



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

**“Implementazione di un banco di misura
della rotazione di eliche di drone
mediante Moku:Go”**

**“Design of a drone propeller rotational
speed testbench based on Moku:Go”**

Tesi di laurea di:

RICCARDO PIERSANTI

Relatore:

Prof. SUSANNA SPINSANTE

Correlatore:

Dott.Ing. GIANLUCA CIATTAGLIA

Anno Accademico 2023-2024

Abstract

Vista la crescita esponenziale dell'utilizzo dei droni in un ampio scenario di applicazioni, è bene sottolineare come la loro efficienza e affidabilità siano strettamente legate alla precisione e cura dei loro sistemi di misura e controllo.

A tal proposito, questo lavoro di tesi si pone con l'obiettivo di implementare un banco di misura della velocità di rotazione di eliche di drone mediante Moku:Go, che sia in grado di misurare e controllare tale velocità analizzando le vibrazioni indotte dalla rotazione delle eliche.

Al fine di escludere gli effetti indesiderati di grandezze interferenti, l'approccio utilizzato combina la scelta e l'impiego della sensoristica necessaria con una efficiente elaborazione del segnale digitale.

Indice

INDICE

INTRODUZIONE E MOTIVAZIONI DEL LAVORO	3
CAPITOLO 1: MISURA DI VIBRAZIONI	5
1.1 CHE COS'È LA VIBRAZIONE.....	5
1.2 METODI E STRUMENTI DI MISURA DELLE VIBRAZIONI.....	7
1.2.1 VIBROMETRI.....	8
1.2.2 ACCELEROMETRI.....	13
CAPITOLO 2: UAV – UNMANNED AERIAL VEHICLE	18
2.1 INTRODUZIONE AGLI UAV.....	19
2.1.1 L' ELICA DEL DRONE.....	20
2.1.2 IL MOTORE DEL DRONE.....	22
2.2 RILEVARE LA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DELL'ELICA STUDIANDO LE VIBRAZIONI.....	27
CAPITOLO 3: STRUMENTI HARDWARE E SOFTWARE	28
3.1 ACCELEROMETRO MEMS ADXL335.....	28
3.2 APPARATO MOKU:GO	30
CAPITOLO 4: PROVE SPERIMENTALI	36
4.1 FASE PRELIMINARE.....	37
4.2 MISURA E CONTROLLO DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI UN'ELICA DI DRONE.....	41
4.3 MISURA DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI DUE ELICHE DI DRONE.....	47
CAPITOLO 5: ANALISI DEI RISULTATI	48
5.1 CONTROLLO DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI UN'ELICA.....	48
5.2 MISURA DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI DUE ELICHE.....	57
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI	
BIBLIOGRAFIA	

Introduzione e motivazioni del lavoro

Negli ultimi anni, l'utilizzo di droni per applicazioni civili, industriali e militari è aumentato in modo esponenziale. La loro versatilità li rende strumenti preziosi per una vasta gamma di attività, dalla fotografia aerea alla sorveglianza, dall'agricoltura di precisione alla logistica, dalle consegne a domicilio alla ricerca e salvataggio di persone scomparse [1].

Tuttavia, l'efficienza e l'affidabilità dei droni dipendono fortemente dalla precisione e dalla bontà dei loro sistemi di controllo e misura. Tra questi, la misura e controllo della velocità di rotazione delle eliche è fondamentale per garantire un volo stabile del drone ed ottimizzarne le prestazioni.

Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo contesto, con l'obiettivo di sviluppare un banco di misura della velocità delle eliche di un drone mediante Moku:Go. Esso è essenziale per escludere gli effetti indesiderati di grandezze interferenti, come il rumore o l'instabilità dell'apparato meccanico sul quale si opera, durante l'acquisizione di segnali di vibrazione del drone mediante tecniche Radar. Le grandezze interferenti possono infatti compromettere l'accuratezza delle misure e influenzare negativamente il comportamento del drone.

A tal fine, il lavoro di tesi prevede l'implementazione del banco attraverso un'opportuna scelta della sensoristica necessaria, seguita da una verifica sperimentale mediante tecniche di laboratorio. L'approccio adottato combina l'utilizzo di una sensoristica MEMS con tecniche di elaborazione di segnali digitali per garantire misure precise e affidabili.

Gli obiettivi specifici di questo studio sono:

1. Identificazione e selezione della sensoristica più appropriata per la misura della velocità di rotazione delle eliche.
2. Implementazione di un banco di misura della rotazione di eliche di drone mediante Moku:Go.
3. Verifica sperimentale dell'efficacia del banco di misura implementato mediante prove di laboratorio.
4. Analisi dei dati atta all'esclusione delle grandezze interferenti.

Nel corso di questa trattazione si andranno ad analizzare in maniera dettagliata ed esaustiva tutti gli obiettivi precedentemente elencati.

Nel primo e secondo capitolo verranno fornite e descritte le nozioni sulla misura di vibrazioni mediante vari metodi ed approcci differenti, con l'obiettivo di capire come la rotazione dell'elica genera una vibrazione sul drone e come l'analisi della vibrazione indotta consenta di rilevare la velocità di rotazione dell'elica stessa.

Nel terzo capitolo verranno descritti nel dettaglio i vari strumenti hardware e software.

In contesto alla strumentazione hardware, verranno descritte le caratteristiche e le specifiche del sensore di accelerazione scelto per effettuare le misure di vibrazione. Mentre, contestualmente alla strumentazione, software verrà analizzato approfonditamente l'apparato Moku:Go, ponendo un'adeguata attenzione ai suoi strumenti interni, utilizzati per l'implementazione del banco di misura e per l'elaborazione dei segnali vibrometrici.

Nel capitolo quarto, si andrà a porre l'attenzione sul banco di misura implementato e si andranno a descrivere le prove sperimentali effettuate. Nel particolare, saranno sottoposti all'attenzione del lettore due casi di studio:

1. Misura e controllo della velocità di rotazione di un'elica di drone, mediante pilotaggio Moku:Go – Matlab.
2. Misura della velocità di rotazione di due eliche di drone tramite applicativo Moku.

Infine, l'elaborato tratterà, corrispettivamente nel capitolo quinto e sesto, l'analisi dei risultati ottenuti dalle varie prove di laboratorio e le conclusioni tratte da quest'ultima.

Capitolo 1

Misura di vibrazioni

1.1 CHE COS'È LA VIBRAZIONE

Il punto di partenza, alla base di ogni misura è conoscere la grandezza fisica che si vuole misurare. In particolare, ci si soffermerà sulla definizione di vibrazione e come questa, con differenti approcci e metodi, può essere misurata.

Come si legge nell' articolo [2], un corpo vibra quando effettua un movimento oscillatorio rispetto ad una posizione di riferimento. Il numero di volte in cui si ripete un movimento completo in un secondo viene definito frequenza e si misura in Hz.

Come mostrato in Figura 1, il movimento può essere quello di un singolo componente ad un'unica frequenza ,come il caso del diapason, o di più componenti a frequenze differenti , come ad esempio il movimento di un pistone in un motore a combustione interna.

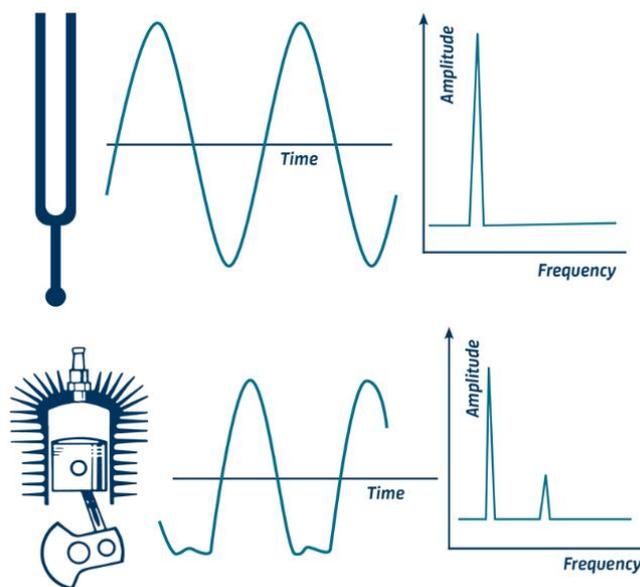


Figura 1: esempio di oggetti che compiono un movimento vibratorio

Essendo la vibrazione una grandezza fisica, ad essa è possibile associare il concetto di segnale di vibrazione. Infatti, come noto dalla teoria dei segnali [3], per segnale si intende una funzione del tempo che rappresenta l'evoluzione temporale di una qualunque grandezza fisica. Generalmente, tranne qualche caso eccezionale, i segnali di vibrazione sono costituiti da molte frequenze differenti che si innescano contemporaneamente e di conseguenza non è possibile, osservando semplicemente l'andamento del segnale nel dominio del tempo, individuare quante componenti armoniche siano presenti e le loro rispettive frequenze.

Prima di descrivere con particolare attenzione i differenti metodi di misura è bene soffermarsi sulla definizione di vibrazione di un corpo e capire quali grandezze si legano ad essa. Dalla definizione si legge che quest'ultima è un movimento di natura oscillatoria attorno ad un punto di equilibrio.

Essendo quindi la vibrazione, un'oscillazione, è possibile descrivere il fenomeno tramite le equazioni del moto, caratterizzate da:

- **Spostamento $x(t)$**
- **Velocità $v(t)$**
- **Accelerazione $a(t)$**

Naturalmente, se il movimento è quello di un singolo componente, come il caso del diapason, descrivere analiticamente la vibrazione in termini di spostamento, velocità e accelerazione è del tutto equivalente. Tanto che, dalle leggi del moto armonico si ha:

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$v(t) = 2\pi \cdot f \cdot A \cdot \text{cos}(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$a(t) = -(2\pi \cdot f)^2 \cdot A \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Tuttavia, come già detto in precedenza, i segnali di vibrazione sono solitamente molto complessi e caratterizzati da armoniche multiple e contemporanee. Questo significa che il moto è ben molto più complesso da descrivere, specie in termini di spostamento e velocità, in quanto si possono verificare anche spostamenti molto piccoli a velocità molto elevate.

Non è così arduo invece, analizzare il moto vibratorio e conseguentemente effettuare delle misure, se si fa riferimento al **segnale di accelerazione** da esso derivante.

1.2 METODI E STRUMENTI DI MISURA DELLE VIBRAZIONI

Come ampiamente discusso nel paragrafo 1.1, a seconda della complessità del sistema in movimento, varierà l'approccio, la modalità e conseguentemente anche lo strumento da utilizzare per la misura delle vibrazioni.

L'elemento che accomuna i vari metodi e strumenti di misura è la caratterizzazione del segnale di vibrazione nel dominio della frequenza.

Mentre nel dominio del tempo risulta difficoltoso discriminare le varie componenti armoniche del segnale, non lo è altrettanto nel dominio della frequenza. Questo significa che indipendentemente dalla modalità e dallo strumento di misura impiegato, il segnale analogico (posto di considerare strumenti con uscita analogica), di spostamento o accelerazione, derivante dalla vibrazione dell'oggetto in esame, dovrà essere necessariamente convertito in digitale ed elaborato.

A tal proposito, si riporta in Figura 2, la *catena di misura*.

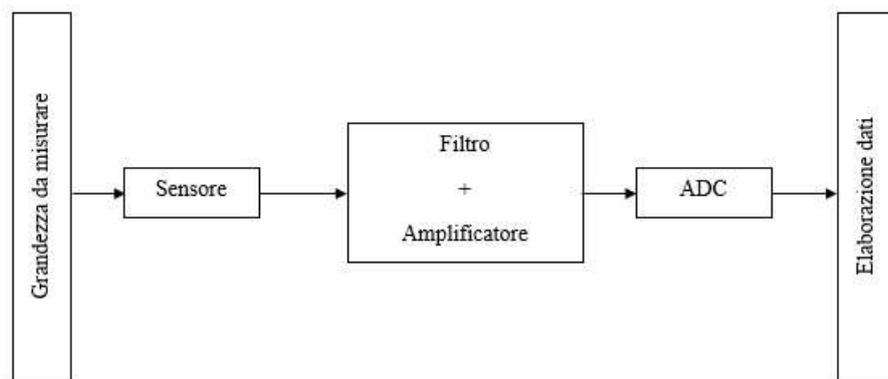


Figura 2: schema a blocchi della catena di misura

Senza entrare nel dettaglio del blocco filtro/amplificatore e convertitore AD, si andrà ora ad effettuare una descrizione della catena di misura.

L'ingresso della catena è costituito dalla grandezza fisica da misurare, che nel caso specifico di questa trattazione, è lo spostamento o l'accelerazione derivanti dalla vibrazione di un sistema.

Il secondo dispositivo, fondamentale e in grado di acquisire il segnale in ingresso è il **sensore**.

Come riportato in [4], un sensore è un dispositivo che trasforma la grandezza fisica che si vuole misurare in un'altra grandezza di natura diversa (tipicamente elettrica ovvero utilizzabile, memorizzabile ed elaborabile in modo estremamente veloce attraverso circuitistica elettronica).

Una volta che il segnale di ingresso è stato acquisito e convertito in un segnale elettrico, per poter essere elaborato al meglio, può presentare la necessità di essere filtrato e amplificato.

A seguito del filtraggio e amplificazione, un passo cruciale è la conversione analogico-digitale, che deve essere effettuata in maniera tale da perdere il minor contenuto informativo possibile.

Infine, dopo aver ottenuto il segnale digitale, è possibile effettuare l'elaborazione dati necessaria per compiere la misura di cui si necessita.

Dopo aver trattato la catena di misura, è possibile analizzare nel dettaglio i differenti strumenti e le varie modalità di misura da adottare per le misurazioni di vibrazione.

Nel paragrafo 1.1 si è detto come sia possibile compiere misure di vibrazione misurando lo spostamento oppure l'accelerazione.

Nel caso in cui si voglia misurare lo spostamento indotto dalla vibrazione, gli strumenti più utilizzati sono chiamati **vibrometri**, mentre se si volesse misurare l'accelerazione, in quanto più semplice, gli strumenti più di uso comune sono gli **accelerometri**.

Nel prosieguo della seguente trattazione, nei sottoparagrafi 1.2.1 e 1.2.2, sarà più volte fatto riferimento al documento [5].

1.2.1 VIBROMETRI

Per la misura di vibrazioni in termini di spostamento o velocità, gli strumenti più utilizzati sono quelli che consentono di apprezzare piccole variazioni del misurando su piccoli range di ampiezza, ovvero i vibrometri.

Tra i dispositivi più usati, è possibile individuarne quattro:

1. **LVDT**
2. **Proximity**
3. **Laser a triangolazione**
4. **Vibrometro laser ad effetto Doppler**

Si procederà ora con una descrizione qualitativa dei principali vibrometri.

LVDT – LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER

Il **Linear Variable Differential Transformer (LVDT)**, il cui schema è riportato in Figura 3, è un sensore di posizione basato sul principio induttivo.

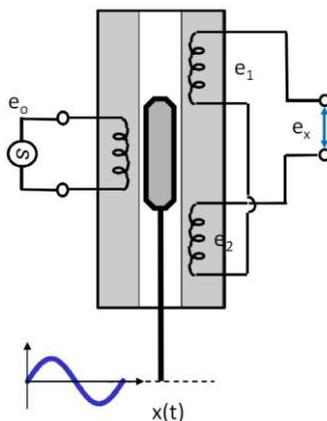


Figura 3 : schema di principio di un LVDT

Il primario è alimentato da un generatore e_0 in alternata che genera un campo magnetico che a sua volta, andrà a generare due tensioni, e_1 e e_2 nei secondari. Tali tensioni sono variabili a seconda della posizione del nucleo (realizzato in traferro) che fa variare il coefficiente di mutua induttanza fra primario e secondari.

Essendo la tensione e_0 alternata (portante), anche la tensione di uscita differenziale e_x sarà una tensione variabile ed in particolare sarà un segnale modulato in ampiezza dalla posizione x del nucleo (modulante).

Per questo motivo, l'LVDT necessita un modulo di demodulazione d'ampiezza del segnale in modo da fornire una tensione V_{out} in uscita proporzionale alla posizione x del nucleo.

$$V_{out} = K_s \cdot x$$

Le prestazioni dell'LVDT dipendono da una serie di fattori tra cui :
 la **non idealità dello strumento**, che si traduce in una tensione di uscita non nulla anche quando il traferro si trova nella posizione centrale. E la **temperatura**, che in virtù della sua influenza sulla resistenza elettrica del primario, ne determina un aumento con conseguente diminuzione della tensione di uscita.

PROXYMITY

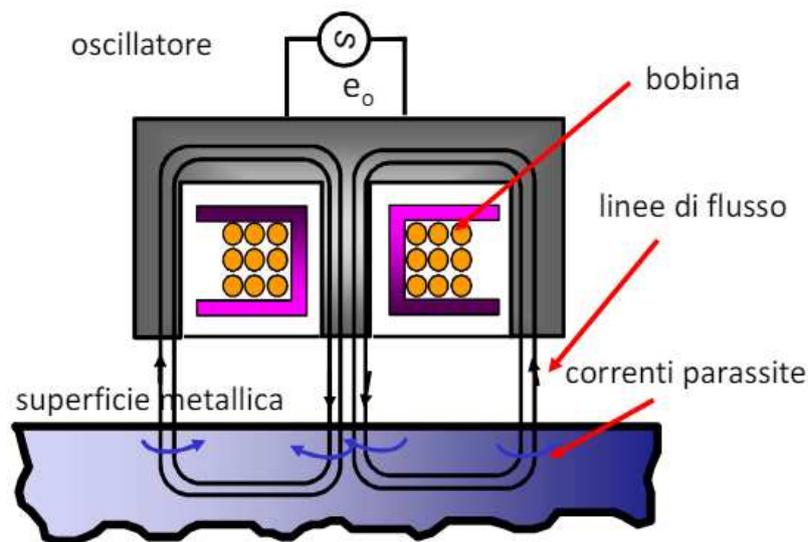


Figura 4 : schema qualitativo di un sensore a correnti parassite

In Figura 4 si può osservare una semplice rappresentazione del Proximity, un trasduttore di posizione che si basa sulle correnti parassite.

Una bobina, alimentata in alternata, genera un campo magnetico variabile nel tempo che genera a sua volta delle correnti parassite sulla superficie del materiale target (conduttore non ferromagnetico). È naturale dedurre che l'entità delle correnti parassite è funzione della distanza relativa tra lo strumento di misura (bobina) e target e quest'ultime andranno a dissipare energia per effetto Joule abbassando così la tensione della bobina.

Il principio di misura di questo strumento è quindi quello di valutare la distanza relativa tra bobina e target attraverso la misura dell'abbassamento di tensione derivato dalla perdita di energia per effetto Joule dalle correnti parassite.

Essendo poi, anche questo uno strumento in alternata, necessiterà di uno stadio di demodulazione del segnale di uscita.

Le prestazioni del proximity dipendono principalmente da tre fattori, ovvero variano in funzione della temperatura, tipologia di materiale target e dalla frequenza della portante. Le ultime due in particolare sono determinanti nel ruolo che l'effetto pelle gioca nelle prestazioni dello strumento.

LASER A TRIANGOLAZIONE

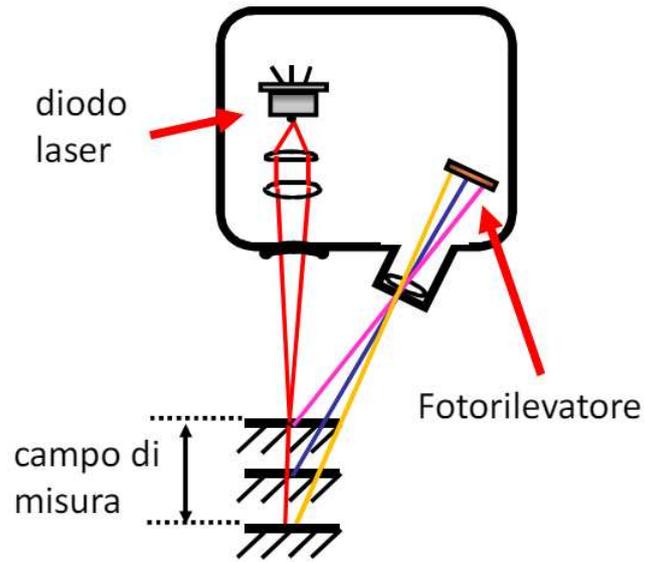


Figura 5 : schema di principio di un laser a triangolazione

Il sistema di misura **Laser a triangolazione**, il cui schema di principio è riportato in Figura 5, si basa sull'impiego di un raggio laser che viene proiettato sul target e *osservato* da un foto rivelatore. La posizione osservata quindi, è funzione della distanza relativa tra sensore e target.

