



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

*Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica*

**Analisi delle condizioni ambientali all'interno di un  
veicolo mediante elaborazione di segnali acquisiti  
sperimentalmente da board ST SensorTile.box**

**Environmental conditions in vehicle cabin analysis  
based on processing of signals collected from an ST  
SensorTile.box board**

*Tesi di laurea di:*  
Alessandro Papa

*Relatore:*  
Prof. Susanna Spinsante

*Correlatori:*  
Ing. Valeria Bruschi  
Ing. Gianluca Ciattaglia

---

*Anno Accademico 2023-2024*

# Abstract

Il comfort e la sicurezza dei passeggeri sono aspetti fondamentali da valutare nel settore dei trasporti. Questo studio si è focalizzato sull'utilizzo della board ST SensorTile.box per monitorare e analizzare le vibrazioni e i campi magnetici all'interno di un'automobile. I dati sperimentali sono stati acquisiti tramite tre sensori: l'accelerometro, il giroscopio e il magnetometro, i quali sono stati collocati in tre diverse posizioni del sedile passeggero situato nel veicolo. I dati raccolti sono stati successivamente elaborati utilizzando codici specifici in Excel e MATLAB, permettendo di calcolare il livello di comfort dei passeggeri secondo la norma ISO 2631-1. I risultati ottenuti hanno mostrato come fattori ambientali, quali le condizioni stradali, e fattori legati al veicolo, come le sospensioni, influenzino la qualità del comfort percepito durante il viaggio.

Questo lavoro fornisce un contributo significativo alla comprensione delle dinamiche ambientali all'interno di un veicolo, evidenziando l'importanza dell'implementazione di sistemi di monitoraggio delle vibrazioni e dei campi magnetici per migliorare l'esperienza di viaggio dei passeggeri.

# Abstract

The comfort and safety of passengers are fundamental aspects to be evaluated in the transportation sector. This study focused on the use of the ST SensorTile.box board to monitor and analyze vibrations and magnetic fields inside a vehicle. Experimental data were acquired through three sensors: the accelerometer, the gyroscope, and the magnetometer, which were placed in three different positions on the passenger seat within the vehicle. The collected data were subsequently processed using specific codes in Excel and MATLAB, allowing for the calculation of the comfort level of passengers according to the ISO 2631-1 standard. The results obtained showed how environmental factors, such as road conditions, and vehicle-related factors, such as suspension, influence the quality of comfort perceived during the journey. This work provides a significant contribution to the understanding of environmental dynamics within a vehicle, highlighting the importance of implementing systems for monitoring vibrations and magnetic fields to improve the travel experience of passengers.

# Indice

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>INDICE</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1: STRUMENTI UTILIZZATI</b> .....	<b>7</b>
1.1 DESCRIZIONE DELLA SCHEDA SENSORTILE.BOX E DELLA SUA APPLICAZIONE.....	7
1.1.1 <i>Hardware della scheda</i> .....	7
1.1.2 <i>Applicazione ST Blue Sensor</i> .....	10
1.1.3 <i>Modalità operative della scheda</i> .....	13
1.2 DESCRIZIONE E FUNZIONAMENTO DEI SENSORI UTILIZZATI.....	15
1.2.1 <i>Le piattaforme inerziali (IMU)</i> .....	15
1.2.2 <i>Gli angoli di Eulero</i> .....	16
1.2.3 <i>L'accelerometro</i> .....	17
1.2.5 <i>Il magnetometro</i> .....	21
1.3 IL SOFTWARE MATLAB.....	22
<b>CAPITOLO 2: PROVE SPERIMENTALI</b> .....	<b>27</b>
2.1 DESCRIZIONE DELLE ACQUISIZIONI ESEGUITE CON LA SCHEDA.....	27
2.1.1 <i>Configurazione della scheda e della sua applicazione</i> .....	27
2.1.2 <i>Acquisizioni dei dati ricavati dai sensori</i> .....	29
2.1.3 <i>Elaborazione dei dati su Excel</i> .....	30
2.1.4 <i>Elaborazione dei dati in MATLAB</i> .....	31
<b>CAPITOLO 3: RISULTATI</b> .....	<b>42</b>
3.1 OUTPUT DELL'ELABORAZIONE SU EXCEL.....	42
3.2 OUTPUT DELL'ELABORAZIONE SU MATLAB.....	55
<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>61</b>
<b>BIGLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</b> .....	<b>63</b>



# Introduzione e scopo del lavoro

Uno degli aspetti più importanti nell'ambito dei trasporti è garantire un elevato livello di comfort e sicurezza per i passeggeri all'interno dei veicoli. Le condizioni ambientali, come la qualità dell'aria, la temperatura, e le vibrazioni, sono fondamentali per determinare il benessere dei passeggeri durante il viaggio. La norma ISO 2631-1, in particolare, stabilisce le linee guida per la valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni, definendo i criteri per misurarle e interpretarne gli effetti che possono influire negativamente sulla salute e sul comfort dei passeggeri.

Per monitorare e gestire queste condizioni ambientali, sono state sviluppate diverse tecniche e strumenti di misurazione. Tra queste, l'uso di sensori e algoritmi di elaborazione dei dati consente di rilevare e analizzare in tempo reale le vibrazioni e altri parametri ambientali. Queste tecniche permettono di identificare situazioni critiche e di adottare misure correttive per ottimizzare il comfort dei passeggeri.

Durante il mio tirocinio, ho avuto l'opportunità di lavorare su un progetto che si colloca in questo ambito. In particolare, ho sviluppato un sistema per il monitoraggio delle vibrazioni e dei campi magnetici all'interno della mia automobile, utilizzando la board ST SensorTile.box fornita dall'azienda STMicroelectronics. Questo sistema ha permesso di acquisire dati sperimentali provenienti da sensori come l'accelerometro, il giroscopio e il magnetometro, i quali sono stati successivamente elaborati con algoritmi specifici per determinare se è stato garantito un comfort soddisfacente durante il viaggio, fornendo così informazioni utili per migliorare l'esperienza dei passeggeri.

# Capitolo 1: Strumenti utilizzati

## 1.1 Descrizione della scheda SensorTile.box e della sua applicazione

### 1.1.1 Hardware della scheda

La board ST SensorTile.box (conosciuta anche con il part number STEVAL-MKSBOX1V1) è una piattaforma di sviluppo della multinazionale STMicroelectronics pensata per applicazioni IoT (Internet of Things), monitoraggio ambientale, fitness, e molto altro [1]. È un dispositivo compatto e versatile, contenuto all'interno di una piccola scatola di plastica, come si può vedere in Fig. 1.



*Figura 1: SensorTileBox*

È, inoltre, dotato di una vasta gamma di componenti hardware che lo rendono ideale per progetti che richiedono raccolta e analisi di dati in tempo reale (si veda Fig. 2). Essi comprendono:

- *Microcontrollore:*

- STM32L4R9ZI: un microcontrollore ultra-low-power basato su un core ARM Cortex-M4 con FPU, che opera a una frequenza di 120 MHz. Questo MCU ha 2 MB di memoria flash e 640 KB di RAM, il che lo rende adatto per l'esecuzione di algoritmi complessi e la gestione di una varietà di sensori. Inoltre, funge anche da RTC (Real Time Clock), consentendo la gestione accurata del tempo in applicazioni che richiedono sincronizzazione temporale.

- *Sensori Integrati:*

- IMU (Inertial Measurement Unit):

- LSM6DSOX: un accelerometro e giroscopio a 3 assi, con capacità di rilevamento del movimento e di attività.

- Magnetometro:

- LIS2MDL: un sensore magnetico a 3 assi per la misurazione dei campi magnetici.

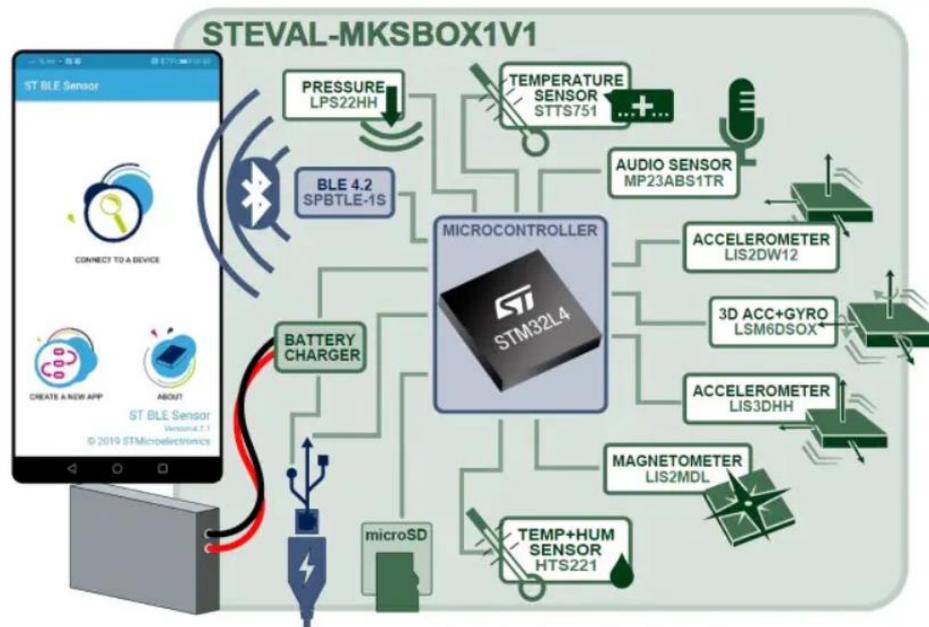
- Sensore di pressione:

- LPS22HH: un barometro digitale che misura la pressione atmosferica con alta precisione.

- Sensore di umidità:

- HTS221: un sensore utilizzato per rilevare l'umidità relativa.

- Sensore di temperatura:
  - STTS751: un sensore di temperatura digitale con alta precisione che può essere impiegato per rilevare la qualità dell'aria e per altre applicazioni di monitoraggio ambientale.
- Microfono digitale:
  - MP23ABS1: un microfono MEMS omnidirezionale ad alta prestazione per la registrazione e l'analisi del suono ambientale.
- *Connettività:*
  - Bluetooth Low Energy (BLE): il modulo Bluetooth integrato consente alla scheda di comunicare in modalità wireless con dispositivi mobili e altri sistemi IoT. In particolare, l'azienda ha sviluppato un'applicazione chiamata ST Blue Sensor che permette all'utente di collegarsi direttamente alla scheda, utilizzando proprio il Bluetooth da un proprio dispositivo mobile.
- *Alimentazione:*
  - Batteria ricaricabile: il dispositivo è alimentato da una batteria ricaricabile integrata, ma può essere alimentato anche tramite USB.
- *Interfacce:*
  - USB: il dispositivo include una porta USB per la ricarica, il debug e la programmazione.
  - GPIOs: ci sono diversi pin di I/O generico che possono essere utilizzati per collegare il dispositivo a sensori o attuatori esterni.



*Figura 2: componenti hardware della scheda*

Infine, la scheda è dotata anche di una microSD per la memorizzazione dei dati, e di tre led:

- *Led rosso*: sta ad indicare lo stato della batteria, se è acceso indica che quest'ultima è in fase di ricarica.
- *Led blu*: quando la scheda è in modalità accoppiamento o è connessa ad un dispositivo Bluetooth, il led blu lampeggia o rimane acceso, a seconda dello stato della connessione.
- *Led verde*: questo led può essere utilizzato per diverse funzioni, ma spesso segnala eventi particolari come il processo di reset della scheda, durante il quale lampeggia.

### 1.1.2 Applicazione ST Blue Sensor

Come accennato in precedenza, STMicroelectronics ha sviluppato un'applicazione per smartphone (o per qualsiasi altro device mobile monitorato di Bluetooth) chiamata ST Blue

Sensor (con il logo mostrato in Fig. 3), disponibile sia per Android che per iOS.



*Figura 3: icona dell'app ST Blue Sensor*

Questa applicazione consente di connettersi via Bluetooth a dispositivi basati su sensori, come la board ST SensorTile.box.

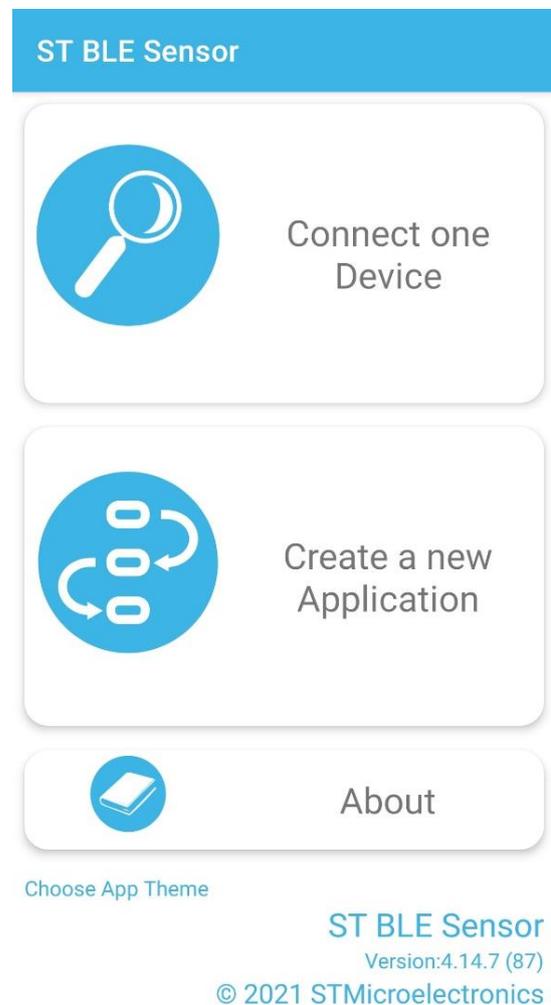
L'interfaccia dell'app è progettata per essere intuitiva, consentendo all'utente di monitorare in tempo reale vari parametri raccolti dai sensori presenti sulla board e di realizzare dei progetti applicativi in maniera veloce ed immediata [2].

Nel dettaglio, l'interfaccia presenta tre pulsanti (si veda la Fig. 4):

- *Connect One Device*: questo pulsante porta ad una schermata denominata “Device List”, nella quale sono presenti tutti i dispositivi ST accesi che si trovano nelle vicinanze e si può procedere in questo modo all'accoppiamento. Una volta che quest'ultimo viene effettuato, comparirà una dashboard che visualizza i dati raccolti dai sensori in tempo reale sotto forma di grafici o valori numerici, in base all'applicazione che è stata caricata nella scheda. Per esempio, può mostrare i dati dell'accelerometro, del giroscopio, del magnetometro, della temperatura,

dell'umidità, della pressione, e del microfono. Questi dati possono poi essere registrati ed esportati sotto forma di file CSV, che contengono valori come il TimeStamp, la data, l'ora, e i dati raccolti dai sensori utilizzati per ciascuna acquisizione.

- *Create a new Application:* tramite questo pulsante è possibile selezionare una delle applicazioni di default già presenti nell'interfaccia, oppure permette di crearne una nuova, personalizzata, dove l'utente può scegliere quali sensori monitorare e regolare le impostazioni di ciascuno, come la modalità di funzionamento (low power o high power), i filtri, la frequenza di campionamento e il fondo scala. Quando viene creata una nuova applicazione bisogna scegliere l'output per la visualizzazione dei dati: "File to SD Card", "Stream to USB" o "Stream to Bluetooth". Quest'ultima modalità è la più diffusa per via della sua praticità, ma può essere utilizzata solo nel caso in cui non si ha bisogno di una frequenza di campionamento troppo elevata. Una volta configurata, l'applicazione può essere salvata con un nome a piacere e potrà essere poi caricata sulla board.



**Figura 4: interfaccia dell'app**

- *About*: riporta semplicemente la versione dell'ST Blue Sensor installata e il link dell'azienda.

### **1.1.3 Modalità operative della scheda**

La SensorTile.box offre tre diverse modalità operative [3]. In ordine di difficoltà di utilizzo troviamo: l'entry mode, l'expert mode e la modalità pro (Fig. 5).

In modalità Entry l'utente può prendere familiarità con i sensori grazie a esempi preregistrati nell'app ST BLE Sensor. Gli esempi attualmente disponibili sono elencati di seguito ed ST ne aggiunge di nuovi man mano che vengono rilasciati gli aggiornamenti dell'app:

- Baby Crying Detector consente all'utente di configurare il sensore del microfono MP23ABS1 per rilevare eventi di voce umana come il pianto di un bambino, di inviare una notifica allo smartphone e attivare un led sulla scheda del sensore.
- Il barometro permette all'utente di configurare i sensori di temperatura STTS751, pressione LPS22HH e umidità HTS221 per monitorare informazioni ambientali in tempo reale sul proprio smartphone, oppure di raccogliere i dati e trasformarli in un grafico in rapporto al tempo, su un'apposita schermata.
- La bussola e la livella danno la possibilità di configurare i sensori dell'accelerometro e giroscopio LSM6DSOX e del magnetometro LIS2MDL per monitorare in tempo reale i dati rilevati dai sensori di orientamento e inclinazione, e di tracciare le informazioni nel tempo.
- L'applicazione per la registrazione dei dati consente all'utente di selezionare e configurare i sensori ambientali e di movimento appropriati per registrare, ad

esempio, le condizioni di trasporto e di conservazione a cui una determinata merce è soggetta nel tempo.

- Il pedometro permette all'utente di configurare l'accelerometro LSM6DSOX per monitorare la velocità della camminata e della corsa e di tracciare le informazioni nel tempo.
- Il monitoraggio delle vibrazioni consente all'utente di configurare l'accelerometro LSM6DSOX e di impostare la scheda affinché "impari" il normale funzionamento di apparecchiature motorizzate domestiche o industriali. Sarà quindi possibile monitorare le stesse apparecchiature per individuare eventuali vibrazioni anomale, al fine di effettuare la manutenzione predittiva dei macchinari.

In modalità Expert, l'utente può creare applicazioni personalizzate all'interno dell'app ST BLE Sensor senza scrivere il codice, ma selezionando e configurando i sensori, definendo risultati e trigger di eventi e applicando ulteriori algoritmi di elaborazione dei dati.

Infine, con la modalità Pro l'utente ha il pieno controllo del kit di sviluppo tramite il proprio IDE preferito e il debugger ST standard.

Questa modalità include un'interfaccia per la programmazione e il debug del firmware che consente agli sviluppatori professionisti di intraprendere lo sviluppo di codice firmware più complesso utilizzando l'STM32 Open Development Environment (STM32 ODE), che comprende un pacchetto di funzioni di intelligenza artificiale per sensori, con librerie per reti neurali.



*Figura 5: modalità operative della scheda*

## **1.2 Descrizione e funzionamento dei sensori utilizzati**

### **1.2.1 Le piattaforme inerziali (IMU)**

In questo sottocapitolo verranno analizzate le componenti principali di una piattaforma inerziale (IMU) e il loro funzionamento. Una piattaforma inerziale è un sistema che, tramite l'utilizzo di sensori, consente di stimare l'assetto, la posizione e le variazioni di velocità di un veicolo o di un qualsiasi corpo rigido, senza la necessità di riferimenti esterni [4]. I sensori che compongono una piattaforma inerziale sono l'accelerometro, il giroscopio e il magnetometro. Questi dispositivi acquisiscono dati fondamentali che vengono elaborati per fornire informazioni precise sull'orientamento e il movimento del corpo analizzato.

