



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Relazione per la prova finale:

**«Raccolta e analisi dei dati di volo per un  
velivolo a controllo remoto»**

Relatore: Prof. Francesco Picano  
Laureando: Emanuele Cason

Padova, 13 luglio 2023



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# 1. Introduzione

La necessità di disporre di un sistema di registrazione e trasmissione dei dati di volo (telemetria), è nata da vari obiettivi:

- Prevedere i punteggi conseguenti alle singole esercitazioni di preparazione svolte nei mesi precedenti alla gara.
- Individuare le migliori condizioni di manovra.
- Verificare l'accettabilità delle approssimazioni, delle relazioni analitiche e dei processi adottati durante il dimensionamento e design preliminare del velivolo.
- Valutare le prestazioni durante il collaudo.

In particolare, considerando vantaggi e svantaggi delle due possibilità, si è deciso di progettare, sviluppare ed integrare il sistema da zero, rinunciando ad alternative prefabbricate.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 2.1. Dispositivo lato velivolo

Il dispositivo a bordo del velivolo è stato progettato con un'architettura centralizzata e modulare, programmato con un firmware appositamente creato.

In particolare un microcontrollore interroga i sensori installati, registra i dati di volo ottenuti in una memoria non volatile e, tramite un modulo rice-trasmettitore li inoltra a terra in tempo reale.

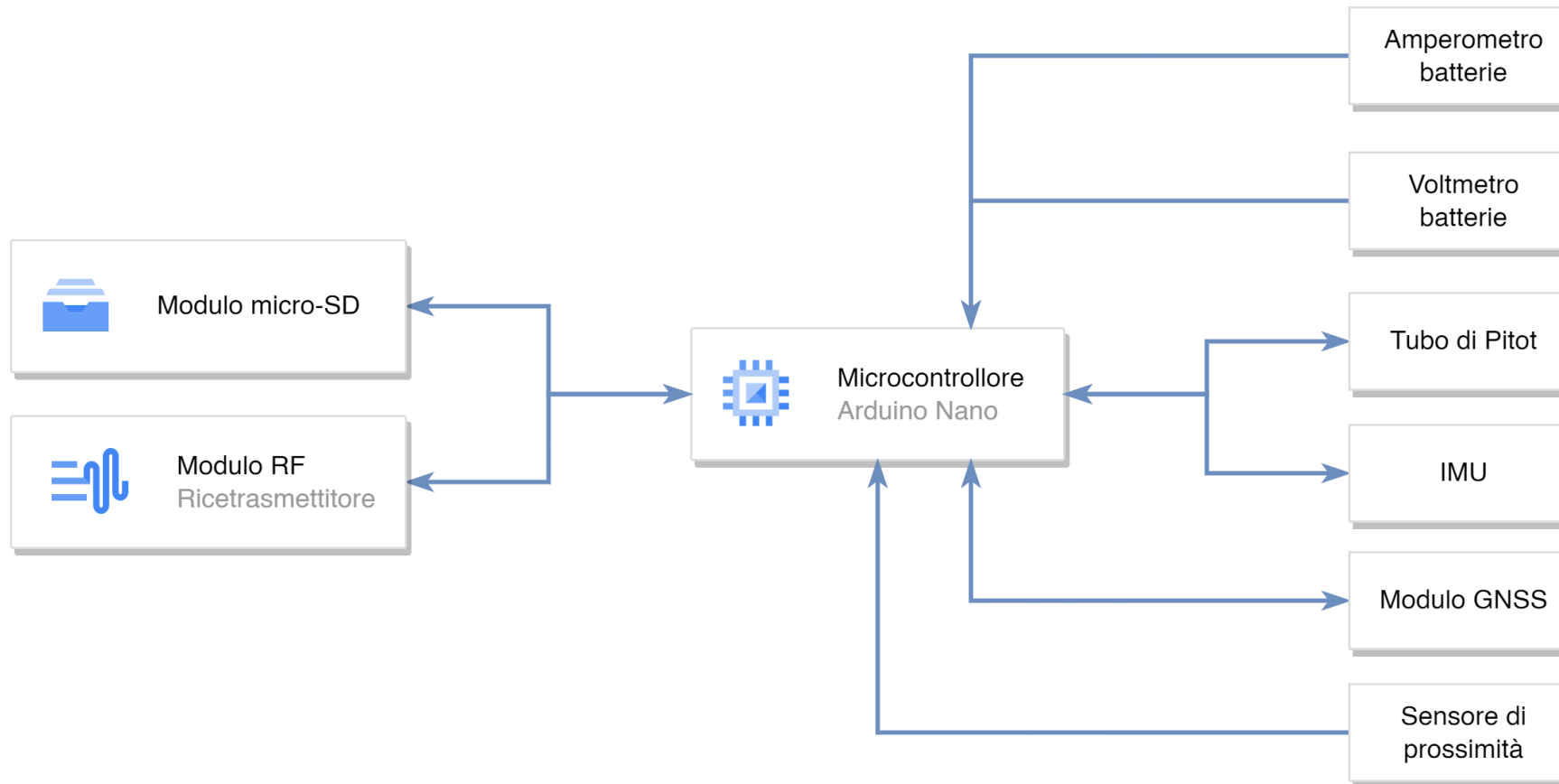
La modularità ha consentito di implementare un numero variabile di sensori, in base alle necessità del momento.





