



Politecnico di Torino

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Stima dei costi per la valutazione delle strategie di utilizzo di un
sistema UAM**

Relatori:

Fioriti Marco

Borghi Marco

Candidato:

Luca De Pascalis

Anno accademico 2023/2024

A Maurizio, ispirazione di una vita.

SOMMARIO

La presente tesi analizza il panorama attuale degli eVTOL (Electric Vertical Take-Off and Landing) e dell'Urban Air Mobility (UAM), con un focus specifico sull'infrastruttura necessaria per supportare questi nuovi mezzi di trasporto: i vertiporti. Viene fornita una panoramica dettagliata dello stato dell'arte dei vertiporti, inclusi gli sviluppi tecnologici, le normative in evoluzione e le sfide operative. In particolare, si esplorano i costi di produzione e i costi operativi dei vertiporti, analizzando le variabili che influenzano questi costi, come l'ubicazione, la tecnologia impiegata e la scala dell'operazione.

Uno dei contributi principali della tesi è l'elaborazione di un metodo per la collocazione ottimale dei vertiporti all'interno delle aree urbane, con un caso di studio specifico sulla città di Torino. Questo metodo considera variabili come la densità abitativa, la domanda di trasporto aereo urbano e la disponibilità di infrastrutture esistenti. Viene inoltre esaminato l'impatto delle tasse vertiportuali sul modello di business degli operatori eVTOL e sulla loro redditività.

Infine, la tesi esplora come il costo del servizio di trasporto aereo urbano possa variare in funzione di parametri chiave, tra cui il numero di passeggeri trasportabili da un eVTOL e il numero di vertiporti disponibili. Attraverso simulazioni e analisi di scenari, si valutano le implicazioni economiche e operative di diversi modelli di implementazione dell'UAM, offrendo una base solida per future decisioni strategiche nel settore emergente della mobilità aerea urbana.

Questa ricerca fornisce una visione integrata dei molteplici aspetti economici e tecnici legati allo sviluppo dell'UAM, contribuendo alla comprensione delle dinamiche di costo e delle opportunità offerte dalla mobilità aerea elettrica nelle aree urbane.

ABSTRACT

This thesis analyses the current landscape of eVTOLs (Electric Vertical Take-Off and Landing) and Urban Air Mobility (UAM), with a specific focus on the infrastructure required to support these new means of transport: vertiports. A detailed overview is provided a detailed overview of the state of the art of vertiports, including technological technological developments, evolving regulations and operational challenges. In particular, the production and operating costs of vertiports are explored, analysing vertiports, analysing the variables that influence these costs, such as location, the technology employed and the scale of the operation.

One of the main contributions of the thesis is the development of a method for the optimal location of vertiports within urban areas, with an urban areas, with a specific case study on the city of Turin. This method considers variables such as population density, demand for urban air transport and the availability of existing infrastructure. The impact of airport taxes on the business model of eVTOL operators is also examined. of eVTOL operators and their profitability.

Finally, the thesis explores how the cost of urban air transport service can vary depending on key parameters, including the number of passengers transported by an eVTOL and the number of vertiports available. Through simulations and scenario analyses, we assess the economic and operational implications of different models of implementation of UAM, providing a sound basis for future strategic decisions strategic decisions in the emerging field of urban air mobility.

This research provides an integrated view of the multiple economic and technical aspects of UAM development, contributing to the understanding of the cost dynamics and opportunities offered by electric air mobility in urban areas.

INDICE

1	Introduzione	1
1.1	UAM	2
1.2	Mobilità urbana classica VS UAM	4
1.3	Tratte extraurbane attraverso Advanced Air Mobility	5
1.4	Fattori di accettazione sociale	7
2	eVTOL	10
2.1	Classificazione	11
2.2	Modelli di eVTOL	13
2.2.1	Volocity	13
2.2.2	Joby S4	14
2.2.3	Midnight	15
2.2.4	Aurora Xplorer	16
2.2.5	Lilium Jet	17
2.3	Infrastrutture	18
2.3.1	Configurazione dei vertiporti e volume privo di ostacoli	19
2.3.2	Vertihubs.....	21
2.3.3	Vertiports	22
2.3.4	Vertistations	23
2.3.5	Progettazione di un vertiporto	24
2.3.6	Skyports	26
2.3.7	Ferrovial.....	27
2.3.8	Voloport.....	28
2.3.9	Urban Air Port.....	29
2.3.10	Tecnologia 5G.....	30
2.4	Sistema di alimentazione	31
2.4.1	Batterie.....	31
2.4.2	Fuel Cell.....	32
2.5	Ricarica.....	34
2.5.1	Ricarica Batterie e Ricarica veloce.....	34
2.5.2	Ricarica Fuel Cell.....	35
2.6	Spazio aereo.....	36
2.6.1	Corridoi aerei	36
3	Analisi della collocazione dei vertiporti e della capacità operativa	40