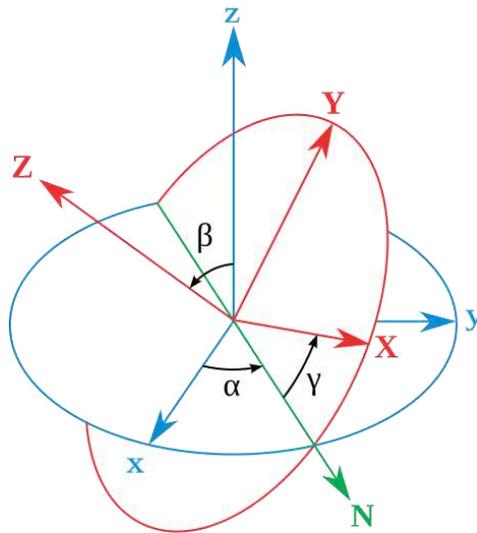
Le piattaforme inerziali sono utilizzate in un'ampia gamma di applicazioni, dai missili alle automobili, passando per dispositivi elettronici come gli smartphone. La loro capacità di

fornire dati precisi sull'orientamento e il movimento le rende indispensabili in molteplici settori, sia civili che militari.

### 1.2.2 Gli angoli di Eulero

Gli angoli di Eulero [5] descrivono la posizione di un sistema di riferimento  $XYZ$  solidale con un corpo rigido, attraverso una serie di rotazioni, a partire da un sistema di riferimento fisso  $xyz$  (Fig. 6). I due sistemi di riferimento coincidono nell'origine. Se i piani  $xy$  e  $XY$  sono distinti, si intersecano lungo una retta che passa per l'origine, chiamata linea dei nodi ( $N$ ). Se i piani coincidono, si definisce la linea dei nodi  $N$  come l'asse  $X$ . Gli angoli di Eulero sono i tre angoli seguenti:

- $\alpha$  è l'angolo tra l'asse  $x$  e la linea dei nodi. Detto angolo di precessione, o rollio, è definito in  $[0, 2\pi[$  oppure in  $[-\pi, \pi[$  ;
- $\beta$  è l'angolo tra gli assi  $z$  e  $Z$ . Detto angolo di nutazione, o beccheggio, è definito in  $[0, -\pi]$  oppure in  $[-\pi/2, \pi/2]$ ;
- $\gamma$  è l'angolo tra la linea dei nodi e l'asse  $X$ . Detto angolo di rotazione propria, o imbardata, è definito in  $[0, 2\pi[$  oppure in  $[-\pi, \pi[$  ; Dal punto di vista dell'algebra lineare il passaggio dal sistema di riferimento fisso  $xyz$  a quello ruotato  $XYZ$  equivale ad operare un cambiamento di base, ovvero passare da una base  $(\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3)$  (con  $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$ , rispettivamente i versori degli assi  $x, y$  e  $z$ ) ad una  $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$  (ovvero i versori degli assi  $X, Y$  e  $Z$ ) tramite una matrice di cambiamento di base  $A$ . La matrice  $A$  è una matrice quadrata  $3 \times 3$  ortogonale che rappresenta una rotazione nello spazio. Gli angoli di Eulero permettono di rappresentare  $A$  in forma relativamente semplice come moltiplicazione di tre matrici di rotazione lungo i tre assi  $x, y$  e  $z$ .



**Figura 6: rappresentazioni degli angoli di Eulero**

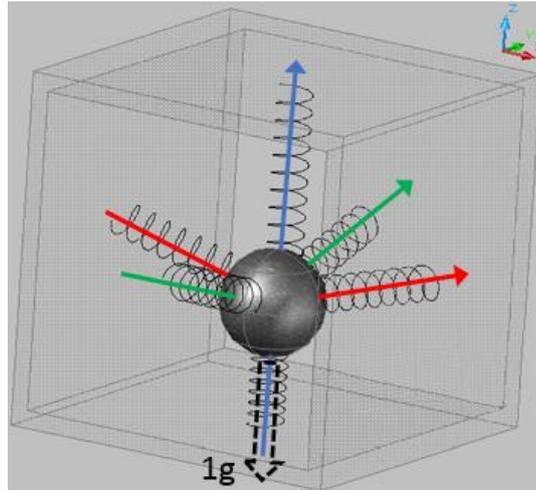
### 1.2.3 L'accelerometro

L'accelerometro è un dispositivo in grado di rilevare e misurare un'accelerazione (cioè una variazione di velocità nel tempo) e di convertirla in un segnale elettrico.

Il principio di funzionamento della maggior parte degli accelerometri si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad un'accelerazione [6].

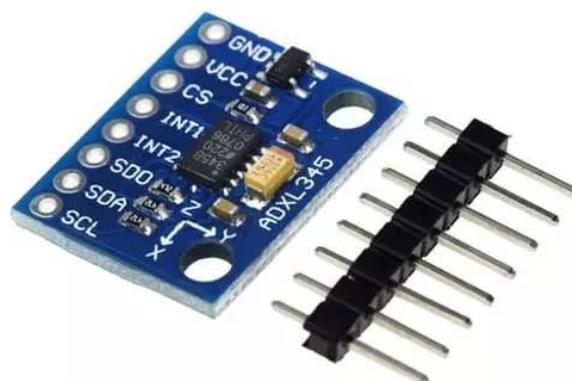
Possiamo immaginarlo come un cubo con al suo interno una sfera sospesa tramite molle fissate alle facce del cubo (Fig. 7). La sfera non è perfettamente centrata ma orientata verso il basso a causa della forza di gravità.

Per come è realizzato, è in grado di misurare sia l'accelerazione statica (ad esempio quando viene ruotato sul posto) che l'accelerazione dinamica (ad esempio quando viene fissato su un'automobile in movimento).



**Figura 7: principio di funzionamento dell'accelerometro**

Negli ultimi anni l'uso degli accelerometri è cresciuto notevolmente, espandendosi oltre le tradizionali applicazioni in campo scientifico e aerospaziale per trovare impiego anche in ambito domestico, industriale e professionale. Questa diffusione ha portato alla diversificazione delle tipologie di accelerometri, con decine di varianti sviluppate (esempio in Fig. 8), ciascuna con caratteristiche funzionali e costruttive specifiche per soddisfare le diverse esigenze dei vari campi di applicazione.

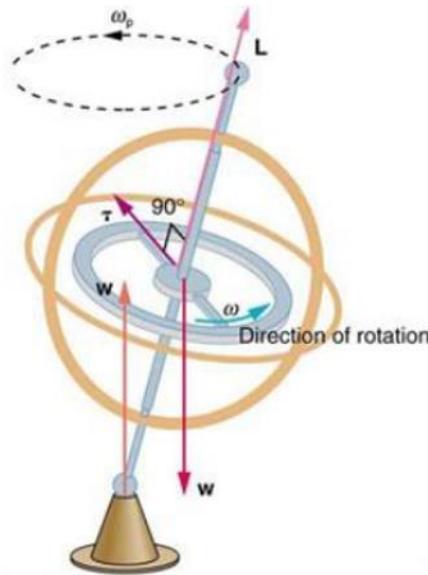


**Figura 8: esempio di sensore accelerometrico in versione MEMS**

### 1.2.4 Il giroscopio

Il giroscopio [7] è un dispositivo fisico in grado di muoversi sul proprio asse per misurare la velocità di rotazione sugli assi  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Viene utilizzato per misurare il moto rotazionale di un corpo. Il principio [8] su cui si basa il giroscopio è la legge di conservazione del momento angolare, secondo cui il momento angolare di un sistema rimane invariato (costante) a meno che non intervenga su di esso una forza esterna.

Sostanzialmente è costituito da un rotore a forma di toroide che ruota intorno al suo asse.



*Figura 9: funzionamento del giroscopio*

Quando il rotore è in rotazione il suo asse tende a mantenersi parallelo a sé stesso e ad opporsi ad ogni tentativo di cambiare il suo orientamento (Fig. 9). L'equazione fondamentale che descrive un qualunque sistema rigido in rotazione è:

$$M = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I\alpha$$

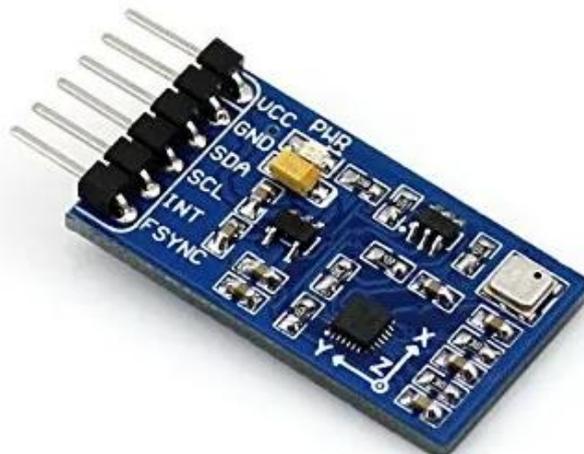
dove:

- $M$  è il vettore del momento meccanico
- $L$  è il vettore del momento angolare
- $I$  è il momento di inerzia
- $\omega$  è il vettore della velocità angolare
- $\alpha$  è il vettore dell'accelerazione angolare

Da questa equazione deriva che se viene applicato un momento meccanico  $M$  perpendicolarmente all'asse di rotazione, quindi perpendicolare anche ad  $L$ , si sviluppa una forza perpendicolare sia a  $M$  che ad  $L$ . Questo fenomeno dà origine a un moto chiamato di precessione, la cui velocità angolare ( $\Omega_p$ ) è data da:

$$\mathbf{M} = \Omega_p \times \mathbf{L}$$

Il giroscopio (esempio in Fig. 10) è stato impiegato nella progettazione e realizzazione di una vasta gamma di oggetti, dai più semplici, come le biciclette, ai dispositivi più complessi, come il telescopio spaziale Hubble. Gli effetti giroscopici si manifestano anche nei cuscinetti di un'automobile durante una sterzata, oppure nei movimenti rapidi del disco rigido di un computer.



*Figura 10: esempio di sensore giroscopico in versione MEMS*

### 1.2.5 Il magnetometro

Il magnetometro è uno strumento utilizzato per misurare sia la magnetizzazione di un materiale come un ferro magnete, ma anche la direzione, la forza o la relativa variazione di un campo magnetico in una determinata posizione. Il vettore induzione magnetica è rappresentato dalla seguente equazione:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

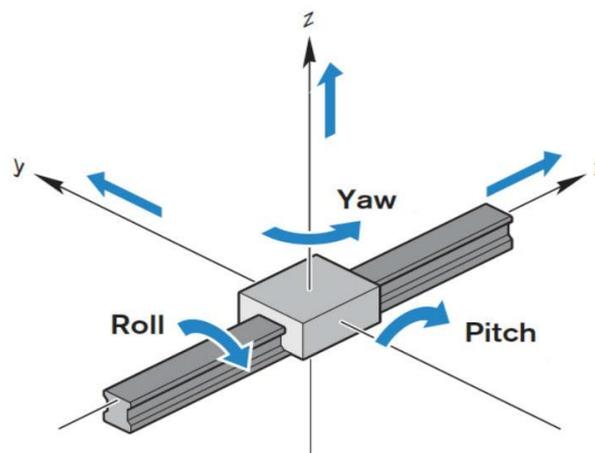
Dove:

-H = campo magnetico

- $\mu_r$  = permeabilità magnetica relativa del mezzo

- $\mu_0$  = permeabilità magnetica nel vuoto

I campi magnetici sono grandezze vettoriali caratterizzate da forza e direzione. Il campo magnetico, secondo il Sistema Internazionale (SI), si misura in Tesla (T), ma in alcuni contesti può essere misurato anche in gauss (Ga). Grazie alla rilevazione del campo magnetico terrestre e ai dati gravitazionali forniti da un accelerometro triassiale integrato, questi sensori avanzati permettono di determinare con grande precisione gli angoli di orientamento sui tre assi principali: rollio, beccheggio e imbardata (Fig. 11).



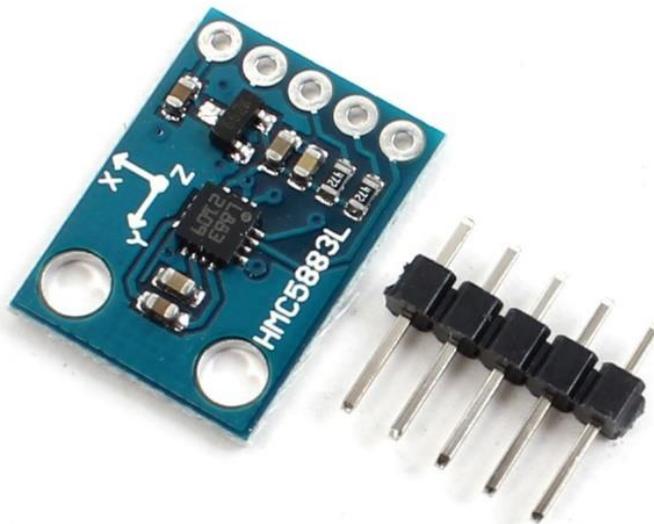
*Figura 11: rollio, beccheggio e imbardata*

Esistono diversi tipi di magnetometri [9], ciascuno progettato per applicazioni specifiche.

La Fig. 12 mostra un magnetometro di tipo MEMS con il proprio circuito di condizionamento del segnale.

Questi sensori vengono utilizzati in moltissimi settori, come ad esempio l'archeologia; infatti, l'argilla dei mattoni acquisisce una propria magnetizzazione in seguito alla cottura.

Inoltre, i magnetometri vengono utilizzati per monitorare i rischi legati all'estrazione del carbone e nel settore militare.



*Figura 12: esempio di sensore magnetometrico in versione MEMS*

### **1.3 Il Software MATLAB**

MATLAB è un linguaggio di programmazione di alto livello e un ambiente di calcolo numerico usato principalmente per l'analisi dei dati, la visualizzazione e lo sviluppo di algoritmi. È stato sviluppato come sistema cross platform dall'azienda MathWorks [10].

Uno dei punti di forza di MATLAB è la sua capacità di lavorare con grandi array di dati, il che lo rende uno strumento efficiente per l'analisi e la modellazione dei dati. Supporta vari formati di dati, tra cui immagini, video, audio e fogli di calcolo.

MATLAB offre anche un ambiente di sviluppo integrato, con il controllo del codice sorgente, il debug e il test, e funzionalità come l'evidenziazione del codice e l'indentazione automatica. Dispone inoltre di toolbox avanzati per domini specifici, come l'elaborazione dei segnali, l'apprendimento automatico e i sistemi di controllo.

Il software [11] utilizza tre tipi principali di file:

- M-file: file con estensione .m usati per scrivere sequenze di comandi come script e funzioni. Questi file ASCII possono essere scritti utilizzando qualsiasi editor di testo, anche se MATLAB include un editor integrato che supporta funzionalità di correzione (debugging).
- MAT-file: file binari che permettono di salvare i nomi e i valori delle variabili generate durante una sessione di lavoro. Sono file binari e pertanto possono essere letti soltanto dal software che li ha creati.
- File dati: file ASCII generati da altri programmi che MATLAB può utilizzare per analizzare i dati.

MATLAB permette di gestire un gran numero di dati trattandoli come singole variabili chiamate array e di svolgere calcoli complessi con poche righe di codice.

La programmazione in MATLAB si contraddistingue per l'uso di variabili predefinite (per esempio il valore di  $\pi$  greco) e variabili personalizzate dall'utente. Inoltre, sono presenti strumenti per lavorare con vettori, matrici e per generare grafici dei dati, rendendo più semplice e veloce l'analisi e la visualizzazione dei risultati.

L'interfaccia principale del software è composta da molte finestre, in particolare quelle

principalmente usate sono quattro:

- *Command Window*
- *Workspace*
- *Current directory*
- *Command history*

La Command Window [12] è una finestra nella quale è possibile digitare comandi supportati e visualizzare a schermo in tempo reale i risultati. Il Workspace è lo spazio di lavoro contenente le variabili dichiarate, mentre la finestra Current Directory permette di esplorare il contenuto delle cartelle sul proprio disco. Nella finestra Command History sono elencati tutti i comandi digitati visti di recente, divisi per ora e data.

MATLAB consente anche di rappresentare graficamente funzioni e dati memorizzati in vettori e matrici [13]. Per farlo si utilizza il comando plot, con la sintassi:

*plot (vettorex, vettorey, 'opzioni')*

dove:

- *vettorex* e *vettorey* sono i vettori di dati (rispettivamente ascisse e ordinate dei punti).
- *opzioni* è una stringa opzionale che definisce il tipo di colore, il simbolo e lo stile della linea del grafico.

Per rendere il grafico più chiaro e leggibile, è possibile aggiungere vari abbellimenti. I principali sono:

- una griglia, tramite il comando “*grid on*”.
- il nome degli assi x e y tramite corrispettivamente “*xlabel('nome dell'asse x')*” e “*ylabel('nome dell'asse y')*”.
- un titolo tramite “*title('nome grafico')*”.

- una legenda con il comando “*legend*”.

È anche possibile creare grafici multipli con una singola chiamata.

MATLAB traccia automaticamente i diversi grafici utilizzando un elenco predefinito di colori, modificabile dall'utente, per distinguere ciascuna funzione. Ad esempio, è possibile specificare il colore, lo stile della linea e i marcatori dei punti con il seguente comando:

*plot (vettorex, vettorey, 'colore-stile-marcatore')*

Uno strumento molto utile per l'analisi dei dati è l'analisi di Fourier, che permette di scomporre un segnale complesso nelle sue componenti sinusoidali con diverse frequenze, ampiezze e fasi. Per vettori di campioni l'analisi di Fourier è realizzata usando la trasformata discreta di Fourier (DFT). La FFT (Fast Fourier Transform) è un algoritmo efficiente per calcolare la DFT. Per una sequenza di ingresso di lunghezza N si ha:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(k-1)(n-1)} \quad \text{per } k = 1, 2, \dots, N$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}(k-1)(n-1)} \quad \text{per } n = 1, 2, \dots, N$$

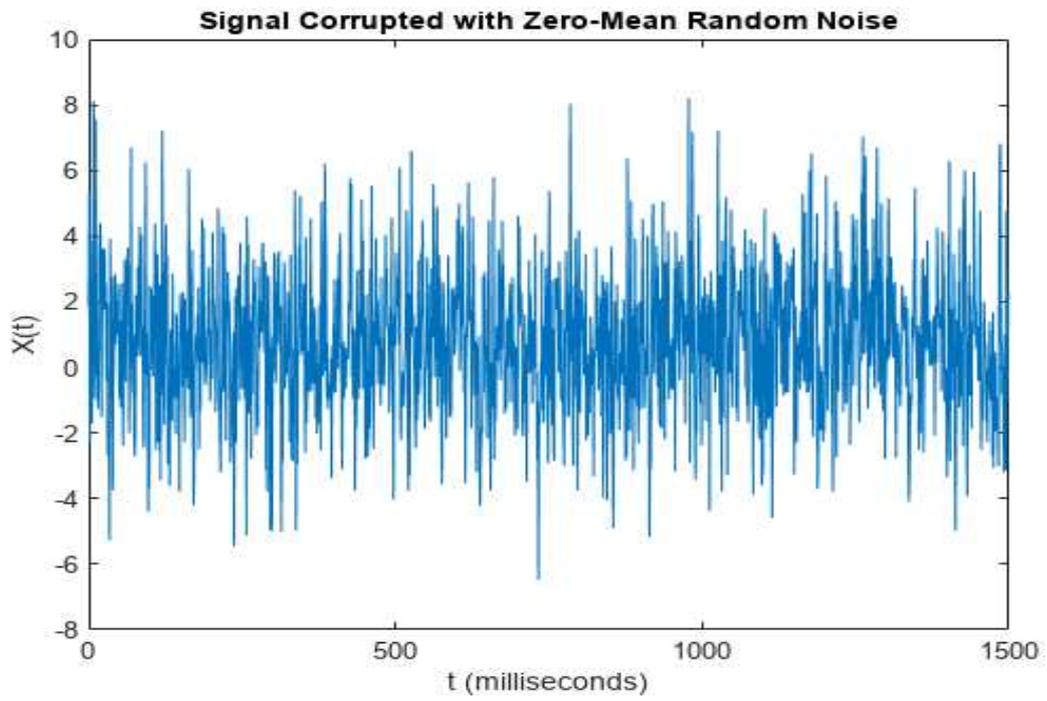
La sommatoria è estesa da 1 a N perché in MATLAB i vettori ammettono solo indici maggiori di zero. Se  $x(n)$  è reale la precedente equazione può anche essere scritta in termini di seni e coseni.

