Corso di Laurea Magistrale
Ingegneria Meccanica

Progettazione, realizzazione e verifica sperimentale delle vibrazioni per una struttura di un banco di test per i display dei sistemi infotainment

Relatore e correlatore
Prof. Terenziano Raparelli
Prof.ssa Daniela Maffiodo
Tutor aziendale
Ing. Alberto Bertone

Candidato
Walter Marino

Anno Accademico 2019/2020

«Ho pensato all'origine di tutti i numeri quadrati e ho scoperto che essi derivano dal regolare aumento dei numeri dispari. L'1 è un quadrato e da esso è prodotto il primo quadrato, chiamato 1; aggiungendo 3 a questo, si ottiene il secondo quadrato, 4, la cui radice è 2; se a questa somma viene aggiunto un terzo numero dispari, cioè 5, verrà prodotto il terzo quadrato, cioè 9, la cui radice è 3; per cui la sequenza e le serie dei numeri quadrati derivano sempre da addizioni regolari di numeri dispari.»

Leonardo Fibonacci

Indice

1. Introduzione 5

2. Teoresi Group 6

3. Radio 7

4. Braccio automatico *Dobot Magician 2.0* 18

4.1. *Dobot Magician 2.0* CAD 3D 24

5. Sistemi di bloccaggio 28

5.1. Morsetti a leva *Push-Pull* 28

5.2. Morsettiera o unità di supporto 29

5.3. Unità di supporto cuscinetti di vincolo 30

5.4. Stampa 3D 31

5.5. Profilati in alluminio 32

5.6. Supporti con piedini di livellamento 34

6. Realizzazione del banco tramite SolidWorks 36

6.1. Realizzazione di un primo prototipo per permettere test funzionali con il robot 36

6.2. Progettazione con profilati in alluminio 39

6.3. Realizzazione del banco prova definitivo 42

7. Analisi vibrazionale con sensore accelerometrico 48

7.1. Sensore *MPU-6050* 49

7.2. Arduino Uno 52

7.3. Collegamento sensore-Arduino 56

7.4. Prove effettuate 63

7.4.1. Risultati delle prove sperimentali con la massa 1 68

7.4.2. Risultati delle prove sperimentali con la massa 2 78

7.5. Discussione dei risultati delle prove sperimentali 88

8. Conclusioni 94
9. Appendici 96
9.1. Appendice A 96
9.2. Appendice B 98
9.3. Appendice C 104
9.4. Appendice D 105
9.5. Appendice E 106
9.6. Appendice F 108
9.7. Appendice G 111
10. Bibliografia 114
11. Sitografia 115
12. Ringraziamenti 116

1. Introduzione

L'obiettivo della seguente tesi riguarda la progettazione, presso l'azienda *Teoresi*, di un banco per testare i display dei sistemi infotainment delle case automobilistiche *FCA* e *PSA*.
Le analisi sulle radio vengono effettuate tramite un robot "*Dobot Magician 2.0*", e consiste nell'andare a premere, tramite il braccio robotico, sullo schermo oppure trascinare le pagine stesse, per esempio quando si vuole trovare una stazione diversa dall'elenco fornito.
Il campo di lavoro che ha il robot è sempre lo stesso, ma varieranno le dimensioni delle radio, in quanto ogni automobile monta una radio diversa, sia per modello sia per casa produttrice e soprattutto per dimensioni. Il problema delle dimensioni, e quindi la forma, ha necessitato di uno studio a sé stante; si è considerata la forma del monitor touchscreen, la presenza o meno di tasti nella radio (principalmente le manopole per cambiare stazione e aumentare/abbassare il volume) e infine la presenza di una parte posteriore ingombrante, cioè la zona degli attacchi di alimentazione e antenna.
Il problema del fissaggio delle radio, e anche del robot stesso, ha rappresentato il principale ostacolo per la costruzione del banco, in quanto ogni minimo spostamento causerebbe una distorsione dei valori della prova in esame, rendendo il test errato.
Il test può essere effettuato manualmente indicando di volta in volta i movimenti che deve svolgere il robot, oppure in maniera automatica grazie all'ausilio di una webcam, montata su un opportuno profilato, la quale scatta foto sul monitor della radio quando il robot sta effettuando la lavorazione. Esse saranno poi memorizzate dal braccio automatico, che sfrutterà le foto precedentemente scattate per i successivi test sulla stessa radio andando ad effettuare gli stessi movimenti e rendendo automatica la lavorazione e quindi il test.
Infine, è stata effettuata una verifica sulle vibrazioni della struttura per determinare dopo quanto tempo è consigliata la prossima lavorazione sulla radio. Questo viene fatto per evitare di avere delle foto o dei video errati. Per effettuare questa verifica si è utilizzato un sensore accelerometrico collegato ad una piattaforma Arduino, che permette di analizzare in tempo reale:

- le accelerazioni nelle tre direzioni dello spazio (X, Y, Z);
- gli effetti giroscopici sempre nelle tre direzioni dello spazio (G_x, G_y, G_z);
- la temperatura del sensore e di conseguenza anche dell'ambiente (T).

2. Teoresi Group

Teoresi è una società internazionale, con sede principale a Torino e sedi operative sia in Italia che nel mondo, e si propone ai propri clienti come partner qualificato per favorirne lo sviluppo tramite tecnologie innovative. Forte di una competenza globale in ambito *engineering*, è in grado di offrire servizi di progettazione di ingegneria, sviluppo e consulenza qualificata, in ambito: Automotive, Industrial, Rail, Aerospace, Bio-engineering, Financial services, TLC, Energy, HW & SW Services e infine Public & University.

Teoresi ha iniziato la propria attività nel 1987, ampliando la sua presenza nel mercato grazie alla distribuzione di un insieme di software tecnico-scientifici in ambito ingegneristico, focalizzandosi su temi di modellazione e simulazione, di controllo e di sviluppo software.

La crescita costante del mercato, ha indotto Teoresi a compiere un percorso di riorganizzazione aziendale che ha portato alla nascita del Gruppo Teoresi, una realtà focalizzata sulla consulenza ingegneristica e sui servizi di *systems integration*.

Per ottimizzare il proprio processo di crescita, *Teoresi Group* ha consolidato partnership già collaudate e vincenti assumendo il controllo diretto di altre due società: *ALTO sistemi* e *Altemedia*.

Come gruppo, Teoresi ha ampliato e rafforzato i propri rapporti di collaborazione creando e consolidando partnership strategiche, con l'obiettivo di ampliare la possibilità di scelta, in termini di metodologie e tecnologie, per meglio rispondere alle specifiche esigenze dei clienti.

3. Radio

Le radio che possono essere testate appartengono ai marchi:

- Fiat
- Alfa Romeo
- Jeep
- Lancia
- Abarth
- Citroën
- Peugeot

Uno studio preliminare ha riguardato la ricerca online dei sistemi infotainment, notando che le varie automobili montano diversi tipi di radio. La ricerca è consistita nell'andare a sfogliare i cataloghi delle principali automobili dei gruppi citati, notando le sostanziali differenze, tra le quali si hanno:

- Forma;
- Dimensioni;
- Presenza o meno di manopole per volume e cambio stazione;
- Presenza o meno di tasti fisici, non touchscreen;
- Presenza o meno di una parte posteriore ingombrante.

Il calcolo delle dimensioni (lunghezza, altezza e profondità) delle radio è stato poi effettuato in sede aziendale, avendo qui a disposizione la maggior parte delle radio da analizzare. Questo è di fondamentale importanza perché le radio presentano dimensioni e forme differenti: dalle più "*slim*" alle più ingombranti nel "*posteriore*".

Nelle tabelle seguenti è possibile vedere le dimensioni fondamentali delle radio analizzate, in cui si definisce lunghezza, altezza e profondità secondo quanto rappresentato sotto:

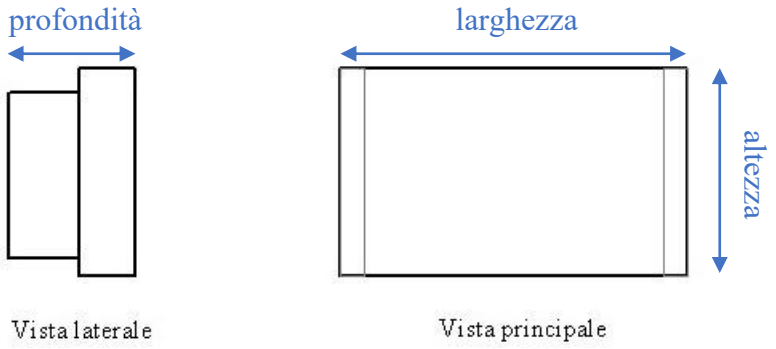


Figura 1 – Dimensioni radio

Fiat 500	
Lunghezza	200 mm
Altezza	150 mm
Profondità	50 mm

Tabella 1 – Dimensioni radio Fiat 500

Fiat 500X e 500 elettrica	
Lunghezza	240 mm
Altezza	135 mm
Profondità	90 mm

Tabella 2 – Dimensioni radio Fiat 500X ed elettrica

Fiat Doblò	
Lunghezza	220 mm
Altezza	135 mm
Profondità	180 mm

Tabella 3 – Dimensioni radio Fiat Doblò

Fiat Tipo	
Lunghezza	220 mm
Altezza	140 mm
Profondità	95 mm

Tabella 4 – Dimensioni radio Fiat Tipo

Jeep Renegade	
Lunghezza	220 mm
Altezza	130 mm
Profondità	95 mm

Tabella 5 – Dimensioni radio Jeep Renegade

Jeep Compass	
Lunghezza	220 mm
Altezza	150 mm
Profondità	80 mm

Tabella 6 – Dimensioni radio Jeep Compass

Inoltre, devono essere collocate nel banco in posizioni tali da poter essere raggiunte in tutti i punti e senza difficoltà dall'*end-effector* del robot, oltre al vincolo principale che tutto il sistema deve essere "in bolla", cioè perfettamente in piano e parallelo al piano in cui tutti i componenti sono inseriti, ovvero il banco.

L'inconveniente principale riguarda il "cambio radio", in quanto esso non può essere automatizzato ma può essere fatto solo manualmente da un operatore. Egli, quando il tutto è fermo, interverrà sul banco posizionando nella posizione corretta la nuova radio da testare. La posizione corretta delle radio è data dalla presenza di opportuni righelli in alluminio fissati su profilati fissi; l'operatore sarà dotato di un file in cui sono descritte le posizioni di montaggio, il che serve per rendere centrato il sistema, in quanto il robot si trova in una posizione fissa e non modificabile.

Di seguito verranno illustrate alcune foto di alcune radio delle automobili del gruppo FCA, presi dai cataloghi online dei rispettivi marchi.
Alcune sono simili a quelle analizzate in azienda perché attualmente in commercio, altre sono diverse rispetto a quelle analizzate in quanto saranno i sistemi infotainment delle automobili che entreranno in commercio nei prossimi anni.

Figura 2 – Fiat 500

Figura 3 – Fiat 500 elettrica

Figura 4 – Abarth 595

Figura 5 – Fiat Doblò

Figura 6 – Fiat Tipo

Figura 7 – Alfa Romeo Stelvio & Giulia

Figura 8 – Jeep Compass

Figura 9 – Jeep Renegade

Nelle figure seguenti sono rappresentate, tramite CAD 3D, una copia delle radio utilizzate per il test nelle quattro viste principali. Non è possibile quotarle e nemmeno rappresentarle fedelmente in quanto i progetti sono secretati, indi per cui è possibile visualizzare solo una bozza di come sono realmente.

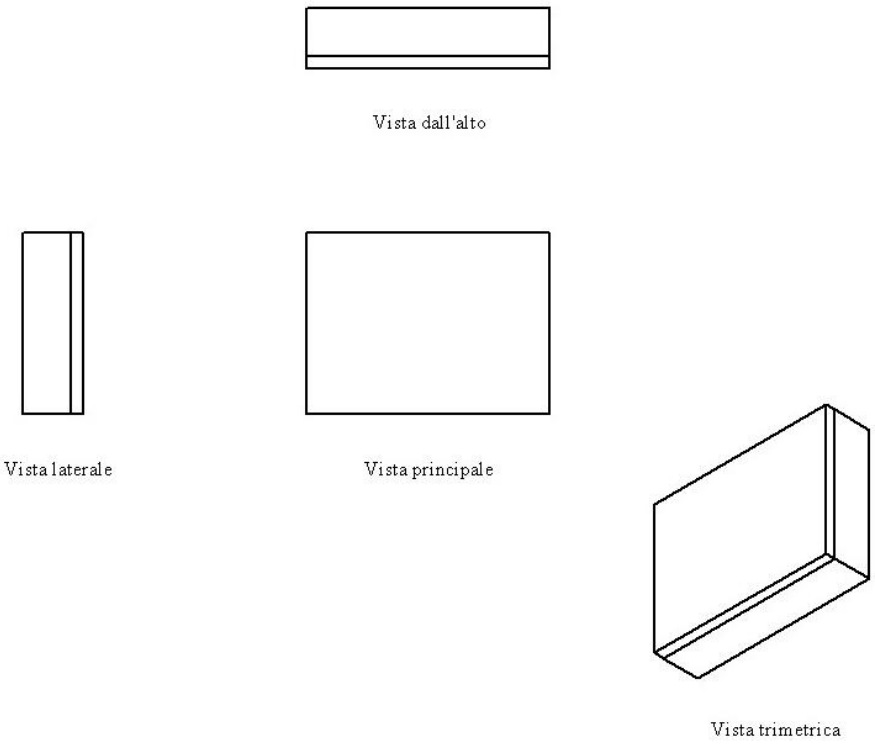


Figura 10 – CAD Fiat 500

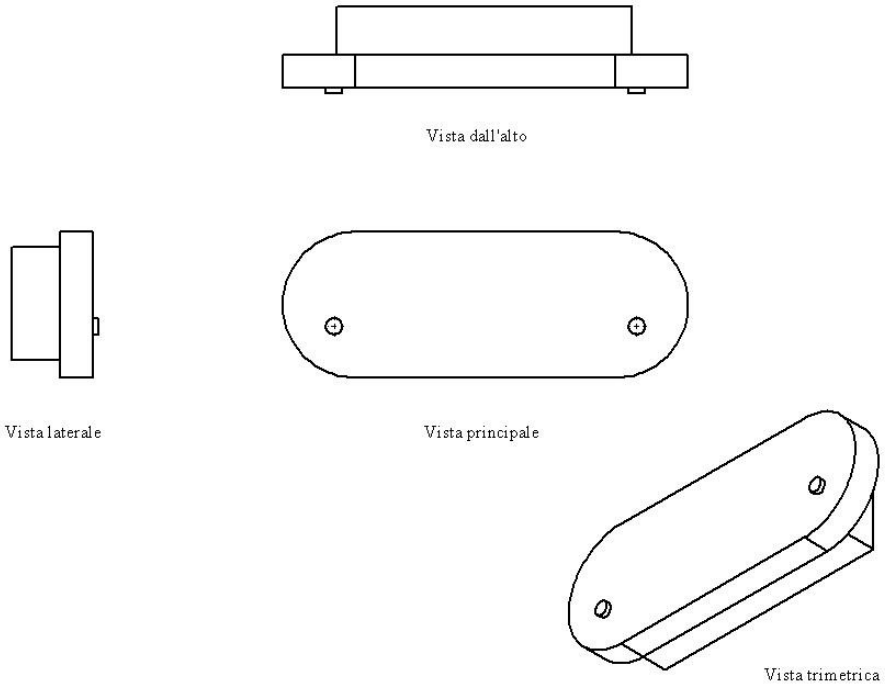


Figura 11 – CAD Fiat 500X e 500 elettrica

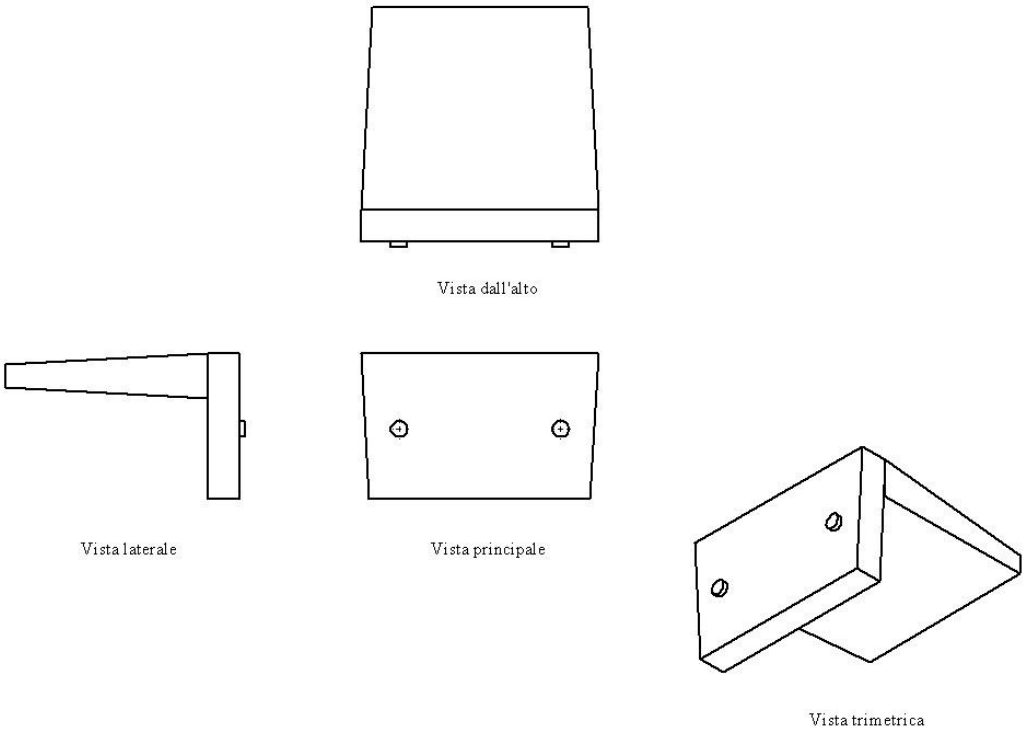


Figura 12 – CAD Fiat Doblò

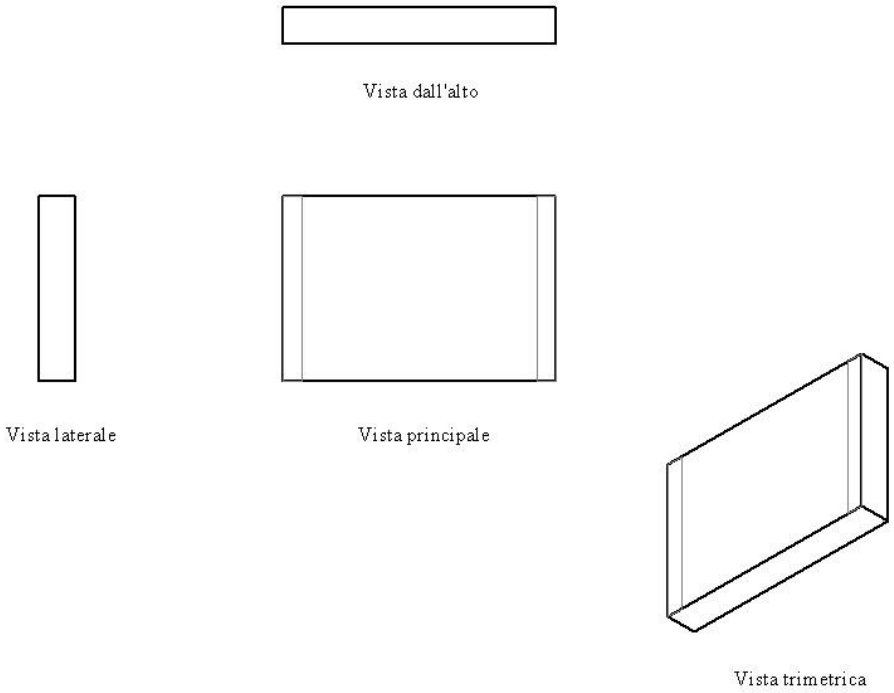


Figura 13 – CAD Fiat Tipo

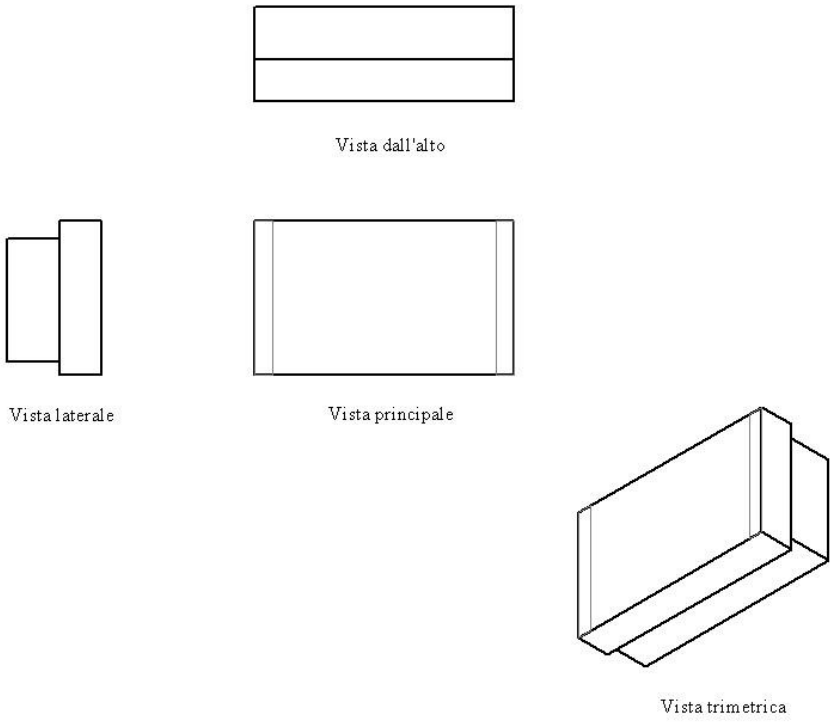


Figura 14 – CAD Jeep Renegade

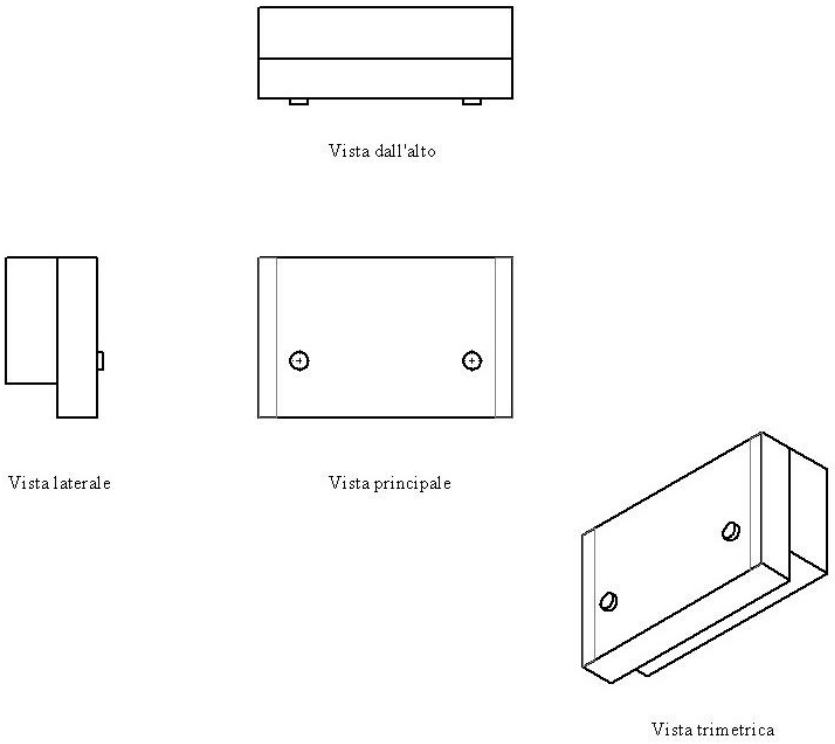


Figura 15 – CAD Jeep Compass

4. Braccio automatico *Dobot Magician 2.0*

Figura 16 – Dobot Magician 2.0

Il *Magician 2.0* è un braccio robotico a 4 assi della casa produttrice *Dobot* e rappresenta la seconda generazione di bracci robotici ad alta precisione. Il design viene definito "*unibody*", cioè compatto; inoltre non richiede alcun assemblaggio da parte dell'utente.
Dobot Magician è in grado di effettuare molte azioni di precisione: scrittura, disegno, incisione laser e stampa 3D, grazie alla possibilità di utilizzare diversi accessori.
Per lo studio in esame viene utilizzato per l'*end-effector* solo il pennino, il quale permette di premere sulle icone, trascinare pagine sul display ed effettuare i test con una elevata precisione.
Il sistema di aggancio/sgancio rapido degli accessori ed un'ampia varietà di metodi di controllo (via PC, App mobile, Bluetooth, Wi-Fi, gesti, voce e LeapMotion) rendono il Magician 2.0 un robot dalle molteplici possibilità di applicazione.

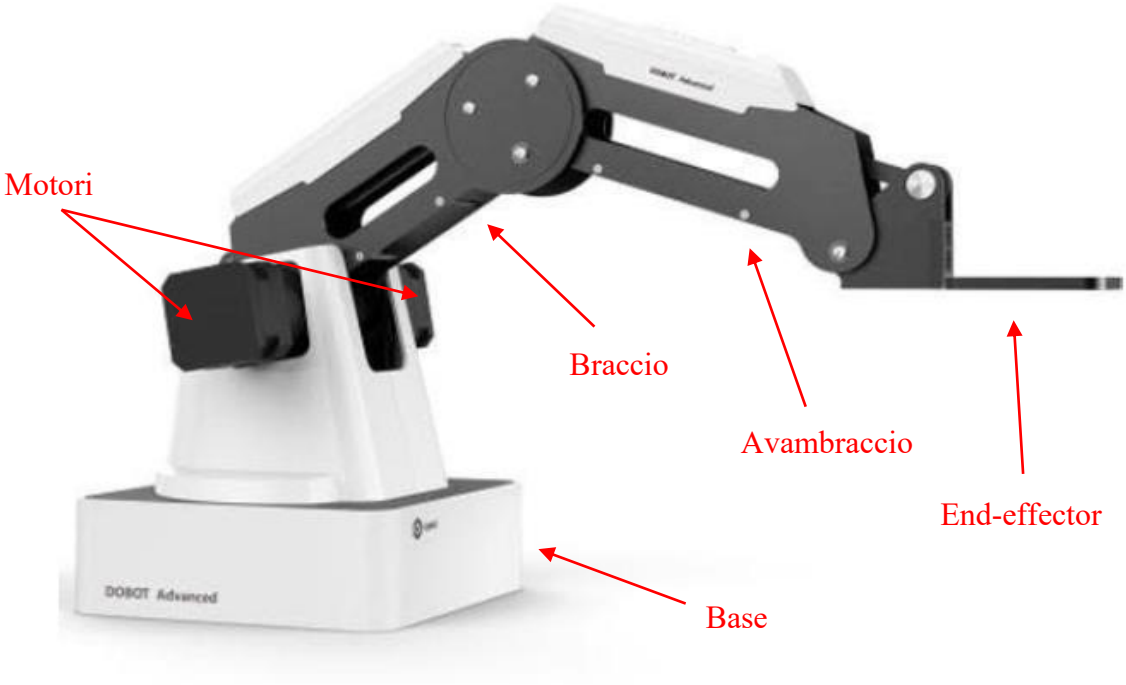


Figura 17 – Dobot Magician 2.0

Il robot è stato acquistato dall'azienda e programmato dal collega in Teoresi, Alberto Marchesa. Le specifiche, i dati fisici e le applicazioni sono riassunte nelle tabelle sottostanti:

Specifiche	
Numero assi	4
Carico massimo	$500\ g$
Braccio (raggio di lavoro)	$320\ mm$
Ripetibilità di posizione (controllo)	$0{,}2\ mm$
Comunicazione	USB / WiFi / Bluetooth
Alimentazione	$100 \div 240\ V\ ,50\ /\ 60\ Hz$
Power In	$12\ V\ /\ 7\ A\ DC$
Consumo	$60\ W\ (max)$
Temperatura operativa	$-10 \div 60\ °C$

Tabella 7 – Specifiche Dobot Magician 2.0

Dati fisici	
Peso netto (Braccio e Controller)	$3{,}4\ kg$
Dimensioni base (ingombro)	$158\ mm$ x $158\ mm$
Materiali	Lega di alluminio 6061, Plastica ABS
Controller	Dobot (integrato)
Posizionamento del robot	Scrivania

Tabella 8 – Dati fisici Dobot Magician 2.0

Applicazioni	
Software a corredo	DobotStudio, Repetier Host, GrblController3.6, DobotBlockly
SDK (Software Develop Kit)	Communication Protocol, Dobot Program Library
Interfacce I/O	1. I/O x10 (Configurabile come input analogico o output PWM)
	2. 12 V Power output controllabile x4
	3. Interfaccia di comunicazione (UART, Reset, Stop, 12 V, 5 V e due I/O incluse)
	4. Stepper x2

Tabella 9 – Applicazioni Dobot Magician 2.0

Come detto in precedenza è a 4 assi aventi le caratteristiche riportate in tabella:

Movimento assi		
Asse	Portata	Velocità massima
Giunto 1 – base	$-135° / +135°$	$320\ °/s$
Giunto 2 – braccio	$0° / +85°$	$320\ °/s$
Giunto 3 – avambraccio	$-10° / +90°$	$320\ °/s$
Giunto 4 – servo rotazione	$+90° / -90°$	$480\ °/s$

Tabella 10 – Movimento assi Dobot Magician 2.0

Gli strumenti di lavoro e le rispettive caratteristiche con i quali può lavorare il robot sono:

Strumenti inclusi		
3D Printer Kit	Area di stampo	$150\ mm$ x $150\ mm$ x $150\ mm$
	Materiale	PLA
	Risoluzione	$0{,}1\ mm$
Laser	Consumo	$500\ MW$
	Tipo	$405\ nm$ (Blue laser)
	Alimentazione	$12\ V$
Portapenna	Diametro penna	$10\ mm$
Ventosa	Diametro ventosa	$20\ mm$
	Pressione	$-35\ kPa$
Pinza	Escursione	$27{,}5\ mm$
	Driver	Pneumatico
	Forza	$8\ N$

Tabella 11 – Strumenti inclusi Dobot Magician 2.0

Le dimensioni principali invece vengono date da catalogo e rappresentate in figura:

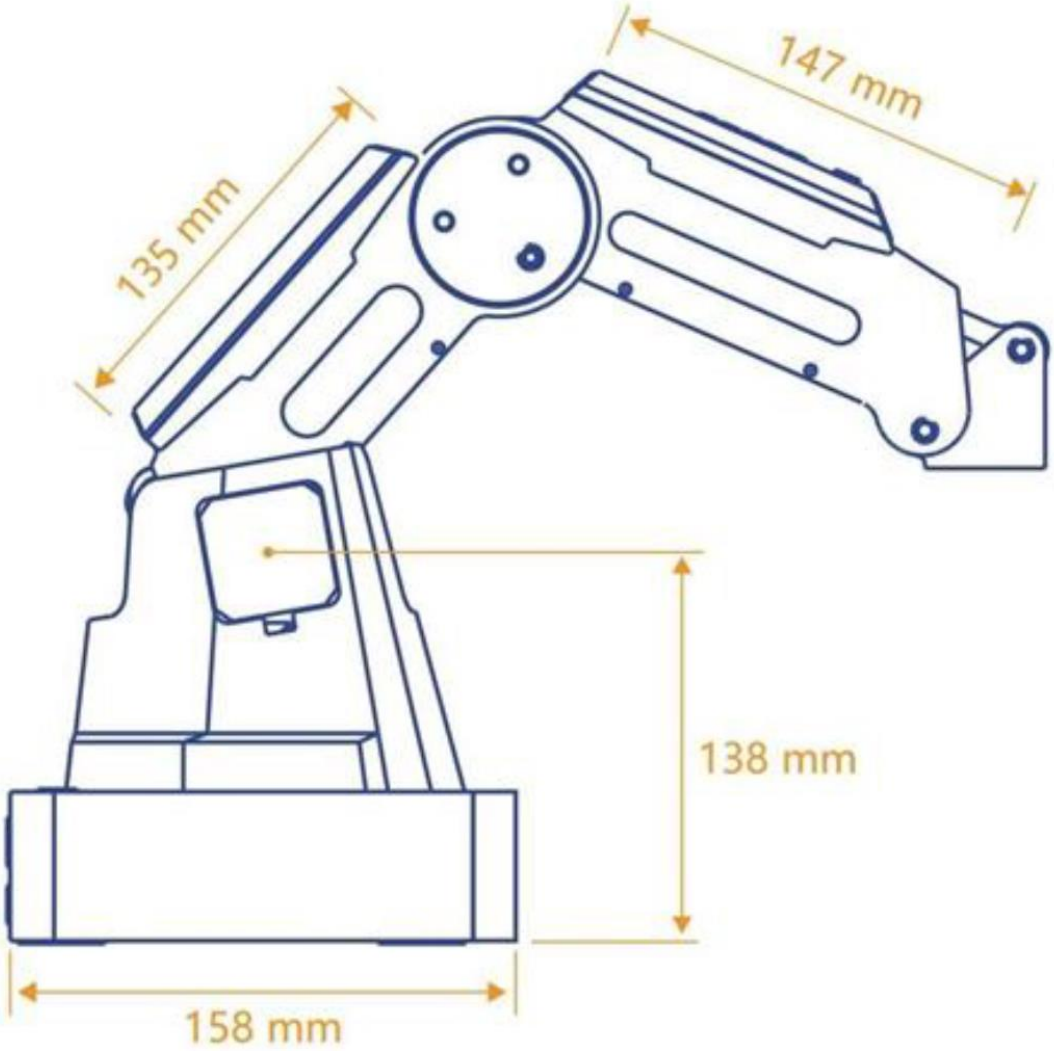


Figura 18 – Dimensioni principali

Il campo o area di lavoro, fornito anch'esso da catalogo e successivamente confermato tramite il CAD 3D, fornito dalla casa produttrice, viene rappresentato dalle due figure sottostanti nelle viste laterali e dall'alto.

L'area di lavoro è rappresentata dall'area in giallo.

Inoltre, vengono rappresentati anche gli angoli massimi che possono essere raggiunti dai 4 assi principali del robot.

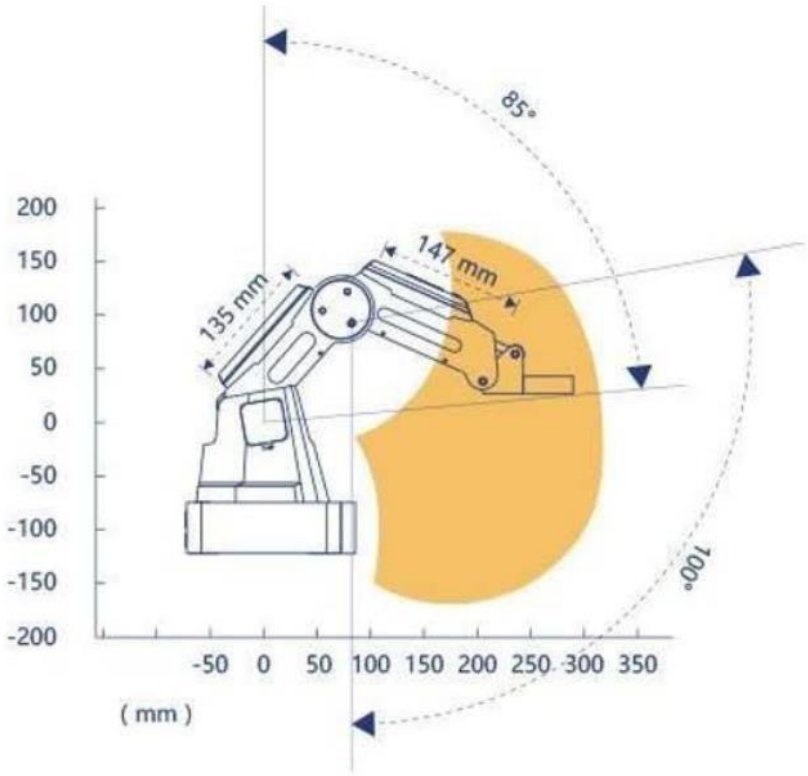


Figura 19 – Area di lavoro in vista laterale

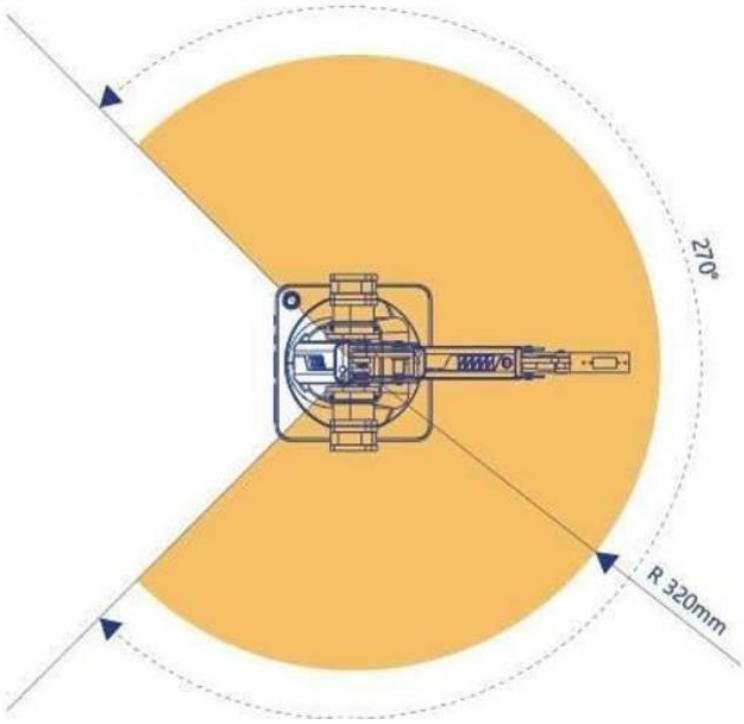


Figura 20 – Area di lavoro in vista dall'alto

4.1. *Dobot Magician 2.0* CAD 3D

La disponibilità dei file CAD dei singoli componenti e dell'assieme del robot è stata fornita dalla casa produttrice. Esso però è stato dato come triangolazione di oggetti (utile per un'analisi FEM) e soprattutto come file immagine (file Oggetto 3D, .stp e .stl). Di conseguenza, essendo file non modificabili e non movimentabili, non è stato possibile effettuare le analisi di spazio di lavoro né creare gli opportuni accoppiamenti tra componenti che permettessero la movimentazione del braccio entro i limiti definiti da catalogo.
Allora si è deciso di utilizzare un CAD non ufficiale, il quale permette di effettuare le analisi base. Esso non è un file immagine né i componenti sono una triangolazione, quindi è stato possibile creare gli opportuni accoppiamenti che permettessero la giusta movimentazione (file .sldprt). Questi sono stati effettuati solo tra i componenti principali, quelli necessari al movimento. Non sono state accoppiate viti, rondelle e dadi, le quali, a fini del movimento del robot CAD, non sono fondamentali. Per questo esse non saranno visibili nelle immagini riportate più avanti nella trattazione.
Essendo non ufficiale, su questo secondo CAD sono state riscontrate diverse problematiche, tra la quali si hanno: le dimensioni non ufficiali della base del robot, una discrepanza di qualche millimetro nella lunghezza del terzo giunto (avambraccio) e infine una diversa forma dell'*end-effector*.