3.1	Densità abitativa.....	42
3.2	Flusso di utilizzo del trasporto pubblico tradizionale.....	44
3.2.1	Tratte servite da GTT	46
3.3	Topologia del territorio	57
3.3.1	Ottimizzazione della rete e nodi chiave	57
3.3.2	Frane e allagamenti.....	59
3.4	Presenza di strutture utili all'UAM	62
3.4.1	Centro commerciale 'Lingotto'	63
3.4.2	Palazzo Sanpaolo.....	64
3.5	Trasporto unidirezionale.....	65
3.6	Collocazione delle infrastrutture	68
3.7	Potenzialità del vertiporto.....	74
3.7.1	Vertihub	76
3.7.2	Vertiport.....	76
3.7.3	Vertistation.....	76
3.8	Orari e regimi di funzionamento	77
4	Stima dei costi operativi e di produzione dei vertiporti	80
4.1	Costo dell'energia elettrica	80
4.2	Costo delle antenne 5G.....	83
4.3	Modelli di stima dei costi	85
4.4	Costi di produzione dei vertiporti	91
4.4.1	Costo di produzione ed installazione dei pads	92
4.4.2	Costo dei Charger	94
4.4.3	Costo degli hangar.....	94
4.4.4	Costo dell'impianto di sicurezza	95
4.4.5	Costo dell'impianto antincendio	96
4.4.6	Costo della cabina di controllo.....	96
4.4.7	Costo dell'Area Passeggeri	97
4.4.8	Costo del faro.....	97
4.4.9	Costo delle antenne 5G	98
4.4.10	Costo del Parcheggio Interrato	98
4.5	Costi operativi dei vertiporti	98
4.5.1	Modellazione dei DOC	100
4.5.2	Modellazione dei IOC	108
5	Costo delle infrastrutture.....	112
5.1	Costi di produzione	112
5.2	Costi Operativi.....	114

5.2.1 Costi Operativi Diretti	115
5.2.2 Costi Operativi Indiretti	117
5.3 Tasse vertiportuali	118
6 Analisi parametrica del costo relativo al sistema di trasporto	119
6.1 Costo del servizio.....	119
6.2 Variazione del numero di infrastrutture.....	120
6.2.1 Variazione del numero di Vertistation.....	120
6.2.2 Variazione del numero di Vertiport.....	121
6.2.3 Variazione del numero di Vertihub	122
6.3 Variazione del numero di ore operative dei vertiporti.....	123
6.4 Analisi di ottimo del modello di eVTOL da utilizzare per il servizio	125
7 Conclusioni.....	127
Bibliografia	129

