



# Analisi Aeromeccanica di un Velivolo per la Mobilità Aerea Urbana

Tesi di Laurea Magistrale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

**Arianna Pascale** (295530)

Aprile 2024



**Politecnico  
di Torino**



# Sommario

## Obiettivi

- Valutazione delle caratteristiche aerodinamiche e dinamiche di una configurazione innovativa di velivolo per la mobilità urbana.
- Definizione del **database aerodinamico** associato al velivolo.
- Analisi della **stabilità** del velivolo, attraverso lo studio delle sue prestazioni e **qualità di volo**.
- Utilizzo di software quali OpenVSP e Star CCM+.



# Indice dei Contenuti

## 1 Introduzione

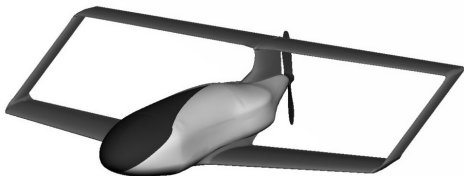
- ▶ Introduzione
- ▶ Dinamica linearizzata
- ▶ Studio della stabilità
- ▶ Qualità di volo
- ▶ Conclusioni



# Modello del Velivolo

## 1 Introduzione

- Vertical Take-Off and Landing (VTOL)
- Full electric
- Tecnologia ThrustPod



Grandezza	Valore
Massa	14 <i>kg</i>
Superficie di riferimento	0.7 <i>m</i> <sup>2</sup>
Corda di riferimento	0.3 <i>m</i>
Apertura alare	2 <i>m</i>



# Richiami teorici

## 1 Introduzione

- Il movimento di un velivolo è descritto dalle equazioni del moto, che si distinguono in **cinematiche** e **dinamiche**.
- L'impossibilità di risolvere il sistema di equazioni del moto porta alla definizione di un modello lineare delle stesse, introducendo il concetto di **derivate di stabilità**.
- Il modello linearizzato permette di separare matematicamente le dinamiche **longitudinale** e **latero-direzionale**.
- I concetti di **stabilità statica** e **stabilità dinamica** del velivolo, che ne descrivono il comportamento di fronte a una perturbazione, sono influenzati dalle derivate aerodinamiche.



# Indice dei Contenuti

## 2 Dinamica linearizzata

- ▶ Introduzione
- ▶ **Dinamica linearizzata**
- ▶ Studio della stabilità
- ▶ Qualità di volo
- ▶ Conclusioni



# Derivate Aerodinamiche

## 2 Dinamica linearizzata

Variazioni dei coefficienti aerodinamici dovute a perturbazioni delle variabili di stato.

- **Derivate Longitudinali:**

- Derivate rispetto alla velocità  $u$
- Derivate rispetto all'angolo di incidenza  $\alpha$
- Derivate rispetto alla velocità angolare  $q$

- **Derivate latero-direzionali:**

- Derivate rispetto all'angolo  $\beta$
- Derivate rispetto alla velocità angolare  $p$
- Derivate rispetto alla velocità angolare  $r$

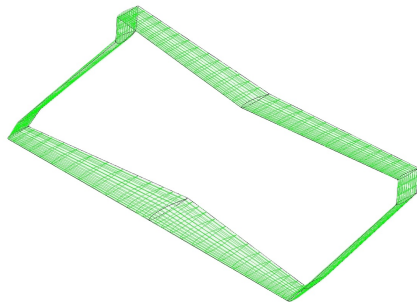


# Studio delle derivate con OpenVSP

## 2 Dinamica linearizzata

- Modifica della geometria.
- Simulazione:
  - stazionaria
  - sinusoidale (in  $p$ ,  $q$  o  $r$ )
- Risultati: derivate aerodinamiche, polare aerodinamica, punto neutro.

- $V = 20 \text{ m/s}$
- $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$







# Studio delle derivate con OpenVSP

## 2 Dinamica linearizzata

### Dinamica longitudinale

$$C_{m_\alpha} = -2.2400$$

$$C_{m_q} = -21.0433$$

### Dinamica latero-direzionale

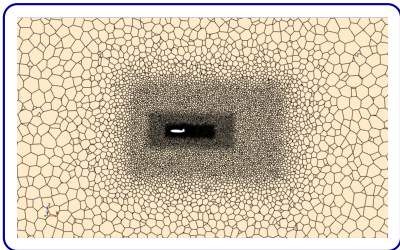
$$C_{l_\beta} = -0.0013$$

$$C_{n_\beta} = 0.0708$$

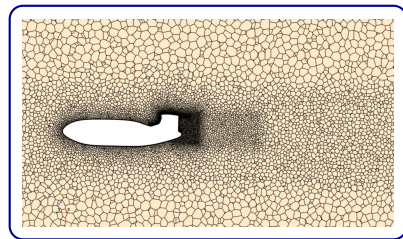


# Studio delle derivate con analisi CFD

Definizione della simulazione



- Modello turbolento:  
 $k - \epsilon$ .
- Condizioni al contorno:  
velocity inlet, pressure outlet e farfield.
- Base Size: 2 m  
(processo iterativo),  
circa 3 milioni di celle.
- Infittimento della scia.



