

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

# Progettazione preliminare di Digital Twin per la Mobilità Aerea Avanzata



**Politecnico  
di Torino**



**Relatori**

prof. Paolo Maggiore  
ing. Paolo Pari

**Candidato**

Paolo Simonetti  
matricola: S275571

ANNO ACCADEMICO 2021/2022



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Skygate e il Digital Twin . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Mobilità aerea avanzata e urbana (UAM-AAM): stato dell'arte e normativa</b>	<b>3</b>
2.1	Definizione . . . . .	3
2.2	Analisi industriale . . . . .	3
2.2.1	Casi d'uso . . . . .	3
2.2.2	Sfide . . . . .	4
2.2.3	Velivoli . . . . .	7
2.2.4	Infrastruttura . . . . .	13
2.3	Analisi normativa . . . . .	16
2.3.1	I primi passi: lo U-Space[13, 14, 15] . . . . .	16
2.3.2	Ipotesi di sviluppo per il trasporto passeggeri . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Vertical Mobility Digital Twin</b>	<b>19</b>
3.1	Vantaggi della simulazione . . . . .	19
3.2	Campi di applicabilità . . . . .	21
3.3	Scelta del software di simulazione . . . . .	22
3.3.1	X-Plane 11 . . . . .	24
3.3.2	Sviluppo dei plugin . . . . .	25
3.4	Sviluppo dell'ambiente di simulazione . . . . .	26
3.4.1	Route design e scelta del metodo di navigazione . . . . .	26
3.4.2	Scelta della localizzazione dei vertiporti[12] e sviluppo modelli 3D . . . . .	32
3.4.3	Creazione della rete di navigazione . . . . .	49
3.4.4	Sviluppo dei modelli di volo . . . . .	53
3.4.5	Lo strumento: Plane Maker . . . . .	53
3.4.6	Struttura logica della simulazione . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Sviluppi futuri</b>	<b>71</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

Il focus del mercato dell'aviazione è stato a lungo, quello dei viaggi nazionali, internazionali e intercontinentali. Le ragioni non sono difficili da immaginare: la difficoltà di rendere profittevoli voli di breve durata rispetto ai più convenienti e comodi mezzi terrestri non è l'unica in campo. Vi è anche la difficoltà di gestire le separazioni e garantire la sicurezza di velivoli piccoli in spazi aerei sovrastanti gli abitati, magari densamente popolati, nonché la gestione di spazi aerei di crescente complessità. Ulteriore difficoltà risulta essere quella infrastrutturale, l'impossibilità di costruire nuovi aeroporti in zone urbane o di garantire un basso livello di inquinamento (ambientale e acustico) nel caso di eliporti.

L'avanzamento dei sistemi di telecomunicazione digitale, della propulsione elettrica e delle opportunità industriali che ne conseguono hanno avuto l'effetto di creare interesse per un settore di nuova concezione e in rapida crescita, ovvero la mobilità aerea avanzata, e nello specifico la mobilità aerea urbana.

L'utilizzo di velivoli a propulsione ibrida o elettrica e capaci di decollo e atterraggio verticali è agli occhi del mercato la nuova frontiera dell'evoluzione dell'aviazione civile, che unita alla costante diffusione di SAPR nel mercato privato hanno necessitato di un notevole sforzo normativo per regolare un fenomeno costantemente in evoluzione.

### 1.1 Skygate e il Digital Twin

Lo scopo di questa trattazione è quello di illustrare il lavoro da me svolto presso la società Digisky di ricerca e progettazione preliminare di un Digital Twin, ovvero di un simulatore di scenari complessi, per lo sviluppo di tecnologie per la mobilità aerea urbana a Torino e nel Piemonte. Questo avviene nel contesto del progetto SkyGate, una piattaforma facilitatrice per le aziende che si affacciano nel mercato della Mobilità Aerea Avanzata, inserita nel contesto del distretto aerospaziale piemontese e della futura cittadella dell'aerospazio[8].

Il progetto si sviluppa inizialmente con una ricerca sullo stato dell'arte delle tecnologie e sulle prospettive di sviluppo della normativa e del mercato. Sulla base di questo si è poi cercato di definire un campo di applicazione dello strumento, definendo alcune aree di intervento ben delimitate. Infine è stata effettuata una caratterizzazione logica del software, nonché delle prove per testarne la validità nell'ambito di applicazione desiderato.

Per comprendere appieno la prospettiva del mercato in analisi, è necessario definire le caratteristiche che ad esso vengono attribuite, in particolare, dalle agenzie mondiali che si occupano del suo studio e del suo sviluppo.

## Capitolo 2

# Mobilità aerea avanzata e urbana (UAM-AAM): stato dell'arte e normativa

### 2.1 Definizione

La NASA si riferisce alla mobilità aerea avanzata (AAM, Advanced Air Mobility) come il settore in sviluppo che fa uso, per la movimentazione di persone e merci, delle emergenti tecnologie innovative come piccoli droni, velivoli a propulsione elettrica, controllo del traffico automatizzato etc.[18]

L'EASA, riferendosi in particolare alla mobilità aerea urbana (UAM, Urban Air Mobility), usa una definizione simile nelle sue FAQ, limitandosi però a citare l'utilizzo in aree densamente popolate e urbanizzate.[1]

La definizione che viene proposta varia spesso, in letteratura si può ulteriormente trovare una definizione di UAM che include lo spostamento urbano tramite elicotteri convenzionali. Per quanto riguarda la trattazione che segue ci si riferirà alla UAM esclusivamente come una sottocategoria dell'AAM definita come dalle due agenzie precedentemente citate.

### 2.2 Analisi industriale

#### 2.2.1 Casi d'uso

È possibile raggruppare le principali applicazioni dell'AAM in alcune categorie, elencate ad esempio da NASA ed FAA nel loro Concept of Operations[18].

1. Ispezione e mappatura di aree ed infrastrutture

Questo tipo di applicazione riguarda sia l'acquisizione di dati nel caso di ispezioni di strutture ed edifici, il monitoraggio del suolo, mappatura di aree ed infrastrutture, sia le ispezioni e il controllo delle situazioni di emergenza, come ad esempio disastri naturali, incendi ed altro genere di incombenza.

2. Trasporto merci e materiale biomedicale

Viene inteso l'uso di UAS per il trasporto di materiali a scopo sanitario e la consegna di carichi di varie dimensioni e con diverse finalità.

3. Trasporto di persone

Il trasporto passeggeri è uno degli aspetti più interessanti ma anche più complessi da un punto di vista pratico e normativo: riguarda principalmente eVTOL (con e senza pilota a bordo) e per vari scopi (air taxi, airport shuttle, trasporto di personale medico e di polizia, turistico etc.). Sarà l'aspetto principalmente considerato in questa trattazione.

4. Supporto all'agricoltura

Compiti precedentemente demandati a velivoli di aviazione generale, ma soprattutto a macchine a terra, possono essere progressivamente trasferite a UAS, come rilascio di sostanze nell'aria o da depositare al terreno, manutenzione di infrastrutture e raccolta di oggetti. Viene tralasciato dalla nomenclatura NASA perché non pertinente all'ambito della Urban Air Mobility.

### 2.2.2 Sfide

Studi hanno individuato una serie di sfide, sia tecnologiche che di mercato, che devono essere vagliate nell'inserimento in questo mercato. La rappresentazione in figura 2.1 dà un'indicazione di quelle che sono le problematiche maggiormente riconosciute nel corso di vari studi.

È chiaro come la problematica dell'accettazione sociale di un cambiamento di mobilità così radicale sia una delle tematiche che, con diverse accezioni, viene messa più in evidenza. Il settore aeronautico si è spesso dovuto scontrare con le problematiche legate in particolare alla sicurezza: il volo, come via per il trasporto passeggeri, ha un impatto emotivo notevole, dovuto alla percezione del pericolo dovuto a velocità e altezza percepite. Tuttavia quella problematica non è oggetto di questa trattazione, in quanto non strettamente legate all'aspetto tecnologico. È invece possibile riconoscere alcuni principali punti di interesse ingegneristico da questo elenco.

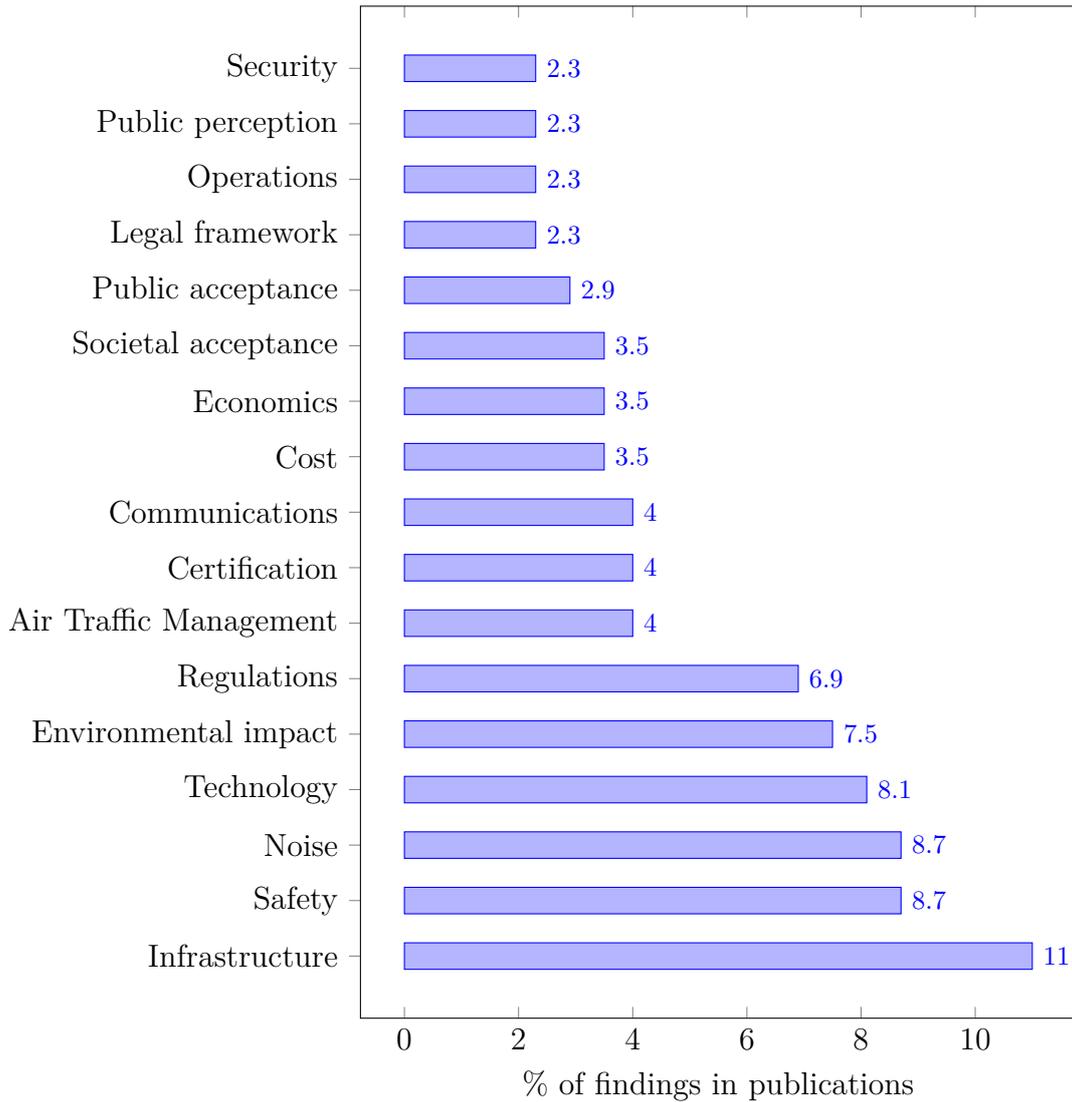


Figura 2.1: Risultati ricerca in letteratura[10]

**Infrastruttura** Il più citato in senso assoluto è il problema infrastrutturale. Esso include tuttavia molteplici aspetti, alcuni dei quali sono ulteriormente nominati in elenco e che verranno trattati in maniera estesa nei capitoli successivi. Tra questi sicuramente il problema delle infrastrutture di decollo e atterraggio, nonché di rifornimento/ricarica, chiamate vertiporti. Si tratta di un concetto completamente nuovo, che si discosta da quanto attualmente presente nelle città nella forma dell'eliporto, sia in termini di localizzazione che in termini di tecnologie presenti.

L'altro aspetto infrastrutturale è quello a colpo d'occhio meno visibile, ma altrettanto, se non più importante (soprattutto in termini di sicurezza): il controllo del

traffico aereo (ATM: Air Traffic Management). Gran parte dell'aspetto innovativo di questo nuovo concetto di mobilità sta nell'automazione dei processi di controllo del traffico, necessaria per sgravare la componente umana del controllo del traffico (ATC) e la gestione delle assegnazioni di slot per permettere anche servizi di trasporto pubblico a chiamata. Questo è conseguenza anche dell'obiettivo di aumentare la densità di traffico, dunque la riduzione della separazione fra velivoli, che non può più essere gestita a vista, né tantomeno manualmente. A questo tema può afferire anche la questione legata alle comunicazioni, che diventerebbero principalmente di tipo digitale, ricadendo nelle comunicazioni classiche solamente in situazioni operative anomale.

**Sicurezza e certificazione** Questi due aspetti sono strettamente legati fra loro. La sicurezza delle aerodine in oggetto dipende dal processo di certificazione, che allo stato attuale sta seguendo le stesse specifiche dei velivoli tradizionali. Questo fa sì che i tempi tecnici per raggiungere la maturità siano piuttosto prolungati, a causa dei design decisamente innovativi con cui si ha a che fare, che vanno dal multicottero, al convertiplano a configurazioni ibride che mantengono fisse e compresenti le componenti propulsive verticali e orizzontali. La motivazione di questo tipo di configurazioni è subordinata alla tipologia di utilizzo pensata per questo tipo di mobilità, ovvero una mobilità che arriva in zone prossimali alla destinazione finale del tragitto del passeggero, dunque richiede il posizionamento dei vertiporti in aree urbane e la possibilità di atterrare e decollare in verticale. La configurazione tradizionale ad elicottero è inadatta allo scopo, a causa della scarsa efficienza del suo accoppiamento alla propulsione elettrica e dell'inquinamento acustico.

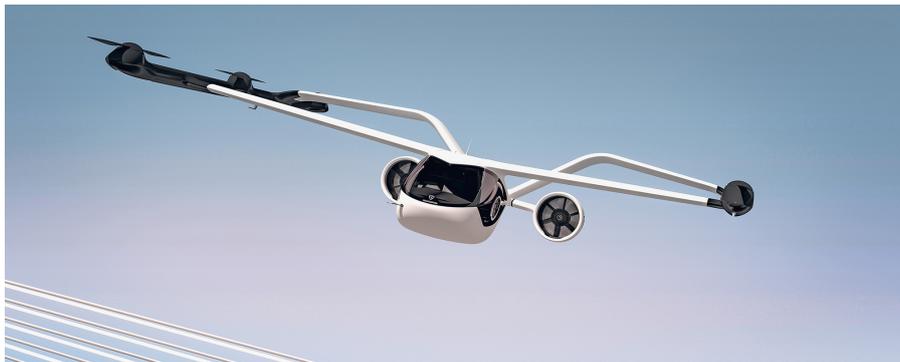


Figura 2.2: Esempio di configurazione ibrida: Voloconnect  
[www.volocopter.com/solutions/voloconnect](http://www.volocopter.com/solutions/voloconnect)

**Impatto ambientale** Il tema ambientale è di interesse generale in ambito aerospaziale, ma diventa ulteriormente centrale quando si tratta di tecnologie di

nuova introduzione e ancor più se queste tecnologie vengono dispiegate in aree urbane, già per loro natura oggetto di particolare concentrazione di inquinanti e inquinamento acustico. La scelta di sistemi propulsivi elettrici è certamente centrale nel perseguire un miglioramento in questo senso, per quanto riguarda invece la tecnologia di stoccaggio e generazione di energia le soluzioni sono molteplici, e verranno anch'esse trattate in maggior dettaglio successivamente.

**Assetto normativo** Una corretta legislazione è una base inalienabile per l'applicabilità dell'AAM in maniera capillare e standardizzata. Attualmente è stato effettuato un passo avanti con l'introduzione dello U-Space da parte di EASA, la nuova categoria di spazio aereo che permette agli operatori di piccoli UAS (SA-PR) di operare in maniera più flessibile e di interagire in maniera efficace con gli spazi aerei tradizionali. Tuttavia la sua limitatezza in altezza sugli ostacoli non consente di ottenere una separazione sufficiente, di conseguenza richiede un'ulteriore evoluzione per poter includere il trasporto di passeggeri.

### 2.2.3 Velivoli

È opportuno approfondire le tipologie di velivoli che sono stati sviluppati per questo tipo di utilizzo. Si analizzeranno anzitutto le caratteristiche comuni a tutte le categorie, per poi andare nel particolare dei dettagli di ciascuna.

Vengono tutti fatti rientrare nella categoria degli eVTOL, ossia dei mezzi a decollo verticale con propulsione elettrica. In generale, in virtù di questa caratteristica, la generazione della spinta è devoluta a eliche, intubate o meno, distribuite, dunque in numero superiore rispetto a quelle di velivoli tradizionali. Questo è dovuto a due fattori principali:

**Tipologia di motori:** per favorire una riduzione del peso e una diminuzione della dimensione dei motori è necessario ridurre il carico di coppia da essi sostenuta. Questo perché la dimensione dei motori elettrici è necessariamente proporzionale a una funzione crescente della coppia. Essa è proporzionale al flusso del campo elettrico secondo la relazione:

$$T_m(t) = K\Phi(t)i_a(t)^1$$

In cui, in un solenoide:

---

<sup>1</sup>  $T_m(t)$  =Coppia motrice  
 $K$ =Costante elettromagnetica del motore  
 $\Phi(t)$ =Flusso del campo magnetico  
 $i_a(t)$ =Corrente di armatura del motore

$$\Phi = K_{\Phi} i_e(t)$$

Questo fa sì che per ottenere flussi maggiori è necessario aumentare le masse di conduttori anche nel rotore, nel caso di magneti non permanenti, oppure la massa dei magneti nel caso di magneti permanenti. La scelta favorisce chiaramente motori più piccoli, che lavorino a regimi di rotazione elevati. La propulsione si sposta quindi verso eliche piccole, leggere che vengono installate in numero elevato per garantire una spinta sufficiente.

**Bilanciamento delle coppie** Un problema generato dal superamento della configurazione elicotteristica a favore di una configurazione a spinta distribuita su eliche, ha reso necessario l'utilizzo di eliche controrotanti per il bilanciamento della coppia. Dal momento che l'equazione di equilibrio della coppia è la seguente[20]:

$$\sum_{i=1}^N \tau_i$$

Ove N è il numero totale delle eliche. La coppia  $\tau_i$  di ciascuna elica si può poi modellare con la seguente legge:

$$\tau_i = b\omega_i^2 + I_M \dot{\omega} \quad 2$$

La conseguenza è che per ottenere delle coppie di controllo sufficienti senza variare eccessivamente il regime di rotazione delle eliche (che può portare a non linearità difficilmente gestibili nella legge di controllo) può essere utile aumentare il numero delle eliche. Questo viene anche a favore della ridondanza, che permette a queste tecnologie di recente introduzione di soddisfare elevati standard di sicurezza, grazie a soluzioni *fail safe*.

Prendendo in esame la tipologia di stoccaggio dell'energia, essa è varia, e dipende specialmente dal profilo di missione del velivolo in esame.

**Batterie chimiche** La classica batteria chimica è chiaramente una delle alternative più gettonate per il trasporto di breve distanza. Consente di produrre dei velivoli a emissioni locali completamente annullate, non necessita di serbatoi e permette di implementare due diverse tipologie di ricarica: la ricarica diretta con collegamento alla rete (o più verosimilmente a un inverter dell'infrastruttura di terra) o la sostituzione delle batterie, rapida e sicura. Inoltre

---

<sup>2</sup>  $\omega_i$  = velocità di rotazione dell'elica  
 $I_M$  = momento d'inerzia dell'elica intorno al proprio asse di rotazione

la struttura delle batterie può essere sfruttata come elemento strutturale del velivolo, come già avviene di frequente nel settore automotive.

Ha però svariate controindicazioni, prima delle quali i lunghi tempi di ricarica imposti dall'attuale tecnologia delle batterie. Questi possono tenere a terra un velivolo svariati minuti, se non ore, se non si opta per la sostituzione delle batterie, che però richiederebbe quantomeno una standardizzazione di tipologia degli accumulatori e interfaccia di ricarica per permettere a una sola infrastruttura di ricaricare le batterie di molteplici modelli di eVTOL.

Il peso delle batterie è attualmente molto elevato a parità di energia immagazzinata. Considerando un'efficienza di circa 0.9 per il sistema elettrico, con una densità energetica delle celle Li-ion di 300 Wh/Kg secondo delle proiezioni sullo sviluppo[17] e un'efficienza termodinamica di 0.28 per un motore turboelica[22] alimentato a Jet A1, il risultato del peso per ottenere 150 kWh di energia è il seguente:

Batterie:

$$\frac{150'000Wh}{0.9 * (300Wh/Kg)} = 555Kg$$

Jet A1:

$$\frac{150'000Wh}{0.28 * 11'889Wh/Kg} = 45Kg$$

Sono state escluse le valutazioni su parti strutturali e serbatoi, per semplificare la valutazione. Tuttavia è evidente che la differenza sia di un ordine di grandezza. La batteria, inoltre, a differenza del combustibile, preserva il suo peso anche col consumo della riserva di energia, cosa che impatta in maniera rilevante sull'autonomia.

**Idrogeno a celle a combustibile** L'idrogeno sembra essere una tecnologia di alimentazione particolarmente emergente. Ha numerosi vantaggi ambientali, a causa della reazione di combustione che emette solamente vapore acqueo a bassa temperatura, e di peso, dovuti alla sua densità energetica prossima ai 40'000 Wh/kg.

Tuttavia ha problemi legati allo stoccaggio: escludendo lo stoccaggio criogenico, la pressione standard di contenimento dell'idrogeno è di 700 Bar, ai quali a 15°C la sua densità è di 42Kg/m<sup>3</sup>. Questa, se confrontato con gli 810Kg/m<sup>3</sup> del Jet A1 risulta essere circa 20 volte inferiore. L'impatto viene attutito dalla quasi quadrupla densità energetica e dalla migliore efficienza (le celle a combustibile PEM raggiungono lo 0.45 di efficienza[21]). Questo, replicando la valutazione fatta in precedenza per le batterie, ma in volume:

Fuel cell:

$$\frac{150'000Wh}{0.45 * (39'400Wh/Kg) * 42Kg/m^3} = 0.201m^3$$

Jet A1:

$$\frac{150'000Wh}{0.28 * 11'889Wh/Kg * 810Kg/m^3} = 0.055m^3$$

In questa condizione è necessario notare che l'idrogeno necessario occupa il quadruplo del volume, ma necessita anche di serbatoi in grado di sopportare la pressione di stoccaggio. Questo si traduce in un chiaro svantaggio di peso.

