



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria dell'informazione

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

**DETERMINAZIONE DELLA POTENZA IRRADIATA DA CUFFIE BLUETOOTH  
IN CAMERA RIVERBERANTE**

**DETERMINATION OF THE RADIATED POWER OF BLUETOOTH  
HEADPHONES IN A REVERBERATION CHAMBER**

Relatore:

**prof. VALTER MARIANI PRIMIANI**

Correlatori:

**prof. FRANCO MOGLIE**

**dr. Ing. ALFREDO DE LEO**

Tesi di Laurea di:

**FEDERICO DI FURIA**

A.A. 2021/2022

# INDICE

## Abstract

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Camera Riverberante .....</b>	<b>4</b>
2.1 Teoria Modale .....	7
2.2 Fattore di Qualità $Q$ .....	10
2.3 Densità Modale .....	13
<b>3. Dispositivi e strumentazione .....</b>	<b>15</b>
3.1 Dispositivi monitorati.....	17
3.2 Stirrer.....	19
3.3 Analizzatore di Spettro .....	22
3.4 Analizzatore di Rete Vettoriale .....	24
3.5 Antenne e cavi.....	26
3.6 Calibrazione.....	27
<b>4. Misurazioni e calcolo in MATLAB.....</b>	<b>29</b>
<b>5. Risultati.....</b>	<b>33</b>
<b>6. Discussione e conclusione .....</b>	<b>34</b>
<b>7. Bibliografia e sitografia.....</b>	<b>36</b>

## INDICE IMMAGINI

**Figura 1:** Camera Riverberante e *Stirrer*, Dipartimento di Ingegneria dell'informazione UNIVPM

**Figura 2:** Cavità rettangolare vuota di dimensioni  $a \times b \times c$

**Figura 3:** Fattore di qualità  $Q$

**Figura 4:** Distanza in frequenza tra i primi 25 modi

**Figura 5:** Schema a blocchi del primo *set up* della Camera Riverberante

**Figura 6:** Schema a blocchi del secondo *set up* della Camera Riverberante

**Figura 7:** Smartphone Samsung Galaxy A52 5G

**Figura 8:** Cuffie Bluetooth JBL Tune 215 TWS

**Figura 9:** Rotore dello *Stirrer*, Dipartimento di Ingegneria dell'informazione UNIVPM

**Figura 10:** Programma di controllo movimento dello *Stirrer*

**Figura 11:** Analizzatore di Spettro *Rohde&Schwarz FSP3 9kHz-13GHz*

**Figura 12:** Analizzatore di Rete Vettoriale: *Agilent Technologies FieldFox Microwave Vector Network Analyzer N9928A 26.5 GHz*

**Figura 13:** Carichi noti per la calibrazione dell'Analizzatore di Rete Vettoriale

**Figura 14:** Spettro del segnale in Camera Riverberante senza soluzione salina.

Strumento utilizzato: Analizzatore di Spettro

**Figura 15:** Spettro del segnale in Camera Riverberante con soluzione salina.

Strumento utilizzato: Analizzatore di Rete Vettoriale

## Abstract

L'utilizzo di dispositivi indossabili (*weareable devices*) è diventato sempre più consuetudine per l'ascolto della musica e le chiamate telefoniche, specialmente nelle generazioni più giovani. Tuttavia, l'impatto a lungo termine sulla salute degli utenti non è ancora stato pienamente determinato a causa della recente diffusione di questi dispositivi.

L'essere umano può essere danneggiato da esposizioni a Radiazioni Elettromagnetiche *E.M.R.* che, a seconda delle fonti di provenienza, si distinguono in ionizzanti, che sono le più nocive, e non ionizzanti che sono le meno nocive.

Obiettivo: Valutare le emissioni dei dispositivi auricolari Bluetooth e l'impatto, in termini di assorbimento delle stesse, da parte dell'utente.

Metodologia: È stato condotto uno studio all'interno di una Camera Riverberante dotata di *Stirrer*, nella quale sono state introdotti le sole cuffie Bluetooth e in seguito un contenitore in *PVC* contenente una soluzione idrosalina allo 0,9% al fine di emulare il tessuto umano.

Raccolta dei dati e metodo di analisi: Per raccogliere i dati si è provveduto in primo luogo alla verifica dei rumori di fondo e alla calibrazione degli strumenti, al fine di ottenere risultati molto più attendibili. Di seguito sono state fatte 36 misurazioni per la verifica delle emissioni delle cuffie Bluetooth e 36 misurazioni per la verifica delle emissioni delle cuffie Bluetooth in presenza del contenitore con la soluzione idrosalina.

L'analisi è stata effettuata utilizzando un Analizzatore di Spettro *Rohde&Schwarz FSP3*, un Analizzatore di Rete Vettoriale *Agilent Technologies*

N9928A. Infine, i dati sono stati elaborati tramite il software di calcolo MATLAB.

Parole chiave: Cuffie Bluetooth, Emissioni, Camera Riverberante, *Stirrer*, Analizzatore, Tessuto umano.

# 1. Introduzione

La teoria formulata da Maxwell sostiene che la variazione continua nel tempo di un campo elettrico e magnetico genera onde elettromagnetiche. Queste onde si differenziano da altre tipologie di onde in quanto non richiedono un mezzo per la loro propagazione, essendo quindi definite come onde trasversali. Ciò significa che i punti del sistema eseguono vibrazioni in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione delle onde.

Inoltre, secondo la teoria di Gauss, i campi elettrico e magnetico sono sempre ortogonali tra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione delle onde elettromagnetiche.

L'energia trasmessa attraverso una onda elettromagnetica è detta Radiazione Elettromagnetica *E.M.R.*

Quando un oggetto emette *E.M.R.*, invia onde di energia elettromagnetica a diverse frequenze, più alta è la frequenza della radiazione, più alti sono i suoi livelli di energia.

Esistono due categorie principali di *E.M.R.*:

- *E.M.R.* ionizzanti, ovvero in grado di rimuovere gli elettroni dagli atomi, hanno una frequenza relativamente alta e sono potenzialmente in grado di danneggiare le cellule umane e il DNA. Tra le fonti di *EMR* ionizzanti si annoverano: macchine a raggi X, rifiuti radioattivi, luce solare, lettini solari ed altro.

- *E.M.R.* non ionizzanti, caratterizzate da una frequenza relativamente bassa che generalmente non causano effetti negativi sull'uomo, a patto che la loro intensità non superi determinati limiti. Tra queste si annoverano:

dispositivi Bluetooth, telefoni cellulari, computer, reti Wi-Fi, contatori intelligenti di energia, microonde, linee elettriche, macchine per la risonanza magnetica ed altro.

I gadget tecnologici come gli smartphone utilizzano diverse tecnologie per comunicare in modalità wireless tra loro e con Internet. I più comuni di questi, accanto alle reti cellulari come 4G e 5G, sono Wi-Fi e Bluetooth che utilizzano radiazioni elettromagnetiche nella gamma delle microonde (circa 2,4 GHz) per scambiare dati.

Risulta quindi interessante studiare l'esposizione dei tessuti umani a contatto con questi campi per determinare eventuali effetti sulla salute.

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la misurazione delle EMR irradiate da cuffie Bluetooth in una Camera Riverberante, con particolare attenzione riguardo la potenza assorbita dalla testa umana.

La Camera Riverberante è stata utilizzata come ambiente di lavoro e sperimentazione per isolare il luogo di misura. All'interno della camera è presente un dispositivo chiamato *Stirrer* che ha lo scopo di mescolare il campo elettromagnetico generando una condizione aleatoria del campo.

Per la misurazione della potenza irradiata sono stati utilizzati un Analizzatore Di Spettro e un Analizzatore Di Rete Vettoriale, strumenti tecnici utili per misurare le proprietà elettromagnetiche di un segnale che permettono di ottenere risultati precisi ed accurati.

