



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.A. 2022/2023

Sessione di Laurea Ottobre 2023

**Progettazione e prototipazione di un sistema multi-
elica per simulazione di una turbina eolica offshore
galleggiante da 5MW**

Relatore:

Prof. Giovanni Bracco

Dott. Massimo Sirigu

Candidato:

Ugo Brunori

*Ai miei nonni, Ugo e
Cosima, che sono sempre
accanto a me*

Indice

| | |
|--|----|
| 0. Sommario | 1 |
| 1. Introduzione | 2 |
| 2. Banco prova | 6 |
| 2.1. <i>Introduzione al Banco Prova</i> | 6 |
| 2.2. <i>Obbiettivi</i> | 6 |
| 2.3. <i>Configurazione e componenti</i> | 7 |
| 2.3.1. Alimentatore da banco | 8 |
| 2.3.2. ESC (Electronic Speed Control) | 10 |
| 2.3.3. Motore Brushless | 13 |
| 2.3.4. Elica | 15 |
| 2.3.5. NI myRIO-1900 | 16 |
| 2.3.6. Cella di carico | 18 |
| 2.3.7. Amplificatore analogico | 21 |
| 3. Metodologia sperimentale | 23 |
| 3.1. <i>Installazione del setup sperimentale</i> | 23 |
| 3.2. <i>Taratura della cella di carico</i> | 27 |
| 3.3. <i>Controllo dei motori</i> | 29 |
| 3.4. <i>Prove sperimentali</i> | 32 |
| 4. Analisi dei dati | 36 |
| 4.1. <i>Fasi preliminari</i> | 36 |
| 4.2. <i>Prima prova sperimentale</i> | 37 |
| 4.3. <i>Seconda prova sperimentale</i> | 47 |
| 5. Conclusioni finali e lavori futuri | 58 |
| 6. Bibliografia | 62 |
| 7. Ringraziamenti | 63 |

0. Sommario

Il lavoro di tesi si concentra sulla creazione di un sistema HIL per riprodurre i carichi generati dalla turbina sulla piattaforma galleggiante. Questo sistema coinvolge il controllo di quattro motori brushless con relative eliche, che replicano la forza della turbina con un fattore di scala 1:96. I quattro motori brushless sono controllati e monitorati attraverso il software LabVIEW. Utilizzando una cella di carico, è stato possibile raccogliere dati sulla forza generata dai motori, e successivamente questi dati sono stati analizzati per stabilire una correlazione tra i parametri di controllo e la forza generata dai motori stessi. Il risultato delle analisi ha fornito le informazioni necessarie a valutare l'efficacia della configurazione utilizzata e anche delle prestazioni dei motori. Il controllo dei motori mediante LabVIEW è risultato soddisfacente, ma i dati raccolti tramite la cella di carico presentano delle imperfezioni, principalmente dovute alla scarsa precisione del trasduttore e alle vibrazioni generate dai motori stessi. In lavori futuri, si prevede di risolvere questo problema tramite l'utilizzo di una cella di carico più precisa e l'implementazione di un sistema di smorzamento delle vibrazioni dei motori.

1. Introduzione

In questo periodo storico la richiesta di energia pulita e rinnovabile è in costante crescita, l'attenzione verso il riscaldamento globale e la necessità impellente di abbassare drasticamente le emissioni di CO₂ hanno fatto sì che tra le varie fonti di energia rinnovabili quella del settore eolico stia crescendo in modo significativo. “In questo scenario, la ricerca e lo sviluppo giocano un ruolo chiave nel diminuire i costi dell'energia e allo stesso tempo incrementare l'efficienza e l'affidabilità di macchine così complesse” [1].

Le turbine eoliche marine galleggianti o note con l'acronimo FOWT (Floating Offshore Wind Turbine), sono tra le più promettenti e innovative tecnologie nel settore della energia eolica. Al contrario delle tradizionali turbine eoliche offshore, le quali vengono installate su fondali marini poco profondi, le FOWT di nuova generazione riescono a sfruttare venti più intensi e costanti che si possono trovare a una distanza considerevole dalla costa dove la costruzione di fondamenta fisse viene ostacolata dalle alte profondità. “Un contributo estremamente importante allo sviluppo di tale tecnologia lo ha dato il progetto ARCWIND (Adaptation and Implementation of Floating Wind Energy Conversion Technology for the

Atlantic Region), il quale è un progetto fondato dall'Unione Europea con lo scopo di promuovere le energie rinnovabili e l'efficienza energetica" [2].

La condizione di galleggiamento delle FOWT di nuova generazione pone delle sfide ingegneristiche notevoli, data l'influenza contemporanea del vento, delle onde e della dinamica della struttura. Per questo motivo, complessi modelli numerici sono stati realizzati per tenere in considerazione l'effetto simultaneo dei carichi. Il problema della validazione di questi modelli numerici con prototipi in scala ridotta è oggetto di discussione nella letteratura scientifica, in quanto le leggi di scala per l'aerodinamica della turbina (legge di Reynolds) non coincidono con le leggi di scala per l'idrodinamica della piattaforma (legge di Froude), e la realizzazione contemporanea dei due modelli in scala risulta spesso conflittuale.

Per questo motivo, spesso le prove sperimentali si concentrano su un modello fisico, la turbina o la piattaforma galleggiante, e si simula il secondo modello con un sistema Hardware in the Loop (HIL), in cui le forze della turbina o della piattaforma vengono calcolate con un modello numerico e implementate con un servomeccanismo.

In letteratura ci sono numerosi studi che sono stati effettuati al fine di validare i modelli numerici con test sperimentali. Tra questi possiamo

trovare lo studio effettuato dalla National Cheng Kung University di Tainan (Taiwan). In questo studio una piattaforma galleggiante dotata di una turbina eolica NREL 5MW e il suo sistema di ancoraggio è stata testata sia numericamente che sperimentalmente. In breve, il sistema formato da piattaforma, turbina e cavi di ancoraggio viene modellato in e testato numericamente con l'uso del software ANSYS AQWA, successivamente viene creato un setup che riproduce tutto ciò che è stato precedentemente modellato e viene testato sperimentalmente. I risultati dell'esperimento hanno confermato che il modello numerico ha una buona prevedibilità sia per le risposte della piattaforma sia per quelle del sistema di ancoraggio [3].

Un altro studio è quello effettuato dalla University College Cork, dove un dispositivo multi-elica viene utilizzato per emulare simultaneamente diversi carichi aerodinamici nei test di una turbina eolica galleggiante, questo sistema è stato ideato per andare a validare i modelli numerici per turbine galleggianti soggette a moto ondoso. I risultati di questi test però non hanno dato i risultati sperati poiché sono stati influenzati dalle vibrazioni ad alta frequenza generate dalle eliche che girano a una elevata velocità o in modo intermittente [4].

Un ulteriore esempio è l'articolo [5], in cui è stato validato un modello numerico esistente con la creazione di un modello in scala di una piattaforma OC4-DeepWind semisommersibile.

Nell'articolo [6] della University of Ulsan (Core del Sud), viene eseguito un test in vasca di un modello in scala 1:90 di una FOWT da 10 MW, al fine di confrontare i risultati sperimentali con le analisi numeriche effettuate con il software FAST. Anche in questo studio, nella maggior parte dei casi, i risultati dei test in vasca del modello corrispondevano a quelli derivanti dall'analisi numerica.

Lo studio [7] propone un'esperienza ancora più complessa per validare i metodi sperimentali con quelli numerici. In questo articolo viene proposto un metodo sperimentale in cui viene simulato il carico della corrente tramite un approccio Software in the Loop (SIL), a questo sistema si aggiunge un sistema multi-elica per effettuare delle prove combinate di vento/corrente/onde nei test in vasca. L'analisi numerica viene effettuata tramite AQWA e FAST, e alla fine i risultati sperimentali e numerici corrispondono.

2. Banco prova

2.1. Introduzione al Banco Prova

Lo scopo del banco prova è quello di controllare in remoto, tramite un programma LabVIEW, quattro motori brushless con relativi ESC (Electronic Speed Control) attraverso il valore di Duty Cycle per poter riprodurre, attraverso una opportuna legge di scala, la forza del vento a cui è sottoposta una torre di una FOWT (Floating Offshore Wind Turbine) da 5 MW.

2.2. Obiettivi

Con questo banco prova si vuole cercare di trovare una correlazione tra il segnale di input, il Duty Cycle del motore brushless, con il segnale di output, la forza di spinta che il motore genera con l'elica. Nello specifico l'esperienza è stata suddivisa in tre parti: la prima consiste nel trovare i valori del Duty Cycle che permettono di armare il motore e di farlo andare alla massima velocità, questa operazione è stata effettuata in maniera

empirica, di seguito verrà esposto nel dettaglio. Nella seconda parte, avendo trovato i valori estremi del Duty Cycle per ogni motore, viene imposto tramite LabVIEW una variazione di Duty Cycle crescente e decrescente, ovvero dal valore più basso al più alto e successivamente di nuovo al più basso. Nella terza e ultima parte invece, il comando imposto è un segnale a gradino, da zero al duty cycle massimo il tutto per un tempo di 120 secondi al fine di valutare se per lo stesso segnale di input corrisponde la stessa forza oppure vi è un errore di ripetibilità. Una volta concluse tutte le acquisizioni verranno esposti i risultati.

2.3. Configurazione e componenti

Di seguito sono elencati tutti i componenti del banco prova che successivamente saranno trattati nello specifico:

- Alimentatore da banco;
- ESC (Electronic Speed Control) X-Racer Quadrant 25A ESC
BLHeli_32Bit - 2S-6S - Dshot1200 32KHz;
- Motore brushless MAMBA TOKA 1103 10000 KV;
- Elica da 65 mm HQProp T65MMX3 Propeller - 2CW+2CCW;
- NI myRIO-1900;

- Cella di carico da 0-100 g;
- Amplificatore analogico per estensimetri con uscita in tensione FUTEK IAA100.

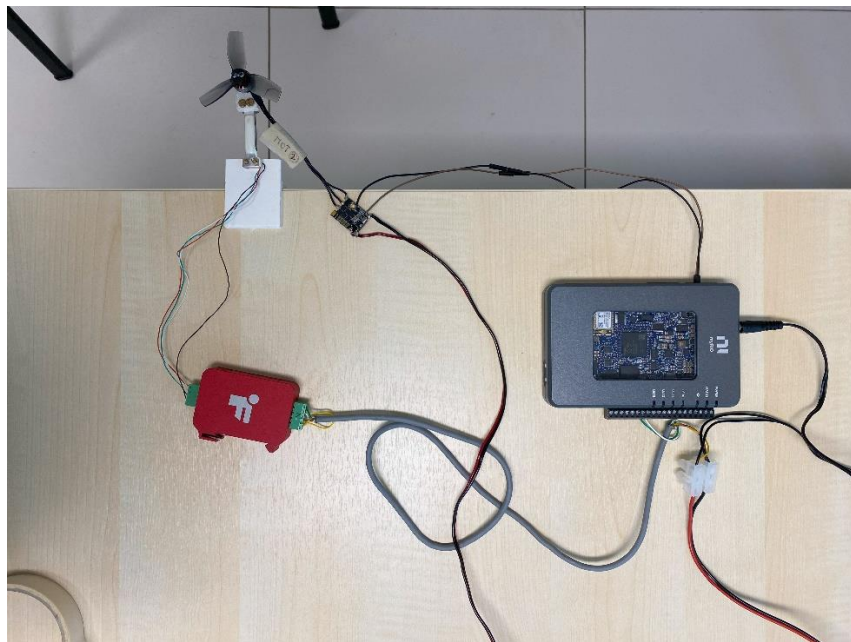


Fig 1. Setup sperimentale

2.3.1. Alimentatore da banco

L'alimentatore da banco in questione è un alimentatore da banco a doppio canale, capace di alimentare due dispositivi esterni contemporaneamente,

dove intensità di corrente e tensione sono regolabili in maniera individuale. Nello specifico la tensione massima erogabile è di 30 V mentre per l'intensità di corrente massima erogabile è di 3 A. L'alimentatore è stato settato, con l'ausilio dei potenziometri predisposti, al fine di fornire una tensione costante di 8 V per quanto riguarda il motore e invece di 12 V per il dispositivo NI myRIO-1900 e per l'amplificatore analogico FUTEK IAA100. È necessario specificare che tutti i dispositivi sono liberi di assorbire l'intensità di corrente che richiedono fino a un massimo di 3 A, valore massimo erogabile dall'alimentatore da banco, di fatti durante le prove effettuate nel momento in cui il motore e quindi anche l'ESC necessitavano di una corrente superiore ai 3 A, questa rimaneva fissa sul valore massimo andando ad abbassare il valore di tensione erogato dall'alimentatore.



Fig 2. Alimentatore da banco

2.3.2. ESC (Electronic Speed Control)

Un Electronic Speed Control, in italiano “controllore elettronico di velocità”, è un dispositivo elettronico utilizzato principalmente nei quadricotteri radiocomandati per controllare la velocità dei motori. L’ESC funziona regolando la quantità di corrente elettrica che fluisce verso il motore brushless che a sua volta determina la sua velocità di rotazione. Nello specifico della configurazione in esame l’ESC riceve il segnale di controllo dal myRIO, comandato a sua volta da un programma LabVIEW. Il segnale di controllo è il valore di duty cycle imposto dal programma LabVIEW che comunica con il myRIO e quindi con l’ESC. Il controllore elettronico di velocità è collegato tramite i pin 27 e 28 al myRIO, dal pin 27 partirà il segnale PWM di controllo mentre il pin 28 è collegato al GND. Di seguito in **Fig. 3** una rappresentazione esplicativa dei connettori del myRIO.