VIBROMETRO LASER AD AFFETTO DOPPLER

Come si legge nell'articolo [6], la vibrometria Laser Doppler è, al momento, il metodo che offre la migliore risoluzione di spostamento e velocità ed è utilizzato in moltissimi campi. Consente di ottenere risoluzione in spostamento dell'ordine dei femtometro e di arrivare a frequenze superiori a 1 GHz. Le proprietà della vibrometria Laser Doppler sono indipendenti dalla distanza di misura per cui, questa tecnologia viene utilizzata sia per applicazioni al microscopio, sia a grandi distanze. La luce come sensore, posta un'adeguata lunghezza d'onda, non ha influenza sull'oggetto. È quindi possibile effettuare misure di vibrazione su qualsiasi tipologia di target.

Senza entrare nel dettaglio dello strumento, seguirà una breve descrizione dell'effetto Doppler e dell'interferometria Laser, che combinate tra loro consentono misurazioni di vibrazione in termini di spostamento e velocità ad elevatissima risoluzione.

Per maggiori approfondimenti, si rimanda all'articolo [6].

L'effetto Doppler

Se un'onda è riflessa da un oggetto in movimento e rilevata da uno strumento (in questo caso con un Vibrometro Laser Doppler o LDV), la variazione nella frequenza dell'onda può essere descritta come:

$$f_D = 2 \times v / \lambda$$

dove v è la velocità dell'oggetto e λ è la lunghezza d'onda emessa. Per essere in grado di determinare la velocità dell'oggetto, la variazione di frequenza (effetto Doppler) deve essere misurata rispetto ad una lunghezza d'onda nota. Questa operazione viene eseguita dal vibrometro laser Doppler utilizzando un interferometro laser.

Interferometria

Il vibrometro laser Doppler lavora sulla base dell'interferenza ottica, per cui, sostanzialmente, due raggi di luce coerente, con le rispettive intensità I_1 e I_2 , si devono sovrapporre. L'intensità totale dei due raggi non è semplicemente la somma delle singole intensità, ma è modulata secondo la formula:

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + 2 \times \sqrt{(I_1 + I_2) \times \cos[2\pi \times \frac{(r_1 - r_2)}{\lambda}]}$$

con il cosiddetto termine "interferenza". Il termine interferenza è relativo alla differenza di cammino ottico tra i due raggi. Se questa differenza è un multiplo intero della lunghezza d'onda della luce, l'intensità totale è quattro volte una singola intensità.

1.2.2 ACCELEROMETRI

Come già detto in precedenza nel paragrafo 1.1, compiere misure di vibrazione misurando l'accelerazione derivante da essa, risulta essere più agevole rispetto che effettuarla in termini di spostamento o velocità. Ne consegue, che anche gli strumenti che sfruttano questo principio, ovvero gli accelerometri, sono più semplici rispetto i vibrometri.

Il principio di funzionamento degli accelerometri è quello inerziale e misurano quindi l'accelerazione assoluta.

Esistono svariate tipologie di accelerometri:

1. **Estensimetrici e Piezoresistivi**
2. **Piezoelétrici**
3. **Ad effetto Hall**
4. **Magnetoresistivi**
5. **A trasferimento di calore**
6. **Capacitivi**
7. **Capacitivi MEMS**

Si procederà ora con la descrizione qualitativa degli accelerometri, prestando particolare attenzione agli accelerometri capacitivi, in quanto l'accelerometro utilizzato per questo lavoro di tesi, è proprio un accelerometro capacitivo MEMS.

ACCELEROMETRI ESTENSIMETRICI E PIEZORESISTIVI

In virtù della **piezoresistività**, che come si legge in [7], è una proprietà di alcuni materiali che indica la variazione della loro resistenza elettrica in risposta a una deformazione meccanica o una pressione applicata, gli accelerometri piezoresistivi ed estensimetrici (Figura 6), si basano sulla misura di resistenza elettrica di un materiale, che varia in funzione della sua deformazione per ottenere da questa una misura di accelerazione.

Vantaggio di tali sensori è la ridotta dimensione geometrica e la limitata massa.



Figura 6: esempio di sensore piezoresistivo (ed estensimetrico)

ACCELEROMETRI PIEZOELETTRICI

Gli accelerometri piezoelettrici o comunemente chiamati **piezoaccelerometri**, si basano sull'effetto piezoelettrico.

L'effetto piezoelettrico fu scoperto nel 1880 da Jaques e Pierre Curie, ed è una caratteristica di diversi materiali naturali, sintetici o ceramiche ferroelectriche polarizzate, che permette loro di sviluppare una carica quando vengono deformati elasticamente. Maggiore è la deformazione, maggiore sarà la carica sviluppata.

Nel piezoaccelerometro (Figura 7), l'uscita del sensore, come detto pocanzi, è una carica e non un segnale elettrico. Tale inconveniente viene risolto integrando nel sensore un dispositivo chiamato ICP - INTEGRATED CIRCUIT PIEZOELECTRONIC.

L'ICP nient'altro è, che un convertitore di carica che consente di convertire la carica in uscita dal sensore in una tensione.

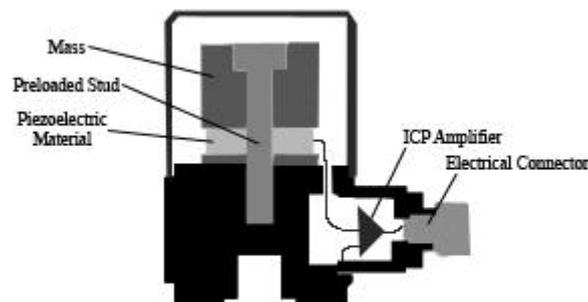


Figura 7: schema qualitativo di un piezoaccelerometro

Il vantaggio di questi sensori è la costanza della sensibilità in tensione e la bassa impedenza di uscita.

ACCELEROMETRI AD EFFETTO HALL E MAGNETORESISTIVI

Gli accelerometri ad effetto Hall, sfruttano tale fenomeno fisico, misurando la variazione di tensione originata da un cambiamento del campo magnetico attorno al sensore.

Mentre gli accelerometri magnetoresistivi misurano la variazione di resistenza elettrica, indotta dalla variazione del campo magnetico attorno al sensore.

Strutturalmente, sono identici a quelli ad effetto Hall, tranne per il fatto che nel primo caso deve essere effettuata una misura di tensione, mentre nel secondo, una misura di resistenza elettrica.

ACCELEROMETRI A TRASFERIMENTO DI CALORE

Senza entrare nel dettaglio, questi sensori misurano grazie all'impiego di termistori, le variazioni di trasmissione di calore, indotte dall'accelerazione di un corpo.

ACCELEROMETRI CAPACITIVI

Come si legge in [8], l'accelerometro capacitivo sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le sue armature. La variazione di capacità di un condensatore differenziale risulta proporzionale allo spostamento del corpo.

Si riporta di seguito uno schema semplificato di un accelerometro capacitivo (Figura 8).

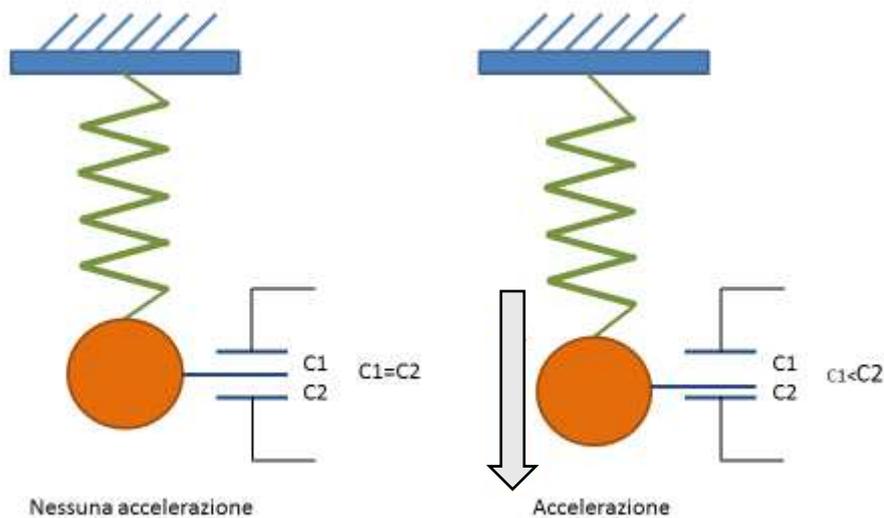


Figura 8: schema qualitativo di un accelerometro capacitivo

In presenza di accelerazione, varia la distanza tra le armature dei condensatori C_1 e C_2 .

E, come detto precedentemente, la variazione della distanza tra le armature di un condensatore determina la variazione della sua capacità. Il problema potrebbe essere analizzare il segnale d'uscita in termini di variazione di capacità per ricondursi all'accelerazione che l'ha generata.

Quindi, una plausibile soluzione potrebbe essere quella di realizzare un circuito elettronico, in grado di convertire la variazione di capacità in variazione di tensione e a quel punto, analizzarla per potersi ricondurre all'accelerazione.

Di seguito (Figura 9), in accordo all'articolo [5], è riportata una possibile soluzione per convertire una variazione di capacità in variazione di tensione .

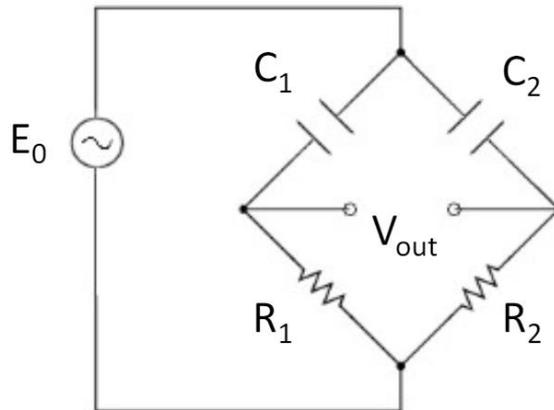


Figura 9 : ponte capacitivo

Il circuito in figura, rappresenta un ponte capacitivo. Esso è simile ad un classico ponte di Wheatstone, ma utilizza resistori e condensatori.

Descrizione del circuito.

I componenti di tale circuito sono:

- C_1 e C_2 : condensatori variabili che rappresentano le capacità da misurare. Queste, possono variare in funzione della vibrazione dell'oggetto target.
- R_1 e R_2 : resistori fissi utilizzati per bilanciare il ponte.
- E_0 : tensione di alimentazione alternata applicata ai nodi opposti del ponte.
- V_{out} : tensione di uscita misurata tra i due nodi del ponte.

Il ponte risulta essere bilanciato quando il rapporto delle capacità è bilanciato dal rapporto delle resistenze, ovvero quando è soddisfatta la seguente condizione di bilanciamento:

$$\frac{R_1}{Z_{C_1}} = \frac{R_2}{Z_{C_2}}$$

Se tale relazione è verificata, si ha che $V_{out} = 0$.

Quando la capacità di C_1 o C_2 varia, a causa del movimento dell'oggetto target, il ponte si sbilancia. Lo sbilanciamento determina la presenza di una tensione di uscita $V_{out} \neq 0$. Misurando la tensione di uscita, si può risalire alla misura di accelerazione.

I vantaggi del ponte capacitivo, risiedono principalmente in tre aspetti:

- nell'elevata sensibilità, in virtù della quale è possibile rilevare piccolissime variazioni di capacità.
- nella precisione, ovvero grazie a tarature accurate, è possibile ottenere misure accurate.
- semplicità di implementazione.

ACCELEROMETRI CAPACITIVI MEMS

Lo sviluppo delle tecnologie dei circuiti integrati, ha consentito di miniaturizzare gli accelerometri capacitivi e di includerli direttamente in circuiti integrati, facendo nascere così gli accelerometri MEMS.

Nonostante cambi la struttura, lo schema funzionale rimane inalterato.

Come detto già, all'inizio della trattazione, l'accelerometro utilizzato nel presente lavoro di tesi è un accelerometro MEMS, che si basa sul principio di funzionamento degli accelerometri capacitivi.

Si riporta di seguito in Figura 10, l'immagine del sensore accelerometrico impiegato, rimandando tuttavia la sua descrizione e caratterizzazione al Capitolo 3.

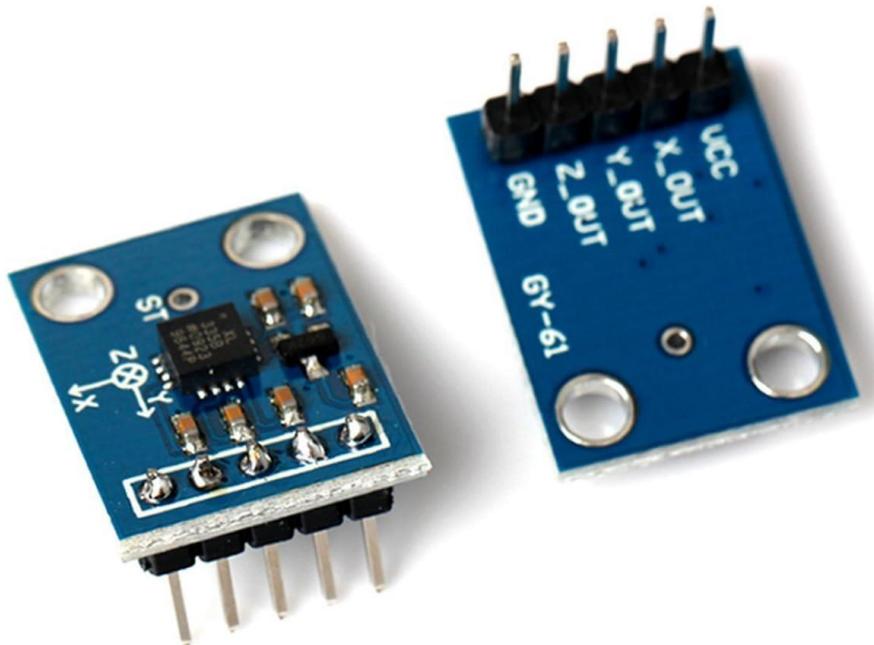


Figura 10: accelerometro MEMS ADXL335

Capitolo 2

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

In questo capitolo, dopo una breve panoramica sugli UAV, ci si concentrerà su uno degli elementi fondamentali del drone: l'elica.

L'elica è una componente cruciale, poiché trasforma l'energia fornita dal motore in movimento, permettendo al drone di sollevarsi e manovrare nello spazio aereo. Si caratterizzerà il funzionamento dell'elica, il motore che la aziona e il ruolo critico che questi componenti giocano nel garantire le prestazioni ottimali del drone.

Inoltre, verrà discusso come è possibile rilevare la velocità di rotazione dell'elica mediante lo studio dei segnali di vibrazione generati dalla sua rotazione. Questo approccio offre un metodo indiretto ma efficace per monitorare e controllare le prestazioni del drone, contribuendo a migliorare la sicurezza e l'efficienza delle operazioni di volo.

2.1 INTRODUZIONE AGLI UAV

Gli UAV, (veicoli aerei a pilotaggio remoto), o più comunemente chiamati droni, rappresentano una delle tecnologie più innovative e versatili degli ultimi decenni. Nonostante siano stati in origine sviluppati per scopi militari, essi hanno trovato impiego in una vasta gamma di settori civili, tra cui l'agricoltura, la fotografia, la sorveglianza, le operazioni di soccorso e molte altre applicazioni. Infatti, la loro capacità di svolgere compiti molto complessi senza la necessità di un pilota a bordo li rende strumenti preziosi per molte operazioni.

Tuttavia, nonostante molto spesso il termine drone e UAV sia utilizzato in modo intercambiabile, occorre fare chiarezza:

- Il **drone** è un veicolo senza pilota che può muoversi autonomamente. Poi, a seconda del campo in cui si muove, possono definirsi i droni marini, terrestri e aerei (Figura 11).
- Un **UAV** invece, è un aeromobile a pilotaggio remoto che può come il drone, volare autonomamente oppure può essere pilotato a distanza tramite controller o tablet. Questo implica che ogni UAV è un drone, ma non vale il viceversa.



Figura 11 : esempio di drone aereo telecomandato (UAV)

2.1.1 L'ELICA DEL DRONE

Precedentemente si è detto che l'elica è una componente cruciale nel drone, in quanto trasforma l'energia fornita dal motore in movimento e permette al velivolo di sollevarsi e manovrare nello spazio.

Si cercherà ora, senza entrare troppo nei dettagli della fluo ed aereodinamica, di capire come si compone un'elica, come può essere realizzata e quali sono le sue principali caratteristiche di funzionamento.

Sarà fatto riferimento agli articoli [10] e [11].



Figura 13: elica del drone

Un'elica è essenzialmente costituita da due componenti fondamentali:

- **Mozzo**
- **Pale**

Il mozzo è la parte centrale dell'elica e permette la sua connessione all'albero motore che applicando la coppia (lavoro), metterà in rotazione l'intero organo. Nel mozzo sono montate le pale e deve essere realizzato in modo da presentare la minor resistenza al movimento.

Le pale invece sono gli elementi che, grazie alla loro particolare geometria, creano la spinta necessaria all'elica per far sì che il drone si sollevi e possa poi compiere diversi movimenti nello spazio aereo. È naturale pensare che ad un numero di pale maggiore corrisponde una maggiore forza di traino o di spinta prodotta, il che in linea di principio è vero, tuttavia ci sono delle limitazioni dettate dalla resistenza alla rotazione prodotta da ogni pala. Questo si traduce nel fatto che motori potenti potranno azionare eliche con un maggior numero di pale rispetto a motori meno potenti. Quindi la scelta dell'elica condizionerà necessariamente la scelta del motore.

A seconda poi, del contesto in cui è utilizzata, l'elica può essere realizzata con diversi materiali ed assumere differenti caratteristiche che andranno inevitabilmente ad inficiare nel funzionamento.

I principali materiali con cui un'elica può essere realizzata sono:

- Lega di alluminio;
- Legno;
- Acciaio;
- Materia plastica rinforzata;

mentre a seconda delle loro caratteristiche si possono definire:

- Eliche **positive**: assorbono coppia dal motore e possono generare forza traente (o di spinta) o forza frenante;
- Eliche **negative** o **Mulinelli**: forniscono coppia all'albero motore (es. pale eoliche);
- Eliche **bloccate**: caratterizzate dall'assenza di moto rotatorio;
- Eliche **a punto fisso**: caratterizzate dall'assenza di moto traslatorio;

Un'ulteriore distinzione inoltre può essere effettuata sulla base di come l'elica si collega all'albero del motore:

se si trova davanti al motore, è detta **traente** in quanto traina il sistema, mentre se posta dietro al motore essa è detta **spingente**, in quanto spinge il sistema.

Nel presente lavoro di tesi, si è fatto uso di un'elica positiva a tre pale, traente e realizzata in materiale plastico rinforzato (Figura 13).

Per descrivere il funzionamento, senza addentrarsi nell'ambito della fluidodinamica ed aerodinamica, è possibile semplicemente fare riferimento al concetto di corpo rigido, e in particolare ai concetti di moto rotatorio e traslatorio.

In accordo al testo [11], un corpo rigido è un sistema di particelle (punti) la cui distanza relativa non varia nel tempo, qualunque sia il sistema di forze esterne che lo sollecita.

Se tutti i punti di un corpo rigido subiscono spostamenti uguali (in modulo, direzione e verso) il moto è di pura traslazione, se invece questi descrivono traiettorie circolari attorno ad un comune asse di rotazione, il moto si dice rotatorio. Una combinazione dei due moti determinerà il cosiddetto moto roto-traslatorio.

Tenendo conto di queste nozioni, è possibile descrivere almeno in modo qualitativo, il funzionamento dell'elica.

Essendo l'elica vincolata all'albero motore, essa è in grado di assorbire la coppia generata e mettersi in rotazione attorno al proprio asse. Grazie al moto rotatorio e alla geometria delle pale, l'elica è in grado di veicolare l'aria attraverso essa, generando la forza traente necessaria per far sollevare il drone e fargli compiere un moto traslatorio.

