



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE

LAB 3

FLUIDODINAMICA SPERIMENTALE

Giovanni Orazi, 247368

Luca Piomboni, 242588

Anno accademico:
2024-2025

Abstract: Questo report presenta un esperimento volto alla comprensione dei principi operativi della tecnica PIV (Particle Image Velocimetry) a due componenti per la misurazione del campo di velocità. L'attività è stata suddivisa in tre fasi principali: la calibrazione del sistema PIV, l'applicazione della tecnica per misurare il campo di velocità attorno a un propulsore a elica di un eVTOL, e l'elaborazione dei dati raccolti mediante software commerciali e script personalizzati. L'analisi ha permesso di valutare le potenzialità della tecnica PIV e di caratterizzare qualitativamente il fenomeno del vortex-ring state che si manifesta durante la discesa rapida degli eVTOL.

Indice

1	Introduzione	4
2	Set up dell'esperimento	4
2.1	Galleria del Vento	4
2.2	Laser a Doppio Impulso	5
2.3	Fotocamere ad Alta Risoluzione	6
2.4	Sistema di Sincronizzazione	6
2.5	Serbatoio ad Aria Compressa	7
2.6	Tabellone di Calibrazione	7
2.7	Rotore eVTOL	8
3	Procedura dell'esperimento	8
3.1	Configurazione del sincronizzatore digitale	8
3.2	Impostazioni temporali e sincronizzazione	9
3.3	Acquisizione delle immagini	9
4	Set-up script MATLAB	10
4.1	Calibrazione Spaziale	10
4.2	Calibrazione Temporale	11
4.3	Pre-Processing delle Immagini	11
4.4	Algoritmo di Correlazione	11
4.5	Post-Processing	12
5	Analisi dei risultati ottenuti	12
5.1	Descrizione fenomeno Vortex ring state	13
5.2	Script MATLAB	13
5.3	PIVlab	15
5.3.1	Validazione 9 m/s	16
5.3.2	Visualizzazione 12 m/s	18
5.4	Confronto MATLAB-PIVlab	18
6	Analisi degli errori di misurazione e loro propagazione	19
6.1	Errore assoluto e relativo	19
6.2	Propagazione dell'errore	19
6.2.1	Considerazioni sulla Propagazione degli Errori	19
6.3	Fonti di errore specifiche	19
6.4	Strategie di mitigazione degli errori	20
7	Conclusioni	20

Elenco delle figure

1	Schema della galleria del vento <i>De Ponte</i>	5
2	Immagini del laser a doppio impulso utilizzato.	5
3	Fotocamere ad alta risoluzione utilizzate nell'esperimento.	6
4	Sistema di sincronizzazione utilizzato nell'esperimento.	7
5	Serbatoio di aria compressa utilizzato per l' inseminamento del flusso.	7
6	Tabellone di calibrazione utilizzato nell'esperimento.	8
7	Setup canali.	9
8	Curve di potenza dal costruttore del laser.	9
9	Risultato della calibrazione spaziale.	10
10	Immagini catturate dalle due fotocamere.	12
11	Sketch del fenomeno di vortex ring state.	13
12	Campo vettoriale della velocità a diversi istanti di tempo.	14
13	Campo di moto del modulo della velocità e streamlines a diversi istanti di tempo.	14
14	Campo di moto delle due componenti di velocità a diversi istanti di tempo.	15
15	Campo di moto del modulo della vorticità a diversi istanti di tempo.	15
16	Post-processing sui vettori spuri.	16
17	Confronto immagini del campo di moto della velocità ottenuto con PIVlab rispetto al nostro script.	16
18	Dettaglio del vortice in camera 2 sulla mappa velocità media e streamlines.	17
19	Risultati PIVlab campo di vorticità a 9 m/s.. . . .	17
20	Media del modulo di velocità ottenuta a 9 m/s con i PIVlab rispetto al nostro script.	18
21	Immagini del campo vettoriale ottenute con PIVlab contro il nostro script.	18

1. Introduzione

L' esperimento svolto in questo laboratorio ha avuto l' obiettivo di comprendere ed applicare la tecnica della Particle Image Velocimetry (PIV) a doppia componente (ovvero capace di visualizzare due componenti della velocità) nel caso di una elica rotante, per comprenderne le potenzialità e le caratteristiche rispetto a tecniche tradizionali di misurazione. In particolare questa potente tecnica di misura è stata utile nel caratterizzare il fenomeno del *vortex-ring state*, un' instabilità aerodinamica critica che interessa i velivoli con ala rotante, come eVTOL ed elicotteri, durante la discesa rapida. L' attività è stata articolata in tre fasi principali:

- Calibrazione del sistema PIV (Particle Image Velocimetry)
- Misurazione del campo di velocità attorno a un propulsore a elica di eVTOL
- Post processing ed analisi qualitativa del fenomeno del vortex-ring state

Nella prima fase, la calibrazione del sistema PIV ha permesso di garantire misurazioni precise del campo di velocità. Questo processo è fondamentale per correggere eventuali distorsioni ottiche e per determinare la relazione tra la scala dell'immagine acquisita e le dimensioni reali del campo di flusso.

Successivamente, la tecnica PIV è stata applicata per misurare la distribuzione del campo di velocità attorno al propulsore di un eVTOL installato all'interno della camera di prova della galleria del vento *De Ponte* per le due componenti di velocità verticale e longitudinale. Questa fase ha richiesto l' acquisizione di immagini del flusso di particelle traccianti illuminate da un laser a foglio e l' elaborazione dei dati per ottenere mappe dettagliate del movimento del fluido.

Infine, i dati raccolti sono stati post-processati ed hanno permesso di caratterizzare qualitativamente il fenomeno del vortex-ring state. Questo si manifesta quando la velocità indotta dal rotore e la velocità di discesa si bilanciano, causando la formazione di un anello vorticoso attorno al rotore e una perdita significativa di spinta. La comprensione di questo fenomeno è essenziale per migliorare la sicurezza e le prestazioni degli eVTOL durante le manovre di discesa.

L' obiettivo del report è analizzare i dati sperimentali ottenuti per validare l' applicazione della tecnica PIV, utilizzando sia un codice sviluppato da noi in MATLAB, sia l'applicativo PIVlab sempre sviluppato dalla *MathWorks* come loro toolbox e tipicamente usato nell'industria.

2. Set up dell'esperimento

Il set-up dell' esperimento prevede l' utilizzo dei diversi strumenti di misurazione elencati di seguito:

- Galleria del vento *De Ponte*
- Laser a doppio impulso
- Fotocamere ad alta risoluzione
- Sistema di sincronizzazione
- Serbatoio di aria compressa
- Tabellone per calibrazione
- Rotore eVTOL

In questa sezione andremo ad analizzare ciascuno degli strumenti appena citati, vedendo in dettaglio il loro funzionamento e le loro caratteristiche tecniche che dovranno essere tenute in considerazione nell' analisi agli errori ed incertezze.

2.1. Galleria del Vento

L' esperimento è stato condotto all' interno della galleria del vento *De Ponte*, una galleria a circuito chiuso con una camera di prova di sezione nominale $1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ e una lunghezza di 3 m. La precisione del flusso d' aria è elevata, con un errore di parallelismo inferiore allo 0.1% e un livello di turbolenza che non supera lo 0.3%. La galleria è in grado di raggiungere una velocità massima di 60 m/s, tuttavia, durante il nostro esperimento sono state effettuate misurazioni a 9 m/s e 12 m/s. Il modello di galleria è riportato nello schema in Figura 1.