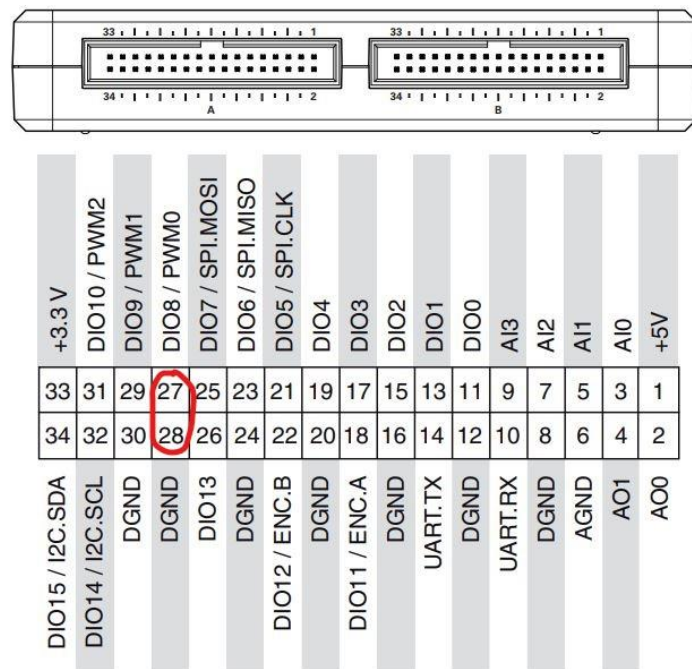


Fig 3. Schema dei segnali primari e secondari sui connettori MXP A e B

Per regolare la velocità del motore, l'ESC utilizza una tecnica chiamata Pulse With Modulation (PWM), in italiano modulazione di larghezza di impulso. Ciò significa che varia la durata degli impulsi elettrici che invia al motore, ovvero se viene inviato, ad esempio, un segnale per cui il PWM è acceso (alto) per il 15% del tempo e spento (basso) per il restante 85% del tempo, il motore andrà al 15% della sua velocità massima. L'ESC è collegato a valle con il motore brushless che deve comandare attraverso tre fili, la cui disposizione determina il senso di rotazione del motore stesso, in senso orario o antiorario.

Il dispositivo scelto è il “X-Racer Quadrant 25A ESC BLHeli_32Bit - 2S-6S - Dshot1200 32KHz”, il quale ha come specifiche tecniche quelle di essere alimentati da 8 a 12 V e riescono ad assorbire una intensità di corrente massima di 25 A.

| | |
|-------------------|--|
| Alimentazione | 2S - 6S |
| Corrente continua | 25A |
| Corrente di picco | 30A / 10sec |
| Firmware | BLHeli 32BIT |
| Supporta | Oneshot 42 / Oneshot 125 / Multishot DShot 1200 32KHz / 600 / 300 / 150 |
| CHIP | ARM32bit MCU 48MHz |
| Dimensioni | 24 * 18 * 3,5 mm |
| Peso | 3g |

Fig 4. Scheda tecnica dell'ESC



Fig 5. Electronic Speed Control

2.3.3. Motore Brushless

La scelta del motore elettrico brushless è stata presa dopo opportune considerazioni che di seguito vengono spiegate. La necessità principale è quella di dover riprodurre una forza di spinta totale di 0.8 N tramite l'utilizzo di quattro motori che si devono dunque ripartire tale forza, inoltre è necessario che questi motori abbiano un tempo di risposta molto breve e la capacità di resistere all'uso prolungato. Quindi, viste queste considerazioni la scelta è ricaduta su motori usati nei droni commerciali, i quali rispettano tutte le caratteristiche richieste. In particolare, il motore scelto è il seguente: MAMBA TOKA 1103 10000 KV.



Fig 6. Motore MAMBA TOKA 1103

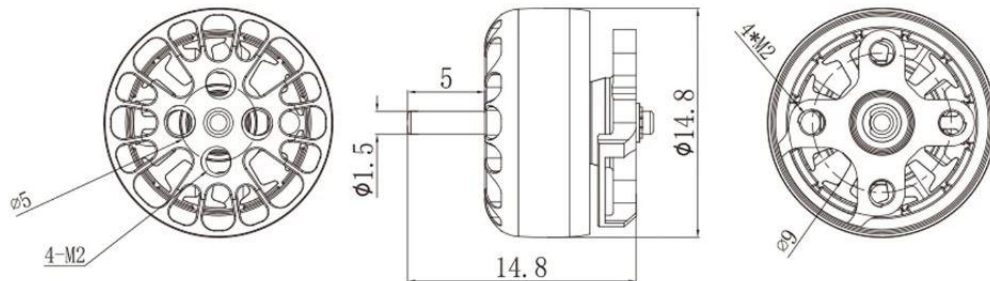


Fig 7. Disegno motore MAMBA TOKA 1103

| 10000KV | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| 性能参数测试数据 | | | | | | |
| TEST DATA | | | | | | |
| 螺旋桨叶 Propeller (inch) | 电压 Voltage (V) | 油门值 Throttle (%) | 电流 Current (A) | 推力 Thrust (G) | 力效 Efficiency (G/W) | 输入功率 Input (W) |
| GF65mm | 8 | 50% | 3.00 | 69.00 | 2.88 | 24.00 |
| | | 60% | 3.60 | 82.00 | 2.85 | 28.80 |
| | | 70% | 4.70 | 95.00 | 2.53 | 37.60 |
| | | 80% | 6.10 | 113.00 | 2.32 | 48.80 |
| | | 90% | 7.60 | 131.00 | 2.15 | 60.80 |
| | | 100% | 8.60 | 145.00 | 2.11 | 68.80 |
| HQ65mm | 8 | 50% | 2.60 | 62.00 | 2.98 | 20.80 |
| | | 60% | 3.60 | 76.00 | 2.64 | 28.80 |
| | | 70% | 4.30 | 92.00 | 2.67 | 34.40 |
| | | 80% | 6.10 | 118.00 | 2.42 | 48.80 |
| | | 90% | 7.00 | 129.00 | 2.30 | 56.00 |
| | | 100% | 7.80 | 140.00 | 2.24 | 62.40 |

Fig 8. Scheda tecnica del motore MAMBA TOKA 1103

Come si può vedere dalla scheda tecnica riportata precedentemente (Fig.8), questo motore alimentato a 8 V e con un'elica HQ65mm riesce a riprodurre al 50% della sua velocità massima una spinta di 69g ovvero

0.61 N; quindi, dalle prove di carico effettuate dalla casa costruttrice rientra nel range di lavoro.

2.3.4. Elica

La scelta dell'elica è ricaduta sul consiglio della casa produttrice del motore MAMBA TOKA 1103, dato che dai datasheets è capace di fornire la spinta necessaria. L'elica in questione è HQProp T65MMX3 Propeller, un'elica trilobata con un diametro di 65 mm.



Fig 9. Eliche HQProp T65MMX3 Propeller

| | |
|--------------|----------------|
| Diametro | 2,5" |
| Pale | 3 |
| Passo | 1,5" |
| Materiale | Poly Carbonate |
| Diametro HUB | 9,8mm |
| Spessore HUB | 5mm |
| Albero | 1,9/1,5/,19mm |
| Peso | 0,8g / Elica |

Fig 10. Scheda tecnica HQProp T65MMX3 Propeller

Dai dati forniti dal costruttore (**Fig.10**) non vi è alcun riferimento al coefficiente di spinta C_t con il quale sarebbero stati fatti degli ulteriori calcoli per verificare la veridicità delle prove di carico effettuate per il motore.

2.3.5. NI myRIO-1900

Il myRIO-1900 è un prodotto di National Instruments, dispositivo specifico nell'acquisizione e controllo dati, il nome sta per "my Reconfigurable Input/Output" ed è progettato per l'automazione e il

controllo di sistemi in tempo reale. Il dispositivo dispone di diverse interfacce I/O che includono ingressi e uscite digitali ma anche analogici, nel caso in esame saranno presi in considerazione solo gli ingressi e le uscite digitali. myRIO è progettato per lavorare con il software LabVIEW, della stessa casa produttrice National Instruments.



Fig 11. NI myRIO-1900

Nel caso in esame il myRIO è usato sia come dispositivo di controllo, per quanto riguarda il motore MAMBA TOKA 1103, sia come dispositivo di acquisizione dati per quanto riguarda la cella di carico. Tramite LabVIEW è stato creato un codice capace di controllare il motore tramite i pin 27 e 28 inviando all'ESC, e quindi al motore, un segnale in PWM.

Contestualmente l'amplificatore analogico FUTEK IAA100, e quindi la cella di carico, è collegata ai connettori 7 e 8 (AI 0+ 0- +/-10V), da questi connettori il myRIO riesce a salvare i dati in Volt in uscita dalla cella di carico. I dati vengono salvati sul dispositivo e poi estrapolati tramite l'utilizzo del software FileZilla. Durante i primi test per le acquisizioni dati, è stato notato, tramite l'interfaccia grafica di LabVIEW, un enorme "rumore" nel grafico della cella di carico. Per ovviare al problema, le alimentazioni del myRIO e dell'amplificatore analogico FUTEK IAA100 sono state collegate alla stessa sorgente, l'alimentatore da banco, e alimentate a 12 Volt, precedentemente il myRIO era collegato tramite il proprio cavo alla rete elettrica, mentre l'amplificatore era alimentato, sempre a 12 V, dall'alimentatore da banco.

2.3.6. Cella di carico

Il sistema multi-elica deve essere capace di fornire una forza di spinta massima di 0.8 N, ed essendo il sistema composto da quattro motori, ogni motore deve garantire una forza di 0.2 N, parlando in termini di massa

20.38 g. Alla luce di queste considerazioni, la scelta è ricaduta su di una cella di carico con un range di lavoro che va da 0 a 100 g.

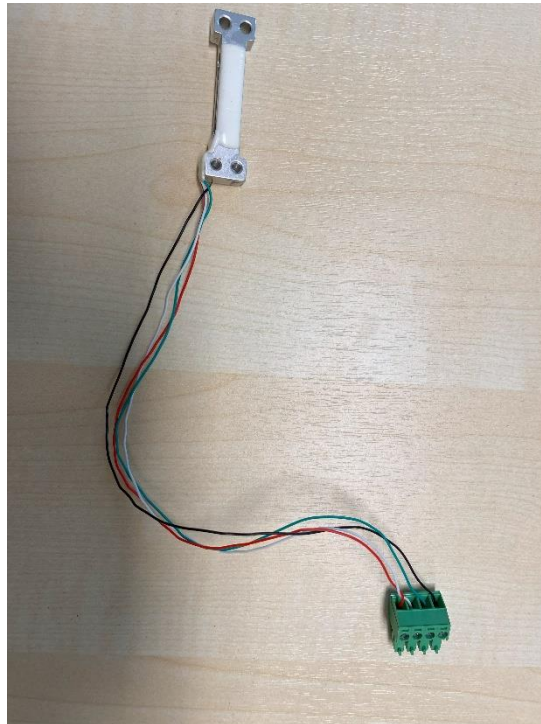


Fig 12. Cella di carico a sbalzo 0-100g

| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| Condizione | 100% nuovo |
| Intervallo limite | 0-100 g |
| Intervallo precisione teorica | 100 g |
| Precisione | 0,020%, 0,010% |
| Errore completo | $\pm 0,03\%$ F.S |
| Impedenza di uscita | 405 ± 6 |
| Impedenza di ingresso | 350 ± 6 |
| Utilizzare la temperatura | - 10 °C a +40 °C |
| Non linearità | 0,02% S |
| Isteresi | 0,02% F.S |
| Tipo di installazione | installazione parallela |
| Sensibilità | $2,0 \pm 0,2$ mv / v |
| Elenco dei pacchetti | 1 * Carica cella |

Fig 13. Scheda tecnica cella di carico

La cella di carico in questione è una cella di carico a sbalzo, una estremità viene fissata a un sistema fisso mentre sull'altra estremità viene montato, tramite un supporto progettato e stampato con l'ausilio di una stampante 3D, il motore brushless. I quattro fili, che si vedono anche nella **Fig.12**, corrispondono rispettivamente: rosso e nero all'alimentazione, il bianco al GND e il verde al segnale digitale. I fili sono collegati direttamente all'amplificatore digitale che è capace quindi sia di fornire l'alimentazione (5 V) alla cella di carico, sia di amplificare il segnale trasformando il segnale in mV della cella in V. In generale una cella di carico, nota anche come trasduttore di forza, converte una forza fisica in un segnale elettrico misurabile. Questo segnale è generalmente il risultato di una variazione di resistenza, il segnale più comune e di tipo "strain gauge". Quest'ultimo consiste in un sottile filo metallico integrato o attaccato alla cella di carico, quando il trasduttore di forza è sottoposto a un carico, il materiale si deforma causando una variazione di resistenza del filo. L'effetto che si ottiene è chiamato effetto piezoresistivo, ciò significa che la resistenza elettrica di alcuni materiali viene modificata se soggetti a uno sforzo di tipo meccanico. La variazione di resistenza elettrica che genera un segnale elettrico viene misurata utilizzando un ponte di Wheastone.