Per maggiori approfondimenti sulla teoria dell'elica, si rimanda all'articolo [11].

2.1.2 IL MOTORE DEL DRONE

Alla stregua dell'elica, anche il motore gioca un ruolo cruciale nel funzionamento del drone, in quanto è l'elemento che fornisce energia al sistema.

Nel contesto dei droni o più generalmente degli UAV, i motori impiegati sono tipicamente elettrici in corrente continua.

Seguirà infatti una descrizione generale del principio di funzionamento di questi motori, ponendo una particolare attenzione al motore **brushless**, che è la tipologia di motore elettrico utilizzato per eseguire le prove di laboratorio sul drone.

Per motore elettrico si intende una macchina elettrica che trasforma l'energia elettrica in ingresso, in energia meccanica. Tant'è che il motore elettrico è definito anche attuatore.

Il principio di funzionamento di questo sistema è basato sull'elettromagnetismo, in particolar modo sulla forza magnetica.

Prima di descrivere con maggiore attenzione le varie componentistiche del motore DC e come questo funziona, è bene fornire qualche richiamo sull'elettromagnetismo in particolare sulla forza di Lorentz.

FORZA DI LORENZ

Nel documento [12] si legge che una carica q in moto con velocità v in una regione sede di un campo elettromagnetico è soggetta alla forza di Lorentz

$$F = q(E + v \times B)$$

La forza di Lorentz è caratterizzata da due termini principali, il campo elettrico E che accelera la carica e il prodotto vettore tra la velocità della carica v e il campo di induzione magnetica B , che agisce variandone la direzione di moto.

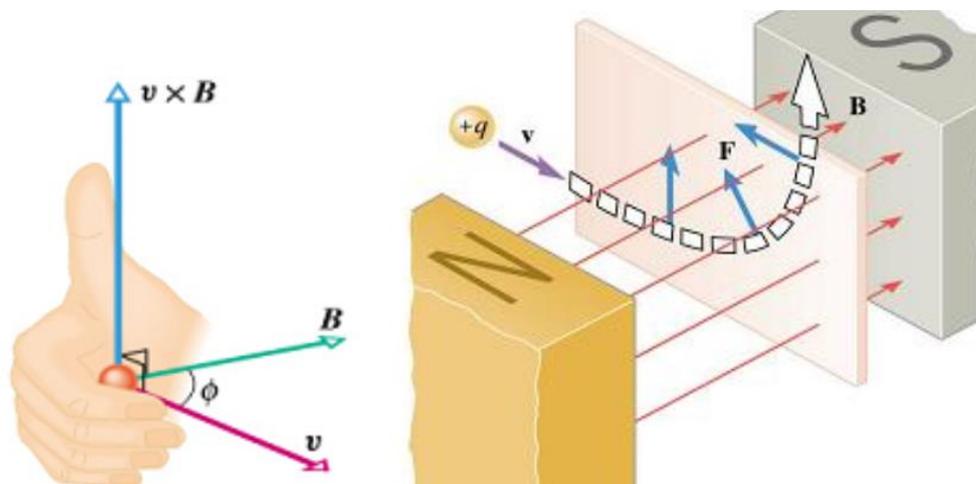


Figura 14: esempio di come agisce la forza di Lorentz e

come determinare la sua direzione secondo la regola della mano destra

Se si ricorda qual è la relazione tra carica elettrica ed intensità di corrente, ovvero la variazione della quantità di carica nell'unità di tempo:

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

è possibile fornire il seguente enunciato:

“Un conduttore di lunghezza l , percorso da una corrente I e collocato in un campo di induzione magnetica B , è soggetto ad una forza F che ha direzione ortogonale al piano formato da B ed I ”.

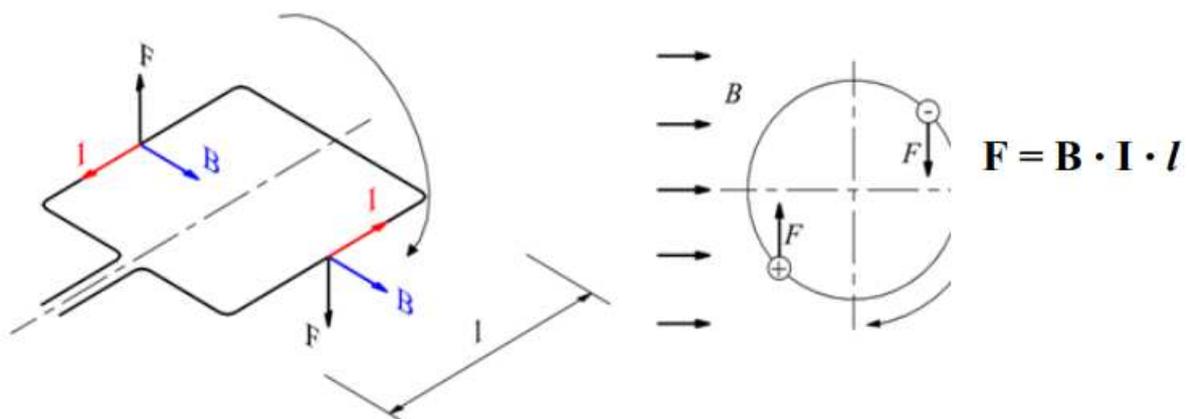


Figura15: come agisce la forza di Lorentz su un conduttore immerso in un campo magnetico

TIPOLOGIE DI MOTORI ELETTRICI

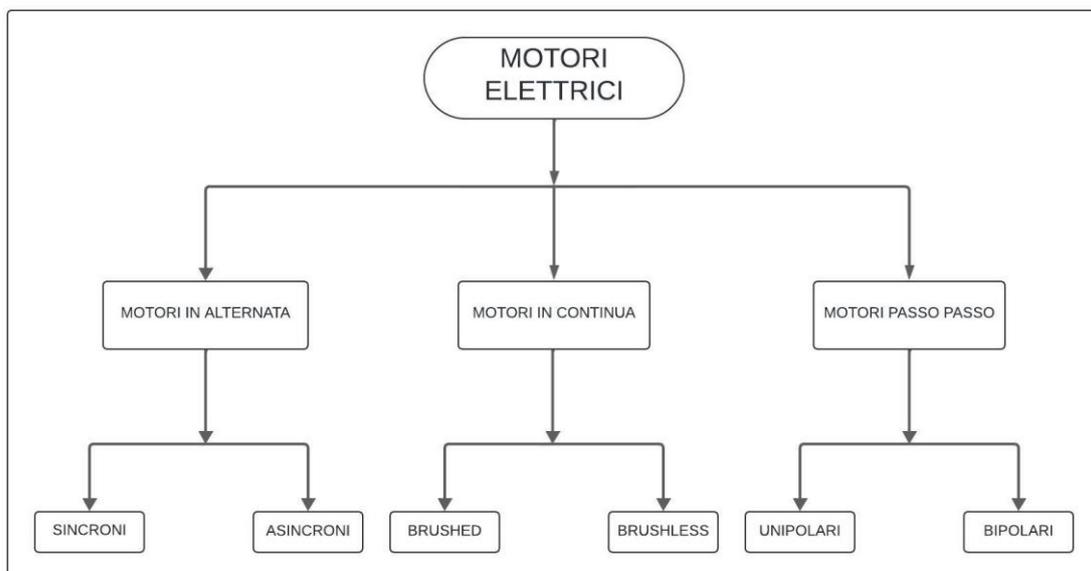


Figura 16: schema di suddivisione dei motori elettrici

Si andrà ora a fornire, in accordo al documento [13], una panoramica sulle componenti fondamentali di un motore elettrico, in modo da poter affrontare con maggiore chiarezza, il funzionamento di un motore brushless.

Seguirà successivamente la descrizione della modalità di pilotaggio e quali vantaggi si possono trarre nel loro utilizzo.

Innanzitutto, un motore elettrico è una macchina elettrica che, sfruttando il campo magnetico, trasforma l'energia elettrica in energia meccanica.

Ogni motore elettrico è composto da due parti fondamentali:

- **Statore**
- **Rotore**

Lo statore è la parte fissa, mentre il rotore, come dice il nome stesso, è la parte che viene messa in rotazione generando energia meccanica.

Una delle due parti è realizzata sfruttando dei magneti permanenti, mentre l'altra è realizzata con degli avvolgimenti di rame smaltato (bobine).

I magneti permanenti creano un campo magnetico fisso, mentre le bobine creano il campo quando attraversate da corrente elettrica.

Tenendo conto di ciò, la contrapposizione dei campi magnetici generati da rotore e statore, permettono di avviare il moto rotazionale del motore.

È chiaro che, affinché si abbia un moto continuo, il campo magnetico sugli avvolgimenti deve variare continuamente.

MOTORE BRUSHLESS

Il motore brushless è un motore elettrico in corrente continua senza spazzole caratterizzato da un rotore a magneti permanenti e uno statore realizzato con avvolgimenti di rame smaltato.

A differenza del motore con spazzole, non si ha bisogno di un contatto elettrico tra rotore e statore in quanto la presenza dei magneti permanenti genera autonomamente il campo magnetico rotorico.

Questo implica che la variazione del campo magnetico sugli avvolgimenti dello statore, non avviene meccanicamente ma elettronicamente.

FUNZIONAMENTO

Si supponga di considerare tre coppie di avvolgimenti “a”, “b” e “c”, nello statore. (Figura 16)



Figura 16: schema del rotore a magneti permanenti e statore ad avvolgimenti

Il funzionamento di tale motore si basa sul semplice concetto di attrazione e repulsione dei poli magnetici, in virtù del quale polo N-S si attraggono mentre N-N o S-S si respingono.

Nella prossima immagine (Figura 17), è possibile osservare come, variando in modo opportuno l'alimentazione delle bobine, con conseguente variazione del campo magnetico statorico, è possibile mettere in rotazione il motore.

Il dispositivo per mezzo del quale è possibile innescare questo meccanismo, prende il nome di **inverter**.

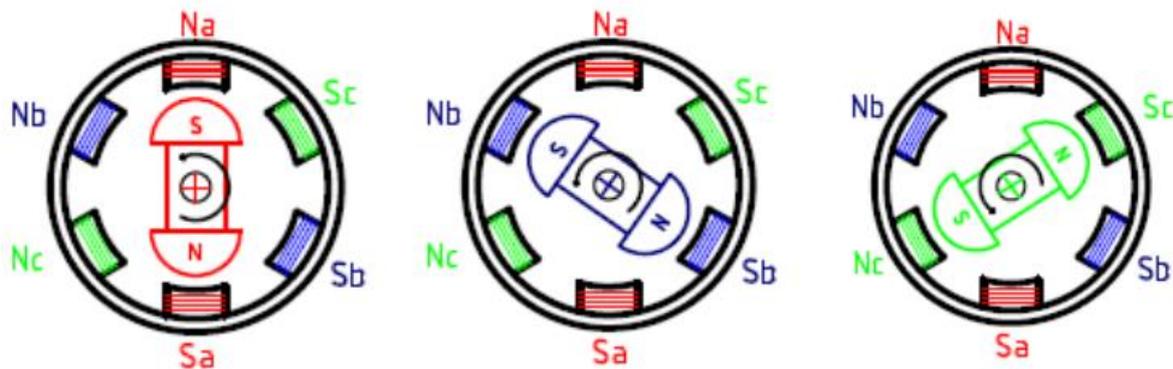


Figura 17: variazione del campo statorico con conseguente rotazione del rotore

È chiaro che per avere un moto continuo, gli avvolgimenti devono essere alimentati in modo corretto, e per questo motivo si utilizzano degli encoder o dei sensori ad effetto Hall che consentono di rilevare quale degli avvolgimenti è alimentato in modo da variare opportunamente il campo statorico.

L'**inverter**, oltre ad alimentare in modo sequenziale gli avvolgimenti dello statore, si occupa del controllo della velocità di rotazione del motore aumentando o diminuendo la frequenza di eccitazione delle bobine stesse, ovvero sfruttando un opportuno segnale PWM.

Invertendo la sequenza di eccitazione inoltre, varierà il senso di rotazione.

Di seguito, senza entrare nel dettaglio del suo funzionamento, si riporta uno schema di principio del pilotaggio di un motore brushless con tre avvolgimenti nello statore. (Figura 18)

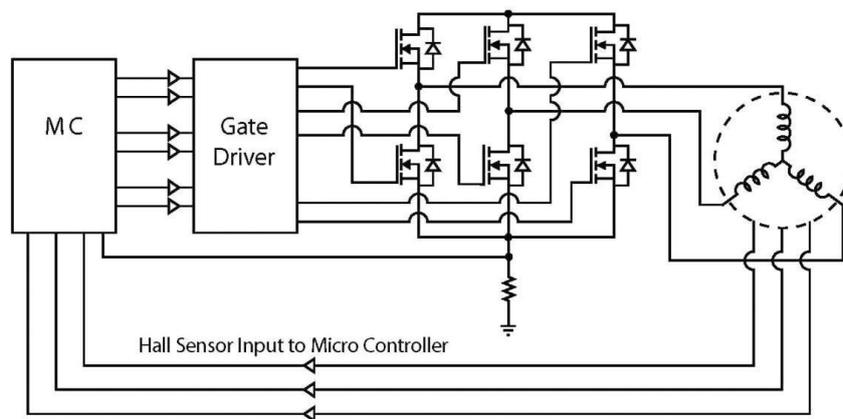


Figura 18: schema di principio del sistema di pilotaggio di un motore brushless

Per la descrizione del segnale PWM si rimanda al Capitolo 3.

VANTAGGI E SVANTAGGI

I principali vantaggi che si possono trarre nell'utilizzo di questi motori, risiedono nel fatto che a differenza dei motori brushed, non ci sono le spazzole.

L'assenza di spazzole, determina una ridotta manutenzione, assenza di limitazioni ambientali nell'utilizzo, assenza di scintille durante il funzionamento, minore rumore elettrico e acustico irradiato, maggiore rendimento, affidabilità e longevità nel tempo, e infine un campo di variazione della velocità di rotazione più ampio grazie all'inverter.

Il principale svantaggio invece sta nel maggiore costo. Il sistema di sensori per il riconoscimento della bobina eccitata e l'inverter per il pilotaggio determinano un considerevole aumento del costo.

2.2 RILEVARE LA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DELL'ELICA STUDIANDO LE VIBRAZIONI

Nel paragrafo precedente sono stati descritti i due componenti cruciali nel funzionamento del drone: elica e motore. In particolare, si è visto come il motore elettrico sia in grado di convertire energia elettrica in energia meccanica. Mentre l'elica, in virtù della sua geometria e composizione è in grado di sfruttare tale energia meccanica per generare una rotazione permettendo così al drone di sollevarsi e manovrare nello spazio aereo.

Ora bisogna comprendere come, dal moto dell'elica si possa rilevare un segnale di vibrazione e come questo può ricondursi alla velocità di rotazione della stessa.

Per comprendere tale meccanismo, occorre soffermarsi sul funzionamento dell'elica.

Nel sottoparagrafo 2.1.1 si è detto:

“Essendo l'elica vincolata all'albero motore, essa è in grado di assorbire la coppia generata e mettersi in rotazione attorno al proprio asse. Grazie al moto rotatorio e alla geometria delle pale, l'elica è in grado di veicolare l'aria attraverso essa, generando la forza traente necessaria per far sollevare il drone e fargli compiere un moto traslatorio.”

Ed è proprio in questo meccanismo che si generano le vibrazioni.

Infatti durante la sua rotazione con il conseguente convoglio dell'aria, le pale dell'elica, di materiale plastico, si deformano elasticamente, generando così una forza elastica che liberandosi, produce su di esse un movimento di natura oscillatoria, del tutto conforme con una vibrazione.

La vibrazione generatasi sulle pale, si ripercuote sul mozzo e si propaga tramite l'albero motore fino alla struttura su quale il sistema è posizionato. Al di sotto dell'elica, come possibile vedere in Figura 19, è posizionato un accelerometro MEMS, che vibrando assieme alla struttura, è in grado di rilevarla. Analizzando a quel punto il segnale di vibrazione (sotto forma di accelerazione), e processandolo nel dominio della frequenza è possibile rilevare la componente armonica relativa alla vibrazione indotta dalla rotazione dell'elica. E chiaramente, maggiore sarà la velocità di rotazione, maggiore sarà la frequenza della vibrazione rilevata.



Figura 19: sistema motore-elica di drone con accelerometro

Capitolo 3

Strumenti Hardware e Software

In questo capitolo si andranno a descrivere i principali strumenti hardware e software impiegati in questo lavoro di tesi. Nel particolare, si andranno a fornire le principali specifiche tecniche del sensore accelerometrico ADXL335 e le caratteristiche dell'apparato Moku:Go con il relativo applicativo Moku. In relazione all'apparato Moku:Go, si andranno ad approfondire con maggiore dettaglio:

- Oscilloscopio digitale
- Generatore di segnale e PWM

3.1 ACCELEROMETRO MEMS ADXL355

Nel paragrafo 1.2 si è descritto in maniera dettagliata il funzionamento degli accelerometri capacitivi e MEMS. In particolare si è visto come sia possibile misurare l'accelerazione di un corpo analizzando la variazione della capacità di un condensatore differenziale.

Appartiene a questa tipologia di sensori anche l'accelerometro ADXL335, un accelerometro capacitivo MEMS con uscita analogica in tensione. (Figura 20)

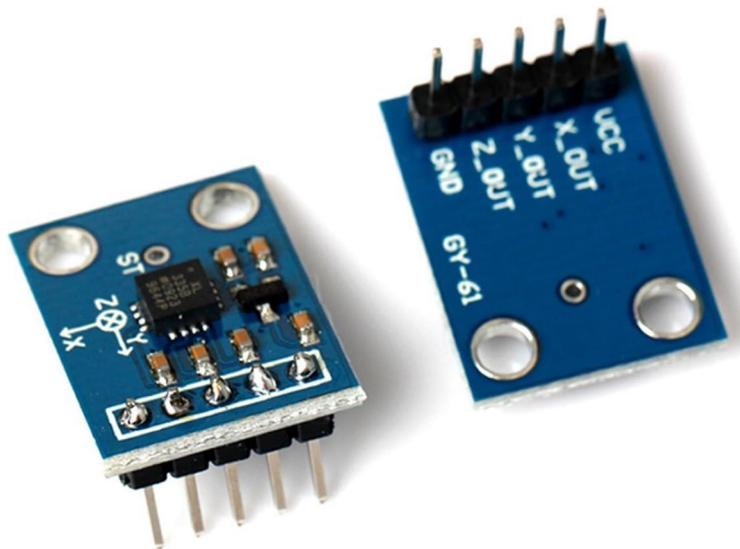


Figura 20: sensore accelerometrico ADXL335

Come è possibile notare dalla figura, tale dispositivo è caratterizzato da cinque pin, due dei quali vengono utilizzati per alimentare il sensore, mentre i restanti tre sono le tre uscite analogiche corrispondenti alle coordinate spaziali x,y,z.

Dal datasheet fornito dal produttore (Analog Devices) è possibile apprezzare le seguenti principali caratteristiche [14] :

Tabella 1: specifiche tecniche del sensore di accelerazione ADXL335

Caratteristiche	Alimentazione	MIN	TYPICAL	MAX
Sensitivity	V _{cc} = 3 V	270 mV/g	300 mV/g	330 mV/g
0 g X,Y-OUT	V _{cc} = 3 V	1.35 V	1.50 V	1.65 V
0 g Z-OUT	V _{cc} = 3 V	1.20 V	1.50 V	1.80 V

Per verificare il funzionamento del sensore, è stata effettuata una prova preliminare che sarà discussa con cura nel Capitolo 4.

3.2 APPARATO MOKU:GO



Figura 21: apparato Moku:Go

In Figura 21 è possibile apprezzare l'apparato Moku:Go, una piattaforma hardware portatile progettata per laboratori didattici. Con un front-end analogico di alta qualità e un potente FPGA Zynq 7020, offre fino a 12 strumenti affidabili e alimentatori programmabili opzionali con capacità di elaborazione in tempo reale.