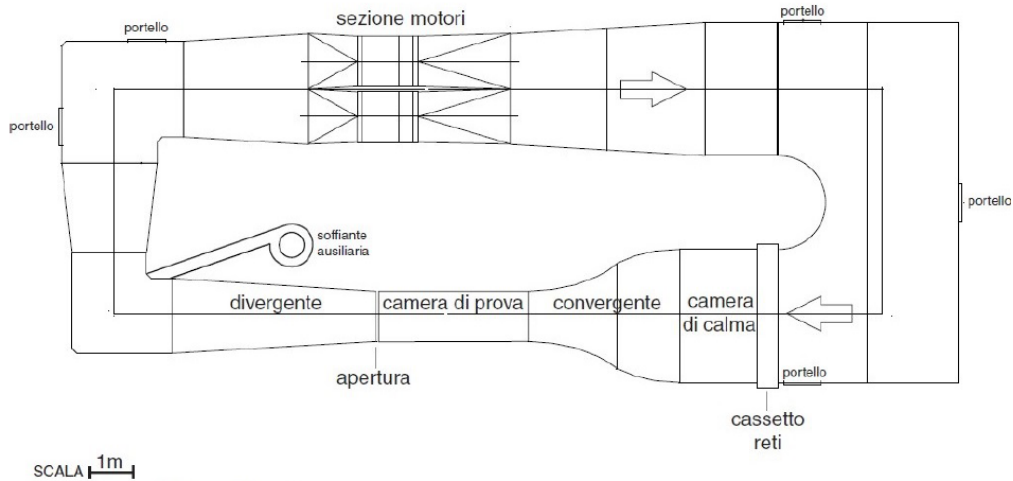
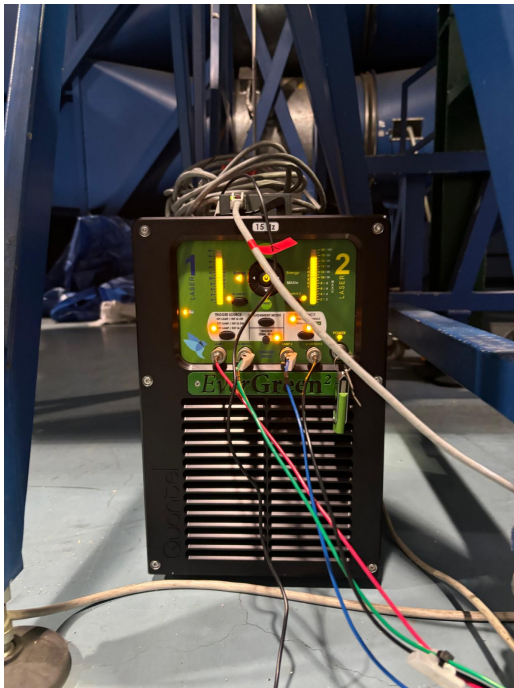


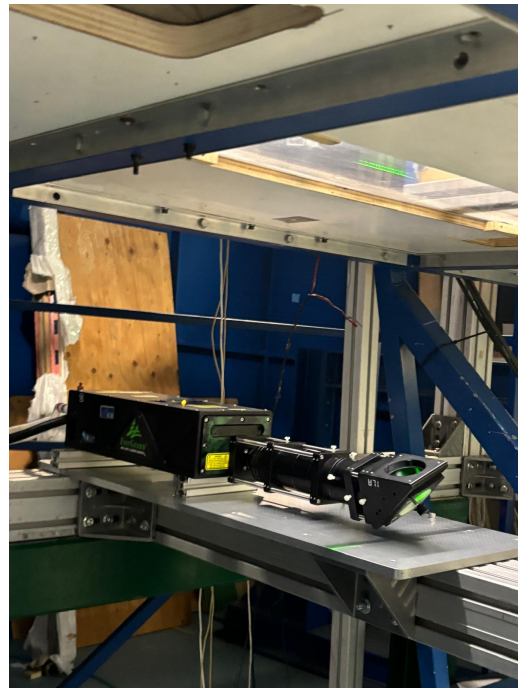
Figura 1: Schema della galleria del vento *De Ponte*.

2.2. Laser a Doppio Impulso

Il laser utilizzato nell' esperimento è un Q-Switch a doppio impulso come riportato in Figura 2a, configurato in doppia cavità e di tipo ND:YAG, a luce verde. Questo dispositivo è in grado di generare impulsi con una potenza massima di 200 mJ e una durata di esposizione fino a 1 ns, raggiungendo una potenza di picco di 200 MW. Per modificare la geometria del fascio laser, è stata utilizzata un'ottica posizionata sulla testa del laser, che consente di passare da un fascio puntiforme a una lama piana di spessore ridotto.



(a) Laser Q-Switch a doppio impulso.



(b) Posizionamento laser con specchio deviatore.

Figura 2: Immagini del laser a doppio impulso utilizzato.

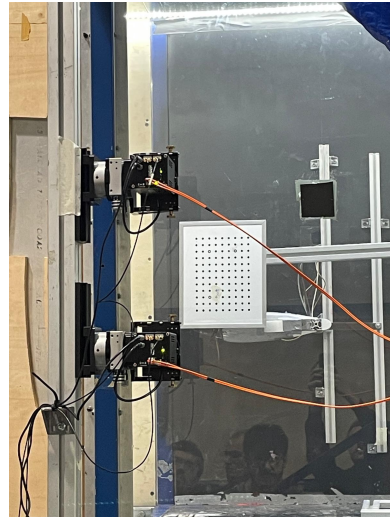
Poiché il laser è situato sotto la camera di prova, è stato installato uno specchio a 90° per indirizzare il fascio verso la finestra situata sul pavimento della camera, realizzata in plexiglass (vedi Figura 2b). Sebbene il plexiglass filtri parzialmente la potenza del laser, è un materiale facilmente lavorabile rispetto al vetro ottico, che sarebbe stato più complesso da gestire.

2.3. Fotocamere ad Alta Risoluzione

Il sistema ottico utilizzato è composto da una combinazione di lenti cilindriche e sferiche, che permettono di ingrandire e registrare la lama laser, riducendo al minimo la dispersione di potenza. Le fotocamere sono disposte in due unità come in Figura 3, al fine di ampliare la finestra di osservazione e garantire una risoluzione complessiva molto elevata. Le telecamere sono state posizionate in modo da inquadrare il rotore da una posizione superiore e inferiore, ma non in configurazione stereoscopica. Sono orientate a 90° rispetto al flusso principale per eseguire una PIV a due componenti di velocità.



(a) Dettaglio fotocamere.



(b) Set-up 90° fotocamere rispetto al modello.

Figura 3: Fotocamere ad alta risoluzione utilizzate nell'esperimento.

Le fotocamere utilizzate sono unità Scientific CMOS da 5.5 megapixel, caratterizzate da alta sensibilità. Inoltre, sono dotate di una modalità double-shutter, che consente di acquisire coppie di esposizioni, le quali vengono poi trasferite digitalmente su memoria. Per regolare la messa a fuoco delle telecamere è stato utilizzato un motore elettrico montato sulle ottiche, che consente un controllo preciso.

2.4. Sistema di Sincronizzazione

La tecnica PIV (Particle Image Velocimetry) richiede una sincronizzazione precisa tra gli impulsi del laser e le esposizioni delle fotocamere per garantire il corretto funzionamento del sistema e ottenere misurazioni accurate. In particolare, è fondamentale che l'intervallo temporale tra i due impulsi laser sia estremamente preciso, con una risoluzione nell'ordine del nanosecondo. Inoltre, la temporizzazione dei segnali provenienti dai dispositivi Q-Switch deve essere altrettanto accurata, poiché questi componenti regolano l'emissione del laser e ne impediscono l'attivazione finché non ricevono il segnale appropriato dal sincronizzatore.

Per gestire questi processi, è stato utilizzato un sofisticato sistema di sincronizzazione dotato di schede digitali Figura 4. Queste schede sono in grado di emettere segnali TTL (transistor-transistor logic) con una temporizzazione estremamente precisa, garantendo la sincronizzazione tra il laser e le fotocamere. Il sistema di sincronizzazione impiegato in questo esperimento dispone di 16 uscite, ma solo cinque sono state utilizzate. Quattro di esse sono state collegate al controllo del laser e dei dispositivi Q-Switch, mentre l'ultima è stata utilizzata per gestire le due fotocamere. In particolare, due canali sono stati destinati al controllo delle lampade laser, mentre i restanti due sono stati utilizzati per i sistemi Q-Switch. Sebbene il sistema consenta l'uso di intervalli di tempo differenti tra le lampade e i Q-Switch per i due laser, nel caso specifico è stato utilizzato un intervallo comune per garantire la corretta acquisizione delle immagini.



Figura 4: Sistema di sincronizzazione utilizzato nell'esperimento.

Il sistema assicura così che l'intervallo di tempo tra i segnali emessi dai Q-Switch corrisponda esattamente al tempo tra l'emissione dei due impulsi laser, permettendo di acquisire le coppie di immagini necessarie per l'analisi PIV.

2.5. Serbatoio ad Aria Compressa

Per l'inseminamento del flusso d'aria all'interno della galleria, è stato utilizzato un iniettore a Laskin nozzle, che sfrutta getti di aria compressa per produrre piccole gocce di liquido oleoso. Queste particelle vengono iniettate attraverso un condotto posto a valle dei motori, garantendo così una distribuzione uniforme delle particelle nel flusso senza interferire significativamente con la dinamica del flusso stesso.



Figura 5: Serbatoio di aria compressa utilizzato per l' inseminamento del flusso.

2.6. Tabellone di Calibrazione

Per la calibrazione del sistema PIV, è stato utilizzato un target costituito da una griglia di punti equidistanti. La distanza tra i centri di ciascun punto è di 17.57 mm. Questo tipo di target è essenziale per garantire la precisione delle misurazioni durante la fase di analisi delle immagini, permettendo di ottenere una calibrazione accurata del sistema ottico e di registrare correttamente i movimenti delle particelle.