Il comando per eseguire la FFT di un segnale x su MATLAB è:

$$Y = \text{fft}(x, n)$$

dove Y rappresenta la variabile nella quale viene salvato il risultato della trasformata, e n il numero di punti della FFT desiderato. Se n viene omissso, il software esegue la FFT utilizzando un numero di punti pari alla lunghezza del vettore x. In altre parole, se x contiene N campioni, la FFT viene eseguita su N punti.

Un esempio grafico della FFT è mostrato in Fig. 13.



*Figura 13: FFT di un segnale affetto da rumore*

# Capitolo 2: Prove sperimentali

## 2.1 Descrizione delle acquisizioni eseguite con la scheda

In questo capitolo verranno descritte le operazioni svolte per acquisire e poi elaborare i dati ricavati dai sensori della scheda SensorTileBox, eseguite seguendo le indicazioni della norma ISO 2631-1 relative alle vibrazioni all'interno di un veicolo ed altre tecniche. Le misurazioni si sono concentrate sulle vibrazioni percepite in diverse posizioni del sedile all'interno dell'abitacolo e sui campi magnetici generati dall'autovettura, al fine di determinare il livello di comfort per i passeggeri.

### 2.1.1 Configurazione della scheda e della sua applicazione

Dopo aver caricato la board tramite un cavo micro USB, si è utilizzata l'applicazione ST Blue Sensor per collegarla allo smartphone.

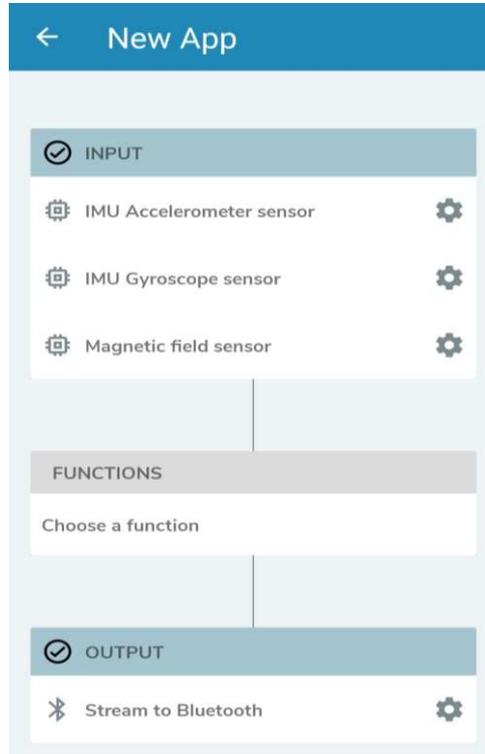
Una volta completato l'accoppiamento tramite un PIN predefinito fornito dall'azienda, la scheda è stata configurata in modalità Expert. È stata quindi creata una nuova applicazione, nella quale solo i sensori necessari per le acquisizioni sono stati selezionati, vale a dire l'accelerometro, il giroscopio e il magnetometro.

- **Accelerometro:** si è selezionato “*IMU Accelerometer sensor*” e impostato la power mode su alte prestazioni. L'Output Data Rate (ODR), che rappresenta la frequenza di campionamento, è stato impostato a 52 Hz, con un fondo scala di 2g, dove g indica l'accelerazione gravitazionale terrestre.

- **Giroscopio:** per il giroscopio, si è scelto “*IMU Gyroscope sensor*”, impostando anche in questo caso la power mode su alte prestazioni, con un ODR di 52 Hz e un fondo scala di 2000 dps (gradi al secondo).
- **Magnetometro:** per il magnetometro, si è selezionato il “*Magnetic field sensor*”, impostando la power mode su alta risoluzione, con un ODR di 50 Hz.

Nella sezione “*FUNCTIONS*”, come si può vedere in Fig. 14, non è stata selezionata nessuna funzione aggiuntiva, poiché non necessarie per le misurazioni.

Infine, come modalità di output, si è scelto "Stream to Bluetooth" per avere un'interfaccia di visualizzazione dei dati in tempo reale direttamente sullo smartphone. La scelta di impostare i tre sensori con una frequenza di campionamento di circa 50 Hz è dovuta al fatto che l'output tramite Bluetooth non consente di selezionarne una superiore.

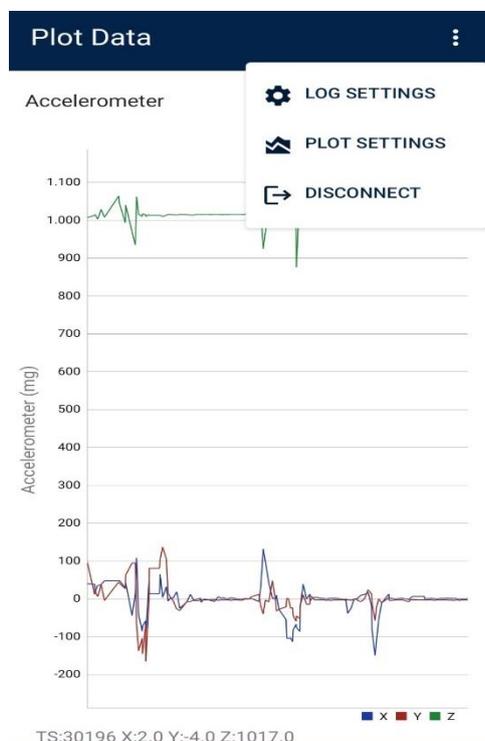


**Figura 14:** impostazione dell'applicazione creata in modalità Expert

## 2.1.2 Acquisizioni dei dati ricavati dai sensori

Dopo aver configurato l'applicazione, essa è stata salvata con un nome specifico per poter eseguire le acquisizioni. In particolare, sono state effettuate tre acquisizioni di circa 90 secondi all'interno dell'automobile personale: la prima posizionando la scheda sulla seduta del sedile del passeggero, la seconda sullo schienale e la terza sul poggiatesta. In tutte e tre le posizioni, la scheda è stata fissata mediante un nastro biadesivo per garantire che rimanesse ferma.

Per iniziare le misurazioni, è bastato selezionare il tasto "Plot Data" dall'interfaccia dell'applicazione caricata sulla board, il quale consente la visualizzazione in tempo reale dei dati raccolti dai sensori tramite grafici nel tempo (si veda Fig. 15). Successivamente, è stata avviata la registrazione dei dati cliccando prima su "LOG SETTINGS", presente nel menù delle impostazioni dell'interfaccia, e poi su "START LOGGING".



**Figura 15: interfaccia "Plot Data"**

A questo punto, è stata avviata l'auto e, dopo circa 90 secondi, la marcia è stata interrotta per interrompere la registrazione. Queste operazioni sono state ripetute per ogni acquisizione.

In questo modo, si sono ottenuti dei file che sono stati salvati in automatico sulla MicroSD della scheda.

### 2.1.3 Elaborazione dei dati su Excel

Tramite un pulsante presente nell'interfaccia dell'applicazione ST Blue Sensor, è stato possibile esportare i dati ottenuti dalle acquisizioni dei sensori su Excel, andandoli a scrivere in un file con estensione CSV (Comma-Separated Values) per iniziare l'elaborazione.

Per prima cosa, i dati acquisiti sono stati convertiti da mg a g per l'accelerometro (dove  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ), da dps (gradi al secondo) a rad/s per il giroscopio, e da mGa a Ga per il magnetometro (dove Ga sta per Gauss).

Queste conversioni sono state necessarie per uniformare le unità di misura a valori fisici standard, facilitando così il confronto e l'interpretazione dei risultati.

Per l'accelerometro, è stato calcolato anche il vettore della magnitudine dell'accelerazione combinando le tre componenti  $a_x$ ,  $a_y$  e  $a_z$  tramite la ben nota formula:

$$\text{Magnitudine: } \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

In questa maniera si sono ottenuti tre vettori di ampiezza dell'accelerazione, uno per ogni acquisizione, ai quali è stato poi sottratto il valore 1g per rimuovere la componente gravitazionale e considerare solo la componente di movimento.

Successivamente, sono stati calcolati i valori medi e le deviazioni standard dei dati raccolti nelle direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$  per ogni sensore e per ciascuna delle tre acquisizioni. Questo calcolo

è stato effettuato sia sull'intero intervallo temporale di circa 90 secondi, che suddividendo i dati in 10 “sottofinestre” temporali. Per il calcolo dei valori medi, è stata utilizzata la formula:

$$=MEDIA(“prima cella”: “ultima cella”)$$

mentre per le deviazioni standard:

$$=DEV.ST.P(“prima cella”: “ultima cella”)$$

Infine, poiché indicato nella norma di riferimento, sono stati calcolati i valori efficaci, in inglese “Root Mean Square” (RMS), tramite la formula:

$$=RADQ(SOMMA(“prima cella”: “seconda cella”) / “numero dei campioni”)$$

In questo caso, le celle contengono i valori delle accelerazioni  $a_x$ ,  $a_y$  e  $a_z$  al quadrato.

Questa formula è stata applicata sia considerando l'intero intervallo temporale di durata delle acquisizioni, che individuando 5 “sottofinestre” della durata di circa 18 secondi.

#### **2.1.4 Elaborazione dei dati in MATLAB**

Nell'ambiente MATLAB, è stato sviluppato un codice che permette di monitorare le ampiezze (magnitudo) dei vettori delle accelerazioni generate dalle acquisizioni dell'accelerometro e di calcolare l'indice di comfort (comfort index) per la valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni meccaniche e ai campi magnetici, seguendo le linee guida della norma ISO 2631-1.

Il codice riportato di seguito è quello relativo all'acquisizione dei dati raccolti dall'accelerometro della SensorTile.Box posizionata sulla seduta del passeggero:

```

% Grafico dei dati dell'accelerometro (in g) nel tempo della seduta del passeggero
figure;
hold on;
load('HostTimeStamp_accelerometro_seduta_passeggero.mat');
load('X_accelerometro_seduta_passeggero.mat');
load('Y_accelerometro_seduta_passeggero.mat');
load('Z_accelerometro_seduta_passeggero.mat');
Time = HostTimeStamp_accelerometro_passeggero.Time;
X_g = X_accelerometro_passeggero.X;
Y_g = Y_accelerometro_passeggero.Y;
Z_g = Z_accelerometro_passeggero.Z;
plot(Time, X_g, 'r', 'DisplayName', 'X (g)');
plot(Time, Y_g, 'g', 'DisplayName', 'Y (g)');
plot(Time, Z_g, 'b', 'DisplayName', 'Z (g)');

xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Valori (g)');
title('Dati accelerometro seduta passeggero X, Y, Z');
legend;
grid on;

% Grafico della magnitudine dell'accelerazione con una soglia a +/-0.3g
figure;
hold on;
load('Magnitudine_accelerazione_seduta_passeggero.mat');
Acceleration = Magnitudine_accelerazione_seduta_passeggero.Acceleration;
plot(Time/1000, Acceleration);
% Aggiunta delle soglie
yline(-0.3, 'k', '-0.3 g', 'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LineWidth', 2);
yline(0.3, 'k', '0.3 g', 'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LineWidth', 2);
ylim([-0.6, 0.6]);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Accelerazione (g)');
title("Magnitudine dell'accelerazione seduta passeggero");
grid on;

% Calcolo della frequenza di campionamento
Fs = 52; % Frequenza di campionamento in Hz

% Calcolo della FFT
N = length(X_g); % Definizione del numero dei campioni N
f = (0:N-1)*(Fs/N);
f = f(1:floor(N/2)); % Definizione della frequenza f
X_fft = fft(X_g);
Y_fft = fft(Y_g);
Z_fft = fft(Z_g);

X_fft = X_fft(1:floor(N/2));
Y_fft = Y_fft(1:floor(N/2));
Z_fft = Z_fft(1:floor(N/2));

% Frequenze per la visualizzazione delle curve di pesatura
frequencies = logspace(log10(0.1), log10(100), 1000); % Frequenze da 0.1 Hz a 100 Hz

% Calcola le curve di pesatura
[Wd, Wk] = creaCurvePesatura(frequencies);

% Visualizzazione delle curve di pesatura Wd e Wk
figure;
semilogx(frequencies, 20*log10(Wd), 'r', 'DisplayName', 'Wd');
hold on;
semilogx(frequencies, 20*log10(Wk), 'b', 'DisplayName', 'Wk');
xlabel('Frequenza (Hz)');
ylabel('Ampiezza (dB)');
title('Curve di Pesatura Wd e Wk');
legend;
grid on;
set(gca, 'XScale', 'log', 'XMinorGrid', 'on', 'YMinorGrid', 'on');

```

```

% Applicazione delle curve di pesatura ai segnali di accelerazione
Wd_interp = interp1(frequencies, Wd, f, 'linear', 'extrap');
Wk_interp = interp1(frequencies, Wk, f, 'linear', 'extrap');
X_fft_pesato = X_fft .* Wd_interp';
Y_fft_pesato = Y_fft .* Wd_interp';
Z_fft_pesato = Z_fft .* Wk_interp';

% Antitrasformata nel dominio del tempo tramite iFFT
a_x_pesato = ifft(X_fft_pesato, 'symmetric');
a_y_pesato = ifft(Y_fft_pesato, 'symmetric');
a_z_pesato = ifft(Z_fft_pesato, 'symmetric');

% Calcolo degli RMS
X_rms = sqrt(mean(a_x_pesato.^2));
Y_rms = sqrt(mean(a_y_pesato.^2));
Z_rms = sqrt(mean(a_z_pesato.^2));

% Calcolo del comfort index
comfort_index = sqrt(X_rms^2 + Y_rms^2 + Z_rms^2);

% Funzione per creare le curve di pesatura Wd e Wk
function [Wd, Wk] = creaCurvePesatura(frequencies)
% Coefficienti per la curva di pesatura Wd (per accelerazioni orizzontali)
Wd_frequencies = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5,
    6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 100];

Wd_gains = [-31.5, -21.5, -16.5, -12.5, -9.5, -6.5, -4.5, -2.5, -1.5, 0, -1,
    -3.5, -6, -7.5, -9, -11, -12, -13, -13.5, -20, -23, -26, -28, -37];

% Interpolazione dei dati per ottenere la curva Wd
Wd = interp1(Wd_frequencies, Wd_gains, frequencies, 'linear', 'extrap');
Wd = 10.^(Wd / 20); % Conversione da dB a guadagno lineare

% Coefficienti per la curva di pesatura Wk (per accelerazioni verticali)
Wk_frequencies = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 2.5, 3,
    3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 100];

Wk_gains = [-37.5, -27.5, -22.5, -18.5, -15.5, -12.5, -10.5, -8.5, -7.5, -6,
    -5.4, -3.5, -2, -1, 0, 0.2, 0.3, 0.3, 0.3, 0.1, 0, -3.5, -7.5, -10, -12, -21];

% Interpolazione dei dati per ottenere la curva Wk
Wk = interp1(Wk_frequencies, Wk_gains, frequencies, 'linear', 'extrap');
Wk = 10.^(Wk / 20); % Conversione da dB a guadagno lineare
end

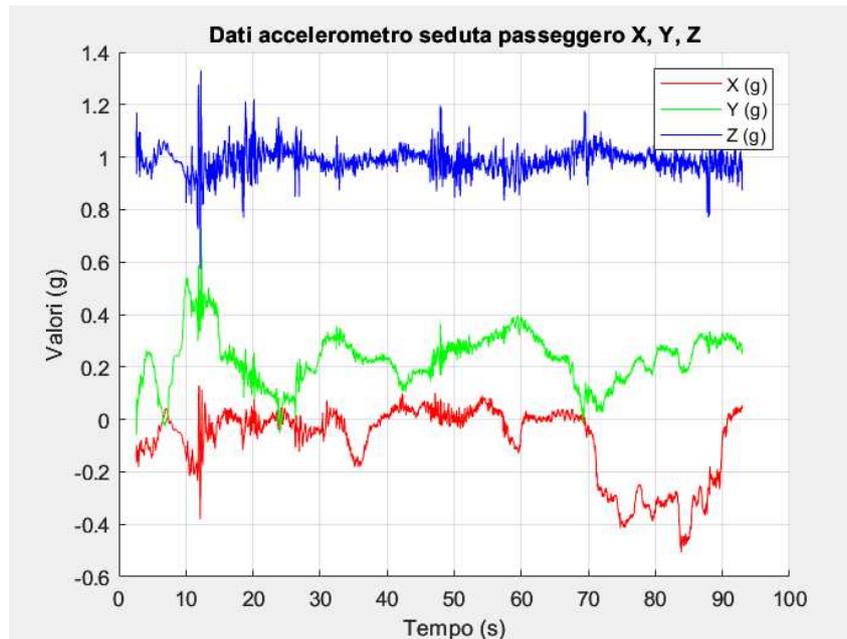
```

Questo stesso codice è stato replicato anche per i dati raccolti dagli altri due sensori e per le altre acquisizioni effettuate sullo schienale e sul poggiatesta, rispettivamente, importando nel software i dati corrispondenti e assegnando loro nomi specifici.

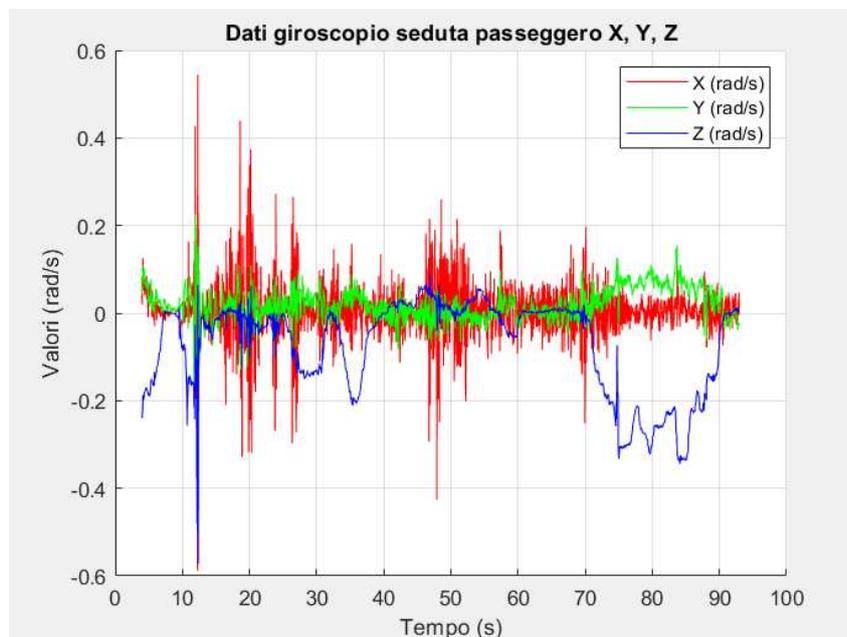
Inizialmente, sono stati caricati i dati relativi alla colonna del tempo (HostTimeStamp) e delle componenti x, y e z dei file Excel su MATLAB, salvandoli con nome per poterli

richiamare in seguito tramite il comando “load” nello script. Successivamente, si sono rappresentate le serie dati in un unico grafico utilizzando il comando “plot”, con l’HostTimeStamp sulle ascisse e le componenti  $x$ ,  $y$  e  $z$  sulle ordinate.