In accordo alla documentazione [15], fornita dal costruttore (LIQUID INSTRUMENTS), si andrà ora a fornire un elenco degli strumenti offerti dall'apparato con alcuni possibili impieghi:

- **Generatore di forme d'onda arbitrarie:**

- Generazione casuale del modello
- Simulazione della risposta del sistema
- Produzione di segnali additivi
- Simulazione della funzione di risposta dello strumento

- **Datalogger a 2 canali:**

- Monitoraggio della temperatura
- Analisi delle vibrazioni
- Monitoraggio ambientale
- Altre registrazioni dati del sensore

- **Analizzatore logico e generatore di pattern:**

- Simulazione del segnale
- Progettazione di circuiti digitali
- Diagnosi della comunicazione digitale
- Sorgente di clock

- **Oscilloscopio e voltmetro 30 MHz:**

- Monitoraggio e analisi del segnale
- Progettazione e caratterizzazione di circuiti
- Allineamento del fotorilevatore
- Test di sistema automatizzati
- Test e debug del sistema

- **Generatore di forme d'onda 20 MHz:**

- Simulazione del segnale
- Progettazione e caratterizzazione di circuiti
- Sincronizzazione del sistema
- Sorgente dell'orologio
- Caratterizzazione dell'amplificatore operazionale

- **Analizzatore di spettro in tempo reale 30 MHz:**

- Analisi nel dominio della frequenza
- Caratterizzazione della risposta del sistema
- Misurazione del rumore
- Identificazione del segnale spurio

- **Generatore di filtri FIR:**

- Progettazione del sistema
- Controllo a circuito chiuso
- Filtraggio del rumore
- Amplificazione del segnale

- **Analizzatore di risposta in frequenza 20 MHz:**

- Misurazione dell'impedenza
- Misura di capacità/induttanza
- Analisi di stabilità
- Analisi dell'alimentazione
- Caratterizzazione del filtro EMI

- **Laser Lock Box per tecnica PDH:**

- Tecnica Pound-Drever-Hall
- Spettroscopia di precisione
- Rilevamento di onde gravitazionali
- Anello ad aggancio di fase personalizzato
- Altri sistemi di controllo a circuito chiuso

- **Amplificatore Lock-In 20 MHz:**

- Stabilizzazione della frequenza laser
- Demodulazione RF
- Radio analogica

- **Misuratore di fase:**

- Analisi dell'oscillatore
- Gamma ottica/ultrasuoni
- Rilevamento di onde gravitazionali
- Interferometria
- Circuito di aggancio fase

- **Controller PID a più ingressi e uscite:**

- Progettazione di sistemi di feedback e controllo
- Stabilizzazione della frequenza laser
- Regolazione della temperatura
- Posizionamento teste di scansione/fase campione
- Pressione, forza, portata e altri controlli

GENERATORE DI SEGNALE E PWM

Come si legge in [16], il generatore di segnale è genericamente lo strumento che fornisce la sollecitazione nell'analisi di rete, e assume diversi nomi a seconda del tipo di segnale che viene generato.

Dal punto di vista del modello, esso viene rappresentato mediante un generatore di tensione ideale con in serie un'impedenza, chiamata impedenza di uscita. Essa deve essere, al fine di evitare riflessioni o effetti indesiderati, reale e uguale all'impedenza delle linee di trasmissione utilizzate.

Una possibile classificazione dei generatori di segnale si basa sulla tipologia del segnale generato, si ha quindi:

- Oscillatore
- Generatore di funzioni
- Generatore di forme d'onda arbitrarie
- Generatore di rumore

La tipologia di generatore utilizzato in questo lavoro è il generatore di funzioni, con il quale è possibile generare più di una forma d'onda di riferimento con frequenza variabile in un campo ampio. Nel caso specifico di questa tesi, il generatore di funzioni è stato utilizzato per generare il segnale PWM necessario al pilotaggio del motore del drone.

La modulazione di larghezza di impulso (PWM: pulse width modulation) è un tipo di modulazione digitale che consente di ottenere una tensione media variabile in funzione del rapporto tra la durata dell'impulso positivo T_{ON} rispetto all'intero periodo T della forma d'onda. Il rapporto tra T_{ON} e T prende nome di duty cycle.

In figura 22 è possibile apprezzare come, variando T_{ON} vari il duty cycle del segnale PWM generato.

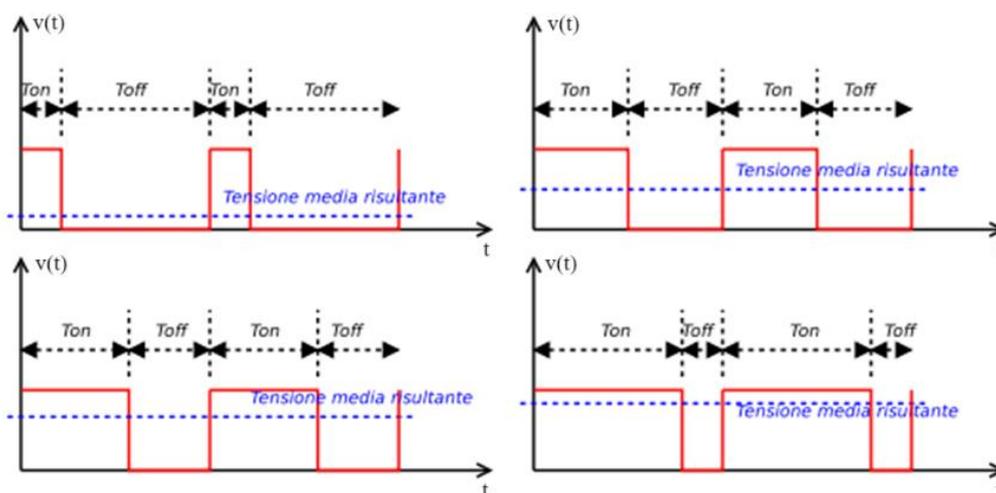


Figura 22: segnale PWM con tensione media risultante variabile in funzione del duty cycle

OSCILLOSCOPIO DIGITALE

Come si legge in [17], a differenza del multimetro digitale, che consente di misurare ddp costanti o al più variabili in modo sinusoidale con ampiezza costante, l'oscilloscopio consente di effettuare misure su qualsiasi segnale dipendente dal tempo, periodico o aperiodico.

Lo schema a blocchi di un oscilloscopio digitale è fornito in Figura 23.

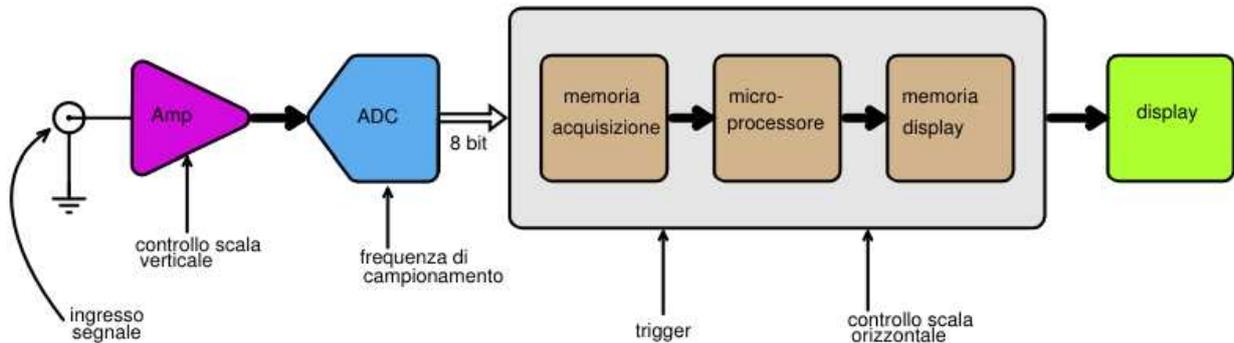


Figura 23: schema a blocchi di un oscilloscopio digitale (nel caso in esempio ci si riferisce ad una risoluzione di 8 bit dell'ADC)

Il segnale di ingresso, viene amplificato e convertito in digitale mediante un ADC. È chiaro che, ogni operazione di conversione analogico digitale, deve essere effettuata in modo tale da perdere il minor contenuto informativo possibile.

Successivamente, il segnale digitalizzato, viene bufferizzato e processato per poterlo visualizzare sul display.

Ad esempio dato il seguente segnale sinusoidale:

$$v(t) = 0.2 \sin(2\pi ft) \text{ V}$$
$$f = 5000 \text{ Hz}$$

l'oscilloscopio restituisce, lungo l'asse delle ascisse la base dei tempi e sull'asse delle ordinate, i valori di ampiezza assunti dal segnale.

Tramite tale rappresentazione, è possibile poi andare a calcolare, sfruttando le funzionalità interne allo strumento, tutta una serie di parametri legati alla forma d'onda che si sta analizzando, come:

- Valore massimo
- Escursione del segnale
- Periodo
- Valore efficace
- Energia e/o potenza
- Segnale Derivata
- Segnale Integrale
- Modulazione del segnale

In Figura 24 è possibile apprezzare il segnale $v(t)$ con alcuni parametri ad esso associati, visualizzati sull'oscilloscopio interno all'apparato Moku:Go, sfruttando l'applicativo Moku.

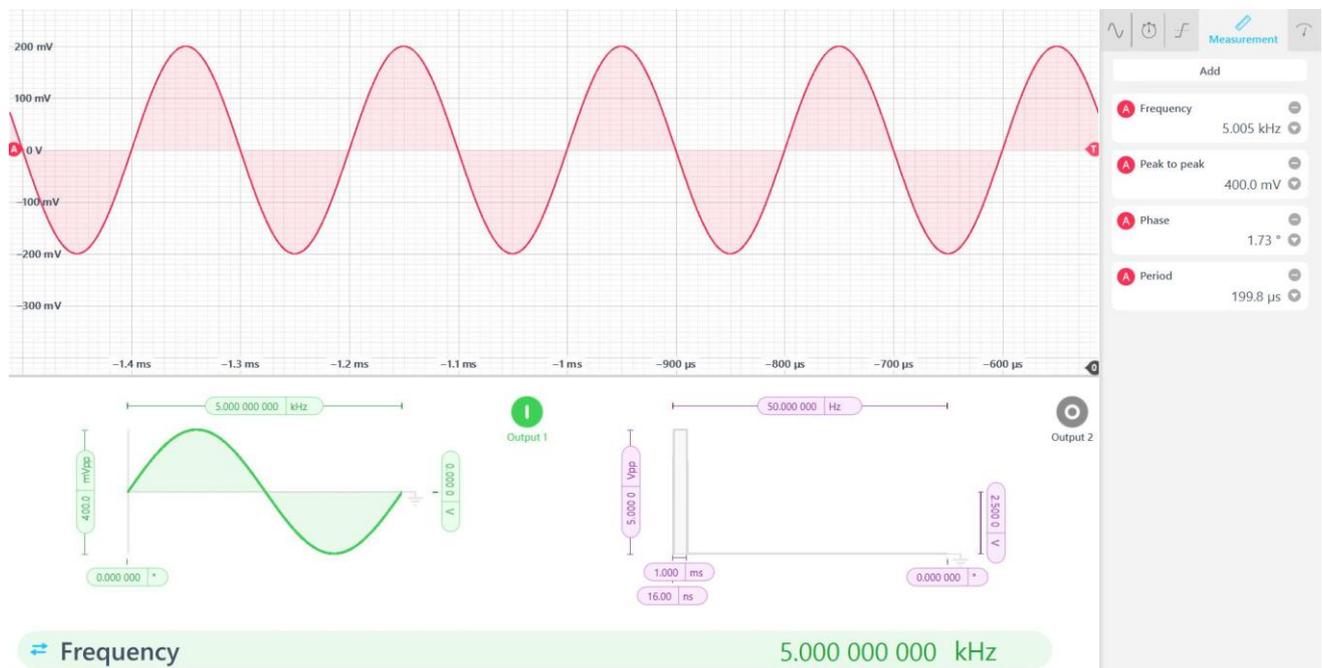


Figura 23: segnale sinusoidale visualizzato sull'oscilloscopio fornito dall'apparato Moku:Go mediante applicativo Moku

Tramite l'applicativo, è possibile accedere a tutti gli strumenti interni all'apparato Moku:Go, dal generatore di segnale o oscilloscopio, fino a strumenti più complessi quali l'analizzatore della risposta in frequenza di sistemi lineari.

Oltre a questi strumenti, esso permette di usufruire della modalità MULTIINSTRUMENTS, grazie alla quale è possibile usufruire di due strumenti differenti contemporaneamente.

In particolare, in questo lavoro di tesi, la modalità multi strumento è stata utilizzata per combinare il funzionamento del generatore di funzioni e oscilloscopio.

Capitolo 4

Prove sperimentali

Nella prima parte di questo capitolo si andrà a descrivere la fase preliminare delle prove sperimentali. Fase in cui si è verificata l'attendibilità tra i dati forniti nel datasheet del sensore ADXL335 e i dati di laboratorio. Seguitamente a ciò, si è allestito il banco di misura, completo di tutta la sensoristica e strumentazione necessaria, per procedere all'analisi della rotazione delle eliche di drone.

I successivi paragrafi andranno invece ad analizzare le due prove effettuate:

- Misura e controllo della velocità di rotazione di un'elica di drone, mediante pilotaggio Moku:Go – Matlab.
- Misura della velocità di rotazione di due eliche di drone tramite applicativo Moku.

4.1 FASE PRELIMINARE

Oggetto della fase preliminare sono state:

- Verifica dell'attendibilità tra i dati forniti dal costruttore del sensore e dati sperimentali.
- Allestimento banco di misura.
- Verifica della concordanza tra la velocità di rotazione dell'elica di drone misurata mediante tachimetro laser e la velocità misurata analizzando il segnale di vibrazione generato dalla rotazione dell'elica.

Per prima cosa, è stato alimentato il sensore e lo si è posizionato in modo tale che l'accelerazione di gravità cadesse sul piano xy, a quel punto tramite sonda per oscilloscopio, si è constatato che la tensione in uscita dal sensore V_{Z-OUT} è di circa 1.430 V. Mentre, quando l'accelerazione è diretta lungo l'asse z, la tensione di uscita aumenta ad un valore di circa 1.710 V, il che è perfettamente in linea con i dati presenti nel datasheet del costruttore. Infine risultati analoghi, sono stati riscontrati anche nel momento in cui l'accelerazione era diretta lungo l'asse x e y.

Dopo aver effettuato le opportune verifiche sull'accelerometro, si è realizzato il banco di misura, completo della sensoristica e strumentazione necessaria al rilevamento dei segnali di vibrazione scaturiti dalla rotazione delle eliche di drone.

Si riporta in seguito lo schema a blocchi del banco di misura realizzato, completo di descrizione delle varie parti e l'immagine dello stesso realizzato in laboratorio.

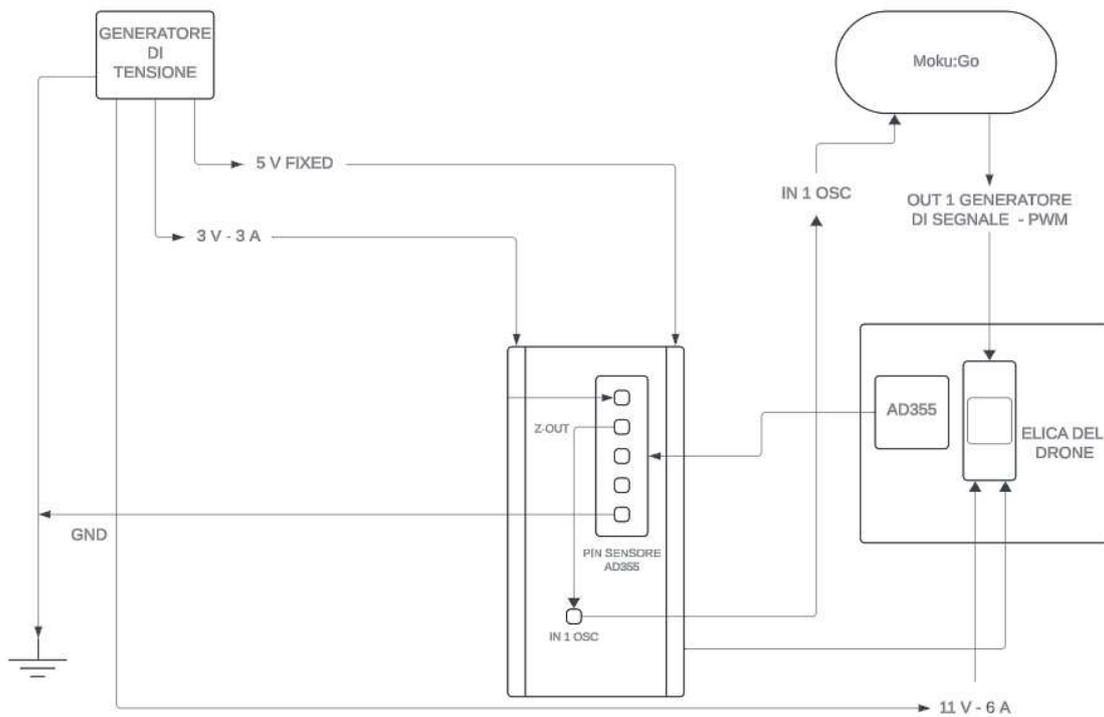


Figura 24: schema a blocchi del banco di misura

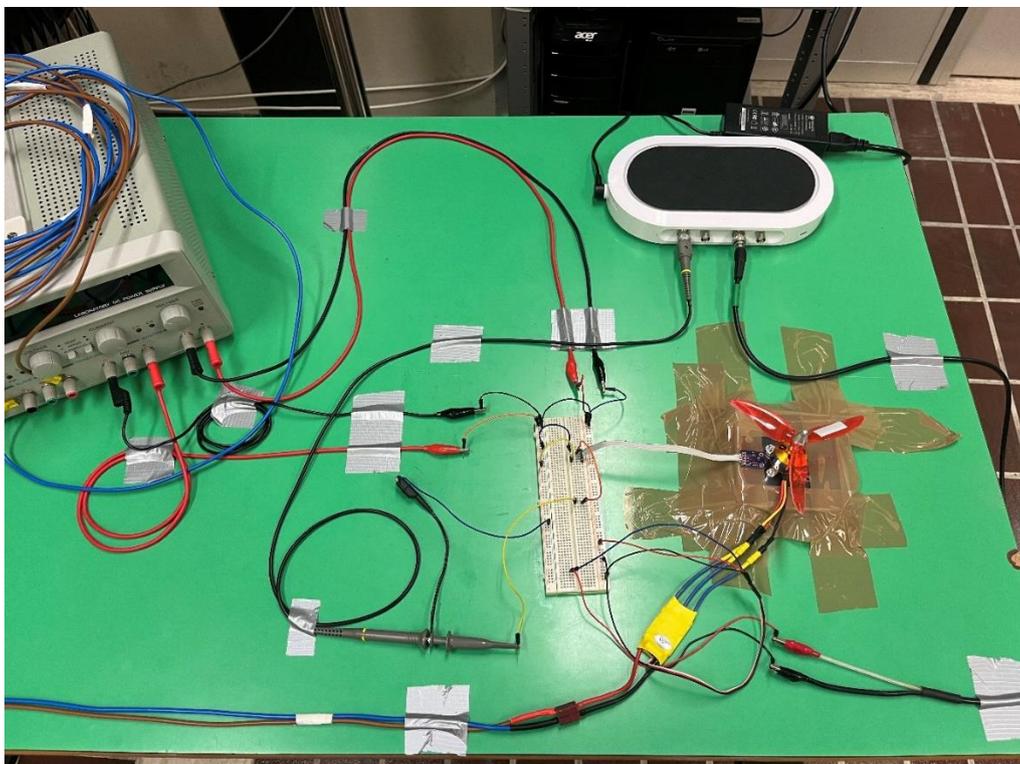


Figura 25: immagine del banco di misura allestito in laboratorio

Come si può vedere in Figura 24 e Figura 25, l'elica del drone è stata fissata sul tavolo del laboratorio in modo che potesse essere il più stabile possibile. Successivamente, è stato incollato l'accelerometro al di sotto dell'elica in modo da poter rilevare le accelerazioni prevalentemente lungo l'asse z. Dallo schema si può notare la presenza di un alimentatore da banco, dal quale sono state prelevate le tensioni di alimentazione necessarie al funzionamento del sensore, motore e relativo driver. In particolare il motore richiede 11 V di tensione ma con un assorbimento di corrente superiore ai 3 A forniti da un singolo alimentatore, motivo per il quale due alimentatori da 11 V – 3 A sono stati collegati in parallelo.