2.3.7. Amplificatore analogico

Come visto nel precedente paragrafo, la cella di carico restituisce un segnale in mV, dunque, serve che questo segnale venga amplificato, questo è lo scopo dell'amplificatore analogico FUTEK IAA100. Nello specifico un amplificatore di segnale ha lo scopo di amplificare e condizionare il segnale elettrico in uscita da estensimetri o da celle di carico. L'amplificatore aumenta quindi l'ampiezza del segnale cosicché sia possibile misurarlo con una precisione maggiore. Il dispositivo riesce anche a filtrare interferenze e rumori indesiderati che sono presenti nell'ambiente di lavoro. Di seguito in **Fig. 14** e **Fig. 15** rispettivamente una foto e la scheda tecnica dell'amplificatore analogico FUTEK IAA100.



Fig 14. Amplificatore analogico FUTEK IAA100

| SPECIFICATIONS | | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|----------|------------|
| PARAMETER | MIN. | TYP. | MAX. | UNIT |
| Power Supply | 16 | | 26 | VDC |
| Current Consumption | | 30 ¹ | 100 | mA |
| Load Impedance | 14000 | | | Ohm |
| Sensor Impedance | 350/75 ⁴ | | 5000 | Ohm |
| Bandwidth (Setting 1) | | 1000 | | Hz |
| Bandwidth (Setting 2) | | 10000 ² | | Hz |
| Bandwidth (Setting 3) | | 25000 ³ | | Hz |
| Common Mode Rejection Ratio | 120 | | | dB |
| Noise | | 10 | | mVp-p |
| Output Span range | -10 | | 10 | % of FSR |
| Output Zero range | -10 | | 10 | % of FSR |
| Gain Drift with Temperature | -25 | | 25 | PPM of FSR |
| Nonlinearity | 0.01 | | 0.01 | % of FSR |
| Zero Drift with Temperature | -25 | | 25 | PPM of FSR |
| Operating Temperature | 32 [0] | | 158 [70] | °F [°C] |
| Storage Temperature | -40 [-40] | | 185 [85] | °F [°C] |
| Relative Humidity | | 95% at 100 [39] | | °F [°C] |

Fig 15. Scheda tecnica FUTEK IAA100

L'amplificatore, nel caso in esame, funge da ponte tra la cella di carico e il myRIO, per eliminare rumori elettrici nelle acquisizioni dati. L'alimentazione dell'amplificatore viene messa in comune con quella del myRIO affinché le masse siano in comune e non ci sia rumore elettrico che disturba il segnale rendendolo molto sporco, considerando anche il fatto che il segnale che viene registrato è molto piccolo e quindi il rumore incide maggiormente rendendo il segnale illeggibile.

3. Metodologia sperimentale

In questa sezione verrà descritto dettagliatamente il processo sperimentale sul banco prova, dall'installazione dei dispositivi all'acquisizione dati passando per la taratura della cella di carico.

3.1. *Installazione del setup sperimentale*

La prima operazione consiste nel collegare ogni motore al proprio ESC, i tre fili che escono dal motore vengono saldati, con una saldatrice a stagno, sulle rispettive collocazioni del controllore, l'ordine con il quale questi vengono saldati determina il verso di rotazione del motore. Vengono saldati anche due cavi predisposti per l'alimentazione, un filo per il positivo e uno per il negativo, fili alla cui estremità hanno una spina a banana adatta per l'alimentatore da banco. Infine, per quanto riguarda i pin del segnale di controllo in PWM e del GND, sono stati usati dei fili, noti come jumper, affinché la connessione con il myRIO sia facilitata. Quest'ultimi sono collegati ai pin 27 e 28 del connettore MXP A del myRIO **Fig.16**.

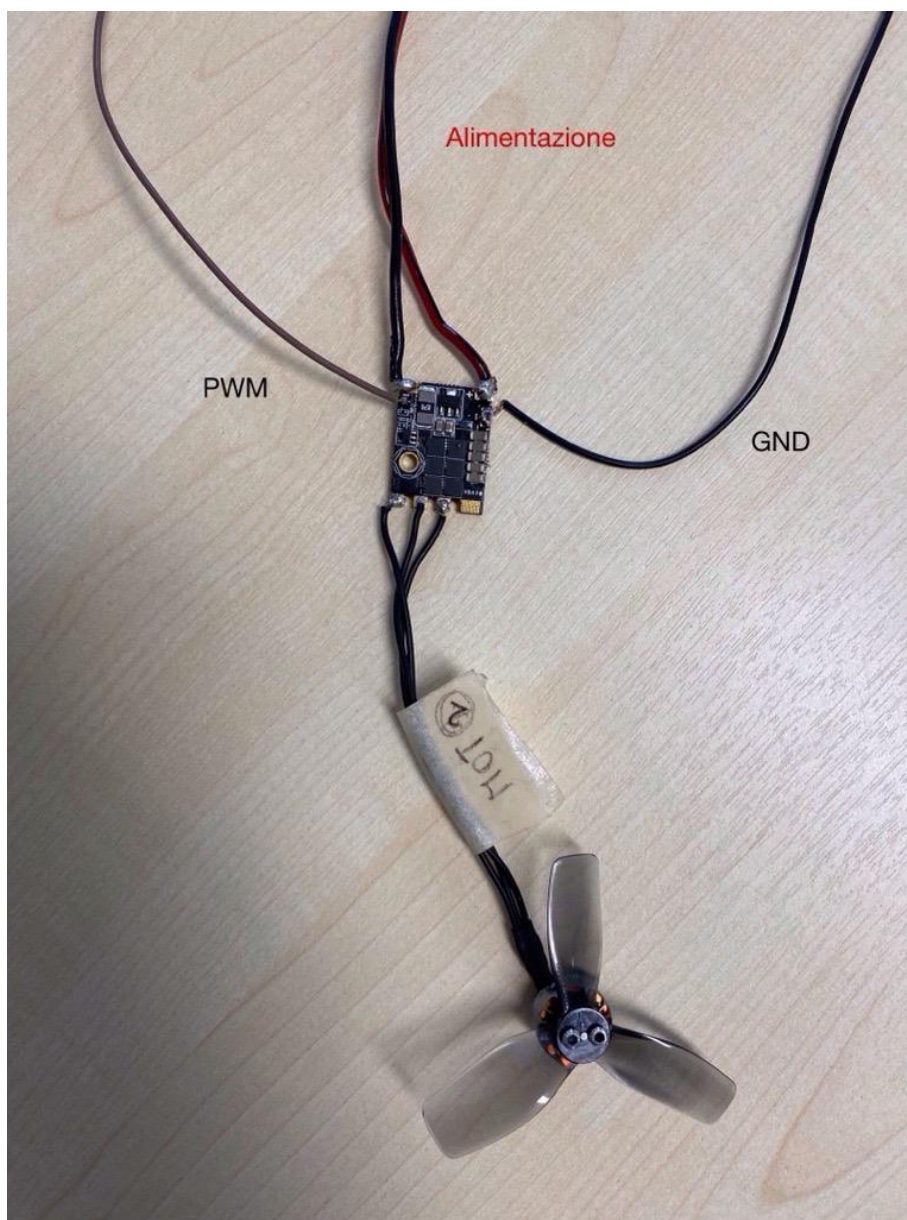


Fig 16. ESC e Motore

Successivamente, la cella di carico viene collegata all'amplificatore, il filo rosso viene inserito nell'ingresso *Ex+*, il filo nero in *Ex-*, il filo bianco in *Signal+* e infine il filo verde al *Signal-*, vedi **Fig.17**. L'amplificatore a sua

volta viene collegato con il myRIO con le seguenti connessioni: il filo verde in uscita dall'amplificatore (dal pin Vout/Iout) connesso con il pin 7 (AI+) del myRIO, mentre il filo blu in uscita dal pin GND dell'amplificatore va connesso al pin 8 (AI-) del myRIO. Gli altri due fili rimanenti di colore rosso e nero sono reputati all'alimentazione che, come detto nel capitolo precedente, viene messa in comune con l'alimentazione del myRIO, grazie all'ausilio di un mammut, vedi **Fig.18**.

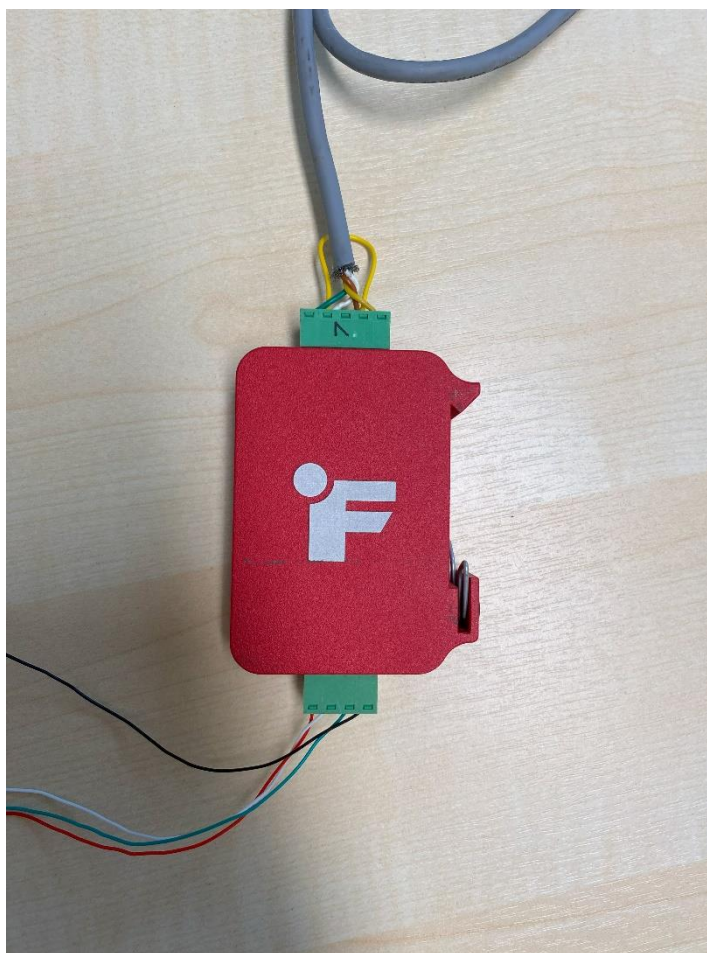


Fig 17. Collegamenti tra amplificatore e cella di carico



Fig 18. Collegamento tra amplificatore e myRIO

Conclusi i collegamenti tra ESC e motore e tra cella di carico e condizionatore, il passo successivo è alimentare il tutto andando a settare i due canali dell'alimentatore da banco. La tensione del canale dedicato all'alimentazione del motore viene impostato sugli 8 V, mentre la tensione del secondo canale a 12 V (**Fig.2**), mentre per i potenziometri dell'intensità di corrente viene impostato al suo massimo valore, ovvero 3 A, questo sarà dunque il valore massimo di corrente erogabile e quindi assorbibile dai dispositivi.

3.2. *Taratura della cella di carico*

La taratura della cella di carico è un passo fondamentale e necessario per lo svolgimento delle prove sperimentali. La taratura consiste nella verifica della precisione e l'accuratezza del sistema di misura, alla fine del processo di taratura si otterrà una correlazione tra massa (in grammi) e valore di tensione registrato dalla cella di carico.

La cella di carico in esame ha un range di misurazione che va dagli 0 ai 100 g; quindi, nello scegliere le masse da usare per la taratura è necessario che non si superi il valore del fondo scala, anche se venisse specificato che può sopportare un sovraccarico, ad esempio, del 20% del fondo scala è meglio non superare il valore del fondo scala affinché la taratura sia più precisa possibile.

Il primo step da effettuare per il processo di taratura consiste nel trovare tre masse la cui somma non superi i 100g, le masse in questione sono state pesate con l'ausilio di una bilancia da laboratorio con una precisione del centesimo di grammo. La pesatura ha dato i seguenti risultati:

- Massa n.1 = 22.00 g;
- Massa n.2 = 23.30 g;
- Massa n.3 = 40.01 g.

Successivamente si legge a schermo, grazie all'utilizzo del software LabVIEW, il valore di tensione registrato dalla cella di carico a vuoto e si salva il valore su di un file Excel. Si posiziona la prima massa, si attende qualche secondo affinché il valore letto a schermo si stabilizzi e poi viene salvato nuovamente, si posiziona la seconda massa sopra la prima e si ripete quanto già fatto, analogo procedimento vale per la terza massa. Quindi, ottenuti i valori di tensione registrati dalla cella di carico, si possono correlare ai valori delle masse tracciandone un grafico.

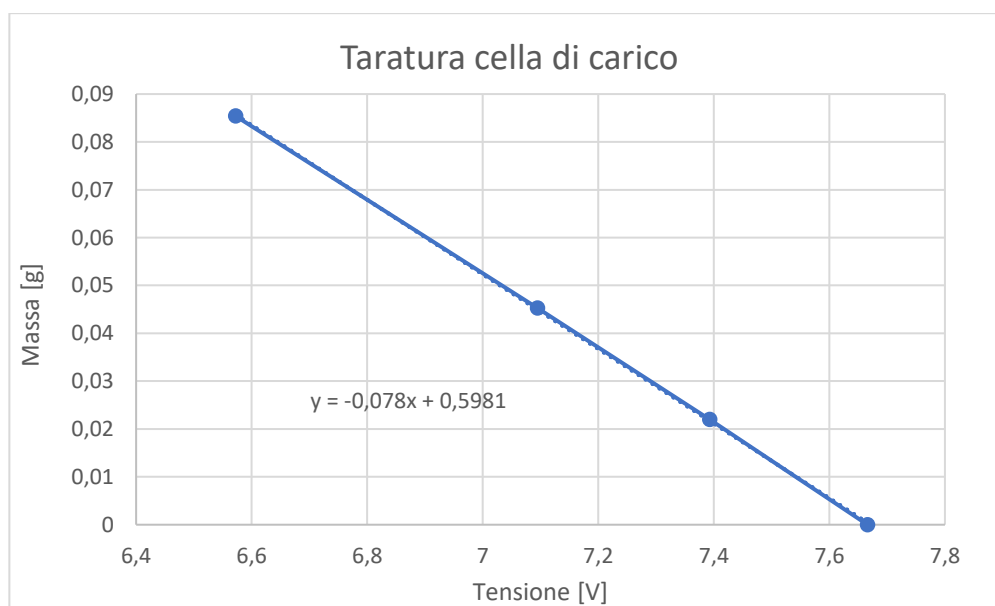


Fig 19. Retta di taratura cella di carico

Dalla **Fig. 19** si evince la correlazione lineare tra segnale in tensione registrato dalla cella di carico e le masse misurate, in particolare:

$$Massa = -0,078 Loadcell + 0,5981$$

Dove:

Massa = valore in kg del carico misurato dalla cella di carico;

Loadcell = valore in tensione in uscita dalla cella di carico e salvato nel myRIO.