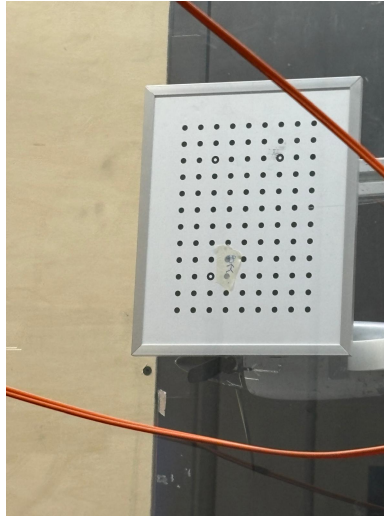


Figura 6: Tabellone di calibrazione utilizzato nell'esperimento.

2.7. Rotore eVTOL

Il propulsore utilizzato nell' esperimento è un modello in scala 1:5 di un motore ad elica destinato a velivoli eVTOL (electrical Vertical Takeoff and Landing) alimentato da un motore brushless. In questa prova il sistema non è stato dotato di un alloggiamento per una cella di carico.

Il rotore è stato posizionato in modo ottimale all'interno della camera di prova per simulare le condizioni di volo. Per farlo, è stato montato su una barra metallica, che permette di regolare la distanza del modello dal pavimento e di allontanarlo dalle pareti per evitare interferenze con il flusso d' aria. La barra è fissata a un supporto verticale, consentendo di variare facilmente la posizione del propulsore rispetto al pavimento.

Per studiare il fenomeno di interesse, il rotore è stato posizionato approssimativamente a metà altezza della camera di prova e lontano dalle pareti laterali, al fine di simulare una condizione di flusso libero (free stream). L' orientamento del propulsore è stato scelto in modo tale che l' elica spingesse il flusso d' aria in direzione opposta a quella del flusso principale della galleria, per simulare le condizioni di discesa di un eVTOL in volo.

3. Procedura dell'esperimento

Inizialmente, è stato acceso il laser con una potenza di 1 mJ. Successivamente, il target di calibrazione è stato posizionato in modo da allinearsi con il piano della lama laser, che rappresenta il piano di misura. Si è inoltre verificato che le due fotocamere fossero correttamente focalizzate sul target. Questa operazione è stata svolta a mano, ma in realtà per avere una misura accurata è necessario avere una accortezza maggiore.

Una volta posizionato il target, il laser è stato spento, e le due fotocamere hanno acquisito le immagini necessarie per la calibrazione. Queste immagini servite a determinare il fattore di magnificazione, che è stato calcolato nel successivo processo di elaborazione dei dati in Sezione 4.1 tramite la velocità media del campo di moto (generalmente pari alla velocità della galleria del vento) e l'intervallo temporale tra le due immagini (Δt). In seguito, il target è stato rimosso dalla scena.

3.1. Configurazione del sincronizzatore digitale

Un aspetto cruciale per il successo dell'esperimento è stata la corretta configurazione del sincronizzatore digitale. Prima di procedere con l' acquisizione delle coppie di immagini, sono stati configurati i canali di sincronizzazione attraverso l' interfaccia software SigMaX visibile in Figura 7. I canali sono stati così impostati:

- **Canale 1 e 2:** Laser 1 e Q-Switch 1
- **Canale 3 e 4:** Laser 2 e Q-Switch 2
- **Canale 5:** Telecamere

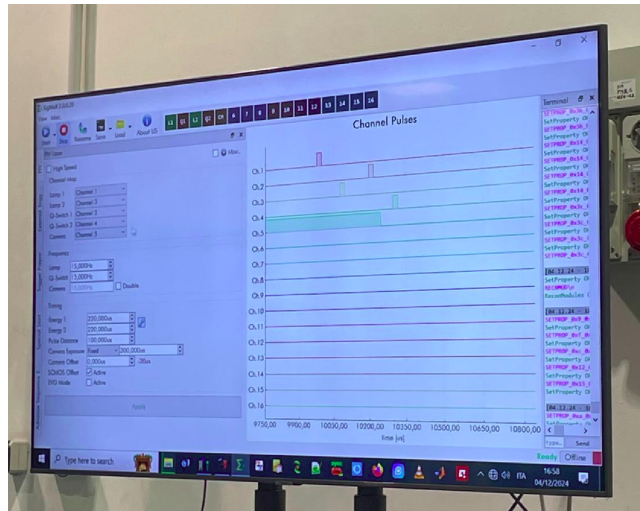


Figura 7: Setup canali.

Inoltre, la frequenza di acquisizione delle due telecamere è stata impostata a 15 Hz, così come la frequenza di funzionamento dei laser e dei Q-Switch, per garantire una corretta illuminazione durante l'acquisizione delle immagini.

3.2. Impostazioni temporali e sincronizzazione

Per ottenere misurazioni precise, l'intervallo di tempo tra i due impulsi laser è stato fissato a $100 \mu s$ (circa pari all' intervallo tra le due immagini acquisite), mentre l'intervallo tra il lampeggio della lampada e il rispettivo Q-Switch è stato impostato a $220 \mu s$. Le curve di potenza in Figura 8 mostrano che l'energia corrispondente a questi impulsi è di 120 mJ.

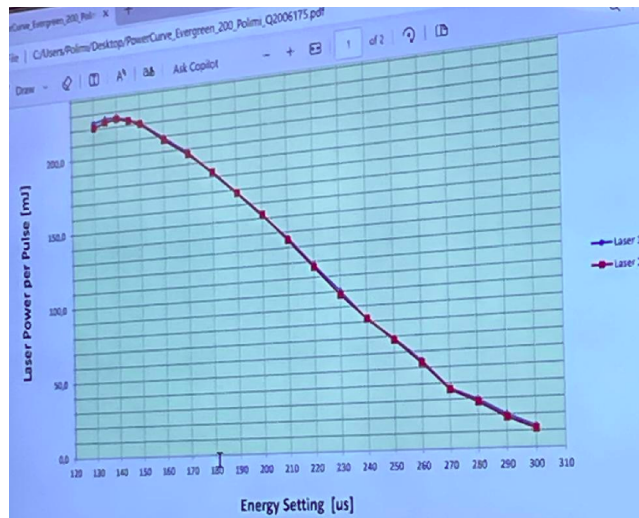


Figura 8: Curve di potenza dal costruttore del laser.

Per finire, le telecamere sono state configurate con un tempo di esposizione di $300 \mu s$, per garantire che l'impulso luminoso del laser rientrasse nel periodo di esposizione.

3.3. Acquisizione delle immagini

Una volta che tutte le impostazioni erano state verificate, il sincronizzatore ha inviato impulsi TTL elettrici durante ogni ciclo di acquisizione, rispettando gli intervalli temporali stabiliti per ogni canale. Le coppie di immagini sono state quindi acquisite e salvate in memoria per ogni ciclo.

Per consentire un' analisi statistica delle misure, sono state scattate le immagini allo stesso azimut fissato della pala del propulsore. Ciò ha permesso di raccogliere dati durante una posizione specifica della pala e, in seguito, di eseguire una media dei risultati nella fase di post-processing.

Prima di iniziare la fase di acquisizione, la galleria del vento è stata accesa e la velocità del flusso è stata regolata a 9 m/s, garantendo che il flusso fosse in condizioni di "free-stream", ovvero senza turbolenze. Dopo aver atteso che la galleria raggiungesse le condizioni di regime, è stato avviato il propulsore ad elica con una velocità di rotazione di 7000 rpm, in modo da ottenere una corrispondenza con il Mach reale del propulsore.

A questo punto, i cicli del sincronizzatore sono stati avviati e sono state acquisite 50 coppie di immagini per ogni condizione di velocità della galleria del vento: una a 9 m/s e una a 12 m/s. Queste immagini sono state raccolte per ogni configurazione del flusso, consentendo di ottenere una serie di dati completi per l'analisi.

Infine, durante tutta la fase di acquisizione, una telecamera di sorveglianza ha monitorato visivamente il funzionamento della camera di prova, assicurando che tutte le operazioni procedessero correttamente.

4. Set-up script MATLAB

I risultati ottenuti sono stati analizzati dapprima attraverso uno script MATLAB realizzato da noi e successivamente confrontati con il software commerciale PIVlab in forma di validazione.

Presentiamo quindi in questa sezione il set-up del nostro script e le fasi principali che sono state eseguite durante il processo.

4.1. Calibrazione Spaziale

La calibrazione spaziale rappresenta la prima fase fondamentale per il processo di analisi, poiché consente di determinare il rapporto tra la distanza in pixel tra due punti di un'immagine e la corrispondente distanza reale nel sistema di riferimento internazionale.