In seguito all'allestimento del banco di misura, si è configurato l'apparato Moku:Go. In particolare, si è utilizzato il Canale A – In 1 dell'oscilloscopio per acquisire il segnale di tensione in uscita dall'accelerometro e il Canale A – Out 1 del generatore di funzioni per generare il segnale PWM necessario per il pilotaggio del motore.

Il segnale PWM (Figura 26) presenta le seguenti caratteristiche:

$$V_{pp} = 5 V$$

$$f = 50 Hz$$

$$V_{offset} = 2.5 V$$

$$5\% \leq DC (Duty Cycle) \leq 10\%$$

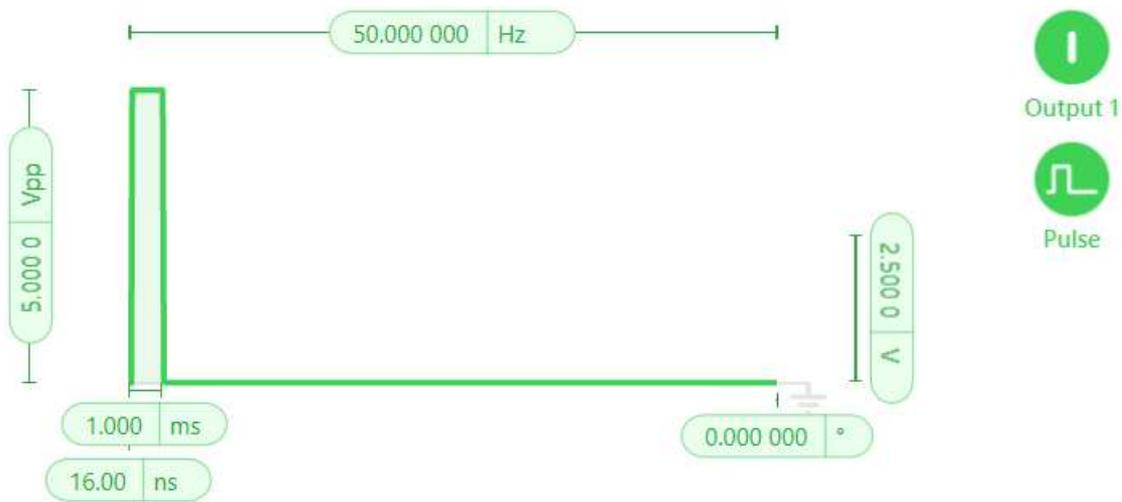


Figura 26: segnale PWM utilizzato per il pilotaggio del motore

Dopo aver fornito le alimentazioni e il segnale PWM al motore, si è proceduto con la sua taratura. Tale operazione consiste nel fornire al driver del motore i limiti, inferiore e superiore, di duty cycle (DC), che questo può ammettere in ingresso secondo datasheet.

Durante la taratura si è visto che con un duty cycle del 5%, ovvero $T_{ON} = 1 \text{ ms}$, esso risulta fermo. Mentre a partire da un valore di T_{ON} maggiore o uguale a 1.05 ms il motore si attiva e aumenta la sua velocità di rotazione. Tuttavia, si è potuto osservare che fornendo direttamente una PWM con un T_{ON} di 1.05 ms, questa non è sufficiente per mettere in rotazione l'elica, a meno che non si fornisca prima una PWM con $T_{ON} = 1.1 \text{ ms}$ e poi lo si abbassi a 1.05 ms. Al di sotto di tale valore, l'elica è ferma, quindi 1.05 ms si è preso come valore minimo di DC da fornire al motore affinché questo possa mettersi in rotazione. Come valore massimo, relativamente alle prove effettuate si è preso un DC del 7.5% corrispondente a un T_{ON} di 1.5 ms.

A seguito della taratura del motore è iniziata la fase iniziale di rilevamento dati.

Partendo da un DC del 5.5% e aumentandolo di volta in volta con un passo dello 0.25%, si è proceduto col visualizzare sull'oscilloscopio i segnali V_{Z-OUT} in uscita all'accelerometro e con l'acquisizione della velocità di rotazione dell'elica utilizzando un tachimetro laser.

Una volta visualizzati i dati questi sono stati salvati in formato Matlab ad alta risoluzione, in modo da poter essere processati in un secondo momento.

L'obiettivo dell'elaborazione del segnale digitale tramite Matlab, come ampiamente descritto nel Capitolo 1, è quello di caratterizzare il segnale di vibrazione rilevato nel dominio della frequenza. Dominio in cui risulta più agevole capire quali sono le componenti armoniche e le relative frequenze della vibrazione innescatasi.

In particolare, in questa fase, si è voluto verificare che ci fosse un'adeguata corrispondenza tra i valori di velocità in RPM rilevati mediante tachimetro laser e i valori di velocità misurati indirettamente analizzando i segnali di vibrazione in uscita dall'accelerometro.

Dal punto di vista pratico, si è calcolata la DFT (Discrete Fourier Transform) del segnale di tensione e si è ricercato il picco, a frequenza diversa da zero, caratterizzato dalla maggiore ampiezza.

Moltiplicando la frequenza corrispondente alla posizione del picco per 60, si è ottenuta la velocità in RPM di rotazione dell'elica di drone:

$$RPM = f * 60$$

Si riporta ora, in Figura 27, un grafico esplicativo della DFT del segnale di vibrazione innescato dalla rotazione dell'elica, quando il motore è pilotato da una PWM con DC = 6% ($T_{ON} = 1.2$ ms).

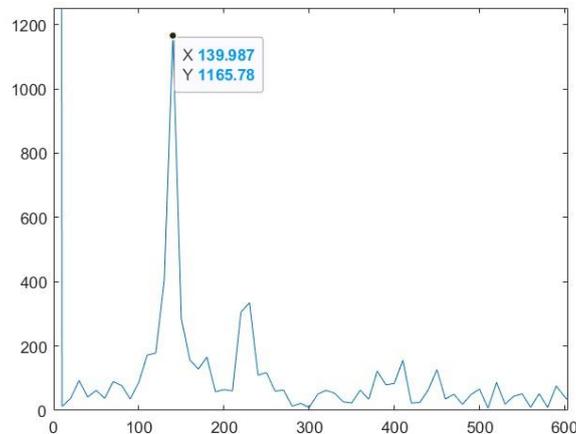


Figura 27: DFT del segnale di vibrazione innescato da una PWM con DC = 6%

Dall'immagine si può notare un picco a circa $f = 140$ Hz, moltiplicando f per 60 si ottiene 8400 RPM, il che, come riportato nelle tabelle sottostanti, non si discosta molto dai dati rilevati mediante tachimetro laser.

Si possono apprezzare ora le due tabelle, Tabella 2 e Tabella 3, riportanti per ogni valore di DC i valori di RPM misurati mediante tachimetro laser, i valori di RPM misurati indirettamente mediante analisi in frequenza con le relative deviazioni assolute e percentuali.

Tabella 2: valori di RPM misurati con tachimetro laser e valori di RPM misurati tramite analisi in frequenza

DC (ms)	RPM misurato	Frequenza del picco (Hz)	RPM post processing
1.1	5400	90	5400
1.15	7100	120	7200
1.2	8300	140	8400
1.25	9300	155	9300
1.3	10150	170	10200
1.35	11000	180	10800
1.4	11700	190	11400
1.45	12300	210	12600
1.5	12900	210	12600

Tabella 3: deviazione assoluta e percentuale rispetto al valore di RPM misurato in laboratorio

DC (ms)	DEVIAZIONE RISPETTO AL VALORE MISURATO IN LABORATORIO (RPM)	DEVIAZIONE PERCENTUALE
1.1	0	0%
1.15	100	1.41%
1.2	100	1.20%
1.25	0	0%
1.3	50	0.49%
1.35	200	1.82%
1.4	300	2.56%
1.45	300	2.44%
1.5	300	2.33%

4.2 MISURA E CONTROLLO DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI UN'ELICA DI DRONE

Oggetto di questa trattazione è l'utilizzo dell'apparato Moku:Go tramite Matlab in maniera tale da implementare un sistema a catena chiusa che sia in grado di misurare e controllare in tempo reale la velocità di rotazione di un'elica di drone, in modo da adeguarla ad un set point prestabilito.

In particolare, per il set point si è preso il valore di RPM misurato tramite tachimetro laser durante la fase preliminare.

Si riporta ora (Figura 28), il diagramma di flusso del codice implementato.

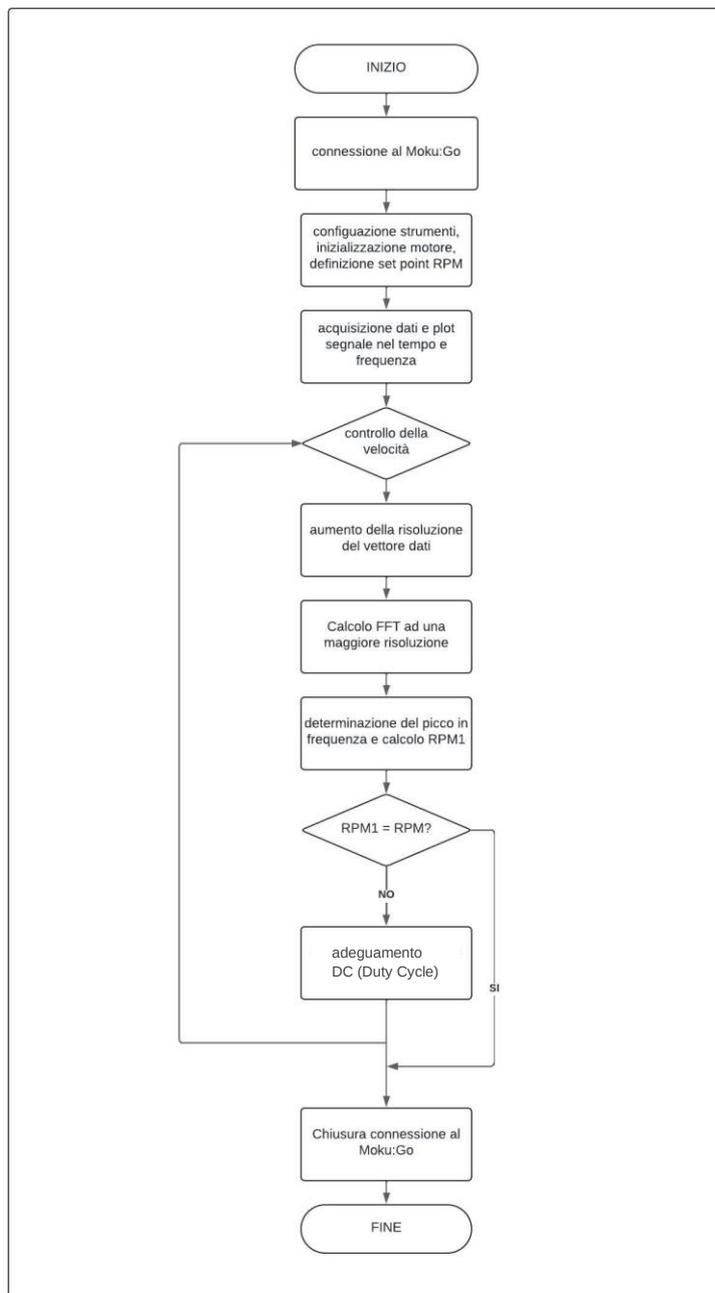


Figura 28: diagramma di flusso del codice implementato

Di seguito invece verrà riportato e descritto il codice Matlab per il controllo della velocità di un'elica di drone, andandolo a suddividere in parti riferite alle diverse operazioni svolte.

PARTE INIZIALE DEL CODICE

```
%% Connessione al moku
% configurare il moku:Go come multistrumento utilizzando l'identificativo
% platform_id 2
m = MokuMultiInstrument('192.168.73.1',2,force_connect=true);
% creo l'oggetto m , ovvero configuro il moku:go come multistrumento
pause(1) % attendo 1 secondo
try

    % configurazione degli strumenti
    % Generatore di segnale nello slot 2
    % Oscilloscopio nello slot 1
    wg = m.set_instrument(2, @MokuWaveformGenerator);
    osc = m.set_instrument(1, @MokuOscilloscope);

    % configure routing
    connections = [struct('source', 'Input1', 'destination', 'Slot1InA');
                  struct('source', 'Input2', 'destination', 'Slot1InB');
                  struct('source', 'Slot2OutA', 'destination', 'Output1');
                  % struct('source', 'Slot2A', 'destination', 'Output1')
                  ];
    % si configurano gli ingressi InA e InB dello slot 1, ovvero dell'
    % oscilloscopio come Input1 e Input2.
    % mentre l'uscita A del generatore di segnale (slot 2), è configurata
    % come Output1
    m.set_connections(connections); % realizzazione connessioni

    % configure frontend
    m.set_frontend(1, "1M0hm", "DC", "0dB");

    % Configure waveform generator
    % generate waveform
    %wg.generate_waveform(1, "Sine");
    wg.generate_waveform(1, 'Square', 'amplitude',5,'frequency', 50, ...
        'offset',2.5, 'duty', 5);
    % si genera una PWM con frequenza di 50 Hz , Vpp=5V, offeset= 2.5V e DC
    % del 5% in modo che si possa inizializzare correttamente il motore
    % dell'elica
    pause(10)% attendo 10 secondi
    DC = 5.5; % definizione set point
    DC1 = DC;
    RPM = 5400; % il valore di rpm valutato in laboratorio tramite
    % tachimetro laser corrispondenti ad un DC di 1.1ms è 5400 RPM
    wg.generate_waveform(1, 'Square', 'amplitude',5,'frequency', 50, ...
        'offset',2.5, 'duty', DC);
    % dopo 10 secondi, si genera una nuova PWM con le stesse caratteristica
    % ma il duty cycle passa al 5.5% in modo che il motore possa iniziare a
    % girare
    % impostazione base dei tempi dell'oscilloscopio
    osc.set_timebase(-5e-3, 50e-3);
```

Come descritto nel Capitolo 3, per poter usufruire contemporaneamente del generatore di funzioni ed oscilloscopio, si deve configurare il Moku:Go con la modalità MULTIINSTRUMENTS.

Infatti, il primo passo è stato creare l'oggetto "m" e configurarlo come strumento multiplo. In seguito si è proceduto con la configurazione delle connessioni interne, in particolare lo slot 2 è stato configurato come generatore di funzioni, in modo che sull' Out 1 si abbia il segnale PWM necessario al pilotaggio del motore, mentre lo slot 1 è stato configurato come oscilloscopio, in modo da poter usare i due ingressi A e B per visualizzare le uscite V_{Z-OUT} e V_{Y-OUT} del sensore.

Dalle prove si è osservato che il motore non necessita una nuova calibrazione, tuttavia richiede un DC della PWM del 5% prima di darne uno maggiore.

Ovvero, ad esempio, se si genera una PWM con DC del 5.5% e la si usa direttamente per pilotare il motore, questo segnala una situazione di errore. Mentre se dapprima viene impostato il DC al 5% e poi lo si aumenta, il motore non rileva errori e si mette in rotazione. Questo problema è stato risolto tramite software, generando dapprima una PWM con DC del 5%, che dopo aver atteso un tempo fisso pari 10 secondi si incrementa a 5.5%. In questo modo il motore parte da fermo e successivamente, dopo aver atteso 10 secondi, inizia a girare.

Ora, prima di procedere con l'analisi della parte centrale del codice, se ne andrà a fornire l'obiettivo e il principio utilizzato per raggiungerlo.

Lo scopo di tale segmento di codice è realizzare un controllo sulla velocità di rotazione dell'elica, ricercando sullo spettro di ampiezza del segnale di tensione in uscita all'accelerometro, il picco relativo alla vibrazione generata dall'elica in rotazione.

Come visto in precedenza, il prodotto tra la frequenza in cui si presenta il picco e 60, restituisce il numero di giri per minuto (RPM) che l'elica compie. Una volta individuato il picco e calcolato il numero di giri per minuto compiuti dall'elica, si esegue un test in modo da capire se si è raggiunto immediatamente il set point impostato oppure occorre modificare il duty cycle della PWM che pilota il motore per raggiungerlo.

PARTE CENTRALE DEL CODICE

```
for v = 1 : 8 % ciclo for per aumentare il numero di campioni su cui
    % effettuo la DFT, aumentandone così la risoluzione
    data = osc.get_data();
    datiVett = [datiVett, data.ch1];

end
```

Sperimentalmente si è visto che il vettore dei dati e il vettore dei tempi hanno una lunghezza pari a 1024 campioni, il che potrebbe essere un problema circa la risoluzione della DFT, quindi si è deciso di calcolare la trasformata di Fourier su un vettore di 8192 campioni, denominato 'datiVett', dati dalla concatenazione di 8 vettori dei dati precedentemente acquisiti.

In questo modo lavorando su più campioni, aumenta la risoluzione della DFT a discapito chiaramente dell'onere computazionale.

```

data = osc.get_data(); % acquisisco i dati in real time
    set(lh(1), 'XData', data.time, 'YData', data.ch1);
    set(lh(2), 'XData', data.time, 'YData', data.ch2);
axis tight

```

Questa parte di codice permette l'acquisizione del segnale di tensione in uscita dal sensore e la sua visualizzazione nel dominio del tempo mediante l'oscilloscopio (Figura 29).

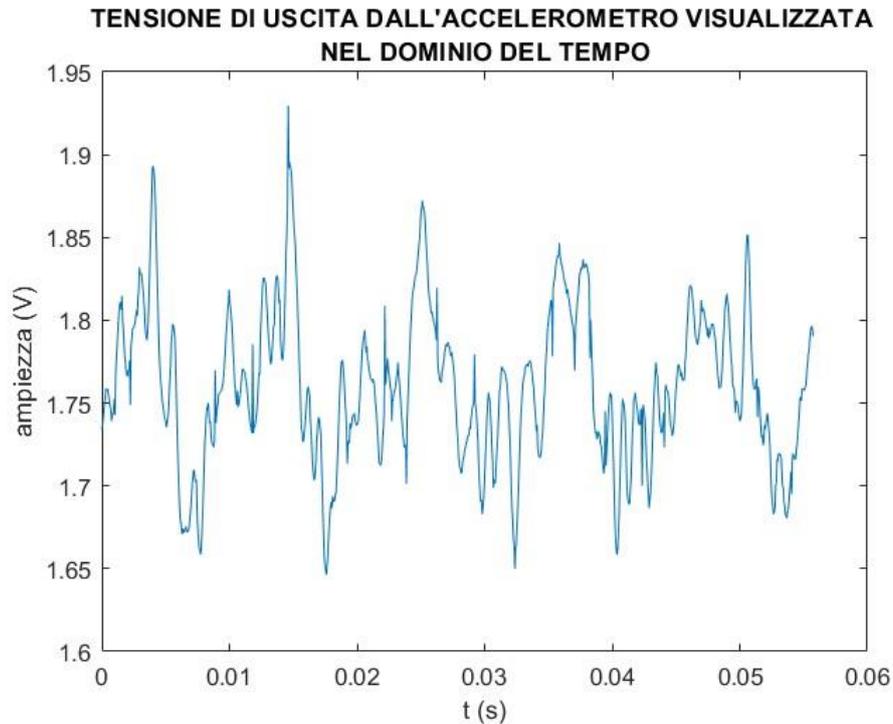


Figura 29: segnale di tensione in ingresso all'oscilloscopio, DC = 5.5%

```

DATIVETT = fft(datiVett); % calcolo la DFT a risoluzione maggiore
% per poter fare un'analisi migliore dello spettro
datiVett = []; % azzero il vettore 'datiVett' affinchè si ottenga
% sempre lo spettro desiderato
figure(4);
plot(frequenza1Hres(1:4096), abs(DATIVETT(1:4096)));
drawnow

```

Dopo aver realizzato il vettore “datiVett” contenente 8192 campioni del segnale di tensione in uscita dall'accelerometro, si calcola la DFT e ne si rappresenta il modulo (Figura 30).