La cella di carico attraverso l'amplificatore invia un segnale in volt al myRIO che lo salva in un file di testo, quindi, per poter ragionare prima in termini di massa e poi in termini di forza è necessario che i valori in volt registrati (*Loadcell*) vengano messi nell'equazione precedente e trasformati in dati di massa.

3.3. *Controllo dei motori*

I motori brushless in esame sono collegati a dei controllori elettronici di velocità (ESC), i quali tramite un segnale elettrico in PWM permettono al motore di muoversi a varie velocità. Il segnale elettrico necessario al

controllo del motore viene inviato all'ESC tramite il myRIO con l'ausilio di un codice LabVIEW. Questo codice una volta stabilita la frequenza del PWM (nel caso in esame $f = 100 \text{ Hz}$) e il valore del duty cycle, invia all'ESC un segnale elettrico tale da permettere al motore di girare alla velocità desiderata.

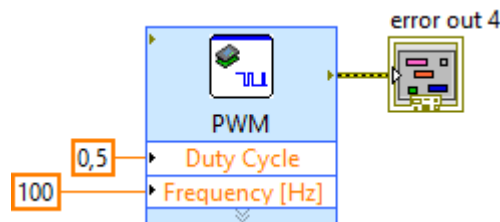


Fig 20. Esempio di blocco LabVIEW per il controllo del motore

I valori estremi del duty cycle che permettono al motore di stare fermo e di andare alla velocità massima non sono noti a priori, di seguito viene spiegata la procedura effettuata per trovare i valori estremi per cui a una frequenza di 100 Hz i motori vanno da zero alla massima velocità.

Una volta collegato il motore, tramite il programma LabVIEW, è stato possibile imporgli un valore di duty cycle grazie al blocco visto precedentemente. Il primo valore di duty cycle assegnato è stato $dc = 0.01$, ma non è stato visto nessun cambiamento; quindi, si è incrementato il valore del duty cycle di 0.01 fino ad arrivare ad un valore di $dc = 0.09$,

e a questo valore il motore inizia a muoversi: questo è il valore per cui si ottiene la velocità minima del motore. L'incremento del duty cycle è continuato, sempre della stessa quantità, e la velocità del motore aumentava fino ad arrivare ad un valore di $dc = 0.131$, in corrispondenza di questo valore la velocità diminuiva e sul display dell'alimentatore da banco si è notato come l'intensità di corrente rimanesse fissa a 3 A mentre la tensione si abbassava. Questo fenomeno, probabilmente, è dovuto dal fatto che l'ESC, e quindi il motore, richiedono più corrente per aumentare la velocità, ma essendo l'alimentatore impossibilitato a fornire più di 3 A per andare in protezione abbassava il valore di tensione.

Alla luce di questo fenomeno, si è deciso quindi di usare come range di duty cycle 0.09 – 0.13, range che permette quindi di andare dalla velocità minima a quella massima. La stessa operazione è stata eseguita sugli altri motori e di seguito viene elencato il range di duty cycle per ogni motore.

- Motore n.1 = 0.09 – 0.13;
- Motore n.2 = 0.1 – 0.125;
- Motore n.3 = 0.1 - 0.131;
- Motore n.4 = 0.1 – 0.129.

Si può notare come i quattro motori non siano completamente uguali, e lo si evince dal fatto che hanno tutti un valore di duty cycle massimo diverso tra loro, fenomeno comunque prevedibile poiché è alquanto improbabile trovare motori e ESC completamente identici tra di loro, ci saranno sempre delle piccole differenze.

Dalla scheda tecnica del motore questo può assorbire un'intensità di corrente fino a 7.8 A, valore che l'alimentatore da banco non può fornire; quindi, è necessario che il range di lavoro e di velocità sia quello visto sopra.

3.4. Prove sperimentali

Per permettere una buona acquisizione di dati da parte della cella di carico è stato necessario progettare un supporto per il motore in modo da poterlo montare sulla cella di carico. Supporto progettato con l'ausilio del software SolidWorks e stampato successivamente in 3D, il materiale scelto è il PLA per mantenere la massa del motore, dell'elica e del supporto al di sotto dei 10 g, così da non eccedere nel range di misura (0-100g) della cella di carico.



Fig 21. Supporto motore per cella di carico

L'obiettivo della prima prova sperimentale è quello di valutare come si comporta il motore ad un incremento e decremento di velocità.

Come già ampiamente spiegato precedentemente, l'incremento e il decremento di velocità per un motore brushless si traduce in un incremento e decremento di valore del duty cycle. Tramite il *Front panel* del programma LabVIEW si impostano i valori di duty cycle massimo e minimo poi anche i valori di incremento, nello specifico si impone un incremento del 1% ogni secondo. Quindi il valore di duty cycle partirà dal valore minimo ed aumenterà del 1% ogni secondo fino ad arrivare al valore massimo per poi diminuire della stessa percentuale sempre ogni secondo per tornare al valore minimo, vedi **Fig.22**.



Fig 22. Front panel per l'impostazione dei parametri

Sono state eseguite dieci acquisizioni tutte memorizzate nel myRIO le quali sono state successivamente estrapolate ed elaborate in Matlab.

Durante le dieci acquisizioni, sia per il primo motore sia per gli altri, non sempre la risposta del motore al comando è stata immediata, nello specifico è capitato che nonostante il valore di duty cycle aumentasse il motore continuava a girare alla velocità minima oppure non girava affatto, e solo dopo una piccola spinta alle eliche il motore tornava a girare come doveva. Questo fenomeno può essere causato da un non perfetto cablaggio oppure dalla bassa qualità dei cavi utilizzati, un'altra opzione potrebbe essere la seguente: i motori MAMBA TOKA 1103 sono motori da droni FPV (First Person View) e quindi progettati specificatamente per essere alimentati con una batteria al litio, con la capacità dunque di assorbire tutta la corrente che vogliono, e con dei potenziometri che ne gestiscono la velocità. Un controllo con un dispositivo come il myRIO potrebbe

comportare dei ritardi nel segnale oppure un segnale elettrico non preciso come può essere quello dei potenziometri. Per ovviare a questi problemi sono state effettuate più acquisizioni del dovuto per mantenerne solo dieci di buona qualità.

Le prove di incremento e decremento del duty cycle sono state effettuate in maniera indipendente su tutti e quattro i motori.

La seconda prova sperimentale a cui sono stati sottoposti tutti e quattro i motori consiste nell'imporre un segnale di input a gradino, il test dura 120s e per i primi 60s il valore di duty cycle rimane uguale al valore minimo per poi assumere il valore massimo. Questa prova ha l'obiettivo di verificare la risposta del motore ad un segnale di input a gradino e di valutare se la forza registrata, dopo il gradino, rimane costante nel lungo periodo, vedi **Fig.23**.

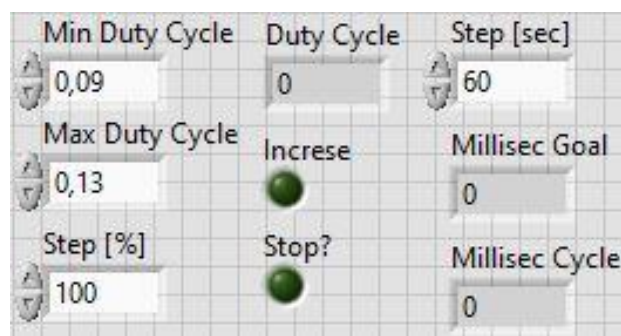


Fig 23. Parametri per segnale di input a gradino

Anche durante queste prove il fenomeno visto nelle acquisizioni precedenti si è presentato nuovamente, dunque sono state effettuate più prove per poter aver cinque acquisizioni pulite per motore.

4. Analisi dei dati

Conclusa la parte riguardante le prove sperimentali e le acquisizioni dati, in questa sezione i segnali di output della cella di carico vengono analizzati e processati con l'utilizzo del software Matlab.

4.1. Fasi preliminari

La cella di carico tramite il dispositivo myRIO salva i dati su quest'ultimo, con l'ausilio del software FileZilla il file di testo, il quale ha al suo interno tutti i dati provenienti dalla cella di carico e i parametri impostati da LabVIEW, viene salvato su una cartella nella stessa directory del file Matlab usato per l'analisi dei dati raccolti.

4.2. *Prima prova sperimentale*

La prima prova sperimentale consiste nel sottoporre il motore ad un incremento e decremento di duty cycle, a partire dal suo valore minimo fino al suo massimo e ritorno.

Come prima cosa viene creato un codice Matlab con l'obbiettivo di salvare e analizzare i dati salvati come file di testo nel myRIO. In una prima parte i dati presenti nel file di testo vengono estrapolati e salvati come vettori, i dati in tensione in uscita dalla cella di carico, attraverso l'equazione caratteristica della cella di carico, vengono trasformati in dati di forza. Riportando su di un grafico il vettore tempo e il vettore Load, ovvero il carico in Newton registrato dalla cella di carico, si ottiene il grafico riportato in **Fig.24**.

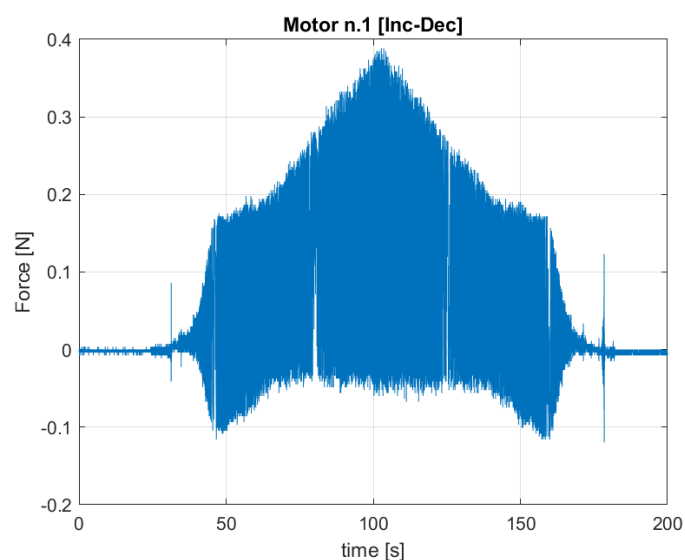


Fig 24. *Segnale originale*

Come si vede dalla **Fig. 24** il segnale derivante dai dati presi dalla cella di carico è inutilizzabile ai fini della tesi, è necessario dunque utilizzare una tecnica che permetta di pulire il segnale ed effettuare successivamente le dovute considerazioni, la tecnica matematica scelta è la trasformata di Fourier.

La trasformata di Fourier è una tecnica matematica che permette di analizzare un segnale nel dominio della frequenza invece che nel dominio del tempo. Il risultato della trasformata di Fourier è uno spettro di frequenza, dove ogni spettro rappresenta quanto di ogni frequenza è presente nel segnale originale. Con le informazioni ottenute dall'analisi del dominio delle frequenze è possibile applicare dei filtri per modificare il segnale, come attenuare o accentuare alcune frequenze specifiche.

Codice Matlab

```
filenames = dir("acq\*_Motor1_IncDec.txt");  
  
for i = 1:10  
  
    % Salvataggio dati  
    table = readtable(filenames(i).name);  
    cycle = table.Cycle_n_; cycle(end) = [];  
    DutyCycle = table.DutyCycle; DutyCycle(end) = [];  
    Loadcell= table.LoadCell_V_; Loadcell(end)= [];  
    maxDC = table.MaxDutyCycle; maxDC(end) = [];  
    minDC = table.MinDutyCycle; minDC(end) = [];  
    step_perc = table.Step___; step_perc(end) = [];  
    step_sec = table.Step_s_; step_sec(end) = [];  
    freq = table.Freq_Hz_; freq(end) = [];  
  
    % Equazione caratteristica della cella di carico
```

```

Load = 9.81*(-0.078*Loadcell+0.5981);
Load = Load-Load(1);

time = cycle/100;

% Funzione per la trasformata di Fourier
res =
FUNC_Signal_FFT_Analysis_nocut(time,Load,0,0,0);

% Segnale filtrato tagliando a una frequenza
specifica
signal_fit = LPfilt(5,1,time,Load);

figure(1)
plot(time,signal_fit)
hold on
grid on
end

ylabel('Force [N]')
xlabel('Time [s]')
legend('1° test', '2° test', '3° test', '4° test', '5°
test', '6° test', '7° test', '8° test', '9° test', '10°
test', 'Location', 'best')
title('Motore 4')

```

Con il codice Matlab riportato precedentemente, la function *FUNC_Signal_FFT_Analysis_nocut* restituisce il grafico della FFT del segnale inserito nel dominio delle frequenze, da questo grafico è possibile stabilire la frequenza di taglio per modificare il segnale. La funzione viene utilizzata per tutte e dieci le acquisizioni di ciascun motore.