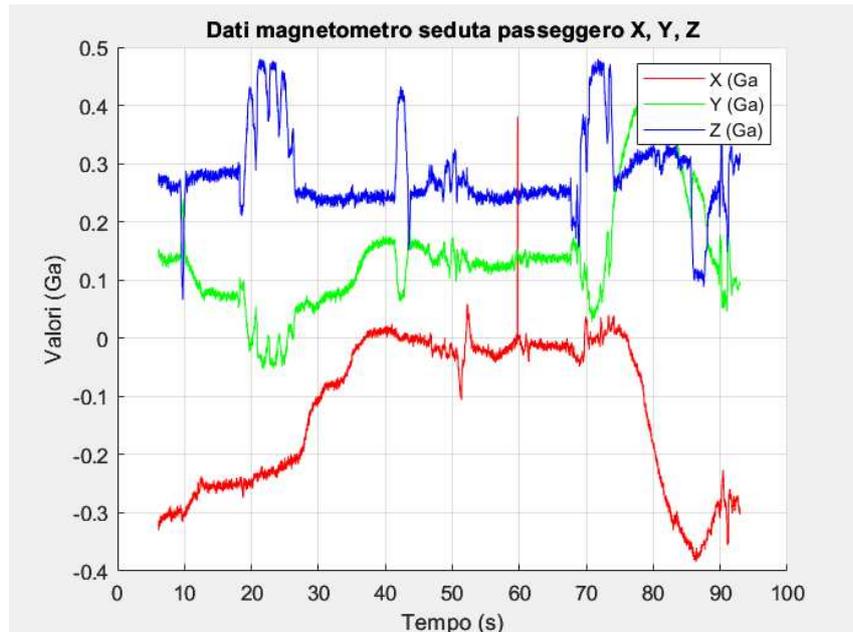
I grafici ottenuti sono riportati nelle Fig. 16-24.



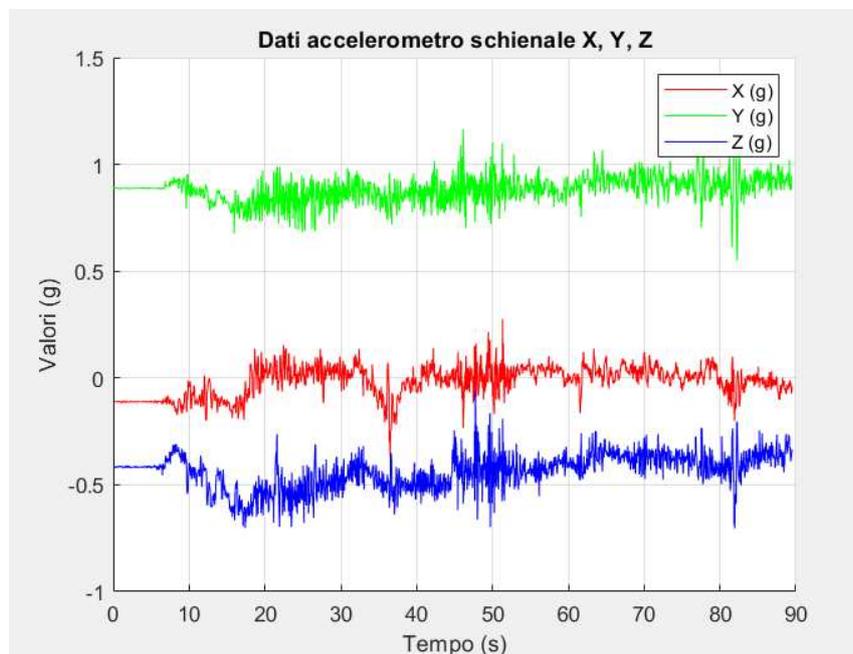
**Figura 16:** grafico delle componenti di accelerazione  $x$ ,  $y$  e  $z$  della scheda posizionata sulla seduta del passeggero



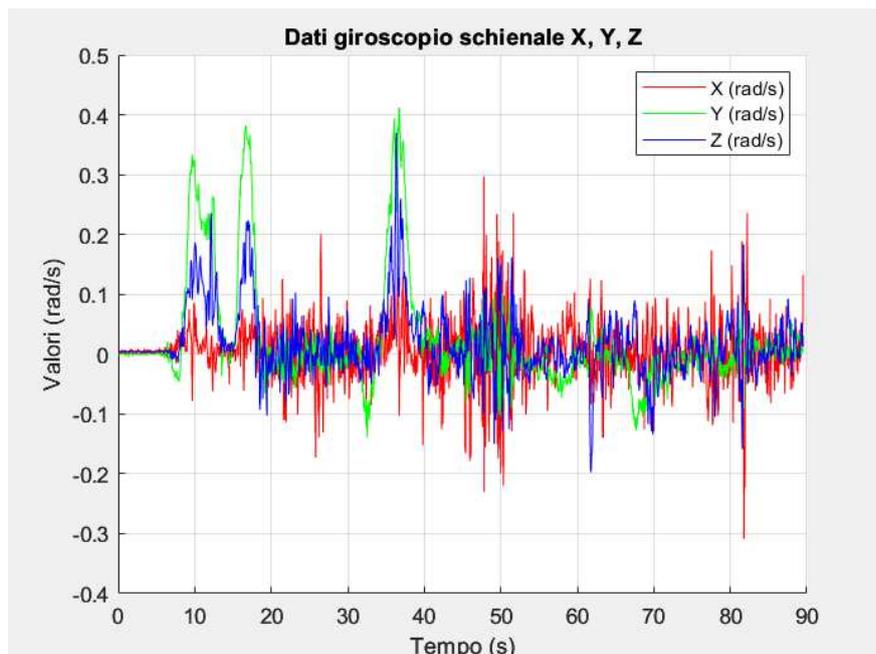
**Figura 17:** grafico delle componenti di velocità angolare  $x$ ,  $y$  e  $z$  della scheda posizionata sulla seduta del passeggero



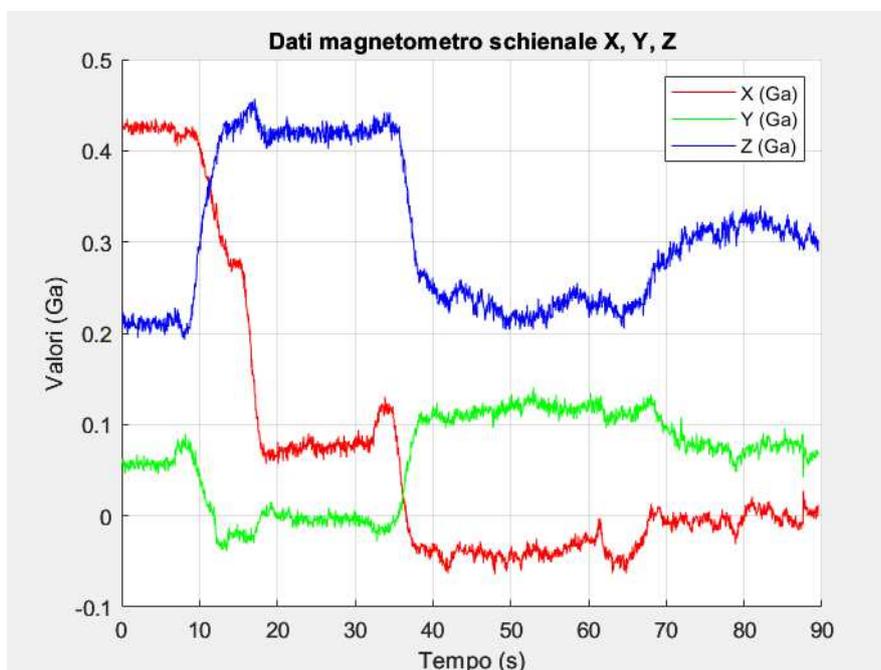
**Figura 18:** grafico delle componenti magnetiche x, y e z della scheda posizionata sulla seduta del passeggero



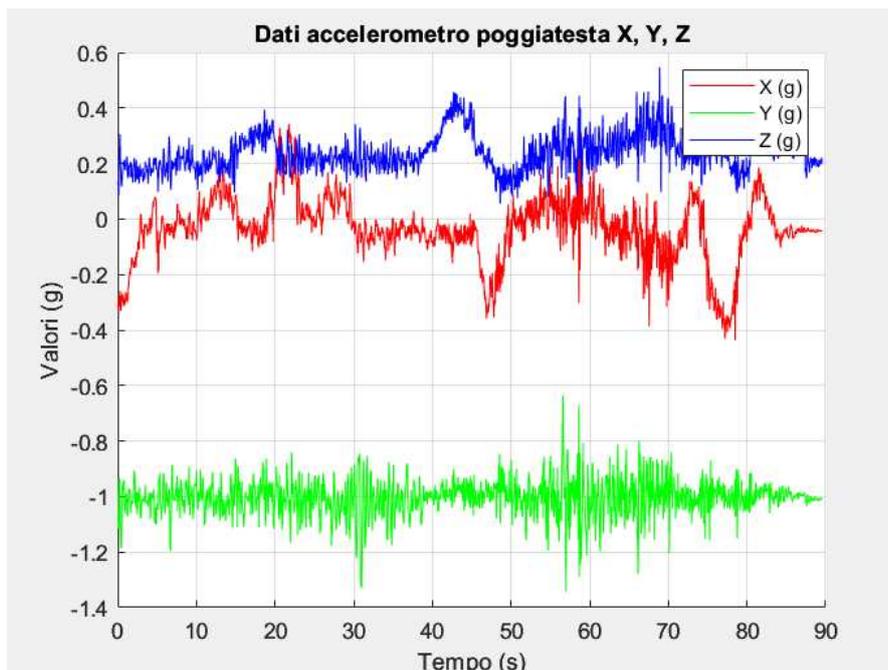
**Figura 19:** grafico delle componenti di accelerazione x, y e z della scheda posizionata sullo schienale



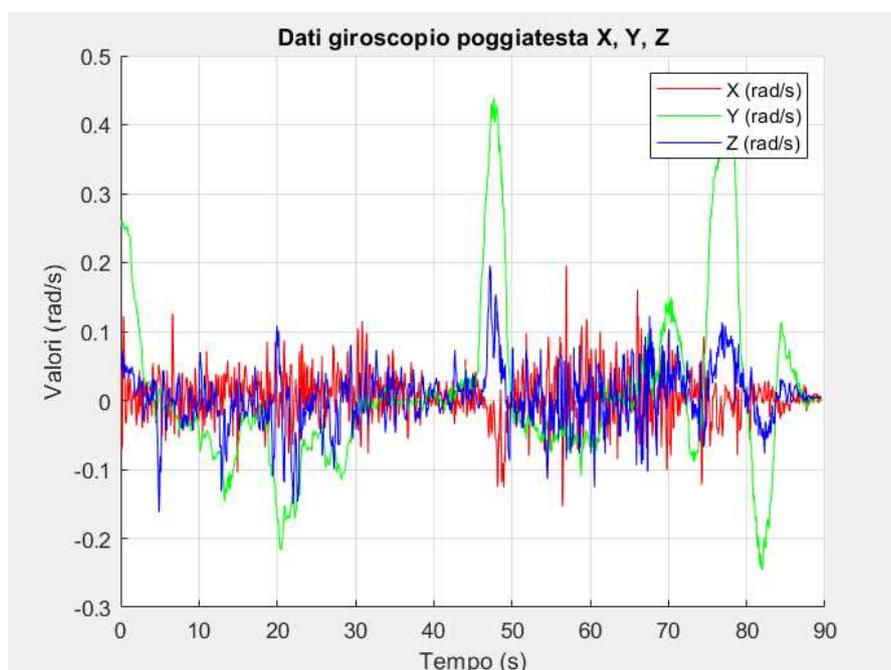
**Figura 20:** grafico delle componenti di velocità angolare  $x$ ,  $y$  e  $z$  della scheda posizionata sullo schienale



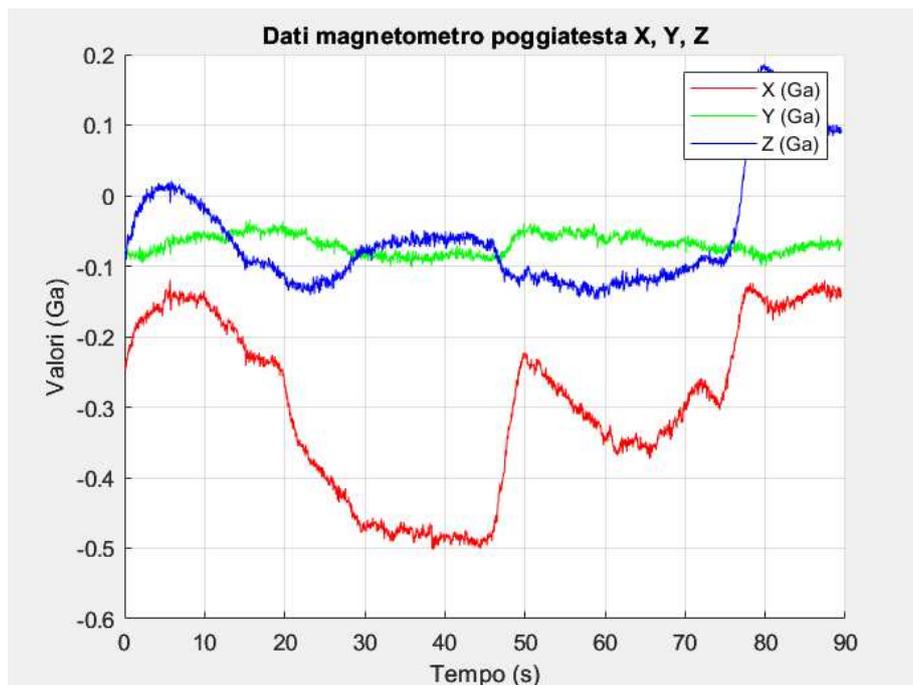
**Figura 21:** grafico delle componenti magnetiche  $x$ ,  $y$  e  $z$  della scheda posizionata sullo schienale



*Figura 22: grafico delle componenti di accelerazione x, y e z della scheda posizionata sul poggiatesta*



*Figura 23: grafico delle componenti di velocità angolare x, y e z della scheda posizionata sul poggiatesta*



*Figura 24: grafico delle componenti magnetiche x, y e z della scheda posizionata sul poggiatesta*

Dai grafici dell'accelerometro, si può osservare che, in tutte e tre le posizioni analizzate, gli assi assumono valori ben distinti tra loro. Nel caso della seduta del sedile passeggero, la prevalenza della componente lungo l'asse z suggerisce che la scheda è stata posizionata orizzontalmente. Al contrario, nello schienale si nota una predominanza della componente lungo l'asse y con valori prossimi a 1, mentre nel poggiatesta la stessa componente y assume valori prossimi a -1, indicando che la scheda è stata posizionata in verticale, ma con un'inversione dell'orientamento rispetto allo schienale.

Da i grafici del giroscopio si può notare che le componenti angolari hanno sempre valori prossimi a zero, indicando che la board pur non essendo rigidamente fissata al sedile, non ha subito rotazioni significative. Nel caso della seduta del passeggero, quelle più evidenti si sono avute sull'asse x (curva rossa) e sull'asse z (curva blu). Queste ultime probabilmente

nascono dal cambiamento di direzione del veicolo, mentre quelle in asse  $x$  sono probabilmente dovute alle vibrazioni subite dal sedile.

Nello schienale e nel poggiatesta, invece, le curve sono molto più sovrapposte, indicando che le sollecitazioni angolari subite nelle tre direzioni dal sensore sono molto simili.

Infine, i grafici del magnetometro presentano componenti lungo i tre assi che rilevano variazioni significative, con curve che si incrociano in determinati istanti. In particolare, le curve delle componenti verticali mostrano variazioni più contenute rispetto alle altre, indicando una minor presenza di disturbi magnetici.

In questo codice, sono poi state implementate due tecniche utilizzate per determinare il livello di comfort percepito da un eventuale passeggero presente a bordo dell'automobile, e risultante delle grandezze rilevate dai sensori.

La prima tecnica [14] per rilevare le perturbazioni del comfort è chiamata "*threshold detection*" (rilevazione della soglia), e come suggerisce il nome, si basa sul confronto tra il picco del segnale e una soglia predefinita per rilevare un evento. Le analisi si concentrano sul vettore della magnitudine dell'accelerazione, che viene utilizzato per differenziare il tipo di evento, ad esempio se l'evento è stato generato da una forte accelerazione o una forte decelerazione. Essenzialmente, è stato importato su MATLAB il vettore della magnitudine dell'accelerazione calcolato precedentemente su Excel, impostando una soglia di  $\pm 0,3$  g, adatta alle variazioni di velocità dei veicoli di medie dimensioni come le automobili. Nel caso di veicoli più grandi che possono avere delle accelerazioni e decelerazioni più intense, come ad esempio gli autobus, si può impostare la soglia a  $\pm 0,5$  g. Per inserire la soglia sul codice, si è utilizzato il comando "*ylines*", in modo da visualizzarla sull'asse delle ordinate ed essa è stata poi rappresentata con l'andamento del vettore della magnitudine dell'accelerazione sullo stesso grafico.

La seconda tecnica utilizzata è basata sulla norma precedentemente menzionata, che propone una valutazione del comfort tramite il valore RMS delle accelerazioni ponderate, indicato con  $a_w$ . Questo valore è calcolato utilizzando la seguente equazione:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt}$$

dove T è il tempo per la valutazione dell'RMS e  $a_w(t)$  rappresenta l'accelerazione ponderata.

Secondo la norma, il comfort index è definito come:

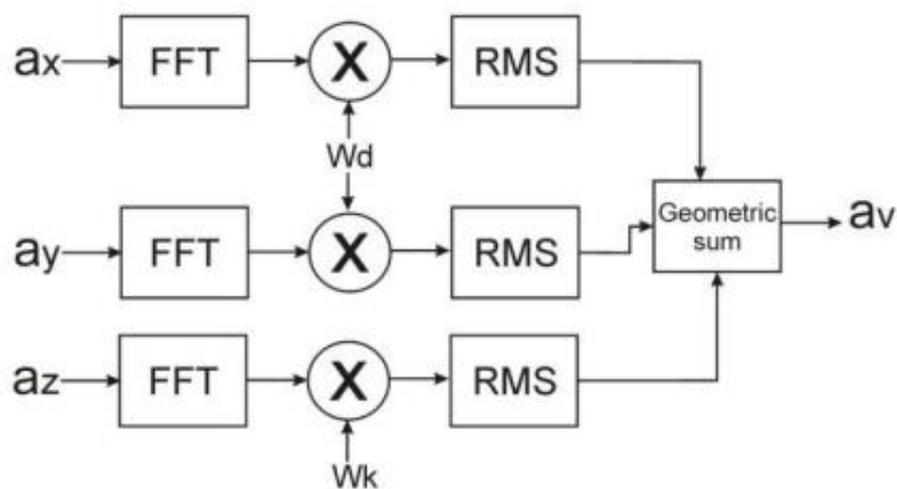
$$a_v = \sqrt{k_x^2 \cdot a_{w_x}^2 + k_y^2 \cdot a_{w_y}^2 + k_z^2 \cdot a_{w_z}^2}$$

dove le  $a_w$  sono i valori degli RMS delle accelerazioni ponderate lungo gli assi x, y e z, mentre i fattori k indicano il contributo delle accelerazioni ponderate in ciascuna direzione.