Occorre però fare in questo caso un'osservazione molto importante:

se, dopo aver calcolato la DFT, non si azzera il vettore “datiVett”, alla successiva ripetizione del ciclo, si andrebbe a calcolare la DFT su un segnale caratterizzato da un numero di campioni maggiore rispetto a quelli desiderati. Mentre l'asse delle frequenze rispetto al quale si rappresenterebbe il modulo di tale DFT rimarrebbe inalterato, ovvero definito per un vettore di 8192 campioni e questo porterebbe ad ottenere una versione dello spettro affetta da uno zoom che aumenta ad ogni ripetizione.

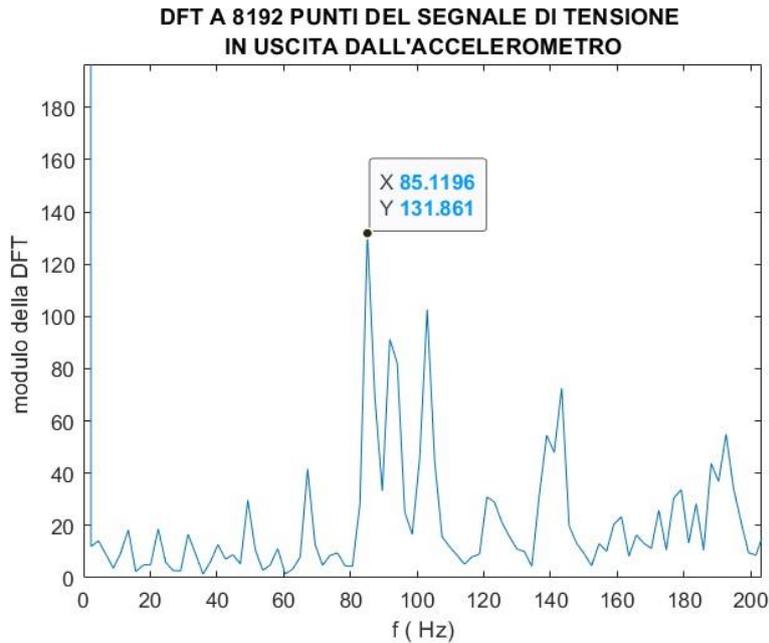


Figura 30: DFT ad alta risoluzione del segnale di tensione in uscita dal sensore, DC = 5.5%

```
[picco, i] = findpeaks(abs(DATIVETT(1:4096))); %ott. in uscita il
%vettore contenenti i picchi e l'indice di frequenza corrispondente
picco(1) = 0; % elimino la continua
[MAX,I] = max(picco);% calcolo il massimo e l'indice
indice = i(I);% calcolo l'indice corrispondente al valore di
% frequenza di interesse
f = frequenza1Hres(indice); % frequenza relativa al picco
RPM1 = f*60; %calcolo gli RPM moltiplicando la frequenza per 60
vettoreRPM = [vettoreRPM,RPM1]; %creo un vettore contenenti gli
% RPM calcolati
vettorePiccoMax = [vettorePiccoMax,MAX]; %creo un vettore con i
% valori relativi ai picchi trovati
```

Come descritto in precedenza, il passo successivo alla rappresentazione in frequenza del segnale di tensione in uscita dall' accelerometro è quello di ricercare il picco e la relativa frequenza, corrispondente alla vibrazione generata dall'elica in rotazione. La ricerca si basa sull'utilizzo della funzione matlab "findpeaks". L'istruzione:

```
[picco, i] = findpeaks(abs(DATIVETT(1:4096)));
```

restituisce in uscita due vettori , "picco" e "i".

Il primo vettore, contiene i valori di ampiezza relativi ai picchi presenti del modulo della DFT, mentre il secondo contiene l'indice corrispondente.

L'istruzione successiva è :

```
picco(1) = 0;
```

questa, permette di eliminare dal vettore "picco", la componente continua del segnale di tensione in uscita dall'accelerometro, che in frequenza, corrisponde a un picco nell'origine.

Tale operazione è di fondamentale importanza in quanto, sperimentalmente si è osservato che il picco, relativo alla vibrazione indotta dalla rotazione dell'elica, è caratterizzato dal massimo valore di ampiezza. Per giungere a tale conclusione però, occorre non prendere in considerazione il picco nell'origine. Dopo aver effettuato questa operazione si procede, mediante la funzione Matlab "max", a ricercare il picco di ampiezza massima presente nel modulo della DFT calcolata e la relativa frequenza. Questo infatti, permette di determinare il valore di RPM compiuti dall'elica in rotazione. Tutte queste istruzioni vengono effettuate iterativamente e di conseguenza, si salvano i valori trovati in due vettori:

- "vettoreRPM";
- "vettorePiccoMax".

```
% TEST SUL VALORE DI RPM %
    if(RPM1 <= RPM)
        DC1 = DC1 + 0.01; % scelgo un passo di 0.01%
        wg.generate_waveform(1, 'Square', 'amplitude',5,'frequency', 50,
...
        'offset',2.5, 'duty', DC1);
        pause(2)
    end

    if(RPM1 >= RPM )
        DC1 = DC1 - 0.01;
        wg.generate_waveform(1, 'Square', 'amplitude',5,'frequency', 50,
...
        'offset',2.5, 'duty', DC1);
        pause(2)
    end

    vettoreDC = [vettoreDC,DC1];

    if(RPM == RPM1)
        break
    end
    pause(0.1)
```

In questo segmento di codice si va ad effettuare il test sul valore di RPM calcolato in precedenza. Se il valore di RPM calcolato è inferiore al set point impostato, il valore di duty cycle della PWM generata per il pilotaggio del motore viene aumentato dello 0.01%. Nel caso in cui il valore di RPM calcolato sia maggiore del set point impostato, allora il duty cycle verrà diminuito dello 0.01%. Invece, se i due valori combaciano, l'esecuzione del ciclo viene interrotta. Anche in questo caso, per tenere traccia delle variazioni di duty cycle durante il controllo, i valori vengono iterativamente salvati all'interno del vettore "vettoreDC".

PARTE FINALE DEL CODICE

```
wg.generate_waveform(1, 'Square', 'amplitude',5,'frequency', 50, ...  
    'offset',2.5, 'duty', 5);  
pause(5)  
catch ME  
    % chiusura della connessione corrente al Moku:Go  
    m.relinquish_ownership();  
    rethrow(ME)  
end  
  
    m.relinquish_ownership();
```

Nel momento in cui l'esecuzione del controllo si interrompe, prima di chiudere la connessione con il Moku:Go, si reimposta il valore di duty cycle della PWM al 5%, in modo da spegnere il motore.

4.3 MISURA DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI DUE ELICHE DI DRONE

Prima di procedere con il rilevamento della velocità di rotazione di due eliche di drone, si è proceduto con la modifica del banco di misura implementato. In particolare è stata fissata una seconda elica sul banco da laboratorio in modo da renderla il più stabile possibile.

Poi, si è deciso di spostare l'accelerometro e posizionarlo tra le due eliche in modo tale da mettersi in una condizione di simmetria.

A quel punto, dopo aver tarato in maniera analoga al primo anche il secondo motore, tramite applicativo Moku, sono stati generati due segnali PWM aventi le stesse caratteristiche e tramite oscilloscopio si sono visualizzati i segnali di tensione in uscita dall'accelerometro.

Anche in questo caso, i dati in formato Matlab ad alta risoluzione, sono stati salvati in modo da poter essere processati a posteriori.

Obiettivo del processing, in questo caso, è quello di calcolare la DFT del segnale rilevato, in modo da capire:

- Se le due eliche, pilotate da segnali PWM uguali, ruotano alla stessa velocità
- Se è possibile discriminare la loro velocità di rotazione

L'analisi dei risultati relativi alle due prove effettuate si rimanda al Capitolo 5.

Capitolo 5

Analisi dei risultati

5.1 CONTROLLO DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI UN'ELICA DI DRONE

Per semplicità si riportano ora i grafici contenenti il segnale di tensione in uscita dall'accelerometro e la sua trasformata di Fourier per ogni prova effettuata. Si noti che, per ragioni grafiche, non è presente l'allineamento dell'asse delle frequenze.

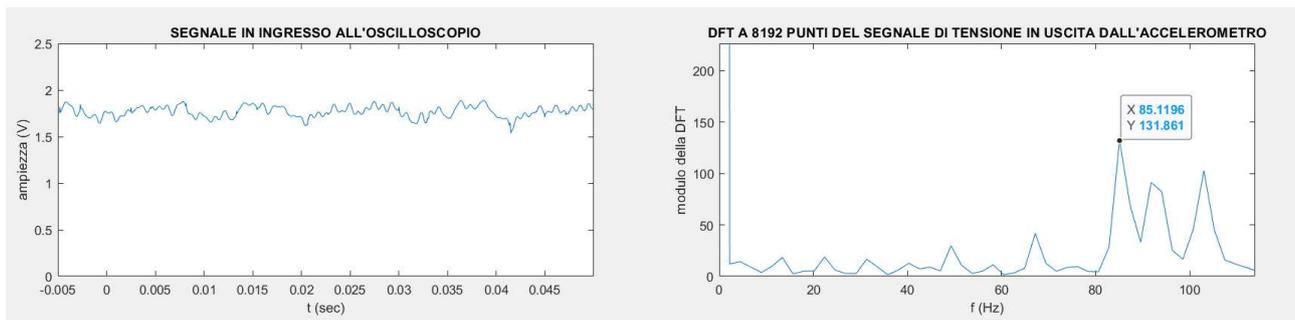


Figura 31: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 5.5%

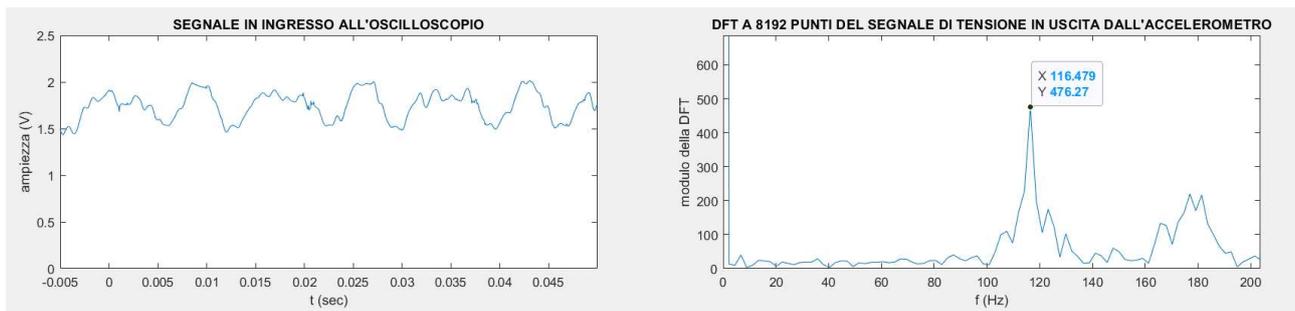


Figura 32: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 5.75%

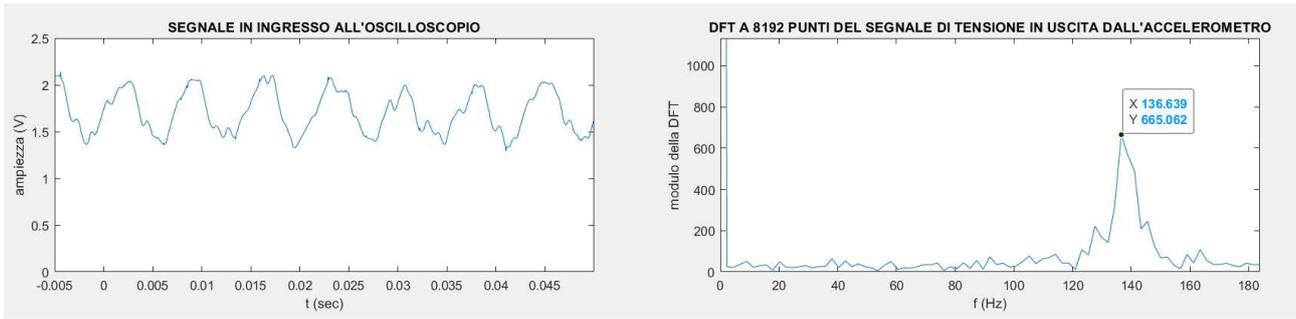


Figura 33: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 6%

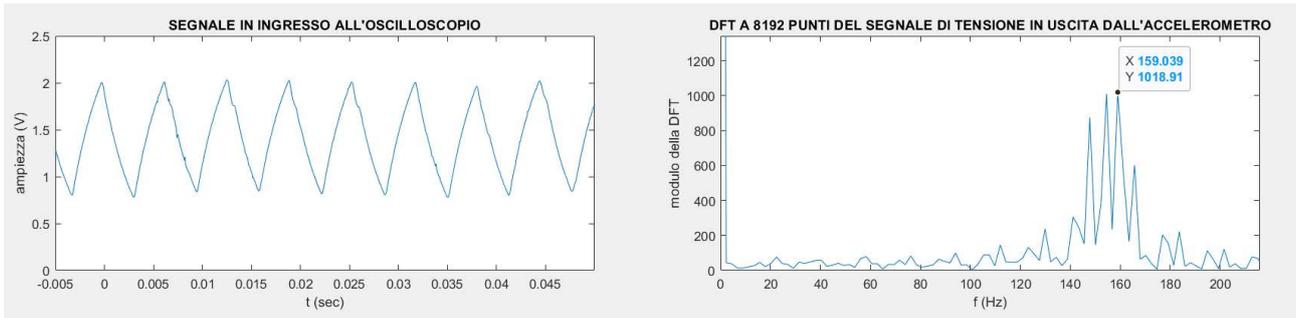


Figura 34: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 6.25%

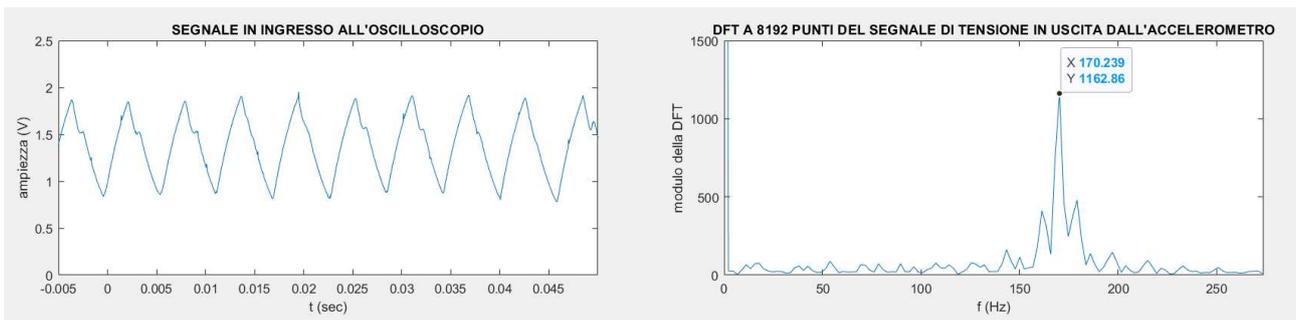


Figura 35: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 6.5%

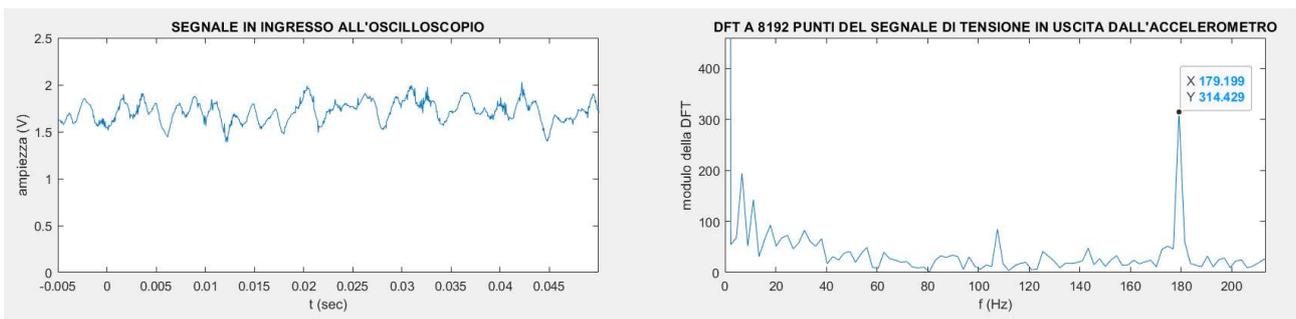


Figura 36: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 6.75%

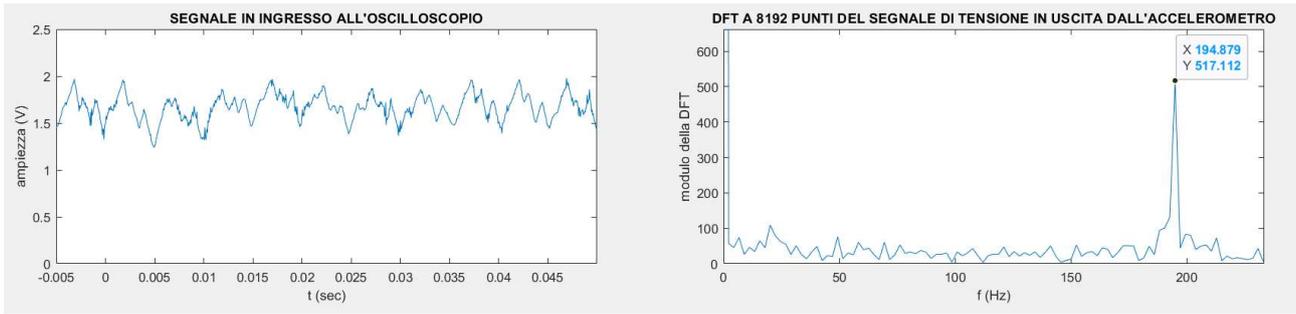


Figura 37: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 7%

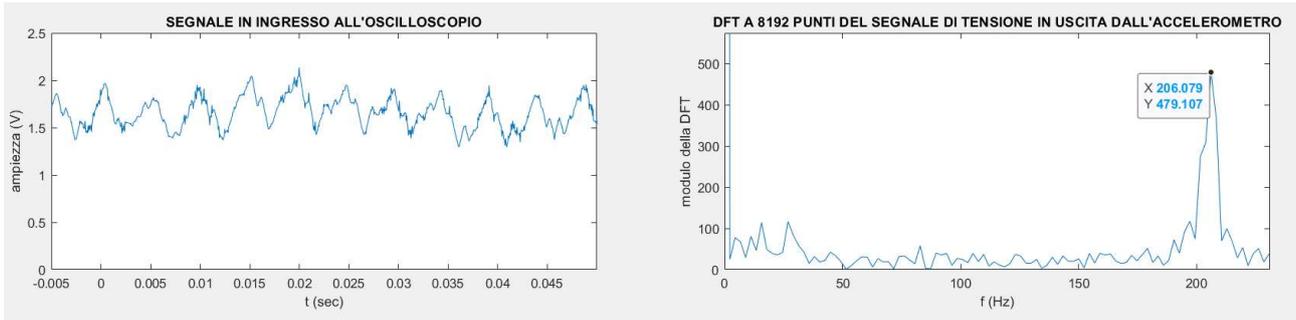


Figura 38: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 7.25%

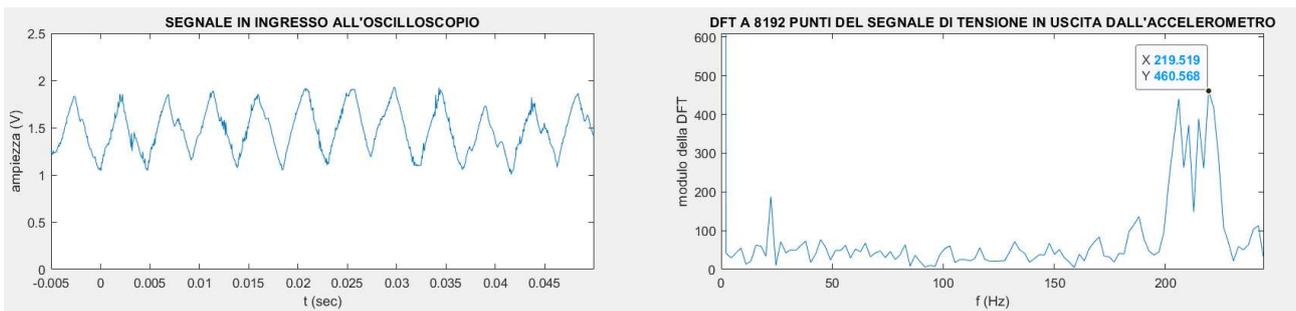


Figura 39: segnale di vibrazione nel tempo e in frequenza generato da una PWM con DC = 7.5%

Dalle immagini è possibile osservare che in ognuna delle prove effettuate, partendo da un duty cycle del 5.5% fino ad arrivare al 7.5%, dall'analisi in frequenza è possibile ricondursi alla velocità di rotazione dell'elica di drone. Tuttavia da questa analisi, non è possibile capire se il set point prestabilito è stato raggiunto e con quante iterazioni è stato possibile.