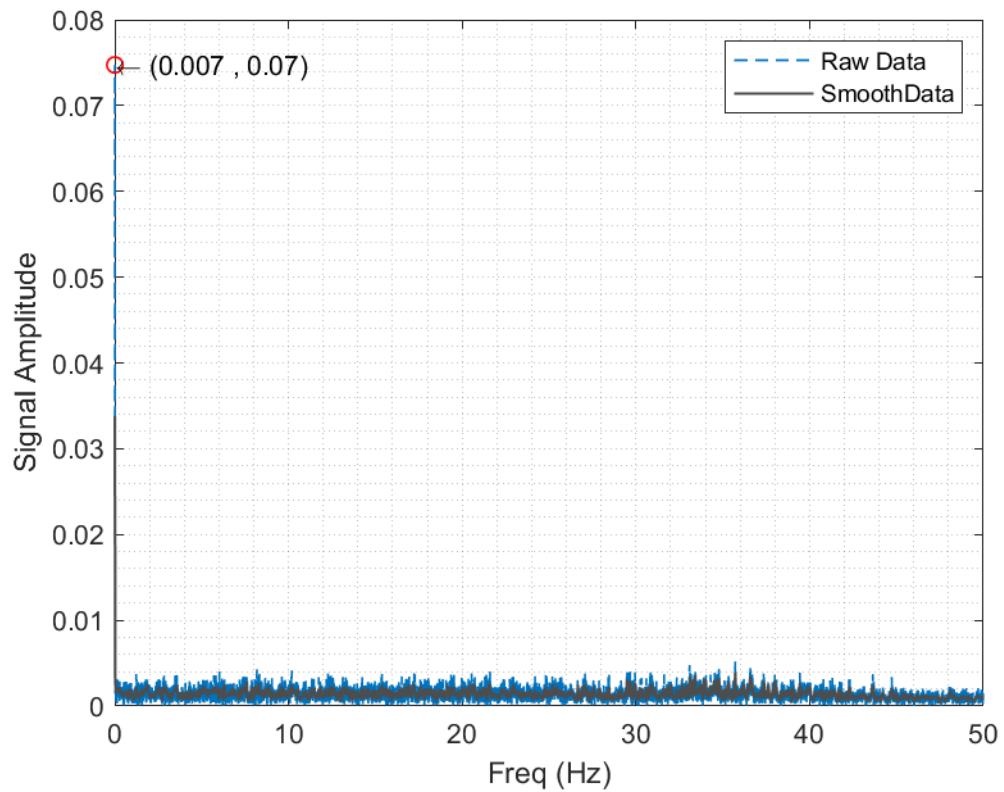


Fig 25. FFT del motore n. 1

In **Fig. 25** viene rappresentata la FFT del motore n.1 sottoposto a un incremento e decremento di duty cycle, da questo si denota che per ottenere un segnale pulito e senza imperfezioni la frequenza di taglio deve essere molto bassa. Usando la function implementata in Matlab *LPfilt*, la quale inserendo il vettore tempi, il segnale originale e la frequenza di taglio desiderata restituisce il segnale filtrato. La prima frequenza di taglio utilizzata è $f_{cutoff} = 1 \text{ Hz}$.

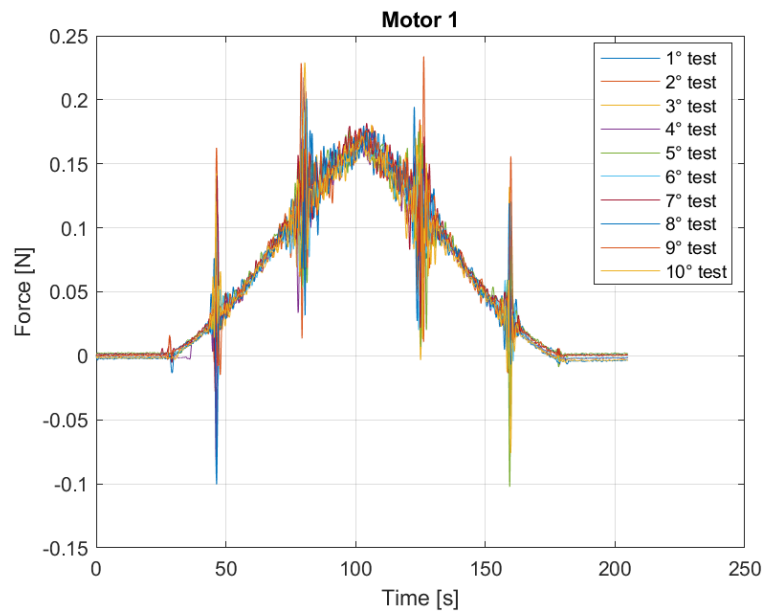


Fig 26. Motore n.1 con frequenza di taglio fissata a 1 Hz

Come si evince dalla **Fig. 26** il segnale presenta ancora molte imperfezioni quindi la frequenza di taglio deve essere ancora più bassa, per cui si è deciso di provare con un valore di frequenza di taglio drastico $f_{cutoff} = 0.1 \text{ Hz}$.

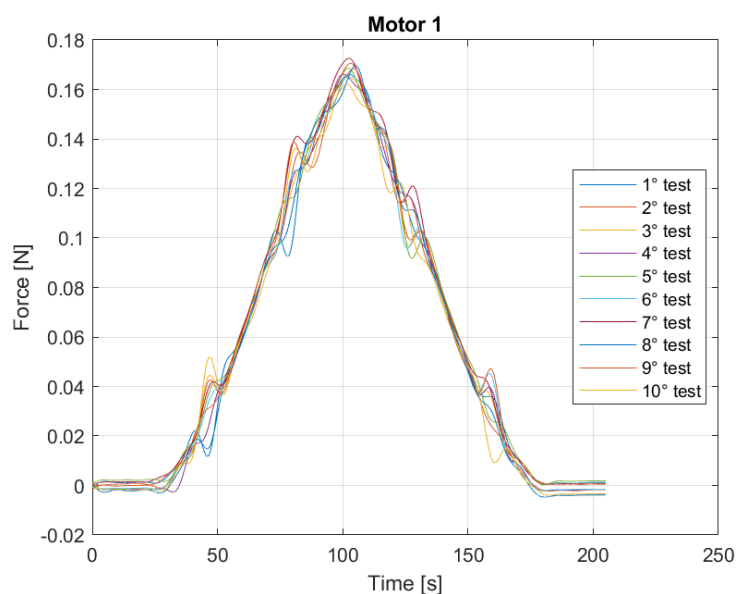


Fig 27. Motore n.1 con frequenza di taglio fissata a 0.1 Hz

Guardando la **Fig. 27** in corrispondenza dei 50s, 70s, 125s e 155s si può notare come siano presenti dei picchi improvvisi e temporanei del segnale, con una frequenza di taglio di 1Hz sono molto più accentuati. Questi picchi improvvisi, in seguito ad una prima analisi, sono probabilmente causati da disturbi elettromagnetici o altre interferenze nel circuito elettrico di alimentazione e controllo dei motori.

Di seguito vengono riportati le FFT e i grafici di forza dei restati motori.