In questo caso, sono stati presi uguali ad 1 per considerare interamente il contributo di ogni asse.

Per calcolare il comfort index sulla base della definizione data, si è seguito lo schema in Fig.

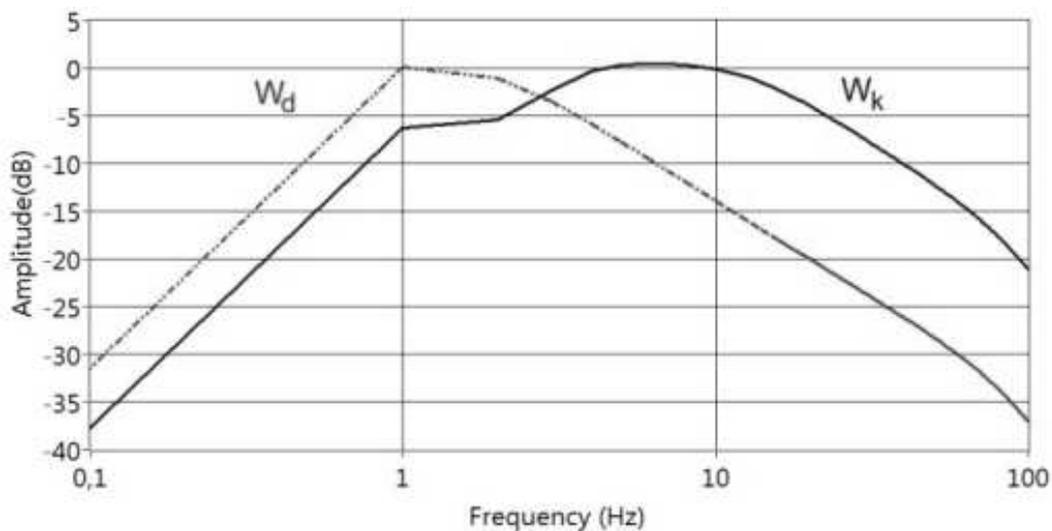
25.



**Figura 25: schema utilizzato per il calcolo dell'indice di comfort**

Quindi per prima cosa, è stata calcolata la FFT (Fast Fourier Transform) delle accelerazioni  $a_x$ ,  $a_y$  e  $a_z$  impostando la frequenza di campionamento (FS) a 52 Hz (per il magnetometro a 50 Hz), come d'accordo con l'impostazione dell'ODR del sensore.

Poi è stata creata una funzione chiamata "creaCurvePesatura" che restituisce le curve di ponderazione  $W_d$  e  $W_k$  mostrate nella Fig. 26, così da poterle moltiplicare alle accelerazioni nel dominio della frequenza. La curva  $W_d$  viene utilizzata per le accelerazioni orizzontali (laterali e longitudinali), mentre la curva  $W_k$  per le accelerazioni verticali.



**Figura 26: grafico logaritmico delle curve di pesature  $W_k$  e  $W_d$**

Una volta eseguita la moltiplicazione, si è riportato il risultato nel dominio del tempo tramite l'iFFT (Antitrasformata di Fourier) per ottenere le accelerazioni ponderate  $a_w(t)$ .

A questo punto, è stato calcolato l'RMS per ognuna delle tre accelerazioni ponderate e si sono sommati i valori per ottenere il comfort index.

Infine, ciascuno di questi codici è stato salvato in un file con un nome specifico e con estensione .m, in quanto si tratta di script MATLAB.

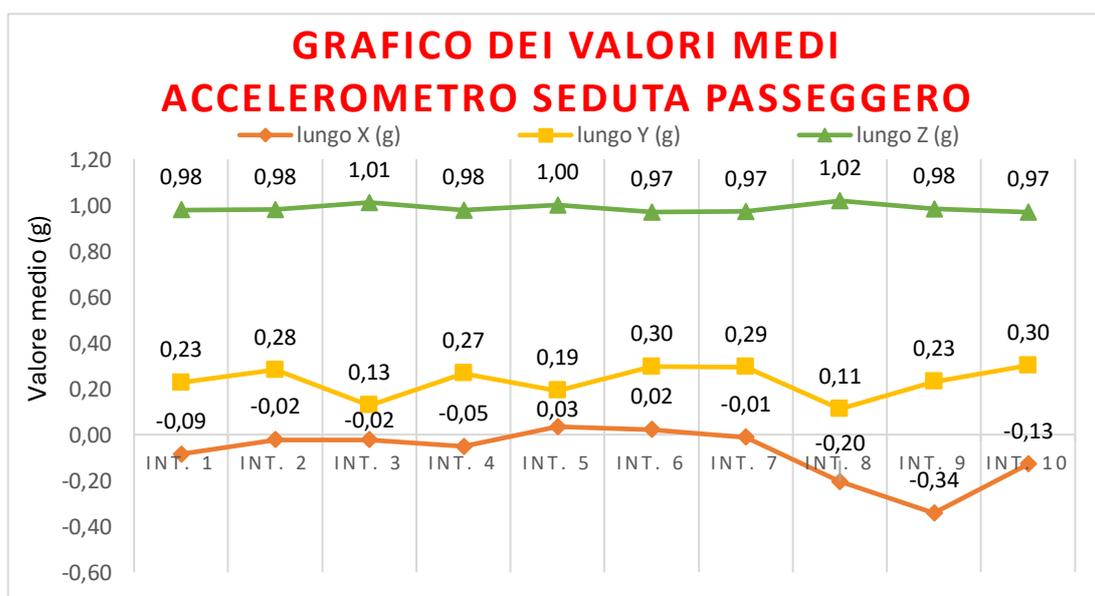
# Capitolo 3: Risultati

In questo capitolo sono stati riportati i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati eseguita su Excel e MATLAB.

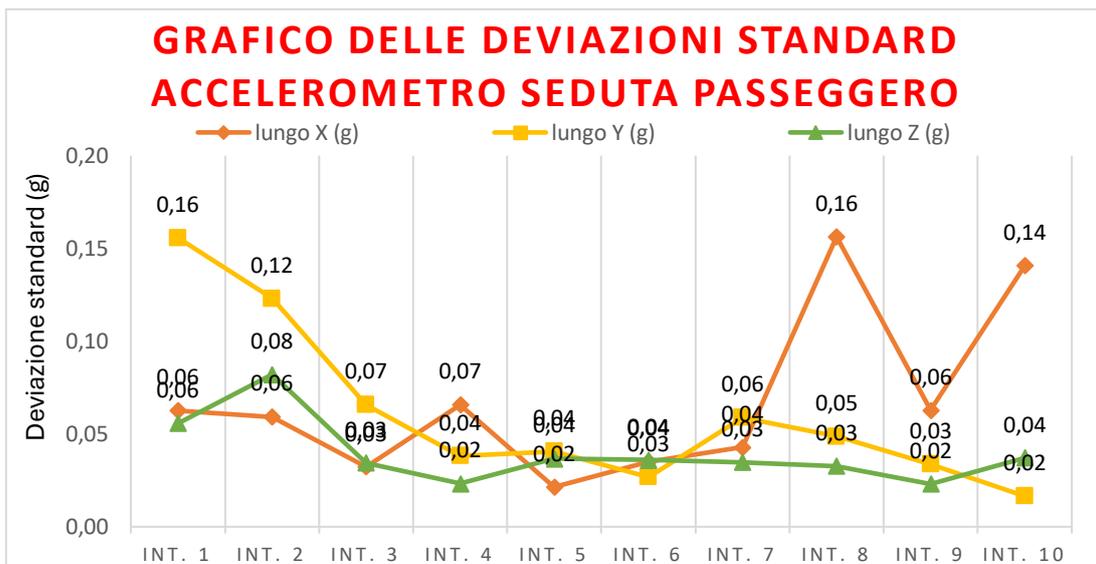
## 3.1 Output dell'elaborazione su Excel

L'elaborazione dei dati raccolti dai sensori mediante Excel, in particolare, il calcolo dei valori medi, delle deviazioni standard e dei valori efficaci (RMS), è stata significativa per ottenere una rappresentazione grafica chiara dell'andamento delle misurazioni.

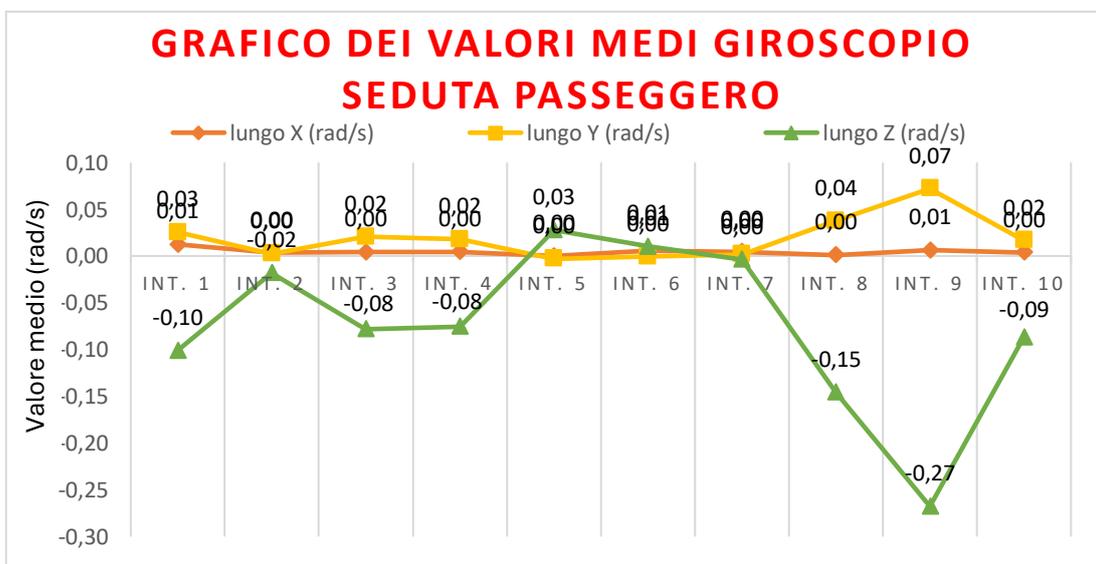
Per quanto riguarda i valori medi e le deviazioni standard dei dati, è stato creato un grafico per ciascuna delle tre acquisizioni effettuate e per ogni sensore utilizzato. In queste rappresentazioni, sono stati riportati i valori ottenuti nelle 10 "sottofinestre" temporali, ciascuna della durata di circa 9 secondi. I grafici sono presentati nelle Fig. 27-44.



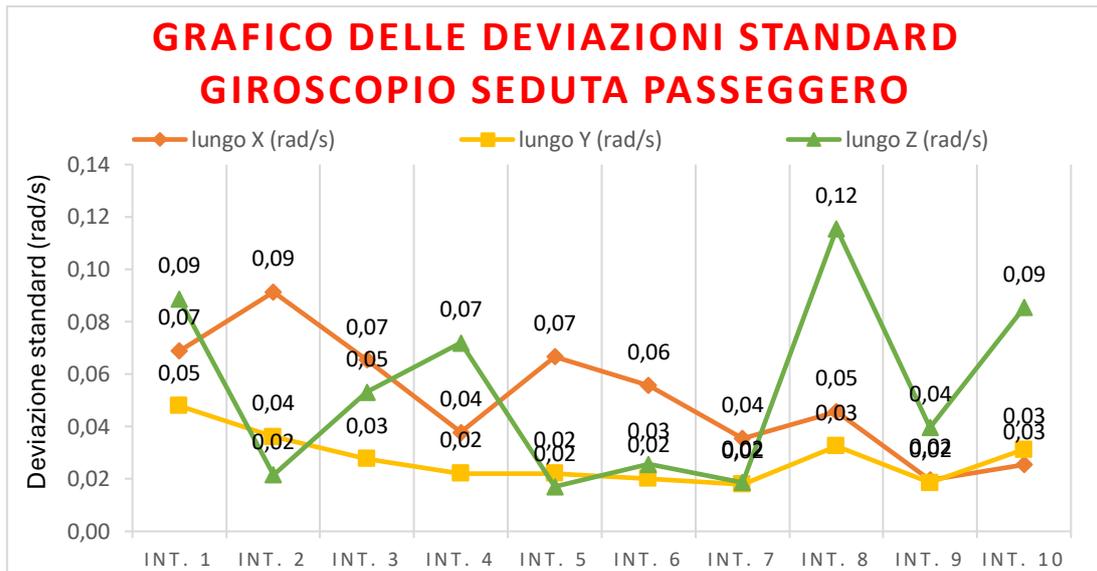
*Figura 27: grafico dei valori medi delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero*



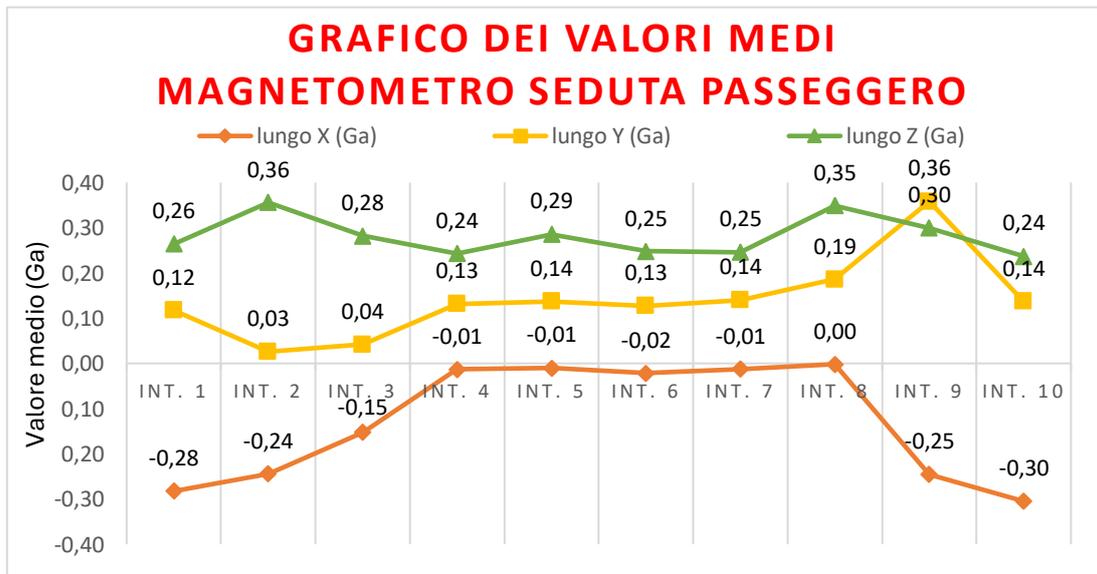
**Figura 28:** grafico delle deviazioni standard delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



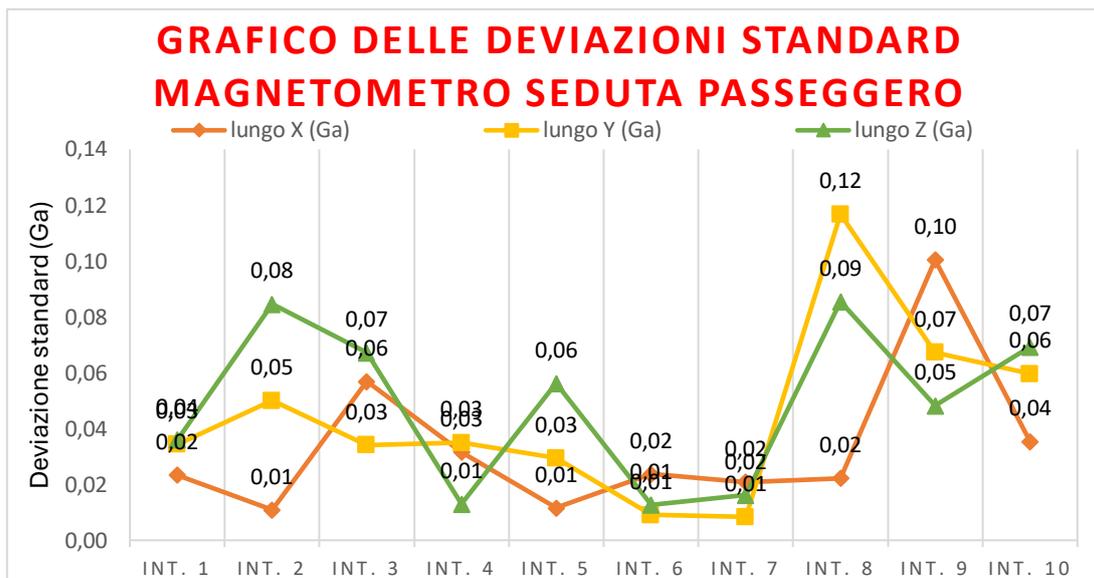
**Figura 29:** grafico dei valori medi delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



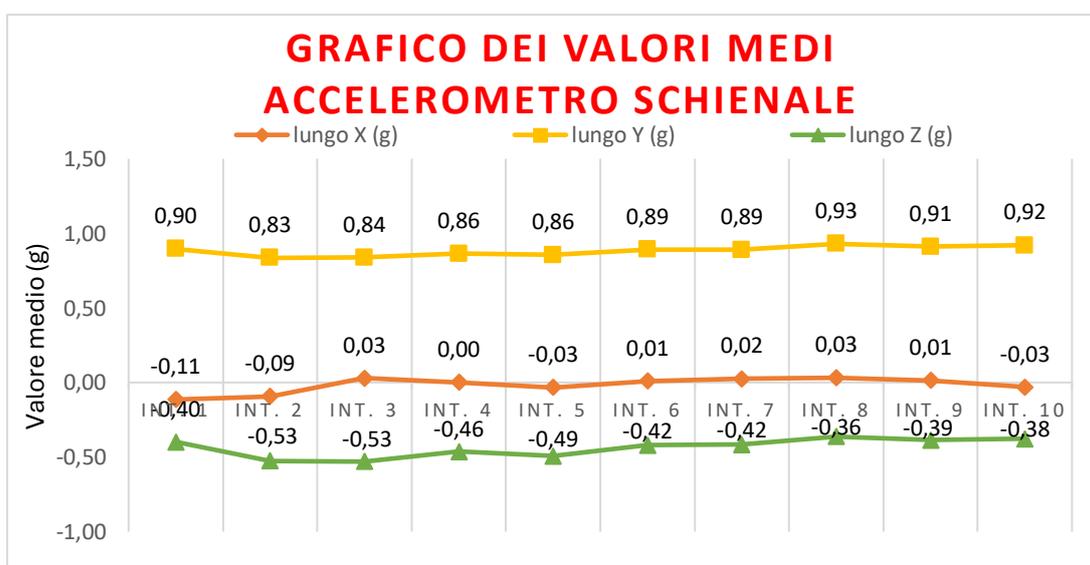
**Figura 30:** grafico delle deviazioni standard delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