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 2.1. Dispositivo lato velivolo





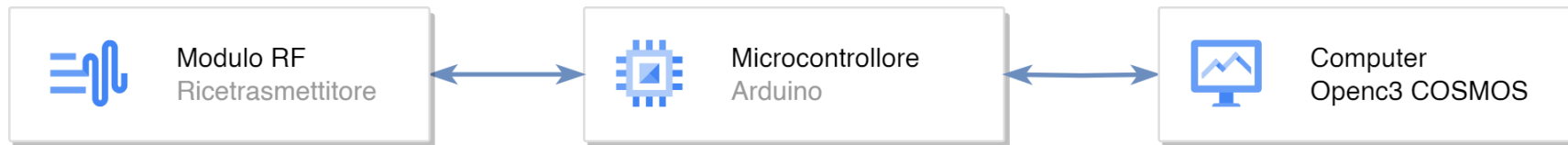
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 2.2. Stazione di terra

La stazione di terra permette il monitoraggio in tempo reale dei valori misurati dal modulo a bordo e l'analisi degli stessi, in differita, a partire dai file di log generati.

Per mezzo di un modulo rice-trasmettitore complementare a quello precedentemente citato e connesso ad un altro microcontrollore, vengono ricevuti e decodificati i pacchetti provenienti dal velivolo e i relativi dati inviati al computer tramite comunicazione seriale.

Il monitoraggio è svolto attraverso il software OpenC3 COSMOS, mentre il post-processing è affidato a vari script Python e MATLAB appositamente creati.





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

### 3. Previsione dei punteggi

E' stata eseguita elaborando i log del modulo GNSS per mezzo di uno script Python apposito. In particolare quest'ultimo permette di determinare l'istante di decollo nominale, distinguendolo dai falsi positivi.

Noto l'istante di decollo nominale, lo script calcola i valori dei fattori da considerare per l'attribuzione del punteggio:

- **Payload** in termini di massa.
- **Altitudine** a  $t+60s$
- **Distanza** tra  $t+60s$  e  $t+180s$

```
C:\WINDOWS\py.exe
Takeoff detected at time 2:20:48
  Altitude: 0.5 m
  Distance: 9 m
  Fixed satellites: 24
is this Dario's takeoff? [ENTER]/[no]: no

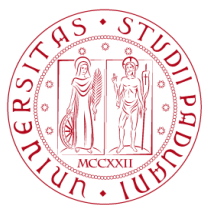
Takeoff detected at time 2:22:09
  Altitude: 0.1 m
  Distance: 11 m
  Fixed satellites: 24
is this Dario's takeoff? [ENTER]/[no]:

-----
Takeoff data:
  Time: 2:22:09
  Altitude: 0.1 m
  Position: (Lat 45.278137, Lon 11.750598)
  Speed: 5.35 km/h
  Route: 0.006 km
  Distance: 11 m
  Fixed satellites: 24

T+60s data:
  Time: 2:23:09
  Altitude: 69.3 m
  Position: (Lat 45.279828, Lon 11.751512)
  Speed: 54.13 km/h
  Route: 0.695 km
  Distance: 206 m
  Fixed satellites: 24

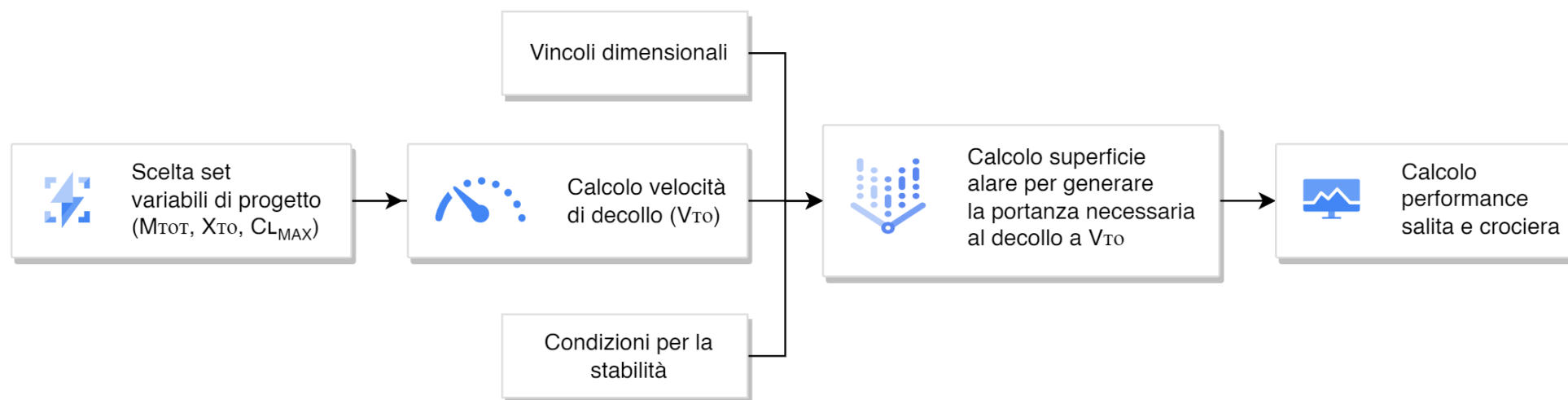
T+180s data:
  Time: 2:25:09
  Altitude: 25.5 m
  Position: (Lat 45.277598, Lon 11.750367)
  Speed: 86.66 km/h
  Route: 3.323 km
  Distance: 57 m
  Fixed satellites: 24

Delta altitude at T+60s: 69.2 m
Delta distance between T+60 and T+180 waypoints: 2.628 km
```



## 4. Verifica del processo di dimensionamento del velivolo

L'algoritmo utilizzato per ottenere i design preliminari dei velivoli del 2019 e 2022, per la sua elevata complessità ha comportato la necessità di fare svariate approssimazioni [4][5]. I dati empirici raccolti hanno permesso di verificare l'accettabilità di alcune di tali approssimazioni. Il processo di dimensionamento ha la struttura seguente:



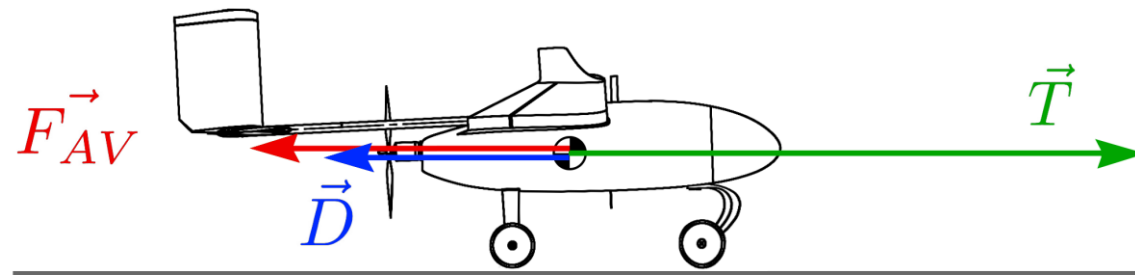




## 4.2. Verifica del processo di dimensionamento del velivolo – criticità del secondo step

Con il collaudo si sono osservate delle forti discrepanze tra distanza e velocità di decollo reali e di progetto. Questo ha spinto ad indagare il secondo step del processo, presso il quale vengono considerate ipotesi e approssimazioni forti. In particolare:

1. La potenza disponibile fornita dal sistema propulsivo viene prevista attraverso un modello che combina i dati eCalc sul motore, con quelli del datasheet dell'elica.
2. Vengono assunte tutte le forze resistenti trascurabili, assumendo che tutta la potenza propulsiva disponibile sia impiegata per accelerare il velivolo.