Al fine di ottenere informazioni utili sull'effettivo assorbimento di tali radiazioni da parte del tessuto umano, si è optato per effettuare le misurazioni con due *set up* differenti.

In primo luogo, sono state analizzate le onde elettromagnetiche emesse da una connessione diretta tra una sorgente che invia informazioni (smartphone) e un ricevitore che raccoglie ed elabora tali informazioni (cuffie Bluetooth). Successivamente è stata introdotta una soluzione fisiologica che emula la composizione del tessuto di rivestimento della testa umana.

La comparazione dei due risultati ha permesso di ottenere risultati importanti sull'effettivo assorbimento delle onde elettromagnetiche da parte del tessuto umano [1], [2].

I risultati ottenuti suggeriscono che l'assorbimento delle onde elettromagnetiche emesse da questi dispositivi non presenta rischi per la salute umana, fornendo così informazioni preziose per coloro che desiderano verificare la conformità ai limiti di esposizione stabiliti dalle norme e per ulteriori studi in materia.

## 2. Camera Riverberante

Le Camere Riverberanti, introdotte da H.A. Mendes nel 1968, sono strutture utilizzate per misurare le proprietà elettromagnetiche di sistemi di comunicazione wireless [3] e di schermature [4]. Queste camere consistono in grandi cavità, a forma di parallelepipedo, realizzate utilizzando pareti metalliche che fungono da schermo per la radiazione elettromagnetica. Le pareti sono progettate per assorbire solo una minima quantità dell'energia irradiata, al fine di creare un campo elettromagnetico polarizzato e statisticamente omogeneo che è in grado di simulare l'ambiente reale. Tale ambiente permette che i dispositivi al suo interno siano colpiti da onde piane provenienti da tutte le possibili direzioni di propagazione.

L'uniformità del campo elettromagnetico all'interno della camera viene ottenuta tramite l'utilizzo di uno *Stirrer*, che consiste in una struttura metallica formata da un'asta centrale legata a un rotore, con piattaforme riflettenti connesse all'asta. Il rotore garantisce un movimento circolare dello *Stirrer* che, mescolando continuamente il campo elettromagnetico, crea una distribuzione statistica uniforme.

La Camere Riverberante è utilizzata per testare l'efficacia delle schermature, le prestazioni dei sistemi di comunicazione wireless e le antenne, grazie alla loro capacità di ricreare le caratteristiche di propagazione dell'ambiente reale [5]. Inoltre, viene anche utilizzata per simulare l'esposizione umana alle emissioni elettromagnetiche, tramite apposite soluzioni che hanno la stessa densità dei tessuti corporei.

Le caratteristiche stocastiche della Camera Riverberante rendono difficile la sua descrizione teorica, ma la *teoria dei modi in cavità vuota* può aiutare ad analizzarne alcune proprietà, come la *densità modale* e il *fattore di qualità Q*.

Le dimensioni possono variare, ma una Camera Riverberante comune ha dimensioni di 6 x 4 x 2,5 metri. All'interno della camera vengono posizionate antenne per analizzare la potenza trasmessa e ricevuta. Un'antenna è connessa all'Analizzatore di Spettro nel primo set di misurazioni, mentre nel secondo set di misurazioni vengono utilizzate due antenne connesse all'Analizzatore di Rete Vettoriale.

Di seguito verranno illustrati dei parametri che descrivono in termini matematici l'ambiente della Camera Riverberante con le rispettive caratteristiche. Questi parametri risultano utili per comprenderne al meglio il funzionamento.



**Figura 1:** *Camera Riverberante e Stirrer, Dipartimento di Ingegneria dell'informazione  
UNIVPM*

## 2.1 Teoria Modale

La teoria modale descrive la modalità di oscillazione di un sistema, come ad esempio una cavità rettangolare, in termini di modi. Ogni modo è descritto come una particolare configurazione di onde elettriche e magnetiche che si propaga all'interno della cavità, soddisfacendo determinate equazioni vettoriali, come l'equazione di Helmholtz. Il modo è identificato da un insieme univoco di numeri interi, che descrivono la sua forma spaziale e le sue proprietà di oscillazione.

La teoria modale descrive, inoltre, la relazione tra le proprietà del mezzo all'interno della cavità, come anche la distribuzione delle energie elettriche e magnetiche.

Una cavità è un volume racchiuso da superfici perfettamente conduttrici al cui interno può essere eccitato un campo elettromagnetico. Essa è caratterizzata da permittività e permeabilità dello spazio libero e il campo elettrico  $\mathbf{E}_p$  all'interno soddisfa l'equazione di Helmholtz:

$$(\nabla^2 + k_p^2)\mathbf{E}_p = 0 \quad (0.1)$$

Inoltre, è importante sottolineare che il campo elettrico soddisfa anche l'equazione della divergenza e sulle pareti della cavità il campo elettrico è nullo.

Il campo magnetico  $\mathbf{H}_p$  viene calcolato dall'equazione del rotore di Maxwell:

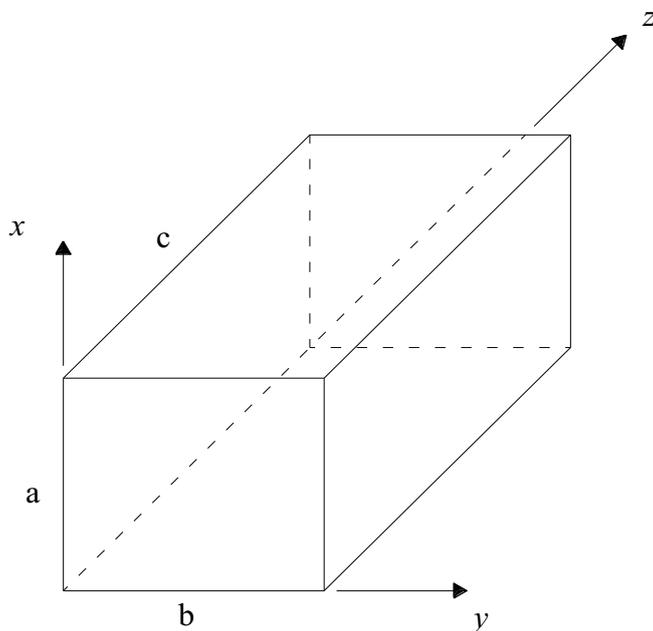
$$\mathbf{H}_p = -\frac{1}{jk_p\eta}\nabla \times \mathbf{E}_p \quad (1.2)$$

L'energia elettromagnetica immagazzinata nella cavità è descritta come integrali di volume:

$$\mathbf{U}_{pe} = \frac{\varepsilon}{2} \iiint_V |E_p|^2 dV \text{ e } \mathbf{U}_{pm} = \frac{\mu}{2} \iiint_V |H_p|^2 dV \quad (1.3)$$

Dove  $\mathbf{U}_{pe}$  rappresenta l'energia elettrica e  $\mathbf{U}_{pm}$  quella magnetica.

Per quanto riguarda le cavità rettangolari, come quella da noi presa in esame, i modi di vibrazione possono essere classificati come **TE** (trasversi elettrici) o **TM** (trasversi magnetici) e verranno analizzati supponendo che la loro direzione sia equivalente all'asse z.