Ulteriore svantaggio in termini infrastrutturali si trova nel sistema di rifornimento, che richiede una rete di distribuzione dell'idrogeno efficace, dei sistemi di produzione energeticamente sostenibili e dei sistemi e delle procedure che consentano di rifornire l'idrogeno in pressione in condizioni di sicurezza.

**Ibrido serie Jet Fuel-elettrico** Infine un ulteriore tecnologia che sta prendendo piede nel settore, specialmente nel segmento dei velivoli a medio raggio, per trasferimento regionale, è quella più tradizionale. Consiste nella generazione di potenza elettrica attraverso un turboshaft alimentato a jet fuel. Il confronto con le tecnologie precedenti rende chiari i vantaggi in termini sia di stoccaggio, che di reperibilità. La diffusione della propulsione a combustibili fossili rende inoltre questo sistema il più economico, nonché il più sviluppato in termini di affidabilità.

Lo svantaggio è altrettanto chiaro, la pressione sociale e normativa per il progressivo superamento dei combustibili fossili crea delle barriere per questa tecnologia, oltre che il limite del rumore dell'unità di generazione, che si somma a quello dell'unità propulsiva. Tuttavia per la categoria di velivoli sopra citata risulta allo stato attuale l'unica possibile alternativa, poiché le due tecnologie precedenti non sono in grado di garantire l'autonomia necessaria allo svolgimento della missione. Una soluzione parziale al problema dell'inquinamento può essere l'utilizzo dei SAF, che tuttavia non risolve l'inquinamento prossimale.

Le tipologie di velivoli sono infine categorizzabili, come già anticipato, in tre macro-categorie: i multicotteri, i convertiplani e i velivoli ibridi.

**Multicotteri** La tipologia più convincente per l'utilizzo nell'ambito urbano.

Mutua il concetto della configurazione dai multicotteri SAPR, che negli ultimi anni hanno incontrato un notevole sviluppo, mentre il concetto della cellula e della gestione degli spazi è legato a doppio filo alla tradizione automobilistica.

Il sostentamento è garantito da un numero elevato di eliche, che devono garantire i restrittivi requisiti di sicurezza attualmente in vigore. Questo perché i motori elettrici allo stato attuale sono molti ordini di grandezza sotto quel valore, spaziando fra un parametro di affidabilità di  $10^{-4}$  e  $10^{-6}$ , contro i  $10^{-9}$  richiesti dalla EASA SC-VTOL-01[19].

L'autonomia è limitata fra i 20 e i 40 minuti, a causa della scarsa efficienza del sistema di sostentamento completamente affidato alla potenza dei motori. Questo può essere alleviato da una strategia progettuale che dà ai piloni di sostegno dei motori un profilo aerodinamico portante, ma l'effetto è molto limitato.

Esempi in fase avanzata dello sviluppo sono il Volocopter Velocity (figura 2.3) o l'Ehang 216, il primo in fase di certificazione EASA avanzata mentre il secondo è già in uso in Cina per operazioni di logistica aerea.



Figura 2.3: Volocopter Velocity  
[www.volocopter.com/solutions/velocity](http://www.volocopter.com/solutions/velocity)

**Convertiplani** Questa categoria afferisce a una tipologia di aeromobile già nota per i grandi vantaggi, ma anche per le enormi sfide tecnologiche che porta con sé. Le gondole motore basculanti sull'ala fissa che genera portanza in volo traslato sono una tecnologia che massimizza l'efficienza in volo traslato consentendo comunque la possibilità di atterrare verticalmente. Inoltre la possibilità di atterrare in maniera convenzionale rende questa categoria estremamente versatile e in grado di fornire un ulteriore grado di sicurezza in caso di avaria.

Le problematiche più importanti sono due. La prima è legata alla sicurezza e alla certificazione del sistema di basculamento delle gondole, che può generare problemi di inceppamento o movimento asimmetrico. Questo rende estremamente lungo e complesso l'iter di certificazione. A ciò si aggiunge il problema delle leggi di controllo del volo, che oltre ad avere le complessità legate alla transizione del regime di volo da sostenuto a traslato, devono

anche adattarsi in maniera repentina ad eventuali situazioni anomale come quelle sopra presentate.

Esempi in fase di testing sono il Manta ANN2 (figura 2.4) e il LiliumJet, entrambi in fase di studio su modelli in scala, o il Joby Aviation eVTOL, in fase di certificazione negli Stati Uniti.



Figura 2.4: Prototipo in scala del Manta ANN2  
[www.mantaaircraft.com](http://www.mantaaircraft.com)

**Design ibrido** Il design ibrido è una tipologia di configurazione che, a scapito di una perdita in efficienza, cerca di ottenere il meglio dell'efficienza del volo ad ala fissa senza sacrificare la sicurezza di non variare l'asse di spinta dei motori. Questo è reso possibile dalla differenziazione dei compiti delle eliche, alcune delle quali sono deputate alle fasi di salita e discesa, altre sono allineate orizzontalmente e si occupano della fase di volo traslato. Chiaramente questo peggiora l'efficienza sia delle fasi di salita, dove le superfici portanti ostruiscono parzialmente il flusso d'aria delle eliche di sostentamento, che a loro volta nelle fasi di volo traslato invece creano resistenza addizionale poiché esposte al flusso d'aria.

L'eliminazione però di parti mobili, al di là dei motori stessi, rende molto più semplice la certificazione, e la presenza di una superficie aerodinamica portante fissa rende possibile la planata, consentendo un ulteriore fattore di sicurezza rispetto al concetto del multicottero.

A questa categoria afferiscono ad esempio il Volocopter Voloconnect (figura 2.2) e il Beta ALIA.

## 2.2.4 Infrastruttura

Le caratteristiche dei velivoli e del loro profilo di missione, che include quindi un decollo e un atterraggio verticali, nonché della prospettiva di un volo quasi completamente autonomo, richiede ovvie attenzioni all'infrastruttura, intesa come i *terminal* delle tratte, ovvero i vertiporti, e la struttura che si occupa di gestire e controllare il traffico, ovvero l'ATM.

### Vertiporti

I vertiporti hanno delle caratteristiche uniche, che li differenziano molto dagli eliporti, dei quali conservano però alcune caratteristiche.

Il complesso di un vertiporto si sviluppa, chiaramente, intorno all'area di atterraggio e decollo, che non è dissimile a quella di un eliporto: uno o più TLOF pad possibilmente rialzati. Questi possono avere dimensioni molto diverse a seconda della destinazione d'uso: aeromobili destinati al trasporto di merci potrebbero non necessitare dello spazio di un aeromobile per il trasporto di passeggeri.

Alle piattaforme TLOF e ai suoi spazi di sicurezza si aggiungono gli altri elementi dell'area di movimento: taxiways e aree parcheggio. Per massimizzare il throughput del vertiporto sono molteplici le configurazioni per la disposizione degli elementi, sono allo studio varie configurazioni. La movimentazione sarà deputata principalmente a sistemi automatizzati di traino, mentre nelle aree di parcheggio devono essere considerate le necessarie infrastrutture per il rifornimento (elettrico o di combustibile) o la sostituzione delle batterie, così come quelle necessarie, eventualmente, per il line servicing.

Altra sezione fondamentale è quella necessaria alla gestione dei passeggeri con tutti i relativi servizi: vendita dei biglietti, controlli di sicurezza, gestione bagagli aggiuntivi, servizi accessori e i non meno importanti scambi per il trasporto intermodale: essi possono riferirsi sia all'interscambio con mezzi di trasporto pubblico, sia taxi e parcheggi di interscambio per mezzi personali o a noleggio.

Parallelamente bisogna considerare l'infrastruttura di cargo handling, con i servizi di tracciamento delle merci, la distribuzione e il caricamento sugli aeromobili.

Infine, comune anche con gli eliporti, non si può non nominare tutti gli elementi legati agli ausili, visivi e non, di navigazione, le stazioni di rilevamento meteorologico, i sistemi per la comunicazione e vari altri.

### Infrastruttura di rete e ATM

**Concept of operations** L'infrastruttura della rete UAM è maggiormente comprensibile se si introduce un concept of operations. Un buon indirizzo lo dà la NASA, attraverso i suoi molti studi, alcuni dei quali sono già stati precedentemente nominati.

Si è infatti accennato al concetto di UAM Maturity Level[18]: la NASA ha infatti introdotto delle fasi per poter avere una prospettiva codificata delle opportunità e delle sfide considerate a ciascun livello di maturità. Le caratteristiche di ciascun livello sono ben descritte in figura 2.5

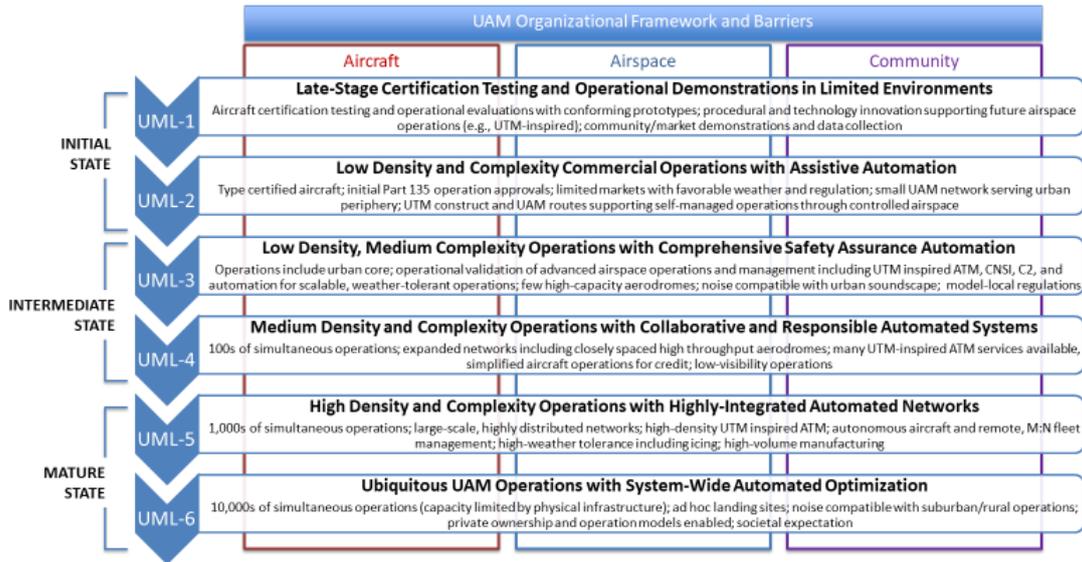


Figura 2.5: Descrizione di dettaglio degli UML[18]

Il riferimento che verrà fatto per quanto riguarda il *concept of operations* è alla UML-4, che è lo stadio iniziale di operatività di eVTOLs per il trasporto passeggeri. Il livello di complessità è medio, e il volume di traffico è nell'ordine delle centinaia di operazioni simultanee. Si tratta inoltre del primo livello di applicazione di un sistema di controllo del traffico automatizzato che scarichi la gestione dall'ATC umano. Questo vuole essere, d'altronde, lo scenario operativo al quale si rivolge il Digital Twin.

Ovviamente si assume che per il raggiungimento di questo livello di maturità, siano stati raggiunti anche i tre precedenti, comprensivi di tutto l'assetto normativo. Inoltre verrà considerato in una prospettiva di evoluzione. Quello che viene proposto dal documento in esame è relativo a una sintesi dei risultati ottenuti dagli studi di varie aziende e della stessa agenzia statunitense.

Lo spazio aereo dove si svolgono le operazioni viene definito UAM Operations Environment (UOE), e si tratta di un volume prevalentemente statico e quindi rappresentabile attraverso le cartine aeronautiche standard. Esso attraversa molteplici spazi aerei tradizionalmente definiti, e raggiunge il suolo solo ove necessario. La non staticità dello spazio aereo si manifesta nel caso di restrizioni o

modifiche temporanee dello spazio aereo, in occasione di eventi particolari. Inoltre, nel caso di penetrazione di spazi aerei controllati, l'accesso e il controllo sono ulteriormente subordinati all'approvazione dell'ente di controllo.

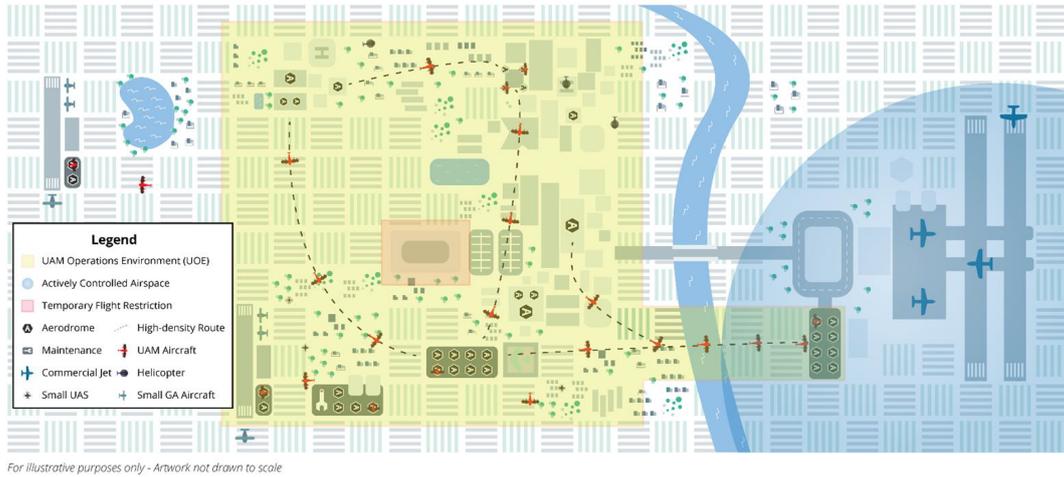


Figura 2.6: Rappresentazione dall'alto di una UOE[18]

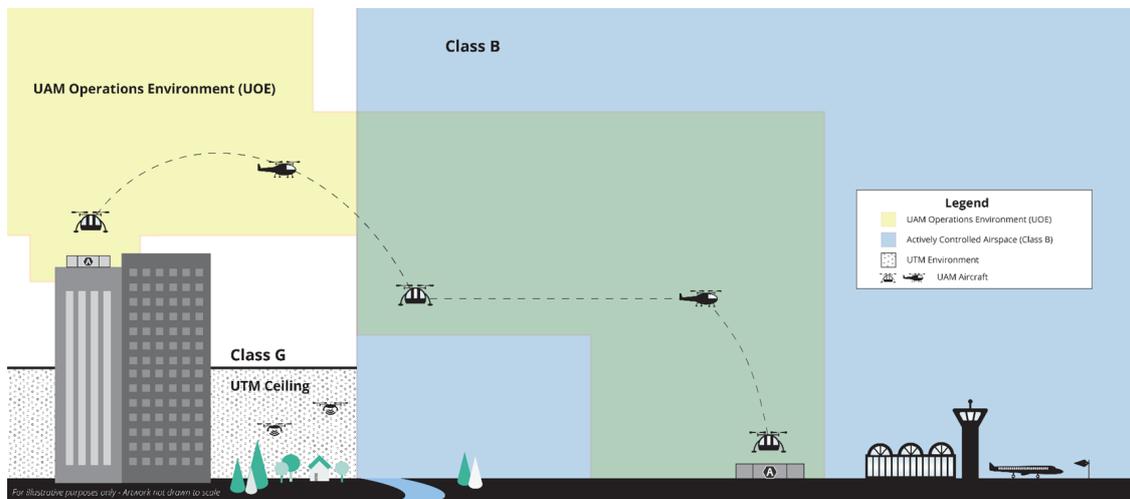


Figura 2.7: Rappresentazione laterale di una UOE[18]

All'interno della UOE possono essere definite varie modalità di gestione delle rotte, che verranno illustrate successivamente. In queste aree i principali enti di gestione del traffico sono due: il controllo del traffico di ciascun vertiporto e il gestore dell'UOE. Entrambi si avvalgono estensivamente di comunicazioni attraverso sistemi Datalink e sistemi digitali di gestione del traffico, riducendo al minimo e, progressivamente portandola a un compito di puro montaggio, l'azione

umana.

Il primo si occupa di gestire decolli, atterraggi e movimenti a terra, e in generale tutto ciò che avviene all'interno della Vertiport Operations Aerea (VOA), corrispondente al concetto tradizionale di ATZ.

Il secondo, in sintonia con FAA si occupa di approvare i piani di volo, di gestire il traffico nelle aerovie dell'UOE e il traffico in ingresso e in uscita, oltre che comunicare tempestivamente le variazioni dinamiche delle caratteristiche dello spazio aereo e delle aerovie. Qualora la UOE, come precedentemente accennato, penetri all'interno di uno spazio aereo controllato, le operazioni sono comunicate all'ente che lo gestisce, e le attività sono soggette alla sua approvazione.

## 2.3 Analisi normativa

Oltre alle previsioni sullo sviluppo delle operazioni è infine necessario valutare lo stato attuale dell'assetto normativo. Questo dev'essere fatto tenendo in considerazione la differenza tra FAA ed EASA.

FAA, in collaborazione con NASA, sta sviluppando il concept of operations precedentemente descritto. Quanto attualmente in vigore riguarda esclusivamente l'utilizzo di Unmanned Aerial Systems (UAS) ad uso ricreativo e certificato, che rispecchia la normativa in vigore anche in Europa.

In Europa, nonostante sia peraltro in vigore una normativa specificamente indirizzata nell'ambito degli UAS, sono stati emanati il 21/04/2021 tre regolamenti di esecuzione che introducono un radicale cambiamento nella concezione di spazio aereo.

### 2.3.1 I primi passi: lo U-Space[13, 14, 15]

I regolamenti appena citati, che entreranno in vigore a decorrere dal 26/01/2023, introducono il concetto di U-Space (Urban Air Space): si tratta di *una zona geografica designata dagli Stati membri, all'interno della quale le operazioni UAS sono consentite solo con l'ausilio di servizi U-space*. Questa zona geografica compenetra, non differentemente dalla UOE ipotizzata dalla NASA, gli spazi aerei tradizionali, e funge da complemento, aggiungendo ai servizi ad essi collegati dei servizi aggiuntivi specificamente indirizzati agli UAS. Si introduce inoltre il concetto di riconfigurabilità dinamica dello spazio aereo, che può essere, se incluso in uno spazio aereo controllato, limitato dinamicamente a seconda delle condizioni di traffico o di operatività.

Lo spazio così designato include dei limiti operativi determinati dagli enti nazionali, non solo in termini operativi ma anche in termini di requisiti di accesso per operatori UAS e/o della strumentazione da loro utilizzata.

Questi servizi sono, nello specifico:

**Servizio di identificazione di rete** Identificazione e monitoraggio continuo della posizione, della traiettoria 4D degli UAS e del loro stato di funzionamento. Fornitura degli stessi agli utenti autorizzati.

**Servizio di geo-consapevolezza** Fornitura agli operatori UAS delle informazioni operative relative alle caratteristiche degli spazi aerei, le loro delimitazioni geografiche e le eventuali limitazioni temporanee.

**Servizio di autorizzazione di volo UAS** Verifica e approvazione/rifiuto delle richieste di piano di volo sottoposte da parte degli operatori UAS, relativa notifica e comunicazione dei margini di deviazione dall'autorizzazione.

**Servizio di informazioni di traffico** Fornitura agli operatori UAS delle informazioni relative al traffico limitrofo alla zona delle operazioni, comprensivo del traffico UAS al fine di mantenere la corretta separazione e compiere eventuali azioni atte ad evitare collisioni.

**Servizio di informazione meteorologica** Fornitura aggiornata di informazioni meteo aeronautiche per gli operatori UAS.

**Servizio di monitoraggio della conformità** Verifica della conformità delle attività alle autorizzazioni, notifica agli interessati nel caso di deviazione.

Questi servizi vengono emessi da fornitori designati dagli enti nazionali, fornitori che possono essere differenti per ogni servizio o fornitori unici.

### 2.3.2 Ipotesi di sviluppo per il trasporto passeggeri

L'impianto di servizi forniti nell'ambito dell'U-Space è un banco prova importante: la digitalizzazione di procedure come l'autorizzazione al volo, il requisito di un tracciamento costante, gli spazi aerei che variano dinamicamente e molti altri aspetti sono questioni affrontate anche nel *Concept of Operations* precedentemente descritto. EASA sta infatti effettuando una serie di studi attraverso la divisione *SESAR joint undertaking* ed in particolare il progetto *CORUS-XUAM* (Concept of Operations for European U-Space Services - Extension for Urban Air Mobility). Si tratta di un Very Large Demonstration project, che mira ad estendere, appunto, i servizi dello U-Space nella mobilità aerea urbana, un progetto corale di svariati attori in Europa (tra cui alcuni italiani) che sperimenteranno ciascuno un aspetto diverso di questo sviluppo successivo.

**ENAC** In Italia, oltre che la partecipazione al progetto *CORUS-XUAM*, è stato emanato nel 2021 un piano strategico nazionale<sup>[16]</sup> che indica la traccia che si vuole seguire per lo sviluppo su grande scala della AAM. In tale piano sono presenti dettagli in generale sulla roadmap italiana per l'implementazione delle

tecnologie riguardanti l'AAM, quindi riguardanti tutti gli ambiti del lavoro aereo, dal telerilevamento all'agricoltura, ma anche per l'applicazione al trasporto passeggeri, che per quanto distante nel tempo viene vista come un punto di arrivo fondamentale. In quest'ottica il progetto SkyGate è visto come centrale, con Digi-Sky ed Always in prima linea con Joby Aviation per puntare alla concretizzazione degli obiettivi. Per il loro raggiungimento è stata stilata una roadmap con delle milestone di medio periodo per l'attuazione di prime attività commerciali entro i prossimi cinque anni (figura 2.8).

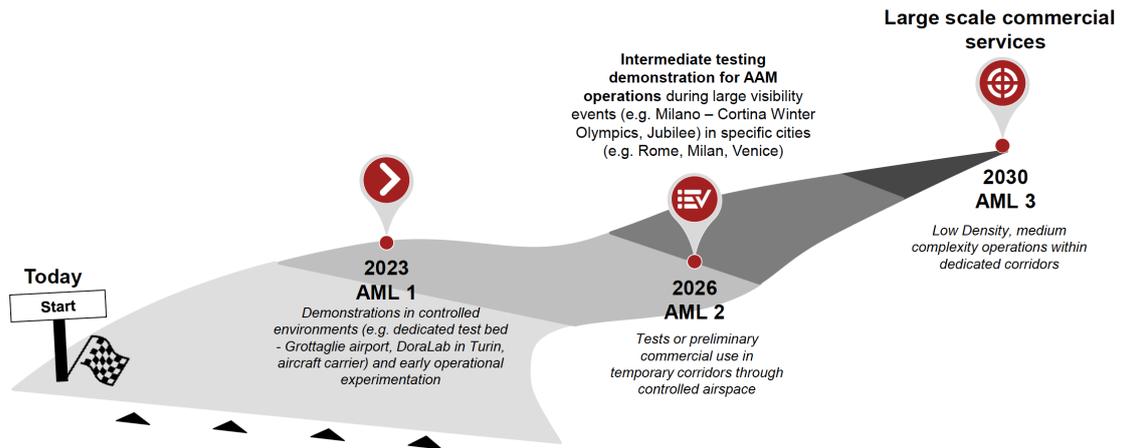


Figura 2.8: Roadmap ENAC[16]

## Capitolo 3

# Vertical Mobility Digital Twin

Alla luce delle analisi appena svolte, lo sviluppo delle tecnologie abilitanti per la AAM sta avanzando con un ritmo molto elevato, ma tende a scontrarsi con lo scoglio della realizzazione concreta. Come precedentemente riportato, da una parte le problematiche legate alla certificazione di velivoli di nuova concezione rallenta il loro ingresso nel mercato, dall'altra, in maniera ancor più determinante, l'assenza di una regolamentazione per gli spazi aerei urbani realmente usufruibili e di un'infrastruttura per una gestione automatizzata del traffico rendono comunque impossibile introdurre queste tecnologie anche a scopo di test nel loro ambiente operativo. Il progetto SkyGate, ed in esso il Vertical Mobility Digital Twin (VMDT) hanno lo scopo di inserirsi proprio in questo contesto, con l'intento di essere un facilitatore dello sviluppo di questi prerequisiti abilitanti alla AAM.