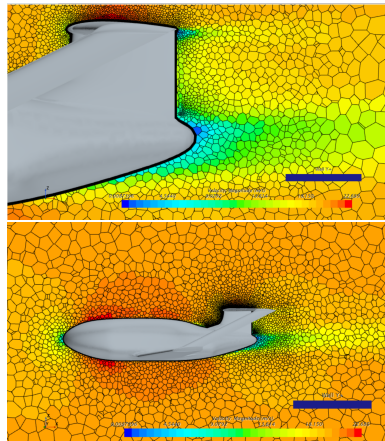


# Studio delle derivate con analisi CFD

Analisi del campo di moto e Mesh Sensitivity

Definizione della mesh a partire dallo studio della *Mesh Sensitivity*.

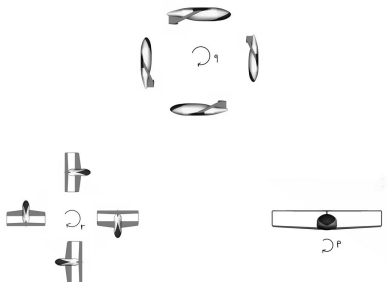
Base Size	$C_L$	$C_D$	$C_M$
1 m	0.077	0.059	0.031
2 m	0.078	0.032	0.031
4 m	0.081	0.033	0.028
5 m	0.081	0.034	0.027





# Studio delle derivate con analisi CFD

Derivate aerodinamiche



- Velocità angolare imposta nel MRF.
- Manovre di *looping*, *tonneau*, *flat turn*.
- Calcolo dei coefficienti aerodinamici al variare della velocità angolare: la **pendenza** della retta è la derivata.
- Valutazione delle derivate in  $\beta$  con lo stesso procedimento.
- Confronto con modelli semi-empirici.



# Studio delle derivate con analisi CFD

Derivate aerodinamiche

**Tonneau**

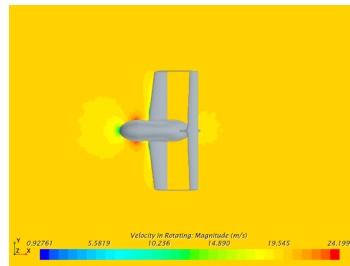
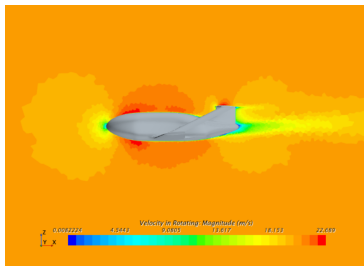
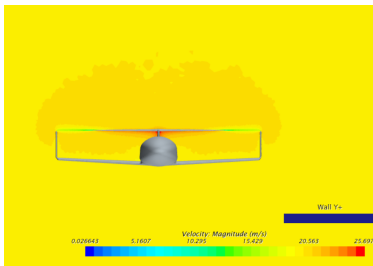
$$p = 0.05 \text{ rad/s}$$

**Looping**

$$q = 0.05 \text{ rad/s}$$

**Flat turn**

$$r = 0.05 \text{ rad/s}$$





# Database Aerodinamico

## 2 Dinamica linearizzata

Derivate longitudinali		Derivate latero-direzionali	
$C_{X_u}$	0	$C_{Y_\beta}$	-0.5335
$C_{Z_u}$	0	$C_{l_\beta}$	-0.0237
$C_{m_u}$	0	$C_{n_\beta}$	0.0069
$C_{X_\alpha}$	0.2607	$C_{Y_p}$	0.0480
$C_{Z_\alpha}$	5.2806	$C_{l_p}$	-0.6343
$C_{m_\alpha}$	2.2400	$C_{n_p}$	-0.0021
$C_{X_q}$	-0.0219	$C_{Y_r}$	0.1824
$C_{Z_q}$	11.3378	$C_{l_r}$	0.0307
$C_{m_q}$	-16.4566	$C_{n_r}$	-0.0564



# Indice dei Contenuti

## 3 Studio della stabilità

- ▶ Introduzione
- ▶ Dinamica linearizzata
- ▶ **Studio della stabilità**
- ▶ Qualità di volo
- ▶ Conclusioni