**Figura 2:** Cavità rettangolare vuota di dimensioni  $a \times b \times c$

I campi dei modi **TE** e **TM** sono descritti dalle seguenti formule:

$$\mathbf{E}_p^{TE}(\mathbf{r}) = -\hat{\mathbf{x}}k_y\varphi_p^x(\mathbf{r}) + \hat{\mathbf{y}}k_z\varphi_p^y(\mathbf{r}) \quad (1.4)$$

e

$$\mathbf{E}_p^{TM} = -\hat{\mathbf{x}}k_xk_y\varphi_p^x(\mathbf{r}) - \hat{\mathbf{y}}k_xk_z\varphi_p^y(\mathbf{r}) + \hat{\mathbf{z}}(k_x^2 + k_y^2)\varphi_p^z(\mathbf{r}) \quad (1.5)$$

Sostituendo la (1.4) e la (1.5) nella (1.2) si ottengono le equazioni del campo magnetico, che dimostrano che per i modi **TE** (1.4) è nulla la componente z del campo elettrico, e che per i modi **TM** (1.5) si annulla la componente z del campo magnetico. [6]

## 2.2 Fattore di Qualità $Q$

Il fattore di qualità  $Q$  è un parametro importante nella valutazione delle camere riverberanti. Esso descrive la capacità di una camera di immagazzinare energia elettromagnetica  $U$  rispetto alla quantità di energia che viene dissipata  $P_d$ .

$$Q = \frac{\omega U}{P_d} \quad (1.6)$$

Il fattore di qualità può essere calcolato considerando i principali meccanismi di perdita, ovvero:

- 1)  $P_{d1}$ : Potenza dissipata nelle pareti della cavità
- 2)  $P_{d2}$ : Potenza assorbita da oggetti all'interno della cavità
- 3)  $P_{d3}$ : Potenza persa attraverso aperture
- 4)  $P_{d4}$ : Potenza dissipata dai carichi delle antenne riceventi

Quindi la quantità di energia totale  $P_d$  che viene dissipata è:

$$P_d = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} \quad (1.7)$$

Sostituendo la (1.7) nella (1.6) si ottengono i fattori di qualità relativi ad ogni singola perdita:

$$Q_1 = \frac{\omega U}{P_{d1}}, Q_2 = \frac{\omega U}{P_{d2}}, Q_3 = \frac{\omega U}{P_{d3}}, Q_4 = \frac{\omega U}{P_{d4}} \quad (1.8)$$

Il meccanismo di perdita dominante è quello riferito alle pareti  $P_{d1}$  e si verifica alle alte frequenze a causa dalle correnti che fluiscono sulle pareti, indotte dall'ambiente elettromagnetico della camera.

Quindi il fattore di qualità  $Q_1$  è descritto da:

$$Q_1 \approx \frac{3V}{2\mu_r\delta A} \quad (1.9)$$

In cui si considerano la superficie totale interna  $A$  e la profondità di penetrazione dell'effetto pelle  $\delta$ , quest'ultima comprende anche la conducibilità elettrica e la permeabilità magnetica delle pareti.

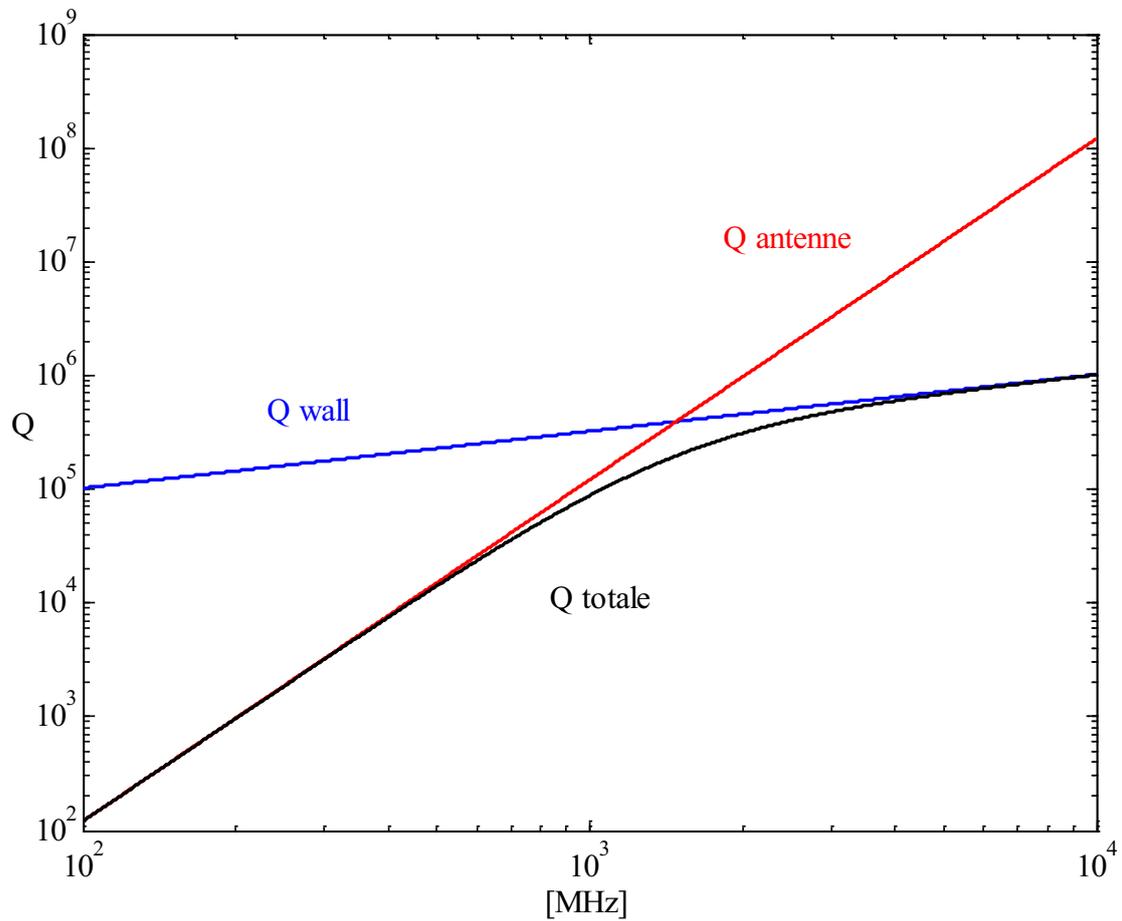
Per quel che riguarda il secondo meccanismo di perdita  $P_{d2}$  si deve considerare che un dispositivo all'interno della camera assorbe potenza, motivo per il quale si dice che esso carica la Camera Riverberante; mentre il terzo meccanismo di perdita  $P_{d3}$  è trascurabile se la camera rispetta specifiche condizioni di costruzione e schermatura.

Infine, per quanto riguarda le perdite dovute alle antenne riceventi  $P_{d4}$ , esse dipendono dal disadattamento di impedenza  $m$  e dall'efficienza d'antenna  $\eta$  :

$$Q_4 = \frac{16\pi^2 V}{\eta m \lambda^3} \quad (1.10)$$

Questo meccanismo di perdita è dominante alle basse frequenze.

La figura di seguito conferma queste valutazioni, mostrando gli andamenti di  $Q_1$ ,  $Q_4$  e del  $Q$  totale ottenuto dai due contributi [6].



**Figura 3:** Fattore di qualità  $Q$

## 2.3 Densità Modale

I modi di una Camera Riverberante sono le forme uniche in cui un'onda elettromagnetica può distribuirsi all'interno della camera. Queste forme sono determinate dalle dimensioni della camera, dalle proprietà dei materiali di rivestimento e dalle caratteristiche dell'aria all'interno della camera. Ogni modo ha una propria frequenza di risonanza e una propria forma che si ripete nel tempo.

Il numero di modi che possono essere eccitati in una camera imperturbata, su una certa larghezza di banda intorno ad una data frequenza, sono definiti dalla densità modale  $D_s(f)$ .

L'equazione di  $D_s(f)$  specifica per geometrie rettangolari è:

$$D_s(f) = \frac{dN_s(f)}{df} = 8\pi abc \frac{f^2}{v^3} - \frac{a+b+c}{v} \quad (1.11)$$

Pertanto, il numero di modi in un intervallo di frequenza  $\Delta f$  è pari a:

$$\Delta N = D\Delta f \quad (1.12)$$

Il numero di modi in un intervallo di frequenza è influenzato anche dal fattore di qualità  $Q$ , tramite la definizione del parametro "quality factor bandwidth"  $BW_Q$  definito come  $f_{lmn} / Q$ .