### 3.1 Vantaggi della simulazione

La simulazione del volo offre numerosi vantaggi, resi ulteriormente forti dalla notevole capacità di calcolo dei calcolatori odierni, e di conseguenza dalle capacità dei simulatori di volo di replicare, attraverso modelli real-time, un ambiente realistico sotto molteplici punti di vista.

**Caratteristiche** La simulazione del volo odierna include modelli di volo basati su metodi con precisione molto elevata, come la Teoria dell'Elemento di Pala (Blade Element Theory) per quanto riguarda superfici portanti, eliche e rotori. A questo e al frequente utilizzo del metodo dei pannelli per il calcolo delle resistenze sulle parti di fusoliera o strutturali, viene sempre più spesso affiancato un modello semplificato di CFD in tempo reale, che permette di simulare le interferenze fra gli elementi stessi del velivolo come il *prop wash* o il *deep stall*.

Un ulteriore elemento di vantaggio è insito nella simulazione ambientale: i simulatori odierni comprendono al loro interno modelli estremamente accurati delle condizioni atmosferiche e dell'aria, che consentono di simulare non solo gli effetti dovuti alle condizioni meteorologiche, ma anche gli effetti delle condizioni dell'aria sulle prestazioni dei propulsori. Può non essere scontato per simulazioni in aree temperate, ma risulta fondamentale la possibilità di simulare condizioni operative in contesti di meteo come nel caso di città molto elevate come ad esempio Città del Messico, o città immerse in ambiente desertico con escursioni di temperatura molto elevate fra notte e giorno. Sempre più spesso viene poi introdotta la simulazione degli effetti aerodinamici dovuti ad edifici ed orografia.

La complessità degli scenari di simulazione odierni è data anche dalle numerose simulazioni degli ausili alla navigazione e della localizzazione satellitare. Sulla base poi della complessità del software è possibile che di essi vengano simulati anche i disturbi e il degrado della precisione.

Oltre a questi aspetti, ve ne sono molti altri, ma uno su tutti diventa estremamente utile nella prospettiva dello sviluppo di nuovi sistemi: la possibilità di inserire nel loop della simulazione dei plug-in modulari. Questo è possibile grazie al fatto che con i simulatori vengono forniti con un kit di sviluppo utile a produrre dei moduli che permettono di simulare sistemi complessi, modelli di volo sviluppati esternamente o perfino inserire sistemi hardware-in-the-loop e pilot-in-the-loop. L'importante è che questi moduli plug-in siano modulari e universali: al di là di un'interfaccia di comunicazione col simulatore, la possibilità di sfruttare lo stesso algoritmo per poterlo interfacciare con altri software permette di poterlo riutilizzare su altri simulatori o effettuare dei test specifici: questa caratteristica diventa, a questo punto, un requisito.

**Aspetti pratici** La scelta della simulazione è resa necessaria per permettere di sviluppare sistemi, protocolli e procedure in un ambiente sicuro e in condizioni riproducibili e facilmente riprogrammabili. Questo permette di riprodurre molteplici test in condizioni simili e ottenere risultati validi in vari aspetti: condizioni di volo, risposta dinamica alla manovra, precisione della navigazione e molti altri. La possibilità di inserire nella simulazione e testare sistemi reali permette di sottoporre diverse evoluzioni di un sistema alle stesse condizioni di volo per apprezzarne in maniera controllata le differenze e poter scegliere accuratamente la soluzione migliore, o risolverne le criticità. Se viene poi utilizzato un software certificato, questi risultati possono essere utili nella certificazione degli stessi. Come precedentemente detto, questo non vale solo per il software: se opportunamente implementati, la simulazione permette di testare e certificare in maniera fedele alla realtà sistemi hardware-in-the-loop, così come sottoporli al giudizio dei piloti fornendo loro un'interfaccia anche fisica. L'interazione dell'uomo con sistemi di volo sempre più autonomi diventa fondamentale nello sviluppo dell'AAM e poter avere uno strumento flessibile per sottoporre alla valutazione dei

piloti sistemi in costante evoluzione diventa fondamentale per garantire i livelli di sicurezza richiesti.

## 3.2 Campi di applicabilità

**Testing dei velivoli** Un primo campo di applicazione è quello di un collaudo dei velivoli. Questo può significare il testing della meccanica del volo, i sistemi di controllo e la risposta ai guasti dei sistemi, la cui logica può essere implementata in maniera personalizzata tramite i plug-in. Oltre a ciò tuttavia può essere utilizzato per testare i sistemi di pilotaggio autonomo e navigazione e la loro precisione, i sistemi di protezione (come TCAS e GPWS) e sottoporli ai piloti. Inoltre ad esso può essere collegato un modello di abitacolo, per permettere ai piloti di valutare tutti gli aspetti descritti.

**Progettazione dei vertiporti** La possibilità di generare scenari in maniera totalmente personalizzata consente di valutare il posizionamento e la configurazione dei vertiporti in relazione alle condizioni operative. Questo significa anzitutto verificare che la loro collocazione sia adeguata, sia in termini di convenienza logistica ma anche a livello di sicurezza. Possono essere poi valutate le condizioni microclimatiche della zona, come particolari condizioni di vento che possono affliggere il vertiporto e rendere maggiormente complesse le operazioni: la collocazione urbana dei vertiporti rende necessario questo studio poiché a causa degli edifici, spesso alti, rende le condizioni di vento estremamente complesse da valutare, e testare la risposta degli aeromobili in tutte le condizioni previste è cruciale per assistere adeguatamente la fase di progettazione dell'infrastruttura.

**Progettazione delle aerovie** In connessione diretta con quest'ultimo aspetto, vi è la progettazione della rete di collegamenti. Come per i vertiporti l'importanza di questa fase è sia logistica che di sicurezza. Infatti risulta necessario equilibrare la spinta alla massima efficienza del trasporto e a massimizzare il margine economico, con la necessità di rendere sicuro uno spazio aereo che in prospettiva è destinato a densificarsi. Altro fattore di complicazione è il sorvolo di aree densamente popolate. La simulazione diventa a questo punto uno strumento fondamentale per comprendere i fattori determinanti nella scelta di una configurazione della rete di trasporto aereo e fare dei test preliminari a quelli su scala reale.

**Testing dell'ATM** L'ATM è un aspetto cruciale. La simulazione consente di sottoporre dei concept di gestione e controllo del traffico a condizioni reali di utilizzo e a traffici crescenti, a condizioni di emergenza e condizioni di volo critiche come ad esempio scarsa visibilità o condizioni meteo proibitive. La duttilità di questi strumenti deve essere dimostrata in tutte queste situazioni per ottenere

l'approvazione degli organi normativi, e dato che questo dev'essere attuato in maniera preliminare alla fase operativa, per consentire l'inizio delle operazioni commerciali è importantissimo cominciare la fase di collaudo con largo anticipo, e quindi fare uso della simulazione.

**Analisi in tempo reale** La fondamentale differenza fra un simulatore e un *Digital Twin* è che quest'ultimo non solo è progettato per un'analisi asincrona, ma viene utilizzato per effettuare analisi in tempo reale delle condizioni del sistema in esame. Questo, applicato a un ambiente di AAM, può abilitare i soggetti coinvolti ad effettuare delle analisi predittive su condizioni operative anomale o emergenziali, per massimizzare la capacità di intervento e ottenere informazioni ancor prima che le condizioni di emergenza avvengano, aspetto fondamentale in un ambiente dove le conseguenze di un'emergenza possono essere fortemente mitigati da un intervento pronto e mirato.

### 3.3 Scelta del software di simulazione

Dal momento che il prodotto in questione dipende strettamente dal software in esame, la scelta del simulatore è cruciale per ottenere il massimo risultato. Per questioni legate alle capacità aziendali, la focalizzazione rimane su prodotti *off-the-shelf*. La valutazione è stata effettuata fra tre software principali:

- Microsoft Flight Simulator
- X-Plane 11
- Prepar3D

**Microsoft Flight Simulator**[3] Questo software è il più recente fra quelli analizzati, e quello che fa uso delle più recenti tecnologie di sviluppo videoludico. Presenta una grafica di ultima generazione, e predisposta all'introduzione di un motore di ultima generazione. La composizione dell'ambiente è devoluta a un sistema misto fra fotogrammetria 3D e ricostruzione tramite intelligenza artificiale di elementi naturali e costruzioni antropiche a partire dalle immagini satellitari bidimensionali. Un altro dei punti di forza di questo software è la ricostruzione accurata del meteo, con la costruzione di nuvole particellari e la ricostruzione degli effetti del passaggio delle masse d'aria intorno agli elementi del terreno e agli edifici. Tuttavia essendo un software di recentissima introduzione, presenta dei difetti di gioventù, come un modello di volo ancora inadatto a velivoli ad ala rotante o comunque con propulsione verticale, difficile implementazione dei sistemi di bordo e la presenza di frequenti problemi inattesi mano a mano che gli aggiornamenti vengono distribuiti. Inoltre non è attualmente presente né prevista una

versione deputata ad utilizzo professionale del software, sicché non vi è la garanzia di un supporto adeguato a compiti professionali. Il costo della versione base, rispetto alla quale le versioni superiori aggiungono solo ulteriori velivoli, è di €69.99.

**Prepar3D**[6] Prepar3D (si legge *prepared*) è un simulatore che raccoglie un'importante eredità: esso è infatti il diretto discendente della fortunata serie originale di Flight Simulator, il cui prodotto e team di sviluppo sono stati integralmente acquisiti da Lockheed Martin. Dal suo passato eredita inoltre un'ampia community di sviluppo di add-ons molto curati e di ampio respiro. Le sue principali caratteristiche sono:

- Piattaforma professionale collaudata e affidabile
- Simulazione eventi meteo statici e dinamici, programmabili nel tempo e nello spazio, oltre che aggiornabili con meteo real-time
- Simulazione guasti accurata

Nonostante ciò Prepar3D risulta un po' datato, sia come modelli di volo che come resa grafica, poiché la Lockheed Martin si è limitata ad adattare ai nuovi standard le radici del software originale, che non sono state rinnovate in modo rilevante. Inoltre per ogni velivolo introdotto dev'essere sviluppato un modello di volo specificamente prodotto, che allunga i tempi di lavoro nel caso in cui il focus non sia il modello specifico ma un sistema.

Esistono vari pacchetti e fasce di prezzo:

- Versione academic: \$59.95. Versione base. È presente un watermark a indicare l'utilizzo in ambito puramente accademico.
- Versione professional: \$199.00. Come academic. È assente il watermark e può essere utilizzato a scopo commerciale o professionale. È certificato da EASA ed FAA
- Versione professional plus: \$2500.00. Versione ulteriormente ampliata del precedente. Ha alcune caratteristiche aggiuntive, le più importanti:
  - Simulazione di azioni militari avanzata implementata
  - Ottimizzazione per il multiscreen, compatibilità con configurazione multi-PC e sincronizzazione real time.

**X-Plane 11**[9] X-Plane 11 è un software molto noto negli ambienti della simulazione del volo, sia fra gli appassionati che fra i professionisti. Lo sviluppatore,

Laminar Research, ha messo in commercio la prima versione nel 1993 e da allora lo sviluppo è proseguito fino ad oggi, ed attualmente resta il più famoso e utilizzato software per la simulazione del volo civile in ambito commerciale. Le sue caratteristiche principali sono:

- Riproduzione accurata di cockpit 3D, che includono anche la riproduzione ufficialmente autorizzata del sistema avionico integrato Garmin G1000
- Riproduzione accurata dell'ambiente di simulazione, con possibilità di inserimento e modifica di ulteriori layer di renderizzazione. Incluso software nativo per la creazione di infrastrutture aeroportuali
- Software nativo per la generazione di modelli di volo con interfaccia grafica intuitiva
- Simulazione guasti completa e dettagliata
- Supporto per Microsoft Windows, MacOS e Linux
- Supporto nativo a configurazioni multi-PC networked
- SDK pubblico

Le versioni disponibili sono due:

- Versione base: \$59.99.
- Versione professional: \$750 (scontata per acquisto multiplo). La versione professional include caratteristiche aggiuntive come:
  - Certificazione FAA (frame rate minimo garantito su hardware approvato)
  - Licenza per utilizzo commerciale
  - Ottimizzazione per la proiezione cilindrica-sferica

### 3.3.1 X-Plane 11

La scelta è ricaduta infine su quest'ultimo. Le motivazioni sono molteplici, prima delle quali la presenza in Digisky di figure professionali con esperienza nello sviluppo di plug-in per questo simulatore, cosa che diventa determinante in prospettiva di medio periodo.

Ulteriore vantaggio è la possibilità di generare rapidamente modelli di velivoli che, nella loro semplicità hanno modelli di volo molto accurati.

Infatti X-Plane, attraverso il software incluso *Plane Maker*, consente di generare modelli di volo basati su teoria dell'elemento di pala, metodo dei pannelli e CFD a partire solamente dai dettagli geometrici, inerziali e le caratteristiche generali

dei sistemi del velivolo. Questo permette di effettuare test di sistemi di navigazione o controllo del traffico anche su velivoli generici rapidamente generabili, in assenza di modelli derivati da aeromobili reali.

Il terreno viene simulato attraverso una stratificazione di layer:

- Alla base è presente la mesh tridimensionale del terreno, con i dati della morfologia del terreno e della tipologia di terreno, contenente ad esempio l'idrografia o la tipologia di terreno che va a generare la grafica.
- Immediatamente superiore è lo strato contenente le cosiddette "ortophoto" bidimensionali, ovvero le immagini che ricoprono il terreno e possono essere immagini satellitari o generate da aerofotogrammetria.
- Il primo layer di oggetti tridimensionali è quello degli oggetti autogenerati. L'autogenerazione avviene attraverso l'acquisizione dei dati da fonti come OpenStreetMap e contiene localizzazione, altezza e tipologia degli edifici, presenza di strade, di vegetazione o di qualunque tipo di elemento urbano tridimensionale.
- Il layer superiore è quello degli elementi personalizzati e degli aeroporti: questi possono essere liberamente modellati e vanno a sostituire gli oggetti autogenerati.

Questi aspetti verranno approfonditi ulteriormente in seguito.

### 3.3.2 Sviluppo dei plugin

Lo scopo dei plug-in è quello di aggiungere delle funzionalità esterne al simulatore. La tipologia di azioni effettuabili sono:

- Leggere dati dal simulatore, ed utilizzarli esternamente.
- Modificare dati nel simulatore, alterando le sue azioni o il suo comportamento, ad esempio influenzando, correggendo o sostituendo il modello di volo.
- Creare interfacce utente nel simulatore.
- Controllare sottosistemi nel simulatore.

I plug-in possono essere inseriti nella simulazione in maniera puntuale, e quindi reagire istantaneamente a un evento, oppure operare parallelamente al simulatore, quindi essere inseriti continuamente nei cicli di simulazione. Essi possono essere scritti in qualunque linguaggio che supporti le chiamate standard in C. Vengono compilati come DLL che conferiscono al simulatore la capacità di utilizzare un set di funzioni. Il funzionamento consente di generare algoritmi in linguaggi che

possono essere poi riutilizzati nel caso in cui si volessero testare su piattaforme diverse.

Il sistema di plugin di X-Plane è utile per l'inserimento nella simulazione di tutti i sistemi precedentemente elencati, cercando di favorire massimamente la modularità del sistema, per far sì che esistano dei sistemi simulati di base, che permettano di testare in un ambiente standardizzato ogni singolo modulo analizzandone le specificità.

## 3.4 Sviluppo dell'ambiente di simulazione

L'ambiente di simulazione standard si basa su un ambiente della zona di Torino. L'elevazione del terreno, così come gli edifici e gli altri elementi urbanistici, sono caricati in parte da OpenStreetMap e in parte da degli ulteriori scenari prodotti ad hoc disponibili online. In futuro essi verranno sostituiti da scenari generati ad hoc tramite gli assetti per aerofotogrammetria in forze a DigiSky.

### 3.4.1 Route design e scelta del metodo di navigazione

Questa fase risulta fondamentale perché alla base del lavoro portato avanti successivamente. La definizione di un modello di rete e dei relativi metodi di navigazione è determinante al fine di compiere tutti i passi successivi. È risultato necessario quindi recuperare quanto analizzato nei *Concepts of Operations* ed espanderli con ulteriori approfondimenti.

#### Fattori determinanti per il route design[11]

Nella determinazione delle aerovie bisogna tener conto di fattori appartenenti a diverse categorie di requisiti.

**Safety** Come è stato spesso ripetuto, la safety è un fattore che deve essere tutelato in tutte le fasi dello sviluppo dell'AAM, dallo sviluppo dei velivoli alla gestione degli spazi aerei, e la determinazione dei volumi di occupazione del traffico non è esclusa. L'interferenza di edifici elevati porta a dover fare considerazioni molto differenti:

**Separazione da ostacoli:** il primo, evidente aspetto è quello della separazione dagli ostacoli, dunque i volumi occupati dagli edifici vanno necessariamente esclusi.

**Effetti di scia degli edifici:** gli edifici generano, come già noto in ambito elicotteristico, dei forti effetti di scia che possono essere fortemente impattanti nel disturbo della traiettoria e della stabilità degli aeromobili.

**Condizioni meteorologiche:** qualora avverse, queste possono essere determinanti nella riduzione dei margini di sicurezza della missione, oltre che ridurre l'efficienza. Questo fa sì che la determinazione delle tratte coinvolga anche considerazioni su quali siano luoghi dove questi mutamenti hanno effetti minori.

**Fattori sociali** Allo stato attuale la presenza di mezzi volanti in aree densamente popolate è occasionale o comunque limitata nel tempo, nel caso di Torino ad esempio le zone che subiscono di più la presenza di aeromobili sono quelle in corrispondenza del sentiero di avvicinamento dell'aeroporto di Caselle o in prossimità di Torino Aeritalia, dove il traffico di aviazione generale e l'elisoccorso occupano spesso lo spazio aereo sovrastante queste aree densamente popolate. La presenza di eVTOL nei cieli cittadini tuttavia aumenterebbe di molto la densità di traffico e di conseguenza l'impatto sulla popolazione residente. Questi fattori devono essere considerati nel dettaglio nella fase progettuale delle rotte:

**Inquinamento acustico:** questo è uno dei fattori maggiormente collegati alla forte riduzione di altezza del volo e dell'aumento della densità del traffico. Può portare a delle problematiche sia di qualità della vita, sia legate alla salute, sia anche ambientali. Le elevate frequenze generate dalle eliche dei multicotteri, inoltre, a parità di intensità con altri suoni (come ad esempio le automobili) risulta essere, secondo studi condotti da vari enti tra cui la NASA, più fastidioso per una frazione notevole di soggetti. Con l'obiettivo di ridurre questo tipo di criticità, una corretta progettazione delle rotte risulta fondamentale.

**Impatto visivo:** la presenza di aeromobili nel cielo di aree densamente popolate, da quanto risulta da studi sull'impatto sociale, sembra aver riscosso molte preoccupazioni riguardo l'impatto visivo che questi potrebbero avere. Questo è influenzato anche dall'effetto culturale della cinematografia distopica degli ultimi decenni, in cui la presenza di mezzi volanti è non solo onnipresente ma caratterizza le ambientazioni in maniera estremamente impattante.

**Privacy:** il volo a bassa quota può esporre le abitazioni e i luoghi di lavoro delle persone al campo visivo di chi vi volasse in prossimità. Per quanto limitato nel suo effetto reale, non può essere ignorato come fattore per quanto riguarda l'accettazione pubblica.

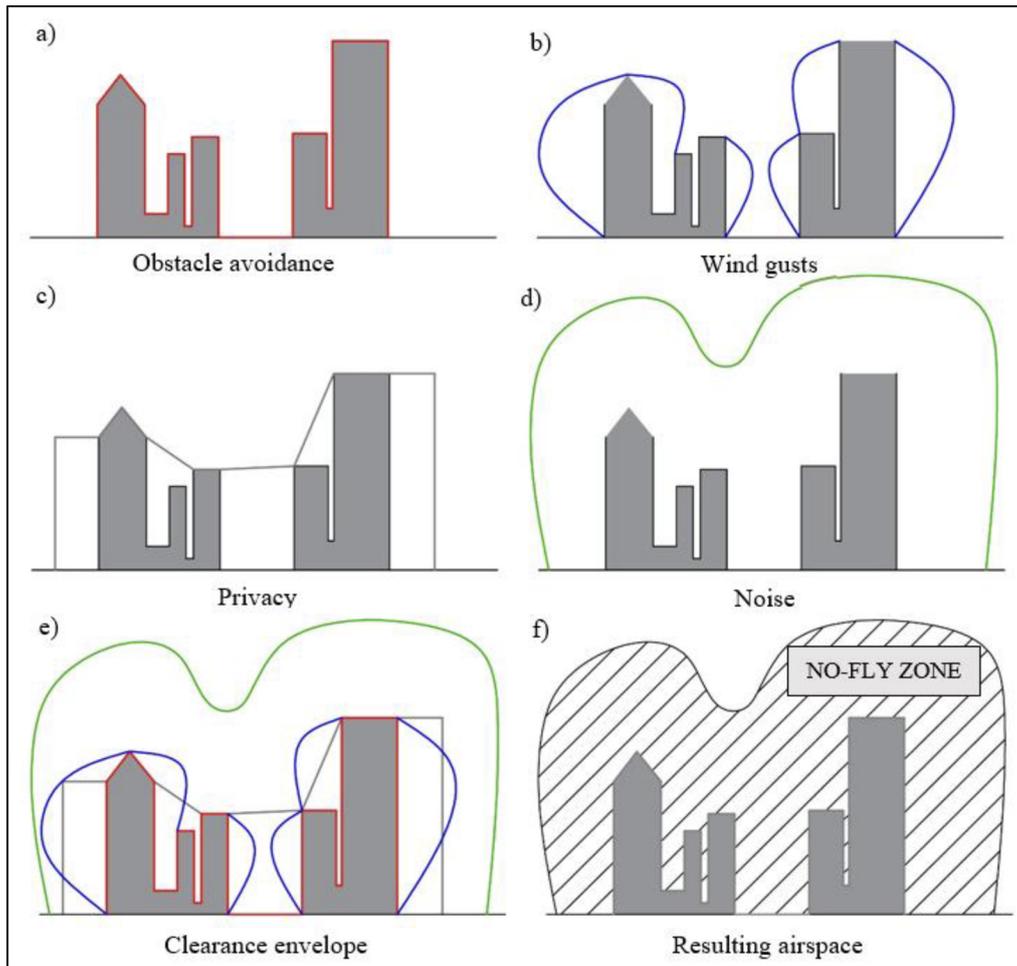


Figura 3.1: Esempio di valutazione della separazione dagli edifici[11]

**Fattori operativi** Chiaramente le caratteristiche di missione di questo nuovo paradigma di trasporto implicano delle necessarie valutazioni di tipo operativo in fase di progettazione delle rotte:

**ATM system:** qualora si scelga un design delle rotte, il sistema ATM dev'essere evoluto e resiliente a sufficienza per gestire il traffico al loro interno nella totalità delle situazioni possibili.