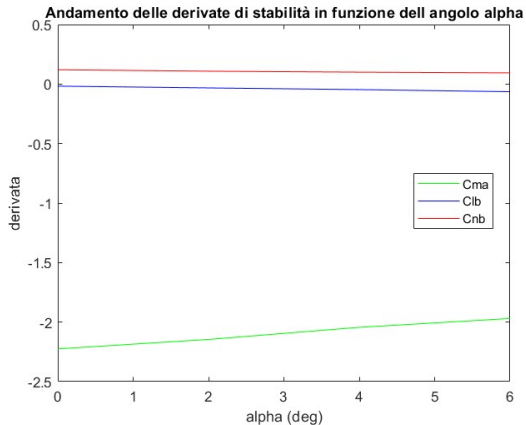
# Stabilità statica

## 3 Studio della stabilità

$$C_{m_\alpha} < 0$$

$$C_{l_\beta} < 0$$

$$C_{n_\beta} > 0$$

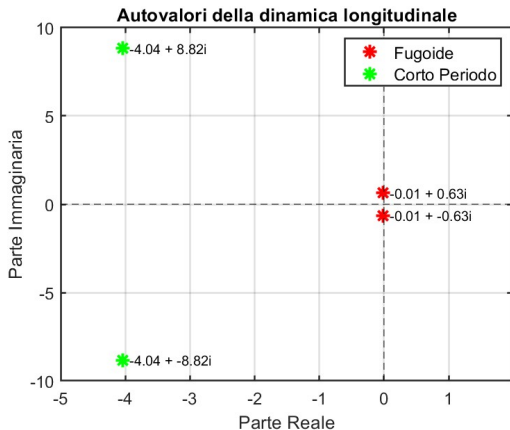






# Stabilità Dinamica: Autovalori latero-direzionali

## 3 Studio della stabilità

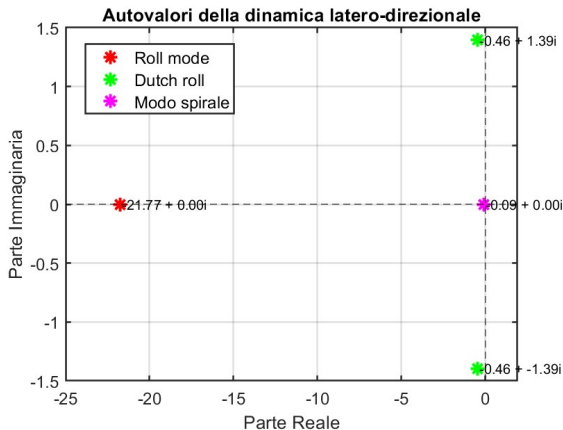


Modi	Fugoide	Corto periodo
Autovalori	$-0.01 \pm 0.63i$	$-4.04 \pm 8.82i$
Periodo (s)	9.959760	0.712273
$t_{1/2}$ (s)	49.779926	0.170954
$\omega_n$ (rad/s)	0.631009	9.700844
$\zeta$	0.021966	0.416064



# Stabilità Dinamica: Autovalori latero-direzionali

## 3 Studio della stabilità



Modi	Modo spirale	Roll mode	Dutch roll
Autovalori	$-0.09$	$-21.77$	$-0.46 \pm 1.39i$
Periodo (s)	-	-	4.507482
$t_{1/2}$ (s)	7.345784	0.031692	1.484205
$\omega_n$ (rad/s)	-	-	1.469426
$\zeta$	-	-	0.316379



# Indice dei Contenuti

## 4 Qualità di volo

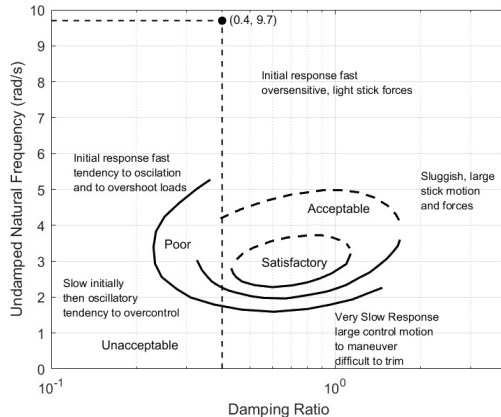
- ▶ Introduzione
- ▶ Dinamica linearizzata
- ▶ Studio della stabilità
- ▶ **Qualità di volo**
- ▶ Conclusioni



# Qualità di volo

## 4 Qualità di volo

- Caratteristiche di stabilità e controllo.
- Normativa MIL-F-8785-C.
- Dinamica longitudinale:
  - Modo fugoide: livello di accettabilità 2.
  - Modo corto periodo: livello 3.
- Dinamica latero-direzionale:
  - Modo spirale e roll: risulta una manovrabilità eccessiva.
  - Modo corto periodo: giudizio positivo.





# Indice dei Contenuti

5 Conclusioni

- ▶ Introduzione
- ▶ Dinamica linearizzata
- ▶ Studio della stabilità
- ▶ Qualità di volo
- ▶ Conclusioni



# Conclusioni

## 5 Conclusioni

- È stato definito il database aerodinamico del velivolo, confermandone la stabilità.
- Il velivolo necessita di alcuni miglioramenti riguardo manovrabilità e controllabilità.
- Il progetto ha fornito competenze aggiuntive sull'argomento e sull'utilizzo di software, specialmente di CFD.
- Eventuali futuri sviluppi possono esplorare altre metodologie per ottimizzare le prestazioni del velivolo.



*Grazie per l'attenzione!*