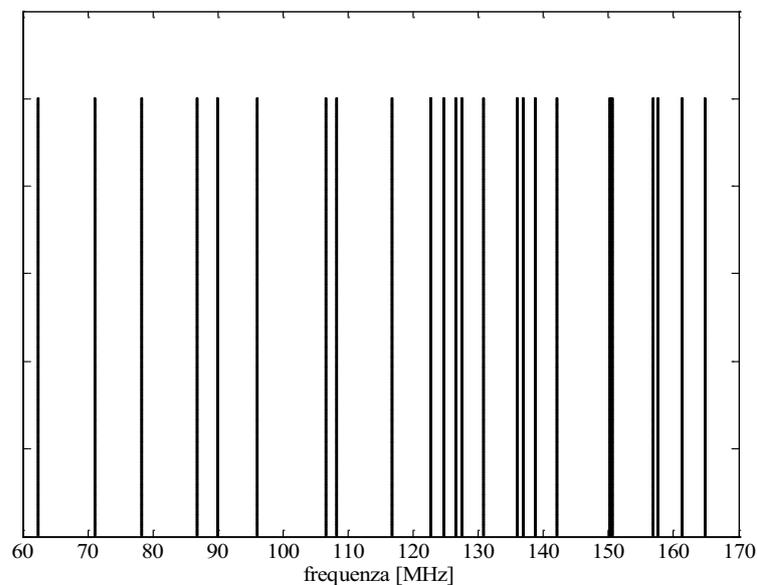
La struttura modale dipende dalla densità modale  $D_s(f)$  e da  $BW_Q$ ; pertanto, il numero di modi  $M$  eccitati in una  $BW_Q$  è dato da:

$$M = \frac{8\pi V f^3}{c^3 Q} \quad (1.13)$$

Un valore alto di  $BW_Q$  significa che la larghezza di banda del modo è relativamente larga, il che permette l'eccitazione di più modi. Un valore basso di  $BW_Q$ , invece, implica che la larghezza di banda del modo è relativamente stretta, il che limita il numero di modi che possono essere eccitati.

Di conseguenza se si vuole avere pochi modi eccitati con ampiezze maggiori, allora il fattore di qualità  $Q$  dovrebbe essere alto. Se si vuole invece avere molti modi eccitati con ampiezze relativamente basse, il fattore di qualità  $Q$  dovrebbe essere basso.

In alternativa, se il fattore di qualità è elevato, si può lavorare a frequenze alte per raggiungere un sufficiente grado di uniformità. In caso contrario, si può raggiungere lo stesso risultato introducendo degli assorbitori, ma in questo caso la potenza di ingresso deve essere elevata [6].

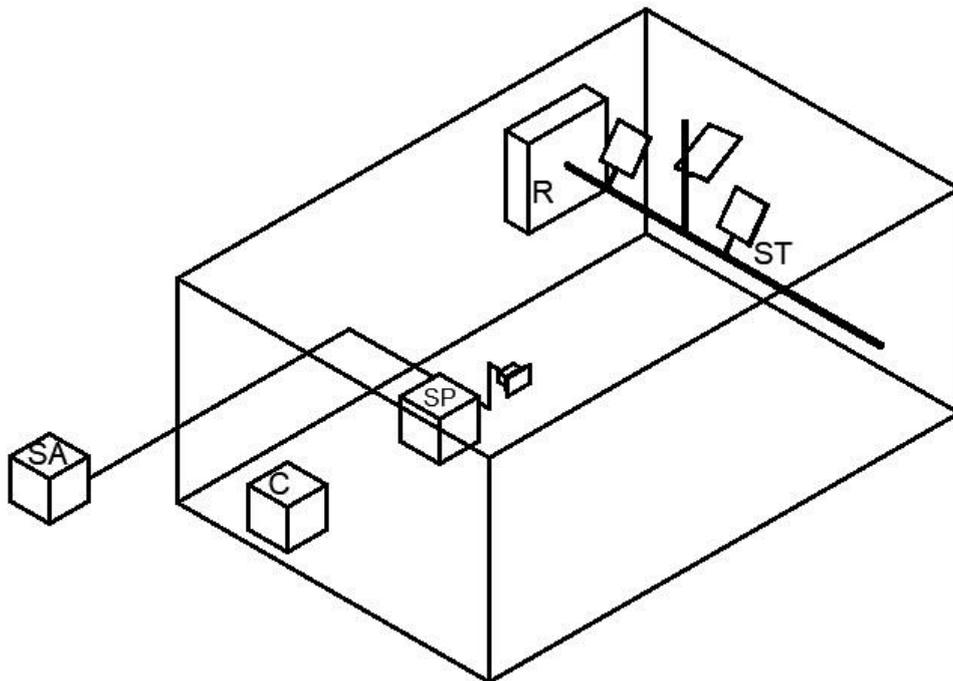


**Figura 4:** Distanza in frequenza tra i primi 25 modi.

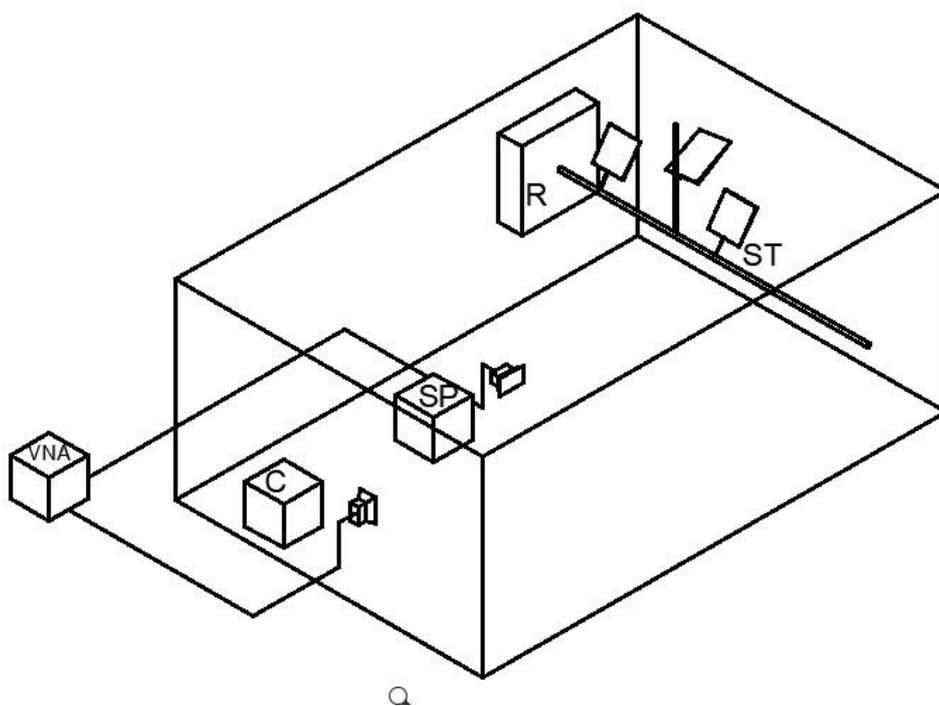
### 3. Dispositivi e strumentazione

La **Figura 5** e la **Figura 6** mostrano la configurazione della Camera Riverberante in due diverse modalità. Nella prima modalità, la camera è connessa ad un Analizzatore di Spettro (*Spectrum Analyzer SA*) che riceve la potenza dal segnale emesso dallo smartphone (*SP*) e dalle cuffie Bluetooth (*C*). Nella seconda modalità, invece, viene utilizzato un Analizzatore di Rete Vettoriale (*Vector Network Analyzer VNA*) connesso a due antenne, che captano il segnale trasmesso e ricevuto dai dispositivi in esame e viene introdotta una soluzione fisiologica tra le cuffie per simulare il tessuto umano. *Stirrer* e Rotore sono indicati rispettivamente da *ST* e *R*.