**CNS:** comunicazione, navigazione e sorveglianza dei velivoli tradizionali si basano su tecnologie certificate, ma inadatte al volume di dati necessario per un sistema come quello finora descritto, limiti che affliggono in particolare sistemi come l'ADS-B che necessiterebbe di un forte potenziamento in quanto soggetto a saturazione di banda. Questo per essere gestito necessita delle

tecnologie di consumo come LTE e 5G, che però presentano limiti di affidabilità non essendo soggette a certificazione. Inoltre il volo in zone cittadine può creare problemi di ricezione satellitare del GNSS, che necessiterebbe sistemi di GBAS per poter operare in certe condizioni. Queste considerazioni devono essere fatte per ottimizzare rotte e procedure.

**Capacità:** le rotte devono essere progettate in modo da poter ospitare un volume crescente di aeromobili nel medio-lungo periodo, senza necessitare variazioni di paradigma importanti, che comporterebbero costi troppo elevati.

**Caratteristiche dei velivoli:** i velivoli che useranno lo spazio aereo saranno estremamente vari, sia in termini di sistemi e livello di autonomia della navigazione, ma anche in termini di prestazioni. Le loro caratteristiche devono essere tenute in conto, per creare uno spazio aereo accessibile ma allo stesso tempo efficiente, implementando corretti requisiti di operatività in ogni ambito.

**Efficienza:** non può infine essere tralasciato il fattore dell'efficienza energetica, che risulta determinante nel massimizzare le capacità operative degli eVTOL, specie nel caso di propulsione verticale, estremamente dispendiosa in certe fasi del volo.

## Modelli esistenti e valutazione

Sono stati proposti nel tempo svariati modelli con caratteristiche estremamente differenti, sia da parte di organi governativi o nazionali, sia da parte dei player industriali. Spesso le proposte possono essere categorizzate secondo caratteristiche comuni, che verranno di seguito analizzate. Ovviamente esistono modelli che propongono degli approcci integrati di queste caratteristiche.

**Traiettorie libere** Questa tipologia è una di quelle più spesso proposte, poiché consente molta libertà in quanto a ottimizzazione delle traiettorie, ma allo stesso tempo risulta complessa nella gestione dei conflitti di traffico.

La proposta risulta essere l'introduzione di uno spazio aereo dinamico, privo di rotte prestabilite ma completamente libero al traffico, che si gestisce con un sistema di pianificazione del volo decentralizzato e indipendente fra velivoli, che possono sfruttare diversi sistemi per ottenere la separazione: si passa da modalità di VFR avanzato, con sistemi di separazione a vista automatizzati, funzionali per uno spazio aereo poco congestionato, fino a sistemi che utilizzano TCAS di ultima generazione e sistemi GNSS e ADS-B.

Uno svantaggio risulta essere una difficile implementazione di sistemi di ottimizzazione delle rotte. Questo è dovuto alla complessità di implementazione di un sistema che identifichi delle rotte libere che tengano in considerazione tutti o quantomeno molti aspetti critici precedentemente descritti. Inoltre vi è una forte complessità nella gestione di elevate densità di traffico: infatti, con uno spazio aereo congestionato è elevata la possibilità che, con un effetto domino, un conflitto di traffico generi una modifica a cascata delle rotte dei velivoli adiacenti andando a ridurre drasticamente l'efficienza del sistema.

**Layers** Il sistema a layers è una proposta che riprende il concetto di separazione verticale per direzione di volo già presente nelle attuali aerovie superiori: prende in considerazione la possibilità di suddividere lo spazio aereo verticalmente in strati suddivisi per direzione di volo, generalmente la proposta è per settori di  $90^\circ$  o anche  $45^\circ$  di rotta vera. Il vantaggio è la semplicità nella separazione, che consente di facilitare i deconflitti orizzontali di traffico. Questo tuttavia rende inefficienti tratte con una elevata complessità in pianta, necessarie ad aggirare ostacoli o a sorvolare aree a minor densità abitativa: ciò comporterebbe numerose variazioni di quota, che per un velivolo a propulsione verticale come un multicottero o un convertiplano a velocità ridotta sono altamente dispendiose in termini energetici. Inoltre si andrebbe ad espandere in verticale lo spazio aereo, determinando uno sconfinamento in aree non disponibili, come ad esempio zone occupate da procedure di aeroporti limitrofi alle città.

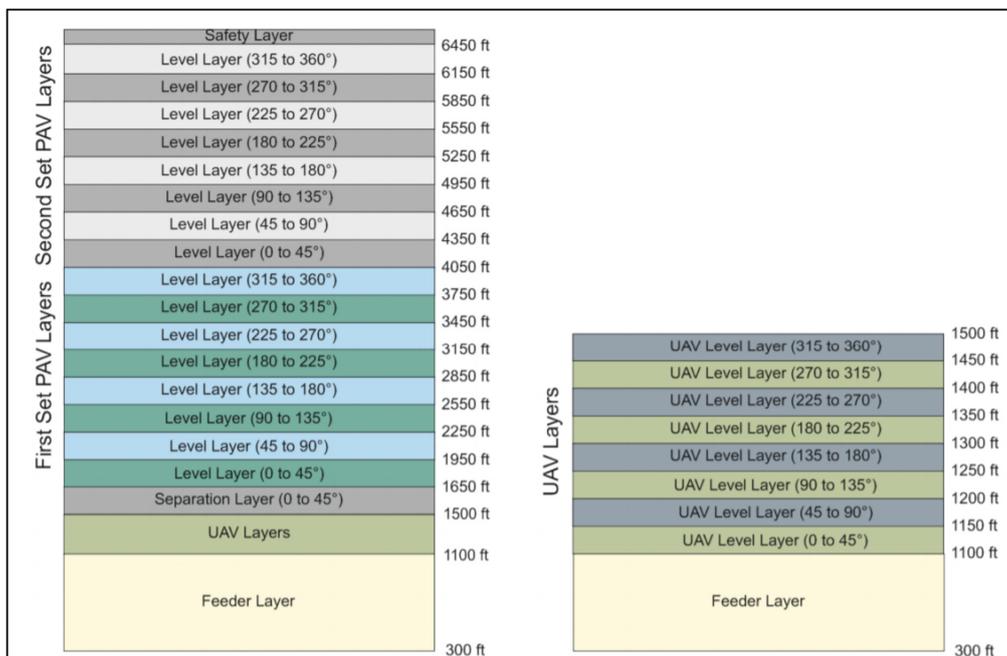


Figura 3.2: Esempio di suddivisione in layers

**Sottospazi** La divisione in sottospazi è un concetto che cerca di suddividere per tipologia di velivoli lo spazio aereo, creando dei limiti all'ingresso in certi spazi per prestazioni, sistemi di bordo abilitanti, ambito di operazione e vari altri criteri. Il vantaggio è in termini di flessibilità rispetto ai precedenti due, e anche di spazi rispetto al sistema di layers. Il confinamento rende anche estremamente flessibile lo spazio rispetto a restrizioni di sorvolo temporanee a determinate categorie di velivoli, di conseguenza la creazione di uno spazio aereo dinamico resiliente a varie esigenze. Tuttavia vi sono limiti di inclusività a livello operativo, che renderebbero molto difficile l'accesso ad alcune zone a velivoli non abilitati all'accesso in maniera rigida. Questo può creare delle barriere a livello di sfruttabilità commerciale.

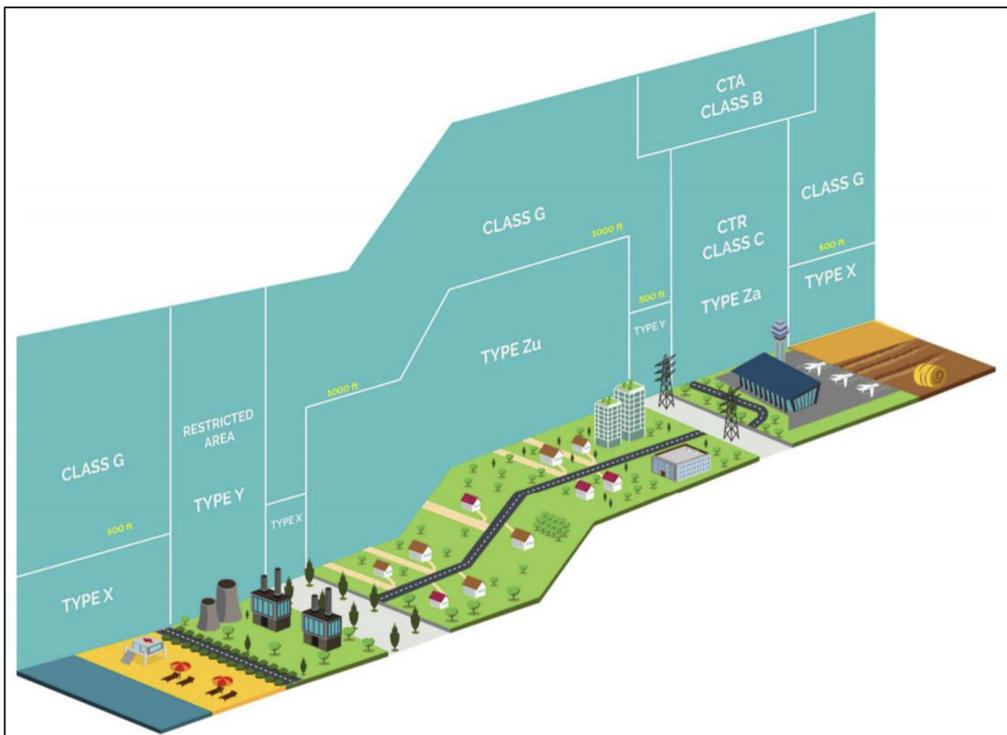


Figura 3.3: Esempio di suddivisione in sottospazi secondo SESAR

**Canali** La creazione di canali è un sistema che può avere diversi metodi di implementazione.

Uno di essi è quello rigido, per cui tutti i canali sono pre-determinati e contemporaneamente attivi. Al sistema è demandata l'ottimizzazione delle rotte e la gestione delle precedenze. Questo sistema è di facile implementazione e molto sicuro, e può consentire di creare rotte che rispettino i fattori sociali critici. Tuttavia rischia di essere poco resiliente e poco adatto a uno spazio aereo dinamico, poiché le restrizioni rischiano di rendere inefficienti o inattuabili alcuni tipi di tratte.

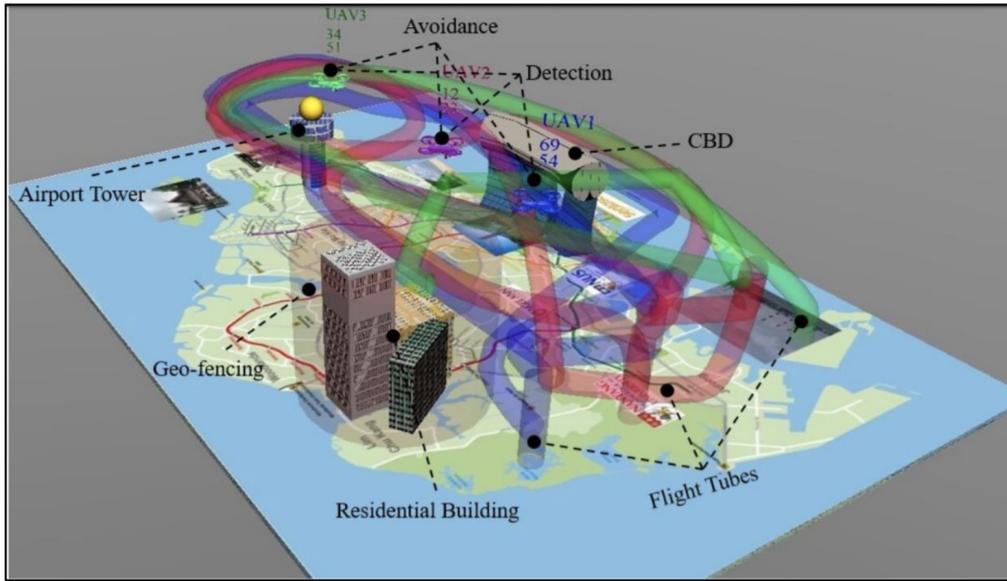


Figura 3.4: Esempio di canalizzazione in corridoi

Altro tipo di implementazione è quello dinamico: questo implica la creazione di molteplici rotte, attivabili dinamicamente a seconda del contesto, della tipologia di aeromobile, delle condizioni meteo e molti altri fattori. Questo consente di rendere molto più efficiente il sistema di rotte, oltre che molto resiliente alle variazioni dinamiche dello spazio aereo. Ovviamente non raggiunge livelli di efficienza come quelli del volo libero, ma può gestire elevate moli di traffico promiscuo in sicurezza, consentendo di ridurre molto le separazioni minime.

Il vantaggio ulteriore di questi due sistemi è che il secondo può risultare da un'evoluzione del primo, quando i sistemi di controllo del traffico dovessero permettere il salto generazionale. Inoltre l'esperienza maturata col primo sistema, lo sviluppo delle rotte e lo studio dell'efficienza permetterebbe di implementare un sistema valutativo in maniera sicura e di poterlo evolvere senza stravolgerlo e senza richiedere cambiamenti radicali dell'infrastruttura. Per questo la scelta dell'implementazione preliminare sul Digital Twin è ricaduta su quest'ultima tipologia.

### 3.4.2 Scelta della localizzazione dei vertiporti[12] e sviluppo modelli 3D

Nell'ottica di questa struttura, il passo successivo è stato scegliere quali fossero i luoghi adatti a posizionare una rete di vertiporti nell'area metropolitana di Torino. L'analisi prende in considerazione anche la zona della cosiddetta *prima cintura*, ovvero la prima fascia di comuni confinanti, dal momento che il tessuto

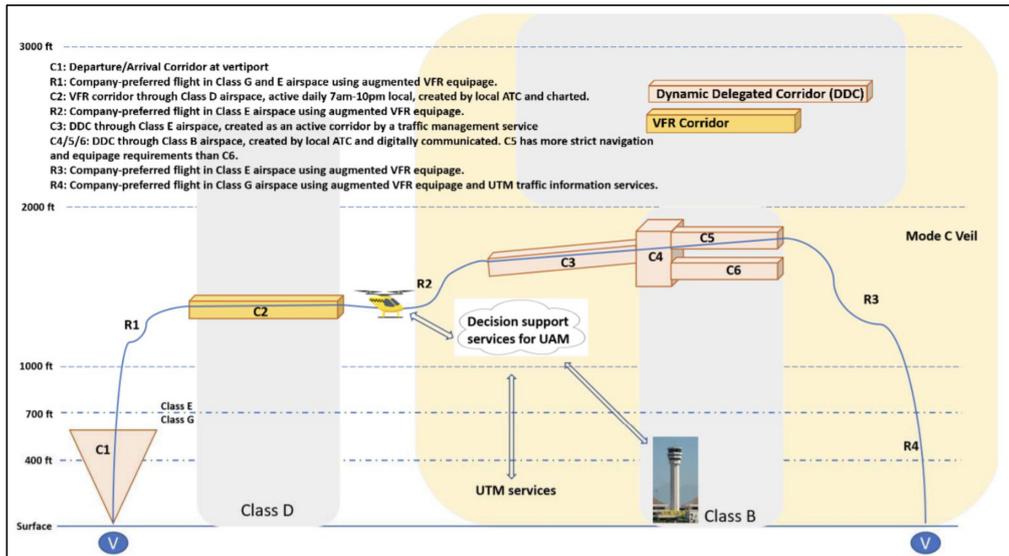


Figura 3.5: Esempio di corridoi dinamici

urbano torinese in senso proprio non ha un'estensione tale da giustificare la presenza di molti vertiporti. Inoltre è opportuno specificare che le analisi effettuate sono delle valutazioni di tipo ipotetico e non hanno tenuto conto, al momento in cui si scrive, della volontà delle amministrazioni locali.

**Criteri** La scelta dei luoghi dove posizionare i vertiporti è stata effettuata cercando, in alcuni luoghi cardine dell'area metropolitana, zone libere da ostacoli antropici e naturali, prevalentemente in piano. Queste tuttavia dovevano fare da riferimento per una zona di interesse per una categoria di potenziali passeggeri, e consentire una certa facilità di scambio intermodale di mezzo di trasporto.

## I vertiporti

### Torino Aeritalia - SkyGate main site

**Coordinate:** N45.082884, E7.607940

Aeritalia è l'aeroporto storico di Torino: è stato per decenni il principale sito di test per i maggiori produttori di aeromobili in Italia, e prima dell'apertura all'aviazione civile di Caselle era l'unico aeroporto di Torino. Oggi è principalmente un aeroporto destinato all'aviazione generale. Il futuro dell'aeroporto è al centro del progetto SkyGate, che vuole porre qui la sede delle attività, accanto al business già presente di DigiSky e vicino alla futura Cittadella dell'Aerospazio. Ciò significa che il vertiporto Aeritalia non solo vuole essere il principale hub di manutenzione del sistema, ma anche fungere da banco di prova per nuovi asset e tecnologie. Come risulta da progetti preliminari già in cantiere, sarà situato

nella zona sud-est, vicino agli hangar degli alianti. Questa zona è attualmente priva di collegamenti con il sistema di trasporto pubblico: la stazione della metropolitana più vicina dista 1 km, e una sola linea di autobus collega il centro con l'aeroporto: ciò renderà necessario un importante lavoro di integrazione infrastrutturale.



Figura 3.6: Pianta dell'area vertiportuale Aerialia[2]

**Ostacoli** L'area è adiacente all'aeroporto, quindi non sono presenti notevoli ostacoli, ma è necessario garantire la sicurezza dell'attività aeroportuale e una sufficiente separazione verticale con l'area urbana sul lato sud ed est.

## Torino centro - Piazzale Valdo Fusi

**Coordinate:** N45.064503, E7.687077

La scelta dei luoghi per la costruzione dei vertiporti in centro cittadino è una questione complessa per numerosi motivi: in primo luogo l'elevata antropizzazione e lo sviluppo verticale delle città rende difficili per un velivolo decolli ed avvicinamenti; inoltre gli spiazzi dove poterlo collocare risultano essere occupati da piazze o siti di interesse storico, o da aree verdi difficilmente sottraibili all'urbanistica. Torino risulta avvantaggiata dallo sviluppo verticale contenuto, tuttavia i luoghi disponibili e comodi al centro sono pochi. In questo senso piazzale Valdo Fusi risulta un luogo oltremodo adatto: dotata di un parcheggio interrato, è dedicata prevalentemente a skate park, con pochi servizi commerciali e leggermente interrata. La costruzione di un vertiporto a sviluppo verticale potrebbe includere la copertura dello skate park e l'inclusione di ulteriori attività commerciali in un edificio che rialzi il piano di atterraggio, senza intaccare luoghi di interesse storico e senza limitare eccessivamente l'utilizzo degli spazi esistenti. La camera di commercio risulta l'edificio di interesse più vicino, in quanto prospiciente la piazza, ma non è la sola località facilmente raggiungibile: il piazzale è infatti posto al centro quasi esatto di un quadrilatero composto dalla stazione di Porta Nuova, il parco del Valentino, piazza Vittorio Veneto e piazza Castello: essi infatti sono tutti equidistanti circa 700 metri in linea d'aria dal piazzale.