Questo rapporto, noto in letteratura come fattore di magnificazione, viene stimato utilizzando un target di riferimento: nel nostro caso, una griglia composta da punti equidistanti. Tale configurazione permette di misurare accuratamente il fattore di magnificazione specifico della prova di laboratorio.

Con l'ausilio di un codice MATLAB, è stata impiegata la funzione built-in `imfindcircles` per rilevare le circonferenze dei punti target, includendo informazioni sul raggio e sul centro di ciascun cerchio. In Figura 9 è riportato un esempio del risultato ottenuto.

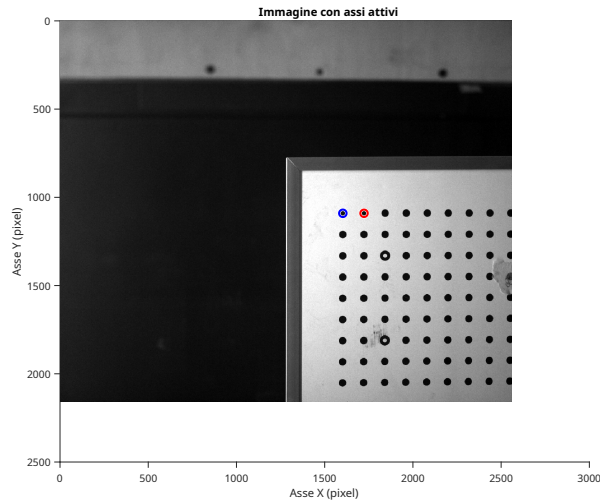


Figura 9: Risultato della calibrazione spaziale.

Calcolando la distanza tra i centri di due cerchi adiacenti nell'immagine e conoscendo che tale distanza reale è pari a 17.57 mm, è stato possibile ottenere il fattore di magnificazione:

$$\text{magnificazione} = \frac{120.064}{17.57} = 6.833 \frac{\text{pixel}}{\text{mm}}$$

Questo valore è risultato coerente con la stima preliminare effettuata durante l'allestimento della prova.

Con il fattore di magnificazione noto, è possibile procedere, in fase di post-processing, al calcolo dei vettori di velocità.

4.2. Calibrazione Temporale

Un altro aspetto cruciale per garantire una corretta correlazione dei dati riguarda il calcolo dell'intervallo di tempo tra i due impulsi Q-Switch, ovvero il ritardo temporale tra due scatti consecutivi delle telecamere. Questo è fondamentale per ottenere coppie di immagini significative ai fini dell'analisi.

Secondo la letteratura, per una buona correlazione si deve rispettare la cosiddetta "regola dell'1/4", che stabilisce che lo spostamento medio in pixel tra due esposizioni consecutive debba essere pari a $\frac{1}{4}$ della dimensione della finestra di campionamento.

Nel nostro caso, la finestra di campionamento adottata per il post-processing è di 32×32 pixel.

Per stimare lo spostamento medio nel sistema internazionale, si assume come riferimento la velocità media del flusso, corrispondente alla velocità nominale della galleria del vento. Sono state condotte due prove con velocità pari a 9 m/s e 12 m/s, rispettivamente.

Nel primo caso, l'intervallo di tempo Δt è stato calcolato come:

$$\Delta t = \frac{120.064}{6.833 \cdot 9} \cdot 10^{-3} = 1.31 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Mentre per la seconda prova, il valore di Δt è risultato:

$$\Delta t = \frac{120.064}{6.833 \cdot 12} \cdot 10^{-3} = 9.76 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Questi calcoli evidenziano l'importanza del sincronizzatore digitale, il quale deve essere in grado di generare impulsi TTL con elevata precisione temporale. Proprio per questo motivo, il sincronizzatore rappresenta uno dei componenti chiave per il successo dell'analisi PIV.

4.3. Pre-Processing delle Immagini

Prima di procedere con l'elaborazione finale delle immagini, è stata eseguita una fase di pre-processing per ottenere risultati più uniformi e affidabili. In questa fase, sono stati applicati filtri passa-basso alle coppie di immagini con lo scopo di ridurre il rumore ad alta frequenza. Nello specifico, è stato utilizzato un filtro gaussiano bidimensionale con una deviazione standard pari a 0.5, scelto per le sue proprietà di smussamento.

Il filtro gaussiano ha consentito di rendere più evidenti le particelle, migliorandone l'identificazione e il tracciamento, e contemporaneamente ha aumentato il contrasto generale dell'immagine. Questo trattamento preliminare non solo ha eliminato il rumore ad alta frequenza, ma ha anche ridotto la presenza di picchi fittizi che potrebbero influire negativamente sul processo di correlazione.

Successivamente, le immagini sono state sottoposte a un filtro mediano con finestra di 3×3 pixel, utile per rimuovere il rumore impulsivo, noto anche come "salt and pepper". La combinazione sequenziale di filtro gaussiano e filtro mediano si è dimostrata particolarmente efficace nel pulire le immagini senza alterare la struttura delle particelle.

Infine, è stato incrementato il contrasto delle immagini acquisite dalle due telecamere per migliorare la visibilità dello scatter generato dalle particelle traccianti (PM1), caratterizzate da un'intensità luminosa intrinsecamente bassa.

4.4. Algoritmo di Correlazione

L'algoritmo di correlazione è stato sviluppato seguendo il metodo *Simple Pass*, uno degli approcci più intuitivi per l'analisi PIV. La correlazione tra le immagini è stata calcolata utilizzando la tecnica della Fast Fourier Transform (FFT), scelta per la sua efficienza computazionale rispetto alla correlazione diretta nel dominio spaziale.

Le finestre di interrogazione adottate hanno una dimensione di 32×32 pixel, con un fattore di sovrapposizione pari al 50%, garantendo un equilibrio tra precisione nella ricostruzione del campo di moto e riduzione del tempo computazionale.

Per ogni coppia di immagini acquisite con un ritardo temporale Δt , sono stati definiti sottodomini di 32×32 pixel. Questi sottodomini sono stati trasformati nel dominio delle frequenze per effettuare la correlazione tramite FFT. Dopo la correlazione, è stata applicata la trasformata inversa per tornare al dominio spaziale, tenendo conto delle problematiche legate alla periodicità della trasformata di Fourier.

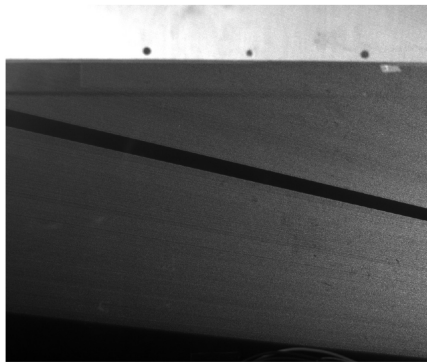
Il massimo della superficie di correlazione, individuato nella mappa risultante, ha permesso di determinare le coordinate degli spostamenti più probabili delle particelle traccianti. Sebbene la PIV sia un metodo statistico e non consenta di tracciare i movimenti di singole particelle a livello locale, essa permette di ricostruire il campo di moto globale.

Una volta determinati gli spostamenti in pixel, si passa alla fase di post-processing, in cui questi vengono convertiti in grandezze fisiche, tenendo conto del fattore di magnificazione e del ritardo temporale Δt .

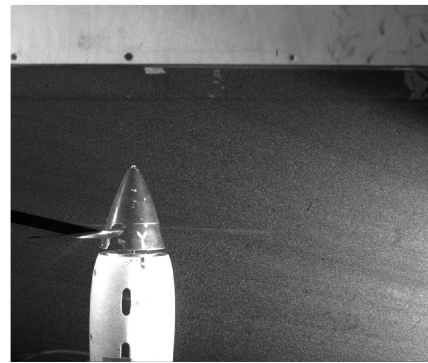
4.5. Post-Processing

Dopo aver trovato le due componenti di spostamento, è necessario andare ad eliminare tutti quei valori anomali, anche detti *outliers*, per ripulire il campo di moto da elementi spuri. Questi vettori sono dovuti alla presenza di zone scarsamente illuminate, a del rumore di sottofondo legato alla riflessione luminosa di alcune superfici, ad un'errata inseminazione di particelle e a causa di forti gradienti di velocità nello spazio.

Nel caso in esame, la presenza di vettori spuri nelle due inquadrature è imputabile maggiormente: sia alla presenza di zone d'ombra dovute alla riflessione della luce ad opera della pala dell'elica, sia alla presenza, nell'inquadratura delle telecamere, della cornice esterna della camera di prova (come possibile vedere nelle immagini acquisite in Figura10).



(a) Immagine fotocamera 2.



(b) Immagine fotocamera 1.

Figura 10: Immagini catturate dalle due fotocamere.