- La discrepanza del primo giunto, la base, la quale presenta una forma diversa è stata facilmente modificata in base alle dimensioni reali del robot misurate in azienda.
- Per la misurazione della massima distanza raggiungibile in direzione frontale, quella dove è posizionata la radio, è stata effettuata nella realtà tramite l'ausilio di una riga e di un compasso.
- La forma e le dimensioni dell'*end-effector* sono rimaste quelle fornite dal CAD, nonostante esse non coincidessero con quelle reali; tramite l'ausilio della riga si sono misurate le distanze di alcuni punti fondamentali. Questo è servito principalmente per determinare la posizione raggiunta dal braccio e dal pennino.

Le prove e ipotesi effettuate tramite SolidWorks sono poi state verificate nella realtà.

La prima e principale prova è stata di quella di determinare i tre punti limite delle radio che devono essere raggiunti dal pennino; questo permette di affermare che se questi tre punti del display vengono raggiunti dall'*end-effector* allora tutti gli altri punti della radio vengono sicuramente raggiunti dal robot. È stato sufficiente effettuare le prove sulla radio di maggiori dimensioni, cioè quella montata sulla Fiat 500X, in maniera tale che tutte le misurazioni sulle altre radio cadessero all'interno di questi valori massimi e avere la certezza di effettuare un corretto test.

Poiché il robot effettua delle rotazioni circolari si è cercato di mettere la radio in posizione simmetrica rispetto al centro del robot e al suo corrispondente braccio e pennino.

In questo modo si è potuto verificare in pochi passi che tracciando delle circonferenze con un compasso, avente centro tra i due motori laterali del robot e raggio pari alla distanza tra i cerchi in rosso della figura sottostante, corrispondenti ai tre punti fondamentali che devono essere raggiunti dall'*end-effector*, tutti gli altri punti del display della radio vengono raggiunti senza alcuna difficoltà dal robot.

Prendendo come esempio la radio montata sulla Fiat Doblò è possibile visualizzare i tre punti in rosso:

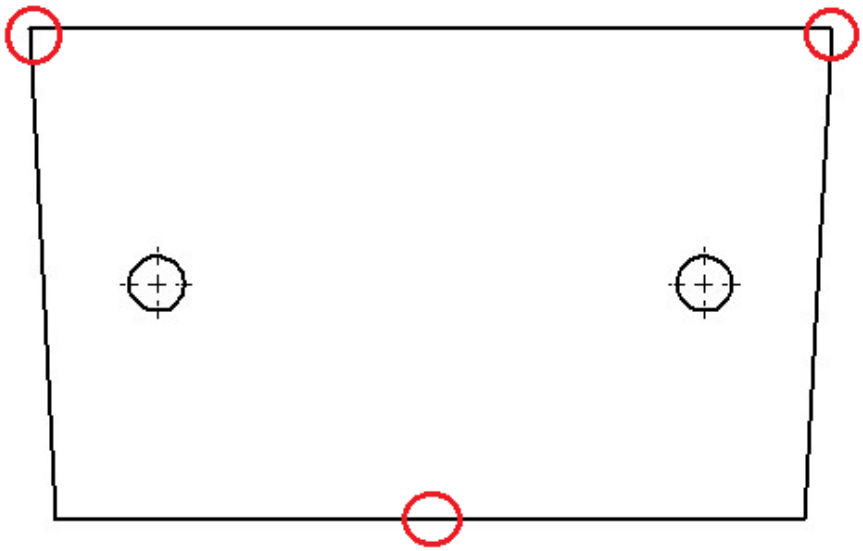


Figura 21 – Punti sul display da raggiungere dall'end-effector

Nell'immagine seguente invece è possibile vedere il movimento che può effettuare il collegamento braccio-avambraccio del robot, che come detto è circolare (in blu). Con le croci

in rosso sono stati segnati i punti del monitor della radio (in giallo) che devono essere raggiunti dall'*end-effector* (in nero).
Di conseguenza, se questi punti saranno raggiungibili dal pennino collegato all'*end-effector* del robot allora tutti gli altri punti interni della radio saranno toccati.

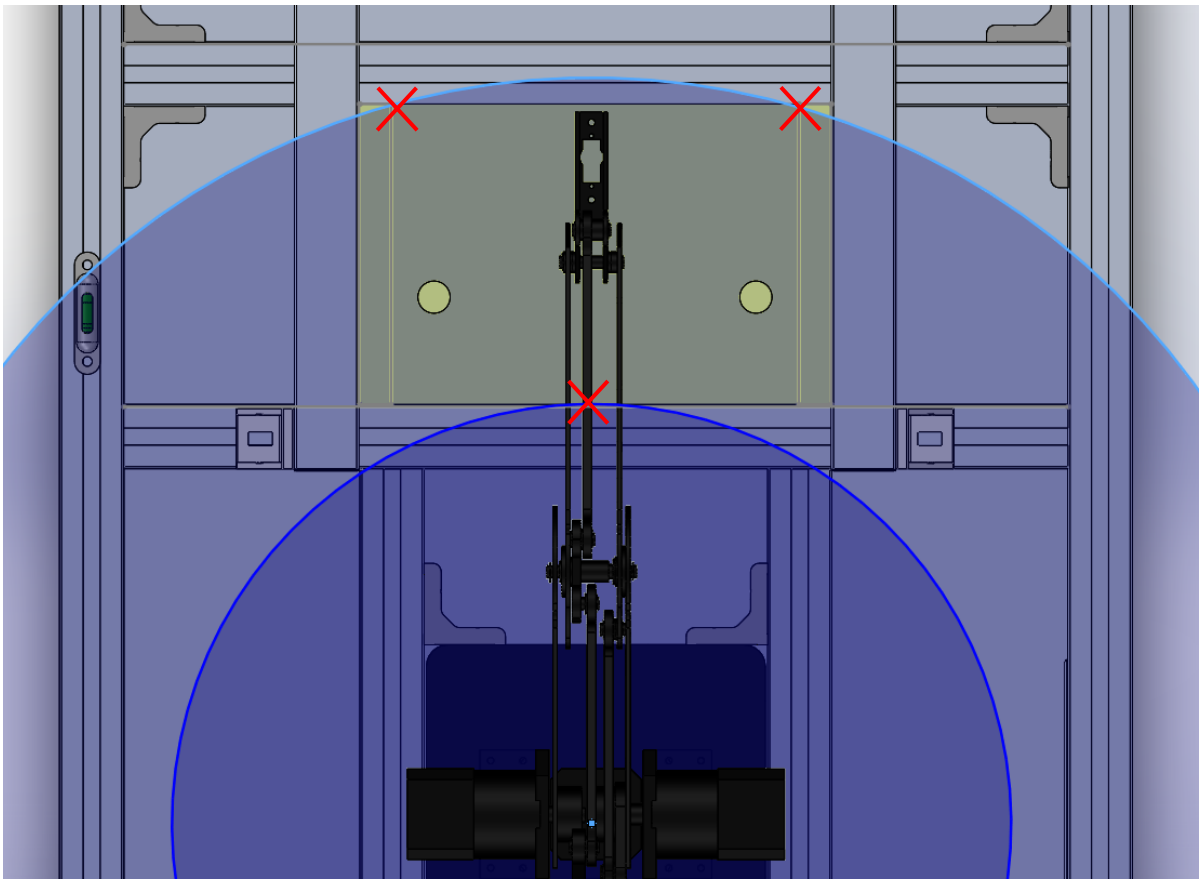


Figura 22 – Punti raggiungibili dal braccio robotico sul banco

Nelle figure sottostanti è possibile vedere, in proiezione in vista trimetrica e laterale, i CAD del robot:

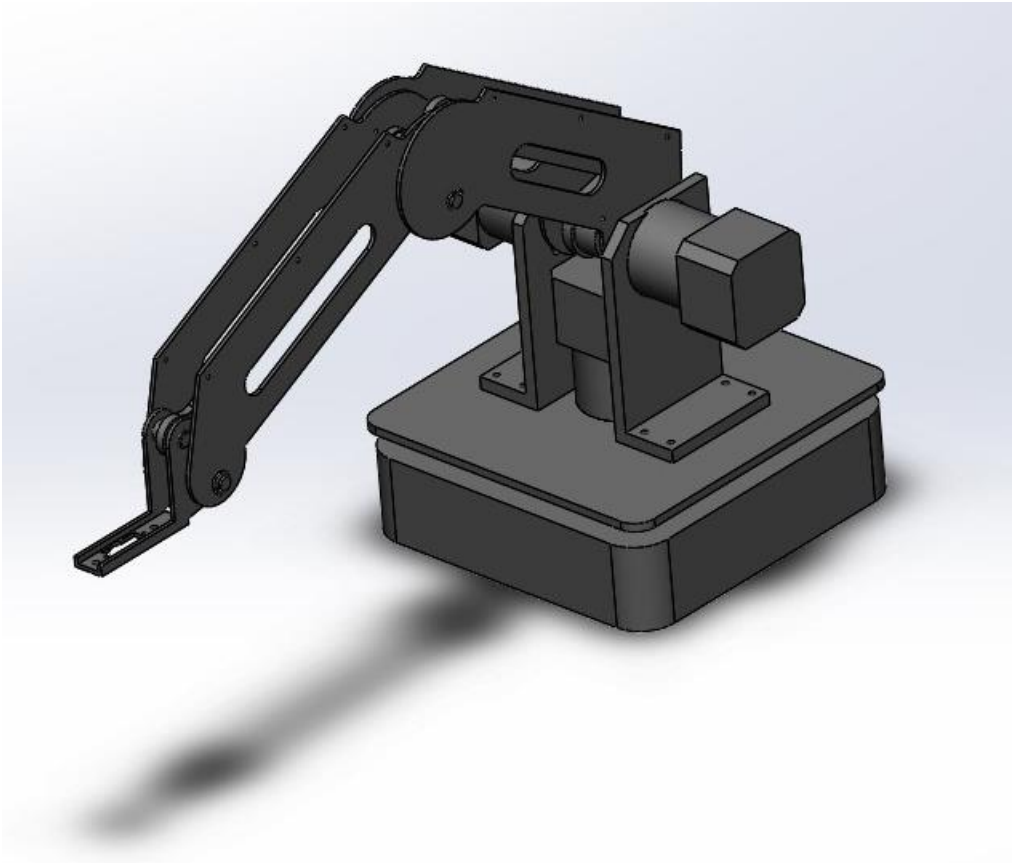


Figura 23 – CAD Dobot Magician 2.0 in vista trimetrica

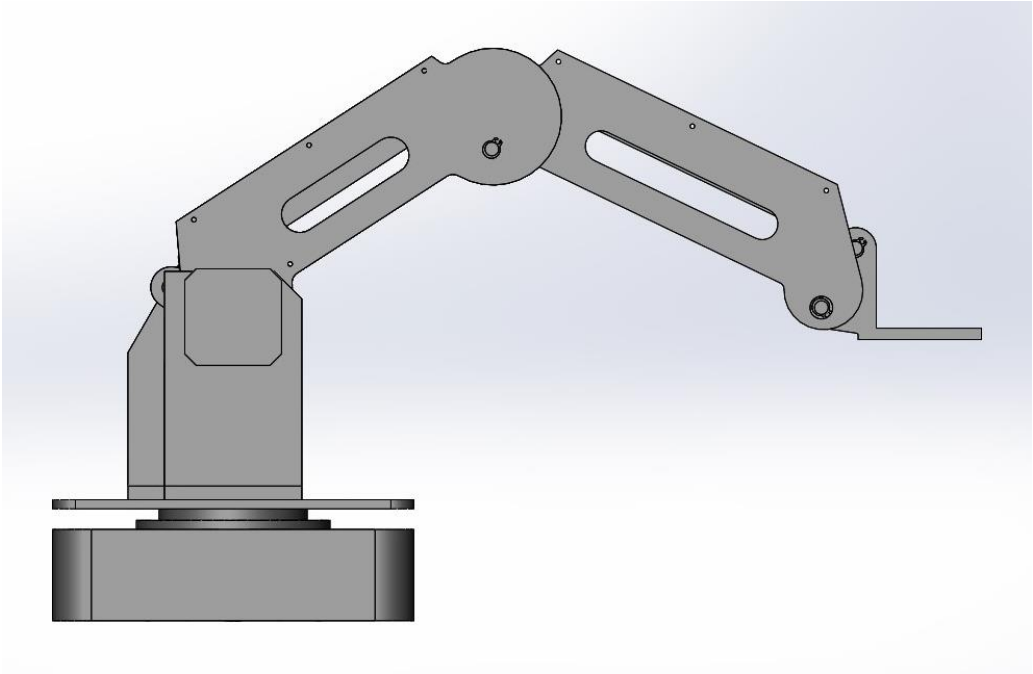


Figura 24 – CAD Dobot Magician 2.0 in vista laterale

5. Sistemi di bloccaggio

Una volta effettuate tutte le ipotesi di funzionamento, rispettando vincoli e campi di lavoro, si è passati alla ricerca dei sistemi di vincolo e bloccaggio tramite dispositivi, i quali permettono di mantenere fisso e in bolla tutto il sistema in esame.
Questa ricerca viene fatta perché durante l'attività di analisi si è ipotizzato che le radio e/o il robot potessero muoversi, andando ad alterare il test e ottenendo risultati del tutto incoerenti con la realtà.
Sono state effettuate diverse ricerche e analisi per determinare il miglior sistema di bloccaggio che permettesse di non avere movimenti.

5.1. Morsetti a leva *Push-Pull*

Figura 25 – Morsetto a leva Push-Pull

Essi sono dei sistemi di bloccaggio a leva orizzontale, ricercati sul sito della Misumi®, la quale è un'azienda venditrice di componenti meccanici configurabili, con una forza di serraggio

variabile tra i 1000 e i 2000 N. La modalità di funzionamento è simile a quello di una pressa, in cui la leva (con impugnatura in rosso) permette di far avanzare o indietreggiare il pistone in acciaio di una lunghezza massima di 30 mm.

Il sistema presenta vantaggi e svantaggi:

- Vantaggi
  - Pezzo unico, in cui è compreso pure il pistone di bloccaggio. Unica spesa aggiuntiva riguarda un terminale in gomma da attaccare alla vite così da non danneggiare né le radio né il robot.
  - Prezzo relativamente basso, circa 10-20 €/cadauno.
- Svantaggi
  - Ingombri eccessivi per un massimo di circa 300 mm in massima estensione.
  - Possibilità che la leva non mantenga la posizione e che ritorni indietro.
  - Prezzo complessivo eccessivo perché ne servirebbero minimo 8 per avere un buon fissaggio in ogni lato del robot e delle radio.
  - Attacco sulla base del banco, che in un primo momento era stata ipotizzata come una piastra forata con un foro al centro che permettesse l'inserimento delle radio. Il problema consisteva nel fatto che i fori dei morsetti a leva potessero non coincidere con i fori della piastra.

5.2. Morsettiera o unità di supporto

Figura 26 – Morsettiera di supporto

Sono dei componenti, anch'essi trovati su Misumi®, composti da una base con fori al centro collegati a un altro elemento uguale tramite una vite. In uno dei componenti uguali è presente

una leva che permette alla vite con terminale di avvitarsi e spingere contro il corpo che deve serrare.

Anche qui si può fare un'analisi per vantaggi e svantaggi:

- Vantaggi
  - Sicurezza nel funzionamento con sicura pressione nel corpo da mantenere fermo, in cui bisogna aggiungere un terminale in gomma per non danneggiare né le radio né il robot.
  - Semplicità di funzionamento e montaggio.
- Svantaggi
  - Prezzo eccessivo, circa 40 €/cadauno, che sarebbe potuto aumentare se i pezzi da comprare venissero venduti separatamente. Il prezzo complessivo sarebbe stato di circa 320 €, se ne venissero acquistati 8, eccessivo per il progetto da realizzare.
  - Eccessivi ingombri che non garantiscono la presa nel modo corretto, in quanto questi dispositivi sono molto alti.

5.3. Unità di supporto cuscinetti di vincolo

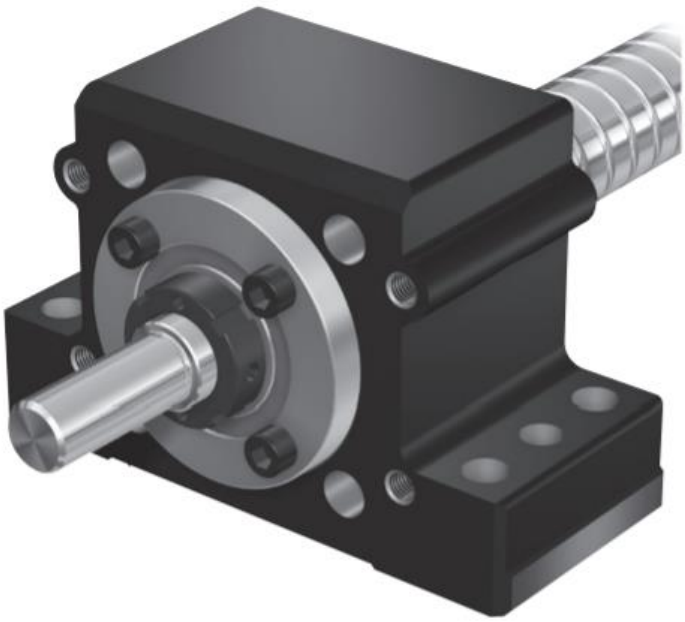


Figura 27 – Unità di supporto cuscinetti di vincolo

Trovati nel catalogo del sito Bosch Rexroth®, altra azienda venditrice di componenti meccanici, sono composti da:

- Supporto di precisione in alluminio con superfici laterali di riferimento su ambo i lati.
- Cuscinetto a doppia corona di sfere a contatto obliquo LGF.
- Ghiera a tacche NMZ.

Anche qui si può effettuare un confronto tra vantaggi e svantaggi:

- Vantaggi
  - Sicurezza nel funzionamento con sicura pressione nel corpo da mantenere fermo.
  - Semplicità di funzionamento e montaggio.
- Svantaggi
  - Eccessivi ingombri.
  - Necessità di comprare separatamente la ghiera a tacche.
  - Prezzo eccessivo, circa 500 € totali, perché bisogna acquistarne minimo 8.

5.4. Stampa 3D

Un'altra ipotesi di fissaggio consiste nel costruire le unità di supporto tramite stampa 3D, essendo l'azienda provvista di apposita stampante.

- Vantaggi
  - Completa customizzazione dei pezzi.
  - Costo relativamente basso.
- Svantaggi
  - Mancanza di un disegno CAD 3D dei componenti.

Questa ipotesi, nonché permettesse di realizzare sistemi di bloccaggio di ogni tipo e forma, è stata scartata in quanto sono stati utilizzati profilati in alluminio.

5.5. Profilati in alluminio

La soluzione scelta è stata quella di utilizzare profilati in alluminio, già in uso per la costruzione del telaio della struttura del banco. Questa soluzione è stata la scelta vincente perché permette di non avere ingombri e di avere un'ottima tenuta.
Per il robot, i profilati utilizzati sono fissi così da mantenerlo sempre nella stessa posizione.
Per le radio, invece, si è usato un sistema di profilati mobili in quanto le radio analizzate hanno dimensioni differenti.
Il bloccaggio dei profilati fissi avviene tramite un opportuno *sistema di collegamento in PVS*, come suggerito dall'azienda fornitrice del materiale, Meccania®.

Figura 28 – Profilati in alluminio con collegamento PVS

Figura 29 – Sequenza montaggio collegamento PVS

Il bloccaggio dei profilati mobili avviene invece tramite opportune squadrette con viti, rondelle e dadi con testa a martello.

Si è usata la *squadretta a doppia parete* per il fissaggio dei profilati delle radio mentre per la tenuta dei profilati su cui è montata la webcam si è utilizzata la *squadretta di montaggio*, essendo essa di dimensioni maggiori e capace di attutire maggiormente i carichi e le vibrazioni nascenti durante il test.

Questa scelta viene analizzata nel dettaglio più avanti nella trattazione.

Di seguito delle immagini CAD dei componenti appena descritti effettuate tramite SolidWorks:

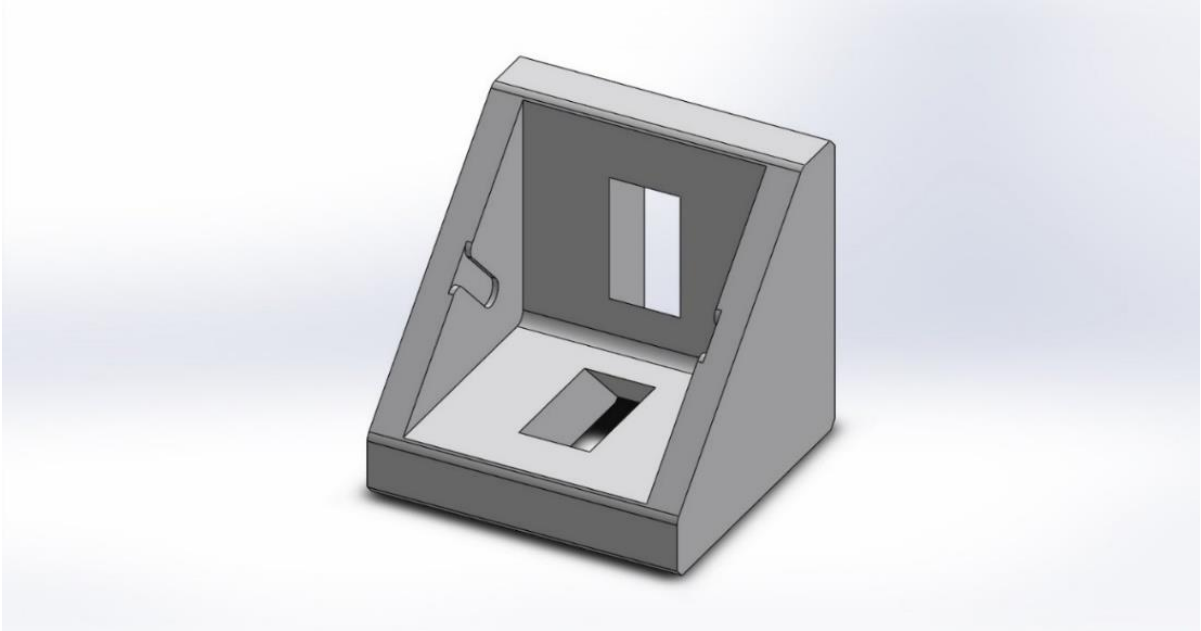


Figura 30 – CAD squadretta a doppia parete

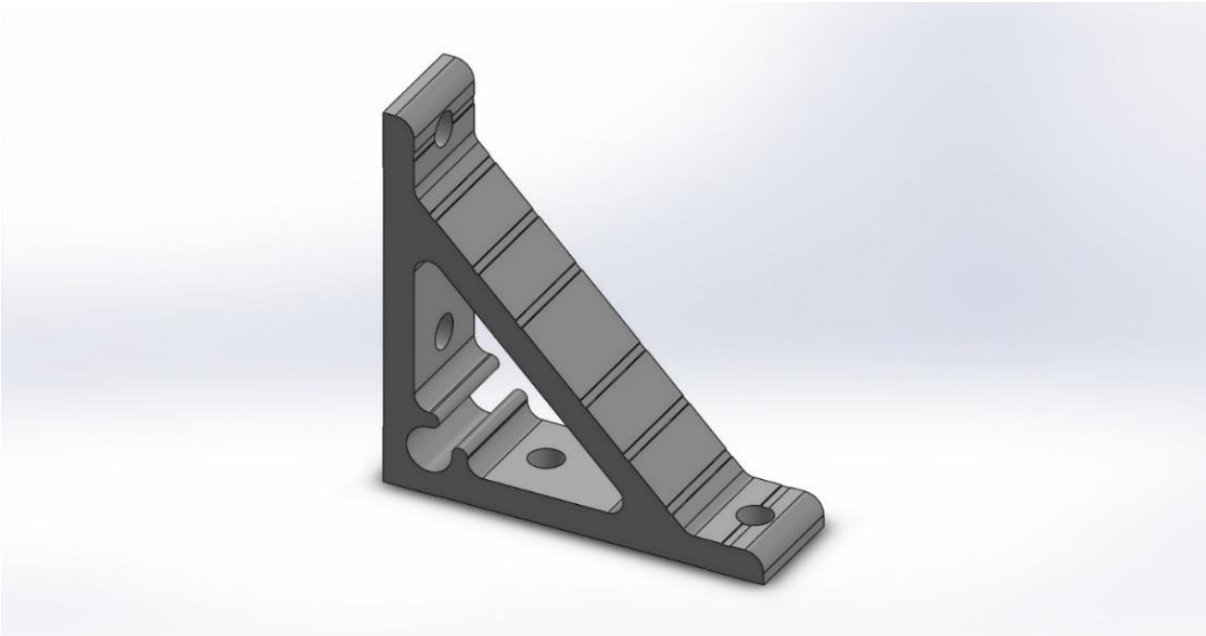


Figura 31 – CAD squadretta di montaggio

5.6. Supporti con piedini di livellamento

Figura 32 – Piedini di livellamento

Soluzione trovata su Misumi® con il compito, essendo degli snodi con terminale in materiale elastico, di potersi adattare ad ogni superficie. L'inconveniente principale consiste nel loro

montaggio, in quanto è necessario un'opportuna unità di tenuta che permetta il loro perfetto funzionamento.

- Vantaggi
  - Prezzi molto bassi, circa 15 €/cadauno.
  - Ingombri contenuti.
  - Possibilità di adattarsi ad ogni superficie.
- Svantaggi
  - Necessità di trovare dei supporti o delle guide che permettano ai piedini di inserirsi al loro interno.
  - Dimensioni del terminale elastico che potrebbe essere eccessivo rispetto alle dimensioni delle radio.

I dispositivi ricercati ed esaminati hanno presentato alcune difficoltà costruttive durante le ipotesi di montaggio del banco, in quanto sperimentalmente non si è riusciti a montarli nel modo migliore, non riuscendo a ottenere un buon fissaggio.
Inoltre, si è verificato che essi potrebbero creare delle difficoltà durante la fase di movimentazione del braccio robotico.

Infine, si è visto che gli ingombri di tutti i dispositivi esaminati non erano contenuti, per cui si è deciso di adottare la soluzione di utilizzare dei profilati in alluminio mobili, aventi la possibilità di scorrere su altri profilati in alluminio fissi.
La scelta dei piedini di livellamento è stata però effettuata per la tenuta in piano della struttura del banco prova stesso, cioè come appoggio del telaio sulla scrivania.
Essi sono dotati di apposita filettatura con dado che permette di innalzare o abbassare la struttura, necessario per mettere "in bolla" il sistema e quindi di non avere piani inclinati che causerebbero difficoltà durante il test sulle radio.

6. Realizzazione del banco tramite SolidWorks

La realizzazione del banco consta di tre fasi fondamentali:

1. Realizzazione di un primo prototipo per permettere test funzionali con il robot
2. Progettazione con profilati in alluminio
3. Realizzazione del banco prova definitivo

6.1. Realizzazione di un primo prototipo per permettere test funzionali con il robot

Il primo modello, fondamentale per la realizzazione di quello definitivo, consiste in una struttura di base in legno accoppiato a profilati in alluminio $20x20\ mm$ acquistati dall'azienda produttrice STS®. Essi sono stati montati grazie all'ausilio di opportune viti, rondelle e dadi a martello, le quali hanno permesso una buona tenuta ma non è stato possibile smorzare bene le vibrazioni e le forze che si instauravano una volta che viene messo in funzionamento il robot.
I profilati in alluminio formano angoli di 90°, bloccati grazie all'ausilio di opportune squadrette, anch'esse aventi la forma a 90°, e bloccate con viti, rondelle e dadi a martello. Degli opportuni profilati vengono utilizzati per bloccare le radio e tenerle parallele al piano, ma le squadrette utilizzate non tenevano bene e quindi si è agiti anche su queste squadrette, andando a sceglierne di migliori.
La base su cui poggia il robot è anch'essa realizzata in legno. E sulla stessa base si sono ricavati degli opportuni spazi per inserire uno switch USB, cioè un dispositivo che presenta diversi ingressi USB e un'unica uscita sempre USB, e un raspberry, cioè un piccolo computer a scheda singola.
Inoltre, non è presente una base per il banco stesso, su cui posizionare eventuali futuri dispositivi secondari.
Come si può notare dalle figure sottostanti, la struttura è posizionata su di una scrivania, il che non garantisce la messa in bolla del progetto, in quanto non sono presenti piedini di livellamento.

Sul profilato verticale sopra la struttura viene montata una webcam, con il compito di andare a fotografare le azioni che il braccio robotico effettua sulla radio in prova. In questa prima struttura si è visto che, durante il test, la webcam oscillava e non riusciva a effettuare una foto di buona qualità. Questo ha rappresentato il principale studio della seguente trattazione, cioè l'aver effettuato delle prove tramite un sensore accelerometrico collegato a una piattaforma Arduino.

Infine, le dimensioni sono state prese in maniera approssimativa, non considerando le effettive dimensioni delle radio e dei componenti del robot, quindi presentava una struttura molto alta, con eccessivi ingombri e che non riusciva a smorzare bene le vibrazioni.

Come è visibile dalle foto sottostanti, si possono notare tutte le problematiche trattate sopra.

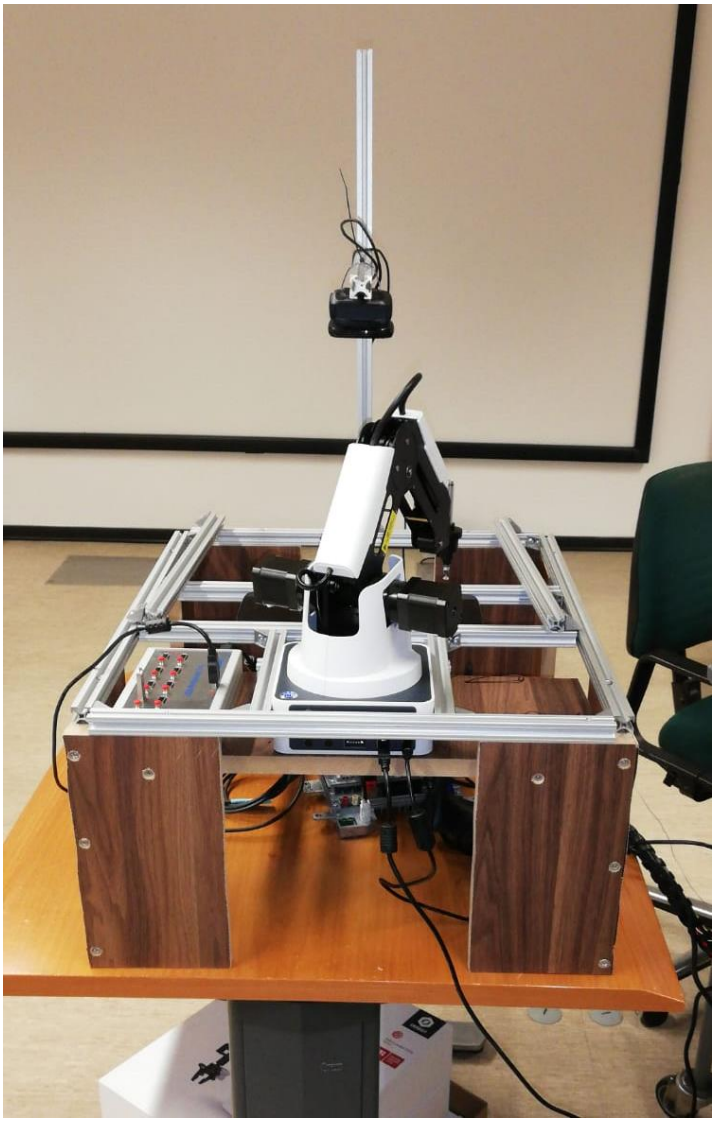


Figura 33 – Prototipo di banco in legno e alluminio

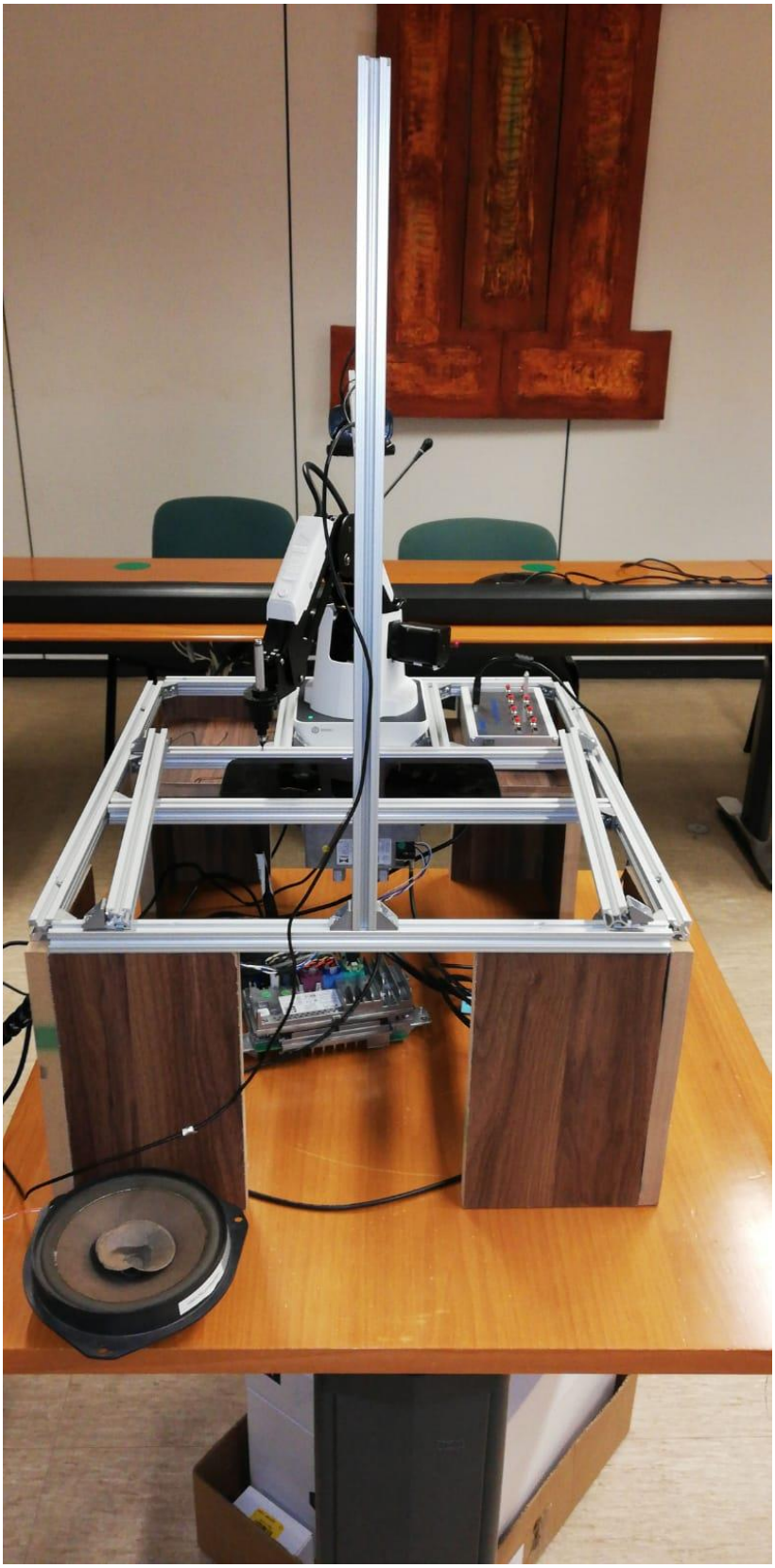


Figura 34 – Prototipo di banco in legno e alluminio

6.2. Progettazione con profilati in alluminio

La seconda struttura prende spunto da quella iniziale in legno, dove, però, vengono migliorati i principali difetti che si sono riscontrati in precedenza. Essa viene progettata interamente su SolidWorks e i componenti sono stati presi su siti di progettazione meccanica, principalmente: Meccania - Profilati e sistemi S.r.l.® e Misumi®, ma anche su: RS Components®, Bosch Rexroth S.p.A.® e STS S.r.l.®.

La struttura principale che prima era in legno viene sostituita con dei profilati in alluminio $30x30\ mm$, i quali poggiano su dei piedini anti-vibrazionali. Questi ultimi vengono collegati ai profilati tramite delle opportune boccole che vengono inserite nei fori cui sono dotati i profilati stessi alle loro estremità.

Le boccole sono caratterizzate dall'avere lo stesso diametro esterno dei fori dei profilati, $12\ mm$, e la stessa filettatura interna delle viti dei piedini anti-vibrazionali, $M10$.

Tutti i profilati sono collegati tramite opportune squadrette, che a seconda del compito che devono compiere si hanno:

a) Squadrette fisse: A30.00 - Squadretta di montaggio 30 mm:

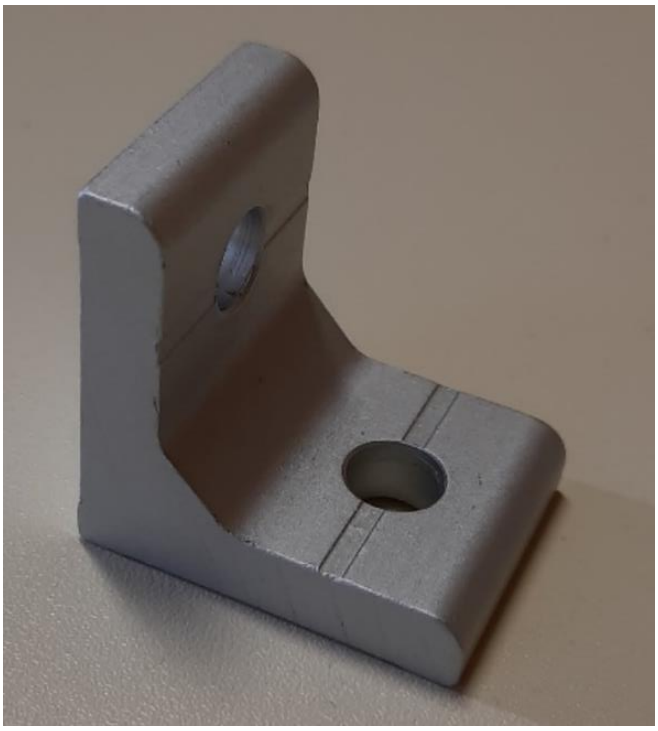


Figura 35 – Squadretta di montaggio

- 2 per bloccare il robot e non farlo andare in avanti;
- 4 per il profilato mobile, che permette il bloccaggio delle radio;
- 2 per il profilato verticale che sorregge la webcam.

b) Squadretta per telecamera: A30.30 - Squadretta grande con rinforzo:

Figura 36 – Squadretta grande con rinforzo

Essa è una squadretta molto robusta, con un rinforzo diagonale, il quale permette di sorreggere il profilato su cui viene montata la webcam. Viene utilizzata questa tipologia di squadretta perché, durante le prove effettuate con la prima tipologia di banco, sulla quale era montata una squadretta semplice, si è notato che la webcam subiva eccessive vibrazioni e non permetteva una buona visione della prova e di conseguenza un risultato distorto.