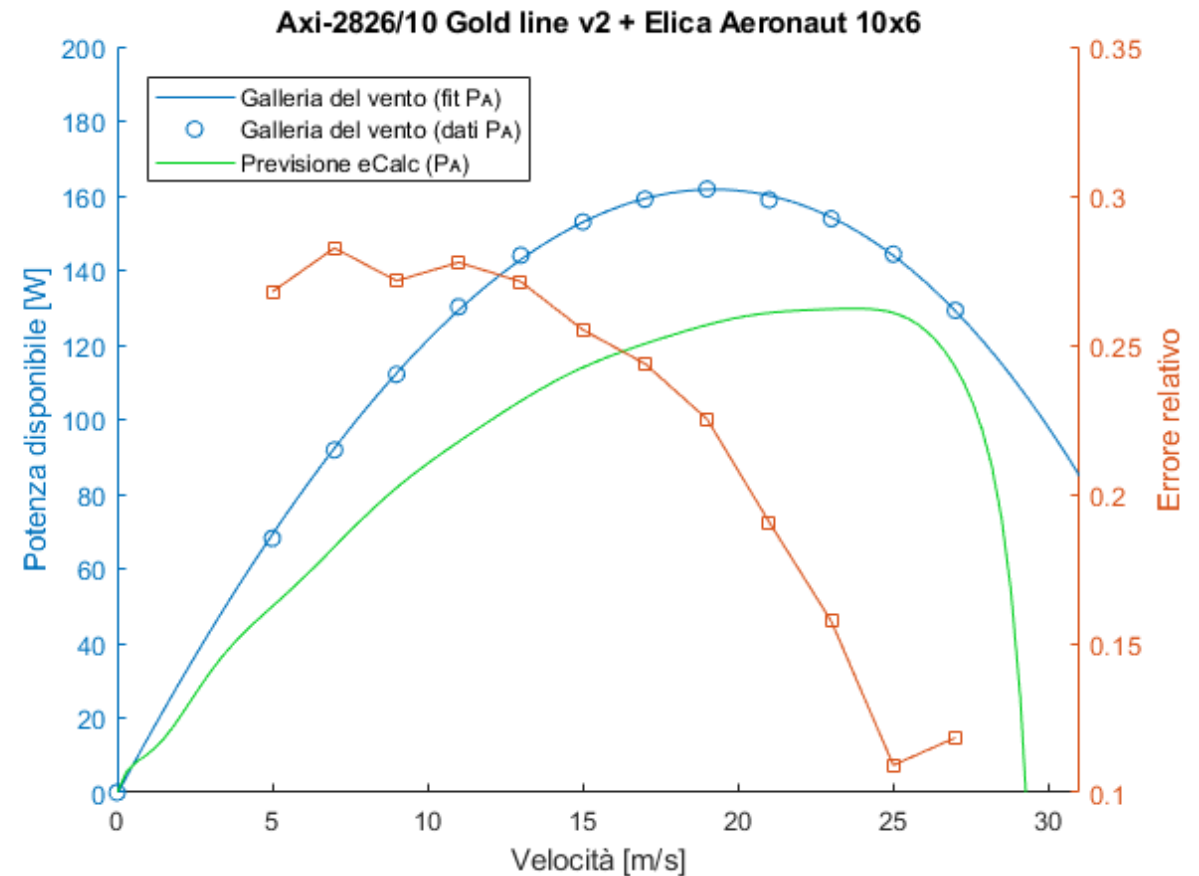




## 4.2.1 Verifica dei risultati di potenza propulsiva disponibile

A partire dai dati resi disponibili sui test condotti in galleria del vento [6], della stessa configurazione elica-motore a throttle massimo, è stato operato, tramite script MATLAB, un confronto tra dati empirici e previsti.

Si osserva che il modello utilizzato per la previsione commette un errore relativo che arriva al 30%. Questo evidenzia l'importanza di partire da dati empirici della potenza disponibile nei dimensionamenti futuri.





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 4.2.2. Verifica delle ipotesi di forze resistenti nulle

Per verificare l'accettabilità dell'ipotesi, si è confrontata la sola forza propulsiva ( $T$ ), ovvero l'unica considerata durante il dimensionamento, nota in funzione della velocità dai test condotti in galleria del vento, con la forza risultante ( $R$ ), ottenibile anch'essa in funzione della velocità dai dati di massa e accelerazione del velivolo al decollo.

$$m \cdot \vec{a} = \vec{T} + \vec{D} + \vec{F}_{AV} = \vec{R}$$

Per una maggiore affidabilità dei dati di accelerazione, si sono utilizzate due misure di origine diversa, in particolare:

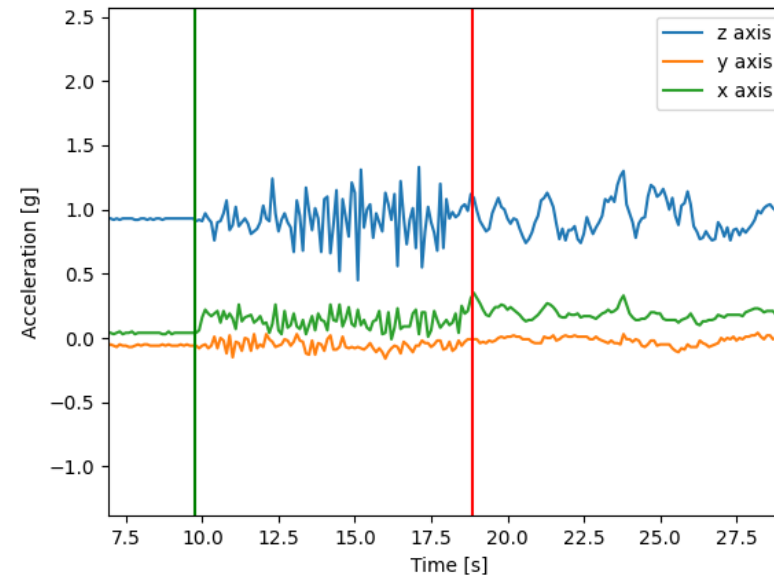
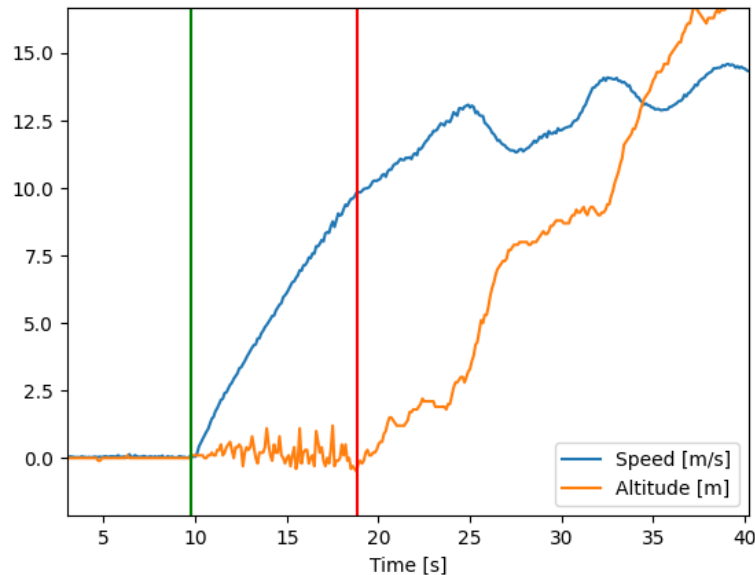
- La variazione di velocità nel tempo, misurata dal modulo GNSS a partire dai dati di posizione satellitari.
- I dati dell'accelerometro.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 4.2.2. Verifica delle ipotesi di forze resistenti nulle – individuazione dell'intervallo di misure