A tal proposito è stata applicata una maschera su tali zone per rendere il più pulita possibile la visualizzazione dei risultati.

Per eliminare le altri possibili fonti di errore sopra citate, si è scelto di usare un approccio di verifica locale.

Si sono infatti eliminati quei vettori il cui gradiente spaziale o lo spostamento medio locale era maggiore di un certo valore di soglia (k), imposto per controllo e pari a :

$$k = \mu + 3\sigma$$

dove con μ e σ si fa riferimento rispettivamente alla media e alla deviazione standard della grandezza in esame. Quei valori così individuati al di fuori della soglia imposta, a loro volta sono stati rimpiazzati da altri ottenuti da un processo di interpolazione lineare (interpolazione su cella 3x3).

Questo algoritmo implementato, seppur alla base di un analisi PIV molto semplice, ci ha permesso di ottenere risultati significativi nel momento in cui si è calcolata la media degli spostamenti per tutte le coppie di immagini. A tal proposito, siamo convinti che implementando delle tecniche di interpolazione più avanzate, al pari di un controllo anche globale sulla qualità del segnale di correlazione, sarebbe possibile realizzare un'analisi ancora più accurata sulle singole coppie di immagini.

5. Analisi dei risultati ottenuti

Il focus di questa discussione riguarderà sia l'analisi critica dei risultati sia il confronto tra i dati ottenuti con il nostro script rispetto a quelli ottenuti tramite il software PIVlab.

Dato che le immagini sono state scattate ad un fissato angolo azimutale della pala del propulsore, andando a confrontare le immagini ai diversi valori di velocità si può ottenere l'analogo di una simulazione RANS non stazionaria (URANS). Per questo abbiamo deciso di presentare i risultati del caso a 9 m/s e a 12 m/s insieme, in modo da apprezzare l'evoluzione temporale dei vortici.

5.1. Descrizione fenomeno Vortex ring state

Prima di discutere i risultati ottenuti, è importante delineare il processo fisico del fenomeno del vortex ring state e la sua importanza nel campo dei rotori. Questo fenomeno è associato alla formazione di vortex ring in corrispondenza delle pale del rotore in particolari condizioni come la discesa in assenza di ground effect con basse velocità di avanzamento, in particolare se il flusso incidente sul velivolo è disturbato. Velivoli ad alto peso sono più suscettibili a questo fenomeno a causa del downwash più alto. Il downwash associato al movimento del rotore interagisce con il flusso d'aria incidente sulle pale. Questo effetto rende il vortici di ricircolazione che si formano all'estremità della pala più grandi, portando a una degradazione della performance della pala stessa. Contemporaneamente se la velocità di discesa è più alta della velocità indotta delle sezioni interne della pala, la velocità relativa vicino all'asse di rotazione del flusso sarà verso l'alto, producendo un vortex ring secondario in corrispondenza del cambio di segno del profilo di velocità relativa lungo la pala. Il risultato è un flusso non stazionario turbolento che causa una perdita di portanza e, conseguentemente, una perdita di controllo sul velivolo. Uno schema del fenomeno è mostrato in Figura [11].



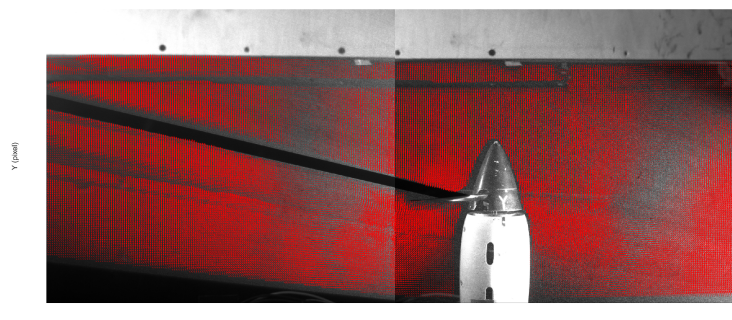
Figura 11: Sketch del fenomeno di vortex ring state.

Per le ragioni citate sopra, è di estrema importanza studiare quali condizioni portano alla formazione del ring vortex state, in modo da poterlo prevenire. L'esperimento quindi ha lo scopo di esaminare quali velocità risultano critiche per il propulsore d'interesse. Attraverso la PIV è stato misurato il campo di velocità e a posteriori è stato calcolato il campo di vorticità. I vortici d'estremità generati dalla pala sono chiaramente visibili nelle visualizzazioni del campo di velocità. Possiamo vedere come in corrispondenza del rotore presenti caratteristiche turbolente, uno dei fattori che porta alla perdita di portanza. Queste osservazioni sono confermate analizzando i risultati del campo di moto della vorticità, dove è possibile osservare la presenza di valori negativi nella parte anteriore della pala (downstream) e positivi nella parte posteriore (upstream). Inoltre, in linea con le aspettative si nota dai grafici che all'aumentare della velocità i valori di vorticità aumentano. Notiamo infine che sia per i risultati del campo di velocità che di vorticità, è possibile osservare la scia generata dalla pala in movimento, soprattutto dalle immagini riprese dalla fotocamera 2.

5.2. Script MATLAB

La fase di post-processing è stata fatta mantenendo, per i contour plot, una scala di colori fissata in modo da ottenere un confronto più efficace dei risultati alle diverse velocità misurate. La discussione dei risultati sarà principalmente riferita alle zone catturate dalla tecnica della PIV, ovvero i vortici ai lati del rotore.

Iniziamo con il mostrare il campo vettoriale ottenuto con lo script per i due casi di velocità presi in esame nelle figure riportate di seguito:



(a) 9 m/s.

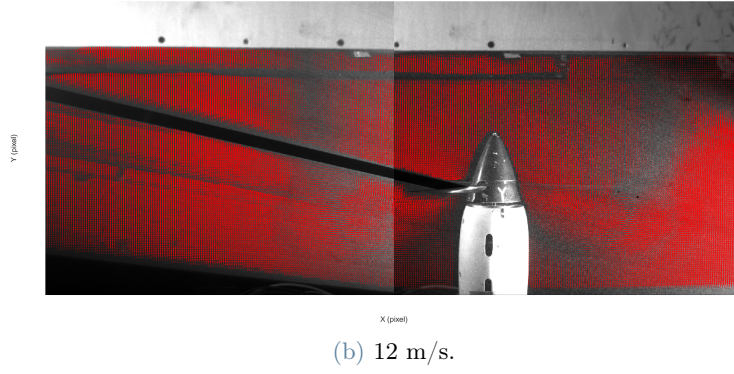


Figura 12: Campo vettoriale della velocità a diversi istanti di tempo.

I risultati sono stati plottati sopra l'immagine catturata dalle fotocamere una volta applicata la maschera nei punti in cui erano presenti i vettori spuri. Da qui è già possibile vedere bene come il codice risulta fornire una ottima previsione dei risultati, con un numero molto basso di vettori spuri. Si riesce già ad intravedere la presenza dei vortici ai lati del rotore che visualizzeremo meglio di seguito.

Per una visione più dettagliata del campo di moto, un grafico con contour plot sul modulo della velocità e per il caso a 9 m/s e 12 m/s (Figure 13a), (Figura 13b) con la relativa rappresentazione delle streamlines per identificare meglio l'andamento dei vortici.

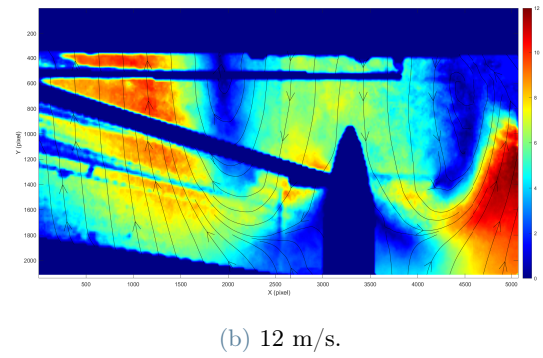
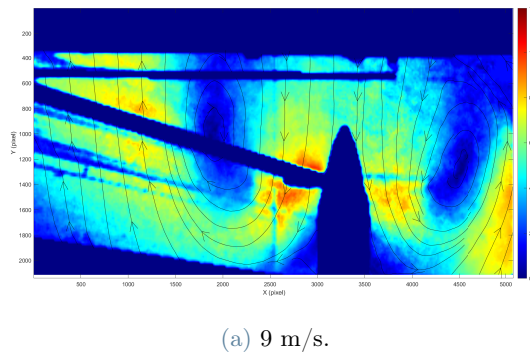
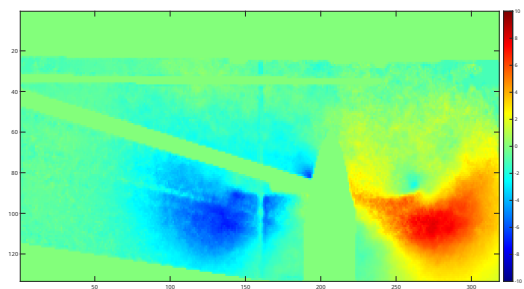
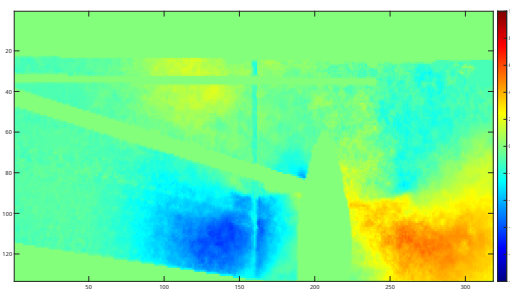
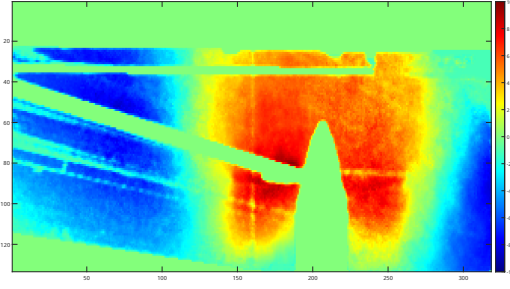