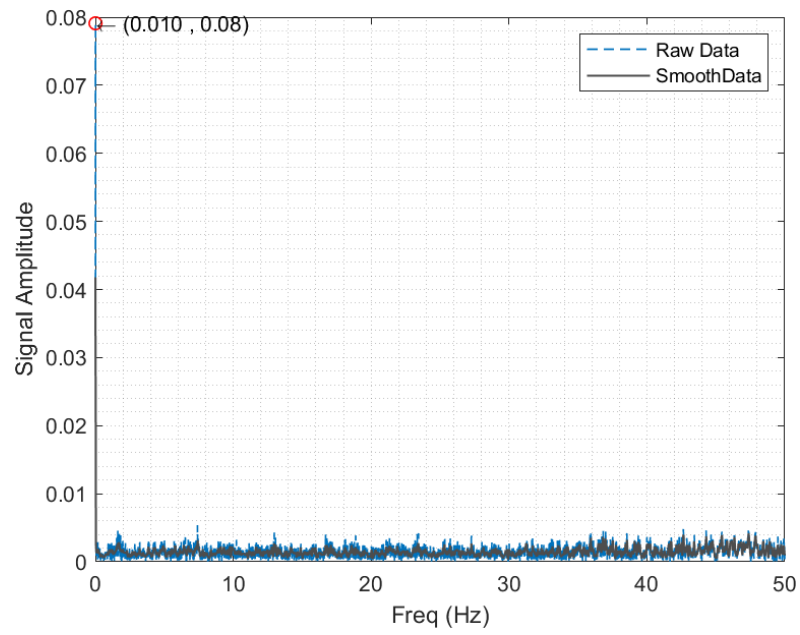


Fig 28. FFT del motore n.2

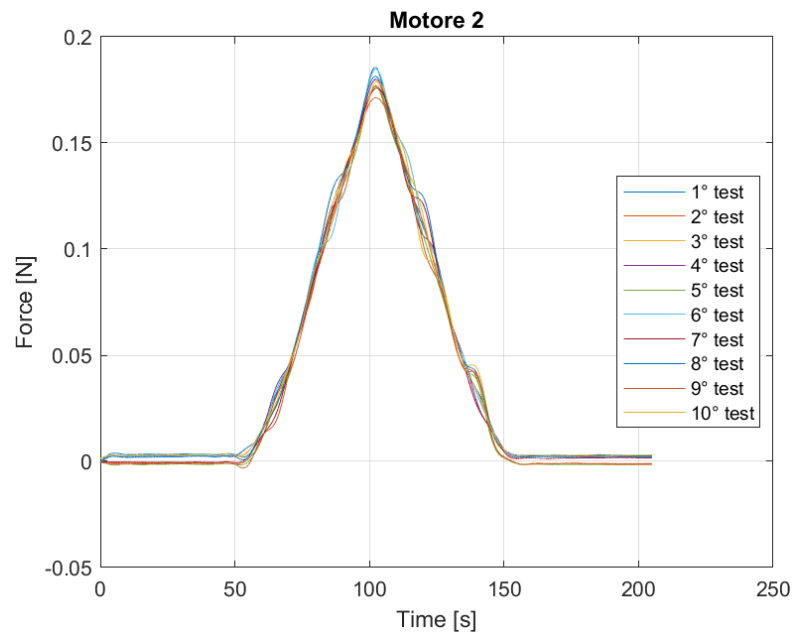


Fig 29. Motore n.2 con frequenza di taglio fissata a 0.1 Hz

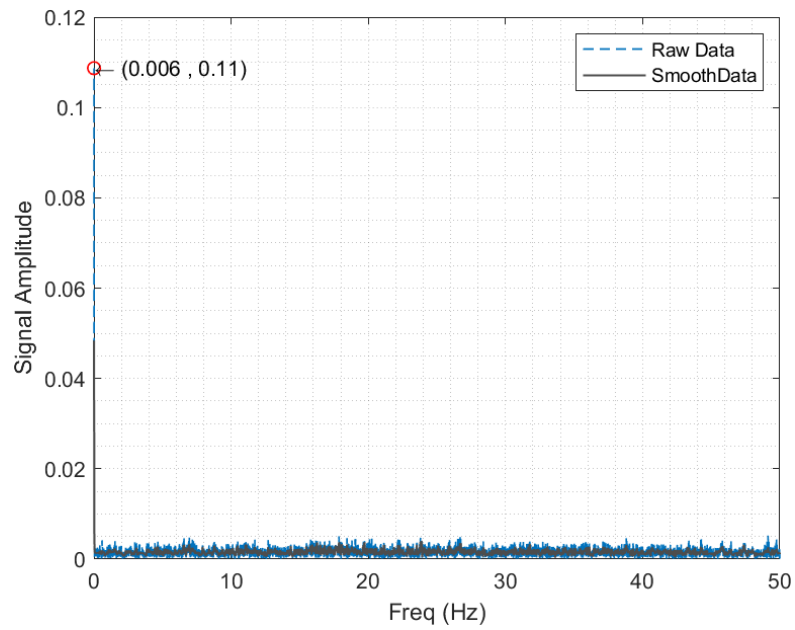


Fig 30. FFT del motore n.3

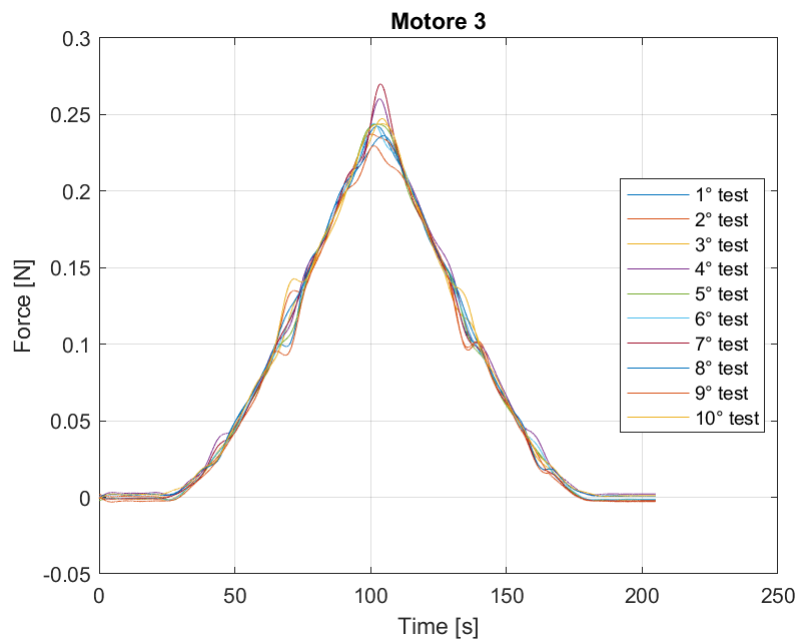


Fig 31. Motore n.3 con frequenza di taglio fissata a 0.1 Hz

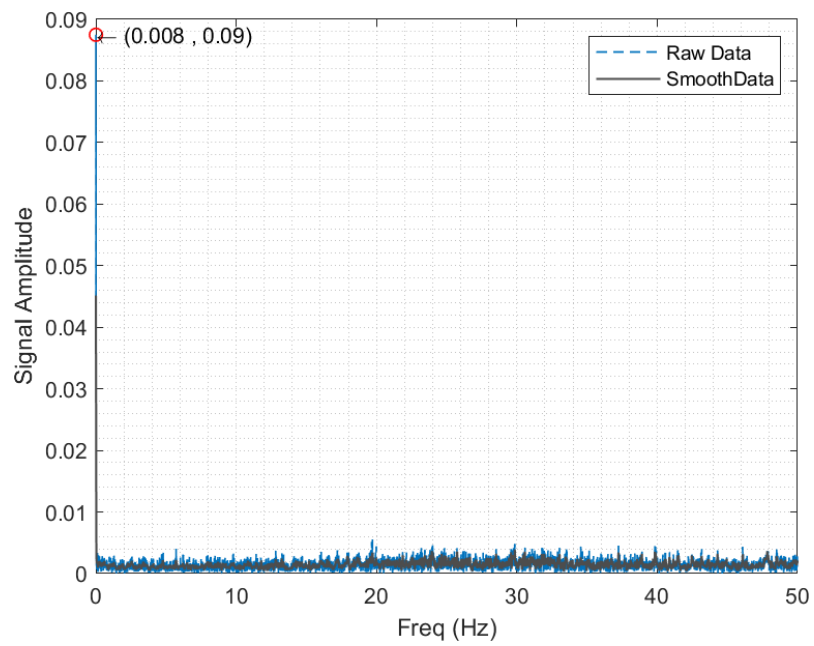


Fig 32. FFT del motore n.4

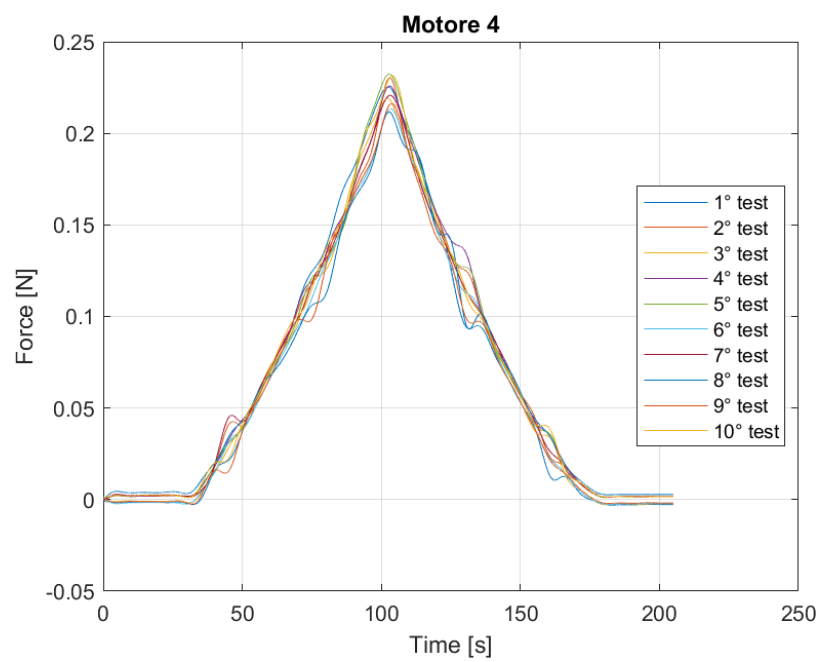


Fig 33. Motore n. 4 con frequenza di taglio fissata a 0.1 Hz

Come risultato di una prima analisi approssimativa, la causa dei picchi di ampiezza potrebbe essere un qualche disturbo elettromagnetico o interferenze nel circuito, ma analizzando i grafici dei restanti motori non tutti presentano li stessi picchi o della stessa intensità. Le prove sperimentali sono state effettuate tutte nelle stesse condizioni e nello stesso ambiente di lavoro; dunque, teoricamente i disturbi elettromagnetici dovrebbero essere gli stessi per tutti e quattro i motori, ma così non è come si può evincere dalle figure precedenti. In particolare, il motore n.2 presenta un grafico con dei picchi con intensità molto bassa, mentre i motori n.3 e n.4 hanno dei picchi simili al motore n.1 seppur di minor intensità. Le interferenze elettriche e i disturbi elettromagnetici causano questi “rumori” ma solo in parte.

Un'altra causa per la presenza di questi picchi potrebbe l'alto numero di vibrazioni a cui è sottoposta la cella di carico. Per come viene fissato il motore alla cella di carico e la cella stessa ad un sistema fisso (vedi **Fig. 34**), non è presente alcun tipo di sistema di smorzamento che possa annullare o limitare le vibrazioni indotte dalle alte velocità del motore, inoltre la cella di carico è assimilabile a una trave a sbalzo, quindi, può agire come un amplificatore delle vibrazioni.

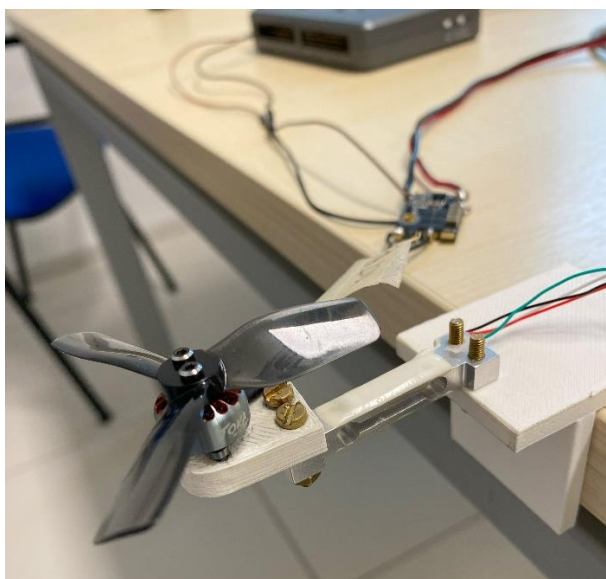


Fig 34. Motore montato sulla cella di carico

4.3. Seconda prova sperimentale

L'obiettivo della seconda prova sperimentale è quello di imporre un segnale a gradino, dove si impone al motore il massimo valore di duty cycle e cosicché possa riprodurre la sua massima forza.

Anche in questo caso, come nella prima prova sperimentale, viene in prima battuta riportato il segnale originale per vedere se si ripresenta lo stesso fenomeno della prima prova, vedi **Fig. 35**.

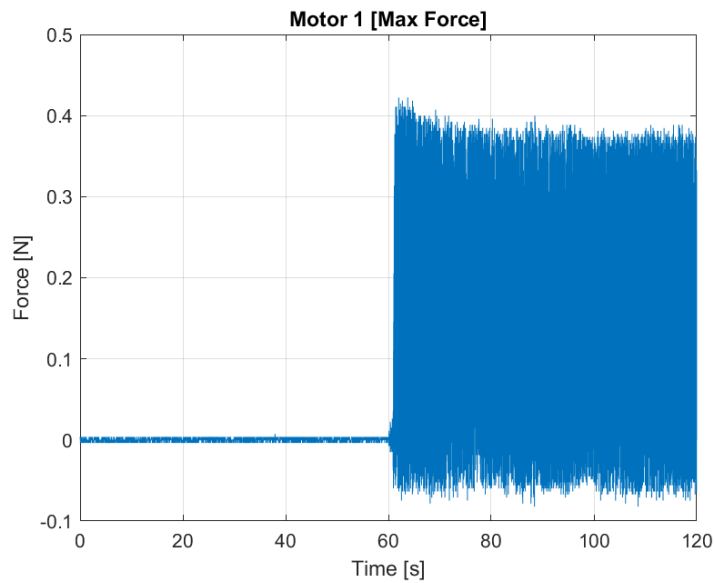


Fig 35. Segnale originale

Il segnale originale, come nel primo caso, presenta delle imperfezioni evidenti che non permettono ulteriori analisi significative; dunque, viene scritto un codice Matlab simile al precedente, il quale usando la trasformata di Fourier aiuta a determinare il valore della frequenza di taglio.

Di seguito viene riportato il codice Matlab.

```
filenames = dir("acq\*_Motor1_MaxForce.txt");

for i = 1:5

    % Salvataggio dati
    table = readtable(filenames(i).name);
    cycle = table.Cycle_n_; cycle(end) = [];
    DutyCycle = table.DutyCycle; DutyCycle(end) = [];
    Loadcell= table.LoadCell_V_; Loadcell(end)= [];
    maxDC = table.MaxDutyCycle; maxDC(end) = [];
    minDC = table.MinDutyCycle; minDC(end) = [];
    step_perc = table.Step___; step_perc(end) = [];
```

```

step_sec = table.Step_s_; step_sec(end) = [];
freq = table.Freq_Hz_; freq(end) = [];

% Equazione caratteristica della cella di carico
Load = 9.81*(-0.078*Loadcell+0.5981);
Load = Load-Load(1);

time = cycle/100;

% Funzione per la trasformata di Fourier
res =
FUNC_Signal_FFT_Analysis_nocut(time(11999/2:end),Load(119
99/2:end),0,0,0);

% Segnale filtrato tagliando a una frequenza
specifica
signal_fit = LPfilt(5,0.1,time,Load);

maxforce (i) = signal_fit(end);

figure(1)
plot(time,signal_fit)
hold on
grid on
end

y = [zeros((length(time))/2,1) ;
mean(maxforce)*ones((length(time))/2,1)];

plot(time,y,'-r','LineWidth',1.15)
xlabel('Time [s]')
ylabel('Force [N]')
legend('1° test','2° test','3° test','4° test','5°
test','Forza Richiesta','Location','best')
title('Motor 1')

```

A differenza del primo codice, i vettori in ingresso alla function *FUNC_Signal_FFT_Analysis_nocut* non sono completi poiché la media deve essere effettuata solo sul secondo tratto ovvero quello in cui il duty

cycle ha il valore massimo. Questo è stato fatto perché la trasformata di Fourier potrebbe dare un risultato sbagliato venendo influenzata dal tratto iniziale in cui il segnale di forza è nullo.

In modo analogo al caso precedente viene riportato la FFT del motore in esame per valutare il valore della frequenza di taglio.

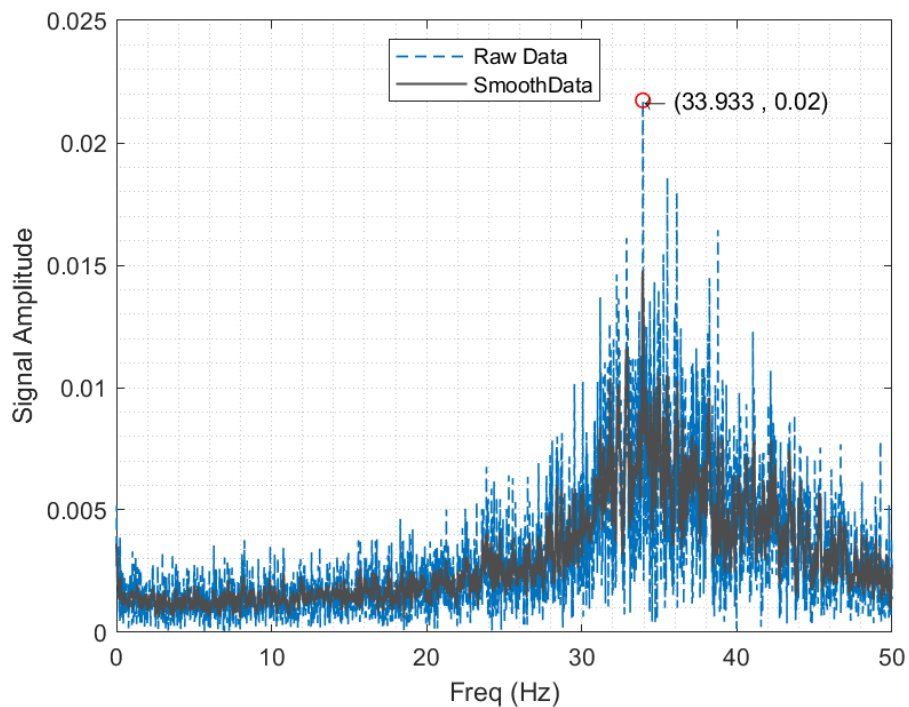


Fig 36. FFT del motore n.1

Come si vede dalla **Fig. 36** vi è una differenza notevole con il primo caso, il picco di ampiezza si ha intorno ai 34 Hz (nel caso precedente il picco di ampiezza si trova intorno a 1 Hz) ma la restante parte del grafico presenta comunque un'ampiezza non elevata ma comunque diversa da zero.

Il primo valore della frequenza di taglio utilizzato è $f_{cutoff} = 10 \text{ Hz}$ il quale porta al seguente risultato.