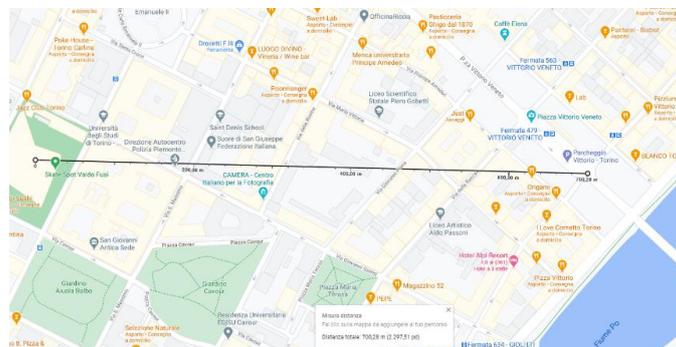


Figura 3.7: Distanza da Piazzale Valdo Fusi a Piazza Vittorio[2]

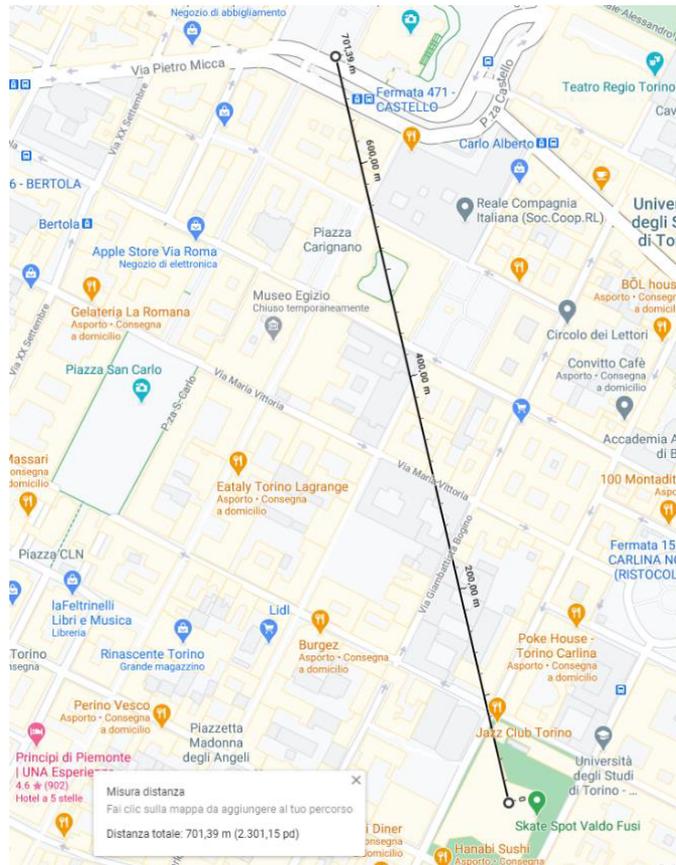


Figura 3.8: Distanza da Piazzale Valdo Fusi a Piazza Castello[2]

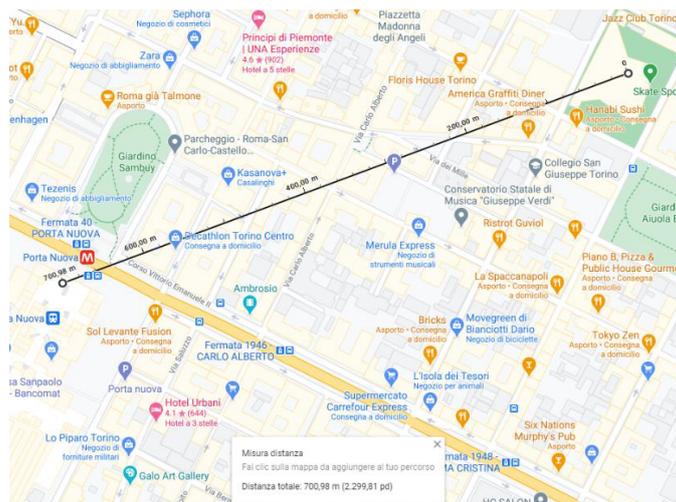


Figura 3.9: Distanza da Piazzale Valdo Fusi alla stazione Torino Porta Nuova[2]

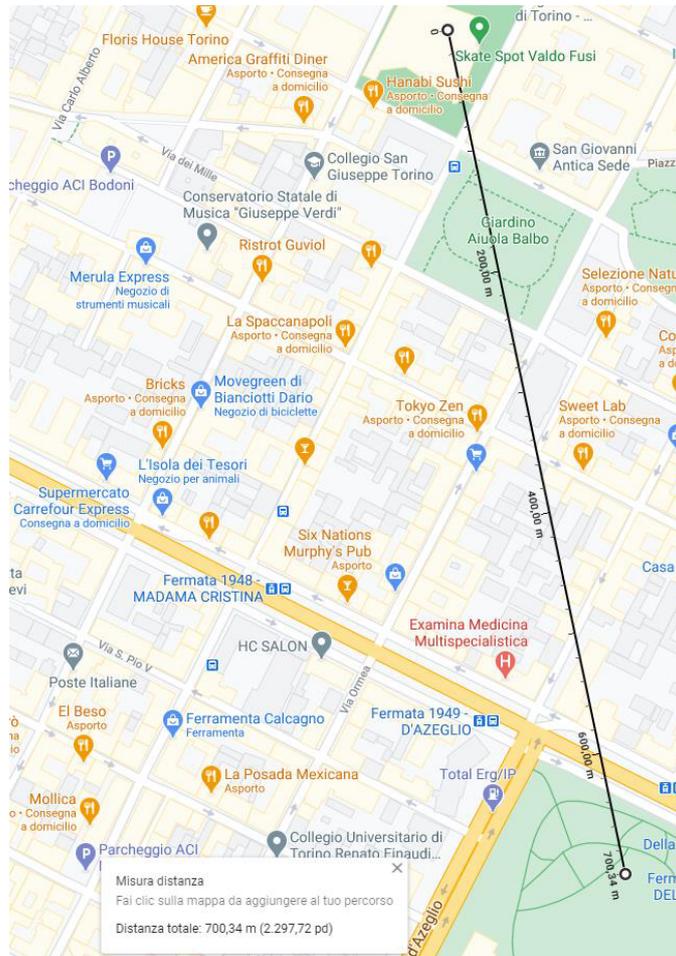


Figura 3.10: Distanza da Piazzale Valdo Fusi al Parco del Valentino[2]

**Ostacoli** Gli ostacoli, come prevedibile, sono rilevanti su tutto il perimetro: si va da edifici di tre piani sul lato sud e sud-ovest, ai quattro piani sul lato nord, e gli edifici del museo di scienze naturali e camera di commercio che si sviluppano su cinque e più piani, sui lati ovest e nord-est, con un solo parcheggio di ridotta estensione a ovest che però include alberi di notevoli dimensioni. A questi si aggiunge l'unico edificio di rilevante altezza nella prossimità, che sarebbe il campanile della chiesa ortodossa di Santa Croce, circa 150 m a nord-ovest, ma che essendo un edificio non esteso può essere facilmente evitato nelle fasi di decollo e avvicinamento. La difficoltà di superare agevolmente edifici notevoli, come spesso accade in città, costringe a valutare la possibilità di sollevare il vertiporto quasi a livello dei tetti, con una struttura rialzata, che potrebbe però contenere al suo interno le strutture che altrimenti sarebbero state tolte completamente a favore della costruzione del vertiporto, come gli esercizi commerciali, lo skate park e i servizi di parcheggio di GTT. In alternativa, data l'estensione della piazza, un

vertiporto a filo è ammissibile, ma costringerebbe a consumi energetici superiori i velivoli nel compiere fasi di salita di svariati metri prima di iniziare la traslazione.



Figura 3.11: Ostacoli a nord[2]



Figura 3.12: Ostacoli a est[2]



Figura 3.13: Ostacoli a sud[2]



Figura 3.14: Ostacoli a ovest[2]

### **Torino centro - Vecchia stazione di Porta Susa**

**Coordinate:** N45.073877, E7.667509

Ulteriore luogo individuato per il centro di Torino si trova in prossimità di Piazza XVIII Dicembre, presso la vecchia stazione ferroviaria di Torino Porta Susa. Si tratta di uno snodo fondamentale per la città, che consente l'intermodalità con mezzi urbani, ma anche con l'alta velocità tranviaria per il resto d'Italia e per la Francia. La localizzazione ideale prevede lo sfruttamento della vecchia stazione dismessa, in particolare l'ex fabbricato viaggiatori ospiterebbe servizi accessori, mentre le strutture laterali fornirebbero lo spazio per le piattaforme del vertiporto e le infrastrutture di ricarica. La storicità del luogo quale centro per i trasporti rende poi porta Susa un luogo culturalmente ideale per avvicinare le persone a questo nuovo genere di trasporto.

**Ostacoli** La zona ha un posizionamento non banale da un punto di vista aeronautico: la vicinanza del grattacielo Rai non crea problemi particolari di turbolenze, poiché i venti principali soffiano verso ovest, ma può creare problemi in quanto ostacolo al decollo verso ovest. Inoltre la presenza del grattacielo Intesa San Paolo a sud-est, a sua volta genera problemi di carattere ventoso, oltre che come ostacolo sempre alle partenze verso sud: di conseguenza partenze e arrivi vanno studiati tenendo in considerazione questi aspetti.

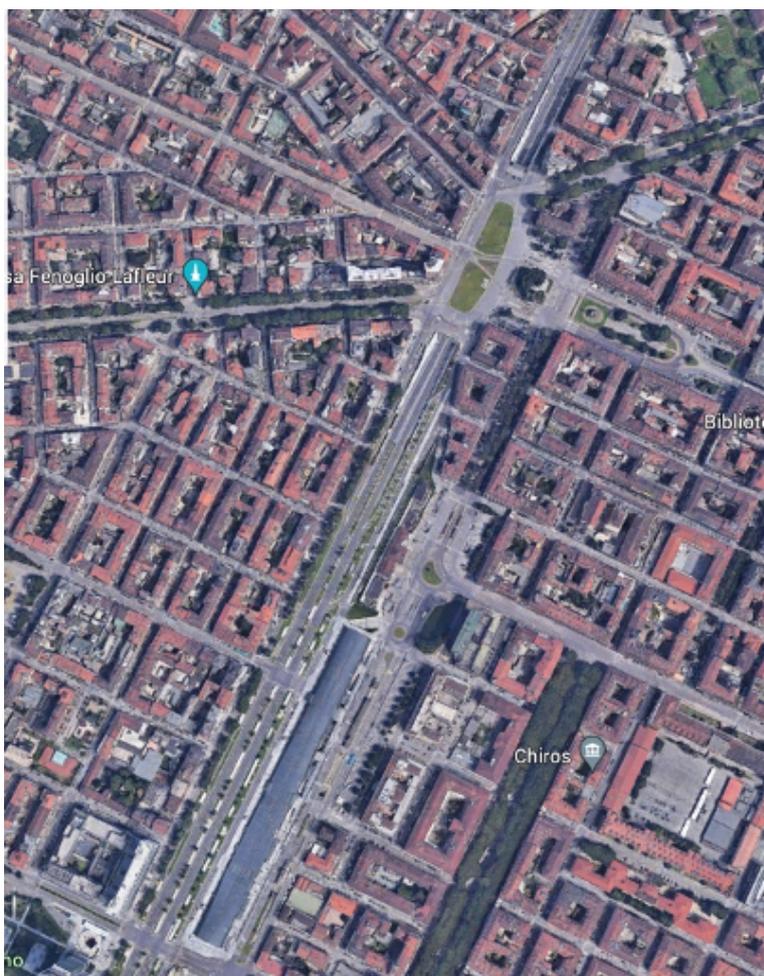


Figura 3.15: Pianta della zona[2]



Figura 3.16: Vista 3D da Nord[2]



Figura 3.17: Vista 3D da Nord Est[2]



Figura 3.18: Vista della stazione da Piazza XVIII Dicembre[2]

### Aeroporto Torino Caselle

**Coordinate:** N45.190924, E7.640572

La scelta di posizionare un vertiporto in prossimità dell'aeroporto è riconosciuta come strategica da vari studi di settore, ed è dettata in questo caso dal potenziale di una tratta “aeroporto-centro” o “aeroporto-cintura”: ciò offrirebbe servizi di *airport shuttle* con tempi di percorrenza estremamente ridotti. Il posizionamento risponde in questo caso a due principali requisiti: vicinanza all'ingresso del terminal (in quanto i passeggeri che volano sono in media provvisti di bagagli pesanti che non possono essere trascinati a piedi per lunghe distanze) ed evitare intersezioni con lo spazio adibito al traffico aereo. La zona scelta è ad uso agricolo e sostanzialmente piana, si colloca inoltre vicino ai parcheggi che potrebbero essere facilmente integrati o anche spostati per adibire la zona al decollo/atterraggio.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>In virtù di accordi in vigore tra SkyGate e SAGAT la posizione dei vertiporti potrebbe essere differente e più prossima al terminal

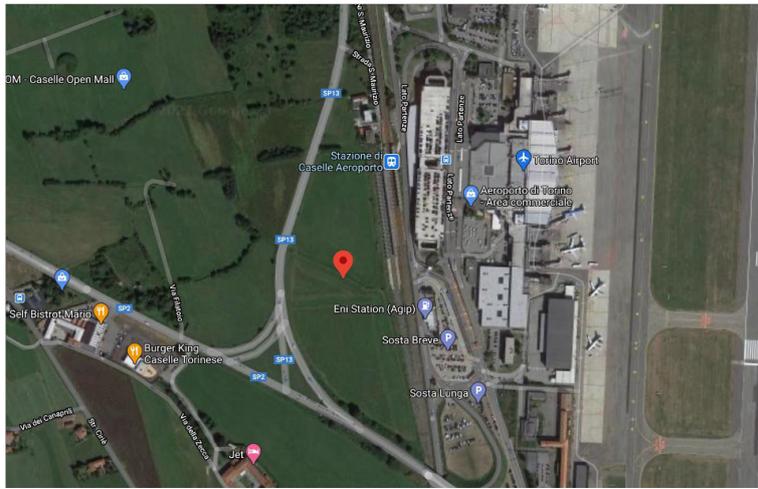


Figura 3.19: Pianta dell'area[2]



Figura 3.20: Foto dello spiazzo da terra[2]

### Ostacoli

La zona è sostanzialmente priva di ostacoli verticali. La presenza tuttavia del traffico aeroportuale determina delle criticità facilmente risolvibili con la corretta progettazione delle procedure.

### Altri vertiporti

**Vertiporto Venaria** N45.134640, E7.632818

**Torino Outlet Village Settimo** N45.129797, E7.741578

**Vertiporto Moncalieri** N44.998947, E7.685066

**Centro Fiat Orbassano** N45.010096, E7.561557

**Vertiporto Orbassano** N45.014260, E7.532407

**Vertiporto Rivoli Castello** : N45.073855, E7.513010

### Modellazione 3D

Per l'effettuazione dei primi voli di prova si è deciso di procedere con la creazione di due vertiporti in 3D in due localizzazioni precedentemente individuate. La scelta è ricaduta sull'aeroporto Aeritalia e su Piazzale Valdo Fusi. La motivazione per la scelta del primo riguarda la sua centralità nel sistema, e la sua priorità nell'ottica del testing. Per quanto riguarda il secondo è stato invece è stata scelta una localizzazione urbana per evidenziare le peculiarità dell'ambiente urbano nel volo. Tuttavia prima di generarli è stato necessario l'affinamento della modellazione dello scenario di Torino e delle aree circostanti.

**Gestione dello scenario di X-Plane**<sup>[9]</sup> Prima di trattare il tema degli scenari 3D, è necessario precisare come X-Plane gestisce lo scenario, e come esso possa essere modificato dall'utente.

X-Plane approssima la terra secondo l'ellissoide WGS84, e tutti gli elementi sono georeferenziati su di esso secondo il corrispondente sistema di coordinate. Le aree del terreno, infatti, sono caratterizzati in una griglia contenuta in `\X-Plane 11\Global Scenery\X-Plane 11 Global Scenery\Earth nav data\`. Si tratta di dati salvati in griglie di dimensione 1x1 grado in coordinate cartesiane, che il sistema poi proietta nel sistema ellissoidale. Questi dati sono salvati in un formato altamente compresso, compatibile con tutte le versioni di X-Plane dalla 7. In questi file sono contenuti i seguenti dati:

**Mesh patches:** sono i dati propri della morfologia del terreno, formati da dei triangoli ai quali è associato un aspetto legato al tipo di terreno

**Oggetti:** possono essere inseriti oggetti 3D personalizzati sul terreno definito come sopra e ruotati a piacimento

**Poligoni e vettori:** questi si riferiscono all'autogenerazione degli elementi, di cui si tratterà nel dettaglio successivamente

**Raster data:** infine i dati relativi al posizionamento, all'interno della singola unità, degli elementi appena elencati

La maggior parte degli scenari viene, come precedentemente accennato, autogenerata da X-Plane a partire da una caratterizzazione generica dei biomi e da una griglia, definita con i poligoni e i vettori precedentemente detti, contenente dati sugli elementi naturali, come foreste di vario tipo, e antropici, quali strade o

edifici. Questo può essere fatto, a seconda delle aree di interesse e delle prestazioni dell'hardware, su livelli di dettaglio diversi. Le indicazioni possono riguardare dati di tipologia degli edifici, altezza degli stessi e della caratterizzazione architettonica della costruzione (ad esempio, il sistema differenzia fra edifici del nord o del sud dell'Europa, generando i secondi con tetti a falde meno pronunciate). Allo stesso modo le strade vengono definite con la loro dimensione e tipologia, così come con la densità del traffico che le percorre.

Oltre ai dati precedenti, che sono di stock su X-Plane, e contengono un livello di dettaglio minimo, queste caratteristiche possono essere aumentate attraverso dei pacchetti di espansione e personalizzazione. La personalizzazione degli scenari avviene mediante l'inserimento di pacchetti, raggruppati per cartelle, all'interno della cartella `./X-Plane 11/Custom Scenery/`, che contengono al loro interno tutti i dati dei componenti aggiuntivi di scenario che si vogliono aggiungere. Essi sono della stessa tipologia di quelli precedentemente elencati e vanno a sostituire quelli di default.

Per rendere ancor più più completa la personalizzazione attuabile da parte di questi pacchetti, essi possono essere integrati dalla presenza di librerie di oggetti. Questo consente di avere una maggiore varietà nella generazione degli scenari tridimensionali.

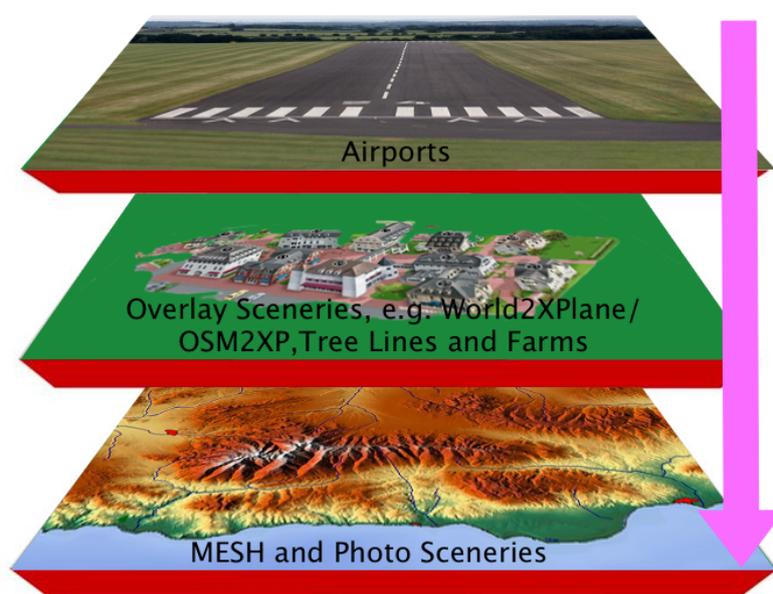


Figura 3.21: Gerarchia consigliata per gli scenari personalizzati

Quando vengono aggiunti alla cartella e viene avviato il software, quest'ultimo scrive nella stessa cartella un file di configurazione chiamato `scenery_packs.ini`.

In esso è contenuto il nome di ogni pacchetto e un valore alfanumerico che ne indica l'attivazione o meno: ma il fattore determinante per un corretto funzionamento è l'ordine in cui i pacchetti sono elencati. Esso infatti determina la sovrascrittura delle aree in cima all'elenco su quelle ad esse inferiori. L'ordine tipicamente utilizzato è quello indicato in immagine 3.21.

**Attività preliminari** Per la corretta riuscita della generazione di un modello 3D soddisfacente non solo dei vertiporti, ma di tutta la zona metropolitana interessata dalle attività di simulazione, è stato necessario effettuare alcune attività preliminari.

Anzitutto è stata creata una mesh aggiornata con il dettaglio della morfologia del terreno, delle strade e delle cosiddette *ortophoto*, ossia la fotogrammetria aggiornata degli elementi del terreno. Questo è stato effettuato mediante il software gratuito e open-source *Ortho4XP*[5], un software che è in grado di ottenere questi dati da svariate fonti, tra cui i principali siti di mappe online. La procedura consente di creare una mesh con un livello di dettaglio scalabile per zone, in modo da ottenere un terreno dettagliato a piacimento a seconda delle aree che si intende utilizzare maggiormente.

Successivamente è stato ricavato un database aggiornato degli edifici e della vegetazione tramite OpenStreetMap[4], e tramite un ulteriore software freeware, *World2XPlane*, si è riusciti ad ottenere la corretta localizzazione degli ostacoli e la loro altezza.

Infine, per ottenere una corretta visualizzazione degli oggetti particolari, è stato acquistato un pacchetto contenente un render della città di Torino, comprendente anche gli edifici particolari presenti nella zona, come la Mole Antonelliana, il palazzo della Reale Mutua, il grattacielo Intesa San Paolo e vari altri edifici.



Figura 3.22: Centro di Torino



Figura 3.23: Vista dell'area Parco Dora autogenerata

**World Editor** Lo strumento chiave per la modellazione dei vertiporti è lo strumento nativo di X-Plane chiamato *World Editor*. Si tratta di uno strumento molto versatile che permette di effettuare varie modifiche allo scenario, tra cui:

- creare aeroporti personalizzati completi
- creare uno scenario completamente personalizzato fuori dall'aeroporto
- modificare un aeroporto di default di X-Plane utilizzando degli elementi integrati
- personalizzare il controllo del flusso di traffico a un aeroporto
- caricare e scaricare aeroporti di default di X plane all'*X-Plane Scenery Gateway*<sup>2</sup>
- estrarre file di dati sullo scenario o sugli aeroporti che possono essere elaborati o condivisi.

World editor utilizza elementi già presenti nelle librerie di X-Plane o in quelle incluse nella cartella `.\X-Plane\Custom Scenery\`, non è infatti un editor di elementi tridimensionali, ma solo di scenari.

La finestra di lavoro tipica, una volta aperto un elemento di scenario, si presenta come in figura 3.24:

1. **Pannello librerie:** elenco degli elementi delle librerie disponibili ad essere posizionati

---

<sup>2</sup>Si tratta di un portale dove possono essere caricati gli scenari personalizzati per essere eventualmente inseriti in future release ufficiali del simulatore



Figura 3.24: Finestra di lavoro di World Editor

2. **Pannello preview della libreria:** preview dell'elemento di libreria selezionato
3. **Toolbar:** barra contenente gli strumenti per piazzare, modificare od eliminare elementi dello scenario
4. **Impostazione dello strumento:** barra dove è possibile modificare le impostazioni dello strumento corrente
5. **Pannello mappa:** pannello che mostra lo scenario dall'alto, con una grafica che evidenzia gli elementi principali
6. **Pannello gerarchie:** pannello in cui sono elencati, in ordine di gerarchia, gli elementi piazzati sullo scenario. Possono essere raggruppati e secondo varie logiche
7. **Pannello attributi:** pannello dove è possibile visualizzare e modificare le proprietà dell'elemento correntemente selezionato
8. **Schede di modifica:** schede che mostrano le varie sezioni del pannello attributi, dove è possibile selezionare varie proprietà dell'elemento

Dal momento che non è possibile selezionare una categoria "vertiporto", verrà selezionata la categoria eliporto per similitudine degli elementi costituenti.

**Vertiporto Aeritalia (figura 3.25)** La ricostruzione del vertiporto riprende un progetto concettuale esistente. Comprende un fabbricato viaggiatori che include tutti i servizi di imbarco, acquisto titoli di viaggio ed eventuali servizi di ristorazione o accessori.

Assente attualmente, viene aggiunto un parcheggio e una zona di interscambio con il trasporto pubblico di superficie. Il collegamento può comprendere anche una zona per lo stazionamento dei mezzi di mobilità dolce (biciclette e monopattini elettrici), sfruttando l'adiacente passaggio della pista ciclabile.

Il piazzale comprende TLOF di misura differente, atti ad ospitare decolli e atterraggi multipli di diverse tipologie di aeromobili, atti al trasporto di persone o di merci. L'area a nord è occupata dall'aeroporto Aeritalia, in particolare dalla pista in erba per alianti, area che in assenza di operazioni di volo può essere utilizzata per il testing di varie fasi di volo lento e di hover di prototipi.



Figura 3.25: Vista aerea dell'aeroporto Aeritalia e vertiporto

**Piazzale Valdo Fusi** Il vertiporto di piazzale Valdo Fusi risulta invece creato da zero, solo a scopo di test dell'ambiente di simulazione. Comprende un fabbricato viaggiatori, che possa includere numerosi servizi accessori, anche integrati con la vita sociale della zona, e un piccolo fabbricato di rimessaggio per i velivoli, comprendente l'area per il rifornimento.

Sono assenti TLOF per eVTOL di dimensioni inferiori, dal momento che si suppone che i punti di arrivo di questi mezzi siano tipicamente posizionati sui tetti, per non occupare il già poco spazio sul terreno.

I TLOF non sono stati sollevati per motivi pratici di compatibilità con l'ambiente grafico, che essendo di terze parti non risulta modificabile. In iterazioni successive è previsto un rialzo delle piattaforme.