Figura 13: Campo di moto del modulo della velocità e streamlines a diversi istanti di tempo.

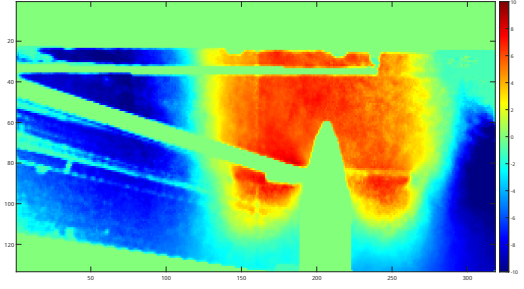
Il campo di velocità permette di osservare il fenomeno tipico del vortex-ring state per il quale si generano i due anelli vorticosi attorno al rotore. L'analisi alle due diverse velocità permette di osservare che il caso più sfavorevole lo si ottiene in condizioni di velocità di flusso pari a 9 m/s, mentre aumentando la velocità i vortici vengono spazzati a valle della pala riducendo l'effetto dannoso.

Per una analisi completa del campo di velocità riportiamo anche i campi di moto delle sue due componenti (orizzontale e verticale), in modo da analizzare quale dei due contributi risulti essere più importante e in quali zone. La tecnica utilizzata permette infatti di ottenere dati inerenti alle componenti di velocità nel piano di moto bi-dimensionale catturato dalle immagini. Riportiamo dunque in Figura 14 i risultati delle componenti di velocità ottenute.





(c) Componente verticale (V) a 9 m/s.



(d) Componente verticale (V) a 12 m/s.

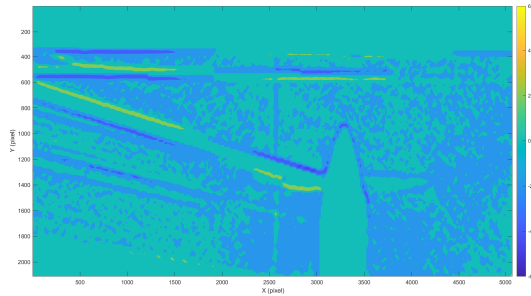
Figura 14: Campo di moto delle due componenti di velocità a diversi istanti di tempo.

Si nota dunque, come ci aspettavamo che la parte più importante di velocità è legata alla direzione assiale, mentre la componente orizzontale è prevalentemente legata alle zone di ricircolo a valle del rotore, mostrando velocità di segno opposto a destra e a sinistra del rotore. Ancora una volta tutto questo ci permette di osservare la dimensione caratteristica del vortice e la sua evoluzione in termini di componenti ai diversi istanti di tempo.

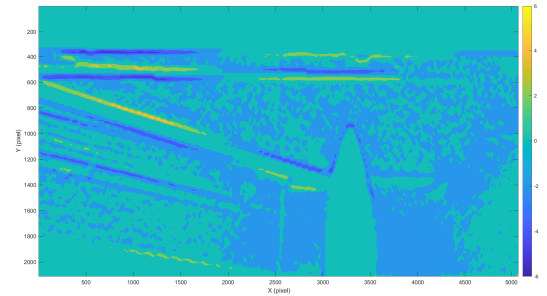
Attraverso il campo di velocità e i suoi gradienti, è stato possibile risalire infine anche alla componente normale al piano di moto della vorticità ω_z del flusso attraverso la relazione

$$\omega_z = \frac{dV}{dx} - \frac{dU}{dy} \quad (1)$$

I risultati per i casi a 9 m/s e 12 m/s sono riportati di seguito nelle Figure 15a e 15b.



(a) 9 m/s.



(b) 12 m/s.

Figura 15: Campo di moto del modulo della vorticità a diversi istanti di tempo.

Si nota che l'aumento della velocità causa un incremento del campo vorticoso e l'intensità di ω_z cresce in valore assoluto. Da tenere presente che anche in questo caso le zone in cui si ha presenza di vettori spuri sono state mascherate e leggeranno il valore zero.

A differenza dei grafici sulla velocità qua l'informazione legata ai vortici del vortex-ring state risulta essere meno evidente.

In generale questi risultati mostrano la correttezza del codice da noi sviluppato e permettono di effettuare una analisi qualitativa ben accurata dei dati a disposizione. Un più attento studio potrebbe essere portato avanti in futuro per verificare la coerenza e correttezza dei filtri applicati.

Nella sotto sezione 5.3 è possibile confrontare i nostri risultati con quelli ottenuti attraverso il software PivLab per una analisi più accurata e per una attenta validazione dei dati ottenuti con il nostro script.

5.3. PIVlab

Per l'analisi tramite il software PIVlab è stato mantenuto lo stesso setup, in modo da confrontare i risultati in maniera uno a uno e validare correttamente il nostro codice. Abbiamo quindi utilizzato anche in questo caso un Single Pass DCC con una finestra di interrogazione pari a 32 pixels ed un pixel step di 1. L'analisi è stata

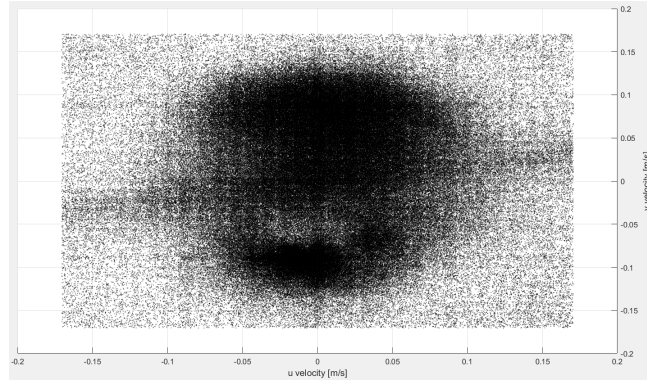


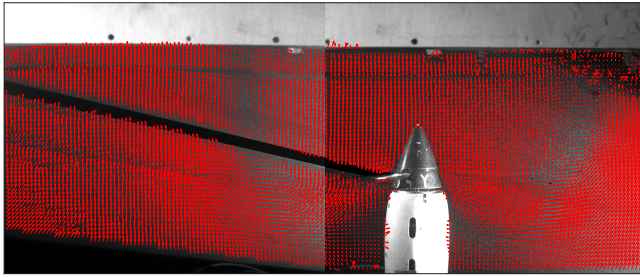
Figura 16: Post-processing sui vettori spuri.

condotta per entrambi i casi di velocità a 9 m/s e 12 m/s per dei risultati più ampi e dettagliati. Come nel nostro algoritmo è stata applicata una maschera alle zone in cui sono presenti vettori spuri, è stata fatta la fase di calibrazione, pre- e post-processing. In particolare attraverso quest'ultima è stato possibile selezionare i vettori che si trovavano all'interno del range delimitato dalla regola dell'1/4 presentata nella sezione 4.2. Tale analisi è riportata nella Figura 16 di seguito.

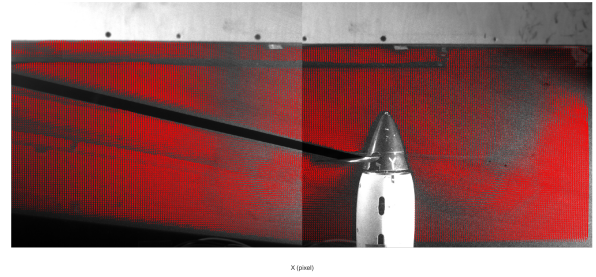
Considerando la velocità che le particelle devono compiere all'interno della finestra di interrogazione, ed aggiungendo un fattore moltiplicativo di margine, abbiamo assunto essere valide le velocità entro un range di ± 0.15 m/s.