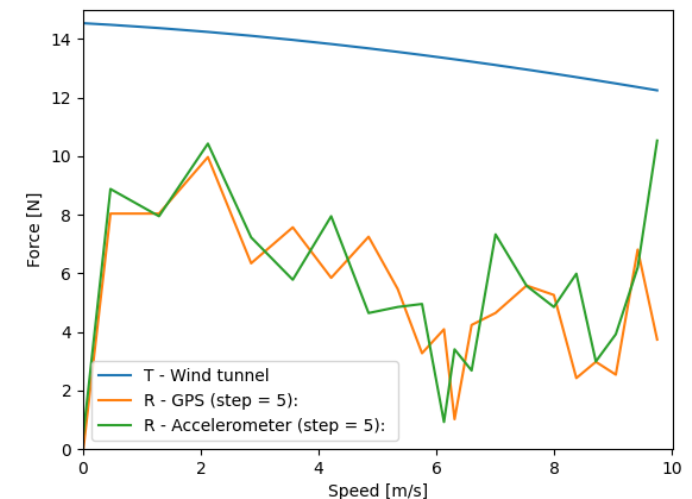
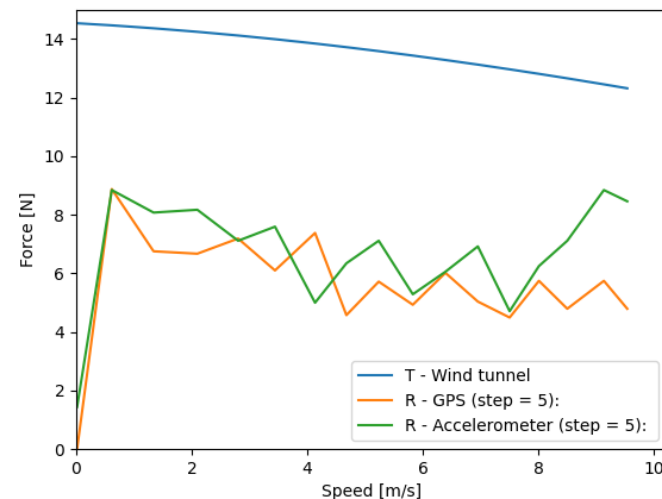
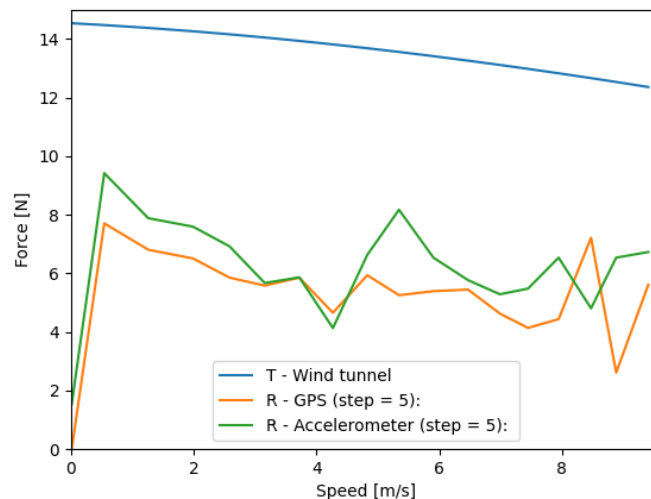
La validità delle considerazioni sul decollo (come il bilancio delle forze) è ristretta all'intervallo di accelerazione orizzontale del velivolo a contatto con la pista. Per questa ragione, lo script Python sviluppato per il calcolo e l'analisi dei tre set di dati, in primo luogo consente di individuare graficamente le sole misure riferite a tale intervallo.