La configurazione descritta ha lo scopo di effettuare una misurazione quantitativa della potenza del segnale, garantendo la massima precisione e accuratezza nei risultati [7].



**Figura 5:** Schema a blocchi del primo set up della Camera Riverberante



**Figura 6:** Schema a blocchi del secondo set up della Camera Riverberante

### 3.1 Dispositivi monitorati

Per il lavoro svolto sono stati analizzati due dispositivi: uno smartphone (**Figura 7**) e delle cuffie Bluetooth (**Figura 8**).

I seguenti dispositivi sono stati monitorati durante una comunicazione wireless Bluetooth, in modalità riproduzione musicale, ponendo particolare attenzione riguardo le radiazioni emesse dalle cuffie Bluetooth.

Scheda tecnica dello smartphone **[a]** :

- Marca: Samsung
- Modello: Galaxy A52 5G
- Sistema operativo: Android 12
- Connessione: 4G, 5G, Bluetooth 5.0

Scheda tecnica delle cuffie Bluetooth **[b]**:

- Marca: JBL
- Modello: Tune 215 TWS
- Connessione: Bluetooth 5.0
- Autonomia: 5 ore

I manuali utente dei dispositivi sono accessibili ai link presenti in sitografia.



**Figura 7:** *Smartphone Samsung Galaxy A52 5G*



**Figura 8:** *Cuffie Bluetooth JBL Tune 215 TWS*

## 3.2 Stirrer

Uno *Stirrer* è un dispositivo meccanico utilizzato per mescolare o agitare un fluido o un campo elettromagnetico all'interno di un contenitore o di una camera. È composto da un asse rotante su cui sono disposte delle pale che girano in sincrono con l'asse, solitamente alimentato da un rotore esterno alla camera. Lo *Stirrer* ha lo scopo di mantenere l'uniformità di un fluido o di un campo elettromagnetico, evitando la formazione di stratificazioni o di aree non miscelate, così da ottenere un ambiente elettromagnetico statisticamente uniforme ed isotropo [8].

Un fattore importante per garantire l'uniformità del campo elettromagnetico è la forma dello *Stirrer*, che deve essere priva di simmetrie così da ottenere una configurazione di campo non ripetitiva.

Esistono diverse tipologie di *Stirrer*, che variano in base alla forma, alla posizione, al numero di pale, alla velocità e alla direzione di rotazione. Ad esempio, alcune tipologie di *Stirrer* includono:

- *Stirrer* orizzontale
- *Stirrer* verticale a Z
- *Stirrer* con pale a forma di elica
- *Stirrer* con pale a forma di foglia
- *Stirrer* ad impulsi

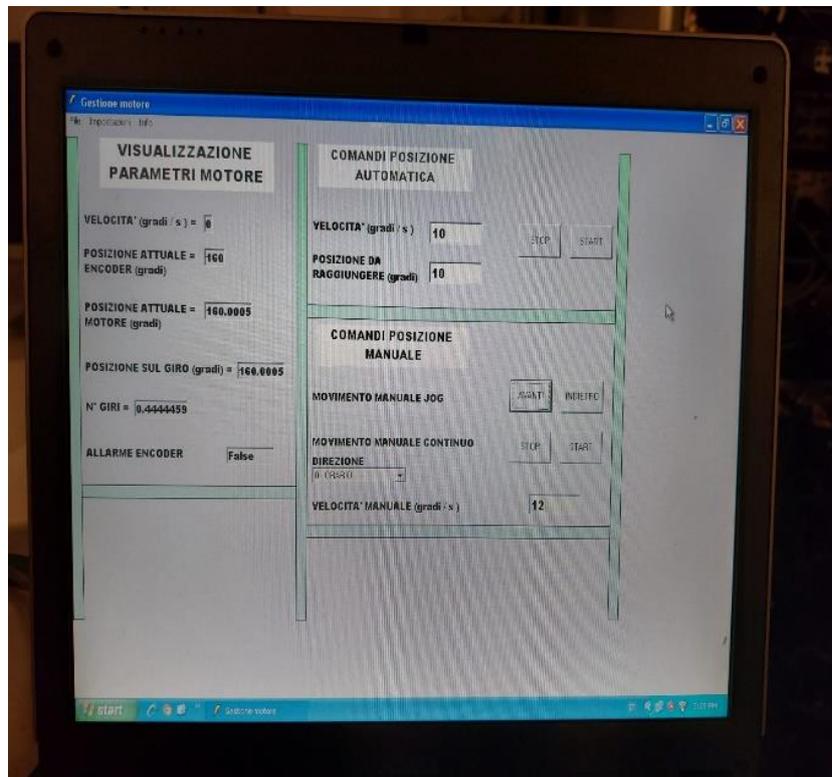
La scelta della tipologia di *Stirrer* dipende dal fluido o dal campo elettromagnetico che si vuole mescolare e dalle condizioni operative specifiche [9].

In questo caso è stato utilizzato uno *Stirrer* orizzontale (**Figura 1**) collegato ad un Rotore (**Figura 9**) posto esternamente alla camera e pilotato tramite computer.

Durante l'utilizzo, i parametri come velocità, tempo di movimento e posizione vengono gestiti da computer (**Figura 10**). Nel caso specifico, è stato utilizzato in modalità tuner, ovvero la potenza è stata misurata cambiando manualmente la posizione dello *Stirrer* di 10° ad ogni fine misurazione, raccogliendo 36 misurazioni prima che tornasse nella posizione iniziale.