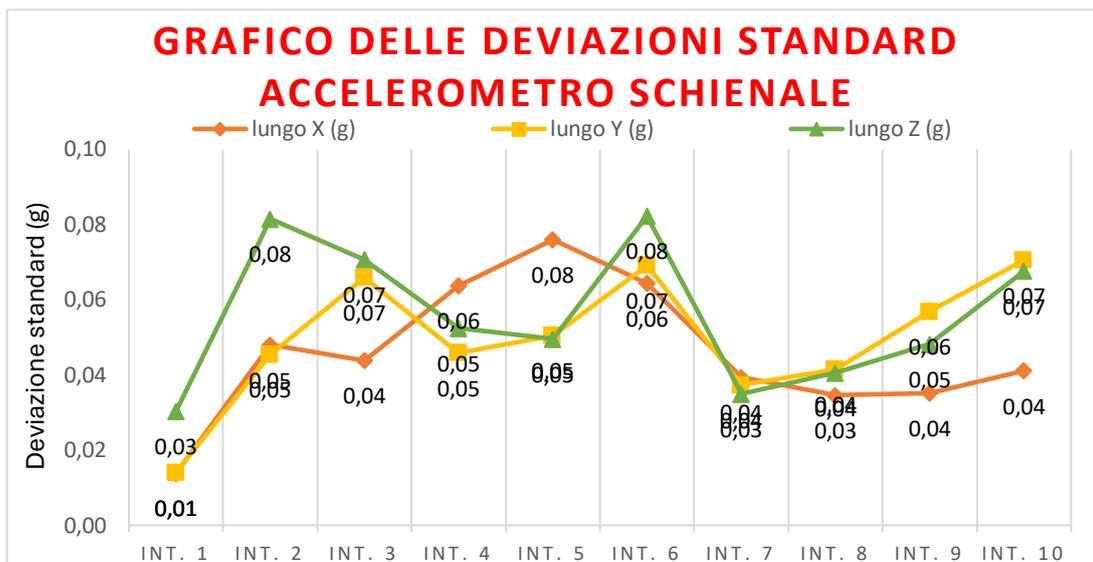
**Figura 31:** grafico dei valori medi delle componenti magnetiche x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



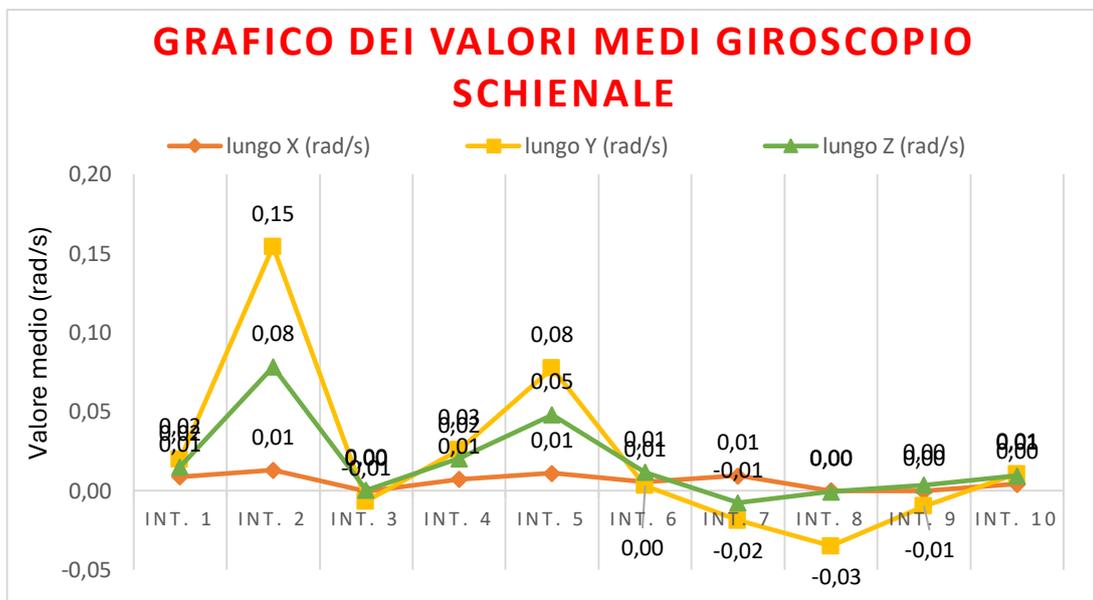
*Figura 32: grafico delle deviazioni standard delle componenti magnetiche x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero*



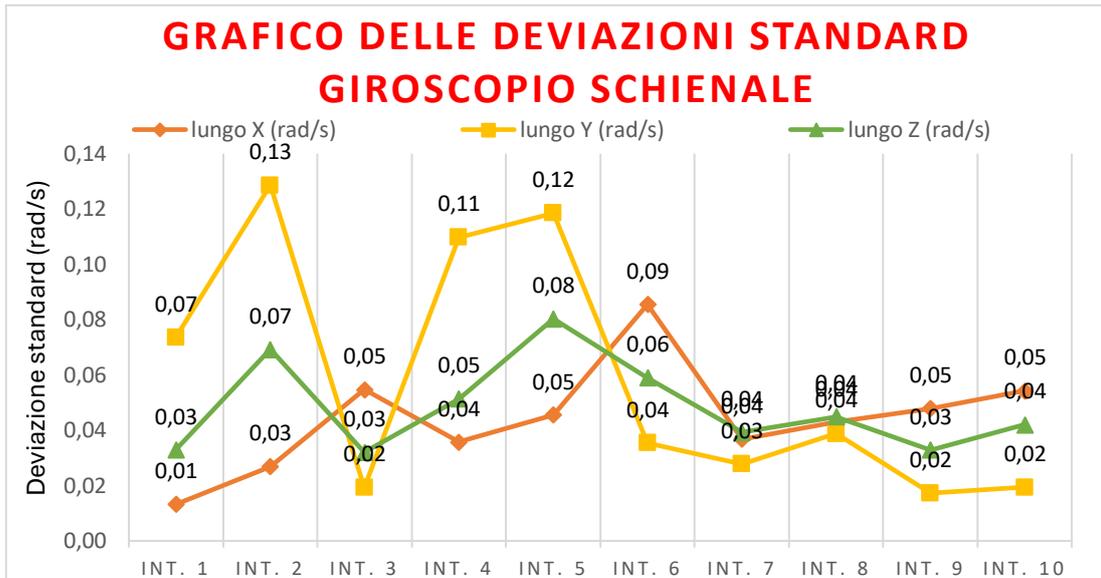
*Figura 33: grafico dei valori medi delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale*



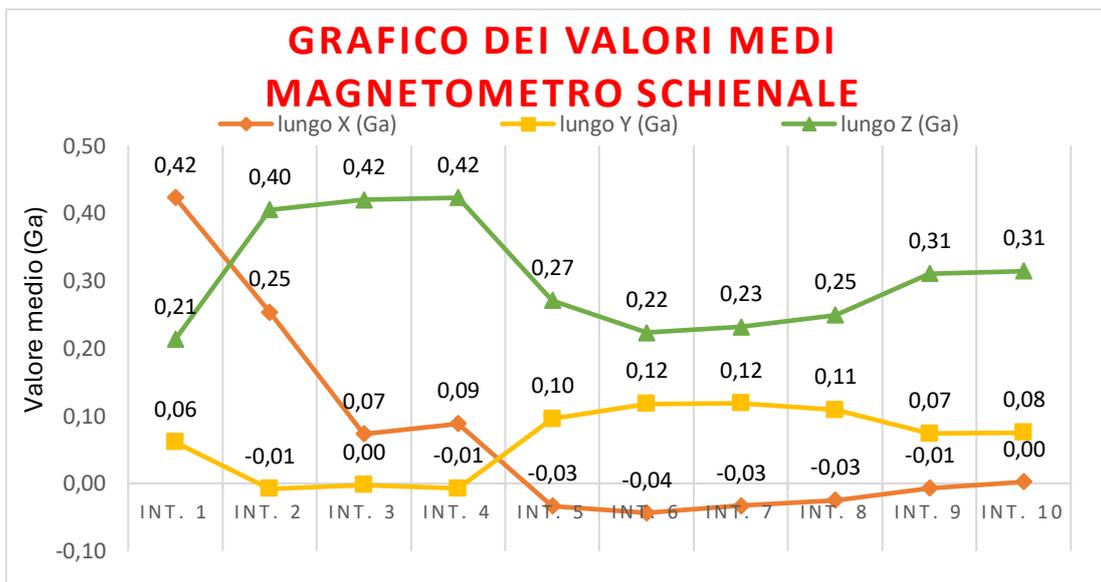
**Figura 34:** grafico delle deviazioni standard delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



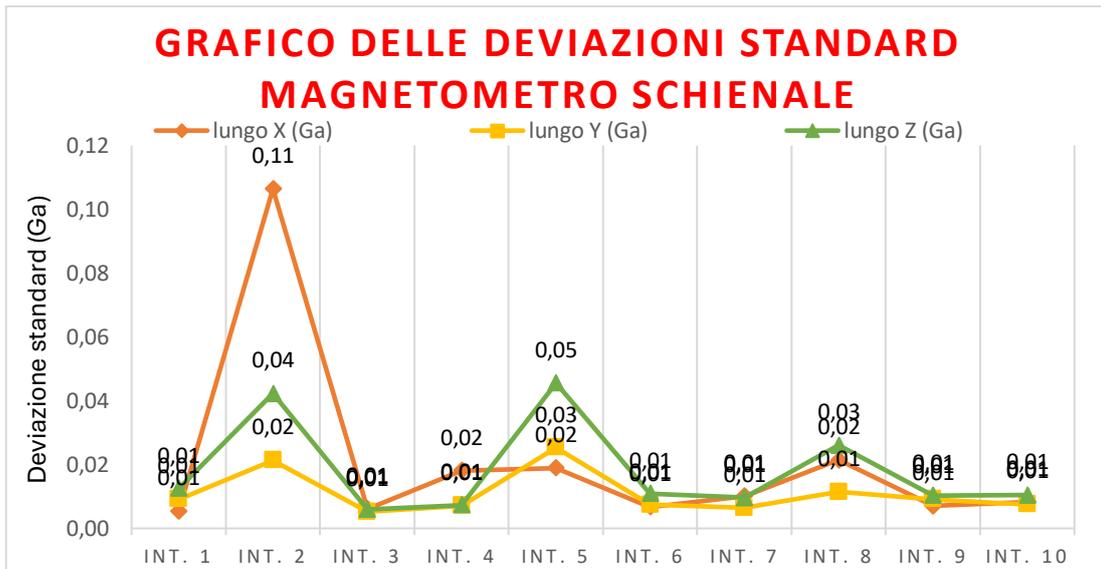
**Figura 35:** grafico dei valori medi delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



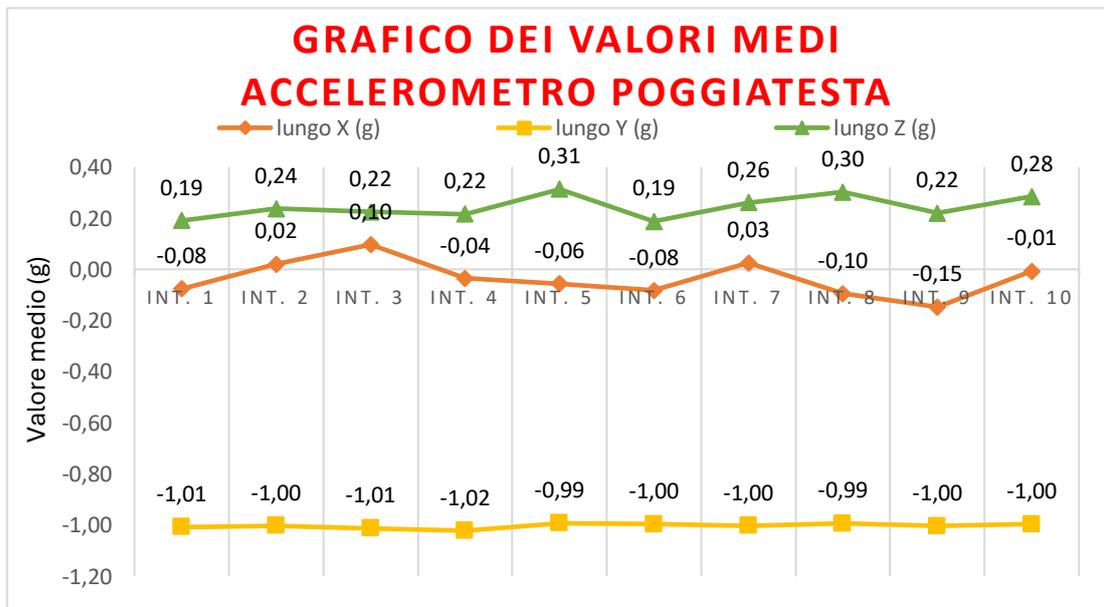
**Figura 36:** grafico delle deviazioni standard delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



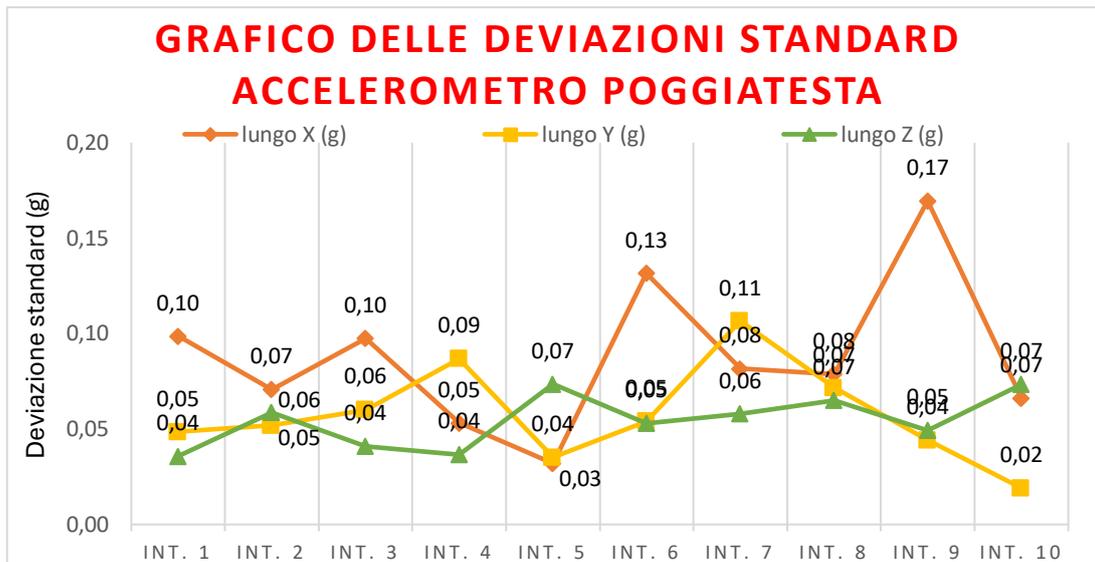
**Figura 37:** grafico dei valori medi delle componenti magnetiche x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



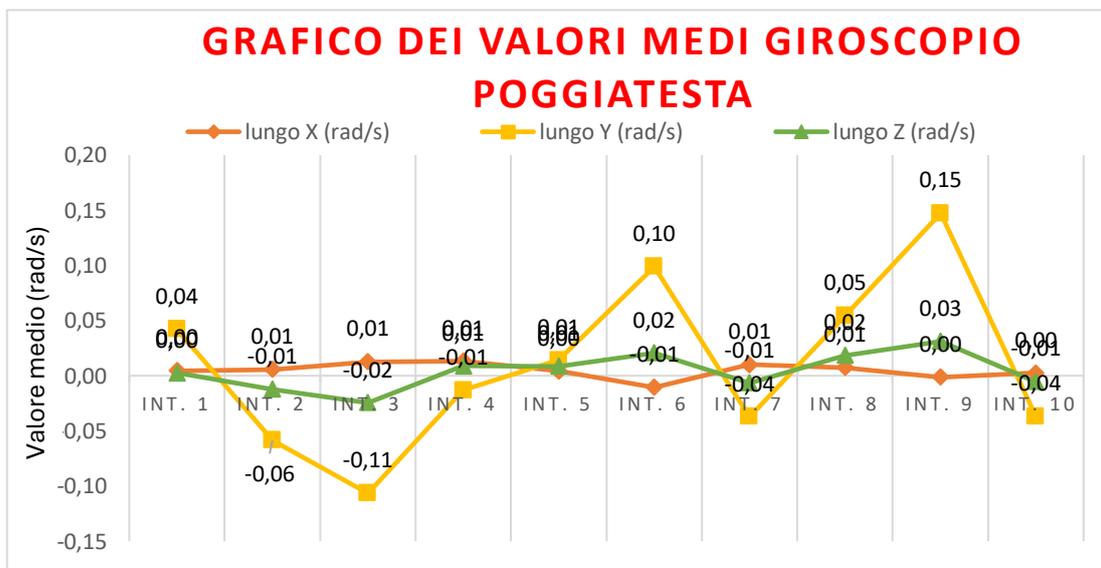
*Figura 38: grafico delle deviazioni standard delle componenti magnetiche x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale*



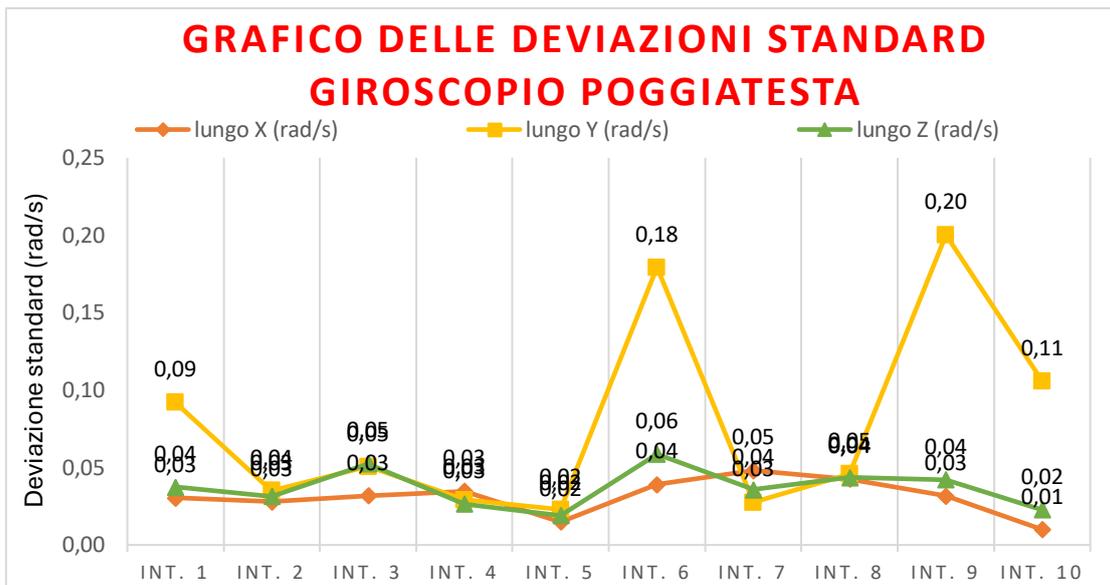
*Figura 39: grafico dei valori medi delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta*