Questa tipologia di squadretta ha permesso di ovviare a questo inconveniente.

c) Squadrette fisse: B30.50 - Squadretta a doppia parete:

Figura 37 – Squadretta a doppia parete

Con la sola funzione di permettere un facile smontaggio perché vengono usate nei due profilati mobili, i quali servono a bloccare lateralmente le radio. Questi due profili sono ausiliari, servono in caso di necessità solo se le radio hanno bisogno di un fissaggio laterale.

Tutte queste squadrette presentano in centro dei fori; essi servono a far passare delle apposite viti con rondelle e dadi a martello. Queste ultime verranno serrate tramite chiavi esagonali, più propriamente dette "chiavi a brugola".
I profilati hanno diverse lunghezze, per la precisione:

Lunghezza [mm]	Quantità [pz]
440	3
590	2
240	6
300	1
380	2

Tabella 12 – Lista provvisoria lunghezze profilati

Le dimensioni dei profilati verticali sono state prese principalmente in modo tale da permettere l'analisi sulla radio montata sulla Fiat Doblò, poiché essa è l'unica che presenta una parte posteriore molto ingombrante, a differenza delle altre che invece sono meno ingombranti.
Quelle dei profilati orizzontali, invece, sono stati studiati in modo tale da far entrare la base del robot, uno switch USB e un raspberry.
Infine, i profilati in lunghezza sono stati studiati per fare entrare, oltre i dispositivi prima citati, anche le radio.
In definitiva le dimensioni finali sono state prese così da avere un banco compatto, leggero e facilmente trasportabile.
I profilati presentano dei terminali di chiusura $30x30\ mm$ così da proteggere l'operatore ed evitare che si faccia male con gli spigoli appuntiti del profilato.
Sono inoltre presenti due basi realizzate in composito:

- una su cui poggiano robot, raspberry e switch USB;
- l'altra su cui vengono poggiati tutti gli altri elementi secondari, utili al funzionamento del test.

6.3. Realizzazione del banco prova definitivo

Una volta definite le dimensioni finali del banco e i materiali necessari, si è passati alla realizzazione. Dopo opportune valutazioni di disponibilità dei materiali, sia come CAD sia come prodotto finito, costo, trasporto e qualità, si è scelto come azienda fornitrice: Meccania®. Essa si è resa disponibile, suggerendo delle modifiche da sfruttare in base alla loro modalità di costruzione e realizzazione, sia a livello di profilati che di attacchi e fissaggi.
Il miglioramento principale consiste nel collegamento dei profilati in alluminio, i quali non sono più collegati solo tramite squadrette ma anche tramite un *sistema di collegamento PVS*, che consiste in una tecnica di montaggio così descritta:

a) Viene praticato un foro cieco con fresa cilindrica, perpendicolare all'asse del profilato d'alluminio precedentemente tagliato su misura.
b) Un cilindro filettato, per accettare il grano cono maschio, viene inserito nel foro praticato in precedenza nel profilo in alluminio anodizzato.

c) L'ancoraggio e la molla di richiamo vengono inseriti nel cilindro attraverso la scanalatura coassiale del profilo d'alluminio.
d) L'ancoraggio viene inserito nella scanalatura esterna del profilato e la vite a brugola con estremità conica viene bloccata realizzando un accoppiamento a cono-piano inclinato con l'incavo a V dell'ancoraggio. Questo sistema consente di realizzare una forza di trazione tra i due profilati di parecchie migliaia di Newton senza pericolo di rotture o di deformazioni delle parti in lega d'alluminio.

Il *sistema di connessione PVS* consente di collegare tra di loro ed in modo ottimale tutte le diverse sezioni dei profili di alluminio anodizzato, facendo uso di connettori combinati in modo analogo ai connettori standard.

Esso risulta essere molto flessibile e consente di apportare modifiche e integrazioni successive senza spreco di materiale.

Figura 38 – Esempio di collegamento PVS

Le squadrette utilizzate sono sempre le stesse della seconda ipotesi di banco, solo che vengono diminuite le quantità perché principalmente i profilati vengono collegati tra loro tramite il sistema di collegamento sopra descritto.

I profilati hanno le stesse lunghezze ipotizzate, in più vengono aggiunti:

- 2 profili da 150 mm per sorreggere il robot;
- 2 profili da 440 mm per creare una base per i componenti secondari;
- 2 profili da 590 mm per creare una base per i componenti secondari.

In definitiva, la lista dei profilati in alluminio necessari è riportata nella tabella sottostante:

Lunghezza [mm]	Quantità [pz]
440	5
590	4
240	6
300	1
380	2
150	2

Tabella 13 - Lista definitiva profilati in alluminio

Sono stati utilizzati anche dei terminali di chiusura, corrispondenti a dei "tappi" per evitare graffi e lacerazioni da parte dei profili, essendo questi ultimi molto taglienti alle loro estremità. Ne vengono usati 12, poiché sono 12 le estremità lasciate scoperte.

La struttura viene sorretta da 4 piedini anti-vibrazionali, i quali sono collegati ai profilati tramite delle opportune boccole che vengono inserite nei fori cui sono dotati i profilati stessi alle loro estremità.
Le boccole sono caratterizzate dall'avere lo stesso diametro esterno dei fori dei profilati, $12\ mm$, e la stessa filettatura interna delle viti dei piedini anti-vibrazionali, $M10$.

Da Misumi® sono state acquistate 2 livelle a bolla, le quali permettono di capire se il sistema è in piano o meno. Se non lo fosse, allora basta abbassare o innalzare i piedini su cui poggia la struttura fino a quando non viene verificato. Esse sono posizionate su due profilati, uno laterale e uno posteriore, così da avere la certezza di avere il parallelismo col piano su tutta la struttura. Infine, da RS Components® sono stati acquistati 2 righelli di tipo industriale, anch'essi posizionati su due profilati, uno laterale, opposto a quello in cui si trova la livella a bolla, e l'altro sul profilato comune al robot e alla radio. Essi hanno il compito di posizionare nella posizione corretta le radio così da avere simmetria tra esse e il robot.
Nelle figure sottostanti è possibile vedere delle immagini CAD del banco nelle tre viste: trimetrica, laterale e dall'alto. Infine, una foto del banco realizzato.

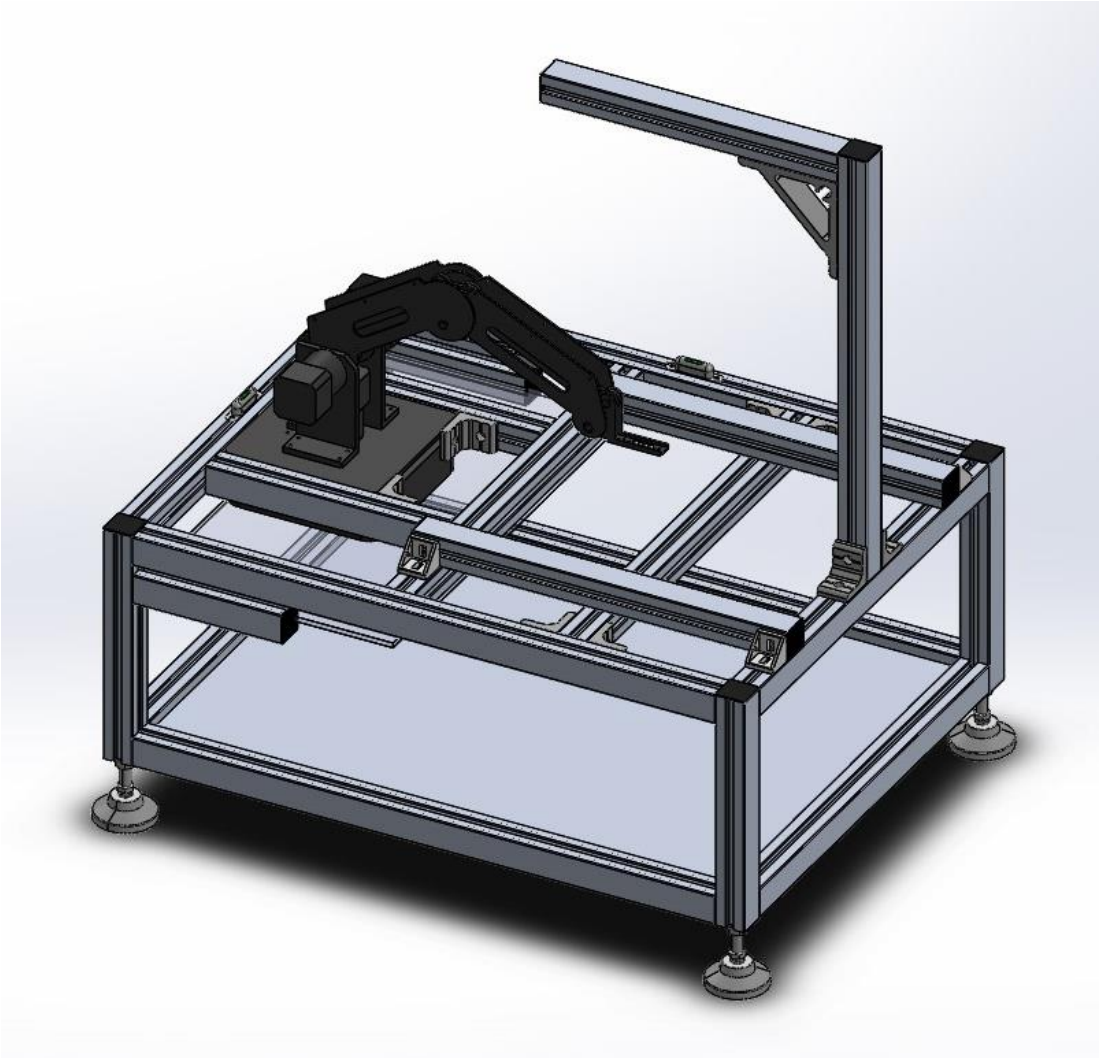


Figura 39 – CAD banco e robot in vista trimetrica

Come è possibile vedere dalla figura, si notano tutti gli elementi descritti sopra.
I piedini di livellamento anti-vibrazionali sorreggeranno la struttura totale, formata dai profilati in alluminio anodizzato $30x30\ mm$, le basi in compensato che sorreggono il robot e gli elementi utili al suo funzionamento, i terminali di chiusura, tutte le tipologie di squadrette utilizzate e le livelle a bolla.
Non sono visibili i righelli e la webcam perché non esiste un CAD di questi elementi. Inoltre, non sono visibili i sistemi di collegamento in PVS e le boccole dei piedini perché interni ai profilati, e le viti con rondelle e dadi a martello perché non utili ai fini della rappresentazione CAD della struttura.

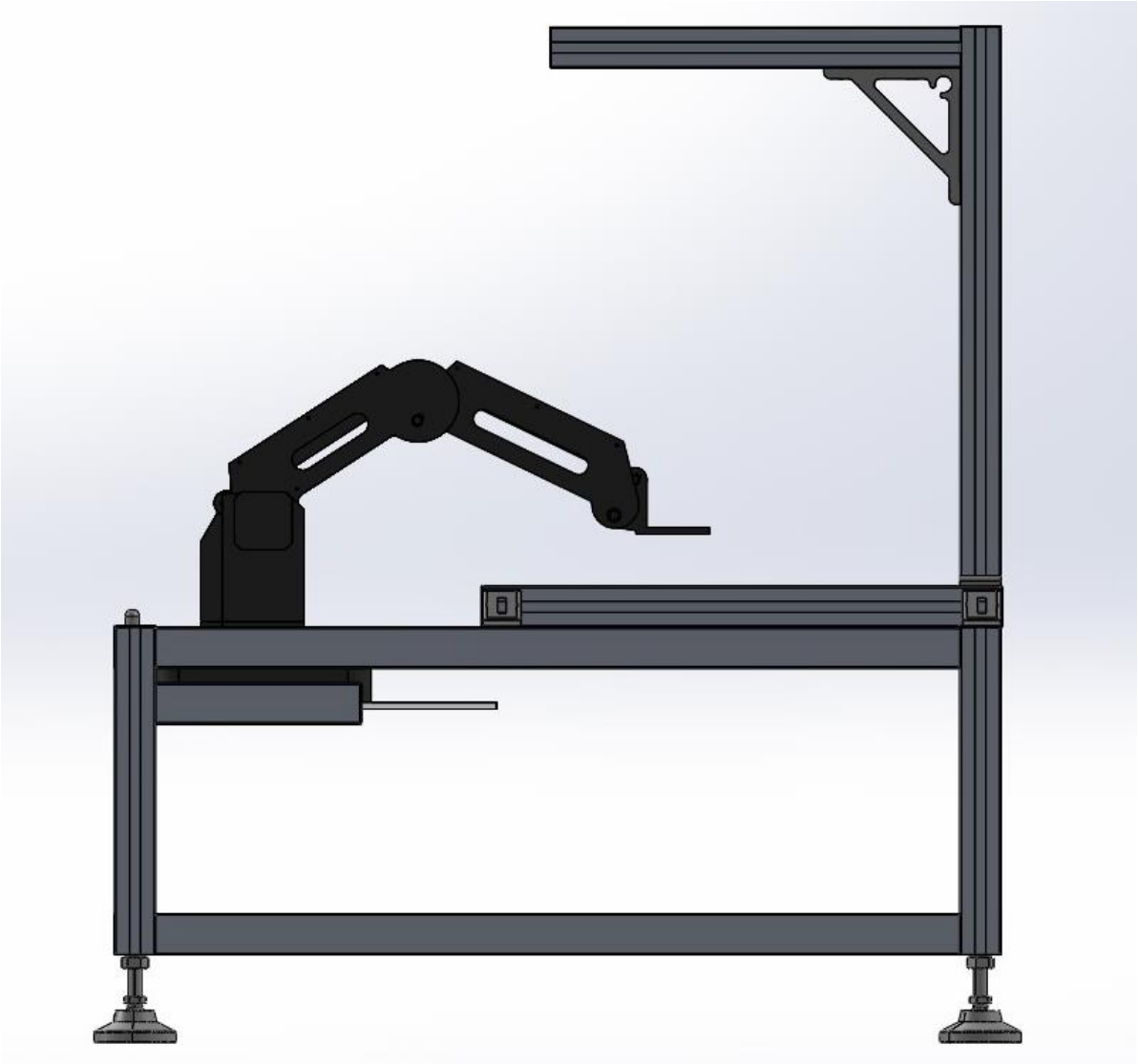


Figura 40 – CAD banco e robot in vista laterale

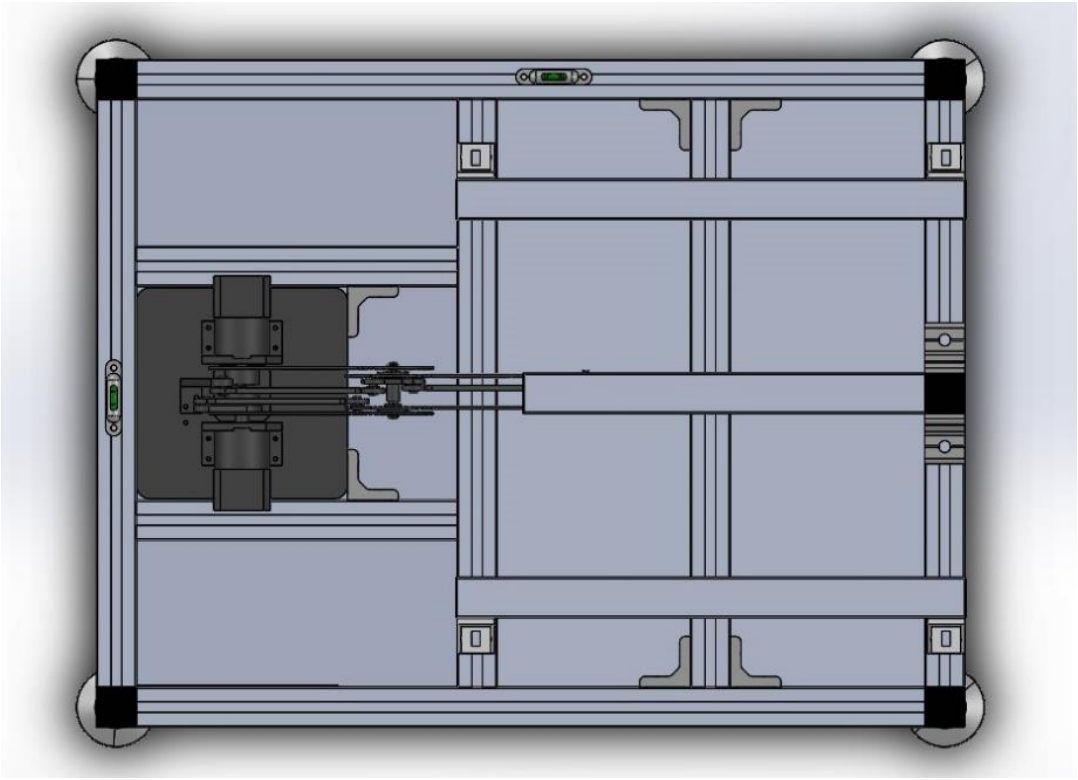


Figura 41 – CAD banco e robot in vista dall'alto

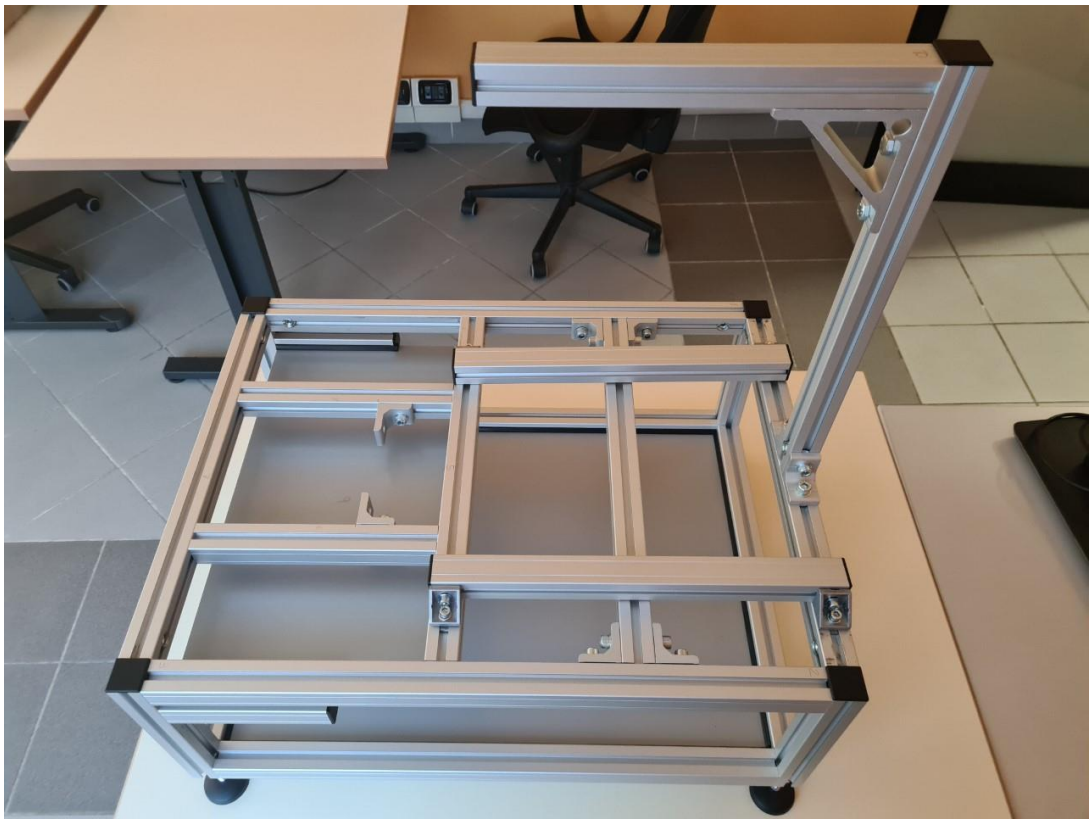


Figura 42 – Foto banco prova costruito

7. Analisi vibrazionale con sensore accelerometrico

Una volta progettata e realizzata la struttura del banco prova per test si è deciso di effettuare un'analisi vibrazionale del profilato su cui è montata la webcam, poiché, come già accennato nei capitoli precedenti, è soggetto a maggiori vibrazioni rispetto al resto della struttura.
Si è notato che il robot, lavorando alla massima velocità, ipotesi peggiorativa poiché non si verifica durante la lavorazione, potrebbe indurre delle vibrazioni nella struttura, facendo oscillare il profilato orizzontale dove è montata la webcam.
Oltre questa prova, ne sono state effettuate altre dove si è ipotizzato che un oggetto, da una specifica altezza, colpisca verticalmente la struttura in dieci punti diversi e si è studiato l'andamento delle accelerazioni e dei momenti giroscopici nelle tre direzioni dello spazio, che subisce il profilato in esame, rispetto al tempo.
Lo studio mostrerà la massima oscillazione che subisce il sensore attaccato al profilato e la durata dell'oscillazione. Da quest'ultima considerazione è possibile capire dopo quanto tempo il sistema ritorna nella sua condizione iniziale di zero; in questo modo la webcam si assesta, non oscilla e viene permesso di effettuare foto e video che siano coerenti con le ipotesi.
È stato poi effettuato uno studio della struttura in funzione della frequenza, il quale mostrerà l'effettivo smorzamento che subirà la struttura. Inoltre, è possibile vedere quali saranno i picchi di oscillazione e a quali frequenze si verificheranno.

In una prima analisi sono state effettuate delle ricerche online per capire quali tipologie di accelerometri esistono in commercio e quale sia il loro funzionamento, cioè come devono essere montati sull'oggetto in esame, cosa misurano oltre l'accelerazione (velocità, spostamento, momenti angolari, …) e come interpretare i dati che vengono forniti in uscita.
A causa dell'eccessivo costo che presentano questi accelerometri (qualche centinaia di euro), si è passati alla ricerca di un'altra tipologia di accelerometri, i sensori accelerometrici, i quali presentano un costo non eccessivo (qualche decina di euro).
Essi sono degli strumenti in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione effettuando il calcolo della forza rilevata rispetto alla massa dell'oggetto, cioè una forza per unità di massa.
Tramite lo spostamento del sensore, che inizialmente è fermo nella sua posizione di zero, a seguito di una massa che "sbatte" contro la struttura, si misura l'accelerazione che subisce il

sensore stesso. Il sensore trasforma lo spostamento in un segnale elettrico acquisibile da un sistema di misura.

7.1. Sensore *MPU-6050*

Il sensore utilizzato nelle prove effettuate è un "*InvenSense MPU-6050*", il quale è un sensore accelerometrico piezoelettrico a bassa impedenza e dispone di un piccolo microcircuito integrato e di un transistor FET che converte la carica in tensione a bassa impedenza, per interfacciarsi facilmente con la strumentazione standard.
Le dimensioni sono ridotte: $21{,}2\ mm\ x\ 16{,}4\ mm\ x\ 3{,}3\ mm$.

Figura 43 – Vista frontale sensore

Figura 44 – Vista posteriore sensore

Il sensore contiene un accelerometro MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) a 3 assi ed un giroscopio MEMS a 3 assi. Tramite quest'ultimo è possibile misurare l'accelerazione angolare di un corpo su di un proprio asse, Roll, Pitch e Yaw, cioè rispettivamente Rollìo, Beccheggio e Imbardata.

Il sensore risulta essere molto preciso, in quanto contiene al suo interno un convertitore A/D (da analogico a digitale) da 16 bit per ogni canale. Perciò cattura i canali X, Y e Z contemporaneamente.

Inoltre, permette anche di misurare la temperatura del sensore stesso, che in condizioni non particolari misura quindi la temperatura dell'ambiente in cui esso si trova.

Il sensore possiede un protocollo di comunicazione standard I^2C (Inter Integrated Circuit), cioè un sistema di comunicazione seriale bifilare, facile da interfacciare con Arduino.

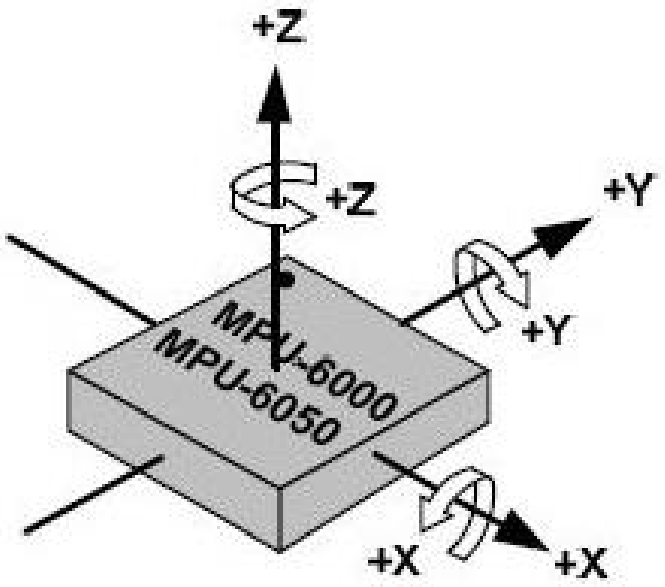


Figura 45 – Orientamento degli assi del sensore

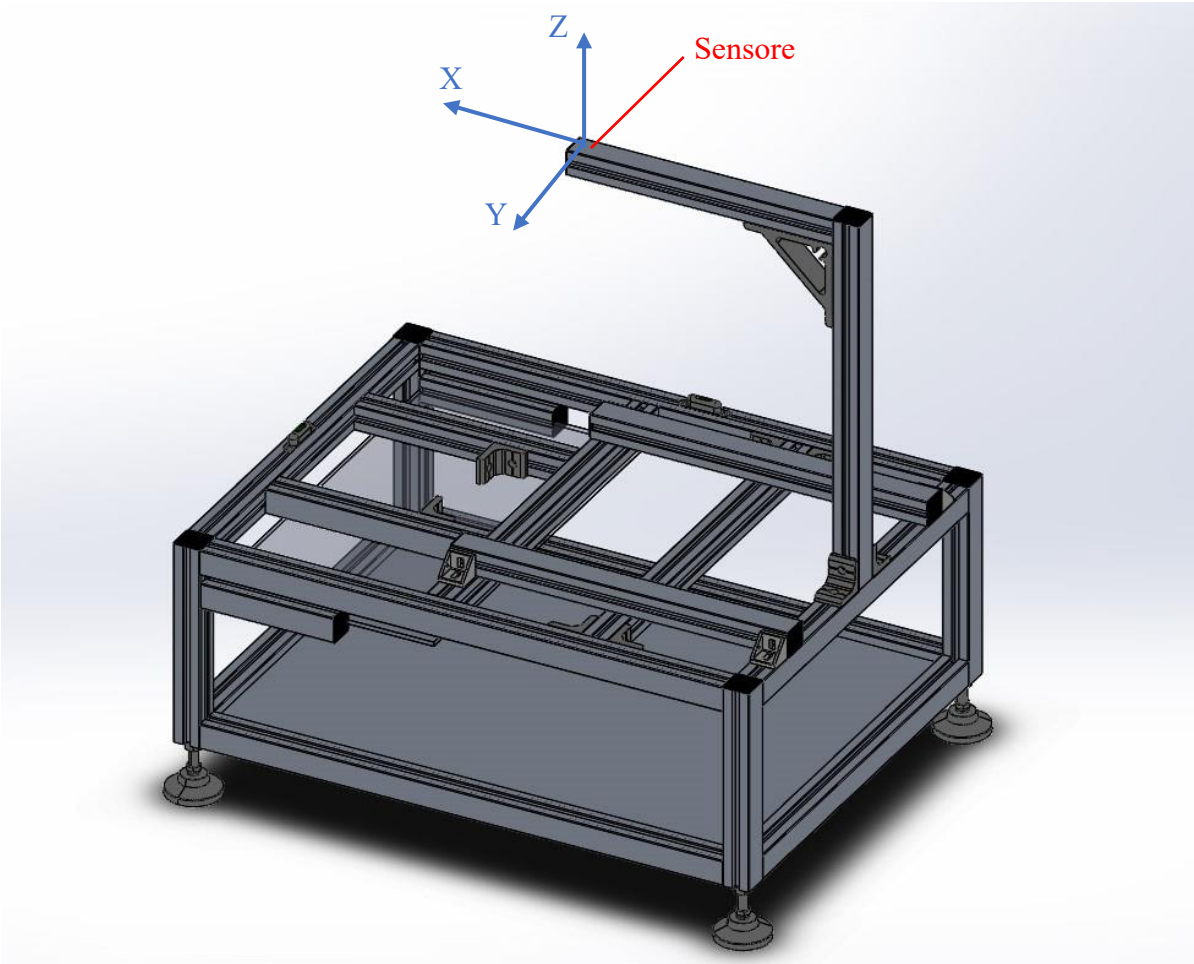


Figura 46 – Posizione del sensore sul banco

Caratteristiche sensore MPU-6050	
Chip	Convertitore A/D a 16 bit integrato
Range di misura giroscopio	± 250 / ± 500 / ± 1000 / ± 2000 $°/s$
Sensibilità giroscopio	131 / 65,5 / 32,8 / 16,4 $LSB/°/s$
Range di misura accelerometro	± 2 / ± 4 / ± 8 / ± 16 g
Sensibilità accelerometro	16384 / 8192 / 4096 / 2048 LSB/g
Range di temperatura	$-40 \div 85$ $°C$
Interfaccia	I^2C
Alimentazione	da 3 a 5 V in DC
Assorbimento durante la misura	< 10 mA

Tabella 14 – Caratteristiche sensore

L'unità di misura comunemente utilizzata per gli accelerometri è g, intesa come accelerazione di gravità, cioè 9,81 m/s^2. Quindi tutti i valori ricavati in uscita sono multipli di questa costante gravitazionale.
Mentre per il giroscopio si utilizzano i $°/s$, cioè di quanti gradi viene ruotato il sensore rispetto all'asse considerato in ogni secondo.
La sensibilità è invece misurata in LSB (Least Significant Bit), il quale rappresenta l'ultimo bit di destra.

Descrizione dei pin		
Pin	Descrizione	Funzione
1	VCC	Alimentazione, è possibile alimentare il modulo direttamente a + 5 V
2	GND	Terminale di massa
3	SCL	Serial clock
4	SDA	Serial data
5	XDA	Serial data per il collegamento a sensori esterni
6	XCL	Serial clock per il collegamento a sensori esterni
7	ADO	Indirizzo slave I^2C LSB (ADO)
8	INT	Interrupt digital output (totem pole or open drain)

Tabella 15 – Descrizione pin del sensore

Nota: di solito vengono utilizzati solamente i pin 1-2-3-4.

7.2. Arduino Uno

Come accennato in precedenza, per funzionare, il sensore ha bisogno di un collegamento con un modulo Arduino. Esistono diverse versioni hardware di Arduino, a seconda del tipo di attuatori e sensori montati sul dispositivo. I vari modelli sono differenziati anche dalla potenza di calcolo, dalla memoria o dalle dimensioni. Sono tutti accomunati dal fatto che supportano lo stesso software, quindi, a meno di utilizzare componenti appositi di uno specifico tipo di piattaforma, il programma creato può essere utilizzato anche su un altro hardware Arduino.

Per rendere il dispositivo più interattivo, la piattaforma è fornita di funzionalità di input e output (I/O), grazie alle quali riceve i segnali raccolti dai sensori esterni.
Il comportamento della scheda è gestito dal microcontrollore che governa la piattaforma in base alle scelte determinate dal particolare programma in esecuzione sulla scheda.
L'interazione con l'esterno avviene attraverso attuatori e canali di output.
Per la trattazione in esame viene utilizzato un *Arduino Uno*. Esso è un microcontrollore basato sul chip *ATmega328*. È provvisto di 14 pin digitali di I/O, 6 pin analogici, un oscillatore ceramico a 16 MHz, una porta USB, un jack di alimentazione, un supporto ICSP e un tasto di reset. Per l'accensione è sufficiente collegarlo all'alimentazione tramite collegamento USB con un computer o collegandolo ad una batteria.
Tra i pin a disposizione alcuni hanno degli utilizzi particolari, per esempio: i pin digitali 2 e 3 possono essere utilizzati come pin di Interrupts, il pin analogico A4 come pin "Serial Data" e il pin analogico A5 come pin "Serial Clock".
La scheda può essere alimentata esternamente ad una tensione variabile tra i 6 e i 20 V, anche se il range consigliato è compreso tra i 7 e i 12 V.
Sono inoltre presenti 3 pin per la messa a terra indicati dalla sigla "GND".

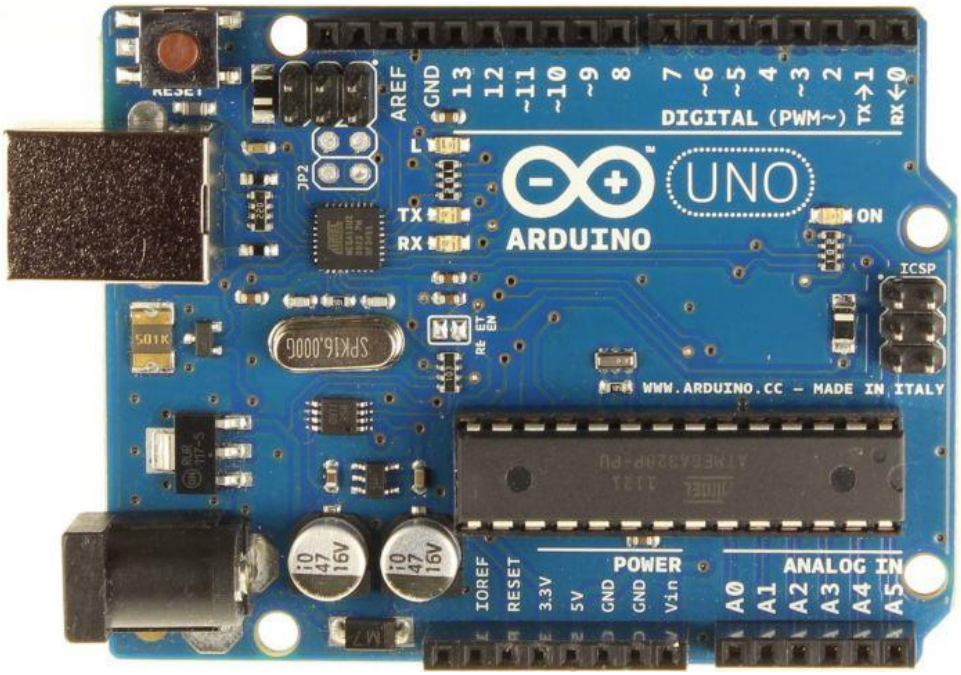


Figura 47 – Board Arduino Uno

A questo hardware viene affiancato un ambiente di sviluppo integrato (IDE – Integrated Development Environment) multipiattaforma, quindi utilizzabile su Linux, Apple Macintosh e Microsoft Windows. Questo software permette di scrivere con un linguaggio, che deriva dal linguaggio C e C++, chiamato Wiring.
Di seguito vengono elencate alcune caratteristiche del dispositivo utilizzato.

- Linguaggio Wiring

Arduino viene usato in combinazione con un IDE, il quale permette di caricare il programma sulla piattaforma, nel caso in esame attraverso la porta seriale. Con questa procedura è possibile scrivere i programmi in linguaggio Wiring che, come accennato in precedenza, è simile al linguaggio C e C++.
Una piattaforma Arduino è dotata di un quantitativo di RAM che varia da $1\ kB$ (kiloByte) fino a $4\ kB$, da qui si ha la necessità di creare programmi molto semplici perché la memoria utilizzabile non è eccessiva.
Un programma in gergo viene chiamato "*sketch*", ovvero schema, abbozzo.
Per rendere più semplice la programmazione e per rendere il codice realizzato portabile anche su altre piattaforme, è possibile importare librerie da C o C++, quindi vengono supportati file con estensione .c, .cpp oppure .h per gli header dei file. L'unica limitazione riguarda le librerie importate, le quali devono soddisfare la grammatica del compilatore di Arduino.
Lo sketch è considerato l'unità di codice che è caricata e che gira nella piattaforma ed è l'unico programma che governa il dispositivo considerato, esiste solo un microcontrollore a livello hardware. Inoltre, non è possibile caricare due programmi contemporaneamente sulla piattaforma; da ciò si può intendere che il linguaggio è molto semplificato, in quanto non deve creare concorrenza tra i vari programmi.
Nel linguaggio C, la fase di compilazione trasforma le istruzioni scritte in "codice oggetto" da far utilizzare alla macchina, mentre con gli sketch la fase di compilazione si completa col caricamento del codice oggetto nella piattaforma, sostituendo eventualmente il codice che risiedeva prima.
Di seguito verrà presentata una breve descrizione del linguaggio Wiring con caratteristiche tipiche di Arduino.

- Struttura del linguaggio

Nel linguaggio C e C++, il codice del programma deve iniziare con la funzione: main().
Mentre in Arduino, lo sketch prevede due step principali: setup e loop.

1) setup: corrisponde in una prima fase di inizializzazione che viene chiamata una volta sola quando il programma viene avviato. Serve per attivare i sensori, gli attuatori, le porte di comunicazione con il mondo esterno, le librerie e le variabili da utilizzare nel corpo del programma.
2) loop: questa fase segue quella di inizializzazione, ed indica che il programma "cicla" di continuo, di solito per percepire le informazioni dei sensori per poi analizzarle e agire di conseguenza. Nel caso esaminato vengono letti ed interpretati i valori dati dall'accelerometro e dal giroscopio in maniera ciclica.

- Gestione dell'orologio interno

Nella piattaforma Arduino sono presenti specifiche funzioni per misurare il tempo, fermare e regolare l'analisi del programma. Si utilizzano le funzioni:

- millis(): restituisce il numero di millisecondi da quando è azionato il programma. Va in overflow, cioè ritorna a zero, dopo circa 50 giorni.
- micros(): restituisce i milionesimi di secondo da quando è azionato il programma corrente. Va in overflow dopo circa 70 minuti.
- delay(msec): provoca un ritardo in millisecondi.
- delayMicroseconds(microsec): provoca un ritardo in microsecondi.

