1000 Hz.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 65, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 1000 Hz.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 66, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 2000 Hz.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 67, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 2000 Hz.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 68, Influenza della frequenza, array da 19/21 microfoni, 4000 Hz.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 69, Influenza della frequenza, array da 38/41 microfoni, 4000 Hz.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 70, Confronto tra array planare random e circolare da 19 per la sorgente centrale, alle varie frequenze.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 71, Confronto tra array planare random e circolare da 19 per la sorgente decentrata, alle varie frequenze.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 72, Confronto tra array planare random e circolare da 19 per la sorgente al bordo, alle varie frequenze.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 73, Confronto tra array planare random e circolare da 38 per la sorgente centrale, alle varie frequenze.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 74, Confronto tra array planare random e circolare da 38 per la sorgente decentrata, alle varie frequenze.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 75, Confronto tra array planare random e circolare da 38 per una sorgente al bordo, alle varie frequenze.....</i>	<i>73</i>

<i>Figura 76, Sala riunioni del laboratorio del dipartimento di misure dell'UNIVPM.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 77, Catena di misura dei test sperimentali</i>	<i>76</i>
<i>Figura 78, Sistema SCADAS Mobile</i>	<i>77</i>
<i>Figura 79, Amplificatore di potenza.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 80, Array circolare realizzato per le prove in laboratorio</i>	<i>79</i>
<i>Figura 81, Microfono PCB Piezotronics</i>	<i>80</i>
<i>Figura 82, Specifiche tecniche dei microfoni utilizzati</i>	<i>80</i>
<i>Figura 83, Sorgente omnidirezionale</i>	<i>81</i>
<i>Figura 84, Sorgente in posizione centrale</i>	<i>81</i>
<i>Figura 85, Sorgente in posizione decentrata.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 86, Sorgente al bordo.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 87, Parametri di acquisizione delle prove sperimentali</i>	<i>83</i>
<i>Figura 88, Setup dei microfoni sul software SimCenter TestLab.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 89, Generazione di onde sinusoidali sul software SimCenter TestLab</i>	<i>84</i>
<i>Figura 90, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente centrale da un array circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>89</i>
<i>Figura 91, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente decentrata da un array circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 92, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente al bordo da un array circolare da 19 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 93, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente centrale da un array circolare ruotata da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>92</i>
<i>Figura 94, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente decentrata da un array circolare ruotata da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 95, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente al bordo da un array circolare ruotata da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 96, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente centrale da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 97, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente decentrata da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>96</i>
<i>Figura 98, Mappe acustiche rilevate in ambiente reale per una sorgente al bordo da un array circolare rototraslato da 38 microfoni, alle frequenze 500, 1000, 2000 e 4000 Hz</i>	<i>97</i>

<i>Figura 99, Influenza della tipologia di array e del numero di microfoni nei test sperimentali</i>	99
<i>Figura 100, Influenza della posizione della sorgente nei test sperimentali</i>	100
<i>Figura 101, Influenza della frequenza del segnale acustico, 500 Hz</i>	101
<i>Figura 102, Influenza della frequenza del segnale acustico, 1000 Hz</i>	101
<i>Figura 103, Influenza della frequenza del segnale acustico, 2000 Hz</i>	102
<i>Figura 104, Influenza della frequenza del segnale acustico, 3000 Hz</i>	102
<i>Figura 105, Confronto tra caso simulato e reale dei risultati ottenuti con l'array</i>	104
<i>Figura 106, Mappa acustica, array circolare 19</i>	105
<i>Figura 107, Mappa acustica, array circolare ruotato</i>	105
<i>Figura 108, Mappa acustica, array circolare rototraslato</i>	106