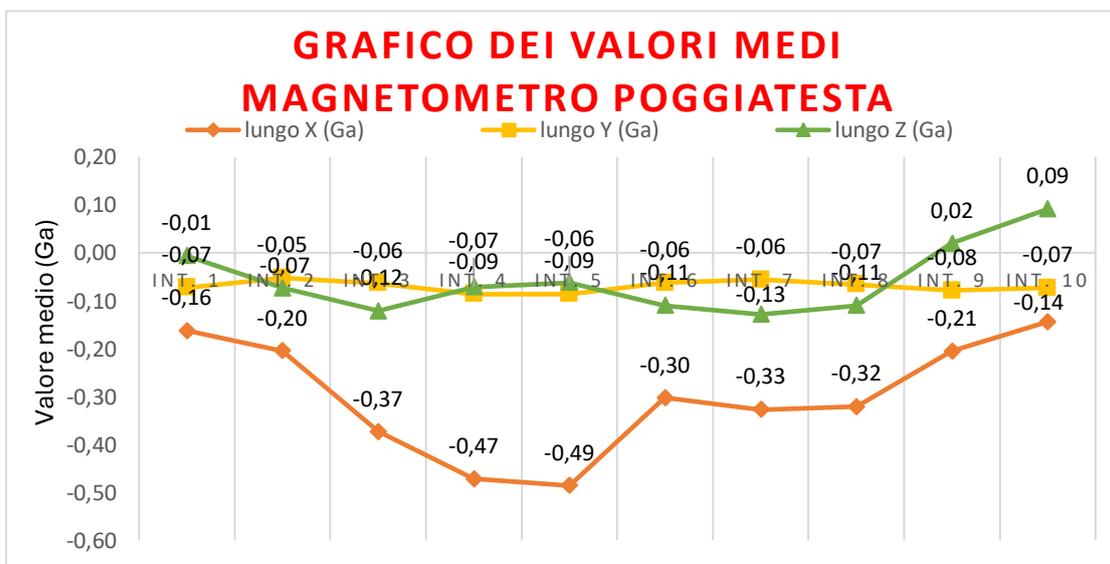
*Figura 40: grafico delle deviazioni standard delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta*



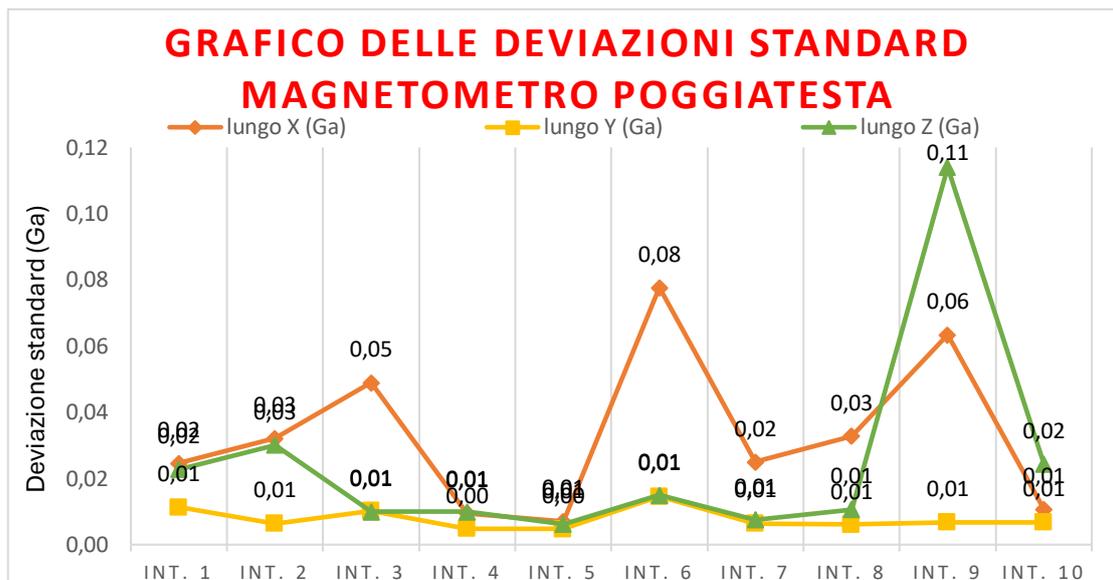
*Figura 41: grafico dei valori medi delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta*



**Figura 42:** grafico delle deviazioni standard delle componenti di velocità angolare  $x$ ,  $y$  e  $z$ , calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta



**Figura 43:** grafico dei valori medi delle componenti magnetiche  $x$ ,  $y$  e  $z$ , calcolati in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta

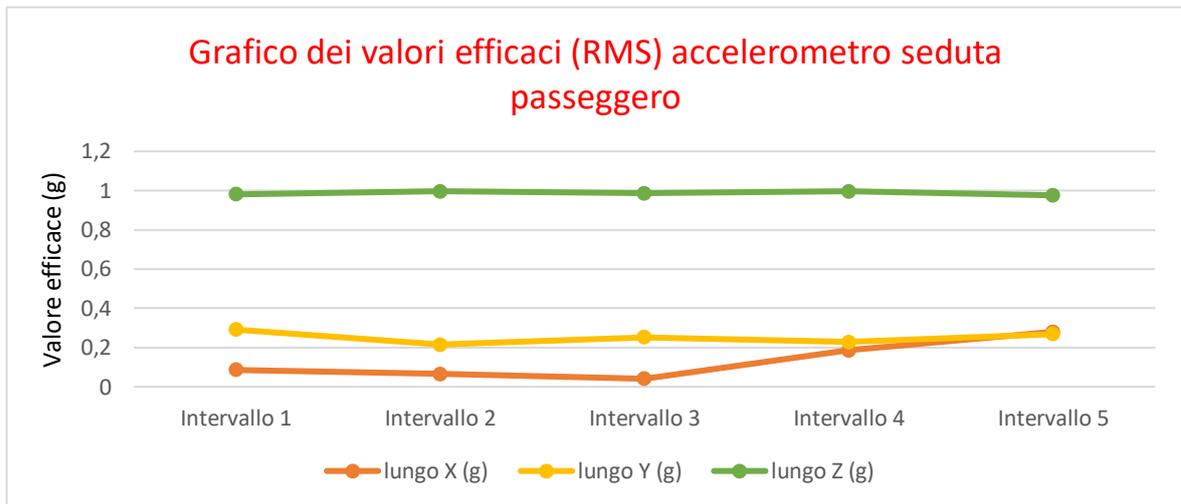


**Figura 44:** grafico delle deviazioni standard delle componenti magnetiche x, y e z, calcolate in 10 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta

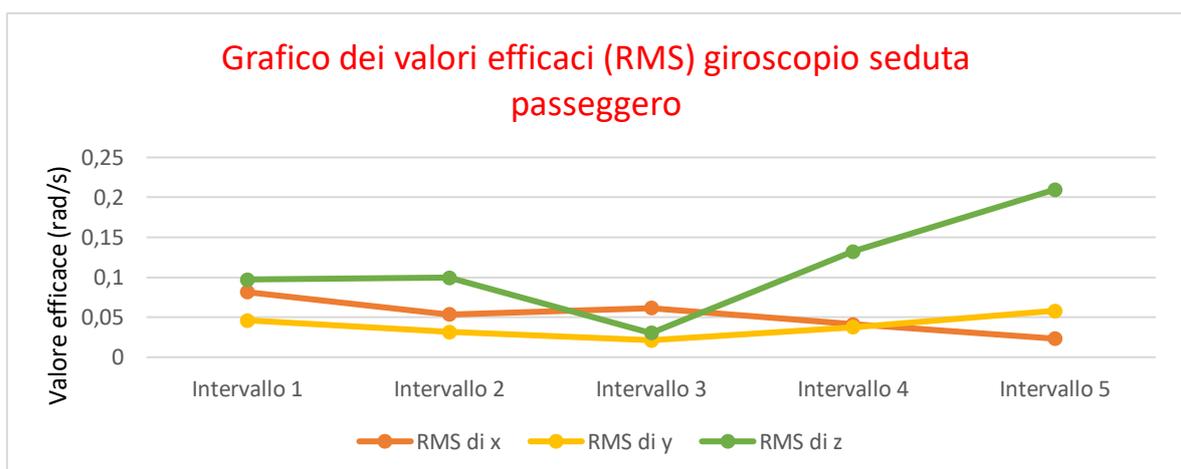
Da questi grafici, si può notare che i valori medi e le corrispettive deviazioni standard non sono correlati tra loro, il che è comprensibile visto che si deve tener conto delle accelerazioni, delle decelerazioni e delle condizioni della strada in ciascuna delle 9 “sottofinestre” temporali. In particolare, i valori medi delle accelerazioni registrate dall’accelerometro nelle tre acquisizioni lungo ciascun asse si mantengono molto stabili da una finestra temporale all'altra, formando quasi delle linee rette costanti. Al contrario, i valori medi ottenuti per il giroscopio e il magnetometro, presentano, nel complesso una stabilità minore in almeno uno dei tre assi.

Nei grafici delle deviazioni standard, si osserva, per ogni sensore e per ciascuna delle tre acquisizioni, una dispersione abbastanza differente (nell’ordine di pochi decimi di unità) da una finestra temporale all’altra, indicando uno scostamento più o meno significativo rispetto al valore medio corrispondente.

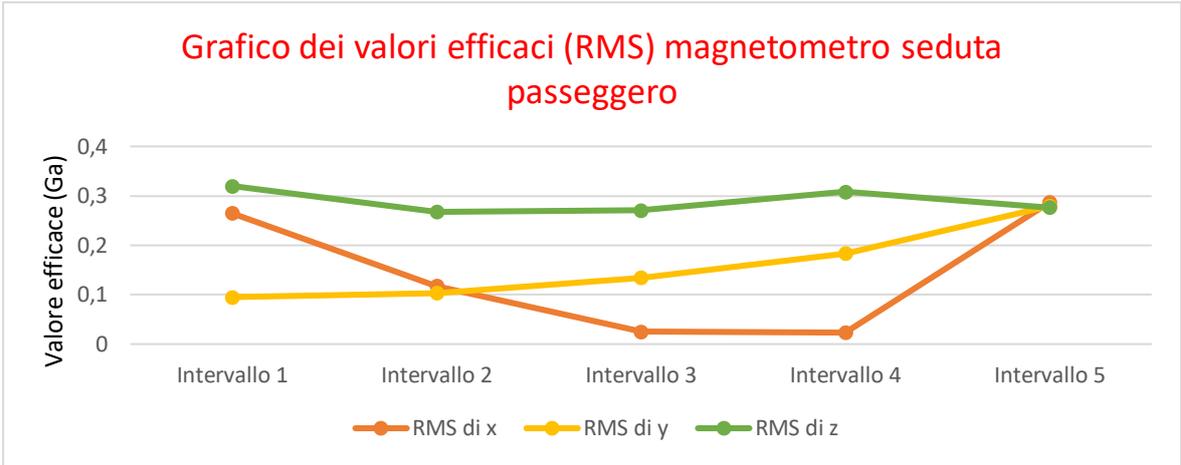
I grafici dei valori efficaci (RMS), invece, sono riportati nelle Fig. 45-53:



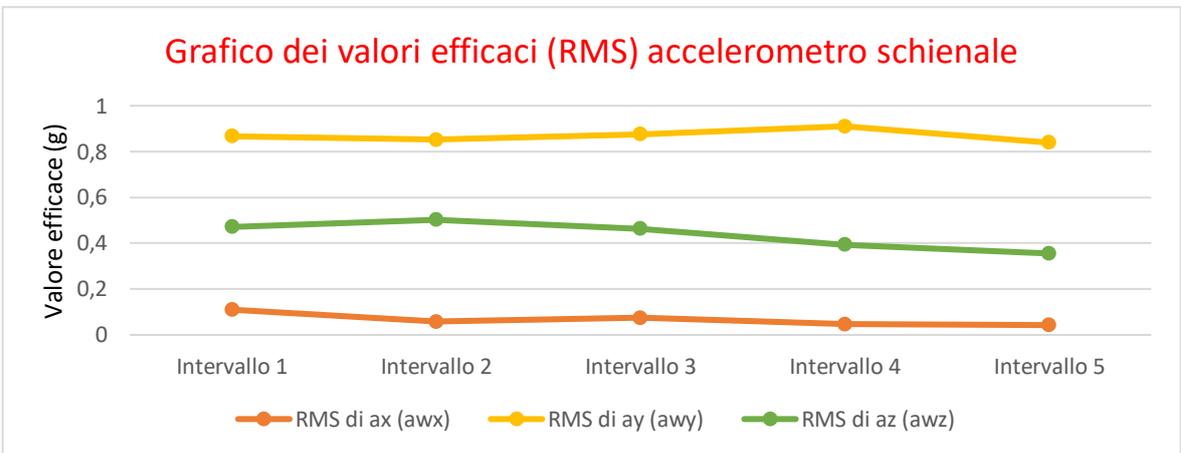
**Figura 45:** grafico degli RMS delle componenti di accelerazione  $x$ ,  $y$  e  $z$ , calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



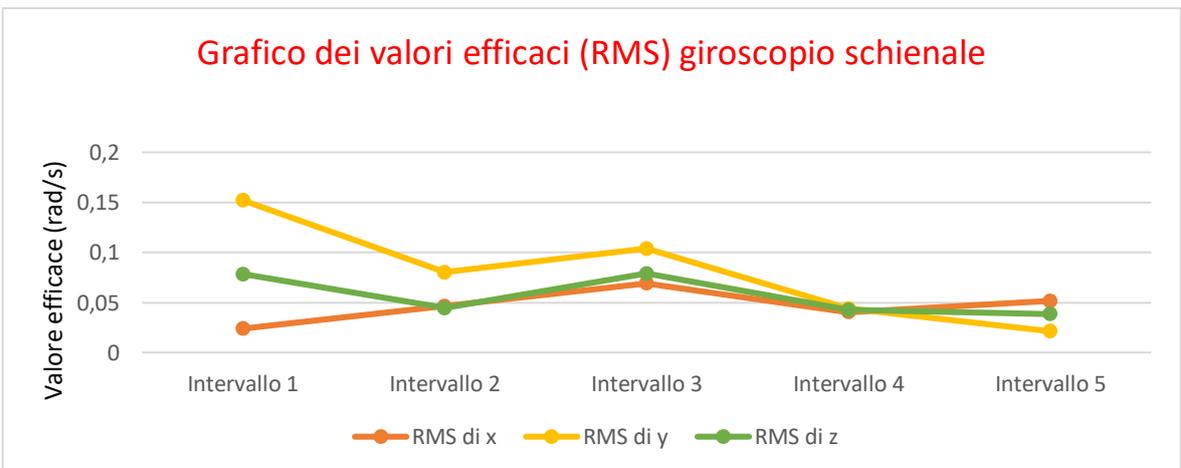
**Figura 46:** grafico degli RMS delle componenti di velocità angolare  $x$ ,  $y$  e  $z$ , calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



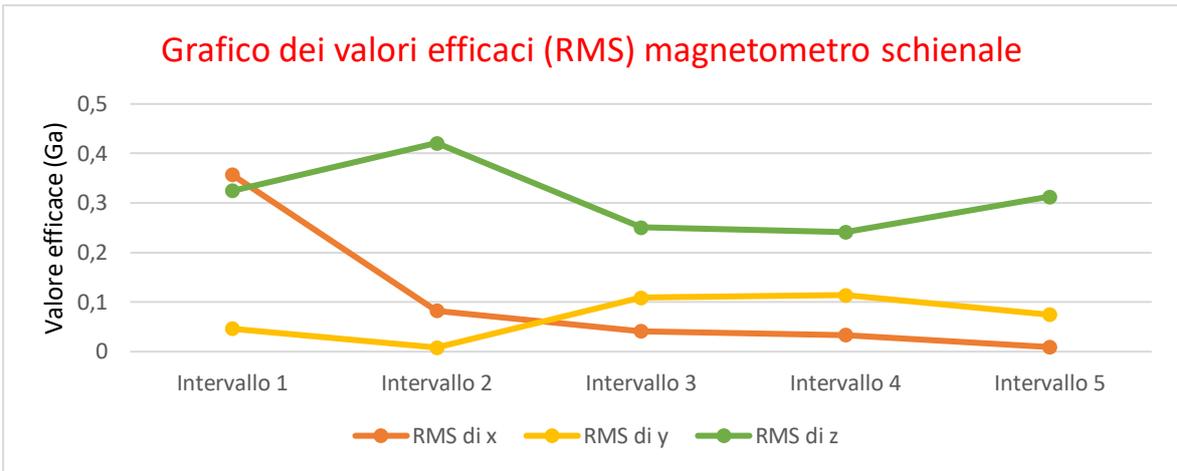
**Figura 47:** grafico degli RMS delle componenti magnetiche x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sulla seduta del sedile passeggero



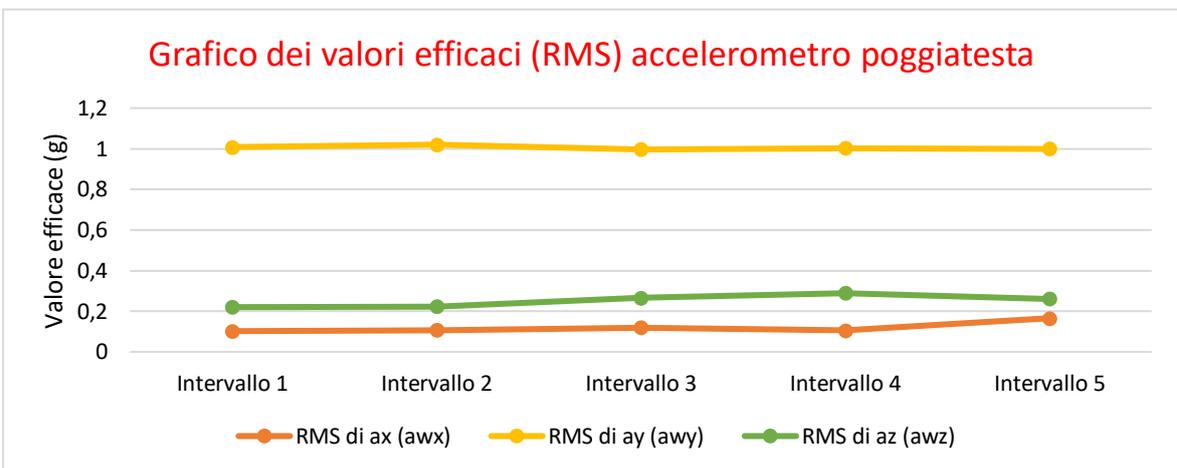
**Figura 48:** grafico degli RMS delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



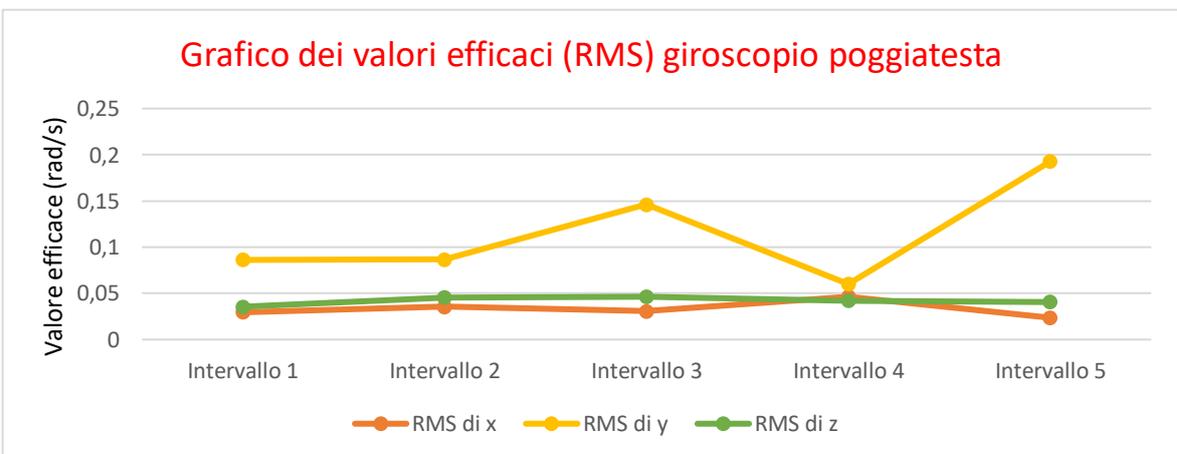
**Figura 49:** grafico degli RMS delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