- Gestione della porta seriale

Anche se esistono diversi modi per accedere ad una piattaforma Arduino (Wireless, Bluetooth, Ethernet, …) la modalità di accesso ai dati analizzati durante l'esecuzione dello sketch è stata effettuata tramite porta USB.
Il linguaggio Wiring supporta diverse funzioni *built-in*, cioè integrate. Esse servono per gestire la connessione con le porte ed appartengono all'oggetto statico *Serial*.
Di seguito vengono elencate le funzioni basilari che permettono una veloce comunicazione:

- begin(baud rate): questa funzione apre la comunicazione con la porta seriale. È richiesto inoltre di indicare il *baud rate*, ovvero la velocità di trasmissione di un numero

prefissato di simboli al secondo. Questo parametro può variare da un minimo di $300\ baud/s$ fino a un massimo di $115200\ baud/s$. Da sottolineare che anche il programma risiedente nel computer deve supportare la comunicazione via porta seriale con lo stesso *baud rate* utilizzato dallo sketch, oltre ad indicare il tipo di porta scelta. Nel caso in esame viene utilizzato un *baud rate* di $115200\ baud/s$.

- available(): controlla la presenza di dati in arrivo sulla porta seriale. La funzione viene messa all'interno del loop dello sketch in modo da fare la scansione periodicamente e non bloccare l'esecuzione dello script nel caso in cui non ci siano dati in entrata dalla porta seriale.
- readBytes(buffer, length): legge i dati in entrata dalla porta seriale. La funzione deve essere inserita nel loop con la stessa logica proposta dalla funzione available(). Questa funzione prevede ulteriori varianti per leggere e formattare i dati in entrata, ma alla fine si possono tutti ricondurre alla lettura non bloccante di byte in input.
- print(ascii_text): scrive in output una stringa di testo. Permette di visualizzare a schermo i dati di output appena misurati. Vi sono diverse funzioni per inviare dati a seconda della loro formattazione o della loro codifica.
- end(): chiude la comunicazione con la porta seriale. Per riaprirla bisogna richiamare il metodo begin presentato prima.

Attraverso queste semplici funzioni si può comunicare tranquillamente con una piattaforma Arduino.

7.3. Collegamento sensore-Arduino

Nella figura sottostante è visibile il collegamento effettuato del sensore con la board di Arduino Uno. Come detto in precedenza vengono usati solamente i primi 4 pin. Inoltre, per visualizzare i risultati si utilizza un cavo di collegamento USB che collega la board con il PC.

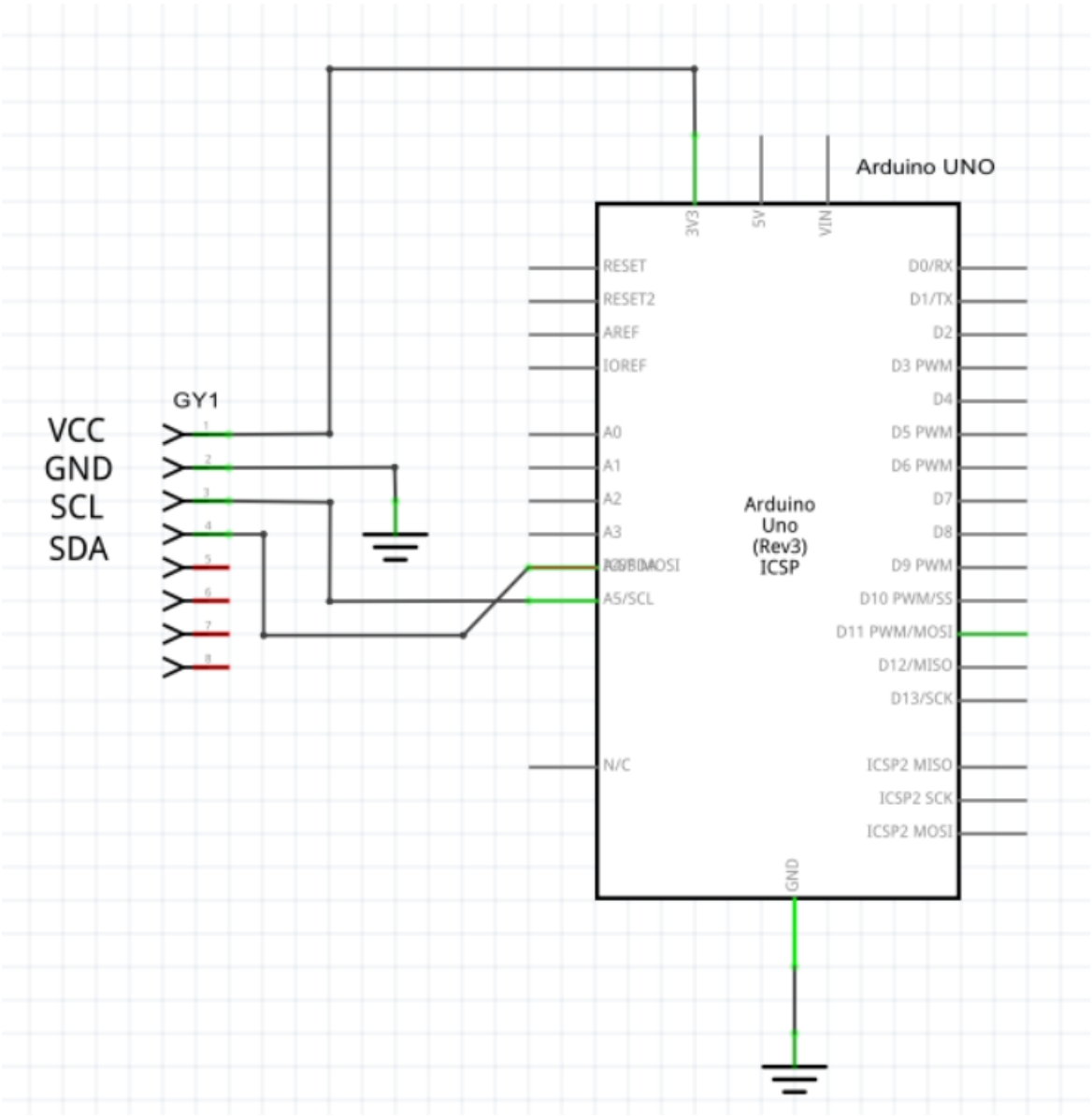


Figura 48 – Collegamento sensore-Arduino

Una volta effettuato il collegamento si è passati alla compilazione dello sketch, descritto in Appendice A.

La programmazione dello sketch è stata effettuata in collaborazione con il collega in azienda Alberto Marchesa.

Una volta verificato e caricato lo sketch è possibile esaminare i valori forniti in uscita in maniera numerica, col comando $CTRL + MAIUSC + M$, oppure grafica, col comando $CTRL + MAIUSC + L$.

I due principali inconvenienti sono:

1) Le due schermate non possono essere aperte contemporaneamente, ma una alla volta. Inoltre, una volta chiusa una delle due schermate non è più possibile riprendere i dati esaminati in precedenza.
2) I dati di uscita vengono dati in maniera continuativa senza possibilità di blocco che possa permettere un'analisi di studio.

Quindi per evitare di perdere dei dati che potrebbero risultare fondamentali per lo studio si è deciso di applicare la seguente metodologia di studio:

a) Scrivere il programma o sketch.
b) Verificare e caricare lo sketch.
c) Aprire la schermata numerica e non quella grafica, perché si è visto che risulta più semplice analizzare i dati numerici anziché quelli grafici.
d) Effettuare la prova.
e) Ricercare nella schermata numerica i valori in cui si registra un effettivo cambiamento dalle condizioni normali di zero.
f) Copiare e incollare i dati registrati su un blocco note e salvarlo come file .txt.
g) Caricare questi dati in un foglio di calcolo Excel (.xlsx), tramite la procedura: Dati → Da testo/CSV → Caricamento del file .txt appena salvato.
h) Aggiungere una colonna che permettesse di avere l'asse dei tempi, ricavato dalla somma dei tempi relativi alla singola acquisizione.
i) Importare questi dati in uno script Matlab tramite la funzione: `xlsread('…')`.
j) Creare un programma che permetta di rappresentare graficamente le accelerazioni e momenti giroscopici in funzione del tempo e della frequenza.

Di seguito rappresentazione grafica dei valori ottenuti durante una prova, cioè nel campo del discreto:

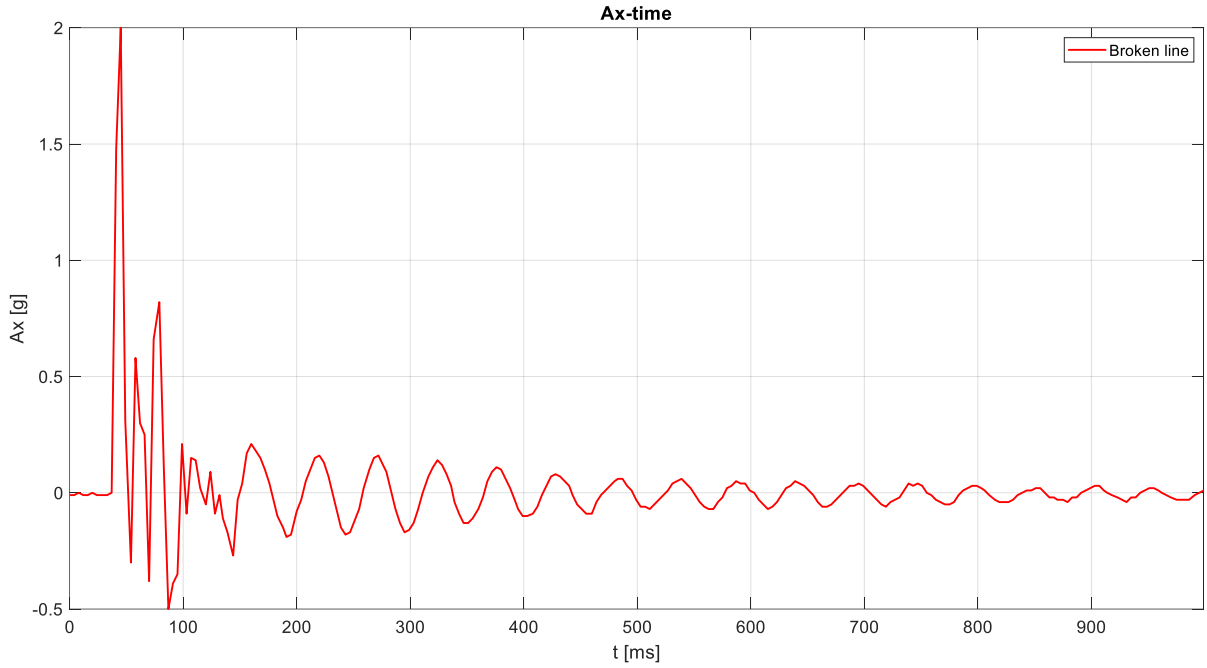


Figura 49 – Grafico accelerazioni nel campo del discreto

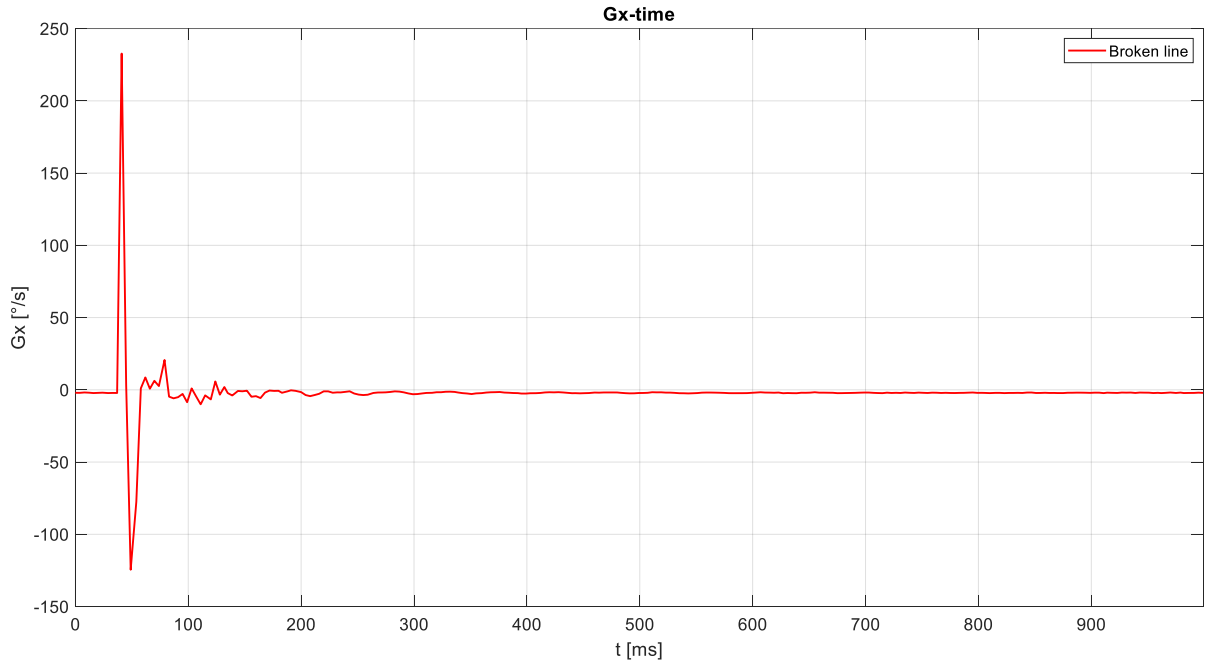


Figura 50 – Grafico momento giroscopico nel campo del discreto

Si nota che si ottengono delle linee "spezzate", come è giusto che sia in quanto il sistema di acquisizione è nel campo del discreto, quindi non è possibile avere una continuità dei valori.

Per passare al campo del continuo si è utilizzata la funzione `spline()` di Matlab. Essa ha permesso di ottenere dei grafici con curve continue e non "spezzate".

Si nota dal grafico seguente che l'approssimazione fatta tramite la funzione `spline()` è corretta perché i due andamenti si sovrappongono abbastanza bene.

Si nota una leggera discrepanza solo nel momento di applicazione della forzante esterna, in cui la funzione `spline()` assume dei valori maggiori rispetto all'acquisizione stessa.

Invece, una volta terminata la forzante si nota una perfetta sovrapposizione delle curve.

Nel grafico seguente viene riportato come esempio l'accelerazione lungo l'asse X in funzione del tempo per la prova 1, la quale verrà descritta più avanti.

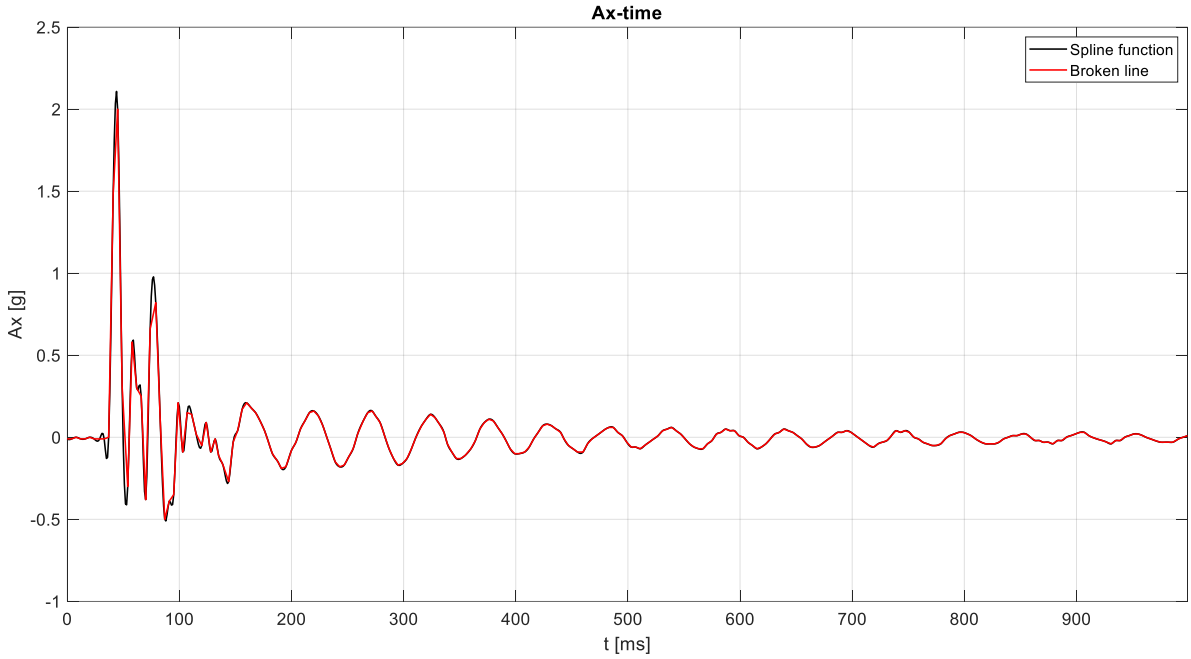


Figura 51 – Sovrapposizione delle due curve di accelerazione

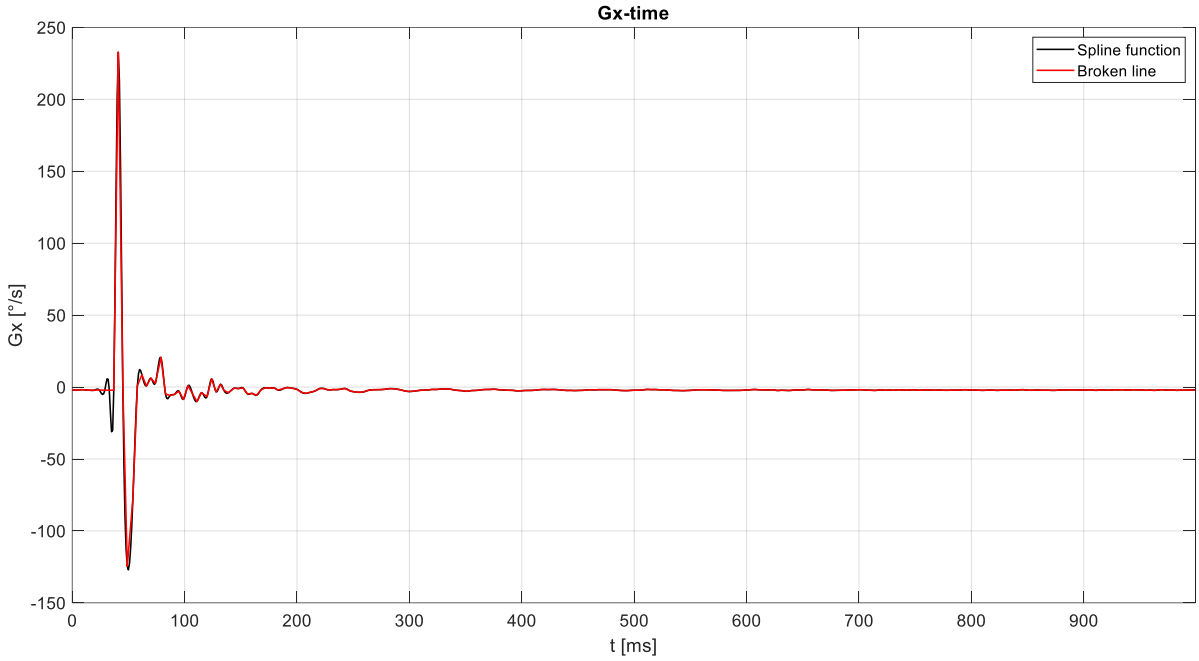


Figura 52 – Sovrapposizione delle due curve dei momenti giroscopici

Si può vedere che le maggiori differenze si hanno quando viene applicata la forzante, in cui cioè il sistema viene destabilizzato; la causa può essere ricercata nel fatto che viene utilizzato un tempo di campionamento molto alto, circa 4 ms. Questo tempo però rappresenta il tempo minimo di acquisizione dei dati da parte del sensore. Di conseguenza non è stato possibile diminuire ancora il tempo di campionamento.

È stato effettuato uno studio anche in funzione della frequenza, con lo scopo di vedere se il banco realizzato riesce a smorzare le vibrazioni e a quale frequenza si presentano i picchi dovuti alla forzante esterna. Questo è stato reso possibile tramite la funzione `fft()` di Matlab, cioè la *Fast Fourier Transform*. Essa permette di modificare il dominio di una funzione o di un segnale nel tempo in una funzione o segnale nella frequenza; può essere utilizzata solo avendo a disposizione un tempo di campionamento, e di conseguenza una frequenza di campionamento, di un segnale di tipo analogico a tempo continuo e/o discreto.
Poiché la funzione richiede un tempo e una frequenza di campionamento costante, si è scelto un $t_c = 4\ ms$, pari a quello del sensore stesso, anche se presenta casi in cui vi è un t_c di 3 ms o 5 ms, ma essendo dei valori sporadici, si è utilizzato il valore più ripetitivo.

Di seguito è possibile vedere un esempio di confronto tra le tre accelerazioni in funzione della frequenza in due diverse rappresentazioni:

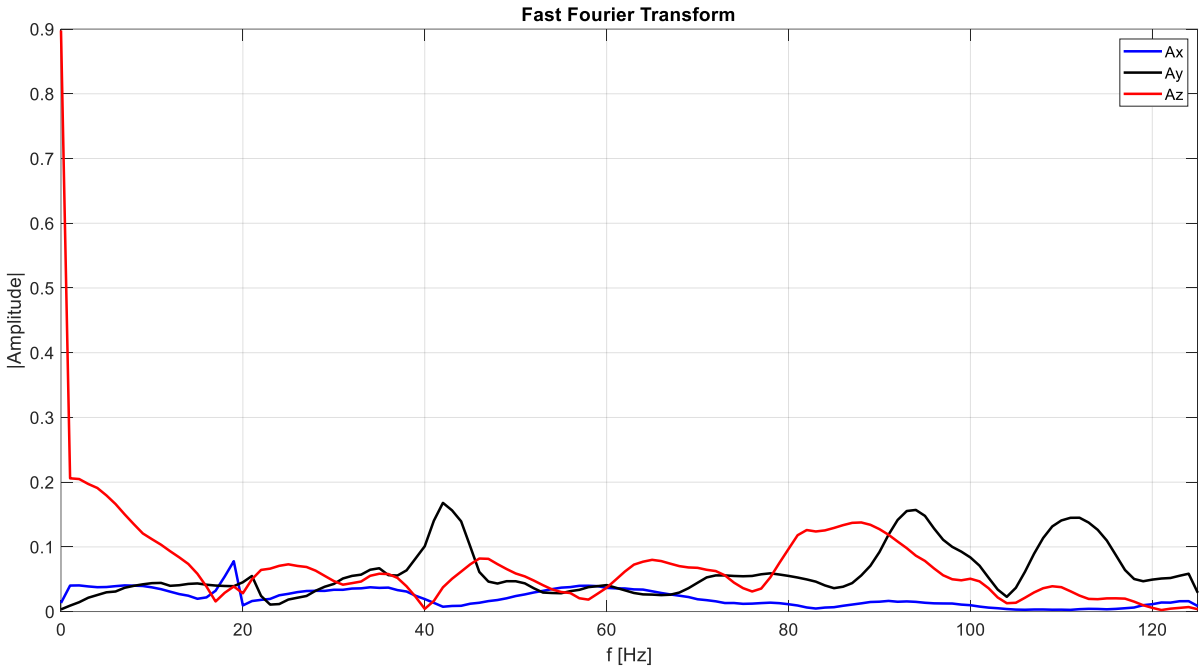


Figura 53 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza

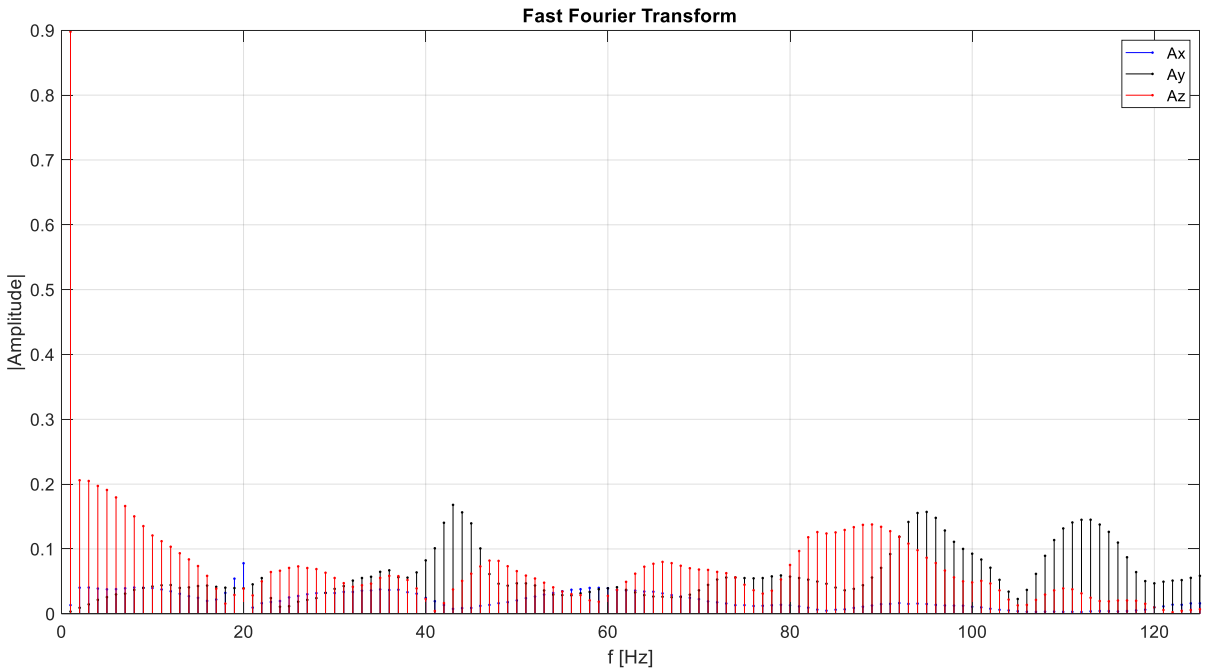


Figura 54 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza tramite funzione stem

Si nota da questi ultimi come la frequenza massima raggiunge un valore massimo di circa $125\ Hz$, in accordo con il teorema del campionamento o *teorema di Nyquist-Shannon*, il quale afferma che la frequenza di campionamento per un segnale a banda limitata deve essere superiore del doppio rispetto a quella massima, cioè:

$$f_c \geq 2 \cdot f_{max}$$

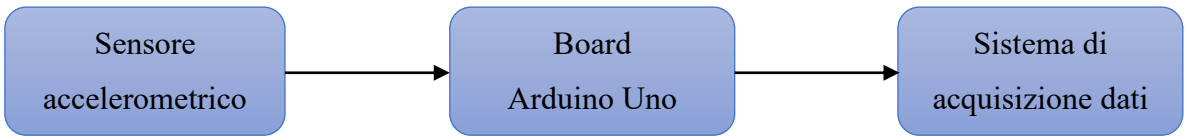
In cui $f_c = 250\ Hz$.
Questi valori variano in basa alla prova in esame.

Nel proseguo della trattazione verranno visualizzate solamente le curve di accelerazione con approssimazione nel continuo tramite la funzione `spline()` e i grafici tramite la `fft()`, mentre non verranno considerati i momenti giroscopici in quanto non hanno un valore rilevante ai fini dello studio effettuato.

In Appendice B è possibile vedere un esempio di foglio di calcolo Excel, necessario per implementare i dati su Matlab.
In Appendice C, D, E ed F è possibile vedere un esempio di script Matlab che permette di visualizzare graficamente rispettivamente la prova reale, quella di confronto tra le due curve di accelerazione e momenti giroscopici, quella solo approssimata con la funzione `spline()` e infine lo script per la rappresentazione nel dominio della frequenza tramite `fft()`.

7.4. Prove effettuate

Il layout del sistema utilizzato è visibile subito dopo, in cui è possibile vedere il collegamento tra sensore, board Arduino e sistema di acquisizione dati, cioè un computer:



Le prove effettuate consistono nel lasciare cadere una massa da un'altezza di circa di 10 cm nei dieci punti evidenziati nella figura sottostante:

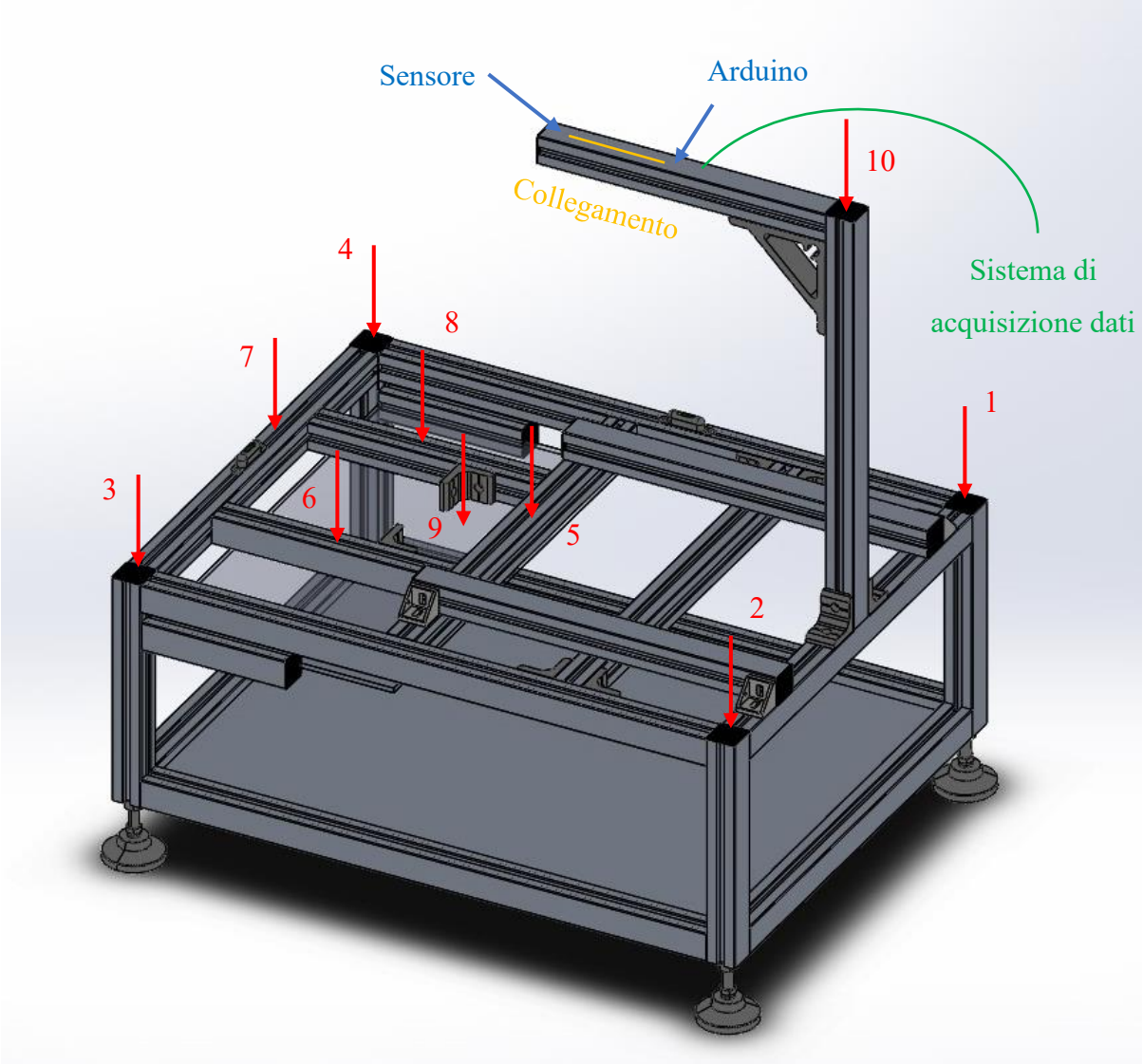


Figura 55 – Punti in cui si è applicata la forzante esterna

I punti 1-2-3-4 corrispondono ai 4 angoli della struttura, dove poggia tutto il sistema.
I punti 5-6-7-8 corrispondono ai centri dei 4 profilati che racchiudono il robot, quindi quelli che potrebbero risentire di eccessive vibrazioni, essendo questi molto vicini ai movimenti del robot stesso.
Il punto 9 corrisponde alla base su cui poggia il robot.

Il punto 10 è stato preso sulla giunzione dei due profilati che sorreggono la webcam, quindi che potrebbe risentire di eccessive vibrazioni se la forza applicata è notevole.
Inoltre, si nota che il punto 5 è un punto su cui poggia anche la radio; quindi, si può notare l'oscillazione che potrebbe subire la radio a seguito di una forza applicata.

Le prove sono state eseguite con due diversi oggetti, aventi una forma cilindrica e omogena ma con due masse differenti:

Strumentazione	
Massa 1	160 g
Massa 2	470 g

Tabella 16 – Massa strumenti

Entrambi gli oggetti saranno soggetti alla forza di gravità:

$$F = mg$$

Per la precisione si ha:

$$F_1 = m_1 g = 1{,}57\ N$$
$$F_2 = m_2 g = 4{,}61\ N$$

Inoltre, poiché il corpo cade da un'altezza $h = 10\ cm$, è possibile calcolare con quanta energia colpisca la struttura:

$$E = mgh$$

Per la precisione:

$$E_1 = m_1 gh = 0{,}157\ J$$
$$E_2 = m_2 gh = 0{,}461\ J$$

Effettuando un'approssimazione, si può considerare il sistema come se fosse a 1 grado di libertà, anche se nella realtà non è così. Viene fatto ciò per avere un paragone e capire che forma debbano avere le curve di output derivanti dalle prove.
Di conseguenza, la forma aspettata dall'oscillazione è quella di una sottosmorzata:

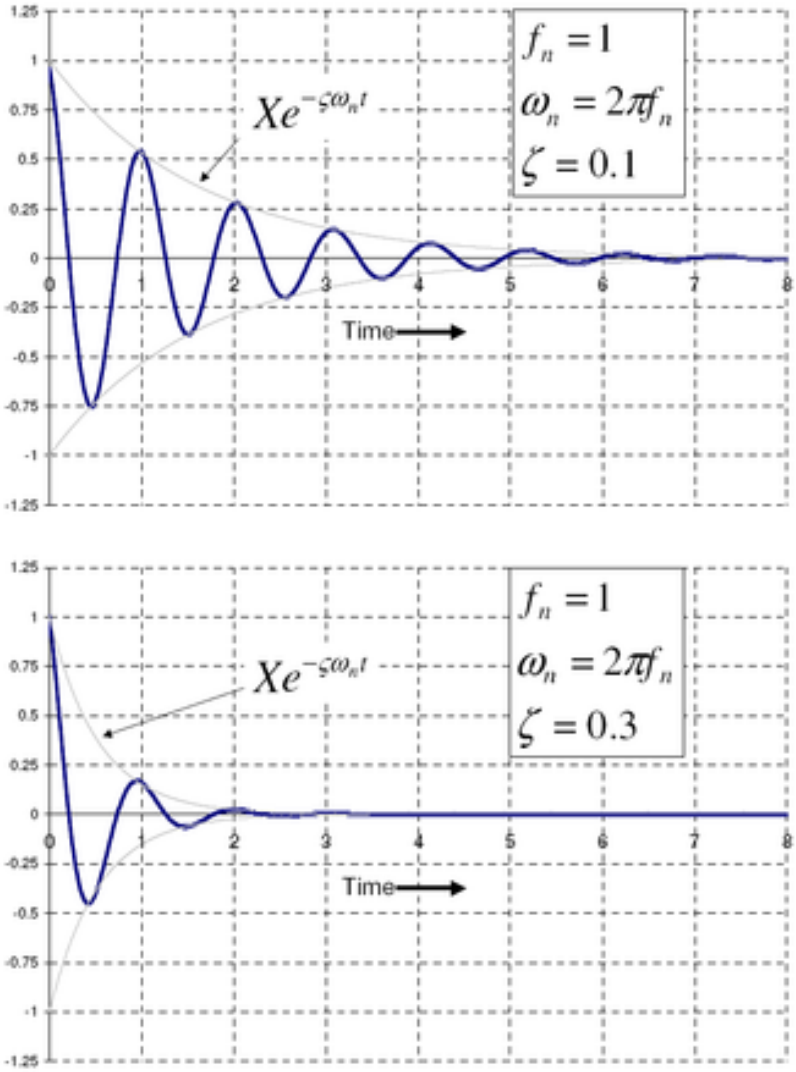


Figura 56 – Andamento oscillazione sottosmorzata

Non avendo dati sulla pulsazione naturale, frequenza naturale e fattore di smorzamento, non si può conoscere a prescindere che forma abbia la curva a seguito del colpo che subisce la struttura.