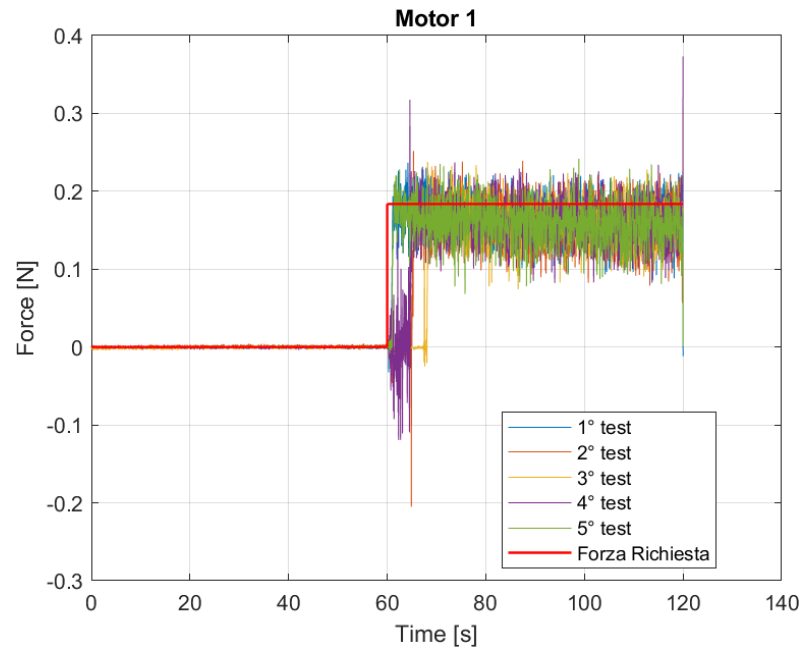


Fig 37. Motore n.1 con frequenza di taglio fissato a 10 Hz

Come si nota dalla **Fig. 37** il valore della frequenza di taglio è troppo alto e non è possibile effettuare delle considerazioni opportune, si prova dunque ad abbassare il valore della frequenza di taglio per effettuare un nuovo tentativo. Il nuovo valore è $f_{cutoff} = 1 \text{ Hz}$.

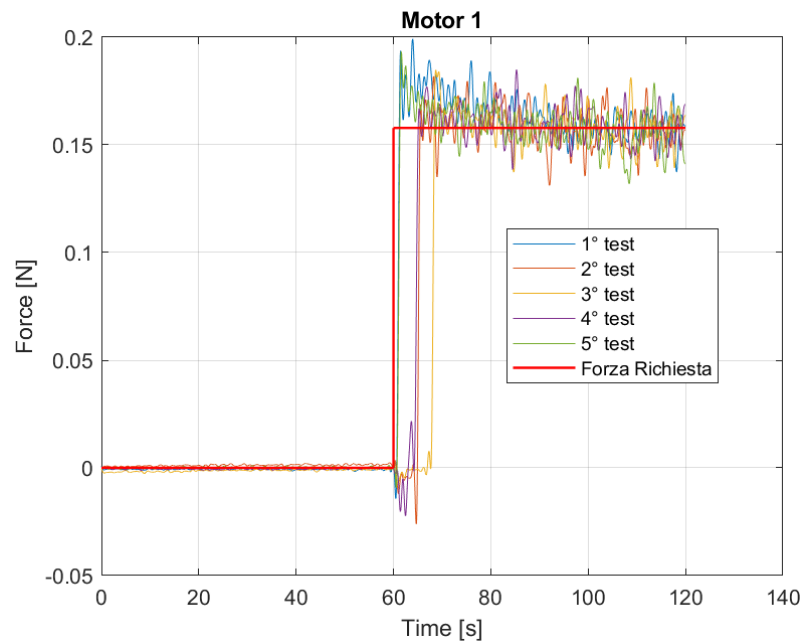


Fig 38. Motore n.1 con frequenza di taglio fissata a 1 Hz

La situazione in questo caso migliora, il comportamento del motore è quello che ci si aspettava, la curva ha un picco all'inizio del gradino e poi si stabilizza sul valore di forza richiesto. Questo andamento si può notare ancora meglio se si abbassa ancora di più il valore della frequenza di taglio a $f_{cutoff} = 0.1 \text{ Hz}$.

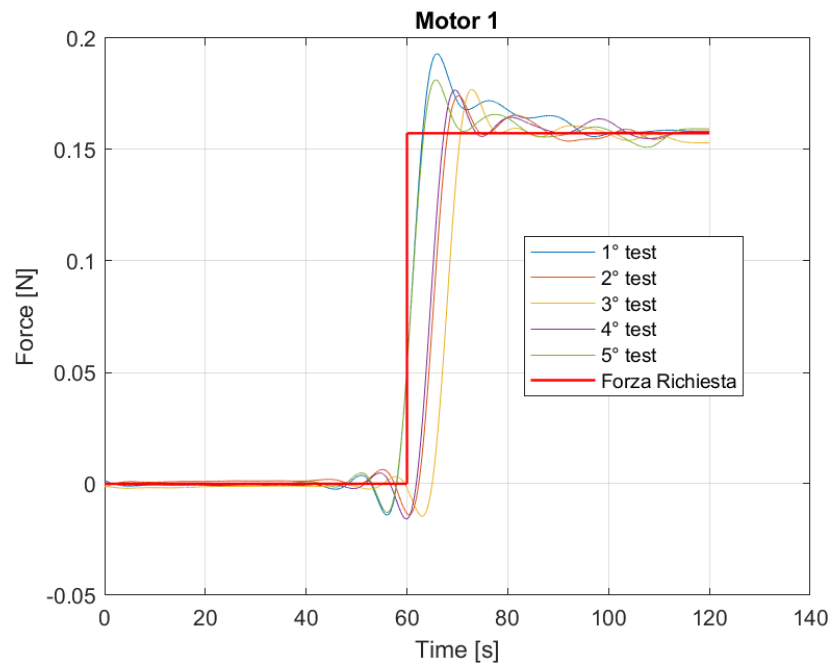


Fig 39. Motore 1 con frequenza di taglio fissata a 1 Hz

Il picco a inizio gradino è più visibile e alla fine la curva segue quasi perfettamente la domanda richiesta. Con questo valore di frequenza di taglio si nota meglio come il secondo, il terzo e il quarto test sono in ritardo rispetto al segnale di comando, sicuramente causato dal fatto che la ricezione del segnale per il motore n.1 non è perfetta. Nonostante questo ritardo il picco è inferiore all'inizio del segnale rispetto al primo test e inoltre l'andamento della curva alla fine del segnale rispecchia quello degli altri test. Un'altra considerazione da fare è la seguente: abbassando a 0.1 Hz il valore della frequenza di taglio la curva anticipa il comando, come si può vedere nell'intorno dei 60s, questo è dovuto sicuramente al fatto che si eliminano troppe frequenze utilizzando un valore di frequenza di

taglio così basso e quindi la function utilizzata compensa questo fenomeno anticipando il segnale. La figura precedente viene utilizzata per far notare con maggior visibilità il picco all'inizio del gradino e l'andamento finale, questo comportamento vale anche per i restanti motori.

Il miglior valore per la frequenza di taglio è dunque $f_{cutoff} = 1 \text{ Hz}$, per questo valore il grafico è più leggibile e si notano le caratteristiche principali.

Di seguito vengono riportati le FFT e i grafici dei restanti motori.