**Figura 9:** Rotore dello *Stirrer*, Dipartimento di Ingegneria dell'informazione UNIVPM



**Figura 10:** Programma di controllo movimento dello Stirrer

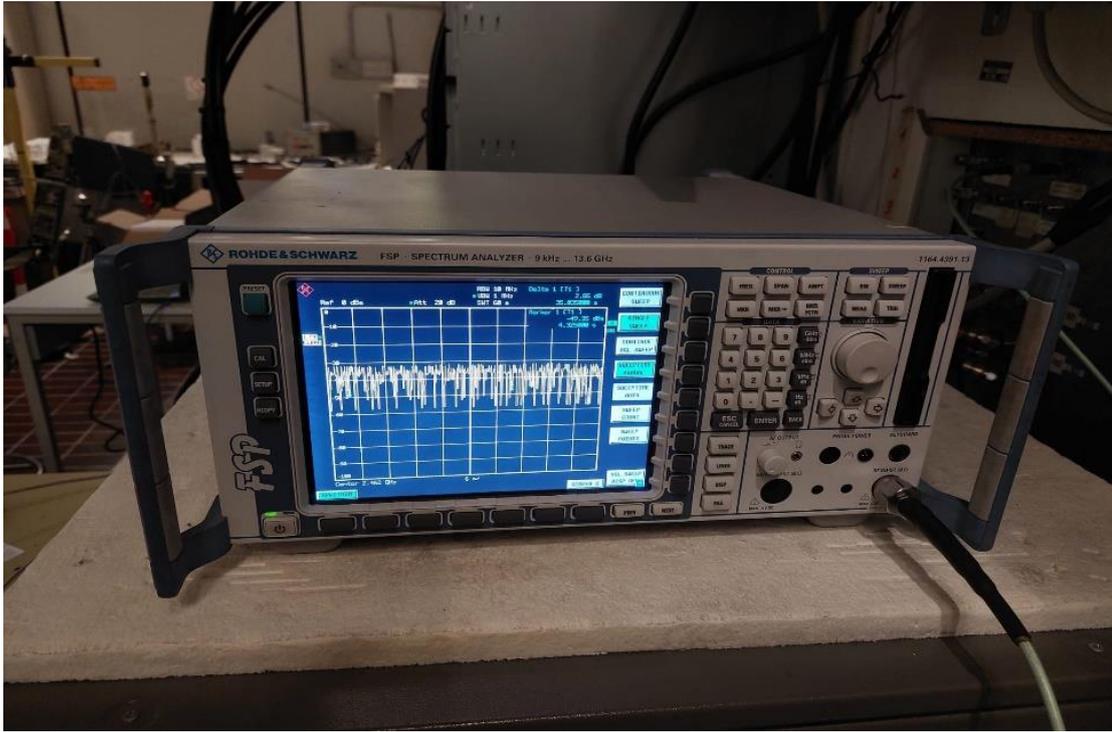
### 3.3 Analizzatore di Spettro

L'Analizzatore di Spettro è uno strumento utilizzato per analizzare la composizione in frequenza dei segnali ricevuti. A differenza di un voltmetro, l'Analizzatore di Spettro non misura direttamente la potenza del segnale, ma valuta la forma dell'onda sinusoidale ricevuta. La potenza può essere calcolata attraverso la calibrazione e la conoscenza delle resistenze.

Nel caso specifico, è stato utilizzato un Analizzatore di Spettro *Rohde&Schwarz FSP3* con un intervallo di frequenza compreso tra 9 kHz e 13 GHz (**Figura 11**).

L'analisi viene effettuata in modulo, ovvero si valuta la potenza assoluta del segnale, e viene visualizzata su un grafico cartesiano che mostra l'andamento della potenza in mV e in frequenza. Nel corso dell'esperimento, è stata utilizzata la funzione *SPAN 0* utile a trasformare la misura in frequenza in tempo.

Sono stati analizzati 60 secondi di segnale e raccolti 501 campioni per ogni misurazione. La banda di frequenza presa in considerazione è di 2,4 GHz, corrispondente alla banda utilizzata dai dispositivi Bluetooth.



**Figura 11:** Analizzatore di Spettro Rohde&Schwarz FSP3 9kHz-13GHz

### 3.4 Analizzatore di Rete Vettoriale

L'Analizzatore di Rete Vettoriale è uno strumento tecnico utilizzato per la misura dell'energia trasmessa e riflessa di un segnale incidente su antenne, scansionandone la gamma di frequenze. A differenza dell'analizzatore di spettro, che dispone di una sola porta, l'analizzatore di reti vettoriali è dotato di due porte, connesse a due antenne.

Invece di utilizzare le correnti e le tensioni che sarebbero difficili da misurare, l'Analizzatore di Rete Vettoriale utilizza valori adimensionali che vengono inseriti in una matrice di scattering priva di dimensioni fisiche. Questi parametri possono essere rappresentati in un grafico cartesiano sotto forma di modulo e fase, fornendo una visione della potenza di trasmissione e ricezione.

Il modello dello strumento utilizzato nell'esperimento era un Analizzatore di Rete Vettoriale *Agilent Technologies N9928A*, con una gamma di frequenza massima di 26.5 GHz e una configurazione a 2.4 GHz per una durata di 60 secondi durante i quali sono stati raccolti 1061 campioni (**Figura 12**).



**Figura 12:** *Analizzatore di Rete Vettoriale: Agilent Technologies FieldFox Microwave  
Vector Network Analyzer N9928A 26.5 GHz*

### 3.5 Antenne e cavi

Nelle analisi effettuate sono state utilizzate antenne *Horn*, note come *Double Ridged Horn Antennas*, adatte per la captazione di onde elettromagnetiche nello spettro delle microonde. Riguardo i cavi di collegamento, sono stati utilizzati cavi coassiali di *tipo N* a bassa distorsione di fase.

Nella prima fase dell'analisi, è stata utilizzata una sola antenna, connessa all'Analizzatore di Spettro tramite un cavo. La funzione dell'antenna è quella di captare l'onda elettromagnetica che, successivamente, viene tradotta in una differenza di potenziale dell'ordine dei millivolt sul terminale del cavo connesso allo strumento.

Nella seconda fase delle misurazioni, è stato utilizzato l'Analizzatore di Rete Vettoriale che richiede due antenne: una ricevente e una trasmittente. Sono stati utilizzati gli stessi tipi di cavi e di antenne utilizzati nella prima fase, ma la loro posizione è stata modificata, le antenne sono state cross-polarizzate.

Il termine "cross-polarizzazione" si riferisce all'utilizzo di due antenne con polarizzazioni opposte durante le misurazioni. Ciò significa che la polarizzazione della antenna ricevente è orientata in modo diverso rispetto a quella della antenna trasmittente. Questa configurazione è stata utilizzata nel caso specifico per minimizzare il segnale diretto e ottenere solo il segnale diffuso dallo *Stirrer* e dalla camera. La cross-polarizzazione aiuta a migliorare la precisione delle misurazioni e a ridurre le interferenze che possono influire sul risultato finale.

### 3.6 Calibrazione

Prima di iniziare le misure si è optato per la calibrazione degli strumenti e della Camera Riverberante.

La calibrazione di un Analizzatore di Rete Vettoriale è un processo fondamentale per garantire la precisione delle misure di potenza effettuate con questo strumento. Esistono due metodi di calibrazione: *TRL (Thru, Reflect, Line)* che utilizza una sola porta e *SOLT (Short, Open, Load, Thru)* che utilizza due porte. In questo caso, è stata effettuata una calibrazione a due porte. Durante questa procedura, sono stati applicati su entrambe le porte dei carichi noti (*Short, Open e Load*) e, successivamente, le porte sono state connesse tramite un cavo coassiale alla Camera Riverberante (**Figura 13**).

In seguito, eliminando i carichi noti e collegando l'Analizzatore di Rete Vettoriale alla Camera Riverberante, è stato calibrato il luogo di misura.

È stata trasmessa una tensione pari a 1 mV , con lo *Stirrer* in movimento continuo per un periodo di 60 secondi. Quindi si analizza la media sulle posizioni dello *Stirrer* calcolando il rapporto tra la potenza ricevuta e quella trasmessa, ottenendo il fattore di calibrazione.

La calibrazione aiuta a correggere incertezze di misura sistemiche, che includono il disadattamento di sorgente (impedenza non ideale della sorgente di segnale) e il *cross talk* tra le porte (influenza di una porta sull'altra durante le misure). Questo procedimento, tuttavia, non corregge gli errori casuali come le interferenze elettromagnetiche. Quindi per ottenere prestazioni accurate e affidabili durante l'utilizzo dell'Analizzatore di Rete Vettoriale, è importante minimizzare fattori che possono influire negativamente sulla

misura, come la deriva termica, il rumore elettrico e le fonti di interferenza. Questo può essere ottenuto attraverso pratiche appropriate di gestione del rumore, compensazione delle derivazioni termiche e utilizzo di schermature efficaci per prevenire le interferenze elettromagnetiche.



**Figura 13:** Carichi noti per la calibrazione dell'Analizzatore di Rete Vettoriale

## 4. Misurazioni e calcolo in MATLAB

Nel primo set di misurazioni, è stato utilizzando l'Analizzatore di Spettro, collegato alla camera tramite cavo schermato. Sono state effettuate le misure per determinare la potenza emessa dalle cuffie Bluetooth collegate allo smartphone in modalità riproduzione musicale. I dispositivi sono stati posizionati su blocchi di polistirolo e collocati a una distanza di 70 cm per emulare la distanza tra la mano e la testa di un utente.

L'Analizzatore di Spettro è stato impostato per rilevare la potenza emessa dai dispositivi e, come riportato nel capitolo **3.3**, lavorando ad una frequenza prestabilita, sono stati ottenuti 501 campioni rilevati utilizzando un tempo di *sweep* di 60 secondi.