Inoltre, non è detto che in ognuno dei 10 punti in cui viene colpita la struttura, essa risponda con lo stesso andamento.
Per questo motivo nei grafici seguenti verranno mostrati i risultati ottenuti delle accelerazione in funzione del tempo e in funzione della frequenza nei 10 punti per le due tipologie di oggetti usati come massa.
Si è preso come intervallo di tempo $t = 1\ s = 1000\ ms$ e per la configurazione del sensore, in condizioni di equilibrio:

$$a_x = a_y = 0\ g$$
$$a_z = 1\ g$$
$$G_x = G_y = G_z = 0\ °/s$$

7.4.1. Risultati delle prove sperimentali con la massa 1

- Prova 1

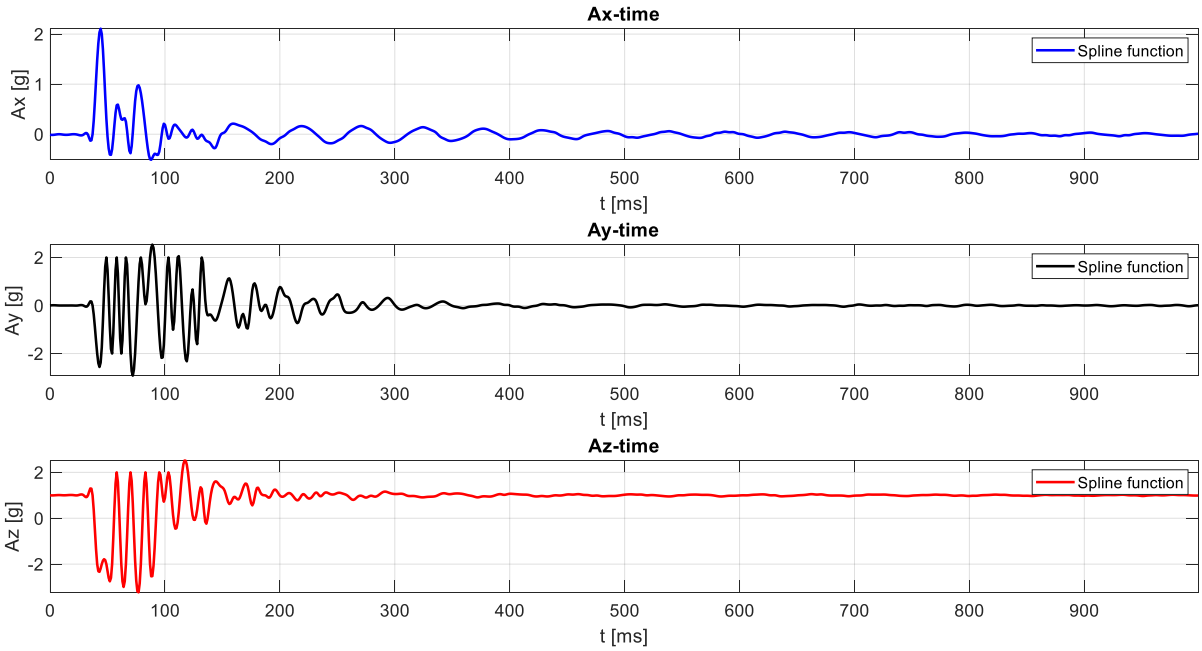


Figura 57 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 1

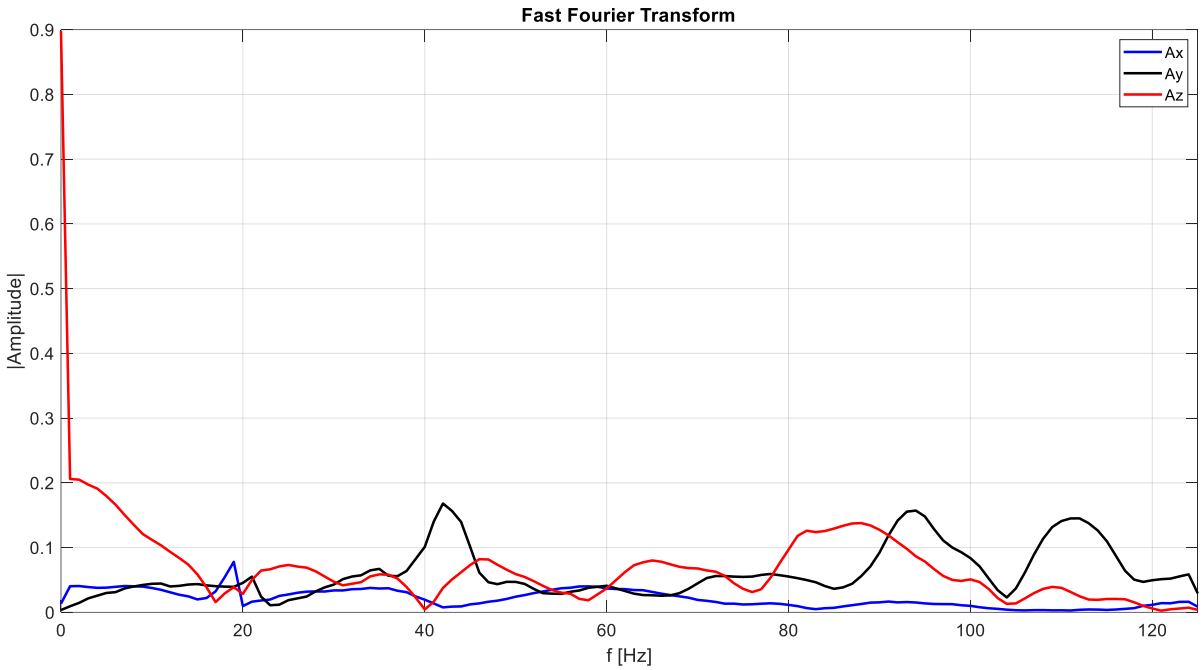


Figura 58 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 1

- Prova 2

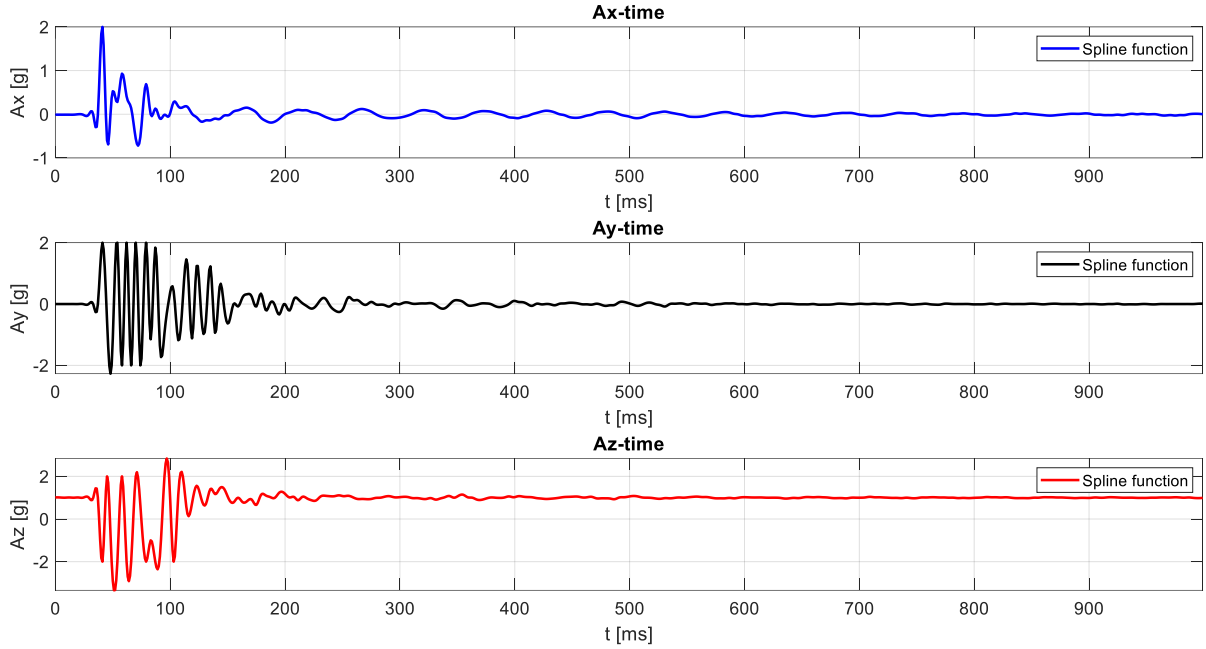


Figura 59 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 2

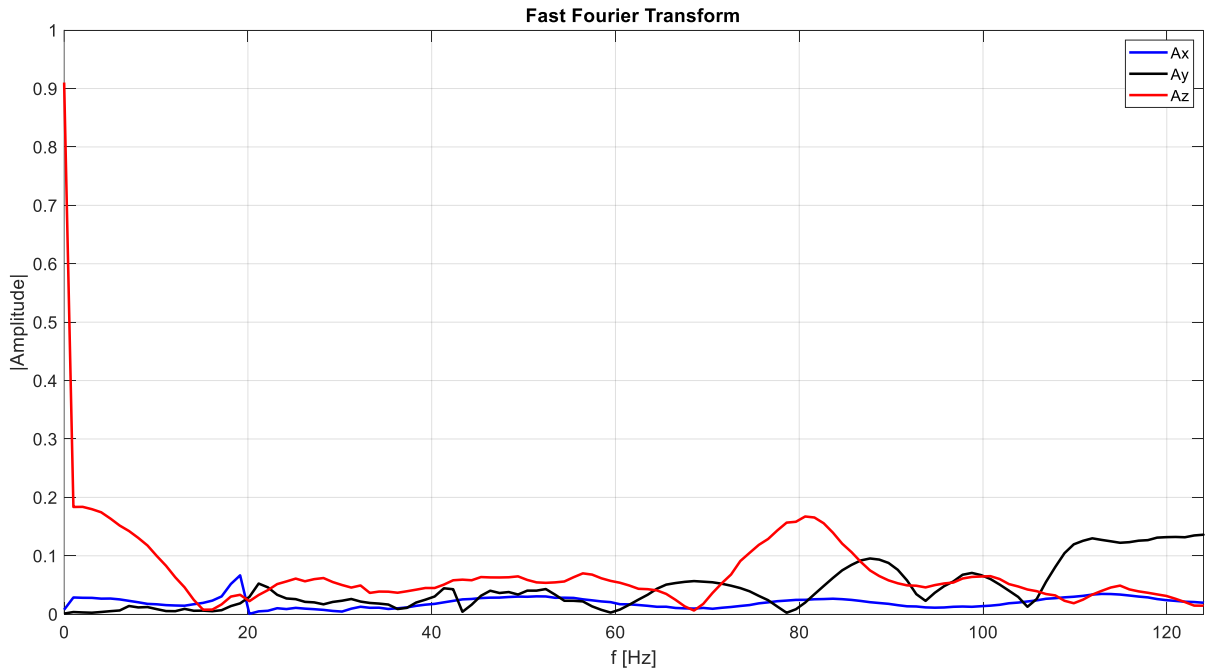


Figura 60 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 2

- Prova 3

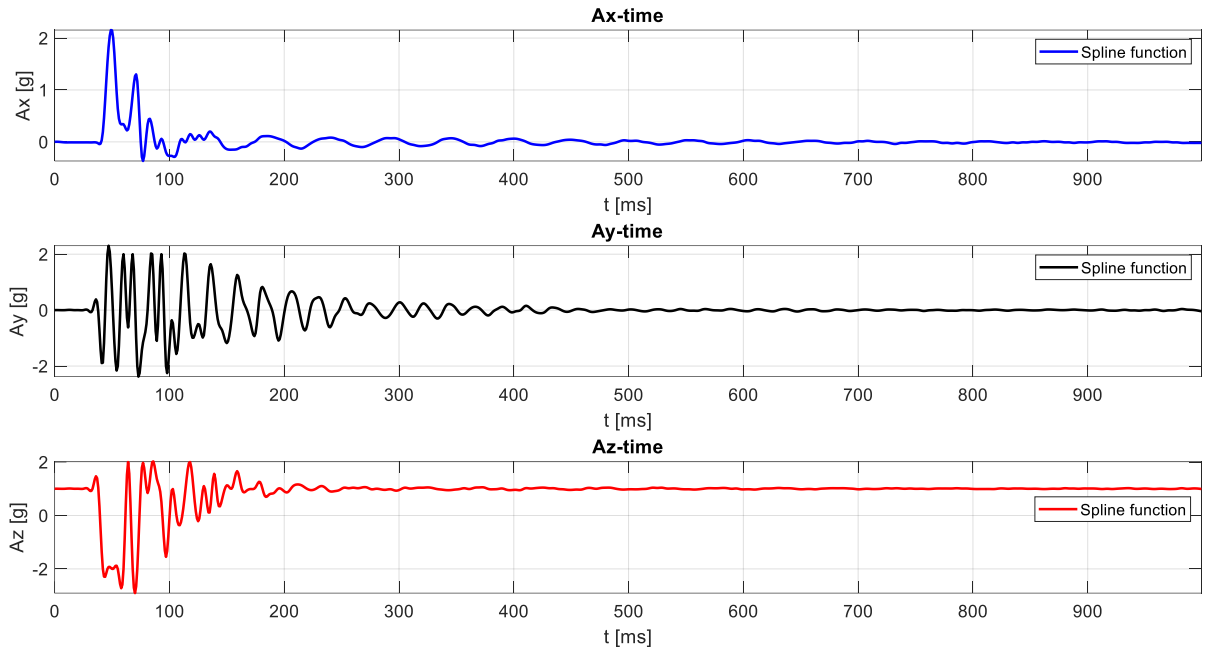


Figura 61 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 3

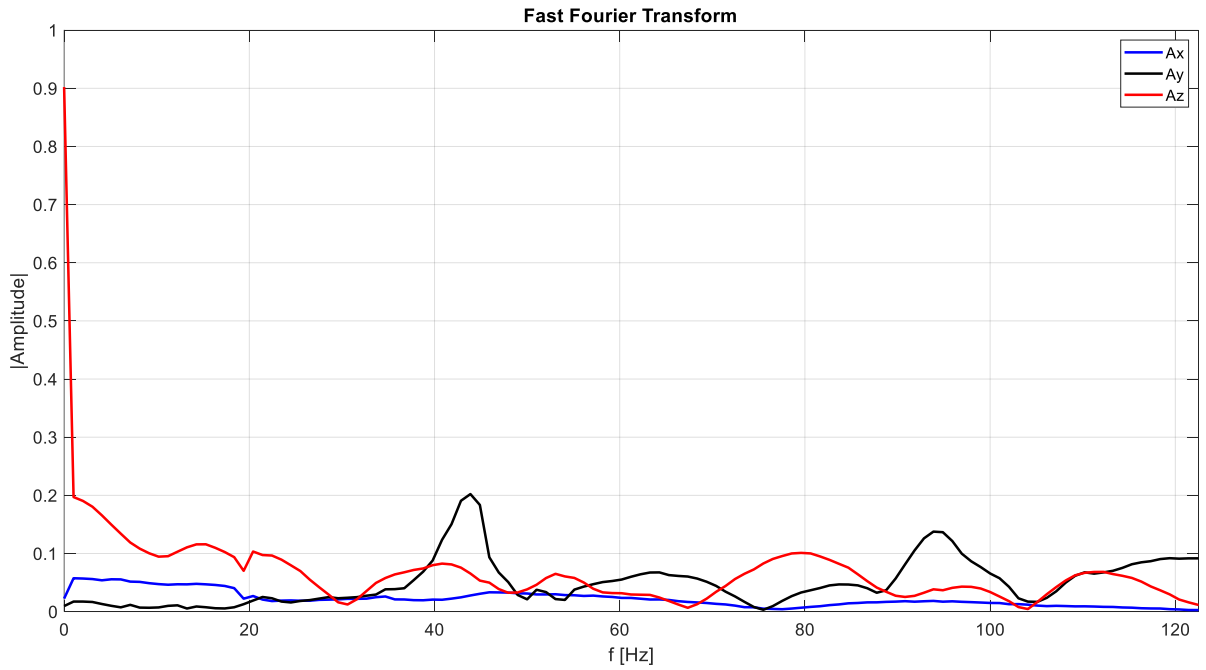


Figura 62 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 3

- Prova 4

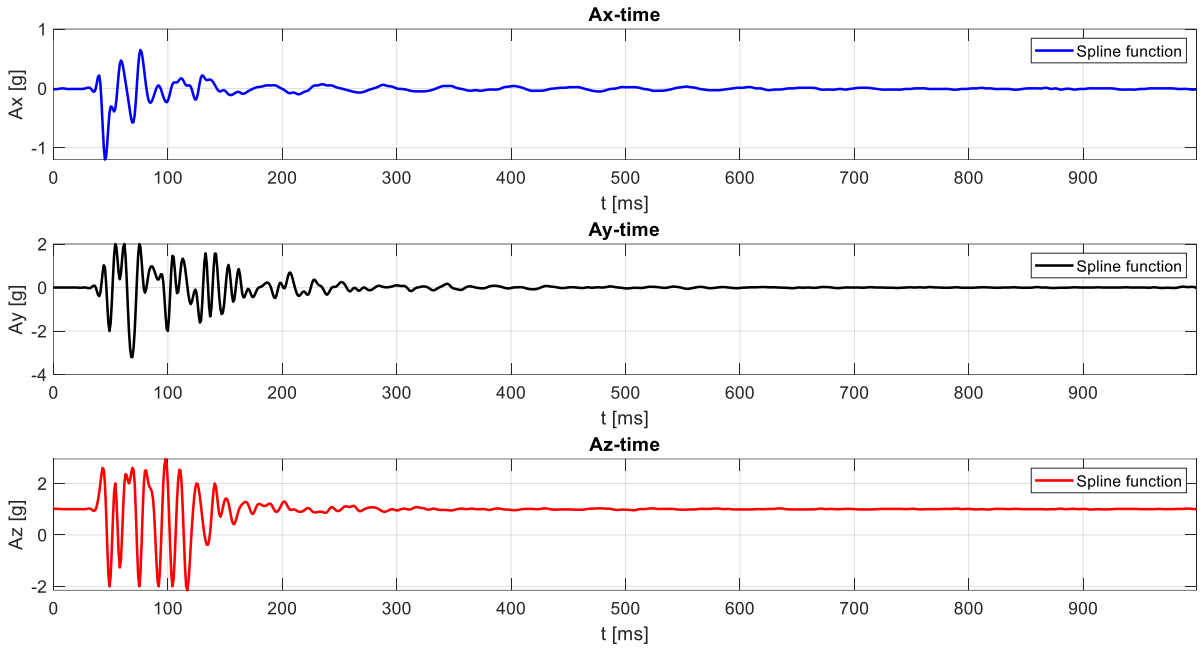


Figura 63 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 4

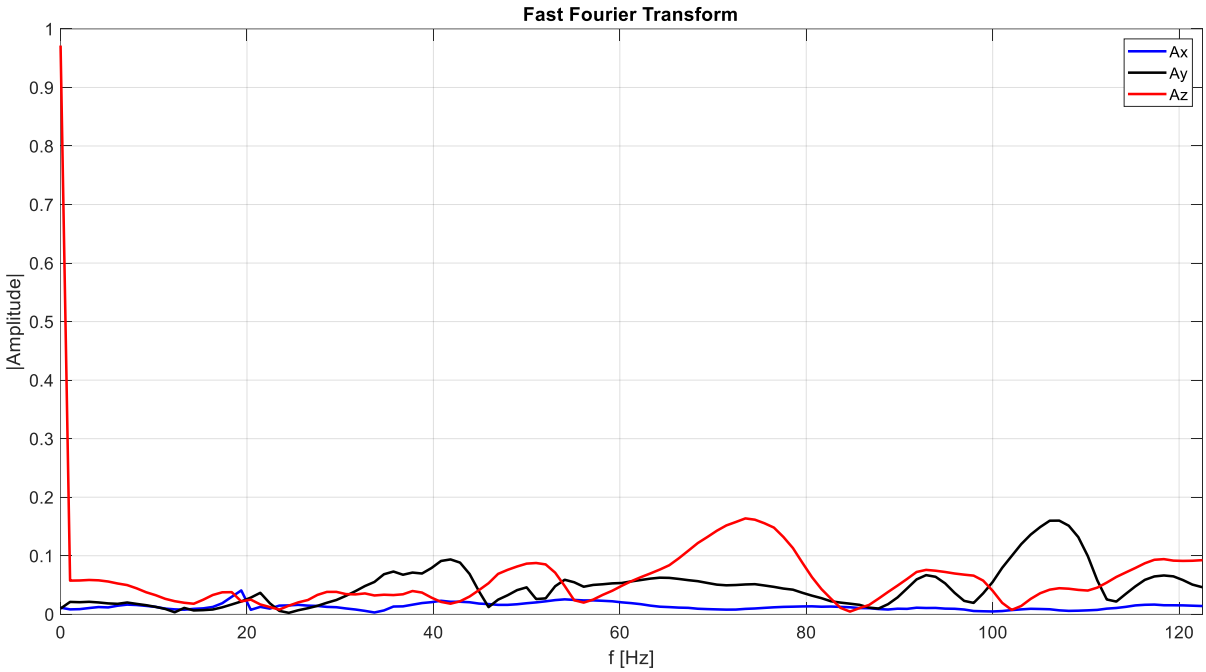


Figura 64 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza assi per la prova 4