FIGURE

Figura 1: Città maggiormente colpite dalla congestione del traffico stradale [1].....	1
Figura 2: Emissioni del trasporto pubblico/commerciale [2]	2
Figura 3: Matrice Benefici/Rischi dell'UAM [3].....	3
Figura 4: Confronto tra UAM e taxi terrestri in termini di costo ed emissioni per una tratta di 25 miglia [4].	4
Figura 5: Confronto tra taxi terrestre e UAM per la tratta JFK-NY city [4]	5
Figura 6: Confronto tra aerolinea, taxi terrestre e AAM per la tratta BST-NY[4]	6
Figura 7: Interesse verso i servizi UAM nelle città interessate [3]	7
Figura 8: Attitudine sulla totalità degli intervistati [3].....	8
Figura 9: Percezione di sicurezza degli intervistati come passeggeri o pedoni [3]	9
Figura 10: Bell-Agusta BA609 [7] ed F35-B [6].....	10
Figura 11: Classificazione degli eVTOL [8].....	11
Figura 12: Alcune delle società di sviluppo degli eVTOL [9]	13
Figura 13: Volocity [10]	14
Figura 14: Joby S4 [11].....	15
Figura 15: Midnight [12].....	16
Figura 16: Aurora Xplorer [13]	16
Figura 17: Liliuim Jet [14]	17
Figura 18: Configurazione di un Vertiporto [17].....	19
Figura 19: Parametri del volume privo di ostacoli [18]	20
Figura 20: Illustrazione del volume libero da ostacoli secondo normativa [18].....	21
Figura 21: Illustrazione di un Vertihub [15] [16]	22
Figura 22: Illustrazione di un Vertiport [15] [16].....	23
Figura 23: Illustrazione di una Vertistation [15] [16]	24
Figura 24: Vertiporto progettato da Skyports.[24]	26
Figura 25: Vertiporto progettato da Ferrovial.[25]	27
Figura 26: Vertiporto progettato da Voloport.[26]	28
Figura 27: Illustrazione della City Box XS (sx) e della City Box XXS (dx).[27]	29
Figura 28: Primo vertiporto al mondo, prodotto da Urban Air Port.[27]	30
Figura 29: Schema del sistema di alimentazione del Bell Nexus [19].....	31
Figura 30: Esempio di fuel cell alimentata ad idrogeno e ossigeno [20]	32
Figura 31: Confronto tra proprietà delle batterie (superiore) e delle FC (inferiore) [21] [22]	34
Figura 32: Esempio di corridoi UAM punto-punto [23]	37
Figura 33: Struttura dei corridoi nelle fasi iniziali [23]	38
Figura 34: Zona di sorpasso verticale [23].....	38
Figura 35: Zona di sorpasso laterale [23].....	39

Figura 36: Dati statistici relativi alla popolazione Torinese.[29]	43
Figura 37: Variazione della densità di popolazione media Torinese.[29].....	43
Figura 38: Distribuzione della densità di popolazione nel comune di Torino.[29]	44
Figura 39: Indici sulla mobilità ISTAT.[30]	46
Figura 40: Tratte Bus/Tram GTT. [31]	47
Figura 41:Tratta della linea 2.[32]	48
Figura 42:Tratta della linea 3.[32]	48
Figura 43:Tratta della linea 4.[32]	49
Figura 44: Tratta della linea 9.[32].....	49
Figura 45:Tratta della linea 10.[32]	50
Figura 46:Tratta della linea 15.[32]	50
Figura 47: Tratta della linea 16CD.[32].....	51
Figura 48: Tratta della linea 16CS.[32]	51
Figura 49: Tratta della linea 17.[32]	52
Figura 50: Tratta della linea 33.[32]	52
Figura 51: Tratta della linea 36.[32]	53
Figura 52: Tratta della linea 42.[32]	53
Figura 53: Tratta della linea 52.[32]	54
Figura 54: Tratta della linea 58.[32]	54
Figura 55: Tratta della linea 62.[32]	55
Figura 56: Tratta della linea 68.[32]	55
Figura 57: Tratta della linea 72.[32]	56
Figura 58: Tratta della linea sotterranea.[32]	56
Figura 59: Mappa topologica di Torino.[33].....	58
Figura 60:Mappatura delle zone a rischio frana.[34].....	59
Figura 61:Mappatura delle zone a rischio allagamento.[34]	60
Figura 62: Mappatura delle strade a rischio allagamento.[34]	61
Figura 63: Tetto del centro commerciale 'Lingotto'.[35]	64
Figura 64:Palazzo Sanpaolo.[36].....	65
Figura 65: Punteggio(€).....	69
Figura 66: Collocazione infrastrutture nella zona di Rivoli.	70
Figura 67: Collocazione delle infrastrutture Torino sud.	71
Figura 68: Collocazione delle infrastrutture Torino ovest.	72
Figura 69: Collocazione delle infrastrutture Torino Centro.	72
Figura 70: Collocazione delle infrastrutture Torino Nord.....	74
Figura 71:Produzione mondiale di energia elettrica per fonti.[37].....	81
Figura 72: Previsioni della produzione energetica Canadese.[38].....	83