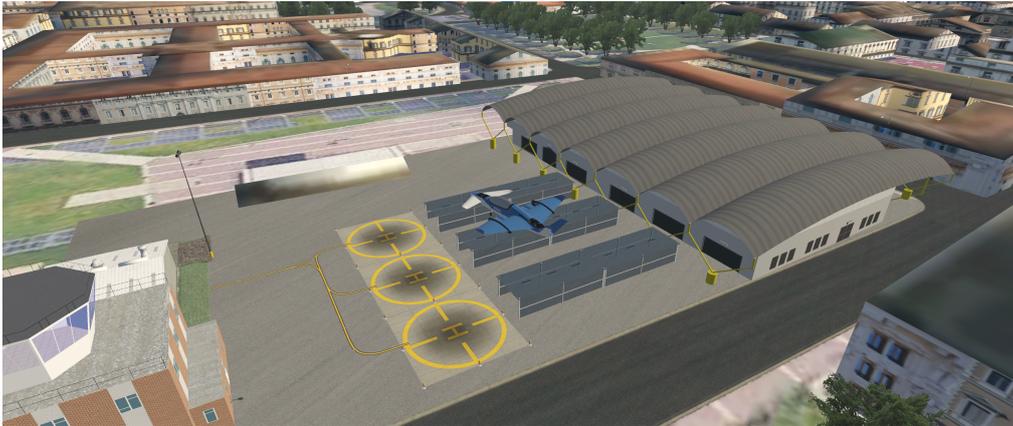


Figura 3.26: Vista aerea del vertiporto Valdo Fusi

### 3.4.3 Creazione della rete di navigazione

Lo studio della rete di navigazione è infine l'ultimo tassello nella definizione dell'ambiente di simulazione. Essa avviene a valle della scelta della localizzazione dei vertiporti, e il suo obiettivo è ottimizzare l'efficienza del trasporto, in conformità con dei criteri di sicurezza.

Uno degli aspetti chiave è che sono stati individuati è proprio il tema della sicurezza, rispetto alla quale non è stato sufficiente attenersi semplicemente alla normativa in vigore, ma è stato necessario introdurre dei nuovi criteri a causa proprio della peculiarità di questa nuova modalità di trasporto, che sono appunto quelli descritti nell'analisi dei fattori determinanti per il route design.

È necessario inoltre sottolineare che la definizione delle rotte è stata fatta anche in prospettiva di un forte aumento del traffico, nonostante il pattern creato venga utilizzato solo a scopo di test. Questo viene fatto per evitare che all'aumentare della complessità dello scenario debba essere nuovamente eseguita una modifica o addirittura una stesura da zero della rete di navigazione.

I principali criteri, dunque possono essere riassunti in questo elenco:

- Altezza di crociera stimata a circa 500 ft AGL, che garantisce di rimanere sotto il circuito di avvicinamento dell'aeroporto di Caselle, essendo utilizzata pure dal servizio di elisoccorso.
- Selezionare rotte che evitano il sorvolo di aree densamente popolate.
- Se ciò non fosse possibile, Le rotte devono seguire le principali strade per evitare di volare sugli edifici.
- Mantenere la separazione orizzontale con gli edifici più alti, che non possono essere sorvolate, in particolare in condizioni di avvicinamento e salita.

- Evitare l'intersezione con rotte aeree esistenti, non solo quindi quelle dell'aeroporto di Caselle ma anche quelle di Aeritalia e degli eliporti della città.
- Ove possibile, tenere conto delle direzioni principali del vento (per Torino la direzione principale del vento è est).
- Evitare i flussi turbolenti a causa dell'interazione del vento con gli edifici.

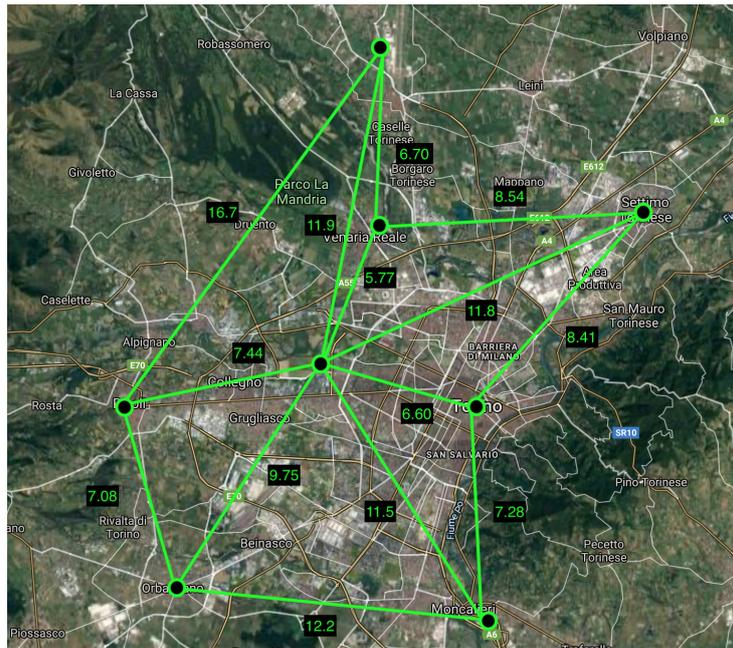


Figura 3.27: Distanze principali fra zone coperte da vertiporti

Analizzando le distanze, è interessante notare che escludendo la zona della collina, a ovest del Po, la distribuzione delle zone coperte da vertiporti è sufficientemente omogenea da far pensare che possa essere attuato un processo di standardizzazione degli schemi di collegamento fra le aree della prima cintura e l'interno. Questo ha portato a ragionare sulla possibilità di sfruttare, per il collegamento esterno, una sorta di rotta circolare che seguisse la tangenziale (per evitare, come detto, le aree abitate) e seguire le arterie principali del traffico per l'ingresso in città.

La presenza inoltre di due fiumi di rilevante impatto e con un corso uniforme come Po e Dora, permette di introdurli come pari, se non preferibili a queste ultime per gli spostamenti interni. In particolare il Po risulta un ramo prezioso per la chiusura dell'anello "tangenziale", mentre la Dora permette di evitare, quando possibile e conveniente, di sorvolare gli abitati quando in ingresso o uscita da nord-ovest.

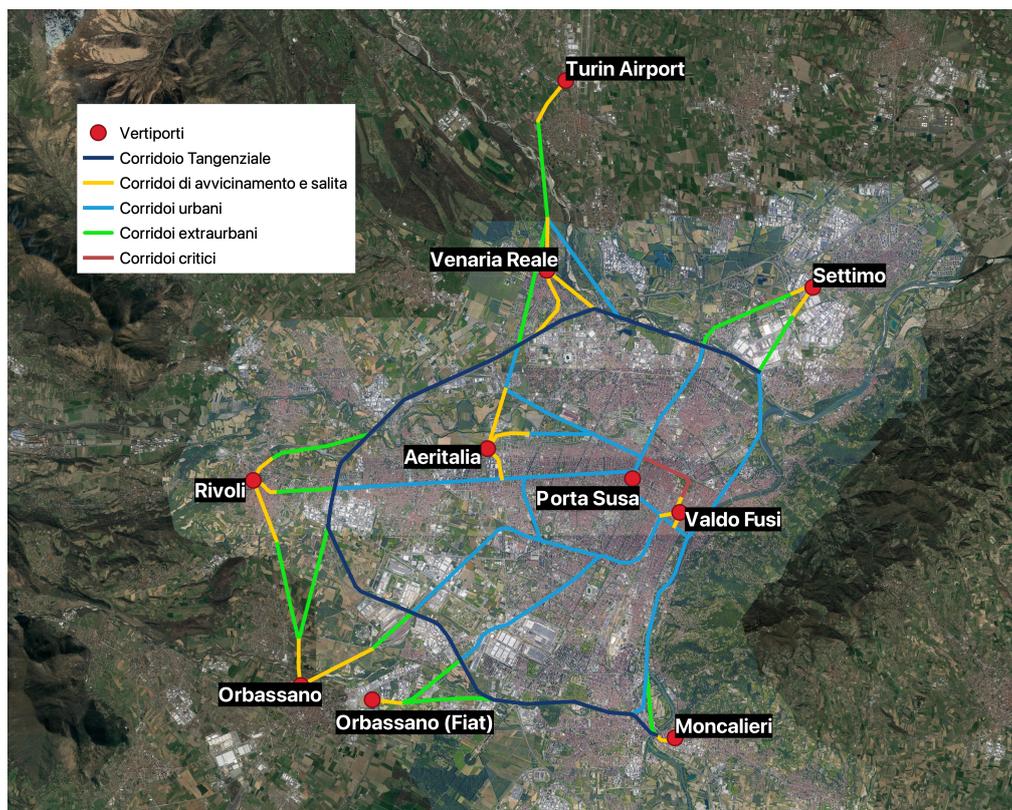


Figura 3.28: Sintesi grafica delle tratte principali

In sintesi le tratte prodotte sono illustrate in figura 3.28. Sono esposti i tratti di salita e discesa, le tratte urbane, la tratta circolare (chiamata, per comodità "Corridoio Tangenziale") e i vertiporti sinora considerati. Ovviamente la rete è in via di sviluppo e si intende svilupparla man mano che sarà possibile ottimizzarla attraverso dei test di simulazione.

La scelta di dividere le tratte per tipologia, deriva dall'esperienza della navigazione ad area, o meglio ancora dal metodo di navigazione RNP (Required Navigation Performance). Si tratta di un sistema di navigazione basato su GNSS e GBAS utilizzato per avvicinamenti in IMC, effettuati tramite autopilota, in cui un sistema monitora la precisione stimata di navigazione. Se la stima dell'errore va oltre un limite designato, il sistema segnala un errore e fa uscire il velivolo dalla procedura. Questo sistema di navigazione è un'evoluzione del sistema RNAV, che non comportava la presenza di un sistema di monitoraggio della precisione, e la sua espansione è tuttora in corso soprattutto per quanto riguarda l'ala rotante. La precisione richiesta dal sistema è indicata dalla sigla RNPX, dove la X viene sostituita da un numero (RNP0.5). Questo numero indica appunto il valore di performance di navigazione richiesta, ovvero la separazione laterale massima in miglia nautiche entro la quale l'aeromobile deve rimanere per il 95% del tempo di

volo. Attualmente, il livello massimo introdotto per questo tipo di navigazione è di 0.1 miglia nautiche.

È un sistema estremamente simile a quello che si vuole introdurre, con dei corridoi che richiedono un sufficiente livello di precisione per poter essere percorsi e mantenere la corretta separazione dagli altri velivoli. Mano a mano che si giunge in aree più centrali, quindi più critiche, la richiesta di precisione sale, di conseguenza alcune tipologie di aeromobili non certificati non potranno accedervi.

I corridoi di avvicinamento e salita sono chiaramente quelli che richiedono maggior precisione, dal momento che la collocazione dei vertiporti è prettamente urbana e la vicinanza con gli edifici rende necessario massimizzare la sicurezza. Questo vale anche per i corridoi critici, qui rappresentati da un solo esempio, quello che collega il corridoio che sorvola Corso Regina Margherita con Piazzale Valdo Fusi. Questo è stato introdotto poiché si è rilevata la necessità di ridurre i tempi di raggiungimento del piazzale a costo di sorvolare parte del centro, questo però non può compromettere i livelli di sicurezza minime ed è stato quindi scelto di specializzare un livello di precisione più alto.

In ordine decrescente di precisione si aggiungono dunque i corridoi urbani, che seguono alcune delle principali direttrici viarie della città, come era stato precedentemente deciso. Questi mantengono un livello di criticità moderato, poiché il sorvolo di aree popolate non può essere evitato. Tuttavia la presenza di paracadute balistico può consentire di sorvolare anche queste zone con un ulteriore fattore di sicurezza.

I corridoi che richiedono meno precisione sono quelli extraurbani unitamente a quello tangenziale. Dal momento che questi possono sorvolare aree scarsamente abitate, possono essere percorsi con livelli di precisione inferiore, anche eventualmente in assenza di un controllo di precisione qualora le condizioni di traffico lo permettessero.

**Struttura dei corridoi** Nella fase iniziale si intendono i corridoi come unidirezionali, di conseguenza un solo aeromobile per segmento è autorizzato ad occuparli. L'evoluzione tuttavia è un passo pressoché certo da attuare, poiché si attende un aumento del traffico notevole dopo i primi anni di attività. Di conseguenza è possibile pensare ad una separazione sia verticale che orizzontale: diagonalmente disposti, a parità di separazione l'ingombro di un corridoio sarebbe ridotto al minimo. Inoltre l'utilizzo di uno o dell'altro corridoio sarebbe dinamico e non fissato a seconda della direzione di volo, ed assegnato dal controllo del traffico.

### 3.4.4 Sviluppo dei modelli di volo

La fase successiva è stata quella di sviluppare dei modelli di volo adeguati allo scopo. Inizialmente si è sviluppato, per i primi test dell'ambiente di simulazione, un modello di multicottero basato sull'Ehang 184, prototipo cinese dell'azienda omonima. Successivamente si è tentato di sviluppare il modello di un convertiplano: il Manta ANN2, velivolo della società partner di DigiSky, Manta Aircraft.

### 3.4.5 Lo strumento: Plane Maker

X-Plane risulta essere uno strumento che si presta facilmente a lavori di prototipazione rapida. Esso infatti consente di produrre in maniera grafica dei modelli di volo allo stesso tempo semplici e accurati. Lo strumento che esso mette a disposizione è chiamato Plane Maker. Ad esso si aggiunge uno strumento altrettanto potente che si chiama Airfoil Maker, che consente di riprodurre fedelmente il comportamento di profili alari conoscendone le curve caratteristiche, facilmente ottenibili dai database online.

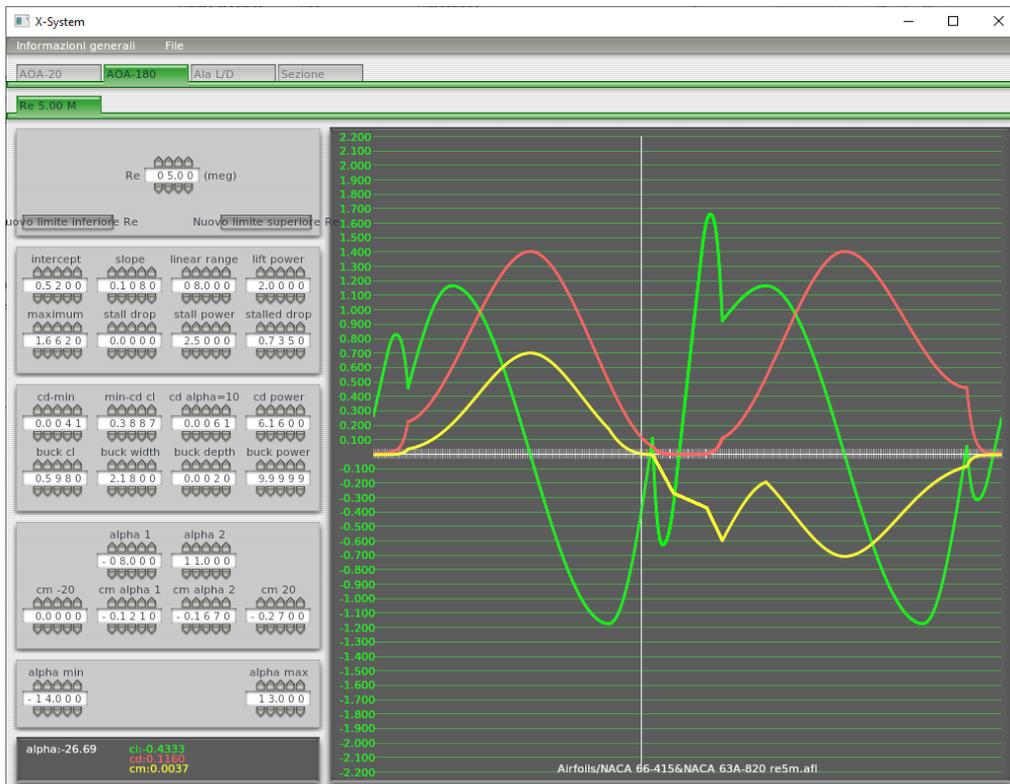


Figura 3.29: Schermata di Airfoil Maker

**Elementi resistenti** la modellazione degli elementi resistenti avviene attraverso la creazione di fusi tridimensionali attraverso un sistema di punti che vanno a comporre delle sezioni poligonali. Plane Maker consente di effettuare ciò attraverso tre principali schermate: la prima mostra una visualizzazione di una serie di sezioni, la scelta dell'utente, che compongono l'elemento. Di esse può essere impostata la posizione dei punti e la distanza dall'origine del sistema di riferimento. Per la fusoliera la precisione ottenibile è maggiore rispetto agli altri elementi, ma il funzionamento è il medesimo. I pannelli che si creano dall'unione di questi punti, consentono al simulatore di calcolare, mediante il metodo dei pannelli, le forze aerodinamiche che agiscono sul velivolo.

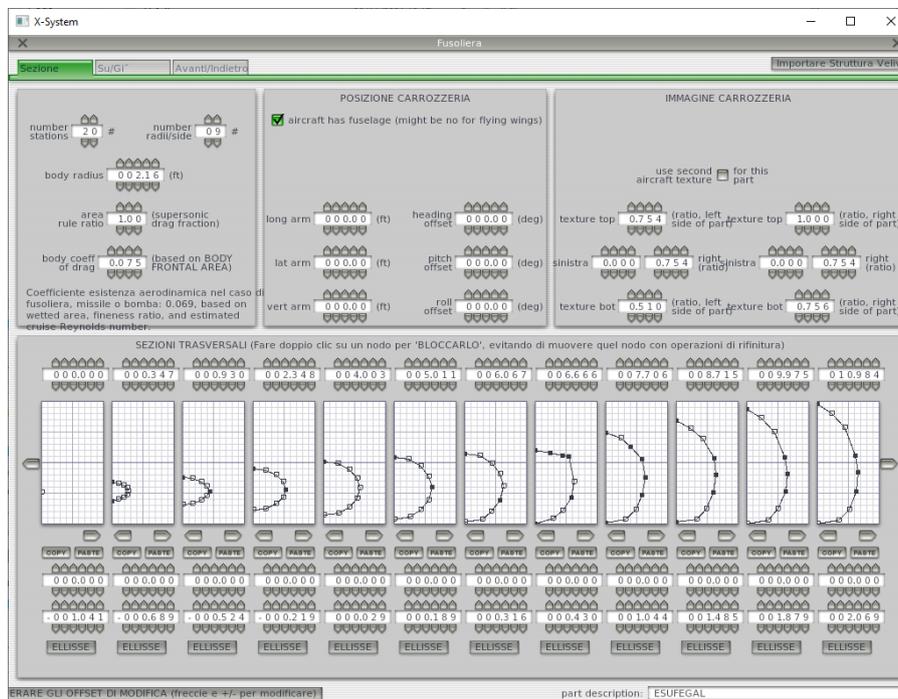


Figura 3.30: Schermata fusoliera 1, Plane Maker

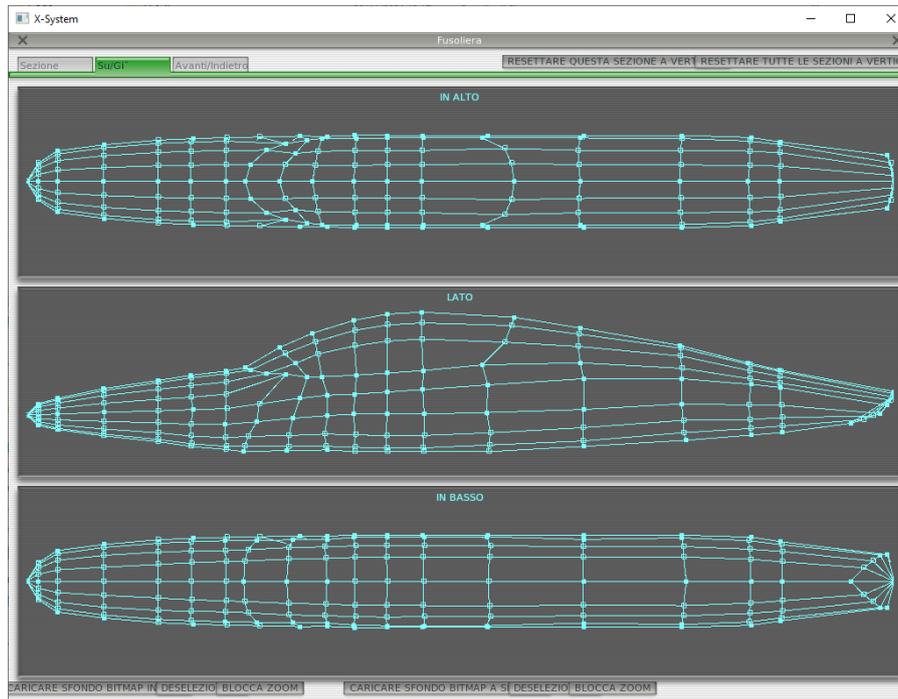


Figura 3.31: Schermata fusoliera 2, Plane Maker

**Elementi portanti** Gli elementi portanti vengono caratterizzati attraverso la creazione di parti di ala a pianta trapezoidale alle quali viene associato un profilo alare di radice e di tip, e dei quali viene eseguita un'interpolazione del comportamento. Questi possono essere congiunti geometricamente, a formare approssimazioni di ali di forma varia. A questi possono essere associate delle superfici di controllo, che corrispondono ad un sezionamento dell'apertura alare. Ogni trapezio può essere suddiviso in massimo nove parti di ugual misura. Queste possono essere geometricamente modellate come frazioni di corda dell'ala, di lunghezza massima di metà corda. Qui è possibile anche selezionare che tipo di azione svolgeranno queste superfici di controllo, includendo un comportamento che può essere anche combinato. Questo, rispetto all'azione dei comandi, viene precisato separatamente, includendo come parametri la massima escursione.

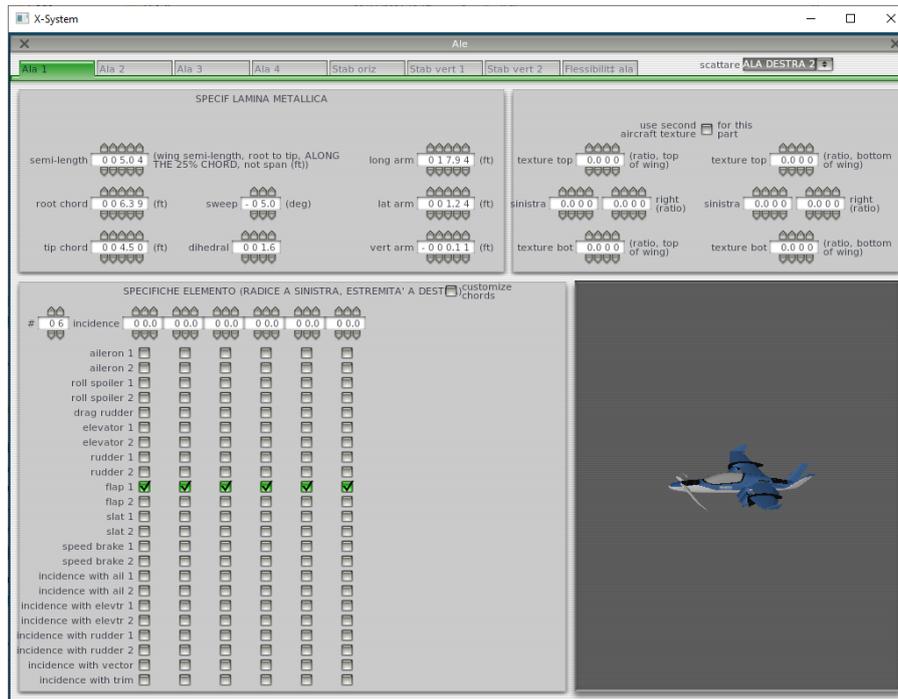


Figura 3.32: Schermata superfici alari, Plane Maker

Superfici alari completamente mobili non possono essere, per quanto prima detto, impostate da questa sezione. Esse possono essere impostate separatamente, con l'unico limite di essere considerate lamine piane e non dotate di profilo alare.