## 4.2.2. Verifica delle ipotesi di forze resistenti nulle

Dai diagrammi prodotti si osserva come: le due curve della forza risultante si dimostrano coerenti tra loro, pur essendo riferite a grandezze fisiche diverse; il loro andamento è mediamente decrescente e traslato verso il basso rispetto alla forza propulsiva; la forza risultante ha un valore vicino al 50% della forza propulsiva, di conseguenza le forze resistenti non possono essere considerate trascurabili.

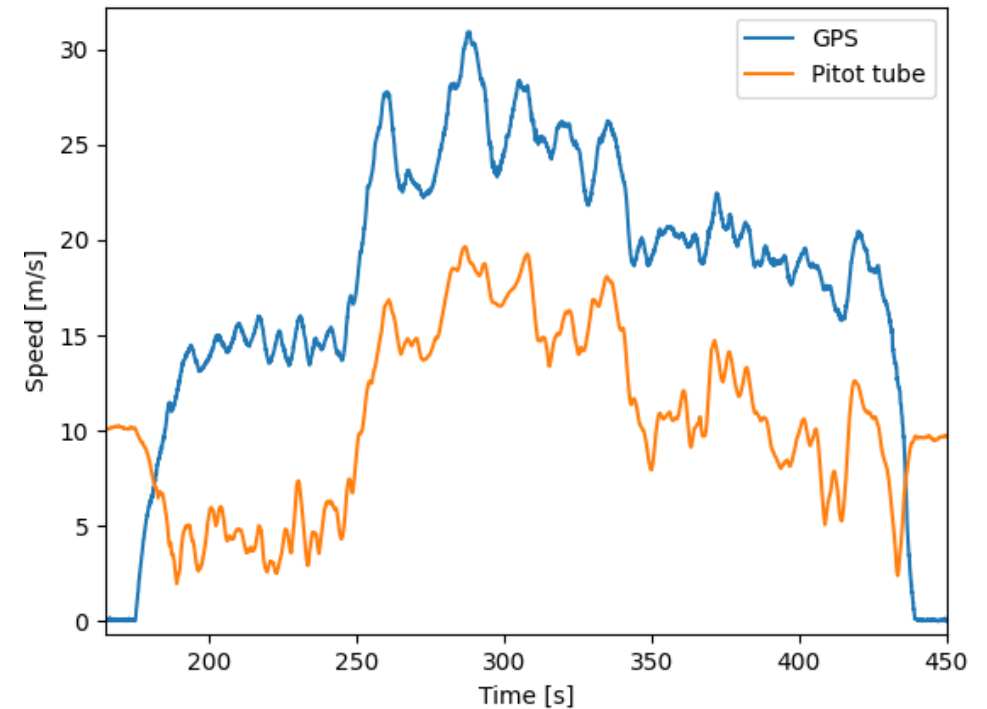




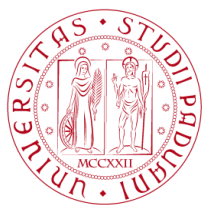
## 5. Misura della velocità del flusso indisturbato

La velocità finora considerata è sempre stata rispetto al suolo. Per una valutazione più completa della velocità del flusso e quindi delle prestazioni, è stato necessario implementare un tubo di Pitot.