5.3.1. Validazione 9 m/s

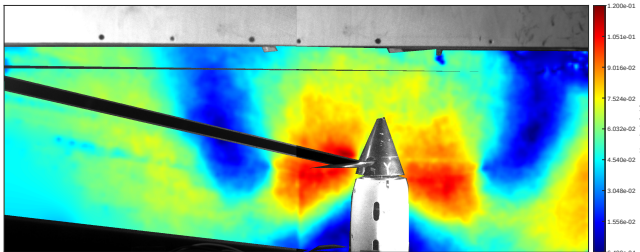
In Figura 17 è riportato il risultato dell'analisi di post processing effettuata con l'applicativo PIVlab nel primo caso analizzato per una velocità di 9 m/s.



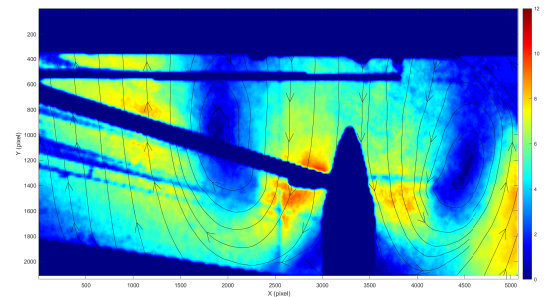
(a) PIVlab.



(b) Script MATLAB.



(c) PIVlab.



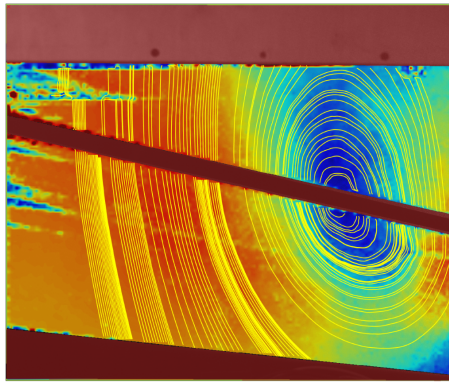
(d) Script MATLAB.

Figura 17: Confronto immagini del campo di moto della velocità ottenuto con PIVlab rispetto al nostro script.

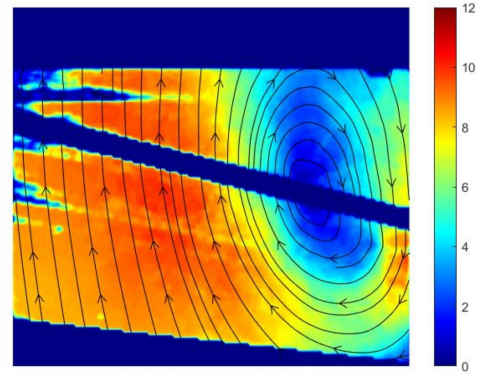
Da questi risultati si può già notare la bontà della elaborazione dei dati effettuata attraverso il nostro script. Le discrepanze che si notano sono principalmente legate all'intensità del campo di moto, probabilmente legata

alla diversa applicazione di filtri utilizzati.

Possiamo andare ad analizzare nel dettaglio l'andamento del vortice osservando sia il campo di moto su una colormap che le streamlines in Figura 18.



(a) PIVlab caso 9 m/s.



(b) Script caso 9 m/s.

Figura 18: Dettaglio del vortice in camera 2 sulla mappa velocità media e streamlines.

I risultati mostrano come in entrambi i casi il campo di moto sia correttamente catturato, fornendoci risultati molto simili. Da questa rappresentazione si può notare come anche zone critiche come quelle dei vortici siano predette con cura e dunque confermando la bontà del nostro algoritmo.

Nel nostro confronto abbiamo tenuto in considerazione anche l'analisi al campo vorticoso attraverso l'uso dei PIVlab ottenendo ottimi risultati, come mostrato in Figura 19.

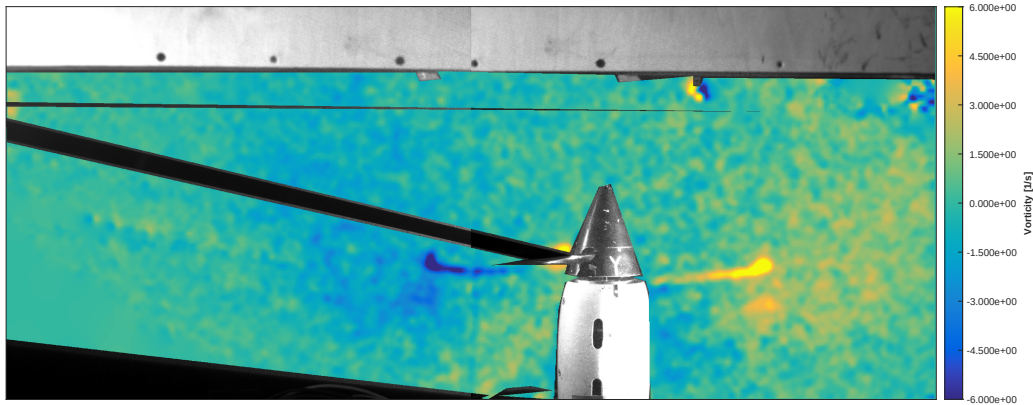


Figura 19: Risultati PIVlab campo di vorticità a 9 m/s..

Anche in questo caso, come per la velocità, notiamo la correttezza dell'andamento del campo vorticoso. Le uniche differenze di nuovo si attestano sull'intensità vorticoso ottenuta. PIVlab, in realtà, riesce ad ottenere molto bene la componente vorticoso legata alla rotazione della pala, evidenziata nei due zone ad alta vorticità (in modulo).

Applicando lo stesso filtro in pre-processing che avevamo usato per lo script e impostando gli stessi filtri anche in fase di post-processing i risultati diventano altamente soddisfacenti e i due campi di moto sono matchati alla perfezione, come si vede nelle immagini in Figura 20.

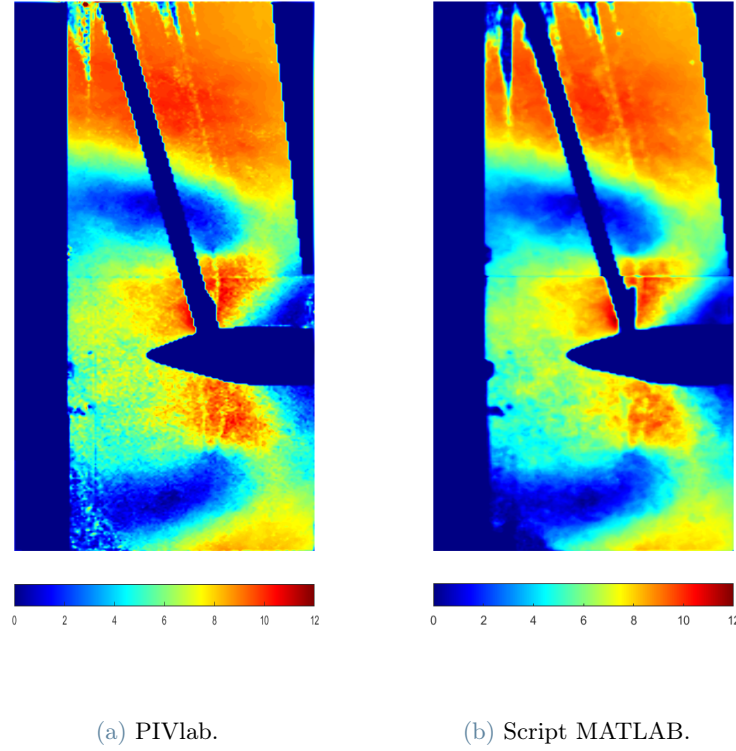


Figura 20: Media del modulo di velocità ottenuta a 9 m/s con i PIVlab rispetto al nostro script.

5.3.2. Visualizzazione 12 m/s

Per finire un breve confronto, per coerenza è stato effettuato anche nel caso a 12 m/s. I risultati in Figura 21 mostrano di nuovo gli stessi risultati citati sopra.