**Propulsione** La sezione dedicata alla propulsione risulta estremamente ampia. Consente, e questo risulta oltremodo utile, di modellare accuratamente anche dei modelli di motore elettrico. Selezionata la tipologia di motore e impostati i parametri di potenza e range di funzionamento in velocità, possono essere modellate le eliche in tutti i loro punti caratteristici. Questa sezione richiede un lungo processo di calibrazione per ottenere dei risultati soddisfacenti, poiché se non si hanno (come in questo caso) dei dati da cui partire, è necessario regolare i parametri sulla base della risposta che si ottiene dal simulatore.

## Vertical Mobility Digital Twin

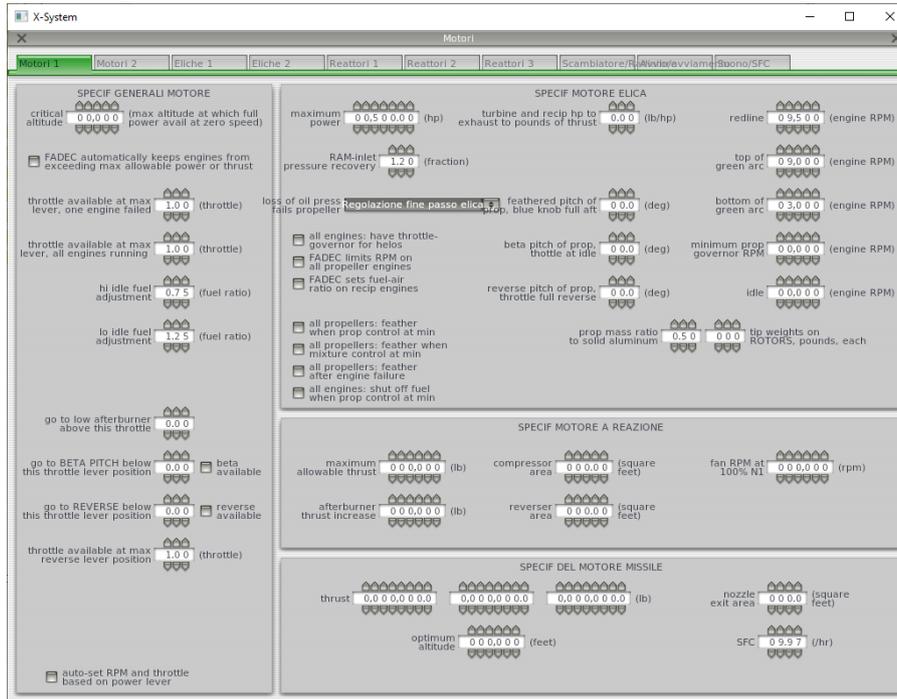


Figura 3.33: Schermata motore 1, Plane Maker

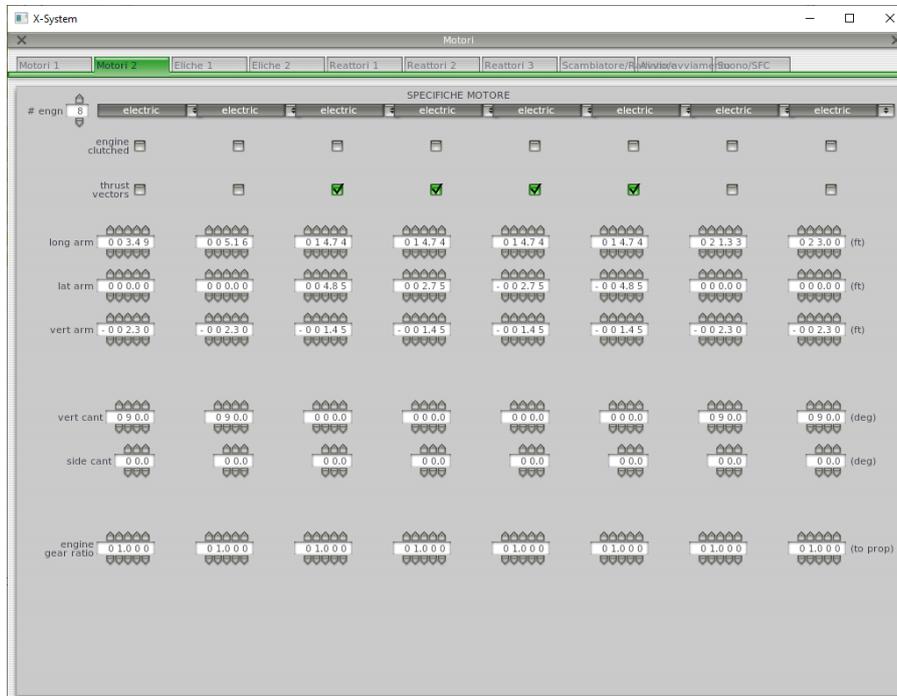


Figura 3.34: Schermata motore 2, Plane Maker

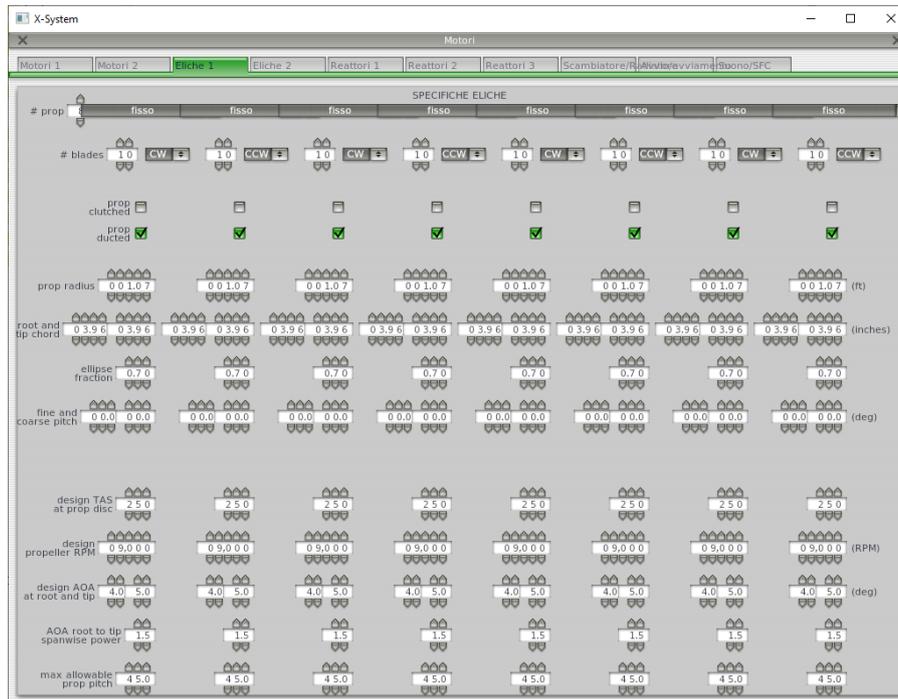


Figura 3.35: Schermata motore 3, Plane Maker

Un'ulteriore impostazione del motore che è risultata fondamentale nella sua presenza, è stata quella di poter selezionare un basculamento delle gondole motore. Questo può essere fatto rispetto a molteplici centri di rotazione, e di esso si può impostare range e velocità.

**Sistemi** Nella sezione dedicata alla modellazione dei sistemi, è possibile inoltre impostare molteplici parametri legati al comportamento dei vari sistemi, soprattutto quello elettrico ed idraulico. In particolare risulta necessario modellare correttamente il comportamento delle batterie, poiché non si tratta solo delle batterie di servizio ma vengono utilizzate dal simulatore anche per alimentare la propulsione. Una non corretta modellazione del pacco batterie può portare ad una altrettanto non corretta curva di funzionamento dei propulsori.

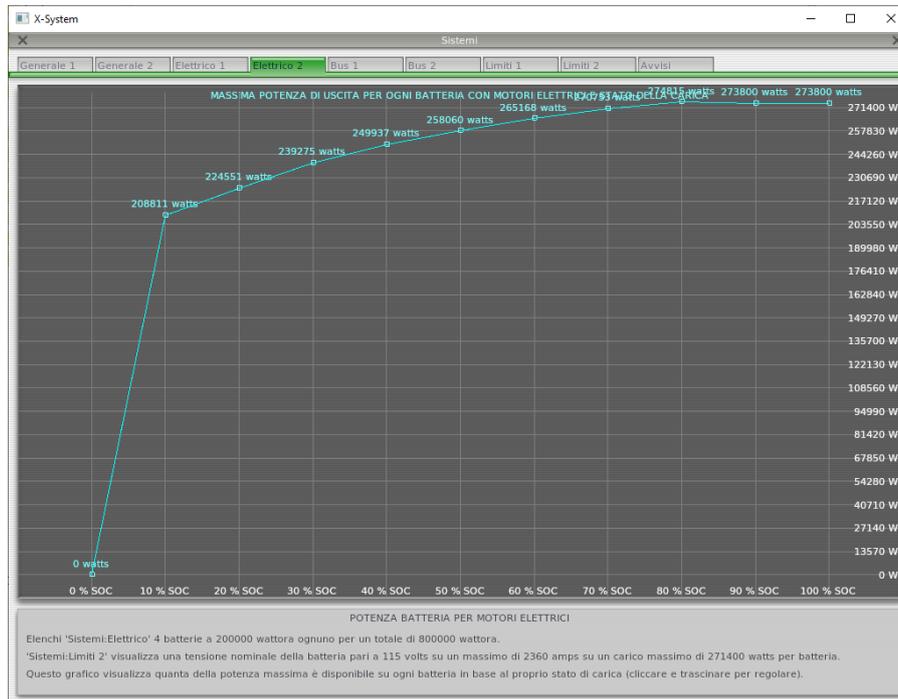


Figura 3.36: Schermata curva di scarica batteria, Plane Maker

**Stabilità artificiale** La sezione che ha reso possibile a una rapida messa in opera di velivoli così complessi è stata quella relativa alla stabilità artificiale. Essa risulta molto semplificata rispetto a una modellazione completa data dalla scelta della tipologia di controllore e dei relativi guadagni, ma comunque sufficiente a consentire di controllare attraverso un'interfaccia intuitiva i sistemi SAS e CAS di un multicottero ed un convertiplano.

In particolare questa sezione permette di associare ad una deflessione del comando, a scelta, un rateo di rotazione oppure un angolo di inclinazione del velivolo. Inoltre consente di applicare due diverse leggi di controllo per le condizioni di bassa e alta velocità, nel caso di velivoli a configurazione variabile come un convertiplano.

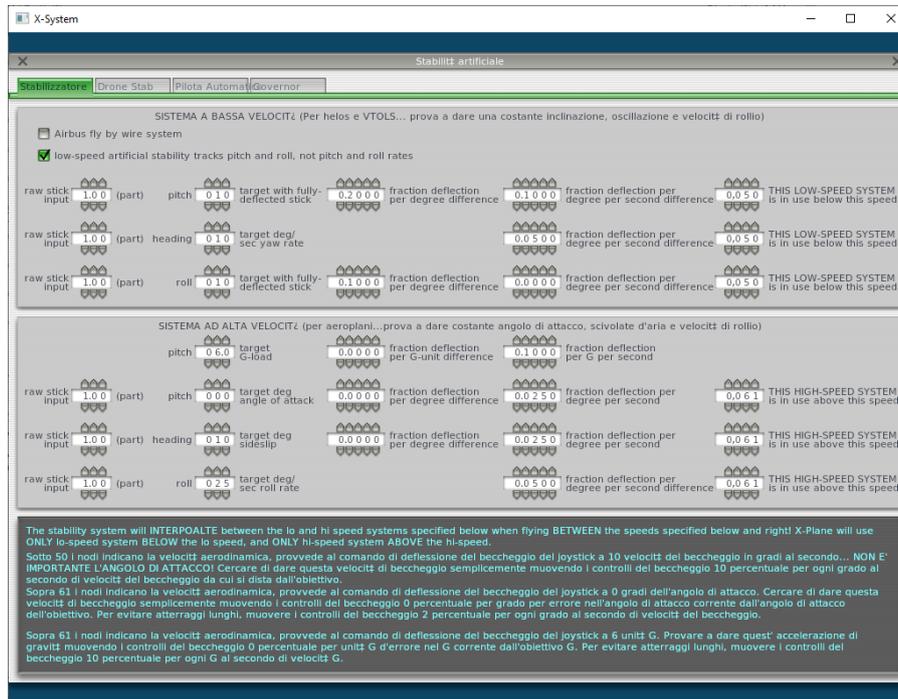


Figura 3.37: Schermata stabilità artificiale, Plane Maker

Queste leggi di controllo possono essere non solo applicate alla deflessione delle superfici di controllo ma anche alla propulsione differenziale e alla deflessione delle gondole motore, includendo la possibilità di escludere la potenza a motori in posizione ortogonale alla direzione di moto.

### Multicottero

Il modello dell'Ehang 184 è stato il primo ad essere prodotto. Si tratta di un multicottero dotato di otto eliche a due a due controrotanti montate, in maniera tradizionale, su quattro bracci uscenti dalla base della fusoliera. La sua tecnologia deriva direttamente da quella dei più piccoli SAPR disponibili sul mercato. In quanto prototipo si è risparmiato sulla ridondanza del sistema propulsivo, guadagnando in semplicità e risparmiando sul costo. Il difetto principale è il posizionamento dei motori sotto il livello della cabina, che li rende esposti al contatto col terreno in caso di raffiche di vento in fase di atterraggio.

La forma della fusoliera è stata riprodotta sulla base delle immagini a disposizione online, scalandola sulla secondo le dimensioni fornite dalle specifiche del produttore pubblicate. Non è stato possibile ottenere dettagli riguardanti la forma delle eliche e la potenza dei motori, tuttavia queste sono state calibrate per ottenere prestazioni vicine a quelle dichiarate e a quelle relative al segmento di appartenenza.



Figura 3.38: Modello dell'Ehang 184 su X-Plane

Il sistema di controllo sugli assi di rollio e beccheggio è posizionale, e ad ogni frazione di spostamento sullo stick corrisponde un angolo rispetto alla posizione orizzontale di riferimento che garantisce una spinta perfettamente verticale. L'asse di imbardata invece viene controllato, classicamente, comandando un rateo di rotazione attraverso la pedaliera.

Il limite riscontrato nella modellazione del sistema di controllo risulta essere l'eccessiva escursione della potenza complessiva dei rotori, che per evitare eccessivi ratei di salita dovrebbe essere limitata. L'eccesso di potenza disponibile è causato dalla necessità di potenza differenziale per mantenere il controllo dell'aeromobile anche durante le fasi di salita.

### **Convertiplano**

Il modello di convertiplano, basato sul Manta Aircraft ANN2, è un convertiplano dotato di quattro eliche supplementari fisse per il sostentamento in hover. Anche la configurazione portante risulta non classica: si tratta di una configurazione con piano alare principale molto arretrato, un importante canard portante, e un'ampia coda a V. Questa configurazione, intrinsecamente instabile, sottolinea l'intento di creare un mezzo dalle capacità dinamiche notevoli.

In virtù della collaborazione fra DigiSky e Manta aircraft è stato possibile ottenere un modello esterno graficamente realistico del velivolo, a differenza di quanto

accaduto per l'Ehang 184.

È stato modellato secondo le stesse modalità del precedente. I dati sulla fusoliera e sulle dimensioni sono stati ricavati dalle immagini in proiezione ortogonale disponibili sul sito ufficiale del velivolo, così come i dati di prestazione e di peso. Anche in questo caso le prestazioni dei motori sono state testate nel simulatore per ottenere prestazioni il più vicine possibili a quelle dichiarate.

Il sistema di controllo su questo velivolo ha richiesto un maggior lavoro di affinamento. Questo è dovuto all'ovvia complicazione generata dalla singolare configurazione del velivolo, che ha richiesto una doppia legge di controllo tra la fase di decollo e atterraggio verticale e quella di volo traslato.

La fase di hover viene gestita, come nel caso del multicottero, attraverso un comando posizionale per l'asse di rollio e di beccheggio, mentre l'asse di imbardata possiede un controllo sul rateo.

La differenza principale qui presente, sono le gondole motori basculanti, poiché essi assolvono multiple funzioni che in un semplice multicottero non sarebbero possibili. Prima fra tutte è fondamentale nominare la generazione di momento imbardante: dal momento che essi possono basculare oltre i  $90^\circ$ , un'inclinazione differenziale nella fase di hover può generare imbardata, il che risulta estremamente utile in mancanza delle numerose eliche in dote ai multicotteri. La loro inclinazione oltre la posizione verticale permette inoltre di esercitare una forza frenante in fase di rallentamento. Nella fase di transizione a volo traslato, infine, essi devono garantire la componente di spinta verticale nonostante la loro rotazione, almeno fino a quando la portanza generata dall'ala non diventi sufficiente.

Oltre a ciò, la presenza di motori adibiti esclusivamente al sostentamento implica che la loro potenza debba essere non solo proporzionale alla manetta ma anche al seno dell'angolo di inclinazione medio delle gondole motori. Questo è necessario affinché la potenza diminuisca in maniera regolare durante le fasi di transizione. Il principale limite dovuto al sistema di simulazione concesso dal software riguarda la generazione elettrica: l'aeromobile in questione presenta una propulsione ibrida, in cui la potenza elettrica è fornita non solo da un pacco batterie (che risulta quindi essere una fonte secondaria di potenza) ma anche e soprattutto da un generatore di gas. Questa configurazione non è attuabile in maniera nativa e dovrà essere, se necessario, implementata esternamente. Per ora essa viene sostituita da sistemi a batteria.

### **3.4.6 Struttura logica della simulazione**

Il Digital Twin ha dunque lo scopo di simulare diverse condizioni operative per validare diversi tipi di elementi, facenti parte di una catena di operazioni. Per definire questi elementi bisogna stabilire la catena operativa in esame. Essa non è altro che l'estrapolazione degli elementi che compongono il Concept of Operations.

Il concetto alla base di questo simulatore di operazioni è costituire un flusso di dati univoco, di cui gli elementi siano modulari e testabili su una piattaforma standardizzata, che funga da banco prova. In questo modo diventa possibile evidenziare le caratteristiche di ciascun modulo inserito in una simulazione di test, e in presenza di un contesto realistico è possibile evidenziare i colli di bottiglia, ad esempio, per efficientare il sistema.

### Controllo del traffico

Cronologicamente in ordine, il primo elemento a entrare in funzione è il sistema di gestione e controllo del traffico: esso ha lo scopo di accogliere le richieste di piano di volo, confrontarle con la condizione di traffico attuale o futura, programmare un eventuale decollo ed applicare le modifiche eventuali e, dopo l'approvazione, comunicare i risultati al richiedente. Questi risultati, in forma di un piano di volo definitivo, arrivano al richiedente, tipicamente un eVTOL, che elabora i risultati attraverso il Flight Management System. Questo deve convertire questi dati in un formato leggibile dall'autopilota e, contemporaneamente, comunicare con gli strumenti per garantire i livelli di sicurezza adeguati.

**Cammini minimi** Questa funzione può essere svolta mediante diversi approcci, quello utilizzato in questo caso è stato sfruttare l'algoritmo di Dijkstra[12]. La rete viene suddivisa in segmenti delimitati da dei nodi, corrispondenti a intersezioni o ai vertiporti. Dopo una fase di testing, per ogni velivolo considerato viene assegnato ad ogni segmento un tempo stimato di percorrenza. Si crea una matrice di adiacenza  $A$ , contenente per ogni elemento  $(i, j)$  i tempi di percorrenza, ove  $i$  e  $j$  sono i nodi stessi. L'algoritmo di Dijkstra, così come qualunque altro algoritmo per il calcolo del cammino minimo, calcola appunto il percorso che consente il minor tempo di percorrenza.

**Deconflitti di traffico** Questo è utile per la programmazione del volo, ma non calcola la presenza di eventuale traffico in volo. Specialmente nella prima fase, in cui i corridoi sono concepiti come corridoi a senso unico alternato, è necessario garantire per ogni corridoio un solo aeromobile alla volta. Una prima, inelegante soluzione, potrebbe essere quella di calcolare per ogni segmento la presenza di un aeromobile nel momento del passaggio e mandare a infinito il tempo di percorrenza di quel segmento, così da costringere l'algoritmo a calcolare un altro percorso possibile. L'alternativa, più appetibile ma più profondamente radicata a livello di sistema, sarebbe quella di calcolare i tempi di percorrenza utilizzando una velocità di crociera che conceda un margine di aumento o diminuzione di velocità: questo consentirebbe, grazie a una variazione dinamica della velocità di percorrenza dei segmenti, di accedere nei segmenti prima che l'altro traffico possa entrare in conflitto oppure di rallentare il volo a sufficienza per attenderne l'uscita. In una

seconda fase questa implementazione potrebbe coinvolgere una comunicazione fra i due velivoli per massimizzare l'efficacia del sistema.

**Altri fenomeni impattanti** I tempi di percorrenza, prima di passare al vaglio dell'algoritmo dei cammini minimi, devono però essere ulteriormente manipolati. Infatti essi variano non solo a seconda della presenza di traffico, ma anche a causa di condizioni di vento, delle condizioni meteo o di variazioni dinamiche dello spazio aereo decise dall'ente di controllo.

Nel caso di vento la soluzione risulta semplice: si somma vettorialmente alla velocità media sul tratto la componente di vento presente. Per quanto riguarda le condizioni meteo avverse può essere possibile ridurre con dei coefficienti correttivi le velocità stesse.

La variazione di percorso dovuta alla modifica temporanea dello spazio aereo può determinare modifiche molto varie allo spazio aereo: i segmenti possono essere modificati, rallentati o interdetti alla navigazione. Questo può costringere non solo a una modifica del tempo di percorrenza ma può costringere alla chiusura del corridoio, e ad una apertura eventuale di un corridoio totalmente diverso. Questo costringe a modifiche sostanziali della matrice che devono essere contemplate e studiate per tempo.

L'entrata in vigore dei cambiamenti deve inoltre essere tenuta in considerazione da parte dell'algoritmo in maniera preventiva alla partenza dell'aeromobile.

## Flight Management System

All'FMS è deputata la decodifica del piano di volo ricevuto dall'ATM, che dev'essere trasformato in dati leggibili dall'autopilota o, eventualmente, dal Flight Director. Come nel caso degli FMS dei velivoli attuali, dev'essere standardizzato il linguaggio: attualmente il linguaggio tipico utilizzato in aviazione per quanto riguarda gli ausili alla navigazione e i fixes è l'ARINC 424, giunto ormai alla sua 22<sup>a</sup> interazione, seppure i dati attualmente pubblicati siano ancora basati sulla versione 18. Si tratta di un linguaggio per database di navigazione, in cui ogni elemento è descritto da una stringa di 132 caratteri alfanumerici. Proprio la versione 18 risulta peculiare per l'introduzione di elementi aggiuntivi e specifici per quanto riguarda gli ausili alla navigazione RNP.