Per ottenere una valutazione statistica della potenza, è stato utilizzato lo *Stirrer* e sono state effettuate 36 misurazioni. A fine di ogni misurazione, infatti, lo *Stirrer* veniva ruotato di 10° ottenendo così una nuova misurazione.

Una volta ottenute tutte le misurazioni si è passati al calcolo dello spettro del segnale tramite l'utilizzo del software MATLAB **[10]**, **[c]**.

Le righe di codice utilizzate per calcolare la potenza media totale sono sotto riportate.

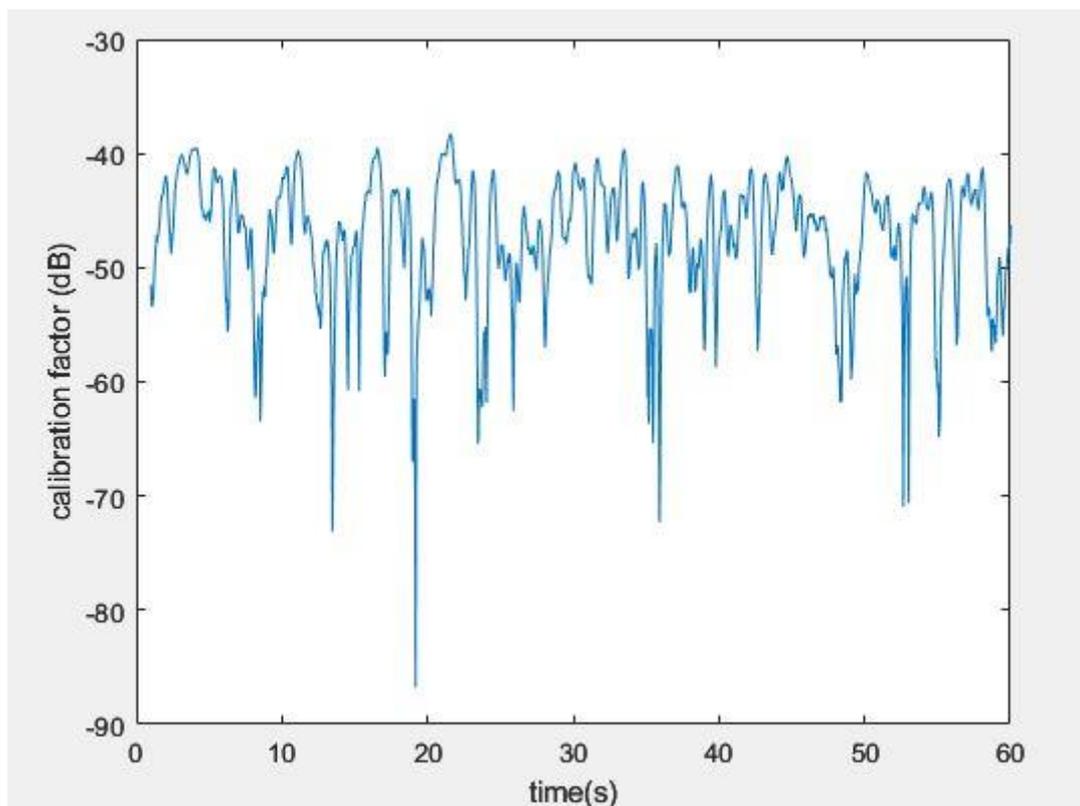
- for i=1:501
- powLin(i) = 10^(powdB(i)/10);
- end
- powAvg(j) = mean(powLin);
- end
- powAvgTot = mean(powAvg);

Ogni misurazione contiene 501 campioni per cui si inizializza un ciclo for attraverso il quale si effettua la conversione di ogni campione da *decibel* a *milliwatt*.

Una volta ottenuta la Potenza Lineare *powLin* si calcola la Potenza Media Temporale *powAvg* come media tra le potenze appena trovate.

Infine, si procede con il calcolo della Potenza Totale Media nel tempo *powAvgTot*.

Lo spettro del segnale ottenuto impostando lo *Stirrer* a  $0^\circ$  è rappresentato in figura:



**Figura 14:** Spettro del segnale in Camera Riverberante senza soluzione salina. Strumento utilizzato: Analizzatore di Spettro

Nel secondo set di misurazioni si è fatto uso dell'Analizzatore di Rete Vettoriale, analizzato nel capitolo **3.4**, che lavorando ad una frequenza più elevata, offre una quantità pari a 1601 campioni analizzati nello *sweep* di 60 secondi.

Anche in questo caso le cuffie Bluetooth sono state collegate allo smartphone in modalità riproduzione musicale.

I dispositivi sono stati posizionati nella stessa posizione precedente, ma è stato introdotto un contenitore d'acqua fisiologica interposto tra le cuffie Bluetooth, al fine di emulare il tessuto esterno della testa umana.

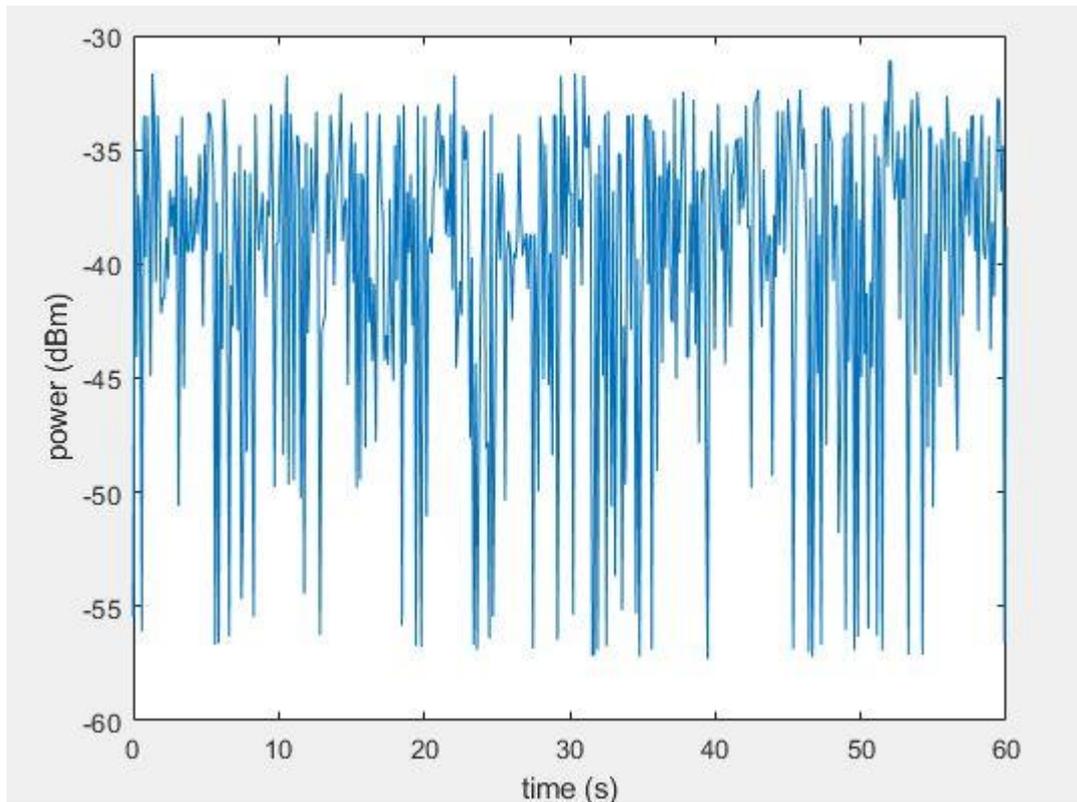
Anche in questo caso sono state effettuate 36 misurazioni spostando lo *Stirrer* di 10° ad ogni misurazione.