Figura 73: Ripartizione dei modelli di stima durante il progetto. [40]	89
Figura 74: Ripartizione percentuale dei costi di produzione	113
Figura 75: Ripartizione percentuale dei Costi Operativi.....	115
Figura 76: Ripartizione percentuale dei Costi Operativi Diretti.....	116
Figura 77: Ripartizione percentuale dei Costi Operativi indiretti.....	117
Figura 78: Ricavi, Costi e profitto al variare del numero delle Vertistation	121
Figura 79: Ricavi, Costi e profitto al variare del numero dei Vertiport.	122
Figura 80: : Ricavi, Costi e profitto al variare del numero dei Vertihub.....	123
Figura 81: Ricavi, Costi e profitto al variare delle OOMGE dei Vertiport.	124
Figura 82: Ricavi, Costi e profitto al variare delle OOMGE dei Verthubt	125

Capitolo 1

1 Introduzione

Il concetto dell'Urban Air Mobility (UAM) rappresenta una innovazione radicale destinata a rivoluzionare gradualmente il panorama del trasporto urbano e della mobilità delle persone e delle merci nelle città del futuro. L'urgente necessità di introdurre un sistema di mobilità aerea nelle aree urbane nasce dalla sfida della congestione del traffico, dell'inquinamento e dell'efficienza dei trasporti nelle grandi metropoli. Questo nuovo approccio al trasporto si basa sull'utilizzo di aeromobili elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL), progettati per alleviare la congestione del trasporto sia urbano che extraurbano, che si prevede aumenterà significativamente a causa dell'incremento dell'urbanizzazione nelle città, prevedendo che, entro il 2050, il 75% della popolazione mondiale vivrà in grandi città.

Di pari passo all'aumento della popolazione cittadina andrà quindi l'aumento della congestione del traffico veicolare, aumentando i tempi di percorrenza e l'impatto ambientale.

Si stima che, mediamente, si spendano circa 8 giorni all'anno nel traffico cittadino e che i tempi di percorrenza medi stiano aumentando esponenzialmente.

Uno studio del 2023 dimostra come nelle città il tempo di percorrenza anche di brevi tratte sia molto dilatato. In particolare Londra, Dublino e Toronto hanno il traffico più congestionato, Milano è al quarto posto nella classifica mondiale.



Figura 1: Città maggiormente colpite dalla congestione del traffico stradale [1]

Tali ritardi si ripercuotono sull'economia cittadina in termini economici. Valutando esclusivamente la EU, i costi dovuti alla congestione stradale cittadina superano i 100 mld con un trend in netta crescita.

Oltre agli aspetti economici bisogna valutare anche l'impatto ambientale della congestione stradale. Focalizzando l'attenzione sull'EU, secondo uno studio del 2019, il trasporto su strada è causa del 71,7% delle emissioni mondiali di CO₂ per il trasporto di merci e persone. Tale percentuale sarebbe ridotta al solo 31% se si riuscisse ad evitare la congestione del traffico cittadino.