- Prova 5

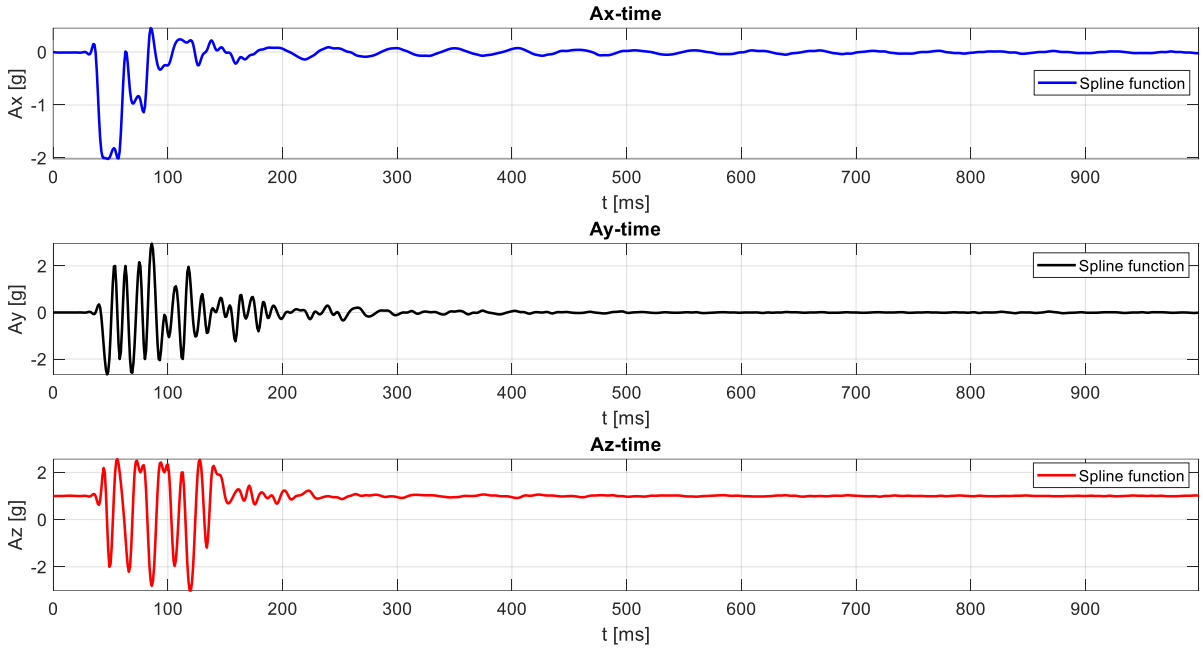


Figura 65 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 5

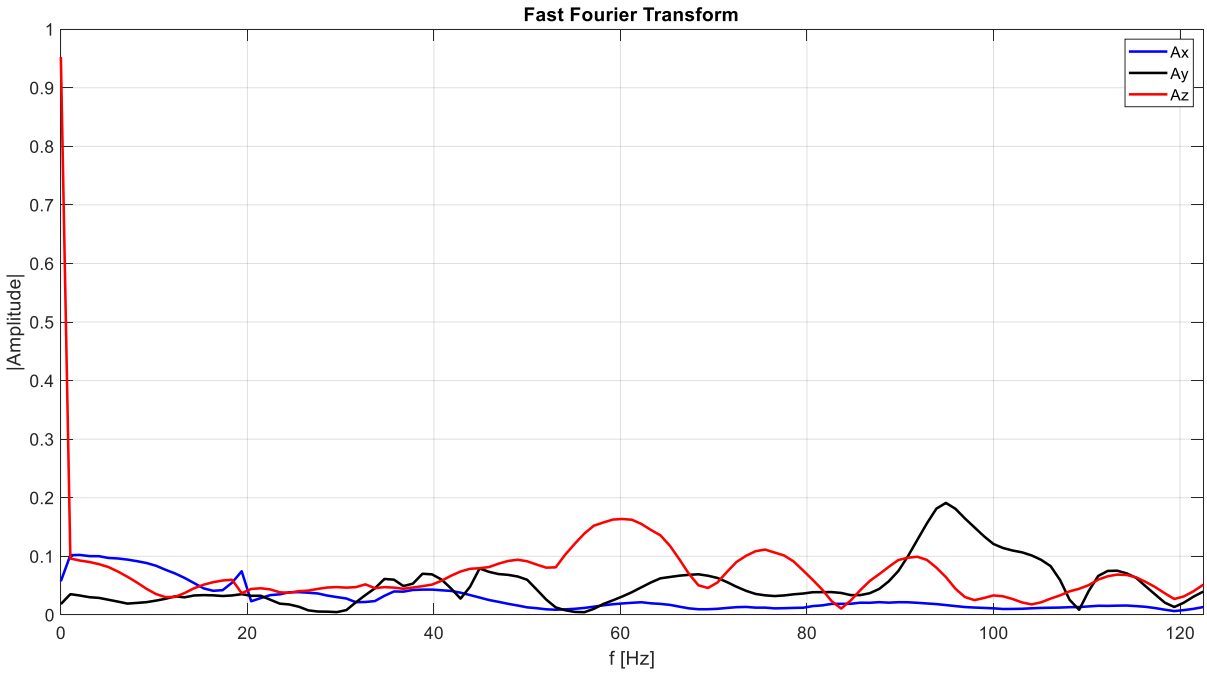


Figura 66 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 5

- Prova 6

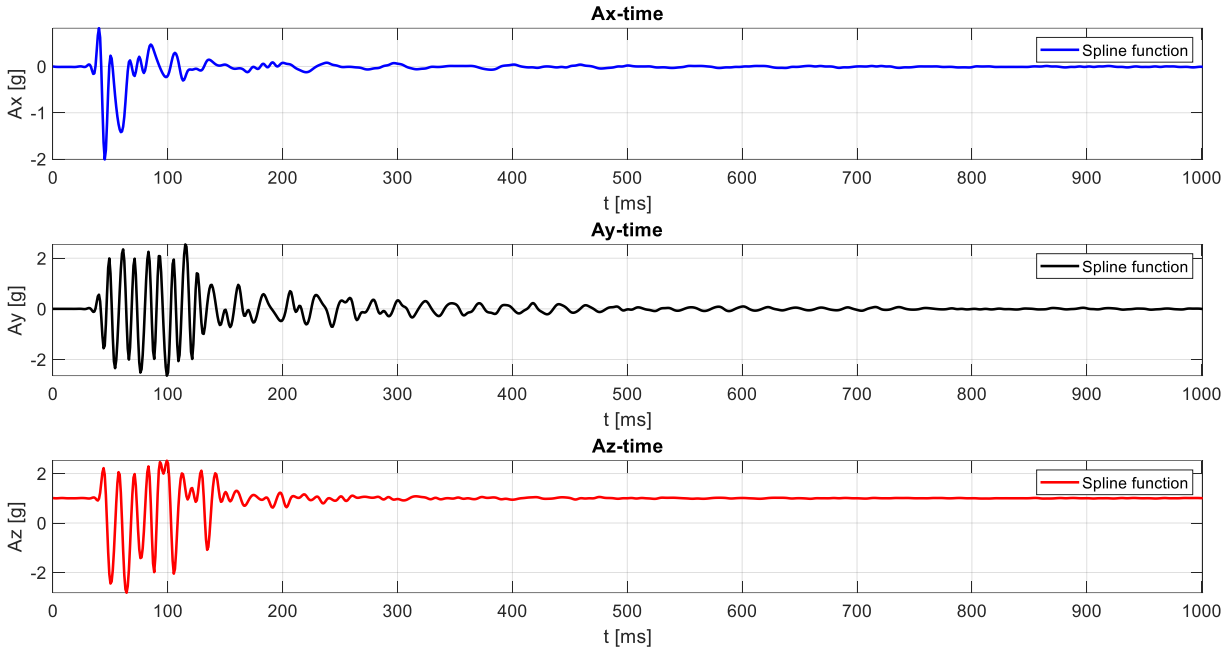


Figura 67 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 6

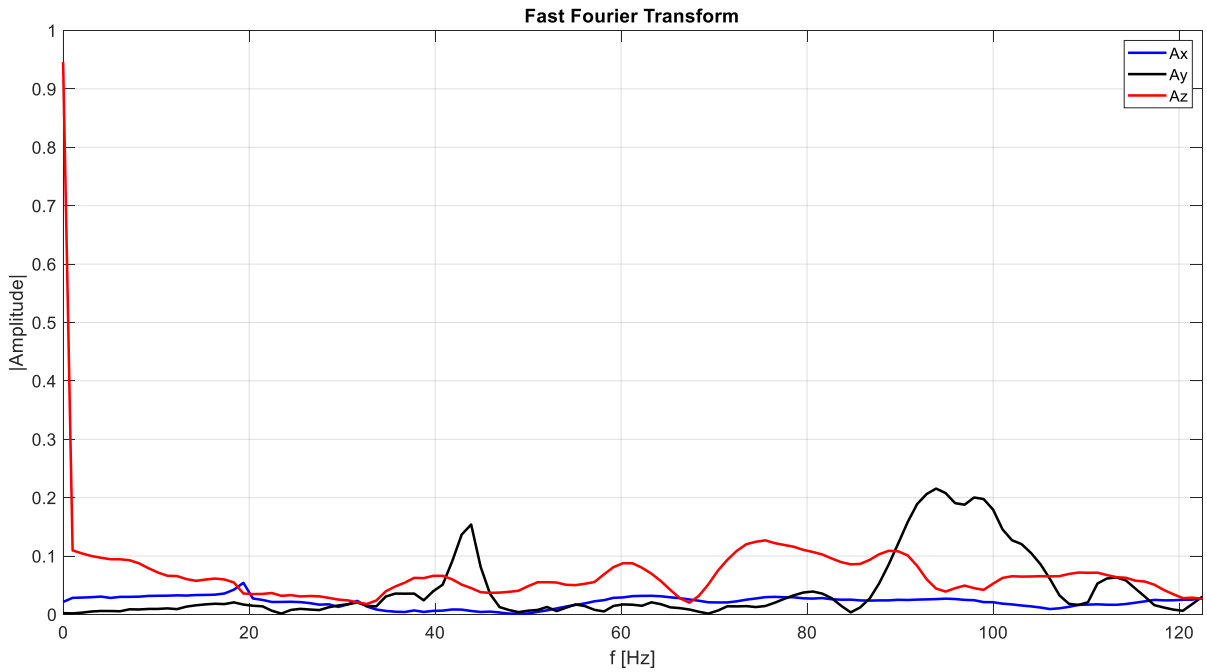


Figura 68 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 6

- Prova 7

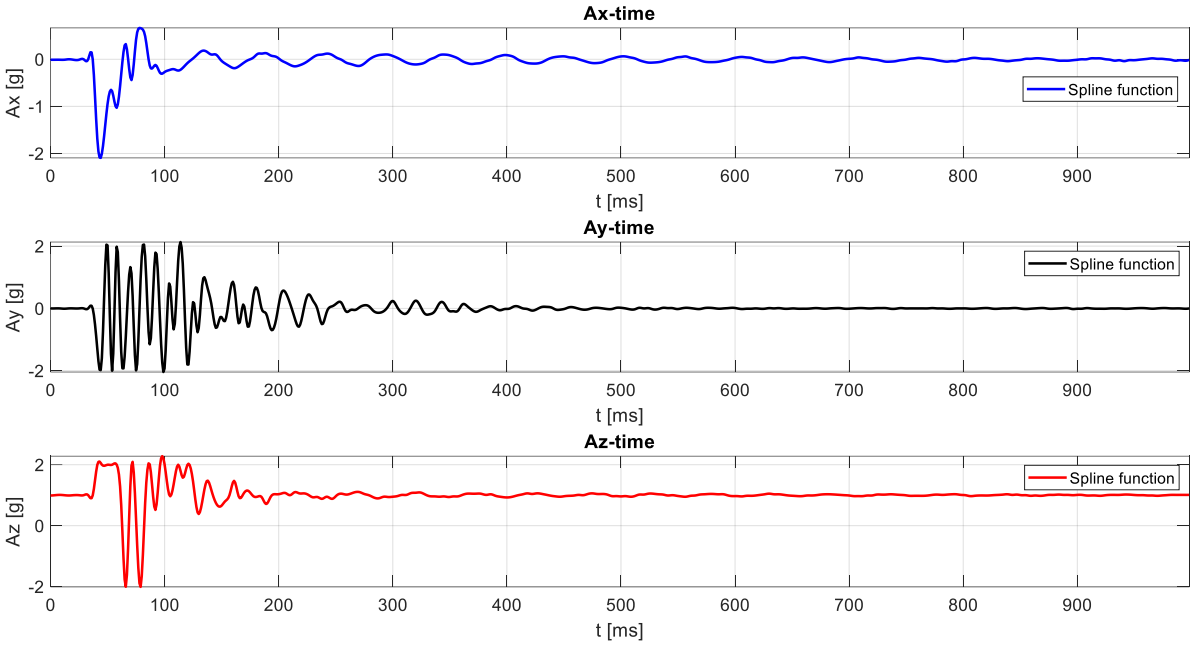


Figura 69 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 7

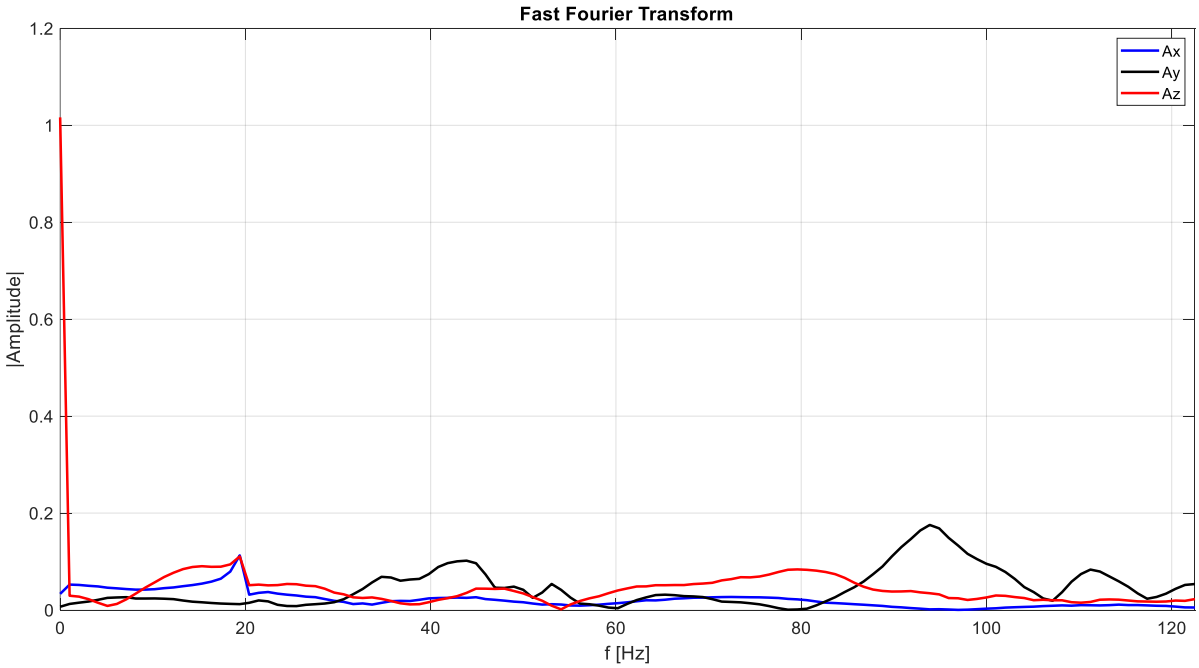


Figura 70 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 7

- Prova 8

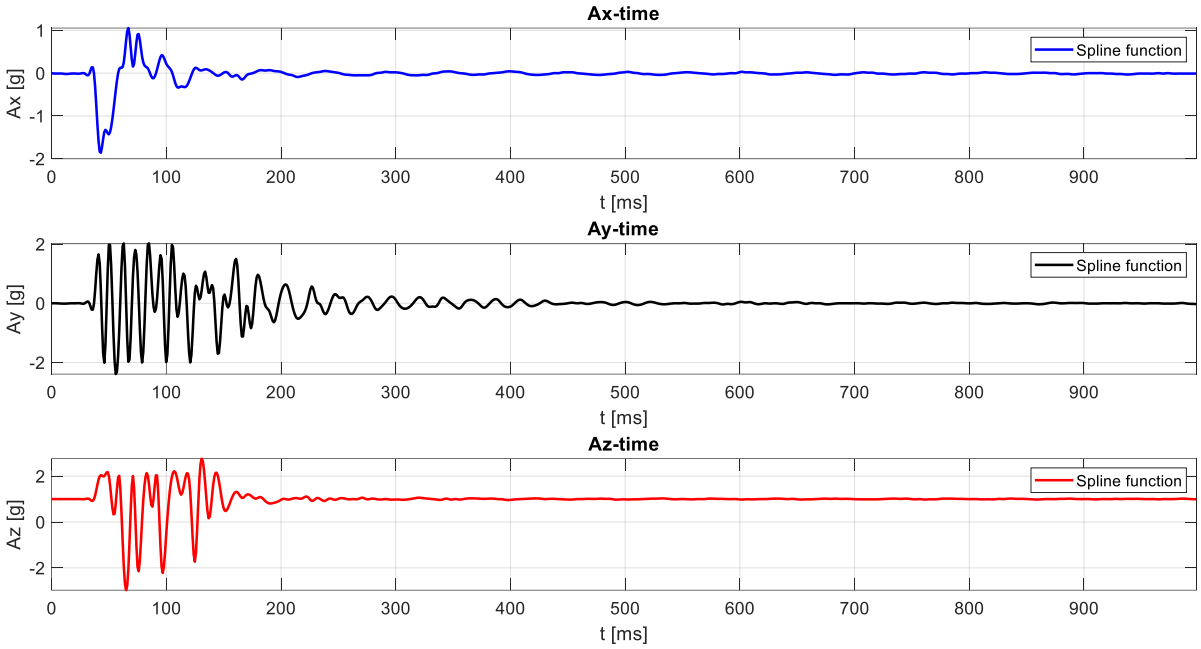


Figura 71 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 8

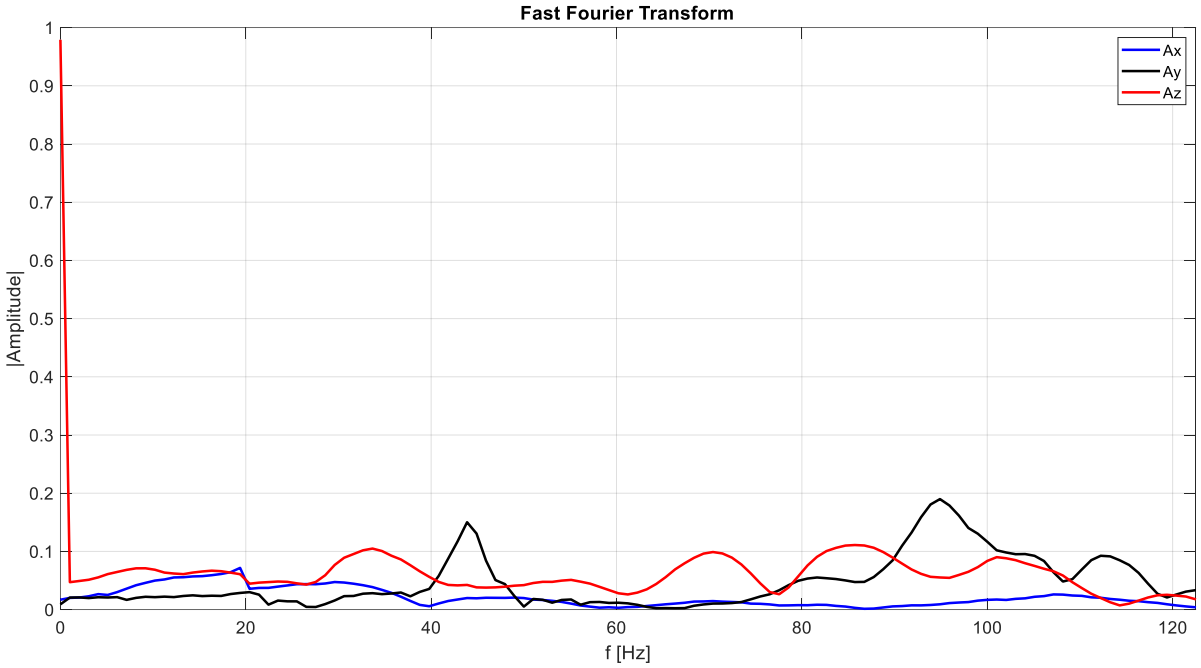


Figura 72 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 8

- Prova 9

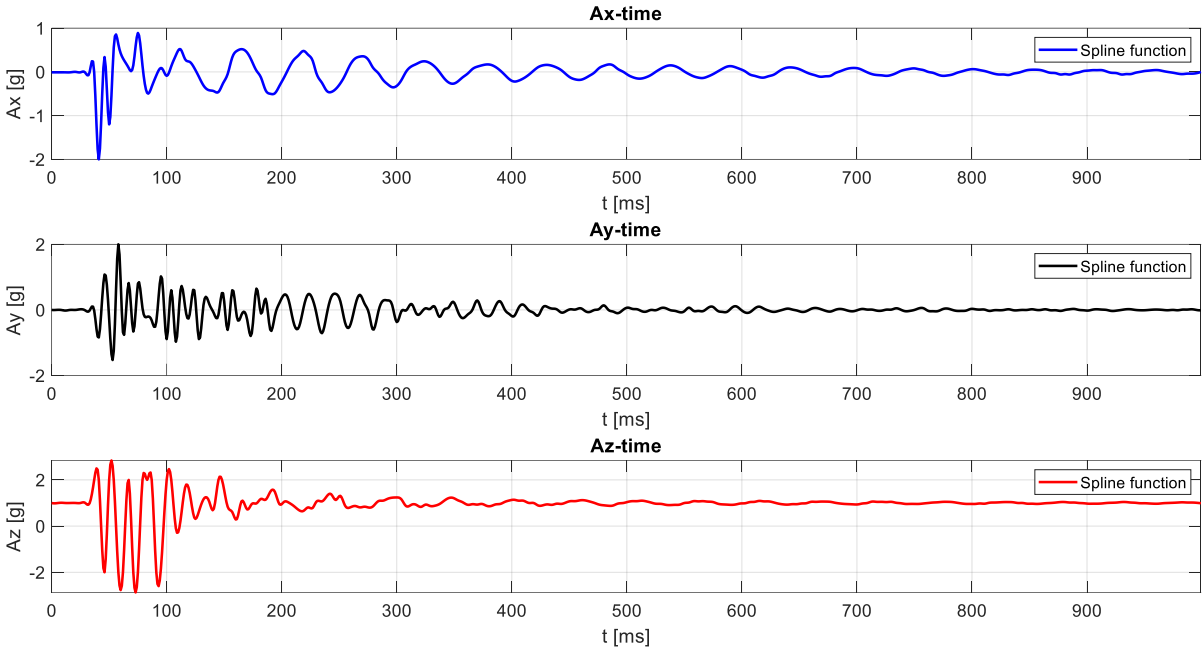


Figura 73 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 9

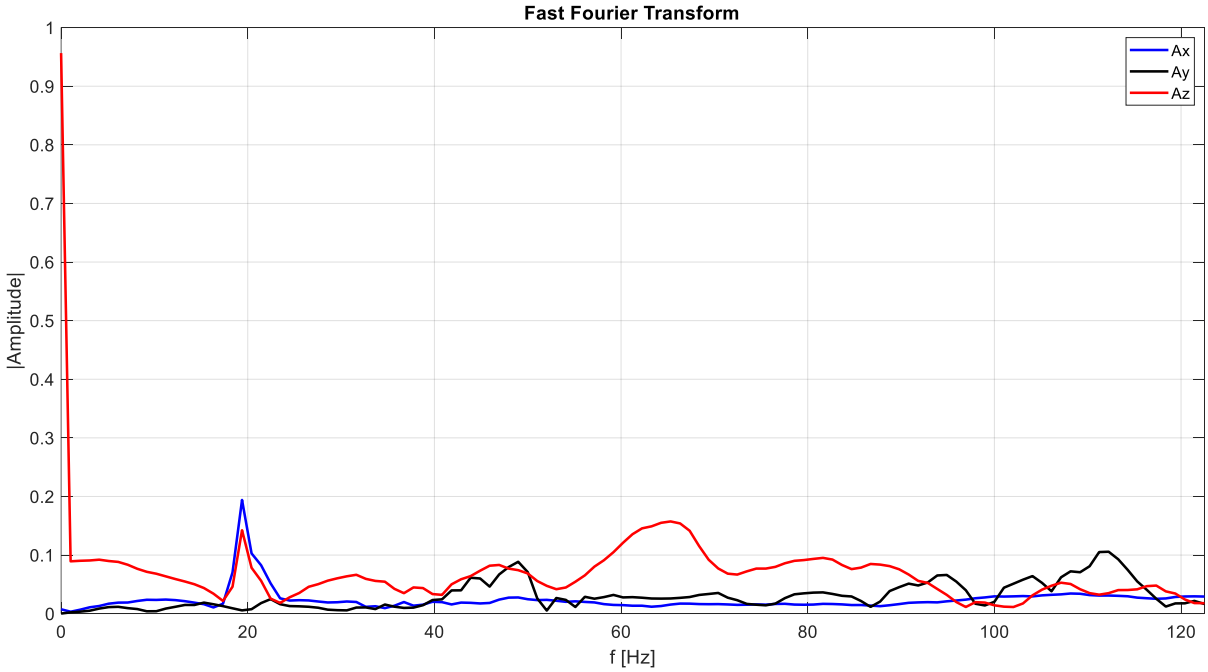


Figura 74 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 9

- Prova 10

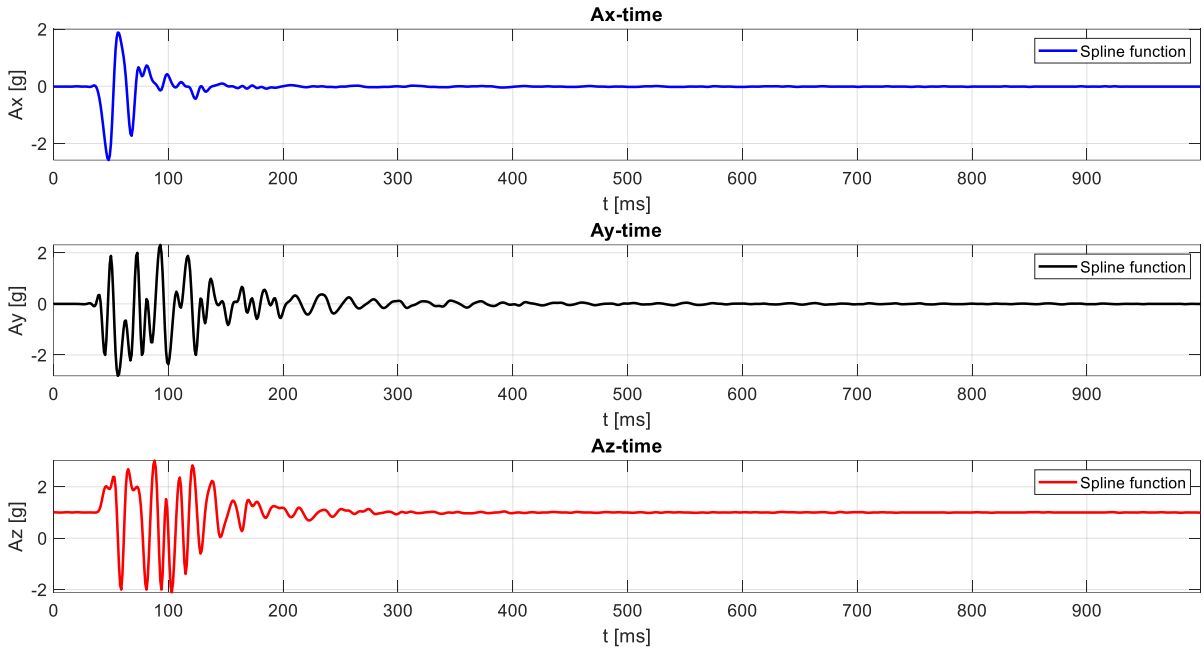


Figura 75 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 10

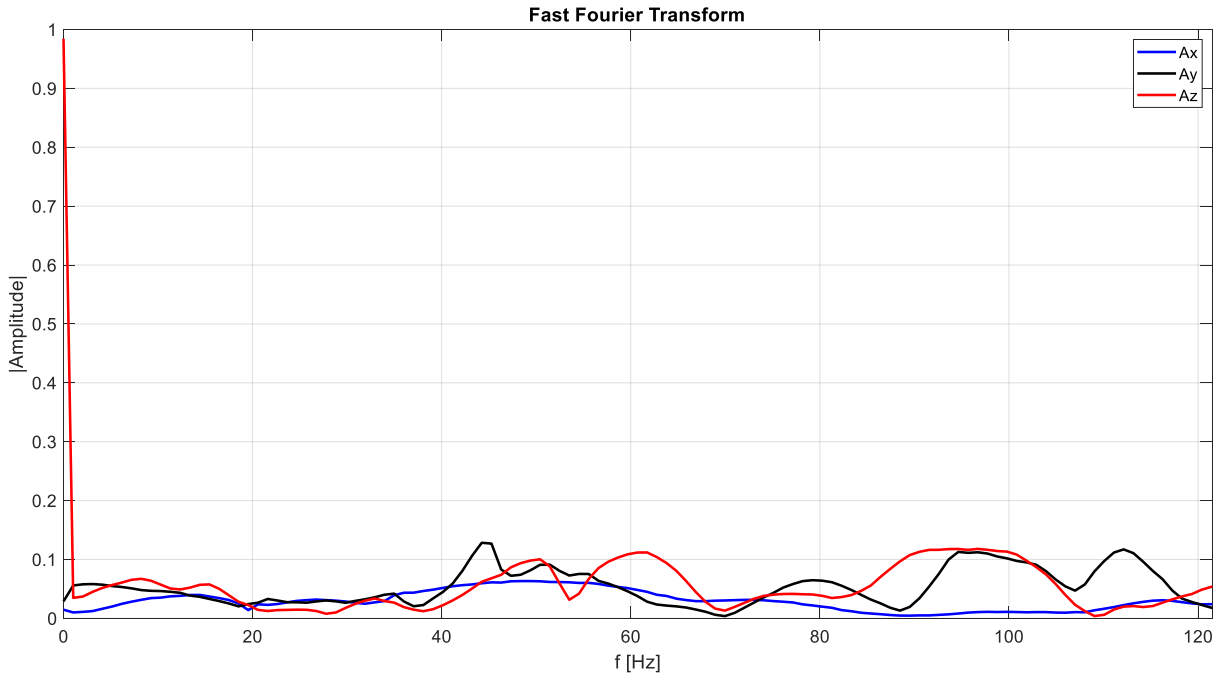


Figura 76 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 10

7.4.2. Risultati delle prove sperimentali con la massa 2

- Prova 1

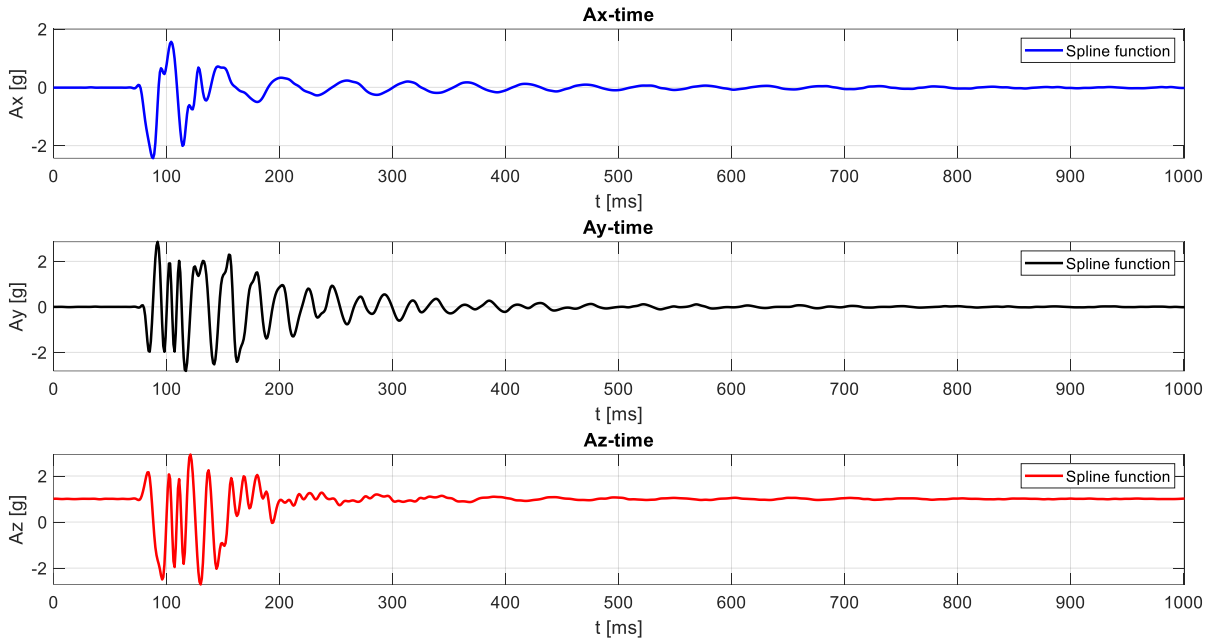


Figura 77 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 1

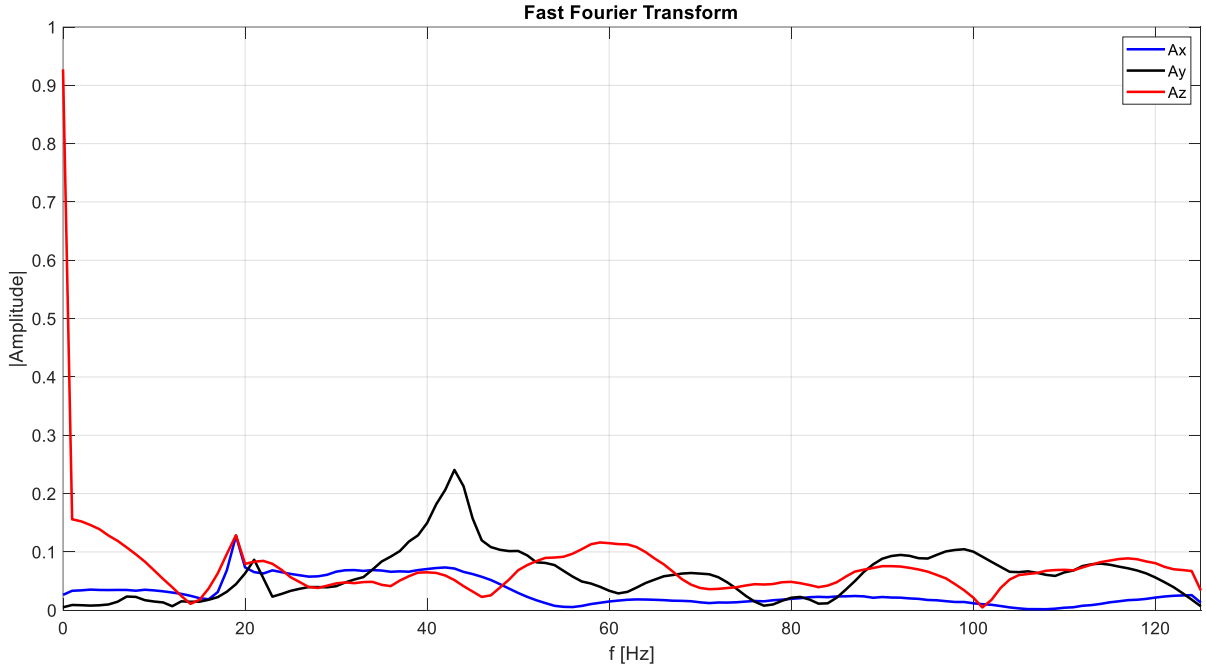


Figura 78 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 1

- Prova 2

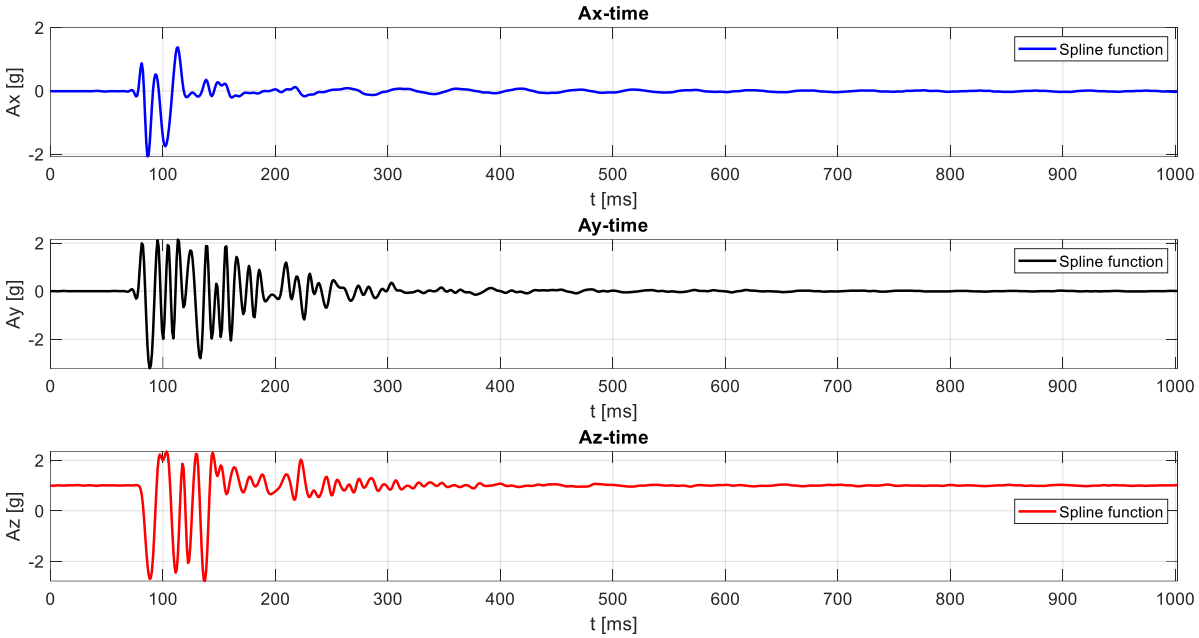


Figura 79 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 2

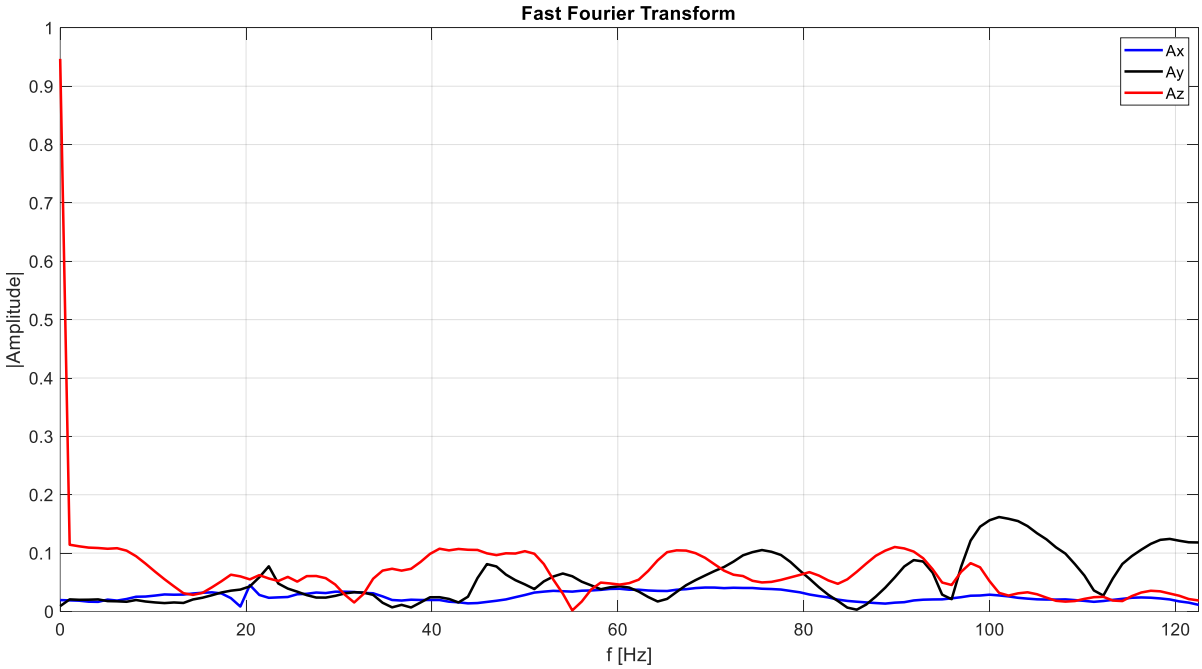


Figura 80 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 2

- Prova 3

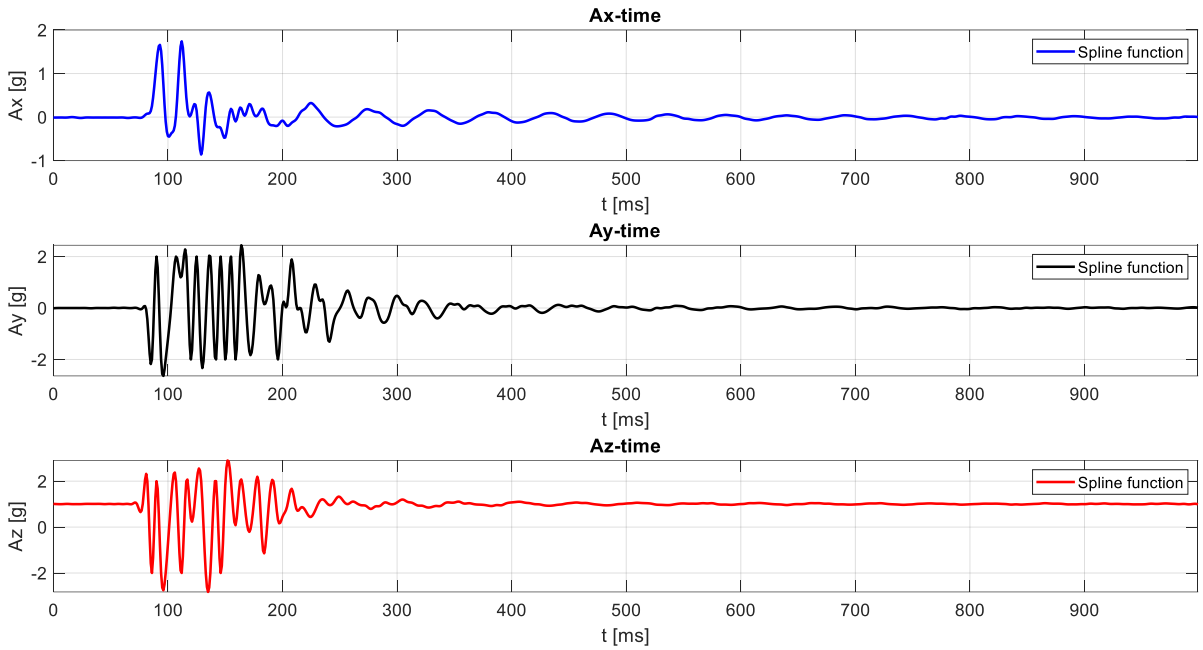


Figura 81 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 3

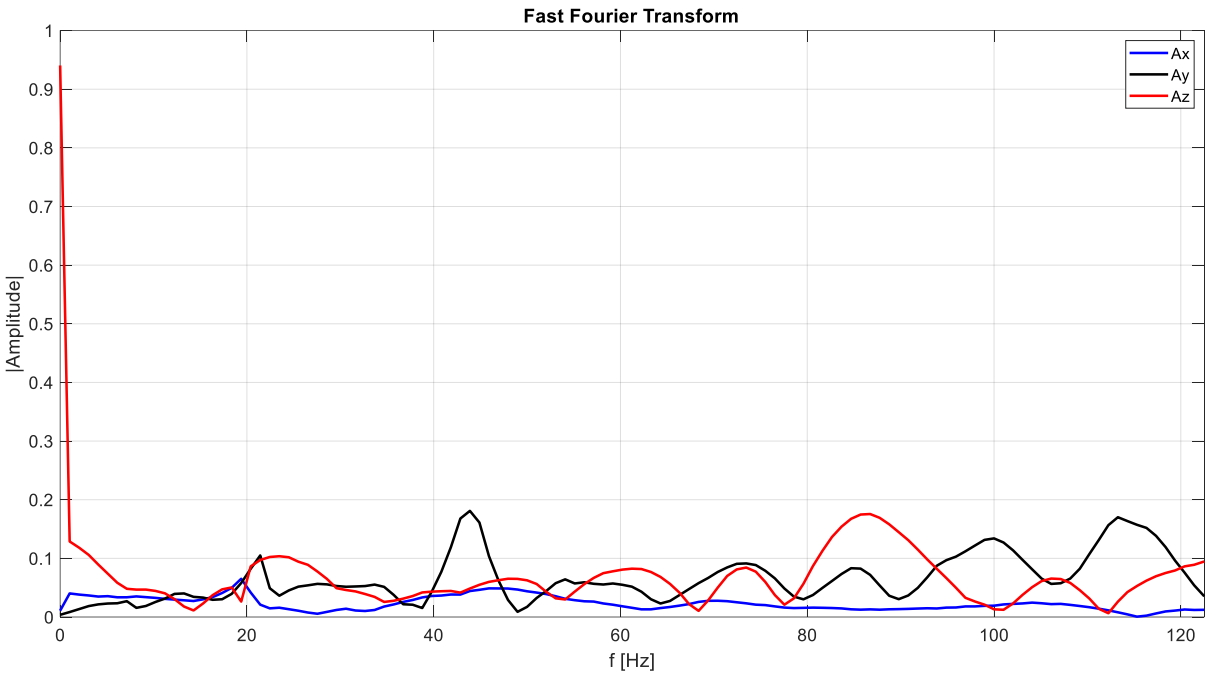


Figura 82 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 3

- Prova 4

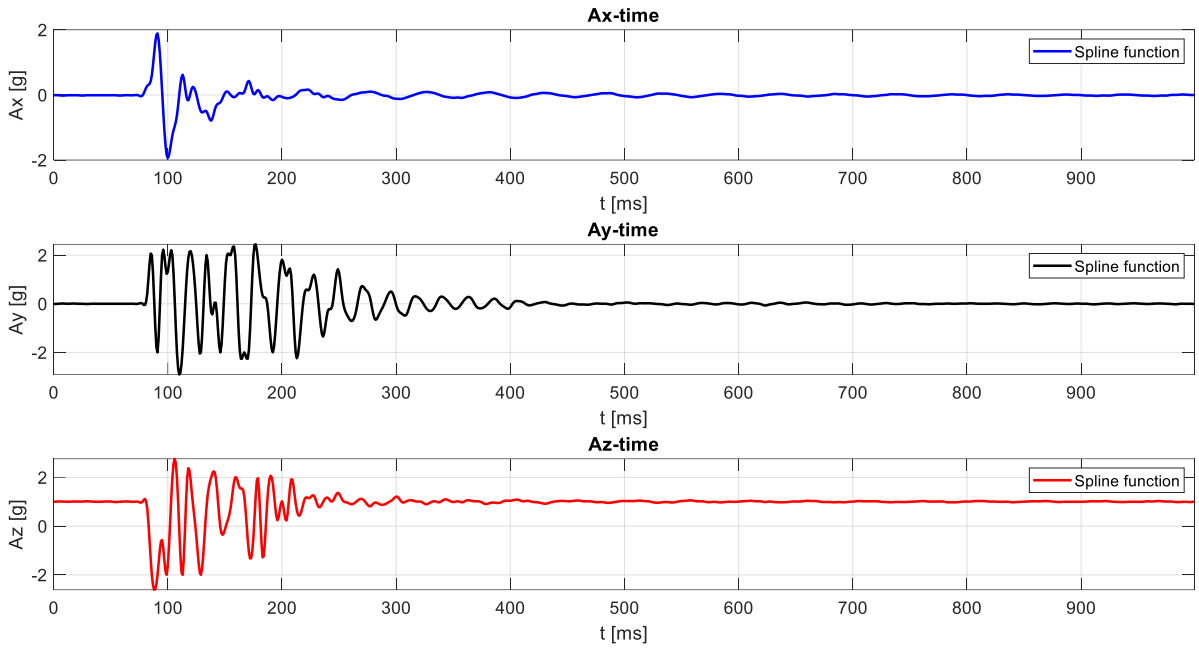


Figura 83 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 4

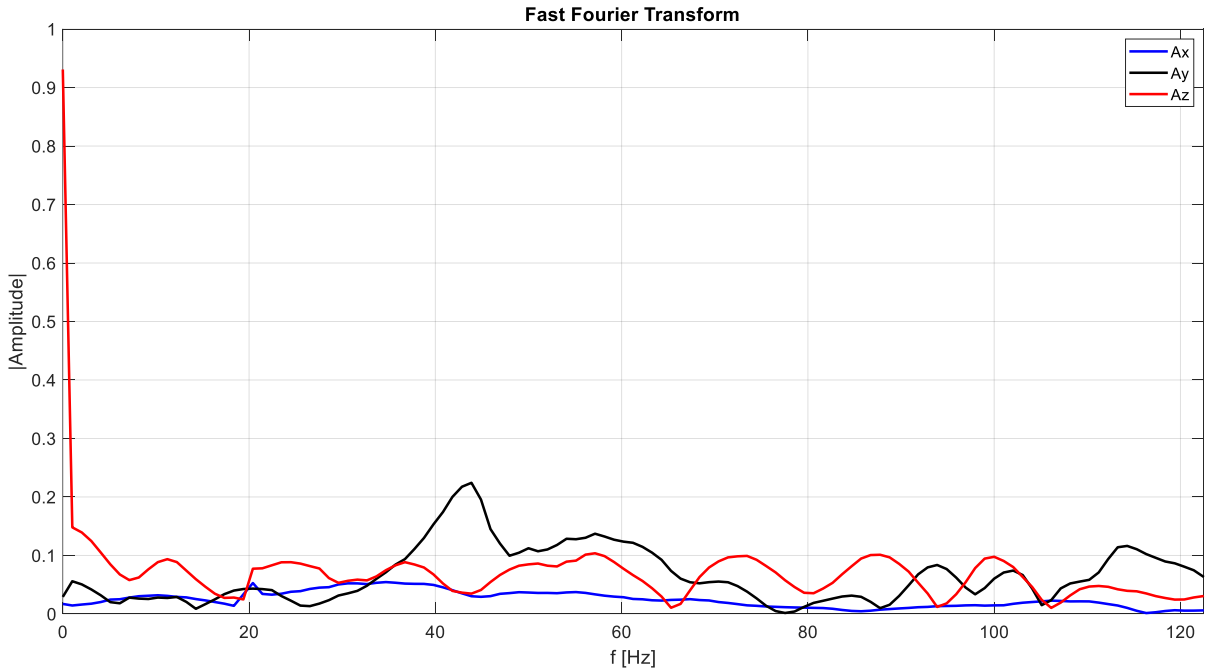


Figura 84 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 4

- Prova 5

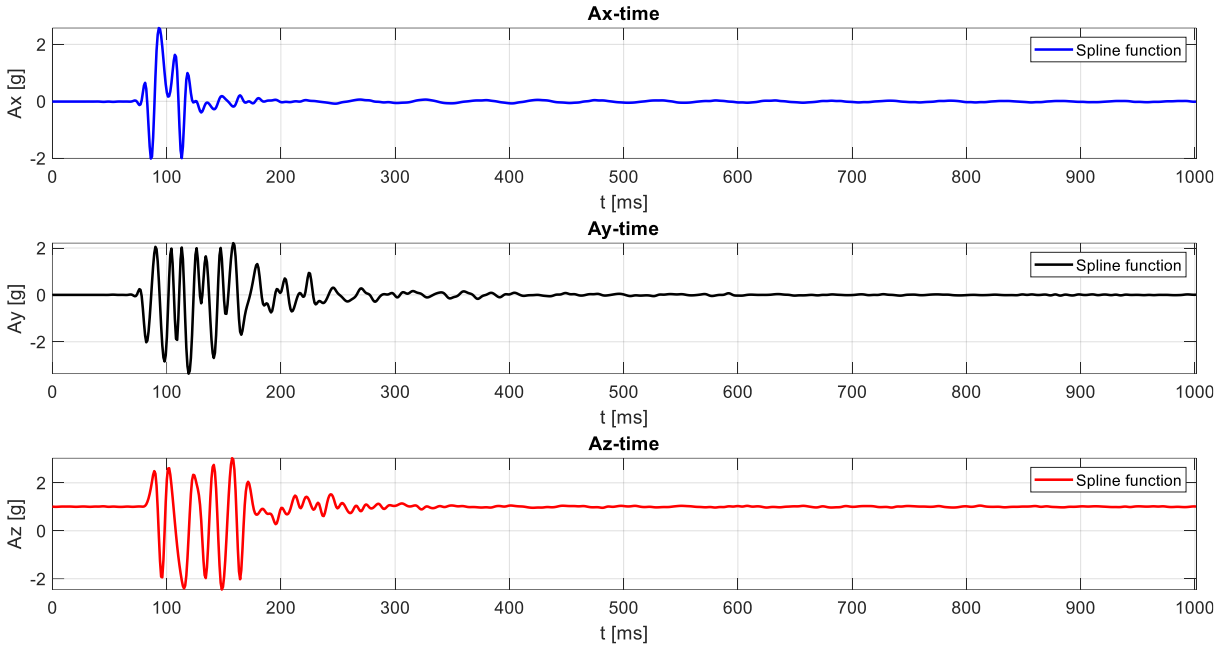


Figura 85 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 5

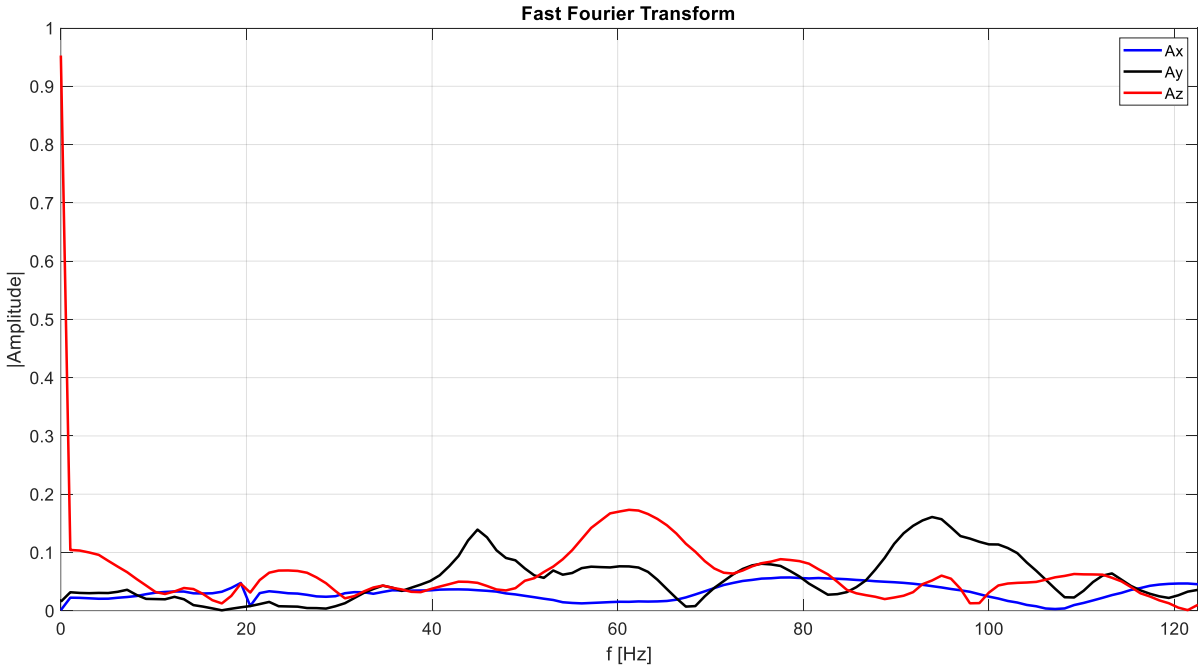


Figura 86 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 5

- Prova 6

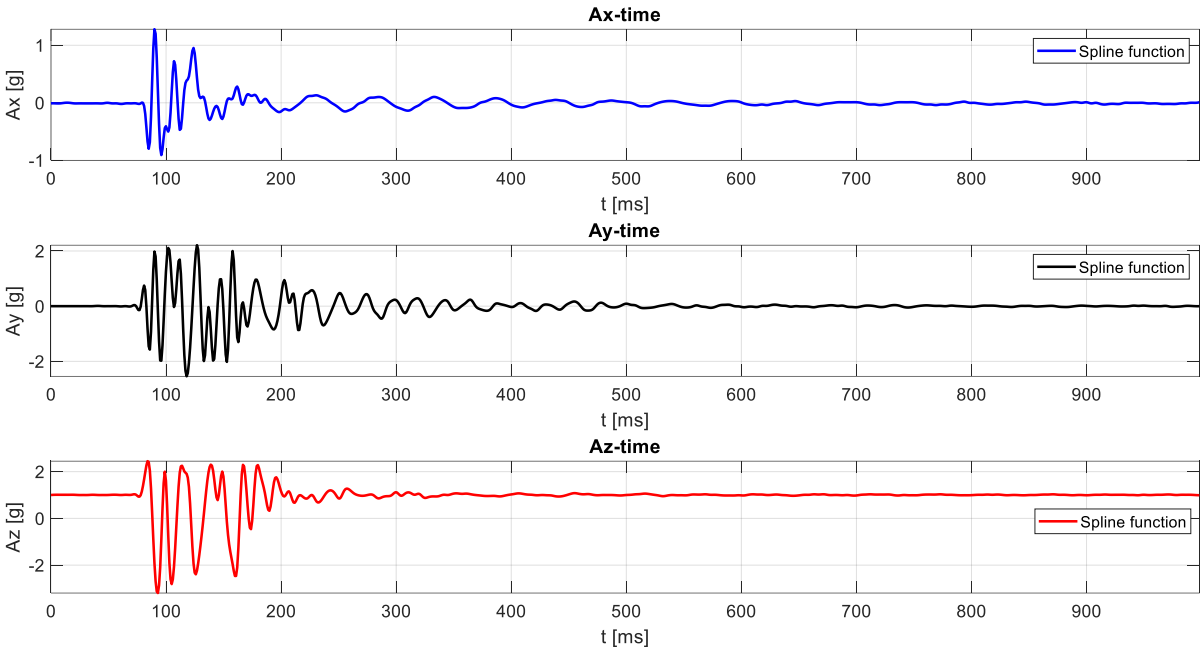


Figura 87 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 6

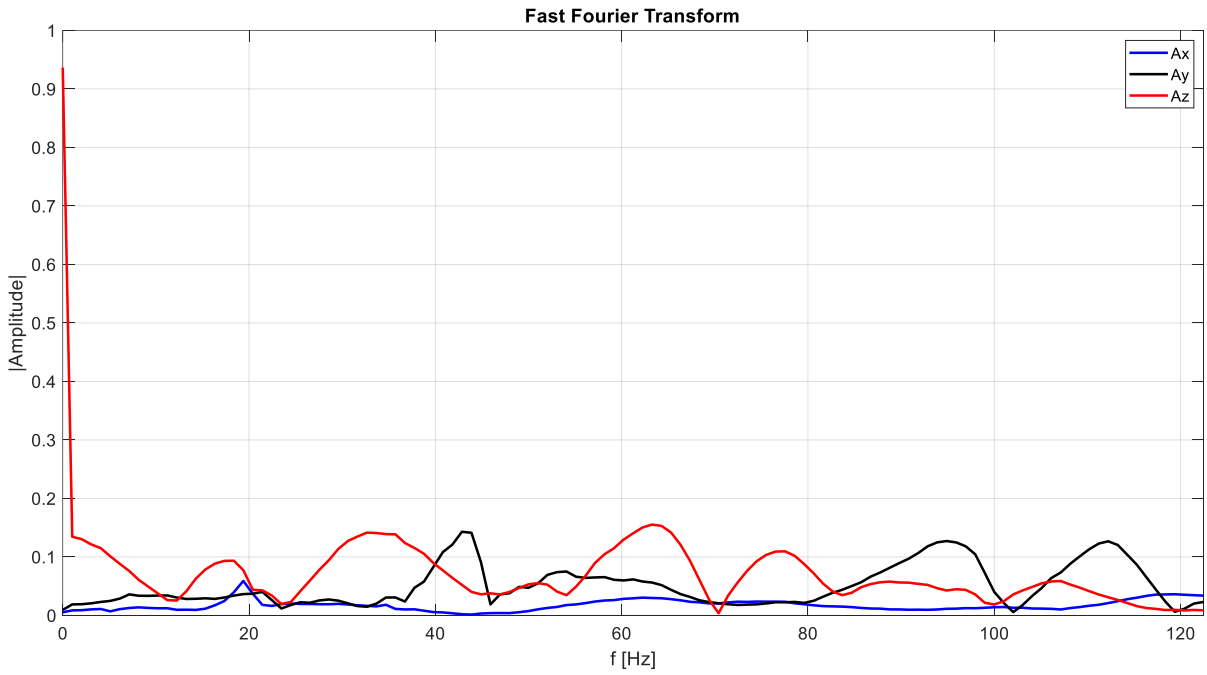


Figura 88 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 6

- Prova 7

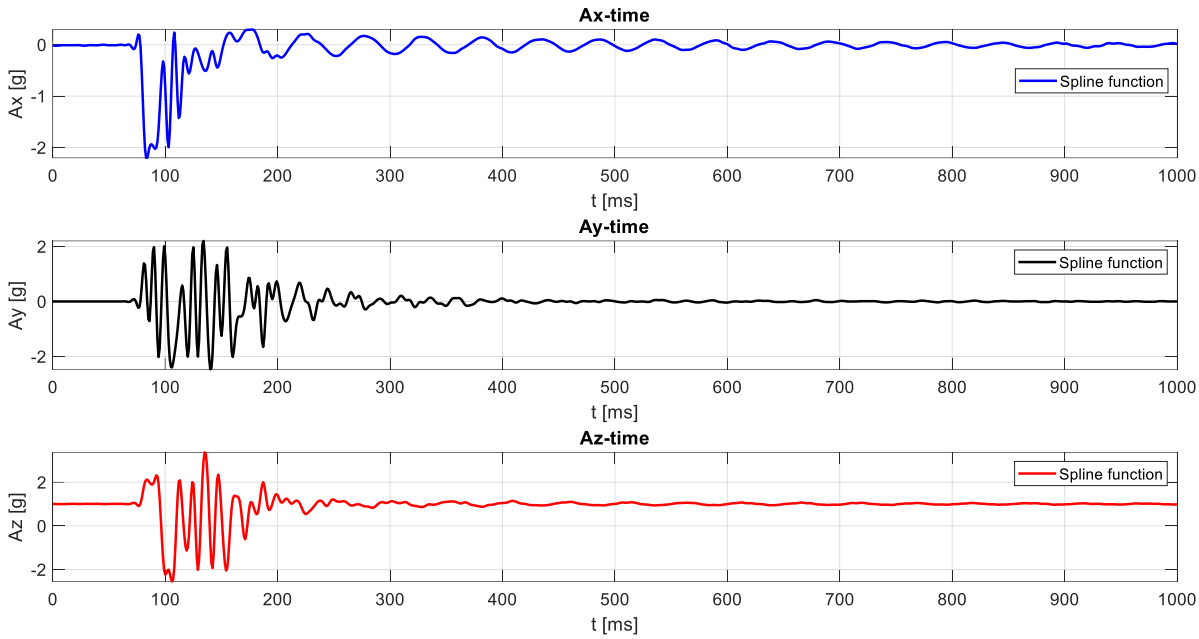


Figura 89 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 7

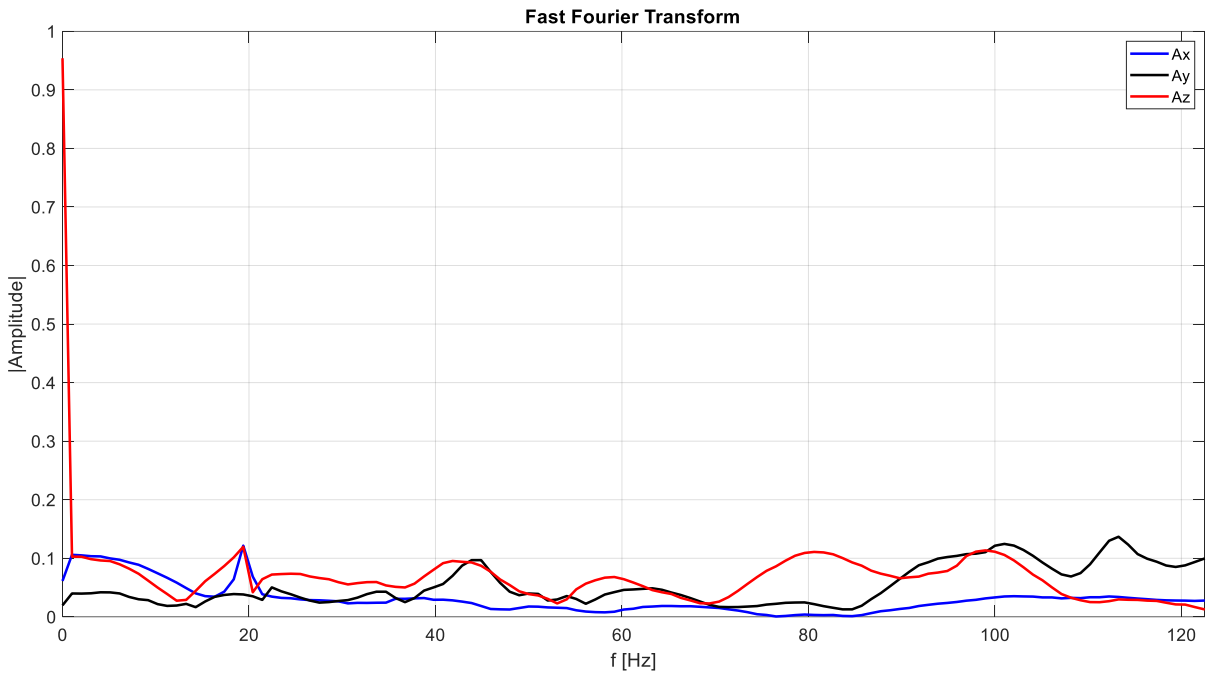


Figura 90 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 7

- Prova 8

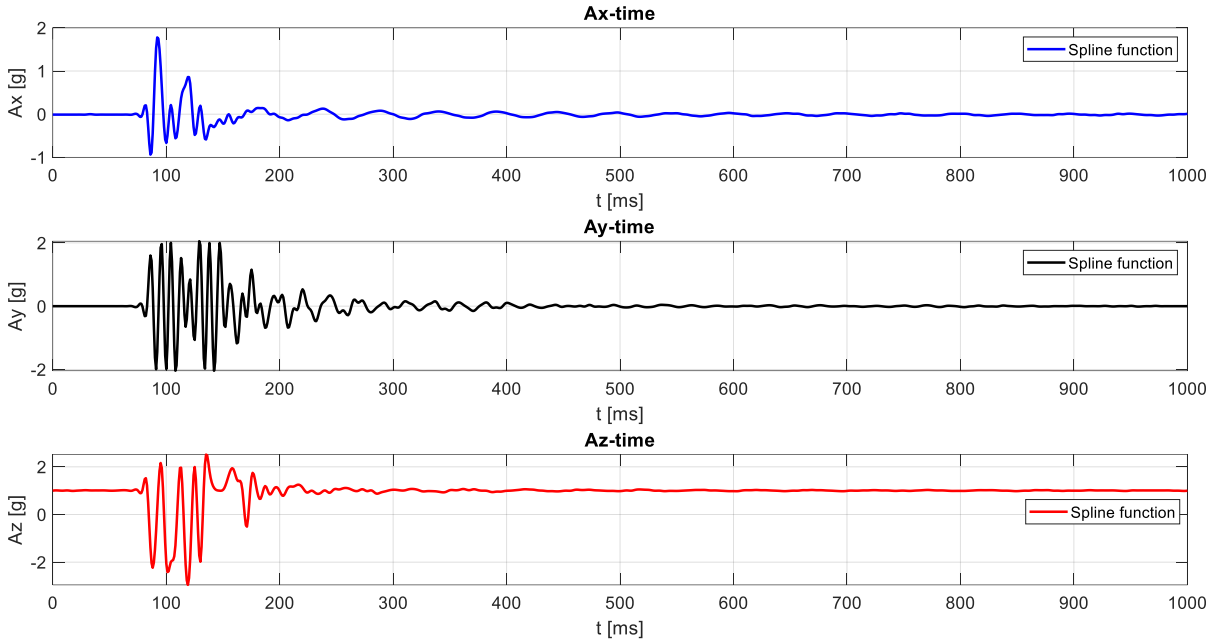


Figura 91 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 8

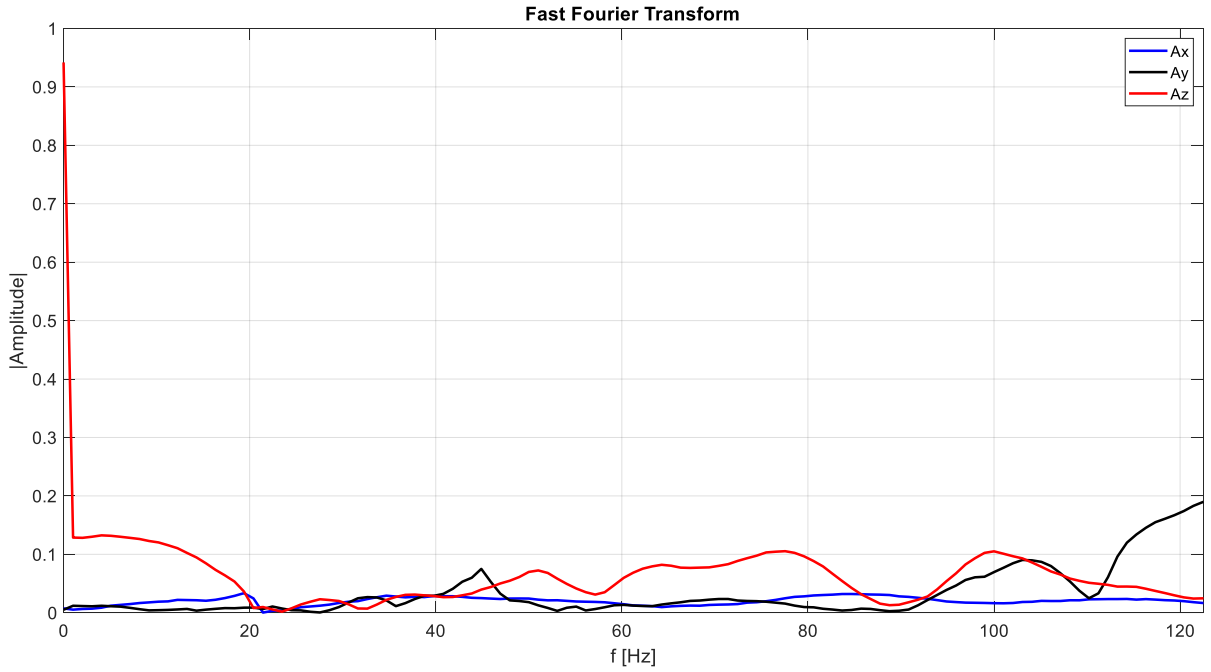


Figura 92 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 8

- Prova 9

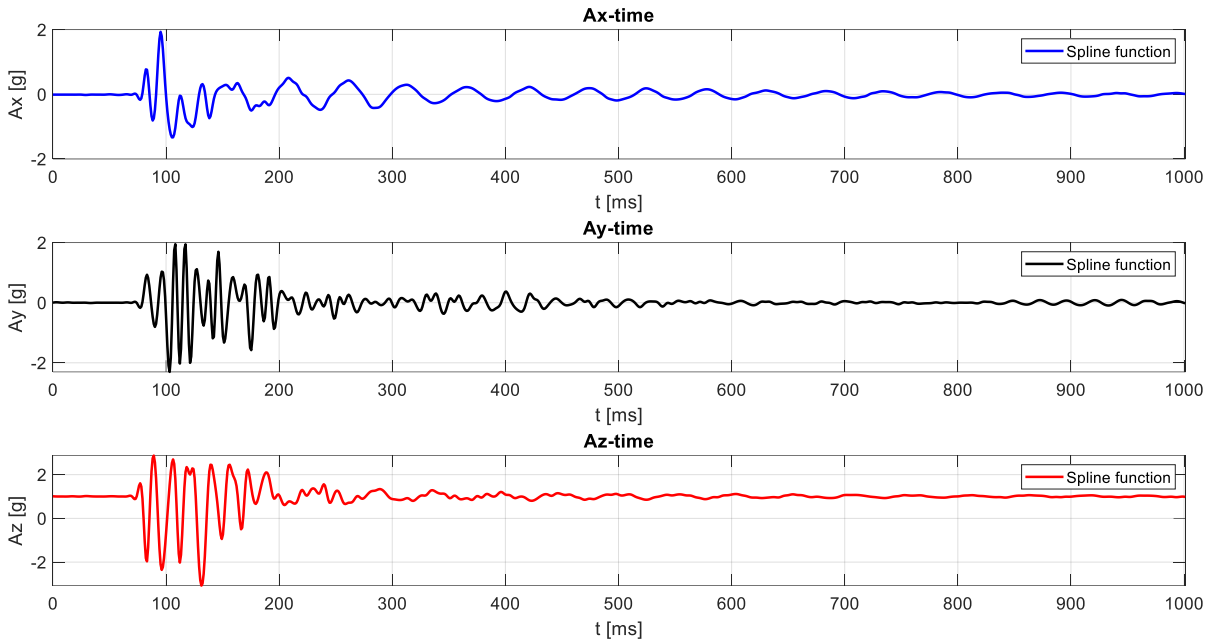


Figura 93 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 9

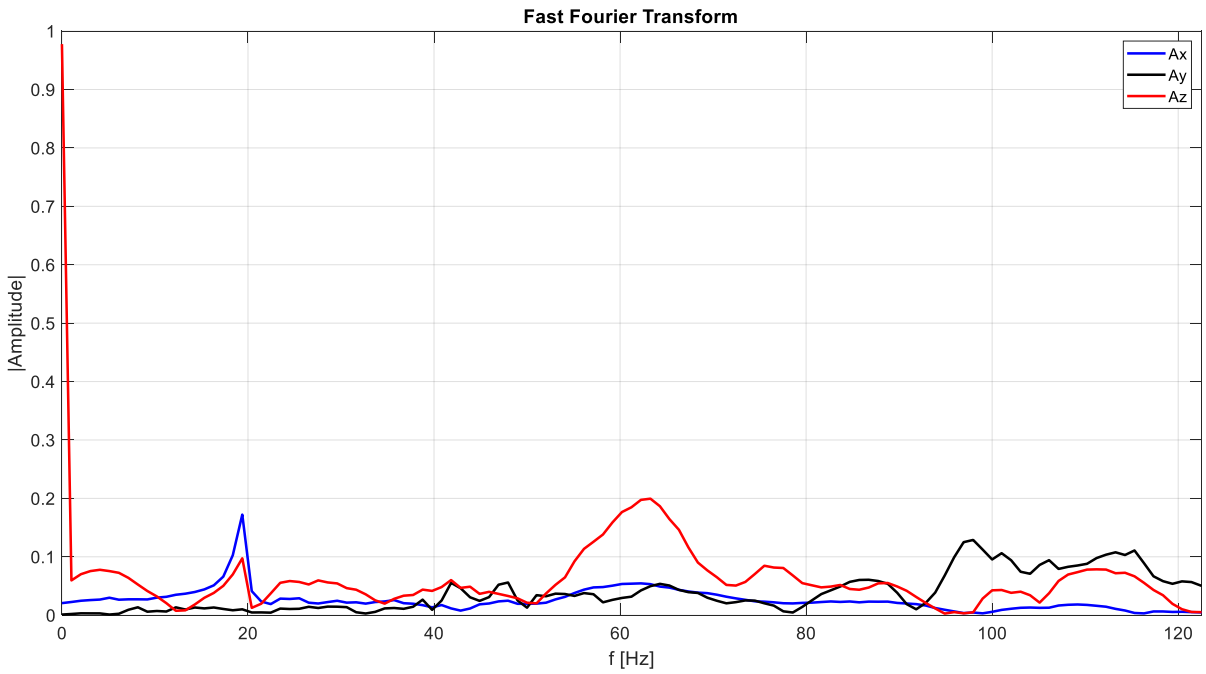


Figura 94 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 9

- Prova 10

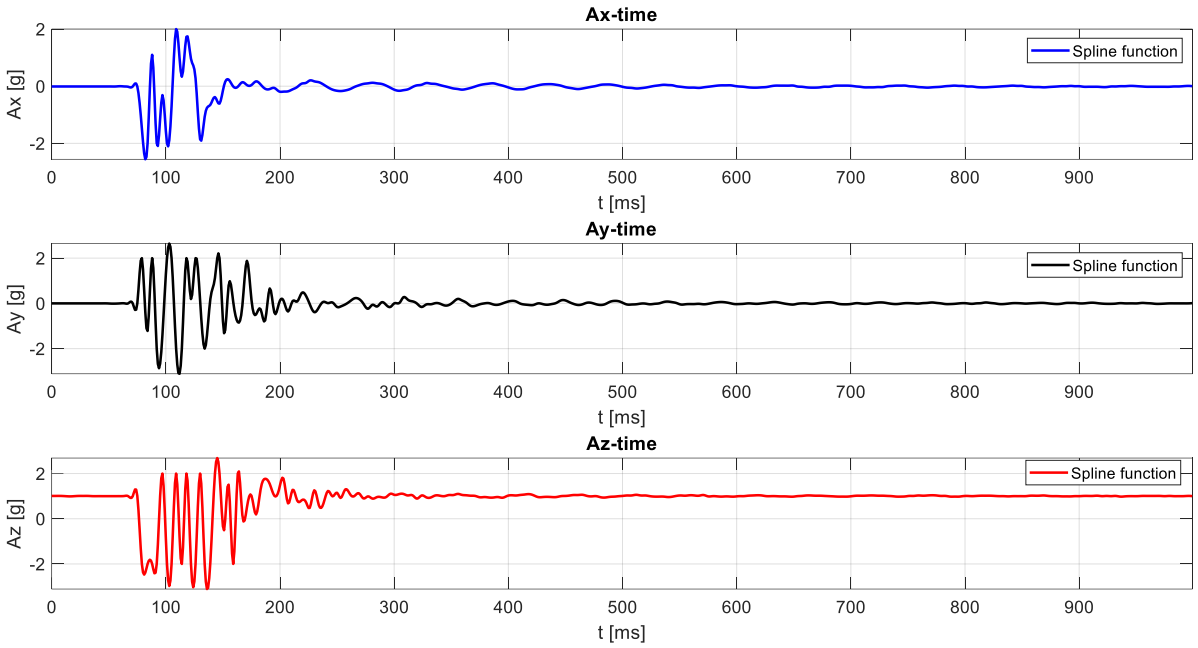


Figura 95 – Andamento accelerazioni nei 3 assi per la prova 10

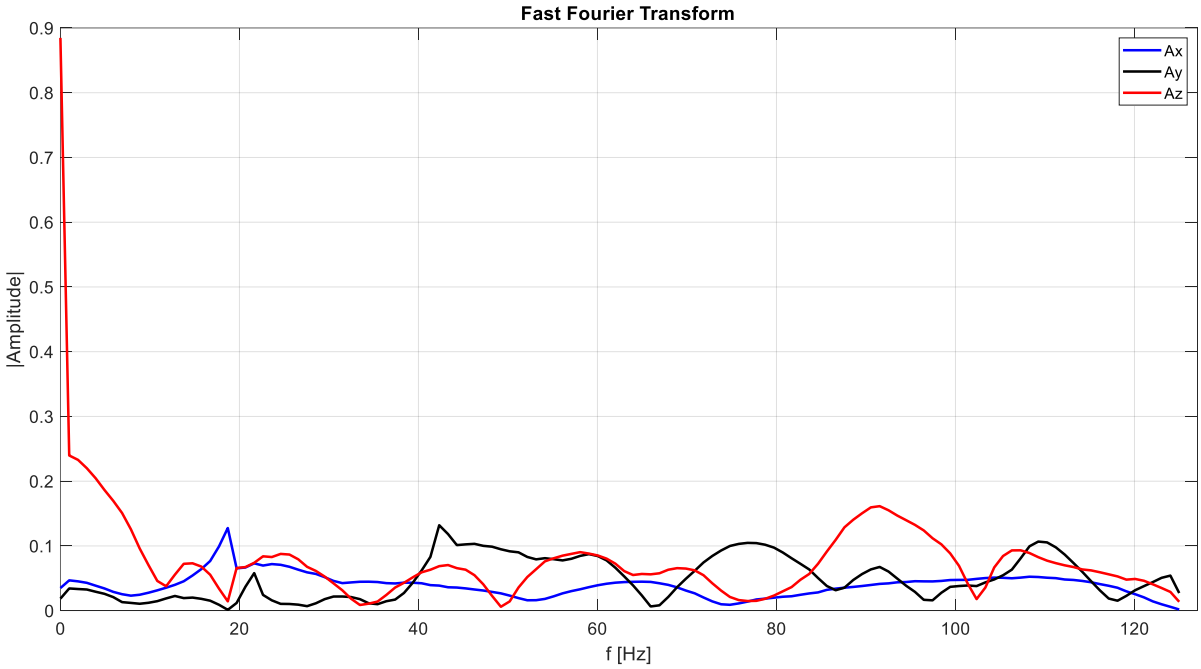


Figura 96 – Andamento accelerazioni in funzione della frequenza per la prova 10

7.5. Discussione dei risultati delle prove sperimentali

Come è possibile osservare dagli andamenti rappresentati nel paragrafo precedente, si può dire subito che l'ipotesi fatta, cioè di risposta del sistema con un andamento sottosmorzato, è verificata. Ovviamente, non essendo il sistema ideale e a 1 grado di libertà, le risposte non saranno delle curve con un periodo costante e neanche i picchi di ampiezza saranno massimi quando viene applicata la forzante, ma si possono avere anche dopo qualche millisecondo dall'applicazione della stessa.
Quello che si può dire a prescindere è che in tutte le prova si parte da una configurazione:

$$a_x = a_y = 0\ g$$
$$a_z = 1\ g$$

con le oscillazioni che saranno intorno a questi valori.
Si nota che i picchi di accelerazione massima, in alcune prove, possono superare i $\pm 2\ g$, in accordo con lo sketch Arduino, in cui si ha uno $AccelScaleFactor = 16384$ e uno $GyroScaleFactor = 131$, che sono i valori di taratura del sensore di $\pm 2\ g$. Il motivo per il quale si va oltre di qualche decimo di g è riferito al fatto che si è utilizzata una funzione `spline()`, cioè un'approssimazione, per rappresentare delle curve e non delle spezzate.
Inoltre, tramite questi andamenti è possibile vedere dopo quanto tempo il profilato su cui è montata la webcam smette di vibrare, e quindi è possibile capire dopo quanto tempo è possibile effettuare fotografie sulla radio. Si ricorda che il compito della webcam è quello di registrare la posizione delle radio in maniera tale che il robot, in un secondo momento, raggiunga sempre quella stessa posizione del monitor e trovi sempre quella stessa icona da premere.
I valori analizzati sono presi in un intervallo di $1\ s$, cioè $1000\ ms$. Si parte da una condizione iniziale di sistema immobile, si applica la forzante dall'esterno e si analizzano i risultati ottenuti nell'arco di $1\ s$.
Considerando le prove effettuate con la massa 1, si può notare che le oscillazioni, durano all'incirca $300\ ms$, tranne per le prove 3, 6 e 9 in cui si può vedere una durata dell'oscillazione maggiore.
Per la prova 3 e 6 si ipotizza sia stato un errore di calcolo durante la prova.

Per la prova 9, poiché è stata colpita la base su cui poggia il robot, la quale è in materiale composito e non in alluminio, si possono notare maggiori vibrazioni prima che il sistema ritorni nella sua condizione di equilibrio.
Invece, considerando le prove effettuate con la massa 2, si può dire che le oscillazioni durano leggermente di più, all'incirca $350\ ms$, tranne che per le prove 3, 6, 7 e 9.
Analogamente alla misurazione precedente, per le prove 3, 6 e 7 si ipotizza un errore di calcolo durante la prova, mentre per la prova 9 si registrano vibrazioni con una durata maggiore a causa della base in composito, la quale attutisce meno le vibrazioni rispetto ai profilati in alluminio.
Le prove, nonostante siano state utilizzate due masse differenti, risultano essere abbastanza simili tra loro, le differenze sostanziali riguardano i picchi massimi e minimi, in quanto si è utilizzati una massa circa tre volte più grande.

Dai secondi grafici è possibile osservare l'andamento della Trasformata Veloce di Fourier (`fft()` - *Fast Fourier Transform*) delle accelerazioni nelle tre direzioni dello spazio in funzione della frequenza.
Considerando i grafici della prova con la massa 1 si nota come le accelerazioni lungo l'asse X sono ininfluenti ai fini vibrazionali, se non per la prova 9, quella sulla base del robot, in cui si nota un picco di $0{,}2$ a $20\ Hz$.
Per le accelerazioni lungo l'asse Y e lungo l'asse Z, invece, si notano diversi picchi a diverse frequenze, con la differenza sostanziale che tutte le accelerazioni lungo l'asse Z hanno un picco massimo a un valore di circa $0{,}9 \div 1$ a una frequenza bassa prossima allo zero, mentre quelle lungo Y partono da 0.
Le differenze tra le varie prove sono racchiuse nelle tabelle sottostanti:

Accelerazione Ay		
Prove	Picchi [-]	Frequenze [Hz]
Prova 1	0,18	45; 90; 110
Prova 2	0,15	110; 120