Passando in MATLAB, le righe di codice sono le seguenti:

- for i=1:1601
- s21lin(i)=10^(s21dB(i)/20);
- end
- CalFact = mean(s21lin)
- powCuffie = powAvgTot/CalFact

Il codice usato per i calcoli è il medesimo di quello precedente; infatti, viene calcolata la Potenza Lineare e la Potenza Media, ma il numero di campioni è aumentato passando da 501 a 1601. Inoltre, la potenza delle cuffie è stata calcolata rispetto al fattore di calibrazione *CalFact*.

L'aumento del numero di campioni si può notare anche in figura, il segnale appare più fitto:



**Figura 15:** *Spettro del segnale in Camera Riverberante con soluzione salina. Strumento utilizzato: Analizzatore di Rete Vettoriale*

## 5. Risultati

La procedura descritta ha permesso di calcolare la potenza totale emessa dalle cuffie Bluetooth in due situazioni: la prima quando l'onda elettromagnetica si propaga liberamente nell'aria e la seconda quando si propaga attraversando un materiale con proprietà dielettriche diverse, paragonabili a quelle del tessuto umano.

Nella prima situazione, la potenza totale rilevata è stata di  $6.8797e-04$  mW e la potenza specifica delle cuffie era di 0.1372 mW. Nella seconda situazione, dopo la calibrazione con un fattore pari a 0.0050, e l'introduzione della soluzione fisiologica, la potenza totale è risultata essere  $2.8659e-04$  mW e la potenza delle cuffie è pari a 0.0572 mW.

Le misurazioni hanno mostrato quindi una riduzione della potenza rilevata dalle cuffie Bluetooth che corrisponde a circa al 58%. Questa differenza è da associare all'assorbimento da parte della soluzione fisiologica e quindi, per analogia, da parte del tessuto umano.

## 6. Discussione e conclusione

In questo studio è stato utilizzato un metodo rapido per valutare la potenza irradiata da cuffie Bluetooth in un ambiente riverberante e per analizzare la potenza elettromagnetica assorbita da una soluzione salina, al fine di dedurre, per analogia, l'assorbimento da parte del tessuto umano.

L'utilizzo della camera riverberante ha permesso la creazione di un ambiente di misura paragonabile all'ambiente reale, potendo ottenere risultati ancora più attendibili.

Il metodo di lavoro consiste nel confronto tra l'emissione irradiata dal dispositivo indossabile e l'emissione del medesimo dispositivo al contatto con un dielettrico con una densità simile a quella del tessuto umano.

La misura è stata effettuata utilizzando una sorgente tempo variante, selezionando una specifica frequenza di lavoro e calcolando la potenza emessa in un intervallo di 60 secondi.

La differenza tra la misura effettuata senza soluzione salina e quella con soluzione salina suggerisce, per analogia, un assorbimento di potenza da parte dei tessuti umani durante l'utilizzo di tali dispositivi.

È importante notare che la potenza assorbita dalla soluzione salina a contatto con le cuffie Bluetooth è risultata essere di circa il 58%, ma si può supporre potenzialmente non nociva per la salute umana durante l'uso quotidiano. Le EMR di tali dispositivi, infatti, rientrando nel campo delle microonde, hanno una lunghezza d'onda molto corta e una bassa frequenza, sono quindi incapaci di penetrare in profondità nel corpo umano e di causare danni ai tessuti.

In Italia, la sicurezza dei dispositivi indossabili è garantita dal Ministero della Salute e dall'Agenzia Italiana delle Dogane e dei Monopoli (*AIDM*). Queste agenzie lavorano insieme per garantire che i produttori seguano i requisiti regolamentari in materia di sicurezza elettromagnetica e che i dispositivi siano conformi a tali requisiti prima di essere messi in commercio.

Inoltre, l'Unione Europea stabilisce requisiti di sicurezza per i dispositivi elettronici, compresi quelli indossabili, attraverso la direttiva sulla compatibilità elettromagnetica (2014/30/UE) **[d]** e la direttiva sulla sicurezza dei prodotti (2001/95/CE) **[e]**.

In conclusione, per quanto gli esiti dello studio possano risultare rassicuranti, rimane necessario prestare attenzione ai limiti di esposizione alle onde elettromagnetiche stabiliti dalle organizzazioni sanitarie, al fine di garantire che l'utilizzo dei dispositivi indossabili sia sicuro per la salute umana.

## 7. Bibliografia e sitografia

- [1] F. Moglie; V. Mariani Primiani e A. P. Pastore, "Modellazione dell'esposizione umana all'interno di un campo di onde piane casuali". *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 29, 251- 267, 2011.
- [2] S. Lall'ech'ere; S. Girard; et al., "Mode stirred reverberation chamber (MSRC): a large and efficient tool to lead high frequency bioelectromagnetic in vitro experimentation". *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 26, 257-290, 2010.
- [3] A. Centeno e N. Alford, "Misurazione delle comunicazioni wireless zigbee in una camera riverberante con modalità di vibrazione e sintonizzazione della modalità". *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 18, 171- 178, 2011.
- [4] C. L. Holloway; D. A. Hill; J. Ladbury; G. Koepke, e R. Garzia, "Misurazioni dell'efficacia di schermatura dei materiali utilizzando camere riverberanti annidate". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, n. 2, 350-356, 2003.
- [5] *Electromagnetic Reverberation Chambers*, Philippe Besnier Bernard Demoulin, ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [6] G. Buoncompagni, "Misure di radiazione in camera riverberante e confronto con misure in ambiente anecoico", Tesi di Laurea, Università Politecnica delle Marche, Ancona, pp- 7-25, 2003
- [7] *Reverberation Chamber Test Methods*, International Electrotechnical Commission (IEC), Std. 61 000-4-21, 2011.
- [8] R. Serra, "Reverberation chambers through the magnifying glass: an overview and classification of performance indicators," in *IEEE*

Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 6, no. 2, pp. 76-88, Second Quarter 2017.

**[9]** R. Serra; A. C. Marvin; F. Moglie; V. Mariani Primiani et al., “*Reverberation chambers à la carte: An overview of the different mode-stirring techniques,*” in IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 6, no. 1, pp. 63-78, First Quarter 2017.

**[10]** MATLAB, 2022. Version 9.13 (R2022b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

**[a]** Smartphone Samsung Galaxy A52 5G:

[https://downloadcenter.samsung.com/content/UM/202202/20220217171633292/SM-A52X\\_A725F\\_DS\\_UM\\_Open\\_SS\\_Ita\\_Rev.1.0\\_220114.pdf](https://downloadcenter.samsung.com/content/UM/202202/20220217171633292/SM-A52X_A725F_DS_UM_Open_SS_Ita_Rev.1.0_220114.pdf)

**[b]** Cuffie Bluetooth JBL Tune 215 TWS:

[https://manuals.plus/m/b41b07ed255504aa067432713002d9ad3d91511f763402e014aacb1906b9faa\\_optim.pdf](https://manuals.plus/m/b41b07ed255504aa067432713002d9ad3d91511f763402e014aacb1906b9faa_optim.pdf)

**[c]** MATLAB: <https://it.mathworks.com/>

**[d]** Direttiva 2014/30/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014L0030&from=IT>

**[e]** Direttiva 2001/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32001L0095&from=IT>

Desidero ringraziare il Relatore prof. Valter Mariani Primiani e i Correlatori prof. Franco Moglie e dr. Ing. Alfredo De Leo per aver contribuito alla stesura della tesi e aver reso possibile questo importante traguardo universitario.

Un ringraziamento speciale a mio padre che ha sempre creduto in me e a tutta la mia famiglia per il sostegno costante e incondizionato. Un ringraziamento anche a Melissa per il suo prezioso supporto e agli amici che sono stati al mio fianco.