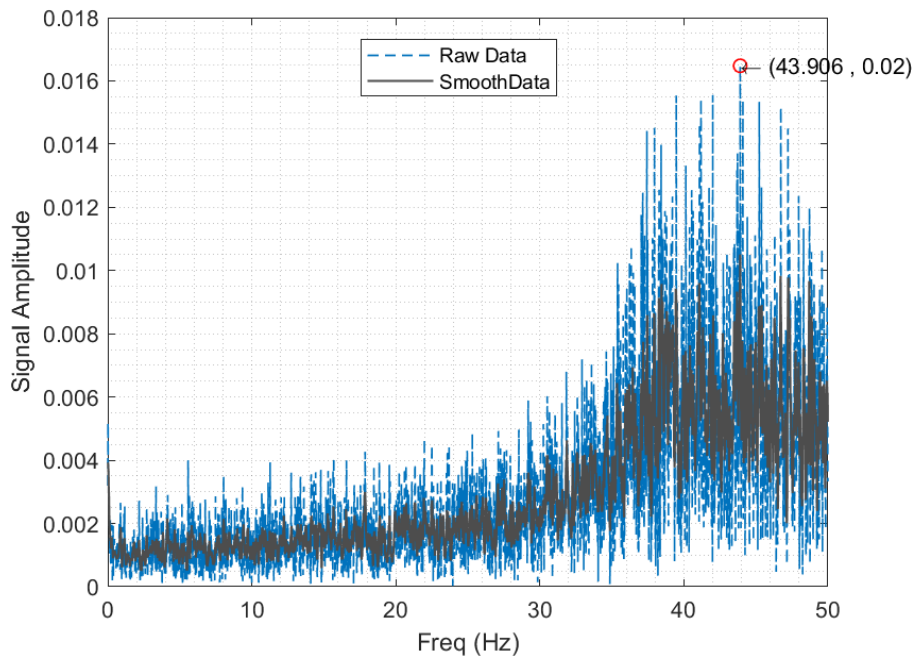


Fig 40. FFT del motore n.2

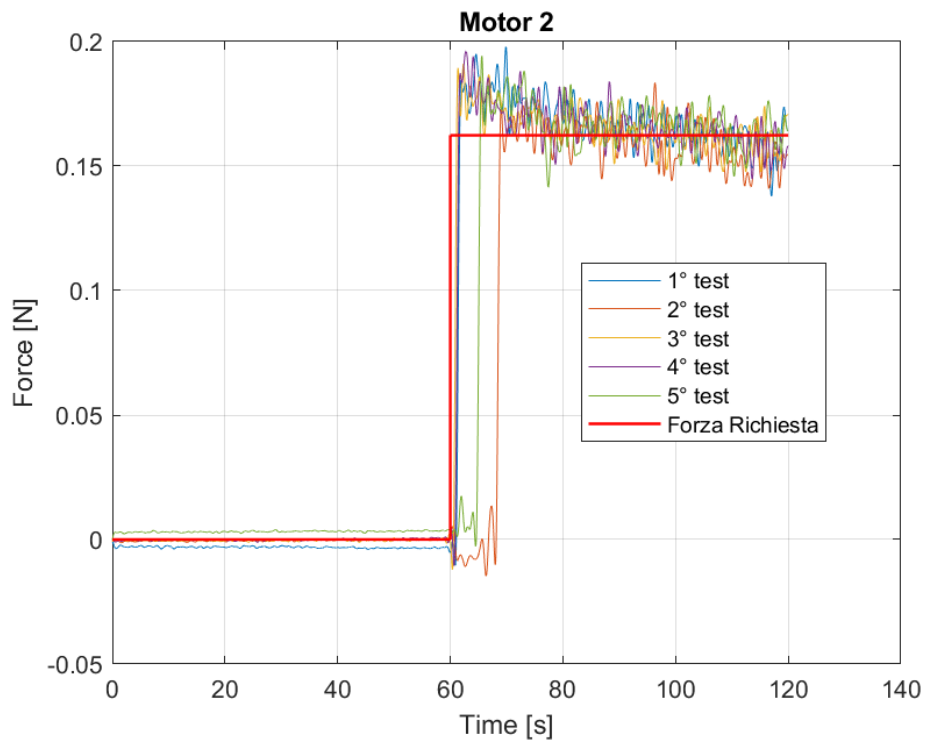


Fig 41. Motore n.2 con frequenza di taglio fissata a 1 Hz

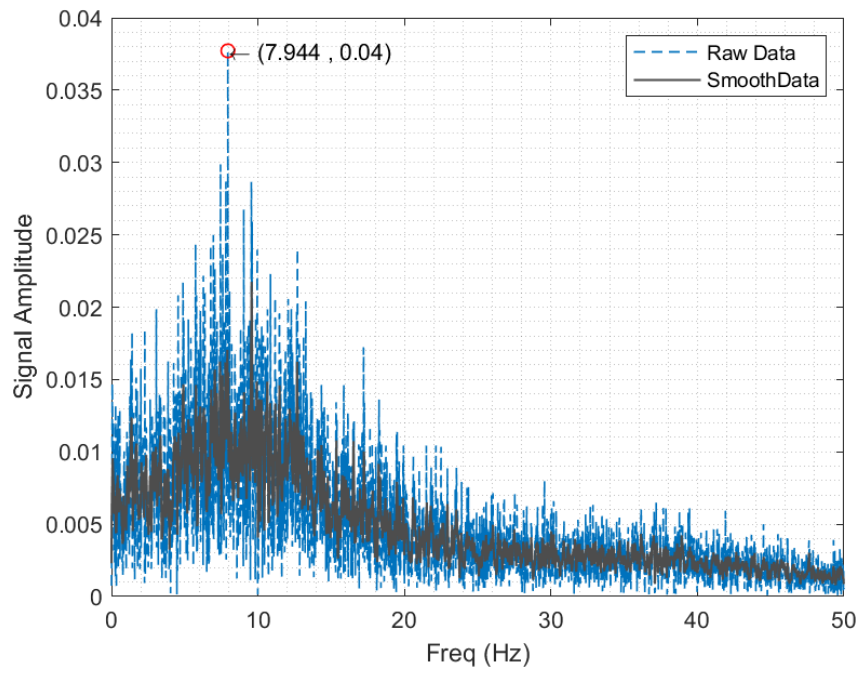


Fig 42. FFT del motore n.3

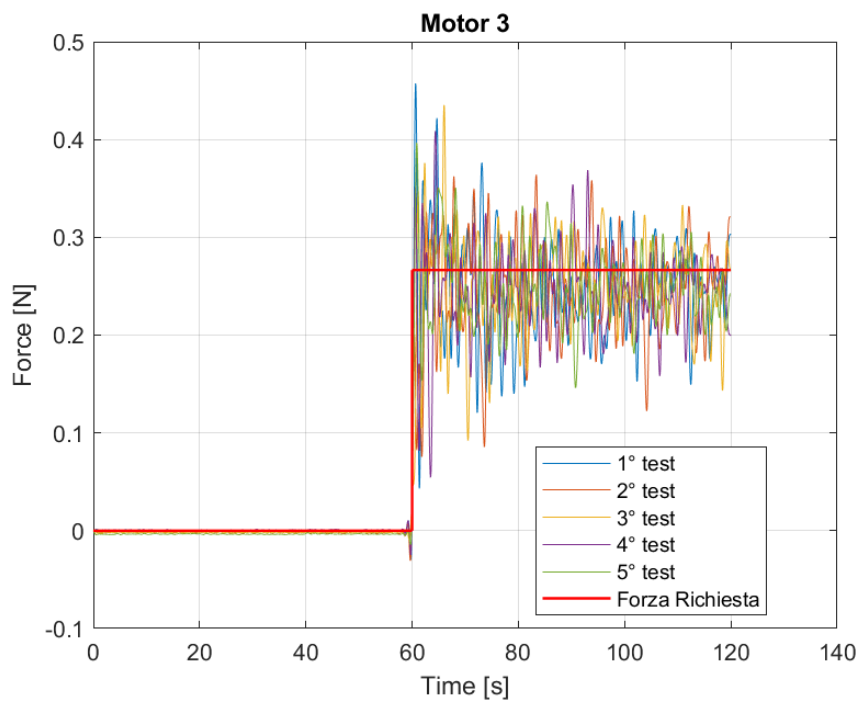


Fig 43. Motore n.3 con frequenza di taglio fissata a 1 Hz

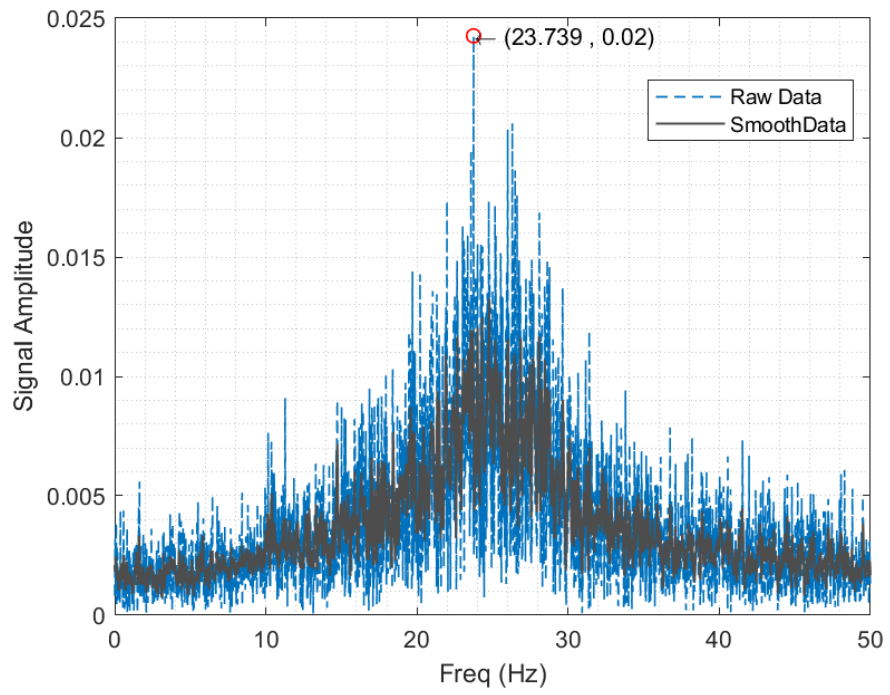


Fig 44. FFT del motore n.4

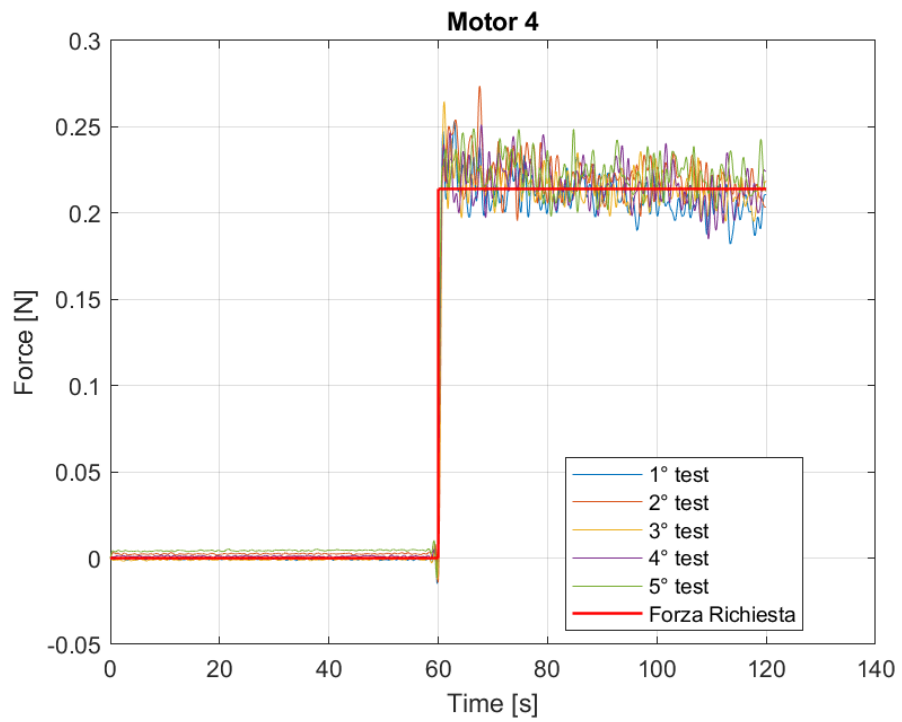


Fig 45. Motore n.4 con frequenza di taglio fissata a 1 Hz

Come si evince dalle figure precedenti, in particolare da quelle raffiguranti le FFT (**Fig. 36, Fig. 40, Fig. 42, Fig.44**), ogni motore ha un grafico diverso e questo fa capire come tutti e quattro i motori siano diversi tra di loro. I picchi di ampiezza del segnale corrispondono tutti e quattro a frequenze diverse, tutti hanno una loro peculiarità e per questo è necessario che in un eventuale controllo successivo ogni motore abbia un programma specifico.

5. Conclusioni finali e lavori futuri

Le prove sperimentali esposte in precedenza avevano lo scopo di verificare la ripetibilità e l'affidabilità dei quattro motori e del setup sperimentale.

Dalla prima prova sperimentale, dove ai motori viene imposto un aumento e un successivo decremento di duty cycle, si evince che la ripetibilità è buona, anche se in corrispondenza di alcuni valori di duty cycle vi è una differenza, tra le dieci acquisizioni, dell'ordine di qualche centesimo di Newton, valore molto piccolo. Le cause di questo fenomeno possono essere molteplici, una di queste è sicuramente un non perfetto collegamento dei cavi di alimentazione e di controllo tra il motore e l'ESC. Un'altra causa potrebbe essere dovuta alla risposta del motore in seguito

a una variazione di duty cycle del 1%, questa variazione, scelta in fase preliminare, è forse troppo piccola, il che non permette al motore di cambiare la sua velocità istantaneamente.

Nella seconda prova sperimentale, il segnale di input del motore è un segnale a gradino, affinché il motore possa riprodurre la sua massima forza, e quindi poter verificare come questo si comporta in caso di comando costante. In fase preliminare, è stato ipotizzato che la risposta del motore fosse la seguente: un picco all'inizio del gradino e poi un andamento che si attesta al valore di forza imposto. Il risultato della prova sperimentale ha confermato, quasi fedelmente, l'ipotesi fatta in fase preliminare. L'andamento della curva di risposta è quello ipotizzato anche se presenta numerose oscillazioni.

Sia nella prima che nella seconda prova sperimentale, nell'analisi dei dati è stato adottato un filtro passa-basso per andare a tagliare le alte frequenze così da poter ottenere un segnale più pulito. I motori e le eliche nel momento in cui girano ad altissime velocità, producono delle vibrazioni, lungo l'asse di rotazione del motore stesso, di elevata intensità, le quali vengono amplificate dalla cella di carico che, per come è montata, è assimilabile a una trave a sbalzo (vedi **Fig.46**).

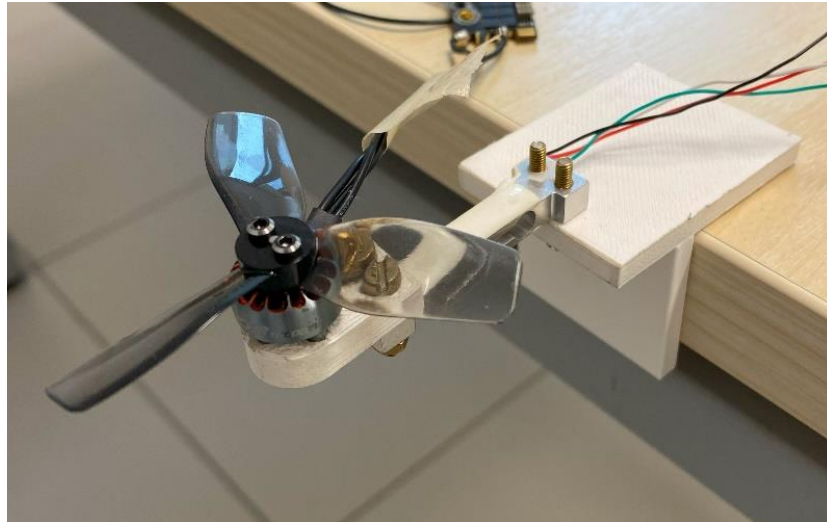


Fig 46. Setup di cella di carico e motore

Inoltre, non è stato possibile verificare esattamente il range di lavoro effettivo dei motori, il duty cycle, per un motore brushless controllato da un ESC, dovrebbe variare tra 0 e 1, dove 0 corrisponde a velocità zero del motore e 1 corrisponde alla velocità massima del motore stesso. I motori in esame, come detto precedentemente, sono motori da FPV Racing, capaci di assorbire un quantitativo di intensità di corrente fino a un massimo di 7.8 A (vedi **Fig. 8**).

Per ovviare ai problemi visti si dovrebbe progettare un sistema di smorzamento delle vibrazioni causate dal motore, e contestualmente cambiare la cella di carico, utilizzandone una a compressione e con una accuratezza e precisione maggiore. Allo stesso tempo sarebbe opportuno controllare e migliorare il cablaggio tra motore, ESC e myRIO, alimentare il sistema con un alimentatore o una batteria esterna, che sia in grado di

erogare la quantità di corrente massima assorbibile dal motore, così da misurare in maniera effettiva la sua velocità massima.

6. Bibliografia

- [1] “On the scale model technology for floating offshore wind turbines” di I. Bayati, 2017.
- [2] “Model tests of a 10 MW semi-submersible floating wind turbine under waves and wind using hybrid method to integrate the rotor thrust and moments” di Felipe Vittori, 2021.
- [3] “Experimental and numerical study of a barge-type FOWT platform under wind and wave load” di Tzu-Ching Chuang, 2021.
- [4] “Emulating aerodynamic forces and moments for hybrid testing of floating wind turbine models” di A. Otter, 2020.
- [5] “Validation of INNWIND.EU Scaled Model Tests of a Semisubmersible Floating Wind Turbine” di C. Koch, 2018.
- [6] “Experimental and Numerical Analysis of a 10 MW Floating Offshore Wind Turbine in Regular Waves” di Hyeonjeong Ahn, 2020.
- [7] “Current simulation with Software in the Loop for floating offshore wind turbines” di A. Otter, 2022.

7. Ringraziamenti

Innanzitutto, voglio ringraziare il Professor Giovanni Bracco e il Correlatore Massimo Sirigu per avermi dato l'opportunità di realizzare questa tesi magistrale e per l'aiuto datomi. Un ringraziamento va anche a Mattia Glorioso per avermi insegnato e aiutato nel setup sperimentale.

Questi tre anni di magistrale sono stati molto complicati per me, la pandemia e le lezioni ed esami a distanza hanno complicato tutto il percorso universitario. Se sono riuscito ad arrivare a questo traguardo, tanto desiderato, lo devo soprattutto alla mia famiglia, a mio padre, a mia madre e alle mie sorelle, che mi sono sempre stati accanto nei momenti di difficoltà. Grazie Papà per i tuoi consigli, grazie Mamma per avermi spronato e supportato, grazie Chiara per avermi insegnato a non mollare mai e grazie Sara per avermi fatto capire che un po' di spensieratezza aiuta sempre.

Questa tesi la dedico ai miei nonni Ugo e Cosima che non ci sono più. A mia nonna Cosima che ha sempre creduto in me e a cui ho voluto un mondo di bene, e a mio nonno Ugo che mi ha insegnato tantissime cose e so che fosse qui con me oggi sarebbe stato di poche parole ma dai suoi occhi avrei capito quanto è fiero di me.

Infine, un ringraziamento speciale va alla persona a cui tengo di più al mondo, Margherita. Grazie per essermi stata sempre accanto nei momenti di difficoltà, nei momenti di tristezza e di felicità, per avermi fatto crescere e superare gli ostacoli, grazie, infinite volte GRAZIE.