Prova 3	0,20	45
Prova 4	0,18	110
Prova 5	0,19	90
Prova 6	0,21	90; 100
Prova 7	0,19	90
Prova 8	0,19	90
Prova 9	0,10	50; 110
Prova 10	0,13	45; 110

Tabella 17 – Valore dei picchi di ampiezza di oscillazione per Ay

Accelerazione Az		
Prove	Picchi [-]	Frequenze [Hz]
Prova 1	0,13	90
Prova 2	0,18	80
Prova 3	0,10	80
Prova 4	0,18	75
Prova 5	0,17	60
Prova 6	0,12	75
Prova 7	0,11	20; 80
Prova 8	0,11	30; 90
Prova 9	0,15	20; 70
Prova 10	0,12	60; 90; 100

Tabella 18 – Valore dei picchi di ampiezza di oscillazione per Az

Si nota che le ampiezze di oscillazione sono molto contenute con valori massimi intorno a 0,2. Inoltre, il sistema oscilla a frequenze molto basse, non pericolose né per la struttura né per la webcam.

Analogamente, si può effettuare una analisi simili per le prove effettuate con la massa 2.

Accelerazione Ay		
Prove	Picchi [-]	Frequenze [Hz]
Prova 1	0,24	45
Prova 2	0,17	100
Prova 3	0,19	45; 110
Prova 4	0,22	45
Prova 5	0,17	90
Prova 6	0,15	45; 90; 110
Prova 7	0,14	100; 110
Prova 8	0,19	120
Prova 9	0,12	90
Prova 10	0,13	45

Tabella 19 – Valore dei picchi di ampiezza di oscillazione per Ay

Accelerazione Az		
Prove	Picchi [-]	Frequenze [Hz]
Prova 1	0,13	20
Prova 2	0,10	40; 50; 90
Prova 3	0,18	90
Prova 4	0,10	50; 90; 100
Prova 5	0,18	60
Prova 6	0,14	30; 70
Prova 7	0,10	40; 80; 100
Prova 8	0,10	80; 100
Prova 9	0,20	65
Prova 10	0,17	90

Tabella 20 – Valore dei picchi di ampiezza di oscillazione per Az

Anche in questo caso si nota come le accelerazioni lungo l'asse X non influiscano tanto, se non per le prove 1, 7, 9 e 10 in cui si registra un picco a una frequenza di 20 Hz.
Per le accelerazioni lungo gli assi Y e Z si registrano andamenti simili a quelli della prova con massa 1. Cambiano solo le frequenze in cui si verificano i picchi, ma le ampiezze di oscillazione massime sono sempre circa 0,2, in questo caso si verifica un massimo in 0,24.
Le oscillazioni lungo l'asse Z presentano un picco massimo di circa $0{,}9 \div 1$ a una frequenza molto bassa, prossima allo zero, come si era presentato anche nel caso precedente.
Il sistema oscilla sempre a frequenze basse e con un'ampiezza di oscillazione non troppo elevata e anche in questo caso la struttura assorbe bene le accelerazioni non creando problemi alla webcam durante la registrazione.
Di seguito si riporta un grafico di confronto per la prova 1 eseguita sul banco prova delle tre accelerazioni rispetto ai tre assi in funzione della frequenza per le due masse utilizzate. Si nota come gli andamenti siano molto simili, con i picchi di oscillazione massima che si verificano sempre alla stessa frequenza, ma avente un ampiezza maggiore per la prova con massa 2, avendo quest'ultima una massa circa tre volte superiore rispetto all'oggetto di massa 1.

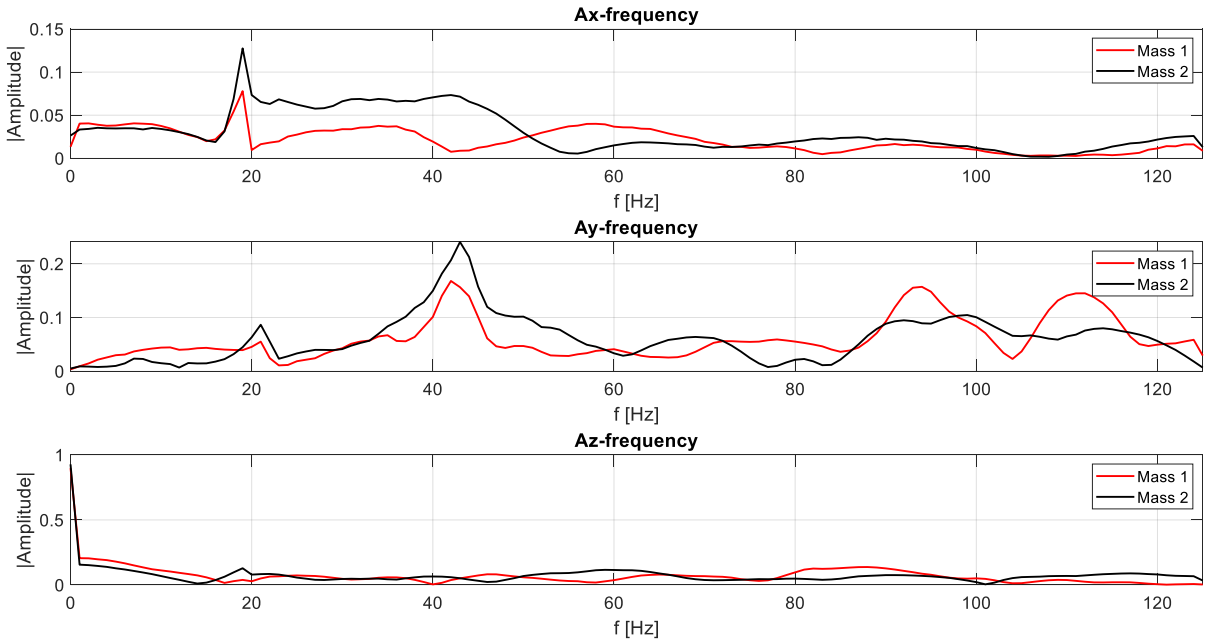


Figura 97 – Confronto andamenti accelerazioni in funzione della frequenza

Si è riportato solo un caso di esempio relativo alla prova 1, analogamente accade per le altre prove sugli altri nove punti della struttura.
Lo script Matlab relativo è riportato in Appendice G.

Comunque sia, per evitare distorsioni delle foto effettuate dalla webcam, e poiché è difficile misurare nella realtà questo tempo, viene consigliato all'operatore che effettua le prove di aspettare $1\ secondo$ prima di scattare foto sulle radio.
Poiché $350\ ms$ è un tempo esiguo, si può affermare che la struttura realizzata assorbe molto bene le vibrazioni causate da agenti esterni o anche dall'attività di movimentazione del robot stesso. Quindi anche la realizzazione di video è permessa, con l'unica accortezza che quando si realizzano video bisogna evitare il più possibile urti esterni che non siano le lavorazioni del robot.

8. Conclusioni

La progettazione e realizzazione del banco prova, con annessa analisi vibrazionale, ha permesso di rendere automatizzato il compito di testing sui sistemi infotainment tramite l'utilizzo di un braccio automatico.

Il primo problema, cioè di come mantenere fermi sia il robot che le radio è stato facilmente ovviato grazie all'utilizzo degli stessi profilati in alluminio con i quali si è costruito il banco e apposite squadrette che permettono lo scorrimento, l'una sull'altra, dei profilati.

Il secondo problema, invece, ha riguardato uno studio vibrazionale su uno specifico profilato, sul quale è montata una webcam, con il compito di scattare foto e video mentre il robot effettua lavorazioni sulla radio in esame, con il compito che il robot memorizzi la lavorazione effettuata per poi ripeterla in un altro momento durante il test. Affinché ciò sia possibile, bisogna verificare che la webcam non oscilli durante la messa in moto del robot. Questo è stato verificato tramite delle prove sperimentali in cui viene fatto cadere un oggetto, avente una determinata massa, da un'altezza specifica. Con questa prova viene simulato il movimento del braccio robotico che preme con il proprio *end-effector*, in queste prove viene usata un pennino, sul monitor delle radio. La forza che riceverebbe la radio tramite queste prove sarebbe eccessiva e soprattutto non realizzabile nella realtà, neanche se il robot lavorasse alla massima velocità.

Quindi sono delle prove estreme, che hanno permesso di giungere alla conclusione che il sistema realizzato assorbe molto bene le vibrazioni, in quanto si vede che durante la prova il sistema ha una durata di oscillazione di circa $300\ ms$, terminata la quale esso ritorna nella sua condizione iniziale di zero e che la frequenza in cui si raggiunge l'ampiezza di oscillazione massima è poco superiore a $0\ Hz$, cioè a una frequenza molto bassa che non crea problemi durante l'analisi sulle radio.

Questo permette di poter realizzare video e foto, acquisibili dal robot, il quale poi potrà effettuarli di nuovo quando gli verrà comandato di ripetere quella specifica lavorazione.

Se si vuole diminuire questo picco massimo nell'oscillazione A_z bisogna costruire un opportuno filtro, passa basso o passa banda, che permette di attenuare le oscillazioni. L'inconveniente però è che essendo un sistema meccanico e non elettrico, la costruzione di un filtro come questi sarebbe complicata.

Per evitare ciò, allora si potrebbe pensare di utilizzare dei piedini anti-vibrazionali differenti da quelli utilizzati, che permettano di assorbire meglio le vibrazioni e ottenere dei risultati migliori rispetto a quelli ottenuti.
Il banco prova è stato testato sulle radio esaminate in azienda e trattate nel capitolo 3, ma nulla toglie che successive radio, che verranno montate nelle nuove automobili dei gruppi **FCA** e *PSA*, che entreranno in commercio nei mesi o negli anni seguenti, possano essere inserite in questo stesso banco ed essere testate senza alcuna difficoltà dallo stesso robot, o anche da un altro di migliori prestazioni.
L'importante è rispettare le dimensioni massime del banco, anche se alcune dimensioni interne possono essere modificate, in aumento o in decremento, a seconda se la base del nuovo robot è più o meno ingombrante o le radio abbiano una forma e dimensioni diverse da quelle analizzate.
Anche la base di compensato, utilizzata per il sostegno del robot e degli accessori utili a quest'ultimo per la sua movimentazione, può essere innalzata o abbassata.
Di conseguenza si può dire che il banco prova realizzato è molto flessibile, resiste alle vibrazioni e permette di effettuare delle ottime analisi sui sistemi infotainment.
Se viene utilizzato un nuovo robot, il quale permette di imprimere maggiori forze sulle radio, bisogna effettuare di nuovo le prove vibrazionali per verificare se anche nelle nuove condizioni il sistema assorba bene le vibrazioni oppure bisogna effettuare dei cambiamenti, per esempio utilizzando altri piedini anti-vibrazionali aventi migliori caratteristiche rispetto a quelli già montati.