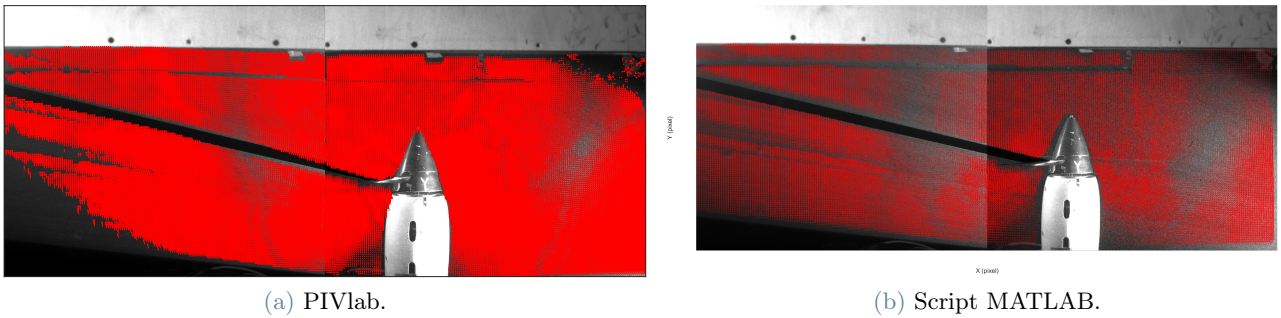


Figura 21: Immagini del campo vettoriale ottenute con PIVlab contro il nostro script.

5.4. Confronto MATLAB-PIVlab

Le differenze con il nostro algoritmo sono da identificarsi in due aspetti:

- Il campo di velocità è sottostimato con il codice MATLAB da noi implementato
- Vengono persi con il nostro codice alcuni dettagli sulle strutture vorticose

Questi due aspetti possono essere legati ai diversi filtri adottati ed ovviamente all'inefficienza del nostro algoritmo risolutivo di qualità inferiore rispetto a quello del software.

Ad ogni modo possiamo ritenerci soddisfatti della generale implementazione del nostro codice che nell' overall è riuscito a catturare più che soddisfacentemente il comportamento del flusso.

6. Analisi degli errori di misurazione e loro propagazione

Durante un esperimento, inevitabilmente si verificano errori di misurazione che possono essere suddivisi in due principali categorie: **errori sistematici** e **errori casuali**. Gli errori sistematici sono legati a problematiche costanti nel sistema, come una calibrazione imprecisa o un disallineamento degli strumenti. Al contrario, gli errori casuali sono causati da fattori imprevedibili, come fluttuazioni nel flusso o rumori elettronici nei segnali. Nel contesto di questo esperimento PIV, gli errori sistematici potrebbero essere associati alla calibrazione delle fotocamere, alla sincronizzazione tra i segnali laser e fotocamere, o a difetti nell'emissione del laser. Errori casuali, invece, potrebbero essere legati alle vibrazioni del sistema, al rumore elettronico o a piccole variazioni nel flusso d'aria all'interno della galleria del vento.

6.1. Errore assoluto e relativo

L'errore assoluto rappresenta la differenza tra il valore misurato e quello reale, espresso nell'unità di misura della grandezza in esame. Questo errore è utile per comprendere l'entità della discrepanza tra i dati sperimentali e quelli teorici. L'errore relativo, invece, esprime la deviazione come una percentuale del valore reale, permettendo di valutare l'affidabilità relativa delle misurazioni.

Nel nostro caso, l'errore assoluto potrebbe derivare dalle imprecisioni nei dati di posizionamento delle particelle traccianti, mentre l'errore relativo ci darà un'idea di quanto la variabilità nei dati influisca sulla precisione complessiva dei risultati, come la velocità delle particelle o le linee di corrente calcolate.

6.2. Propagazione dell'errore

La propagazione dell'errore è un concetto fondamentale quando si lavora con misurazioni sperimentali, poiché ogni errore si trasferisce nelle grandezze derivate, come la velocità o le linee di corrente. In un sistema come il PIV, dove le misurazioni si basano su sequenze temporali di immagini per calcolare la velocità delle particelle, gli errori nella sincronizzazione e nell'acquisizione delle immagini possono propagarsi nel calcolo dei vettori di velocità.

Pur non avendo eseguito una formalizzazione dettagliata della propagazione degli errori, è importante considerare come incertezze nei parametri di calibrazione e nei tempi di esposizione delle fotocamere possano influenzare i risultati. Ad esempio, errori nel tempo di esposizione o nella calibrazione delle fotocamere possono portare a distorsioni nei dati di velocità e, quindi, nelle linee di corrente che rappresentano il flusso del fluido.

6.2.1. Considerazioni sulla Propagazione degli Errori

Quando una grandezza, come la velocità, è derivata da una combinazione di misure (ad esempio la posizione delle particelle e l'intervallo temporale), l'incertezza complessiva dipende dalle incertezze in ciascuna di queste misure. L'incertezza nei dati di posizione delle particelle, ad esempio, si propaga nel calcolo della velocità, influenzando direttamente la precisione delle linee di corrente (streamlines).

Per esempio, se la velocità v di una particella è determinata dalla variazione della sua posizione nel tempo, qualsiasi incertezza nel calcolo della posizione e nel sincronismo tra laser e fotocamera si riflette nel valore di v . La precisione con cui questi dati vengono acquisiti influisce quindi in modo significativo sulla qualità dei risultati finali.

6.3. Fonti di errore specifiche

Anche se non è stata condotta una valutazione formale e matematica della propagazione degli errori, ci sono alcune fonti di incertezza che meritano attenzione:

- **Calibrazione delle fotocamere e allineamento ottico:** La calibrazione e l'allineamento delle fotocamere sono cruciali per la precisione delle misurazioni delle particelle. Piccole imprecisioni in queste fasi potrebbero introdurre errori nei dati di velocità, specialmente in aree di flusso complesse.
- **Sincronizzazione del sistema laser-fotocamera:** La sincronizzazione tra il laser e le fotocamere è un altro punto critico. Un errore di temporizzazione tra l'emissione del laser e l'esposizione delle fotocamere potrebbe distorcere la misura del movimento delle particelle e, di conseguenza, compromettere il calcolo delle velocità.
- **Rumore nei segnali elettronici:** Gli strumenti di misurazione, come il sincronizzatore e le fotocamere, sono suscettibili a interferenze elettroniche o rumore di fondo, che possono introdurre errori nei segnali e influenzare la qualità dei dati acquisiti.

- **Variazioni nel flusso della galleria del vento:** Le fluttuazioni nel flusso d'aria, dovute a variazioni nelle condizioni ambientali o alle caratteristiche strutturali della galleria, possono influire sulla distribuzione delle particelle e causare errori nella misurazione delle velocità, soprattutto in zone non perfettamente uniformi del flusso.

6.4. Strategie di mitigazione degli errori

Per ridurre al minimo gli errori sistematici, sono state eseguite operazioni di calibrazione approfondita delle fotocamere, delle ottiche e del sistema di sincronizzazione. Inoltre, ogni configurazione sperimentale è stata ripetuta più volte per ridurre gli errori casuali e per garantire una maggiore affidabilità dei risultati.

Nel processo di post-processing, i dati sono stati elaborati utilizzando MATLAB, dove sono stati generati grafici delle velocità e delle linee di corrente (streamlines). Questi strumenti hanno permesso di visualizzare in modo chiaro la dinamica del flusso e di individuare eventuali anomalie. È stato inoltre eseguito un confronto tra diverse acquisizioni per valutare la consistenza dei risultati e minimizzare gli errori casuali.

Nonostante queste misure di mitigazione, alcuni errori sistematici potrebbero essere stati inevitabili, come lievi imprecisioni nella sincronizzazione o nel posizionamento delle fotocamere. Tuttavia, i risultati finali sono stati adeguatamente corretti e presentano una buona affidabilità.

7. Conclusioni

L'esperimento ha dimostrato l'efficacia della tecnica PIV (Particle Image Velocimetry) nell'analisi del campo di velocità attorno al rotore di un eVTOL, con particolare attenzione allo sviluppo dei vortex rings. I risultati principali possono essere così riassunti:

la calibrazione e l'acquisizione delle immagini hanno permesso di ottenere dati accurati del campo di velocità e vorticità. Il codice MATLAB sviluppato ha prodotto risultati coerenti, sebbene con alcune limitazioni rispetto al software PIVlab.

Le osservazioni hanno confermato che il fenomeno si manifesta in condizioni di velocità di flusso ridotte (9 m/s), con vortici ben visibili attorno al rotore. L'aumento della velocità del flusso (12 m/s) ha mostrato una riduzione dell'effetto negativo dei vortici, indicando come velocità maggiore possa mitigare gli effetti negativi prodotti dai vortex ring, i quali vengono trasportati più velocemente per convezione, interagendo in modo minore con il flusso incidente sulle pale.

Il codice MATLAB sviluppato, pur essendo efficace, ha sottostimato il campo di velocità e perso alcuni dettagli delle strutture vorticosi rispetto ai risultati ottenuti con PIVlab. Le differenze possono essere attribuibili ai filtri adottati e alla risoluzione inferiore dell'algoritmo implementato.