Come descritto in 4.2, per ogni iterazione del ciclo di controllo, i valori di DC e RPM calcolati mediante studio in frequenza, sono stati salvati in due vettori: "vettoreDC" e "vettoreRPM".

Lo scopo di salvare tutti i valori che si sono succeduti, è quello di poterli elaborare in un'analisi statistica, con l'obiettivo di calcolare il vettore degli scostamenti "vettoreDELTA" contenente, elemento per elemento, lo scostamento tra il valore di RPM calcolato e il set point impostato. Su questo vettore poi, si calcola la media e la deviazione standard, in modo da comprendere quale sia lo scostamento dei dati attorno al set point. In questo modo è possibile capire se e in quante iterazioni, esso è stato raggiunto, controllando così, in maniera efficace, la velocità di rotazione dell'elica.

Prima di discutere sull'analisi statistica effettuata e a quali risultati ha portato, è bene descrivere brevemente il codice Matlab utilizzato per effettuarla.

```
vettoreDELTA = [];  
  
for c = 1:length(vettoreRPM)  
    delta = abs(RPM-vettoreRPM(c));  
    vettoreDELTA = [vettoreDELTA,delta];  
end  
  
somma = 0 ;  
  
for s = 1:length(vettoreRPM)  
    somma = somma + vettoreDELTA(s);  
end  
  
media = somma / length(vettoreDELTA);  
deviazionestandard = std(vettoreDELTA);  
  
MEDIA = ones(50)*media;  
DEVIAZIONESTANDARD = ones(50)*deviazionestandard;
```

Come si può leggere nel codice, il vettore degli scostamenti contiene, elemento per elemento, il valore assoluto della differenza tra il valore di velocità determinato dallo studio in frequenza e il set point. A quel punto, si è calcolata mediante un semplice ciclo for, la somma di tutti gli elementi e la si è divisa per il numero degli stessi per determinarne la media.

Per calcolare la deviazione standard, parametro statistico che misura la dispersione dei dati rispetto al valore centrale, è stata utilizzata la funzione:

$$\text{deviazionestandard} = \text{std}(\text{vettoreDELTA});$$

tale funzione, prende in ingresso il vettore degli scostamenti e ne restituisce in uscita la deviazione standard.

Si riportano ora i grafici relativi all'analisi statistica effettuata, contenenti l'andamento della variazione del duty cycle della PWM con relativo andamento della variazione della velocità di rotazione dell'elica di drone durante il controllo e, si riporta l'andamento del vettore degli scostamenti evidenziandone il valore medio e deviazione standard.