9. Appendici

9.1. Appendice A

```
#include <SoftwareSerial.h>

#include<Wire.h>
const int MPU_addr=0x68;   // I2C address of the MPU-6050
const uint16_t AccelScaleFactor = 16384;   // full scale to have +/- 2 g
const uint16_t GyroScaleFactor = 131;    // full scale to have +/- 250 °/s
int16_t AccelX,AccelY,AccelZ,Temperature,GyroX,GyroY,GyroZ;
void setup(){
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU_addr);
  Wire.write(0x6B);   // PWR_MGMT_1 register
  Wire.write(0);    // set to zero (wakes up the MPU-6050)
  Wire.endTransmission(true);
  Serial.begin(115200);
}
void loop(){
  double Ax, Ay, Az, T, Gx, Gy, Gz;
  Wire.beginTransmission(MPU_addr);
  Wire.write(0x3B);   // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
  Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(MPU_addr,14,true);   // request a total of 14 registers

  AccelX=Wire.read()<<8|Wire.read();    // 0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C
                                           (ACCEL_XOUT_L)
  AccelY=Wire.read()<<8|Wire.read();    // 0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E
                                           (ACCEL_YOUT_L)
  AccelZ=Wire.read()<<8|Wire.read();    // 0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40
                                           (ACCEL_ZOUT_L)
  Temperature=Wire.read()<<8|Wire.read();   // 0x41 (TEMP_OUT_H) & 0x42
                                               (TEMP_OUT_L)
  GyroX=Wire.read()<<8|Wire.read();   // 0x43 (GYRO_XOUT_H) & 0x44
                                         (GYRO_XOUT_L)
  GyroY=Wire.read()<<8|Wire.read();   // 0x45 (GYRO_YOUT_H) & 0x46
                                        (GYRO_YOUT_L)
  GyroZ=Wire.read()<<8|Wire.read();   // 0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48
                                         (GYRO_ZOUT_L)

  Ax = (double)AccelX/AccelScaleFactor;
  Ay = (double)AccelY/AccelScaleFactor;
  Az = (double)AccelZ/AccelScaleFactor;
  T = (double)Temperature/340+36.53;    // temperature formula
  Gx = (double)GyroX/GyroScaleFactor;
  Gy = (double)GyroY/GyroScaleFactor;
  Gz = (double)GyroZ/GyroScaleFactor;

//   T = 0;
//   Gx = 0;
//   Gy = 0;
//   Gz = 0;
```

```
  Serial.print(millis()); Serial.print(";");     // print time function
                                                    sensor
  Serial.print(Ax); Serial.print(";");    // print acceleration in x
  Serial.print(Ay); Serial.print(";");    // print acceleration in y
  Serial.print(Az); Serial.print(";");    // print acceleration in z
  Serial.print(T);  Serial.print(";");    // equation for temperature in
                                             degrees C from datasheet
  Serial.print(Gx); Serial.print(";");    // print gyroscope in x
  Serial.print(Gy); Serial.print(";");    // print gyroscope in y
  Serial.println(Gz);    // print gyroscope in z
  //delay(1);
}
```

9.2. Appendice B

Δ time	time	Ax	Ay	Az	T	Gx	Gy	Gz
[ms]	[ms]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°/s]	[°/s]	[°/s]
0	0	-0,01	0	1	28,58	-2,06	1,11	-0,66
4	4	-0,01	0,01	1	28,48	-2,08	1,1	-0,79
4	8	0	0	1,01	28,58	-1,83	1,13	-0,78
4	12	-0,01	0	1	28,53	-1,98	0,87	-0,68
4	16	-0,01	0	1,01	28,48	-2,24	0,91	-0,74
4	20	0	0	1,01	28,44	-2,11	0,98	-0,71
4	24	-0,01	0	1	28,53	-1,98	0,96	-0,86
5	29	-0,01	0	1,01	28,44	-2,24	0,95	-0,78
4	33	-0,01	0	1	28,53	-2,15	0,85	-0,83
4	37	0	0	1	28,53	-2,18	0,95	-1,11
4	41	1,48	-2	-2	28,58	232,72	250,13	31,86
4	45	2	-1,75	-2	28,48	3,38	131,22	-63
4	49	0,31	2	-2	28,53	-124,51	-198,52	45,8
5	54	-0,3	-2	-2	28,58	-77,49	-21,11	-54,92
4	58	0,58	2	2	28,58	1,02	-130,77	45,41
4	62	0,3	-2	-2	28,44	8,57	50,15	1,79
4	66	0,25	2	-2	28,53	0,76	52,26	-2,95
4	70	-0,38	-2	2	28,53	6,24	-15,54	17,08
4	74	0,66	-2	-1,85	28,58	2,59	42,62	-27,15
5	79	0,82	2	-2	28,48	20,65	25,52	3,53
4	83	0,1	0,05	2	28,58	-4,73	-12,23	-6,5
4	87	-0,5	2	-2	28,53	-5,88	6,82	-2,59
4	91	-0,39	2	-1,3	28,58	-5,08	-7,31	20
4	95	-0,35	-1,17	2	28,48	-2,85	-17,11	10,14
4	99	0,21	-1,65	0,72	28,53	-8,58	-18,82	-23,85
4	103	-0,09	2	2	28,53	0,98	-16,45	6,09
4	107	0,15	-1,01	0,15	28,53	-4,6	7,94	-5,79
4	111	0,14	2	-0,19	28,53	-10,03	-9,37	2,2
4	115	0,02	-0,22	2	28,39	-3,84	-10,24	19,62
5	120	-0,05	-2	2	28,53	-6,63	6,4	-14,13
4	124	0,09	0,67	0,13	28,48	5,79	7,34	2,87
4	128	-0,09	-1,61	0,37	28,53	-3,35	2,76	-14,17
4	132	-0,01	2	1,28	28,48	1,95	4,48	3,18
3	135	-0,11	0,25	-0,15	28,44	-2,26	9,95	5,47
4	139	-0,17	-0,37	0,72	28,53	-3,92	-1,4	-0,48
5	144	-0,27	-0,63	1,61	28,48	-0,8	-3,16	-0,24
4	148	-0,03	-0,12	1,41	28,48	-1,01	-1,33	-6,32

4	152	0,04	0,61	1,19	28,62	-0,62	1,02	-2,86
4	156	0,17	1,13	0,62	28,48	-4,8	1,5	0,34
4	160	0,21	0,15	0,93	28,53	-4,39	-0,53	6,4
4	164	0,18	-0,92	0,82	28,58	-5,71	0,51	-0,7
4	168	0,15	-0,35	1,32	28,48	-1,92	-0,05	-0,14
4	172	0,1	-0,96	1,38	28,53	-0,5	3,46	-4,67
4	176	0,04	0,64	0,56	28,53	-0,75	4,25	-4,29
4	180	-0,04	0,61	1,32	28,58	-0,68	0,7	2,69
3	183	-0,1	-0,18	1,12	28,48	-2,05	3,18	-0,22
5	188	-0,15	0,02	0,98	28,58	-1,05	2,23	0,89
3	191	-0,19	-0,48	0,9	28,48	-0,34	1,39	-1,85
4	195	-0,18	-0,15	1,24	28,48	-0,7	-1,19	-5,26
5	200	-0,08	0,77	0,99	28,48	-1,58	-1,24	-1,27
4	204	-0,03	0,43	0,97	28,53	-3,63	-0,68	0,53
4	208	0,05	0,3	1,1	28,44	-4,37	-1,34	1,56
4	212	0,1	-0,37	0,93	28,58	-3,6	0,13	2,08
4	216	0,15	-0,71	0,79	28,48	-2,74	-0,6	-2,59
4	220	0,16	-0,06	1,05	28,48	-1,05	0,93	-3,02
4	224	0,13	0,11	0,89	28,58	-1,07	2,93	-1,52
4	228	0,07	0,26	0,93	28,48	-2,01	2,87	-0,63
4	232	-0,01	0,13	1,12	28,48	-1,76	2,86	1,81
3	235	-0,07	-0,29	0,96	28,58	-1,79	2,76	0,07
4	239	-0,15	-0,27	1,11	28,58	-1,43	1,96	-2,72
4	243	-0,18	0,17	1,07	28,53	-1,02	1,43	-1,6
4	247	-0,17	0,32	1,04	28,53	-2,55	0,24	-1,95
4	251	-0,12	0,44	1,11	28,44	-3,31	-0,89	0,74
4	255	-0,07	-0,12	1,07	28,53	-3,63	-0,65	1,24
4	259	0,02	-0,3	0,98	28,58	-3,39	-0,24	-0,98
5	264	0,1	-0,27	0,8	28,62	-2,17	-0,24	-1,73
4	268	0,15	-0,1	0,95	28,48	-1,85	0,03	-2,35
4	272	0,16	0,14	0,96	28,53	-1,81	1,12	-0,66
3	275	0,13	0	0,9	28,62	-1,74	1,99	0,23
4	279	0,09	-0,17	0,98	28,53	-1,47	2,41	-0,39
4	283	0,01	-0,13	0,94	28,53	-1,07	2,71	-1,37
4	287	-0,07	0,04	1,05	28,58	-1,23	2,18	-1,98
4	291	-0,13	0,25	1,16	28,48	-1,75	2,07	-1,35
4	295	-0,17	0,3	1,11	28,48	-2,5	1,34	-0,13
4	299	-0,16	0,08	1,06	28,58	-3,05	0,47	0,63
4	303	-0,13	-0,12	1,06	28,53	-2,93	-0,37	-0,21
4	307	-0,07	-0,17	1,06	28,48	-2,52	-0,41	-1,08
4	311	0	-0,1	0,98	28,58	-2,15	-0,65	-1,21
5	316	0,07	-0,01	0,97	28,53	-2,06	-0,05	-0,96
4	320	0,11	0,02	0,94	28,53	-1,67	0,15	-0,38

4	324	0,14	-0,08	0,91	28,44	-1,66	0,98	-0,52
4	328	0,12	-0,11	0,93	28,53	-1,35	1,83	-1,05
4	332	0,08	-0,04	0,94	28,53	-1,29	2,18	-1,18
4	336	0,03	0,07	0,97	28,53	-1,45	2,48	-1,53
3	339	-0,04	0,14	1,04	28,48	-1,85	2,31	-0,95
4	343	-0,09	0,16	1,09	28,48	-2,29	1,85	-0,58
4	347	-0,13	0,06	1,05	28,48	-2,54	1,4	-0,27
4	351	-0,13	-0,03	1,07	28,58	-2,92	0,6	-0,63
4	355	-0,11	-0,07	1,08	28,53	-2,47	0,19	-0,59
5	360	-0,07	-0,11	1,05	28,48	-2,28	-0,06	-1,09
4	364	-0,02	-0,06	1	28,53	-1,89	-0,39	-1,2
4	368	0,05	-0,04	0,96	28,58	-1,69	0,24	-0,8
4	372	0,09	-0,02	0,91	28,48	-1,63	0,43	-1
4	376	0,11	0,02	0,95	28,48	-1,51	0,71	-0,86
4	380	0,1	0,03	0,95	28,58	-1,89	1,59	-0,98
4	384	0,06	0,06	0,95	28,53	-2,02	1,98	-0,85
4	388	0,02	0,08	1,01	28,44	-2,21	2,08	-0,69
4	392	-0,03	0,07	1,05	28,58	-2,28	1,82	-0,63
3	395	-0,07	0,03	1,02	28,48	-2,57	1,74	-0,79
4	399	-0,1	0,02	1,06	28,48	-2,59	1,44	-0,55
4	403	-0,1	-0,04	1,06	28,58	-2,36	0,99	-0,55
5	408	-0,09	-0,05	1,04	28,53	-2,33	0,49	-0,6
4	412	-0,06	-0,1	1,03	28,53	-2,16	-0,15	-0,62
4	416	-0,01	-0,08	1,02	28,44	-1,81	-0,18	-1
4	420	0,03	-0,03	0,97	28,48	-1,67	0,26	-1,18
4	424	0,07	0	0,95	28,48	-1,75	0,5	-1,09
4	428	0,08	0,06	0,97	28,48	-1,63	0,73	-0,93
4	432	0,07	0,05	0,95	28,44	-1,82	1,79	-0,76
4	436	0,05	0,04	0,97	28,62	-2,08	1,63	-0,79
4	440	0,03	0,05	1	28,48	-2,34	1,81	-0,57
3	443	-0,01	0,02	0,99	28,44	-2,31	1,84	-0,66
4	447	-0,05	0,01	1,01	28,53	-2,42	1,53	-0,73
4	451	-0,07	-0,03	1,04	28,53	-2,32	1,44	-0,76
4	455	-0,09	-0,07	1,03	28,48	-2,23	1,21	-0,8
5	460	-0,09	-0,06	1,05	28,58	-1,89	0,7	-0,82
4	464	-0,04	-0,04	1,02	28,53	-1,96	0,21	-0,9
4	468	-0,01	0	1,01	28,48	-1,83	0,39	-1,08
4	472	0,01	0,02	0,98	28,48	-1,82	0,3	-0,7
4	476	0,03	0,03	0,99	28,44	-1,82	0,5	-0,8
4	480	0,05	0,04	0,96	28,67	-1,84	0,75	-0,96
3	483	0,06	0,04	0,96	28,58	-2,06	0,95	-0,6
4	487	0,06	0,04	0,97	28,58	-2,3	1,44	-0,83
4	491	0,03	0,03	0,97	28,48	-2,45	1,68	-0,76

4	495	0,01	0,01	0,99	28,58	-2,41	1,79	-0,5
4	499	-0,03	-0,02	1,02	28,58	-2,21	1,77	-0,39
4	503	-0,06	-0,07	1,04	28,48	-2,18	1,37	-0,73
4	507	-0,06	-0,07	1,04	28,53	-2,06	1,15	-1,03
4	511	-0,07	-0,03	1,03	28,48	-1,66	0,98	-1,08
4	515	-0,05	0,02	1,03	28,58	-1,75	0,63	-1,08
4	519	-0,03	0,03	1	28,58	-1,72	0,51	-0,77
4	523	-0,01	0,03	1,01	28,48	-1,92	0,37	-0,75
4	527	0,01	0,02	1	28,58	-1,93	0,49	-0,79
4	531	0,04	0,03	0,98	28,48	-2,11	0,53	-0,9
4	535	0,05	0,05	0,96	28,62	-2,34	0,76	-0,55
4	539	0,06	0,03	0,95	28,44	-2,38	1,47	-0,58
4	543	0,04	0	0,97	28,58	-2,48	1,52	-0,4
4	547	0,02	-0,03	1	28,48	-2,38	1,45	-0,63
4	551	-0,01	-0,05	1	28,48	-2,25	1,62	-0,93
4	555	-0,04	-0,04	1,02	28,53	-1,96	1,56	-0,97
4	559	-0,06	-0,03	1,03	28,48	-1,88	1,26	-0,95
4	563	-0,07	-0,01	1,03	28,58	-1,89	1,01	-0,87
4	567	-0,07	0,03	1,02	28,53	-1,95	0,55	-1,11
4	571	-0,04	0,03	1,02	28,62	-2,03	0,4	-0,89
4	575	-0,02	0,03	1,01	28,53	-2,13	0,31	-0,75
4	579	0,02	0,01	0,98	28,53	-2,31	0,59	-0,75
4	583	0,03	0	0,95	28,39	-2,33	0,48	-0,88
4	587	0,05	0	0,96	28,58	-2,32	1,17	-0,68
4	591	0,04	-0,01	0,98	28,58	-2,31	1,09	-0,69
4	595	0,04	-0,02	0,98	28,53	-2,27	1,32	-0,82
4	599	0,01	-0,03	0,99	28,53	-2,07	1,47	-0,69
4	603	0	-0,05	1	28,53	-1,89	1,59	-0,66
4	607	-0,03	-0,03	1	28,39	-1,69	1,71	-0,85
4	611	-0,05	0	1,02	28,48	-1,89	1,05	-0,71
4	615	-0,07	0,03	1,03	28,58	-1,92	0,95	-0,96
4	619	-0,06	0,03	1,04	28,48	-2,01	0,82	-0,67
4	623	-0,04	0,02	1,03	28,48	-1,89	0,4	-0,96
4	627	-0,01	0,02	1	28,48	-2,35	0,21	-0,96
4	631	0,02	0,01	1	28,58	-2,21	0,68	-0,69
4	635	0,03	0	0,96	28,53	-2,31	0,73	-0,77
4	639	0,05	-0,01	0,96	28,58	-2,34	0,97	-0,73
4	643	0,04	-0,04	0,97	28,53	-2,02	1,24	-0,66
4	647	0,03	-0,03	0,98	28,53	-2,05	1,48	-0,78
4	651	0,01	-0,02	1	28,53	-1,95	1,64	-0,82
4	655	-0,01	0	1,01	28,53	-1,67	1,54	-0,9
4	659	-0,04	0,01	1,03	28,58	-1,96	1,53	-0,94
4	663	-0,06	0,02	1,05	28,48	-1,96	1,24	-0,84

4	667	-0,06	0,02	1,03	28,48	-2,01	0,89	-0,87
4	671	-0,05	0,02	1,04	28,58	-2,05	0,76	-0,96
4	675	-0,03	0,02	1,01	28,48	-2,31	0,74	-0,89
4	679	-0,01	0,01	0,99	28,48	-2,28	0,27	-0,68
4	683	0,01	0	0,99	28,48	-2,21	0,8	-0,7
4	687	0,03	-0,03	0,99	28,48	-2,16	0,63	-0,5
4	691	0,03	-0,05	0,98	28,48	-2,09	1,02	-0,63
4	695	0,04	-0,02	0,96	28,58	-1,97	1,15	-0,89
4	699	0,03	0	0,98	28,58	-1,88	1,39	-0,83
4	703	0,01	0,04	0,99	28,62	-1,89	1,36	-0,95
4	707	-0,01	0,03	1	28,58	-2,09	1,48	-0,41
4	711	-0,03	0	1,03	28,48	-2,22	1,4	-0,77
4	715	-0,05	-0,01	1,03	28,58	-2,3	1,3	-0,77
4	719	-0,06	0	1,03	28,53	-1,97	0,99	-0,82
4	723	-0,04	0	1,03	28,58	-2,18	0,74	-0,89
4	727	-0,03	0,02	1,03	28,44	-2,06	0,51	-0,87
4	731	-0,02	0	1,01	28,53	-2,18	0,46	-0,77
4	735	0,01	-0,02	1	28,53	-1,89	0,56	-0,98
4	739	0,04	-0,01	0,98	28,44	-2,05	0,56	-0,89
4	743	0,03	-0,01	0,97	28,48	-2,15	0,94	-0,67
4	747	0,04	0,01	0,97	28,48	-1,92	1	-0,94
4	751	0,03	0,01	0,99	28,62	-2,06	0,98	-0,65
4	755	0	0,01	1	28,58	-2,18	1,29	-0,79
4	759	-0,01	0	1,01	28,58	-1,96	1,49	-0,74
4	763	-0,03	-0,02	1,01	28,48	-2,01	1,51	-0,79
4	767	-0,04	0,01	1,02	28,58	-2,18	1,22	-0,99
4	771	-0,05	0,02	1,03	28,58	-2,06	0,92	-0,85
4	775	-0,05	0,02	1,02	28,48	-2,18	0,76	-0,82
4	779	-0,04	-0,01	1,02	28,58	-2,21	0,69	-0,6
4	783	-0,01	-0,03	1	28,53	-2,12	0,63	-0,56
4	787	0,01	-0,04	0,98	28,58	-2,09	0,53	-1,21
4	791	0,02	-0,02	0,99	28,58	-1,96	0,84	-0,95
4	795	0,03	0,02	0,99	28,48	-1,85	0,89	-1,01
4	799	0,03	0,03	0,97	28,53	-2,1	1,21	-0,68
4	803	0,02	0,01	0,98	28,53	-2,08	1,14	-0,82
3	806	0,01	-0,01	0,98	28,48	-2,14	1,54	-0,77
4	810	-0,01	0	1	28,58	-2,27	1,35	-1,03
5	815	-0,03	0,02	1,01	28,53	-2,11	1,48	-1,08
4	819	-0,04	0,03	1,02	28,53	-2,11	1,14	-0,7
4	823	-0,04	0,01	1,03	28,53	-2,27	1,04	-0,76
4	827	-0,04	-0,02	1,02	28,62	-2,15	0,92	-0,71
4	831	-0,03	-0,02	1,02	28,48	-2,15	0,95	-0,77
4	835	-0,01	-0,01	1	28,48	-2,09	0,73	-0,99

4	839	0	0	0,99	28,53	-2,17	0,81	-0,89
4	843	0,01	0,02	0,99	28,53	-1,89	0,71	-0,88
4	847	0,01	0	0,98	28,53	-1,85	0,9	-0,76
4	851	0,02	-0,01	0,98	28,58	-2,19	0,95	-0,66
4	855	0,02	-0,01	0,97	28,48	-2,16	1,25	-0,85
4	859	0	-0,01	0,99	28,48	-2,05	1,34	-0,86
4	863	-0,02	0,01	1,01	28,58	-2,18	1,22	-0,94
4	867	-0,02	0	1,02	28,48	-2,15	1,14	-0,81
3	870	-0,03	0	1,01	28,48	-2,23	1,22	-0,73
5	875	-0,03	-0,01	1,01	28,53	-2,25	1	-0,83
4	879	-0,04	-0,02	1,01	28,48	-2,03	0,98	-0,89
4	883	-0,02	-0,01	1,01	28,58	-2,02	0,76	-0,69
4	887	-0,02	0	1,01	28,62	-1,95	0,67	-1,08
4	891	0	0,01	0,99	28,48	-1,96	0,71	-0,61
4	895	0,01	0,01	0,99	28,44	-2,01	0,95	-0,64
4	899	0,02	0	0,98	28,53	-2,1	0,98	-0,82
4	903	0,03	0	0,99	28,44	-1,96	1	-0,84
4	907	0,03	0,01	0,98	28,53	-1,97	1,08	-0,89
4	911	0,01	0,02	0,99	28,58	-2,27	1,18	-0,6
3	914	0	0,01	1	28,53	-1,97	1,25	-0,66
4	918	-0,01	-0,01	1,01	28,53	-2,06	1,13	-0,53
5	923	-0,02	-0,03	1,01	28,58	-2,15	1,03	-0,7
4	927	-0,03	-0,02	1,01	28,53	-1,89	1,23	-0,87
4	931	-0,04	0	1,02	28,48	-1,95	0,99	-0,62
4	935	-0,02	0,01	1,02	28,48	-1,89	0,85	-0,69
4	939	-0,02	0	1	28,58	-2,16	0,69	-0,73
4	943	0	-0,01	1	28,58	-1,89	0,75	-0,89
4	947	0,01	-0,01	0,99	28,44	-1,95	0,81	-0,99
4	951	0,02	0,01	0,97	28,48	-1,98	1,03	-0,92
4	955	0,02	0,02	0,99	28,48	-2,22	1,07	-0,79
4	959	0,01	0,02	1	28,53	-2,08	1,08	-0,74
3	962	0	0	1,01	28,58	-2,26	1,15	-0,47
4	966	-0,01	-0,02	1	28,48	-2,08	1,27	-0,7
4	970	-0,02	-0,01	1	28,53	-1,86	1,27	-0,93
5	975	-0,03	0	1,02	28,53	-2,17	1	-0,84
4	979	-0,03	0,02	1,02	28,53	-1,91	1,09	-0,73
3	982	-0,03	0,02	1,01	28,53	-2,23	0,9	-0,69
4	986	-0,03	0	1,01	28,53	-2,15	0,69	-0,54
5	991	-0,01	-0,03	1	28,53	-2,13	0,97	-0,97
4	995	0	-0,01	0,99	28,48	-1,96	0,77	-0,81
4	999	0,01	0,01	0,99	28,58	-2,11	0,92	-0,85

9.3. Appendice C

```
clear all
close all
clc

x = xlsread('prova_1.xlsx');

t = x(:,2);                          % asse tempi
last_t = x(length(t),2);             % ultimo valore del tempo

Ax = x(:,3);                         % accelerazione Ax
Gx = x(:,7);                         % giroscopio Gx

t1 = linspace(0,last_t,1000);        % asse dei tempi

Ax1 = spline(t,Ax,t1);
Gx1 = spline(t,Gx,t1);

figure(1)
plot(t,Ax,'r','LineWidth',1.5)       % plot spezzata
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Ax [g]')
grid on
title('Ax-time')
legend('Broken line')

figure(2)
plot(t,Gx,'r','LineWidth',1.5)       % plot spezzata
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Gx [°/s]')
grid on
title('Gx-time')
legend('Broken line')
```

9.4. Appendice D

```
clear all
close all
clc

x = xlsread('prova_1.xlsx');

t = x(:,2);                          % asse tempi
last_t = x(length(t),2);             % ultimo valore del tempo

Ax = x(:,3);                         % accelerazione Ax
Gx = x(:,7);                         % giroscopio Gx

t1 = linspace(0,last_t,1000);        % asse dei tempi

Ax1 = spline(t,Ax,t1);
Gx1 = spline(t,Gx,t1);

figure(1)
plot(t1,Ax1,'k','LineWidth',1.25)          % plot spline
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Ax [g]')
grid on
title('Ax-time')
hold on
plot(t,Ax,'r','LineWidth',1.25)            % plot spezzata
legend('Spline function','Broken line')

figure(2)
plot(t1,Gx1,'k','LineWidth',1.25)          % plot spline
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Gx [°/s]')
grid on
title('Gx-time')
hold on
plot(t,Gx,'r','LineWidth',1.25)            % plot spezzata
legend('Spline function','Broken line')
```

9.5. Appendice E

```
clear all
close all
clc

x = xlsread('prova_1.xlsx');

t = x(:,2);                    % asse tempi
last_t = x(length(t),2);       % ultimo valore del tempo

Ax = x(:,3);                   % accelerazione Ax
Ay = x(:,4);                   % accelerazione Ay
Az = x(:,5);                   % accelerazione Az

Gx = x(:,7);                   % giroscopio Gx
Gy = x(:,8);                   % giroscopio Gy
Gz = x(:,9);                   % giroscopio Gz

t1 = linspace(0,last_t,1000);

Ax1 = spline(t,Ax,t1);
Ay1 = spline(t,Ay,t1);
Az1 = spline(t,Az,t1);

Gx1 = spline(t,Gx,t1);
Gy1 = spline(t,Gy,t1);
Gz1 = spline(t,Gz,t1);

figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(t1,Ax1,'b','LineWidth',2)
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Ax [g]')
grid on
title('Ax-time')
legend('Spline function')

subplot(3,1,2)
plot(t1,Ay1,'k','LineWidth',2)
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Ay [g]')
grid on
title('Ay-time')
legend('Spline function')
```

```
subplot(3,1,3)
plot(t1,Az1,'r','LineWidth',2)
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Az [g]')
grid on
title('Az-time')
legend('Spline function')

figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t1,Gx1,'b','LineWidth',2)
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Gx [°/s]')
grid on
title('Gx-time')
legend('Spline function')

subplot(3,1,2)
plot(t1,Gy1,'k','LineWidth',2)
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Gy [°/s]')
grid on
title('Gy-time')
legend('Spline function')

subplot(3,1,3)
plot(t1,Gz1,'r','LineWidth',2)
xlim([0 last_t])
xlabel('t [ms]')
ylabel('Gz [°/s]')
grid on
title('Gz-time')
legend('Spline function')
```

9.6. Appendice F

```
clear all
close all
clc

x = xlsread('prova_1.xlsx');

Ax = x(:,3);                        % accelerazione Ax
% Ax = Ax-mean(Ax);
Ay = x(:,4);                        % accelerazione Ay
% Ay = Ay-mean(Ay);
Az = x(:,5);                        % accelerazione Az
% Az = Az-mean(Az);

t = 4;                              % tempo di campionamento in ms
freq = 1/t*1000;                    % asse frequenze in Hz
L = length(x);                      % lunghezza vettore temporale
T = (0:L-1)*t;                      % vettore tempo

Y_x = fft(Ax);                      % calcolo fft
Y_y = fft(Ay);                      % calcolo fft
Y_z = fft(Az);                      % calcolo fft

% Calcola lo spettro bilaterale P2. Quindi calcola lo spettro
unilaterale P1 basato su P2 e la lunghezza del segnale con
valore pari a L
% P2 e P1 per i valori di Ax
P2_x = abs(Y_x/L);
P1_x = P2_x(1:L/2+1);
P1_x(2:end-1) = 2*P1_x(2:end-1);

% P2 e P1 per i valori di Ay
P2_y = abs(Y_y/L);
P1_y = P2_y(1:L/2+1);
P1_y(2:end-1) = 2*P1_y(2:end-1);

% P2 e P1 per i valori di Az
P2_z = abs(Y_z/L);
P1_z = P2_z(1:L/2+1);
P1_z(2:end-1) = 2*P1_z(2:end-1);

% Definisce il dominio della frequenza e traccia lo spettro di
ampiezza unilaterale P1
f = freq*(0:(L/2))/L;
```

```
% grafico Ax con metodo MathWorks
figure(1)
plot(f,P1_x,'b','LineWidth',2)
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on

% grafico Ay con metodo MathWorks
figure(2)
plot(f,P1_y,'b','LineWidth',2)
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on

% grafico Az con metodo MathWorks
figure(3)
plot(f,P1_z,'b','LineWidth',2)
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on

% grafico con Ax, Ay e Az
figure(4)
plot(f,P1_x,'b','LineWidth',2)
hold on
plot(f,P1_y,'k','LineWidth',2)
hold on
plot(f,P1_z,'r','LineWidth',2)
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Ax','Ay','Az')

% grafico Ax con altro metodo
figure(5)
stem(P1_x,'.')
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
```

```
ylabel('|Amplitude|')

% grafico Ay con altro metodo
figure(6)
stem(P1_y,'.')
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')

% grafico Az con altro metodo
figure(7)
stem(P1_z,'.')
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')

% grafico Ax, Ay e Az
figure(8)
stem(P1_x,'b.')
hold on
stem(P1_y,'k.')
hold on
stem(P1_z,'r.')
xlim([0 L/2])
title('Fast Fourier Transform')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Ax','Ay','Az')
```

9.7. Appendice G

```
clear all
close all
clc

x1 = xlsread('prova_1.xlsx');
x2 = xlsread('prova_2.xlsx');

Ax1 = x1(:,3);                    % accelerazione Ax
Ax2 = x2(:,3);                    % accelerazione Ax
Ay1 = x1(:,4);                    % accelerazione Ay
Ay2 = x2(:,4);                    % accelerazione Ay
Az1 = x1(:,5);                    % accelerazione Az
Az2 = x2(:,5);                    % accelerazione Az

t1 = 4;                           % tempo di campionamento in ms
t2 = 4;                           % tempo di campionamento in ms
freq1 = 1/t1*1000;                % asse frequenze in Hz
freq2 = 1/t2*1000;                % asse frequenze in Hz
L1 = length(x1);                  % lunghezza vettore temporale
L2 = length(x2);                  % lunghezza vettore temporale
T1 = (0:L1-1)*t1;                 % vettore tempo
T2 = (0:L2-1)*t2;                 % vettore tempo

Y_x1 = fft(Ax1);                  % calcolo fft
Y_x2 = fft(Ax2);                  % calcolo fft
Y_y1 = fft(Ay1);                  % calcolo fft
Y_y2 = fft(Ay2);                  % calcolo fft
Y_z1 = fft(Az1);                  % calcolo fft
Y_z2 = fft(Az2);                  % calcolo fft

% P2 e P1
P2_x1 = abs(Y_x1/L1);
P1_x1 = P2_x1(1:L1/2+1);
P1_x1(2:end-1) = 2*P1_x1(2:end-1);

P2_x2 = abs(Y_x2/L2);
P1_x2 = P2_x2(1:L2/2+1);
P1_x2(2:end-1) = 2*P1_x2(2:end-1);

P2_y1 = abs(Y_y1/L1);
P1_y1 = P2_y1(1:L1/2+1);
P1_y1(2:end-1) = 2*P1_y1(2:end-1);

P2_y2 = abs(Y_y2/L2);
```

```
P1_y2 = P2_y2(1:L2/2+1);
P1_y2(2:end-1) = 2*P1_y2(2:end-1);

P2_z1 = abs(Y_z1/L1);
P1_z1 = P2_z1(1:L1/2+1);
P1_z1(2:end-1) = 2*P1_z1(2:end-1);

P2_z2 = abs(Y_z2/L2);
P1_z2 = P2_z2(1:L2/2+1);
P1_z2(2:end-1) = 2*P1_z2(2:end-1);

% Frequenze
f1 = freq1*(0:(L1/2))/L1;
f2 = freq2*(0:(L2/2))/L2;

% grafico Ax con metodo MathWorks
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(f1,P1_x1,'r','LineWidth',1.5)
xlim([0 L1/2])
hold on
plot(f2,P1_x2,'k','LineWidth',1.5)
xlim([0 L2/2])
title('Ax-frequency')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Mass 1','Mass 2')

% grafico Ay con metodo MathWorks
subplot(3,1,2)
plot(f1,P1_y1,'r','LineWidth',1.5)
xlim([0 L1/2])
hold on
plot(f2,P1_y2,'k','LineWidth',1.5)
xlim([0 L2/2])
title('Ay-frequency')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Mass 1','Mass 2')

% grafico Az con metodo MathWorks
subplot(3,1,3)
plot(f1,P1_z1,'r','LineWidth',1.5)
xlim([0 L1/2])
hold on
```

```
plot(f2,P1_z2,'k','LineWidth',1.5)
xlim([0 L2/2])
title('Az-frequency')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Mass 1','Mass 2')

% grafico Ax con altro metodo
figure(2)
subplot(3,1,1)
stem(P1_x1,'r.')
xlim([0 L1/2])
hold on
stem(P1_x2,'k.')
xlim([0 L2/2])
title('Ax-frequency')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Mass 1','Mass 2')

% grafico Ay con altro metodo
subplot(3,1,2)
stem(P1_y1,'r.')
xlim([0 L1/2])
hold on
stem(P1_y2,'k.')
xlim([0 L2/2])
title('Ay-frequency')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Mass 1','Mass 2')

% grafico Az con altro metodo
subplot(3,1,3)
stem(P1_z1,'r.')
xlim([0 L1/2])
hold on
stem(P1_z2,'k.')
xlim([0 L2/2])
title('Az-frequency')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('|Amplitude|')
grid on
legend('Mass 1','Mass 2')
```

10. Bibliografia

[1] E. Chirone, S. Tornincasa, « Disegno tecnico industriale », Vol. I e II, ed. Il Capitello, Torino, 2011

[2] Simonetto Enrico, « Sviluppo di una piattaforma giroscopica per la misura del ritorno elastico nel processo di deformazione di tubi metallici », *Tesi di laurea magistrale*, capitolo 4.2.1, 2014

[3] Ferracin Andrea, « Acquisizione, ricostruzione ed analisi di dati rotazionali da dispositivo mobile », *Tesi di laurea magistrale*, capitolo 2, 2013

[4] C. Ferraresi, T. Raparelli, « Meccanica applicata », Casa editrice CLUT, 2007

[5] A. Fasana, S. Marchesiello, « Meccanica delle Vibrazioni », Torino: Casa editrice CLUT, 2006

[6] A. Fasana, S. Marchesiello, « Appunti del corso sulle Vibrazioni Meccaniche », Politecnico di Torino, 2018

[7] M. Lacagnina, « Appunti del corso Meccanica Applicata alle Macchine, Vibrazioni Meccaniche », Università degli Studi di Catania, 2015

[8] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, « Fisica Vol. I, Meccanica e Termodinamica », EdiSES, 2000

[9] M. Sorli, « Appunti del corso Meccatronica, Teoria dei segnali, frequenza di campionamento », Politecnico di Torino, 2018

11. Sitografia

[1] http://www.abarth.com/abarth-595

[2] https://www.fiat.it/fiat-500

[3] https://www.fiat.it/500-elettrica

[4] https://www.alfaromeo.it/stelvio

[5] https://www.alfaromeo.it/giulia

[6] https://www.fiat.it/tipo/tipo-berlina-life

[7] https://www.jeep-official.it/compass

[8] https://www.jeep-official.it/renegade

[9] http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx

[10] http://www.dobot.it/prodotti/dobot-magician/

[11] http://www.dobot.it/wp-content/uploads/2018/03/dobot-magician-user-manualV1.2.5.pdf

[12] https://drive.google.com/drive/folders/0B4xvTj1rSIvGdE0yTDNZVEtKZjA

[13] https://it.misumi-ec.com/

[14] https://www.boschrexroth.com/it/it/

[15] https://www.meccania.com/

[16] https://www.cnc-store.eu/

[17] https://it.rs-online.com/web/

[18] https://it.wikipedia.org/wiki/Accelerometro

[19] https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/

[20] https://win.adrirobot.it/datasheet/speciali/pdf/mpu6050.pdf

[21] file:///C:/Program%20Files%20(x86)/Arduino/reference/www.arduino.cc/en/Reference/HomePage.html

[22] http://www.giuseppecaccavale.it/arduino/mpu-6050-gy-521-arduino-tutorial/

[23] http://www.brescianet.com/appunti/Elettronica/Arduino/corso/Esempio_ACCELEROMETRO.htm

[24] https://win.adrirobot.it/sensori/MPU-6050/sensore_MPU-6050.htm

12. Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia, mamma e papà, che mi hanno permesso di poter effettuare questo percorso e mi hanno dato il tempo di portarlo a termine nonostante tutte le difficoltà legate agli studi e alla distanza da casa.

Ringrazio mia sorella e Armando che hanno creduto sempre in me sostenendomi e aiutandomi sempre, soprattutto per i problemi legati al computer.

Ringrazio mio nipote Lorenzo che da quando è nato mi ha dato una gioia immensa che mi mancava da tempo.

Ringrazio le mie nonne che ormai non ci sono più, sapendo che mi hanno aiutato durante gli esami in questi anni. Mi mancano soprattutto i pianti subito dopo l'aver superato un esame.

Ringrazio i miei nonni che non ho mai conosciuto e che avrei voluto tanto conoscere, potendoli rendere orgogliosi di me.

Ringrazio tutti i miei zii, zie, cugini e cugine che mi hanno sostenuto fin dal primo giorno in cui ho intrapreso questo percorso.

Ringrazio Ciccio, l'amico e coinquilino più logorroico che possa avere. Se ho portato a termine questo percorso è anche grazie a te. Alle nostre stupidaggini, giornate e nottate passate insieme.

Ringrazio Simone, un amico da una vita, che mi ha fatto sentire sempre come se fossi a casa.

Ringrazio Marco e Kilian, con i quali non manca mai l'occasione per sentirci e che hanno sempre creduto in me.

Ringrazio Ludovica o anche Mismuki, a detta sua, con la quale è tradizione andare a mangiare il panino da Antonio e ascoltare le nostre canzoni. Un'amicizia che so durerà per sempre.

Ringrazio Valeria che mi ha sempre tenuto compagnia in questi anni a Torino e che c'è e ci sarà sempre per me.

Ringrazio Luca e Francesca, colleghi, anzi amici della triennale di Catania, con i quali non manca mai l'occasione di sentirci e vederci. Siete stati importanti per la mia formazione attuale, grazie alle nostre giornate di "studio frenetico".

Ringrazio Valentina, Carmine, Agnese, Alessandra, Chiara, Giorgia e Leonarda che per vari motivi avete fatto parte del mio percorso universitario rendendolo migliore.

Ringrazio i miei colleghi universitari, senza i quali era impossibile finire questo percorso.

Ringrazio le mie comitive, di Siracusa, Priolo e Torino, con le quali è sempre un piacere vedermi nei periodi di vacanze e di stacco dallo studio giornaliero.

Ringrazio i ragazzi del Collegio Onaosi, con i quali ho passato un anno fantastico e mai passato prima e che hanno sempre creduto in me.

Ringrazio Peppe e Simona, con i quali stiamo passando questa nuova esperienza di convivenza e il degrado aumenta di giorno in giorno.

Infine, ringrazio Teoresi, l'azienda che mi ha permesso di poter realizzare questa tesi e farmi entrare con la mentalità nel mondo del lavoro e le persone con cui ho collaborato, in primis il mio tutor aziendale Alberto Bertone e poi i ragazzi delle "radio".