I risultati empirici, applicato un filtro digitale per attenuare il rumore, hanno delineato l'andamento che è rappresentato nel diagramma, insieme alle velocità rispetto al suolo.



Si osserva che i due set di dati, differiscono per un offset pressoché costante, attribuibile a molteplici fattori come errori sistematici di misura del sensore, errori di postazione, *ecc.*



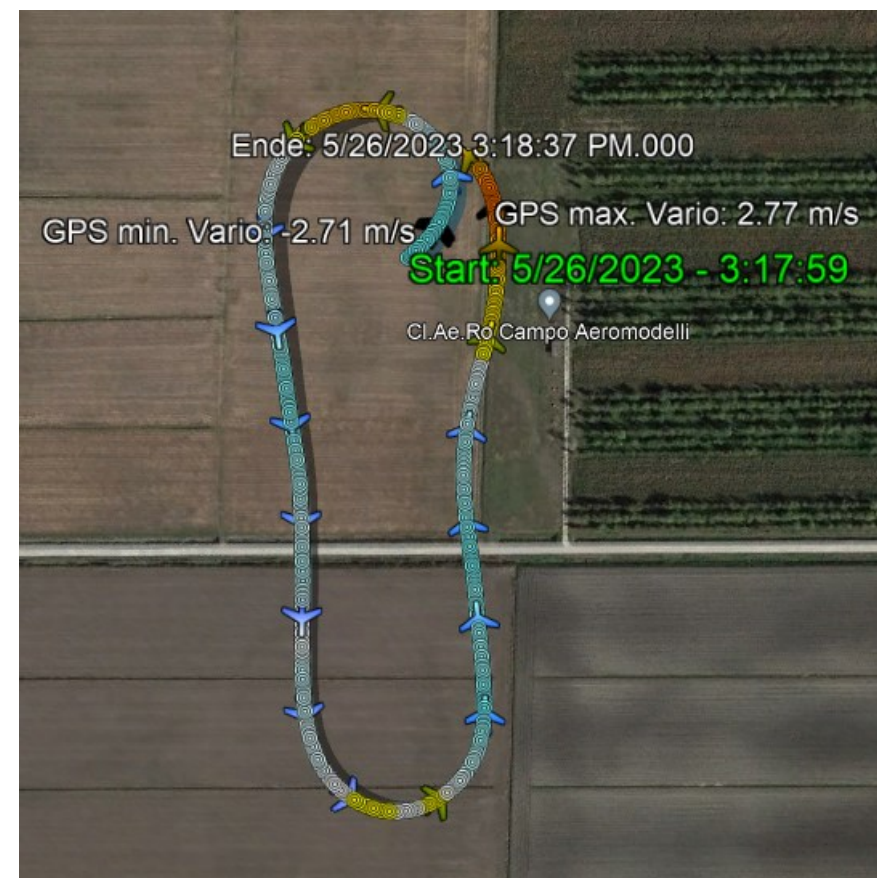
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 5.1. Misura della velocità del flusso indisturbato

L'offset costante evidenzia come, al fine di disporre di dati utilizzabili, sia necessario eseguire una calibrazione di massima del dispositivo.

A tale fine, durante il volo, è stata eseguita una traiettoria allungata, per minimizzare gli effetti del vento reale e l'impatto delle manovre di virata, pur rimanendo all'interno dello spazio aereo consentito.

Il set di dati di velocità del flusso viene dunque traslato di una costante, imponendo che il suo valore medio sia uguale a quello della velocità rispetto al suolo, durante l'intervallo di manovra.





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## 5.1. Misura della velocità del flusso indisturbato

Il diagramma delle velocità così calibrato è quello rappresentato.

Si possono osservare alcuni aspetti: il fatto che le curve abbiano inizialmente una differenza costante è un dato positivo trattandosi di grandezze fisiche completamente diverse, ed evidenzia la coerenza dei dati; inoltre, a calibrazione eseguita, si ottiene un'ottima sovrapposizione delle due curve.