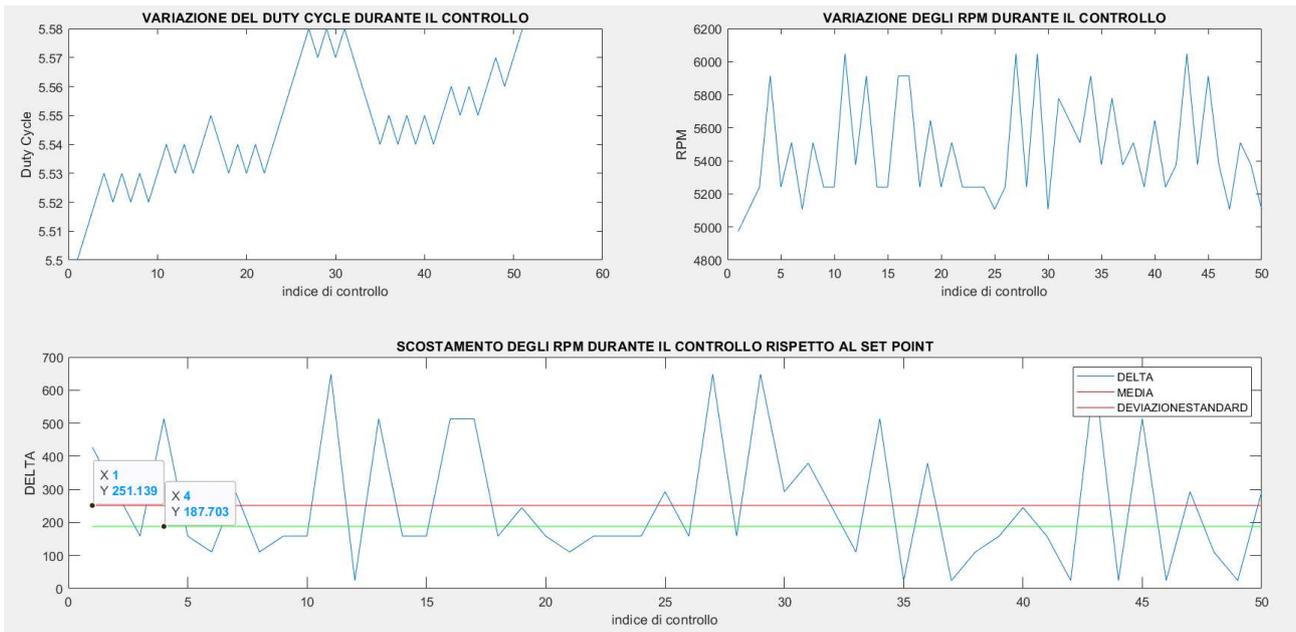


Figura 38: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 5.5%

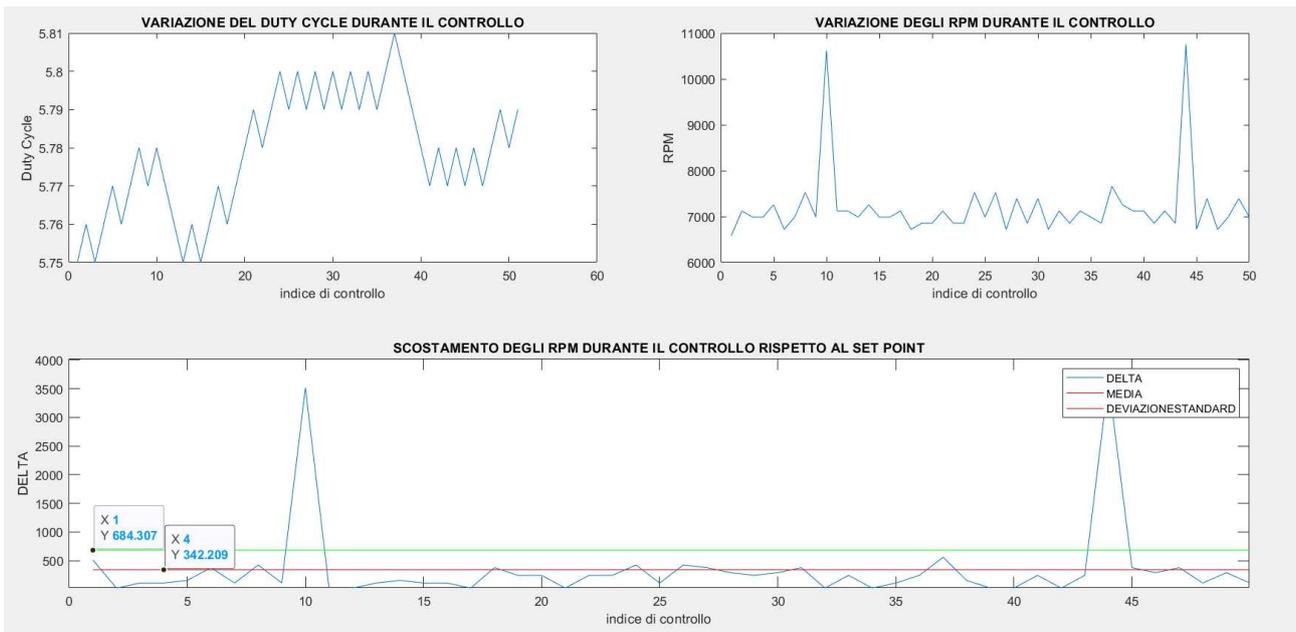


Figura 39: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 5.75%

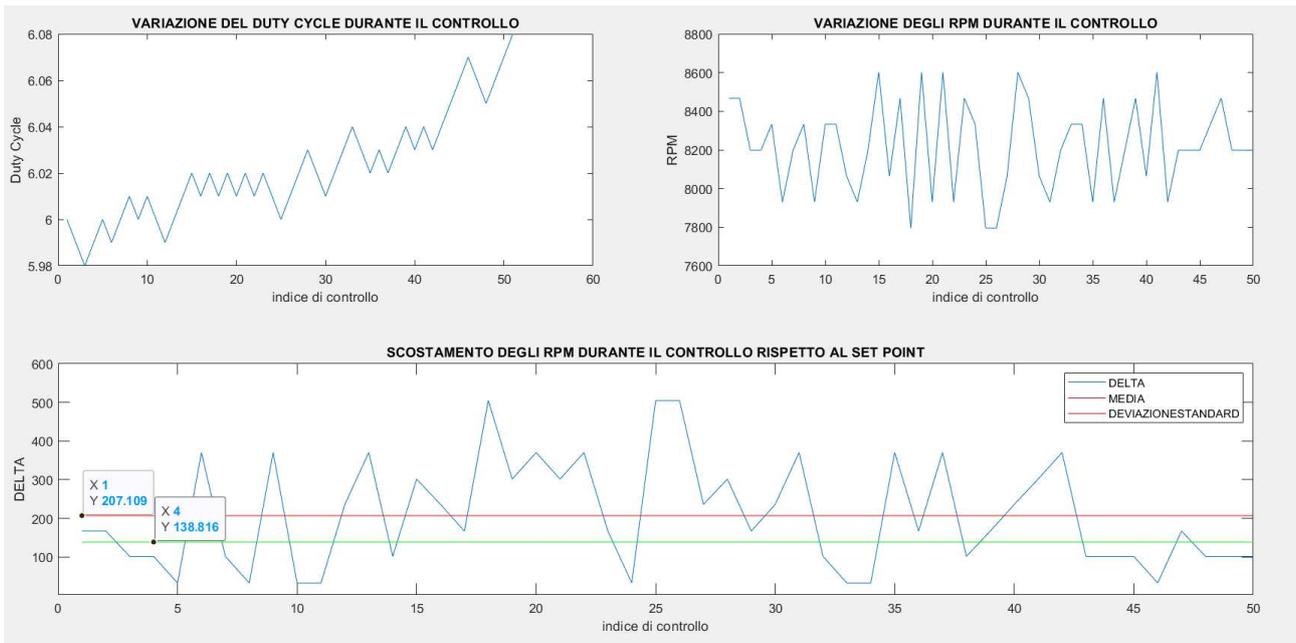


Figura 40: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 6%

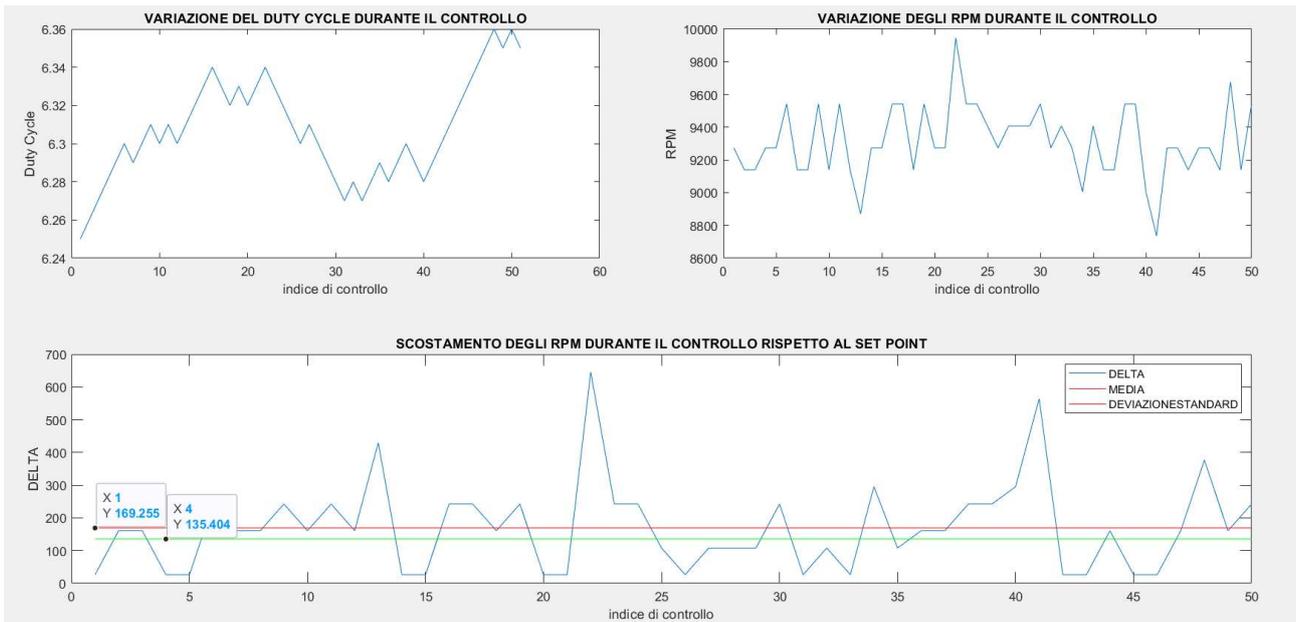


Figura 41: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 6.25%

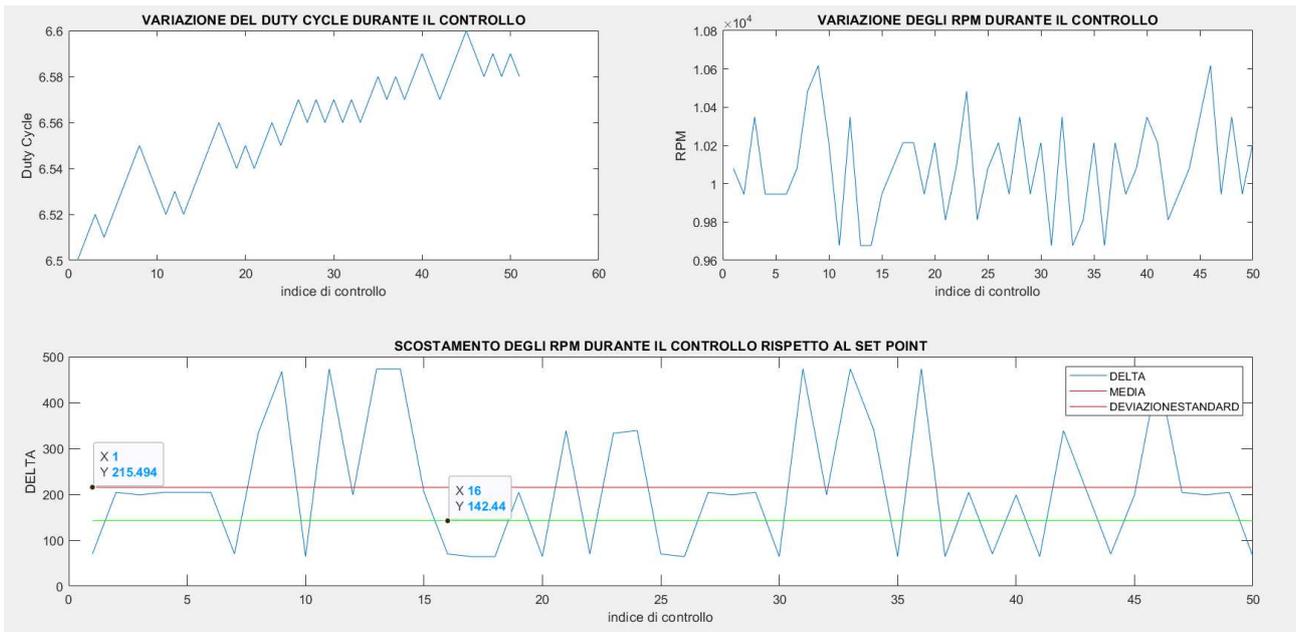


Figura 42: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 6.5%

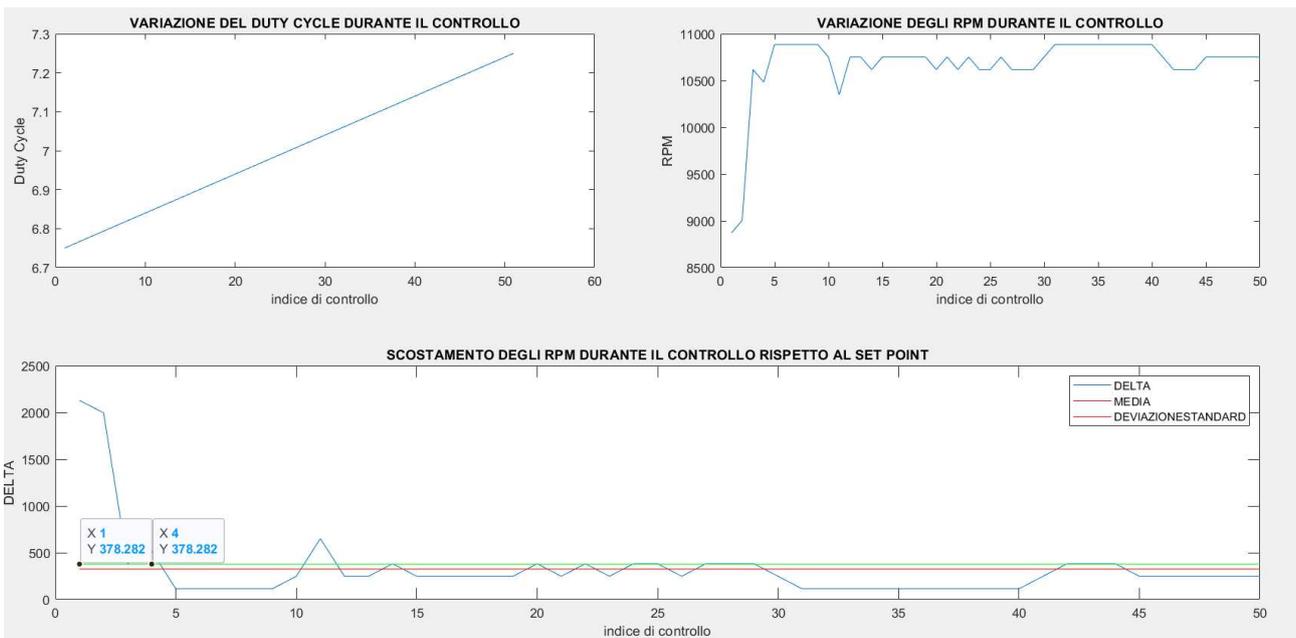


Figura 42: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 6.75%

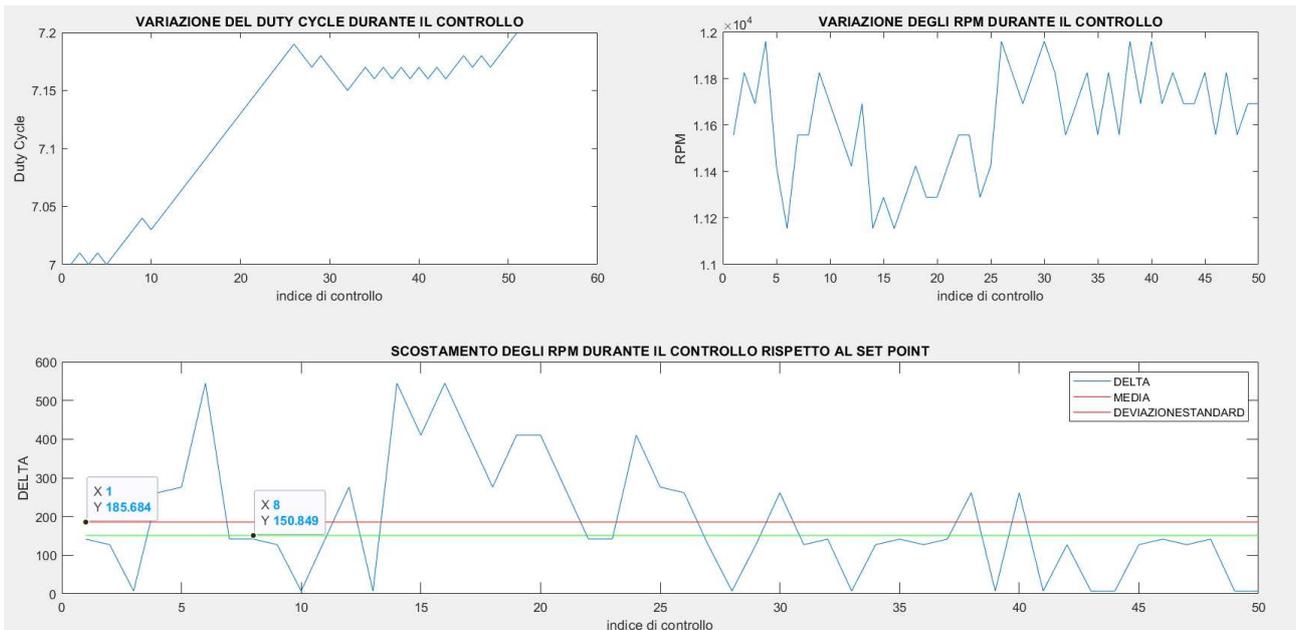


Figura 43: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 7%

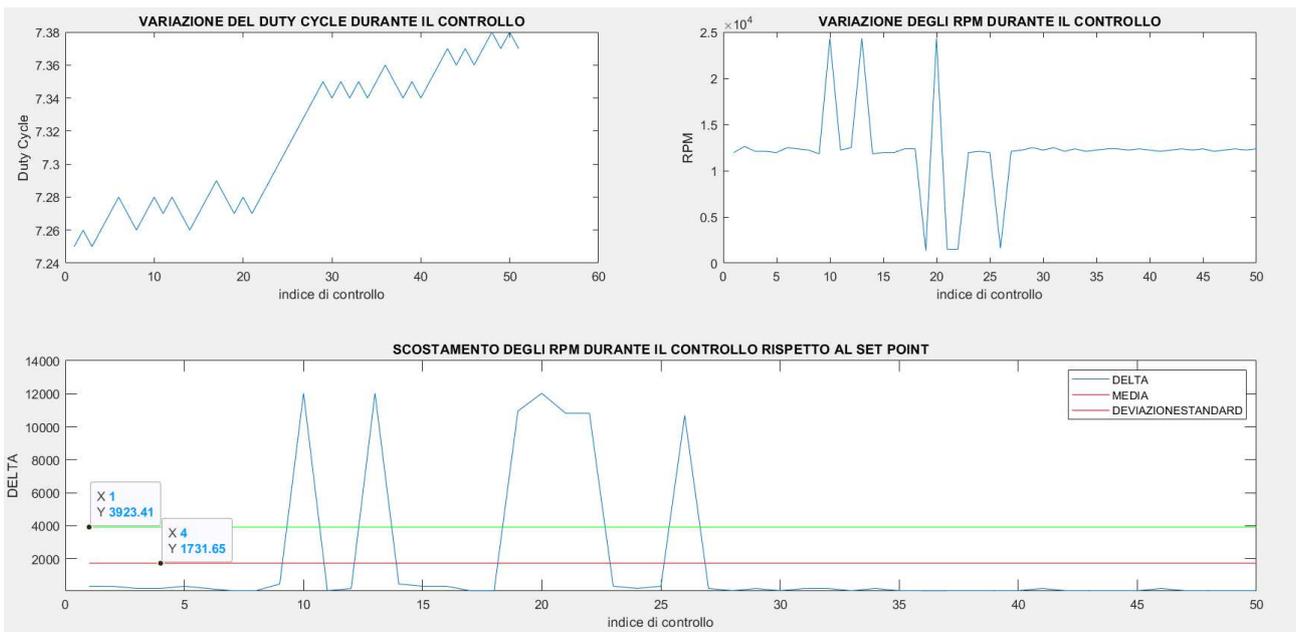


Figura 44: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 7.25%

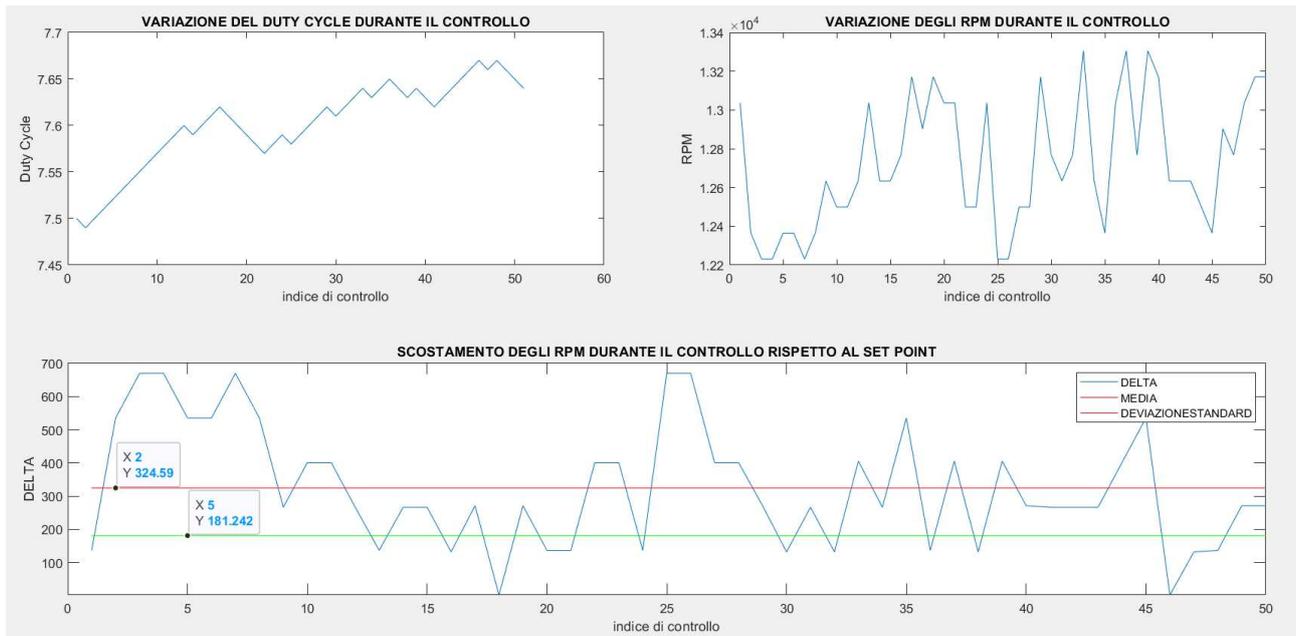


Figura 45: analisi statistica per prova relativa ad un DC = 7.5%

In primo luogo, è bene osservare come in ognuna delle prove effettuate, il controllo attuato non consenta di raggiungere il set point predefinito.

Questo può essere dovuto principalmente a tre fattori:

- Rumore, che si sovrappone al segnale di vibrazione degradandone le caratteristiche;
- Temperatura, che altera le caratteristiche dell'accelerometro MEMS ADXL335;
- Risonanze meccaniche, scaturite dall'instabilità del supporto meccanico su cui l'elica è fissata.

Se si pone invece attenzione, all'andamento del DC durante il controllo, si può notare come questo tende ad essere aumentato al fine di provare a raggiungere il set point, mentre i valori di RPM tendono ad avere un andamento oscillatorio attorno allo stesso.

Dallo scostamento degli RPM calcolati, si può osservare che tendenzialmente, la media e deviazione standard assumono valori compresi tra i 100 RPM e circa 400 RPM, tranne qualche caso eccezionale in cui per le cause precedentemente elencate si hanno valori più elevati.

Caso molto particolare e rilevante in quanto unico, è quello riportato in Figura 44 dove si ha una fase transitoria in cui lo scostamento rispetto al set point è estremamente elevato, ma al termine di quest'ultima, a partire dall'indice di controllo n.27, lo scostamento si riduce in maniera considerevole, fino a raggiungere valori al di sotto dei 100 RPM.

In linea di principio, si potrebbe dire che in generale, uno scostamento di qualche centinaia di RPM rispetto al set point che tipicamente ha un ordine di grandezza di 10^4 , non ha molta rilevanza sulla spinta che l'elica genera tramite la sua rotazione. Tuttavia, il tutto dovrebbe essere approfondito e studiato nei minimi dettagli per poterlo confermare.

5.2 MISURA DELLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE DI DUE ELICHE DI DRONE

Innanzitutto, visualizzando durante le prove effettuate il segnale in uscita dall'accelerometro e utilizzando il tachimetro laser, si è osservato che i due motori, a parità di duty cycle della PWM che li pilota, ruotano con velocità differenti.

A seguito di questa osservazione, sarebbe stato naturale aspettarsi, nella DFT del segnale di tensione in uscita dall'accelerometro, due picchi distinti in frequenza, che corrispondessero alle due velocità di rotazione.

Tuttavia, una volta importati i dati ad alta risoluzione su Matlab ed eseguito il calcolo della DFT, si è potuto notare che, a causa della diversità del setup di misura, dell'interferenza tra le due eliche e della presenza di rumore, non è possibile discriminare quale sia la velocità di rotazione delle stesse.

Si riportano ora due esempi che permettono un chiarimento circa quanto detto.

Esempio n.1

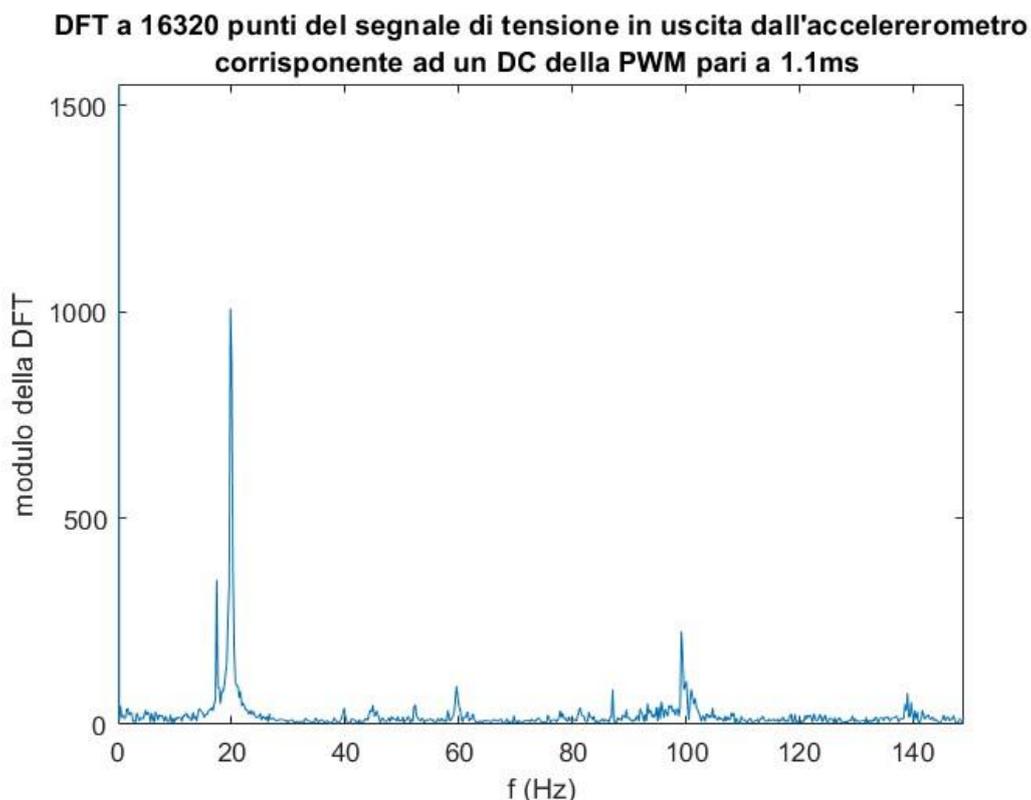


Figura 46: DFT del segnale in uscita dall'accelerometro corrispondente ad un DC = 5.5%

Dalle prove effettuate su un singolo motore, in corrispondenza di una PWM caratterizzata da un duty cycle pari a 1.1ms ovvero del 5.5%, si dovrebbe ottenere un picco a circa 90 Hz. Chiaramente, dato che il secondo motore ruota più lentamente, ci si aspetterebbe un picco a circa 90 Hz e un secondo picco a frequenza leggermente inferiore.

In Figura 46, è possibile apprezzare la presenza di picchi a frequenza diversa da zero, in particolare, i picchi di ampiezza maggiore si trovano nell'intorno dei 20 Hz e questo, non corrisponde a ciò che ci si aspetterebbe. Questo può essere dovuto, come descritto precedentemente, a una differenza nel setup di misura, al rumore che inevitabilmente si sovrappone al segnale e all'interferenza dei due motori in rotazione.

Esempio n.2

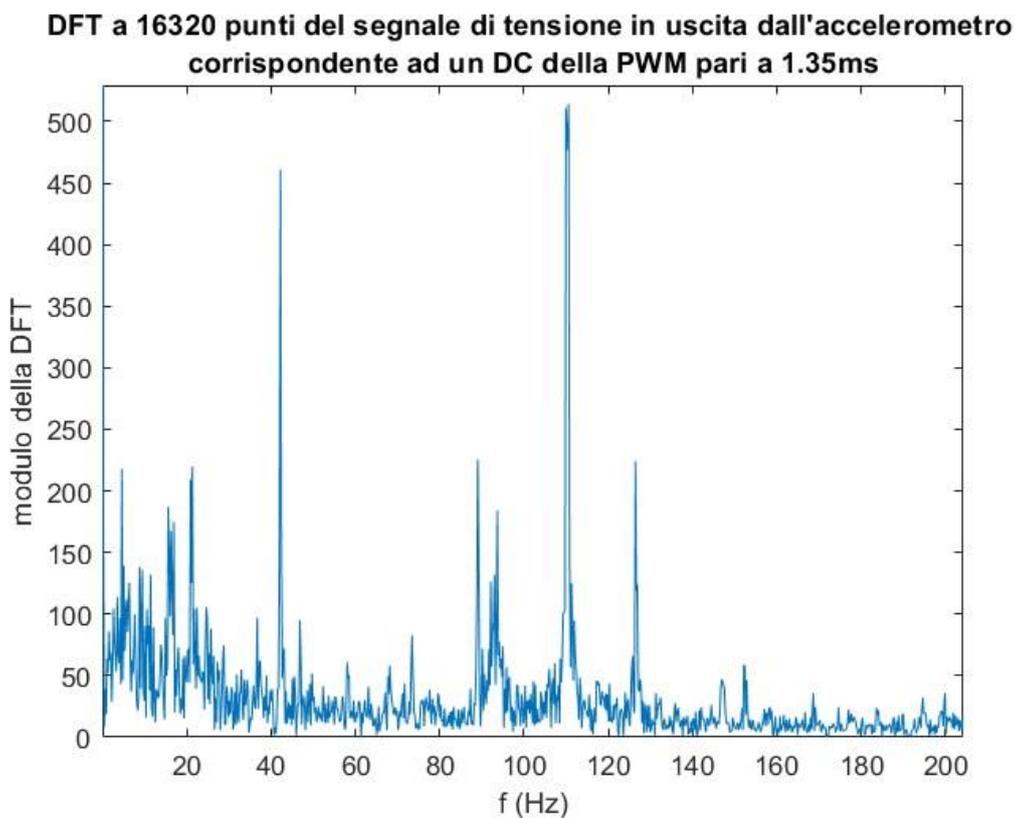


Figura 47: DFT del segnale in uscita dall'accelerometro corrispondente ad un DC = 6.75%

In questo caso, a maggior ragione rispetto al primo, si può notare la presenza di molti picchi a frequenza diversa da zero, che però non corrispondono ai picchi che ci si aspetterebbe di trovare.

Risultati analoghi, è possibile verificarli per ogni prova effettuata.

Conclusione

In conclusione a questo lavoro di tesi, si vuole ritornare sul percorso effettuato.

Nel primo capitolo si è trattata in maniera approfondita la misura di vibrazioni, cercando di capire come, un segnale di vibrazione generato dal movimento di un corpo, può essere rilevato ed analizzato. Studiare la misura di vibrazioni è risultato fondamentale al fine di scegliere la sensoristica e strumentazione necessaria per allestire il banco di misura della velocità delle eliche di drone.

Dopo aver trattato la vibrometria si è passati alla descrizione dei droni e degli UAV, soffermandosi sugli elementi cruciali nel loro funzionamento, l'elica e il motore, con l'obiettivo di capire come la vibrazione indotta dalla rotazione dell'elica si ripercuote sul sistema e come attraverso il suo studio si può risalire alla sua velocità di rotazione.

Il terzo capitolo si apre con la caratterizzazione degli strumenti hardware e software impiegati per la realizzazione del sistema di misura e controllo della velocità di rotazione dell'elica di drone mediante pilotaggio Moku:Go – Matlab, mentre nel quarto e quinto capitolo sono stati descritti in maniera dettagliata tutte le varie prove sperimentali effettuate, riportando i casi specifici esaminati e l'analisi dei risultati ottenuti.

In particolare, il sistema di misura e controllo implementato fornisce buoni risultati circa la valutazione della velocità di rotazione di una singola elica, quindi soddisfa gli obiettivi che ci si era posti, mentre per il caso di due eliche occorre approfondire il problema per capire se sia possibile determinarne la velocità di rotazione mediante misura accelerometrica in una singola posizione.

Bibliografia

- [1] discoverthesky.it
- [2] <https://www.bksv.com/it/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>, “MISURAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI BRÜRL & KJÆR”
- [3] Franco Chiaraluce, Dipende di Teoria Dei Segnali, “CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI”
- [4] https://people.unica.it/nicolacarbonaro/files/2012/04/1_Misure-in-campo-biomedico_2.pdf, Università degli Studi di Cagliari, “SENSORI”
- [5] <https://archimedes.unibs.it/dida/MMT-2019/metrologia/MMT-06-Vibrazioni.pdf>, MISURE MECCANICHE E TERMICHE, “La Misura di Vibrazioni”
- [6] https://www.bpsweb.it/wp-content/uploads/LDV_01-Vibrometria-Laser-Doppler.pdf, “Vibrometria Laser Doppler Polytec”
- [7] Luca Perlini, “Studio e realizzazione di un banco per la misura sperimentale della risposta piezoresistiva di un campione di Velostat”
- [8] <https://e-l.unifi.it/mod/resource/view.php?id=320635>, Dott. Ing. Sara Matteoli, Scuola di Scienze della Salute Umana, Corsi di Laurea Triennale (DM 270/04) in TECNICHE ORTOPEDICHE, “Meccanica Sperimentale (Accelerometri)”
- [9] https://moodle2.units.it/pluginfile.php/401636/mod_resource/content/0/02_UAV_2021.pdf, Stefano Furlani, a.a. 2020-2021 “UAV: METODI E TECNICHE”
- [10] IGMA – Giuseppe Mangialomini VID 255889 – IVAO, “L’ELICA (The Propeller)”
- [11] Roberto G.M. Caciuffo, Savino Melone con la collaborazione di O. Francescangeli, “Fisica Generale Meccanica e Termodinamica”, Masson Milano
- [12] Leonardo Zappelli, Fondamenti di Elettromagnetismo, a.a. 2020-2021, “07.Ampere.pdf”
- [13] Matteo Zuccalà, CFP GLADUS, 3° Operatore Elettrico Relatore Prof. Revelli Franco, “IL MOTORE ELETTRICO”
- [14] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf>, ANALOG DEVICES, “Accelerometer ADXL335”
- [15] <https://liquidinstruments.com/product/moku-go>, Liquid Instruments, Moku.Go
- [16] G. Martines “Appunti di Strumentazioni e Misure – Strumentazione Elettronica”, <https://ik4rvg.altervista.org/alterpages/files/GeneratoriOscilloscopi.pdf>
- [17] https://e-l.unifi.it/pluginfile.php/440203/mod_resource/content/1/oscilloscopio.pdf, Laboratorio per l’ottica II, Corso di Laurea in Ottica e Optometria, Università di Firenze