Ad un'analisi superficiale l'utilizzo di questo linguaggio può sembrare estremamente efficiente da un punto di vista dello spazio, efficace e consistente. Tuttavia il rischio è che la specificazione di rotte aeree cittadine estremamente dense di punti rischiano di saturare il sistema, oltre che richiedere una flessibilità che questo linguaggio non può garantire in quanto basato su una concezione tradizionale

degli spazi aerei, sostanzialmente statica. Si evidenzia quindi la necessità di introdurre un sistema, basato su questo o interamente nuovo, formato da elementi statici ed elementi dinamici, che possa garantire la flessibilità necessaria ai repentini cambi di definizione degli spazi aerei urbani.

Un esempio pratico di limitatezza di questo sistema è la promulgazione delle modifiche temporanee attraverso NOTAM: spesso NOTAM devono essere letti e interpretati da piloti ed operatori aerei umani, mentre i cambiamenti e delle cosiddette AIRAC vengono rilasciati semestralmente e solo per quanto riguarda modifiche permanenti. Questo non può avvenire nelle condizioni considerate, dal momento che la pianificazione del volo avviene in maniera completamente autonoma e qualora delle modifiche venissero effettuate esse devono poter essere interpretate da parte di un sistema automatizzato. Questo fa sì che il database debba essere costantemente aggiornato, cosa non compatibile con i cicli di aggiornamento cui si fa riferimento.

Inoltre l’FMS deve essere in grado di recepire ed attuare modifiche del piano di volo durante il volo stesso, qualora condizioni di tempestiva necessità si verificano. Questo deve essere possibile in maniera completamente autonoma, anche in assenza di collegamento con l’ATM: questa necessità nasce allo scopo di evitare che in caso di assenza di collegamento la prima soluzione sia direttamente il volo controllato manualmente dal pilota, cosa che può generare problematiche di sicurezza ulteriore legate al fattore umano (per quanto questa rimanga un’opzione necessariamente da considerare, specie nelle prime implementazioni). Il sistema deve essere in grado sempre più di gestire condizioni di emergenza attraverso la sensoristica interna, rendendo possibile la terminazione del volo anche in assenza di controllo esterno.

## **Autopilota**

L’elevato livello di integrazione dei sistemi di missione con i sistemi di volo rendono l’autopilota una componente fondamentale per il funzionamento degli aeromobili all’interno dello spazio aereo. L’intenzione di SkyGate di diventare una piattaforma di testing per questo genere di velivoli rende ulteriormente necessario rendere il Digital Twin in una piattaforma per la validazione anche dei sistemi di navigazione autonoma e di gestione del volo. L’opportunità creata da parte di X-Plane di estrarre qualunque dato legato alla simulazione, e di inserire allo stesso modo questi dati fa sì che sia possibile modellare a piacimento un autopilota così come inserirlo hardware-in-the-loop.

## **Modello di volo**

In aggiunta a quanto precedentemente esposto sulla produzione di modelli di volo, è possibile produrre efficacemente anche modelli di volo più elaborati attraverso codice esterno. Grazie alle capacità di X-Plane è anche possibile deputare

il calcolo del modello di volo a un calcolatore separato da quello centrale della simulazione, per evitare l'aggravio su una macchina sola.

È possibile, in questo modo, generare un cluster di calcolatori che possono inserire anche il pilot-in-the-loop, per testare anche l'ingestione nel sistema di un sistema pilotato non autonomamente. Questo può essere fatto per fino a 20 aeromobili contemporaneamente, numero che può tuttavia essere aumentato ulteriormente attraverso opportuni strumenti.

## Analisi dei dati di simulazione

L'analisi dei dati di simulazione può essere effettuata attraverso strumenti molto vari, dal momento che con X-Plane essi possono essere estratti attraverso strumenti nativi. Dalle impostazioni di X-Plane infatti possono essere mostrati a schermo, così come scritti su file o inviati a un indirizzo IP attraverso la rete. In questo modo, attraverso software di vario tipo può essere possibile un'analisi, ad esempio attraverso Matlab. Tuttavia è stato deciso di non utilizzare Matlab a causa dell'assenza, ad oggi, di una licenza in azienda.

Lo strumento invece che si è deciso di utilizzare è TacView[7]: si tratta di uno strumento noto da anni nel mondo della simulazione e che consente svariati tipi di analisi di traiettoria per scenari complessi, potendo esso comprendere i dati di simulazione di svariati velivoli contemporaneamente e di mostrarli tridimensionalmente nello spazio e nel tempo, e su grafici personalizzabili. A questo, un'analisi ulteriore effettuata con i dati estratti da X-Plane può essere affiancata.

Esso inoltre può essere utilizzato ugualmente anche per tracciare voli reali, mediante l'importazione di dati che possono contenere dati sia posizionali che di assetto: in questo modo è possibile utilizzare un solo strumento per molteplici utilizzi, ma soprattutto per poter confrontare i dati di simulazione con i dati reali.

Come esempio sono stati effettuati due voli di prova, nella tratta Aeritalia - Piazzale Valdo Fusi. Questa tratta risulta interessante perché attraversa due zone critiche: il sorvolo dell'aeroporto di Aeritalia e il sorvolo dell'area critica del centro di Torino. Volo estremamente scenografico, ma che rappresenta soprattutto un benchmark importante per la misura dei livelli di precisione della navigazione.

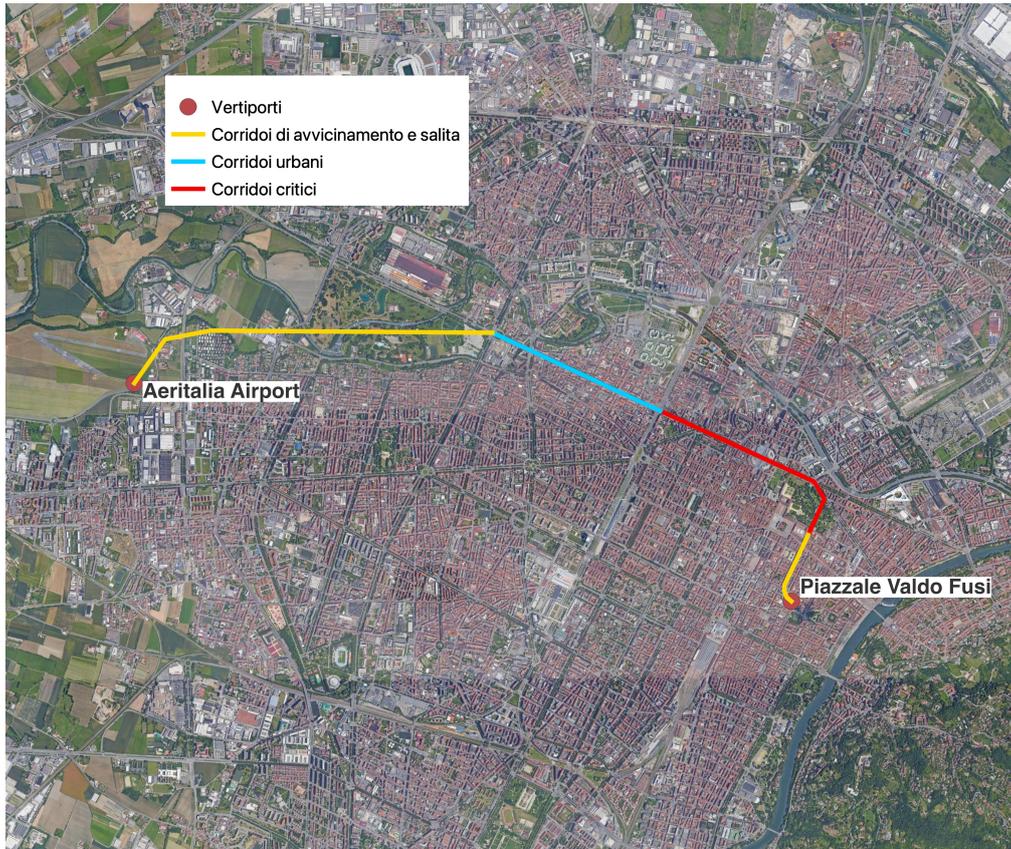


Figura 3.39: Aeritalia - Piazzale Valdo Fusi

Il test è stato effettuato attraverso un volo in condizioni VFR, di giorno, visibilità oltre i 10 Km e con scarse nuvole oltre i 15000 ft. Il pilotaggio è stato manuale, utilizzando la strumentazione in dote al simulatore di operazioni del Dipartimento di Meccanica ed Aerospaziale del Politecnico di Torino.

**Volo di esempio 1: Ehang 184** Il primo volo viene effettuato con l'Ehang 184, allo scopo di visualizzare il comportamento di un multicottero.

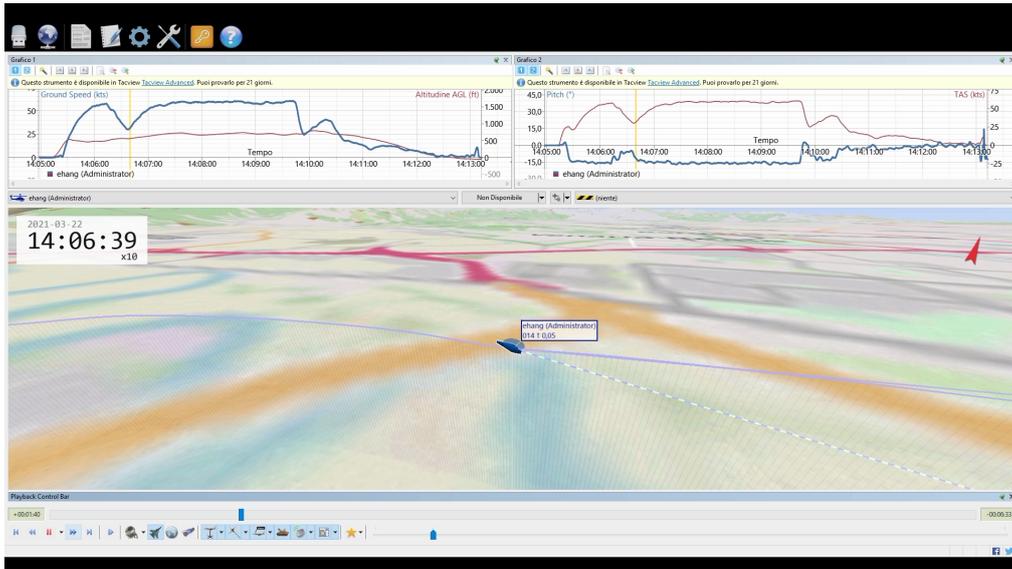


Figura 3.40: Schermata di Tacview del volo di esempio 1

Il volo si svolge senza maggiori deviazioni dal corridoio, anche grazie ai riferimenti visivi della tratta, che sono principalmente Corso Regina Margherita e la sua intersezione con Corso Lecce, corso San Maurizio, il Teatro Regio e infine lo stesso Piazzale Valdo Fusi.

Si possono evidenziare fino a quattro diversi grafici, con numerose informazioni visualizzabili: in questa situazione, in particolare, si evidenziano sulla sinistra l'altezza dal terreno [ft] e la ground speed [kt], e a destra la true airspeed e l'angolo di assetto.

Si evidenzia la correlazione fra angolo di assetto e velocità, dovuta dalla configurazione a multicottero che per il movimento longitudinale necessita di vettoramento della spinta mediante l'assetto.

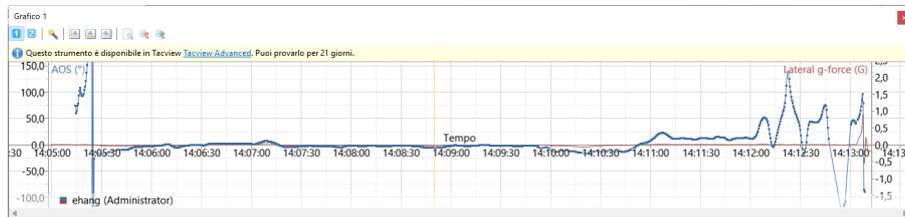


Figura 3.41: Analisi laterodirezionale

Un aspetto interessante che può scaturire da questa analisi, pur breve e a solo

scopo illustrativo, è la forte mancanza in questa tipologia di velivoli di una derivata direzionale significativa, evidenziata chiaramente dal volo manuale: la correlazione è evidente nel grafico in figura 3.41. Questo può risultare interessante ai fini dello studio, ad esempio, del benessere dei passeggeri e per ridurre al minimo gli effetti negativi dovuti a movimenti che possono essere mal recepiti dall'apparato vestibolare durante la crociera.

Nonostante ciò il volo risulta in controllo in tutte le situazioni, con un comportamento prevedibile in ogni condizione. Le caratteristiche aerodinamiche della fusoliera e la potenza dei motori consentono facilmente di raggiungere i 60 kt, con la sola eccezione delle virate, in cui il vettoramento della spinta riduce la componente longitudinale per guadagnarne lateralmente ed effettuare la virata (seppure nel volo qui considerato, nella prima virata ampia di inserimento nel corridoio che entra in città il rallentamento sia eccessivamente accentuato).

Il decollo avviene alle 14:05, con il contatto a terra che avviene alle 14:13, con un tempo totale di volo di circa otto minuti per raggiungere il centro città: un risultato ragguardevole, ma decisamente prevedibile date le caratteristiche del volo aereo. L'obiettivo è cercare di mantenere questi tempi anche in condizioni di traffico intenso.

**Volo di esempio 2: Manta ANN2** Il secondo volo viene effettuato con il convertiplano di Manta Aircraft, l'ANN2. Il comportamento e le prestazioni del convertiplano sono molto diverse, tanto da rendere questo modello inadatto a tale tipo di collegamenti, tuttavia risulta interessante effettuare un sintetico confronto fra i due aeromobili.

Vi sono evidenti le due fasi di transizione della condizione di volo: la prima avviene immediatamente dopo il decollo, durante la fase di salita, mentre la seconda avviene con largo anticipo rispetto all'avvicinamento: questo è causato dalla criticità della procedura di ingresso in città, che richiede capacità di manovrare con raggio notevolmente ridotto. A causa di ciò la manovra di avvicinamento risulta anche più lenta di quella della controparte multicottero.

Tuttavia la differenza maggiore è evidente nella fase di corridoio: i 150 kt del Manta in fase di volo sono fin eccessivi rispetto alla durata del volo. Tale limite, unito alla minore agilità nelle fasi di avvicinamento e decollo, fa sì che il vantaggio in termini di tempo su questa tratta sia di appena due minuti.

In compenso si nota una maggiore difficoltà nel mantenere, nel pilotaggio manuale, una velocità verticale costante. Dal grafico delle accelerazioni sono evidenti anche delle fasi di oscillazione molto sostenuta dovute in parte al difficile controllo da parte del pilota umano ed in parte ai limiti del controllo di stabilità di default di X-Plane, che con un velivolo così complesso tende ad andare in crisi specie nella gestione delle transizioni e nel trimming poco preciso, necessitando di frequenti correzioni manuali.

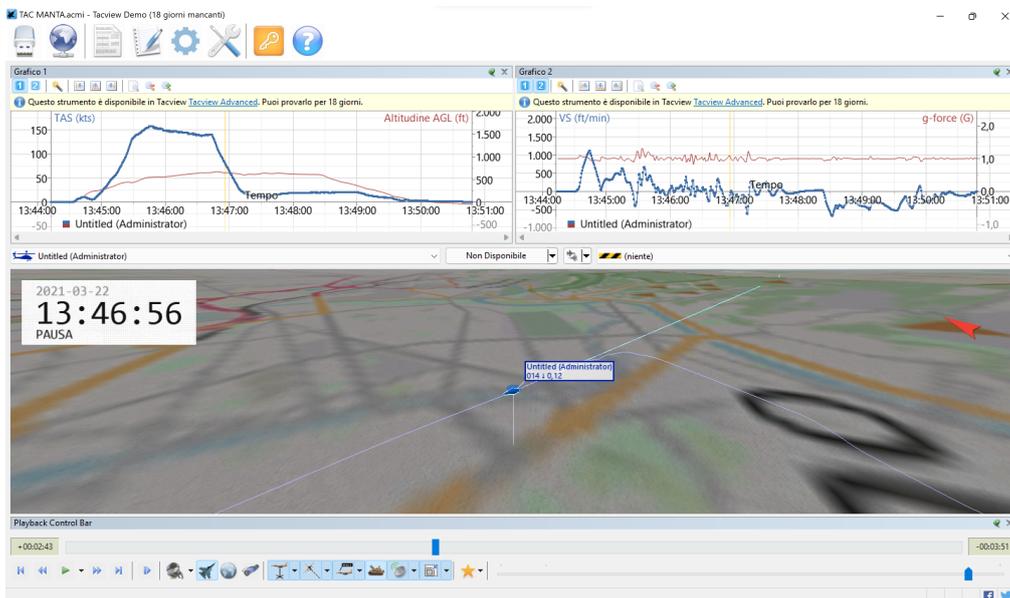


Figura 3.42: Schermata di Tacview del volo di esempio 2

## Capitolo 4

# Sviluppi futuri

Il simulatore è distante dall'essere completato, dal momento che il codice di simulazione è estremamente integrato. La presenza del framework non è sufficiente alla simulazione, poiché ogni componente dev'essere presente per il funzionamento delle altre. Al termine dello sviluppo di un flusso coerente di dati tra ATM e simulazione vera e propria, sarà possibile integrare diverse tipologie di moduli per il testing e la validazione.

Possono poi essere scelte svariate configurazioni per l'utilizzo dello stesso simulatore con scopi diversi.

Alcuni esempi:

**Cluster di velivoli** È possibile collegare molteplici velivoli, autonomamente gestiti, a una rete locale per studiarne l'interazione in un ambiente comune di simulazione. Ogni velivolo può essere diversamente allestito e autonomamente gestito da un calcolatore separato, e può contenere: hardware-in-the-loop, software-in-the-loop, pilot-in-the-loop e combinazioni di essi.

**Monitoraggio in tempo reale di test flight** Il simulatore può anche essere predisposto alla ricezione ed iniezione nell'ambiente di simulazione in tempo reale dei dati di volo di un velivolo testato realmente.

**Pilot-in-the-loop e fattore umano** Il simulatore può essere impostato per testare la capacità di interazione di un pilota con i nuovi sistemi di bordo in condizioni realistiche, per validarle e considerare il fattore umano e sviluppare nuovi paradigmi di addestramento.



# Acronimi

**AAM** Advanced Air Mobility.

**ATC** Air Traffic Control.

**ATM** Air Traffic Management.

**ATZ** Aerodrome Traffic Zone.

**CFD** Computational Fluid Dynamics.

**DLL** Dynamically Linked Library.

**EASA** European Aviation Safety Agency.

**ENAC** Ente Nazionale Aviazione Civile.

**eVTOL** electric Vertical Take Off and Landing.

**FAA** Federal Aviation Administration.

**GBAS** Ground Based Augmentation System.

**GNSS** Global Navigation Satellite System.

**GPWS** Ground Proximity Warning System.

**NASA** National Aeronautics and Space Administration.

**PEM** Proton Exchange Membrane.

**SAF** Sustainable Aviation Fuel.

**SAGAT** Società Azionaria Gestione Aeroporto Torino.

**SAPR** Sistema Aereo a Pilotaggio Remoto.

**SESARju** Single European Sky ATM Research joint undertaking.

**TCAS** Traffic Collision Avoidance System.

**TLOF** Touchdown and Lift Off Area.

**UAM** Urban Air Mobility.

**UAS** Unmanned Aerial System.

**UML** UAM Maturity Level.

**VFR** Visual Flight Rules.

**VOA** Vertiport Operation Area.

# Bibliografia

- [1] Easa sito ufficiale. <https://www.easa.europa.eu/>. Ultimo accesso: 28/02/2022.
- [2] Google maps. <https://maps.google.com>. Ultimo accesso: 28/02/2022.
- [3] Microsoft flight simulator sito ufficiale. <https://www.flightsimulator.com>. Ultimo accesso: 28/02/2022.
- [4] Pagina di openstreetmap. <https://www.openstreetmap.org/>. Ultimo accesso: 15/03/2022.
- [5] Pagina github di ortho4xp. <https://github.com/oscarpilote/Ortho4XP>. Ultimo accesso: 15/03/2022.
- [6] Prepar3d sito ufficiale. <https://www.prepar3d.com>. Ultimo accesso: 28/02/2022.
- [7] Sito ufficiale di tacview. <https://www.tacview.net>. Ultimo accesso: 22/03/2022.
- [8] Skygate sito ufficiale. <https://www.alwaysideas.it/skygate>. Ultimo accesso: 28/02/2022.
- [9] X-plane 11 sito ufficiale. <https://www.x-plane.com>. Ultimo accesso: 28/02/2022.
- [10] McKinsey & Company (New York, NY United States), European Union Aviation Safety Agency. Study on the societal acceptance of urban air mobility in europe. 2021.
- [11] Aleksandar Bauranov and Jasenka Rakas. Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, 125:100726, 2021.
- [12] Daniele Cassano. Urban air mobility: Simulazione del volo di evtol e pianificazione delle tratte urbane. 2021.
- [13] Commission of European Union. Commission implementing regulation (EU) 2021/664. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2021/664/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/664/oj).
- [14] Commission of European Union. Commission implementing regulation (EU) 2021/665. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2021/665/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/665/oj).

- [15] Commission of European Union. Commission implementing regulation (EU) 2021/666.  
[https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2021/666/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/666/oj).
- [16] Gruppo di lavoro ENAC "Advanced Air Mobility". Enac: Piano strategico nazionale (2021-2030) per lo sviluppo della mobilità aerea avanzata in italia. 2021.
- [17] William L Fredericks, Shashank Sripad, Geoffrey C Bower, and Venkatasubramanian Viswanathan. Performance metrics required of next-generation batteries to electrify vertical takeoff and landing (vtol) aircraft. *ACS Energy Letters*, 3(12):2989–2994, 2018.
- [18] Brian P Hill, Dwight DeCarme, Matt Metcalfe, Christine Griffin, Sterling Wiggins, Chris Metts, Bill Bastedo, Michael D Patterson, and Nancy L Mendonca. Uam vision concept of operations (conops) uam maturity level (uml) 4. 2020.
- [19] Timothy Krantz. Reliability requirements and research strategies for urban air mobility propulsion. In *2019 Propulsion and Power Technical Meeting*, number GRC-E-DAA-TN74347, 2019.
- [20] Teppo Luukkonen. Modelling and control of quadcopter. *Independent research project in applied mathematics, Espoo*, 22:22, 2011.
- [21] Wanyi Ng, Mrinalgouda Patil, and Anubhav Datta. Hydrogen fuel cell and battery hybrid architecture for range extension of electric vtol (evtol) aircraft. *Journal of the American Helicopter Society*, 66(1):1–13, 2021.
- [22] Barinyima Nkoi, Pericles Pilidis, and Theoklis Nikolaidis. Performance assessment of simple and modified cycle turboshaft gas turbines. *Propulsion and Power Research*, 2(2):96–106, 2013.