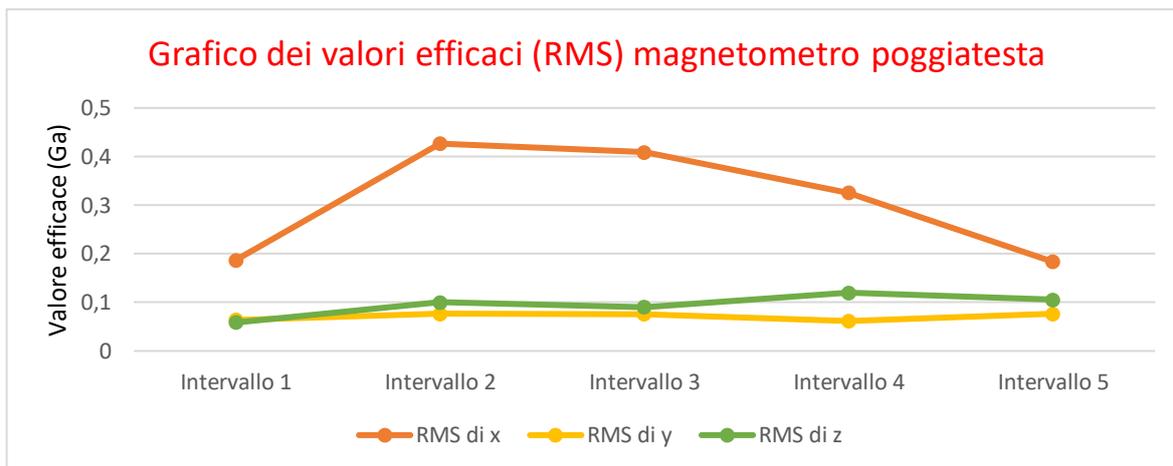
**Figura 50:** grafico degli RMS delle componenti magnetiche x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sullo schienale



**Figura 51:** grafico degli RMS delle componenti di accelerazione x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta



**Figura 52:** grafico degli RMS delle componenti di velocità angolare x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta

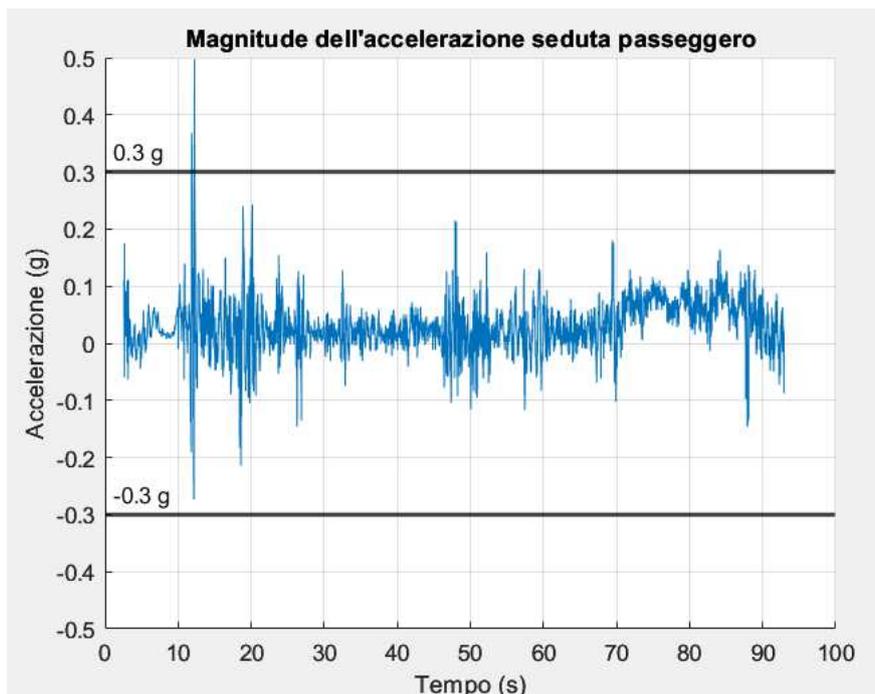


**Figura 53:** grafico degli RMS delle componenti magnetiche x, y e z, calcolati in 5 finestre temporali, con la scheda posizionata sul poggiatesta

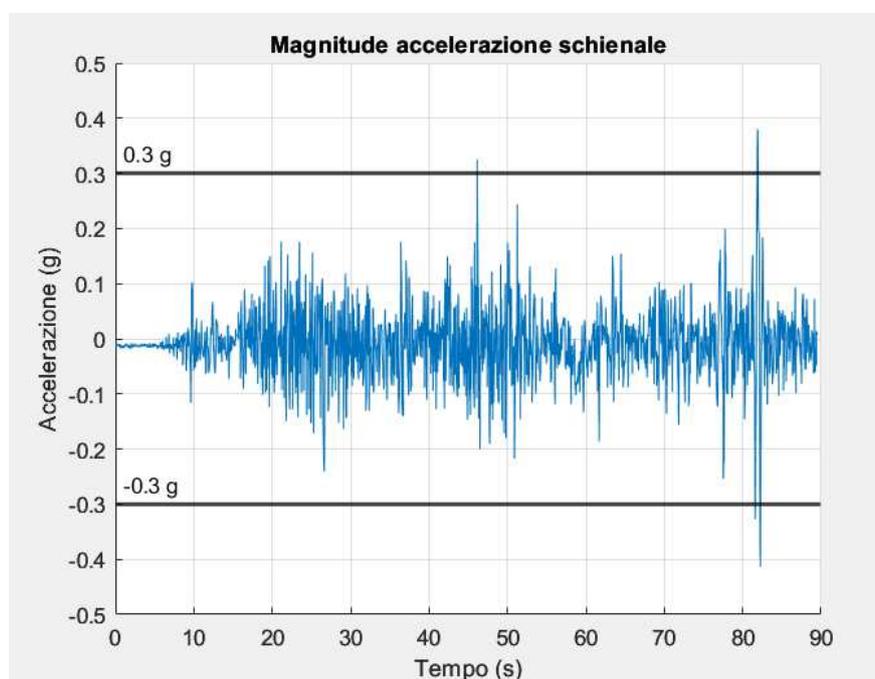
Il calcolo degli RMS si è rilevato necessario perché, a differenza del valore medio, fornisce una stima più accurata della grandezza complessiva del segnale, indipendentemente dalla direzione delle variazioni. Dai grafici relativi all'accelerometro, si può notare una prevalenza della componente  $a_z$  quando la scheda è stata posizionata sulla seduta del sedile passeggero, e della componente  $a_y$  quando la scheda è stata collocata sullo schienale e sul poggiatesta. Ciò avviene perché, come già spiegato in precedenza, sulla seduta, la board era in posizione orizzontale, facendo sì che la componente di accelerazione gravitazionale si sommasse al contributo sull'asse z, mentre sullo schienale e sul poggiatesta era posizionata in verticale, sommando quindi la componente gravitazionale al contributo sull'asse y.

### 3.2 Output dell'elaborazione su MATLAB

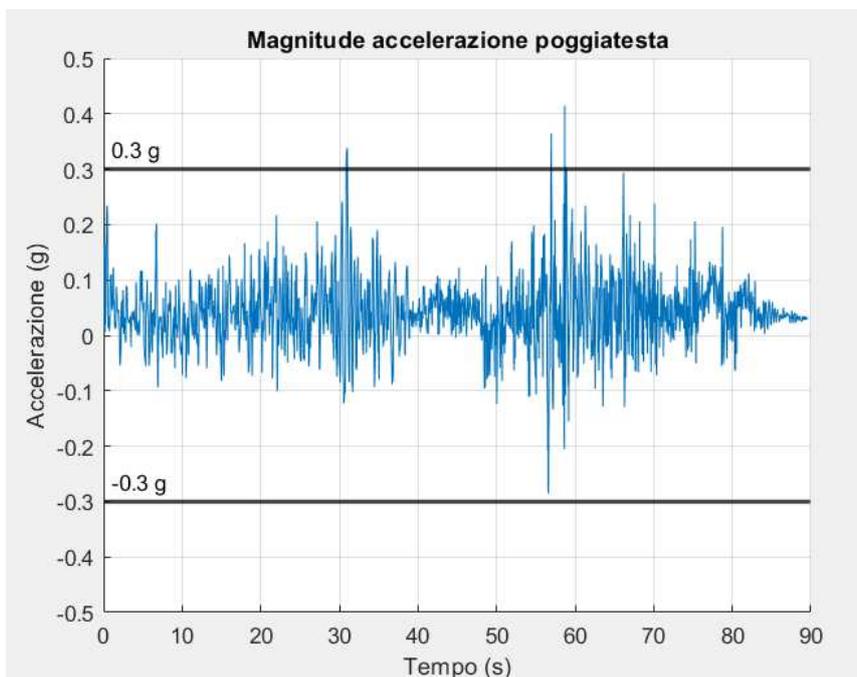
La prima tecnica utilizzata in MATLAB per determinare il comfort all'interno dell'auto, vale a dire la "threshold detection", ha generato i risultati riportati nelle Fig. 54-56:



*Figura 54: grafico del vettore della magnitudo dell'accelerazione ottenuto posizionando la scheda sulla seduta del sedile passeggero*



*Figura 55: grafico del vettore della magnitudo dell'accelerazione ottenuto posizionando la scheda sullo schienale*



**Figura 56: grafico del vettore della magnitudo dell'accelerazione ottenuto posizionando la scheda sul poggiatesta**

Dalle rappresentazioni dei vettori si può notare che sono presenti dei picchi di accelerazione che superano la soglia di  $\pm 0.3$  g. Ciò indica che, in quegli'istanti, l'accelerazione o la decelerazione del mezzo, insieme alle condizioni della strada, ha comportato un livello di comfort inferiore.

Oltre alla prima acquisizione, sono state effettuate ulteriori quattro acquisizioni per ciascuna posizione della scheda, per un totale di cinque. Questi dati aggiuntivi sono stati utilizzati per calcolare il valore medio dei cinque comfort index ottenuti, fornendo così una visione più completa e affidabile dei risultati e garantendone la ripetibilità.

I risultati dei comfort index ottenuti per ciascuna posizione della scheda sono i seguenti:

Per la scheda posizionata sulla seduta del passeggero:

	<b>Accelerometro</b>	<b>Giroscopio</b>	<b>Magnetometro</b>
<b>1° acquisizione</b>	0,063	0,078	0,020
<b>2° acquisizione</b>	0,080	0,079	0,023
<b>3° acquisizione</b>	0,104	0,071	0,018
<b>4° acquisizione</b>	0,112	0,069	0,022
<b>5° acquisizione</b>	0,072	0,093	0,021
<b>Valore medio</b>	<b>0,086</b>	<b>0,078</b>	<b>0,020</b>

Per la scheda posizionata sullo schienale:

	<b>Accelerometro</b>	<b>Giroscopio</b>	<b>Magnetometro</b>
<b>1° acquisizione</b>	0,106	0,072	0,019
<b>2° acquisizione</b>	0,116	0,083	0,024
<b>3° acquisizione</b>	0,102	0,072	0,019
<b>4° acquisizione</b>	0,106	0,069	0,020
<b>5° acquisizione</b>	0,113	0,073	0,019
<b>Valore medio</b>	<b>0,109</b>	<b>0,074</b>	<b>0,020</b>

Per la scheda posizionata sul poggiatesta:

	<b>Accelerometro</b>	<b>Giroscopio</b>	<b>Magnetometro</b>
<b>1° acquisizione</b>	0,113	0,054	0,012
<b>2° acquisizione</b>	0,129	0,083	0,010
<b>3° acquisizione</b>	0,093	0,062	0,020
<b>4° acquisizione</b>	0,119	0,073	0,022
<b>5° acquisizione</b>	0,103	0,070	0,020
<b>Valore medio</b>	<b>0,111</b>	<b>0,068</b>	<b>0,017</b>

COMFORT RATE DEFINITION		
Index	Range (G)	Rate
0	Greater than 0.229	Extremely uncomfortable
1	0.145 to 0.229	Very uncomfortable
2	0.092 to 0.145	Uncomfortable
3	0.057 to 0.092	Fairly uncomfortable
4	0.032 to 0.057	A little uncomfortable
5	Less than 0.032	Not uncomfortable

*Figura 57: tabella degli indici di comfort*

Seguendo la tabella in Fig. 57 fornita dalla norma ISO 2631-1, è stata operata la determinazione del comfort index estendendo l'uso della definizione utilizzata per l'accelerazione anche al caso dei segnali del giroscopio (velocità angolare) e del magnetometro (intensità di campo magnetico). I risultati relativi al livello di comfort in funzione della posizione della scheda sono i seguenti:

- **Seduta del sedile passeggero:**
  - *Accelerometro*: livello di comfort moderatamente basso (abbastanza scomodo)
  - *Giroscopio*: livello di comfort moderatamente basso (abbastanza scomodo).
  - *Magnetometro*: livello di comfort elevato (confortevole).
- **Schienale:**
  - *Accelerometro*: livello di comfort basso (scomodo).
  - *Giroscopio*: livello di comfort moderatamente basso (abbastanza scomodo).
  - *Magnetometro*: livello di comfort elevato (confortevole).
- **Poggiatesta:**
  - *Accelerometro*: livello di comfort basso (scomodo).
  - *Giroscopio*: livello di comfort moderatamente basso (abbastanza scomodo)

- *Magnetometro*: livello di comfort elevato (confortevole).

Questi risultati sono probabilmente dovuti alle discontinuità della strada riscontrate lungo il tragitto delle acquisizioni e alle sospensioni dell'automobile usata che risultano particolarmente morbide. In particolare, si può osservare che l'accelerometro, quando la scheda è stata posizionata sulla seduta del passeggero, ha ottenuto valori di comfort leggermente migliori rispetto a quelli rilevati sullo schienale o sul poggiatesta. Ciò è dovuto al fatto che la seduta tende a essere più stabile rispetto ad altre parti del sedile, riuscendo quindi ad assorbire meglio le vibrazioni. Per quanto riguarda il magnetometro, i valori ottenuti sono molto bassi (comfort elevato). Questo sta ad indicare che l'auto ha generato pochi disturbi magnetici, i quali non interferiscono significativamente con il passeggero.

# Conclusioni

In questa attività di tesi, è stata condotta un'analisi dei dati acquisiti dalla board ST Sensor.Tile.box, collocata in diverse posizioni sul sedile di un'automobile, mediante l'utilizzo di sensori integrati nella scheda, quali accelerometro, giroscopio e magnetometro. L'obiettivo dell'analisi è stato quello di rilevare le vibrazioni e i campi magnetici all'interno del veicolo, seguendo tecniche specifiche e, in particolare, le linee guida fornite della norma ISO 2631-1.

Nel Capitolo 1 sono state descritte le caratteristiche e le configurazioni degli strumenti utilizzati per lo svolgimento di questa attività.

Il Capitolo 2 si concentra in modo dettagliato, sulle fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati, svolte tramite Excel e MATLAB, mentre i risultati ottenuti sono riportati nel Capitolo 3.

L'analisi in Excel, si è focalizzata principalmente sul calcolo dei valori medi, delle deviazioni standard e dei valori efficaci, fornendo una rappresentazione più chiara delle misurazioni effettuate con i sensori.

In MATLAB, è stato sviluppato un codice che permette di individuare i picchi di accelerazione dei dati ricavati dall'accelerometro e calcolare l'indice di comfort secondo la norma.

In questo modo è stato possibile ottenere una visione completa dell'esposizione alle vibrazioni e ai campi magnetici generati dal veicolo.

I risultati dell'elaborazione mostrano indici di comfort soddisfacenti per quanto riguarda i dati del magnetometro, mentre i dati relativi all'accelerometro e al giroscopio indicano un livello di comfort inferiore.

Una possibile implementazione futura per aumentare l'efficacia dell'analisi potrebbe essere quella di applicare dei filtri ai segnali acquisiti dai sensori, così da eliminare le componenti di rumore non desiderate ed ottenere misurazioni più precise. Inoltre, si potrebbe introdurre nell'analisi un'altra tecnica chiamata "*Threshold-Jerk detection*" [14]. Quest'ultima si basa sulla valutazione della derivata dell'accelerazione (Jerk) come un'altra fonte di disturbi e offre la possibilità di valutare non solo l'entità dell'accelerazione, ma anche la durata della stessa. Così facendo l'elaborazione risulterebbe ancora più accurata e potrebbe essere utilizzata (applicando le giuste accortezze) per monitorare il comfort dei passeggeri in altri mezzi, come ad esempio nei trasporti pubblici.

# Bigliografia e Sitografia

- [1] STMicroelectronics, «STEVAl-MKSBOX1V1 - SensorTile.box wireless multi sensor development kit with user friendly app for IoT and wearable sensor applications - STMicroelectronics». [Online]. Disponibile su: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-mksbox1v1.html>
- [2] D. Valanzuolo, «Scopriamo la piattaforma SensorTile.box: programmare con ST BLE Sensor», Elettronica Open Source. [Online]. Disponibile su: <https://it.emcelettronica.com/scopriamo-la-piattaforma-sensortile-box>
- [3] «Iniziare a utilizzare il kit di sviluppo IoT pronto all'uso SensorTile.Box», Arrow.com. [Online]. Disponibile su: <https://www.arrow.com/it-it/research-and-events/videos/getting-started-with-the-sensortilebox-iot-dev-kit>
- [4] S. Borghesi, «A cosa servono le piattaforme inerziali», Il blog di Atlantide. [Online]. Disponibile su: <https://www.atlantidezine.it/a-cosa-servono-le-piattaforme-inerziali>
- [5] «Angoli di Eulero», *Wikipedia*. 2 luglio 2023. [Online]. Disponibile su: [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Angoli\\_di\\_Eulero&oldid=134280336](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Angoli_di_Eulero&oldid=134280336)
- [6] G. Bernardo, «Cosa sono, come funzionano e a cosa servono gli Accelerometri», SETTOREZERO. [Online]. Disponibile su: <https://www.settozero.com/wordpress/cosa-sono-come-funzionano-e-a-cosa-servono-gli-accelerometri>
- [7] «Giroscopio», *Wikipedia*. 27 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Giroscopio&oldid=137063453>
- [8] «Giroscopio: cos'è e come funziona - different». [Online]. Disponibile su: <https://www.thedifferentgroup.com/2017/02/10/giroscopio-come-funziona>
- [9] «Magnetometro», Codevintec. [Online]. Disponibile su: <https://www.codevintec.it/magnetometro>
- [10] «Cos'è MATLAB e a cosa serve», GeekandJob. [Online]. Disponibile su: <https://www.geekandjob.com/wiki/matlab>
- [11] M. Cesarelli, «Introduzione all'uso di Matlab». [Online]. Disponibile su: <https://www.math.unipd.it/~michela/brevimatlabplot.pdf>
- [12] «MATLAB», *Wikipedia*. 20 maggio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=MATLAB&oldid=139373777>
- [13] «brevimatlabplot.pdf». [Online]. Disponibile su: <https://www.math.unipd.it/~michela/brevimatlabplot.pdf>
- [14] J. C. Castellanos, A. A. Susin, e F. Fruett, «Embedded sensor system and techniques to evaluate the comfort in public transportation», in *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Washington, DC, USA: IEEE, ott. 2011, pp. 1858–1863. doi: 10.1109/ITSC.2011.6083051.