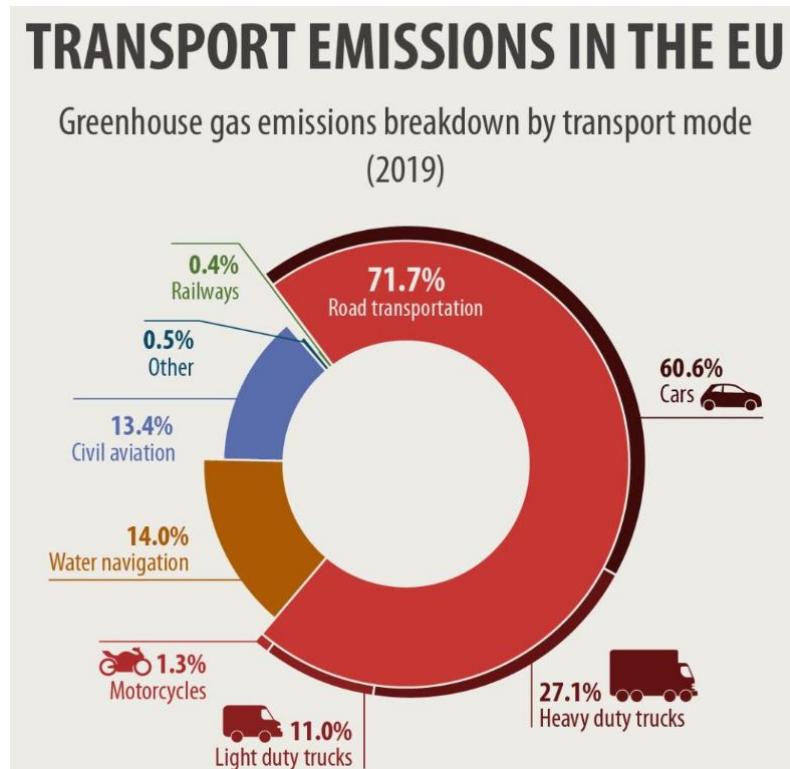


Figura 2: Emissioni del trasporto pubblico/commerciale [2]

1.1 UAM

Per far fronte ai problemi elencati in precedenza nasce l'Urban Air Mobility (UAM), un concetto innovativo che riguarda il trasporto aereo di passeggeri e merci all'interno di ambienti urbani attraverso l'uso di veicoli aerei come droni, aerotaxi e aeromobili a decollo e atterraggio verticali (eVTOL).

Questo concetto è nato dalla convergenza di diversi fattori. Innanzitutto, gli avanzamenti tecnologici hanno reso possibile la realizzazione di veicoli aerei più leggeri, efficienti ed economicamente sostenibili, grazie allo sviluppo di tecnologie come batterie ad alte prestazioni, motori elettrici e sistemi di navigazione avanzati.

Le persone sono sempre più alla ricerca di soluzioni di trasporto più rapide, convenienti ed ecologiche, e l'UAM offre la possibilità di viaggiare rapidamente da un punto all'altro della città, evitando i tradizionali ostacoli del traffico stradale.

Infine, numerose aziende e start-up, così come istituzioni pubbliche e governi, stanno investendo risorse significative nello sviluppo e nell'implementazione dell'UAM, sia per motivi economici che ambientali.

Complessivamente, l'UAM rappresenta una risposta innovativa e promettente alle sfide della mobilità urbana

del futuro, offrendo l'opportunità di trasformare radicalmente il modo in cui le persone si spostano all'interno delle città.

Da uno studio di EASA [3] sono stati identificate sei diverse applicazioni per l'UAM: trasporto (trasferimento di passeggeri per applicazioni commerciali), consegna (trasporto di merci per applicazioni commerciali e industriali), servizi di emergenza (risposta in caso di incidenti, incendi, disastri, ecc.), sorveglianza civile e altre operazioni (operazioni manuali che interagiscono fisicamente con l'ambiente), funzioni sovrane (sorveglianza e analisi di aree, oggetti o persone), e emissione (fornitura di banda multimediale emettendo segnali/video/audio).

Per ciascuna di queste categorie di casi d'uso, sono stati valutati i rischi e i benefici sociali al fine di identificare quelli con i rischi e i benefici più elevati, e un framework è stato creato per suddividere i benefici e i rischi in categorie. Ciò ci ha permesso di comprendere quali casi d'uso sono probabilmente destinati ad essere implementati nell'UE nei prossimi cinque-dieci anni:

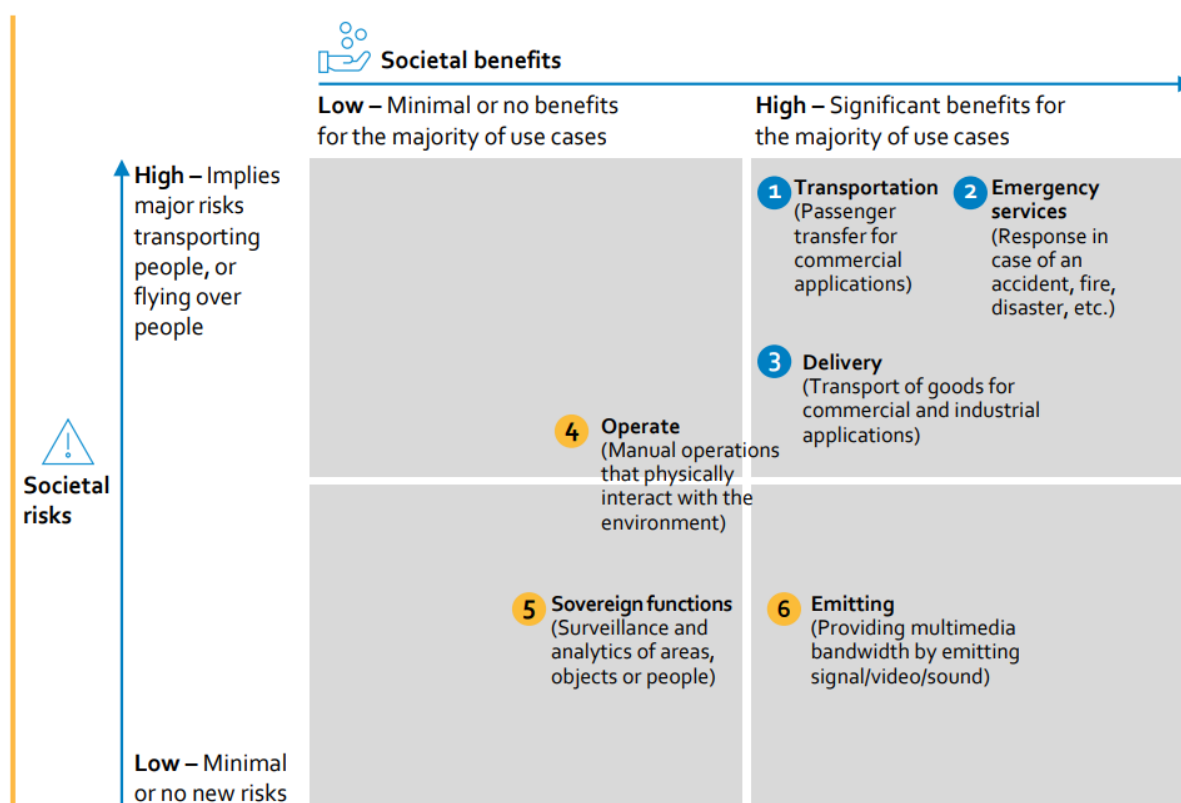


Figura 3: Matrice Benefici/Rischi dell'UAM [3]

I risultati indicano che tre casi d'uso hanno un elevato rapporto Benefici/Rischi e che quindi sono i migliori candidati all'accettazione sociale: (1) il trasporto commerciale di passeggeri tramite decollo e atterraggio verticale elettrico (eVTOL) con un pilota a bordo, (2) i casi d'uso dei servizi di emergenza (sia l'equipaggiamento medico tramite drone che il trasporto di persone tramite eVTOL con un pilota a bordo) e (3) il trasporto di consegne tramite droni per applicazioni commerciali e industriali.

1.2 Mobilità urbana classica VS UAM

Secondo uno studio del 2022 [4], i promotori di UAM possono competere con il trasporto urbano esistente, ma devono migliorare l'economia per catturare il mercato, poiché la domanda sarà probabilmente direttamente proporzionale al prezzo del servizio. Un prezzo più basso per posto nel tempo probabilmente creerebbe una maggiore domanda, risultando in un alto fattore di carico poiché la volontà dei consumatori di pagare per un trasporto più veloce è prevista come uno dei principali fattori che guidano l'adozione dell'UAM. Con l'aumento della domanda, volumi di produzione più elevati potrebbero portare a economie di scala.

L'economia dell'UAM dipende in larga misura dal tipo di flotta, dalla capacità di seduta, dal fattore di carico e dalla lunghezza delle rotte di volo. I promotori di UAM dovrebbero anche stabilire un modello di business per eVTOL pilotati poiché il lancio commerciale su larga scala delle operazioni eVTOL autonome sarà almeno 10 anni dopo il lancio commerciale delle operazioni eVTOL pilotate.

Oltre all'economia, la sicurezza, la durata del viaggio e l'impronta di carbonio giocano anche ruoli significativi nel guidare il mercato dell'UAM. I produttori di eVTOL affermano zero emissioni operative, e questo nuovo sistema di mobilità potrebbe raggiungere lo zero netto tagliando il carbonio dai modi di trasporto correlati durante le operazioni di volo.

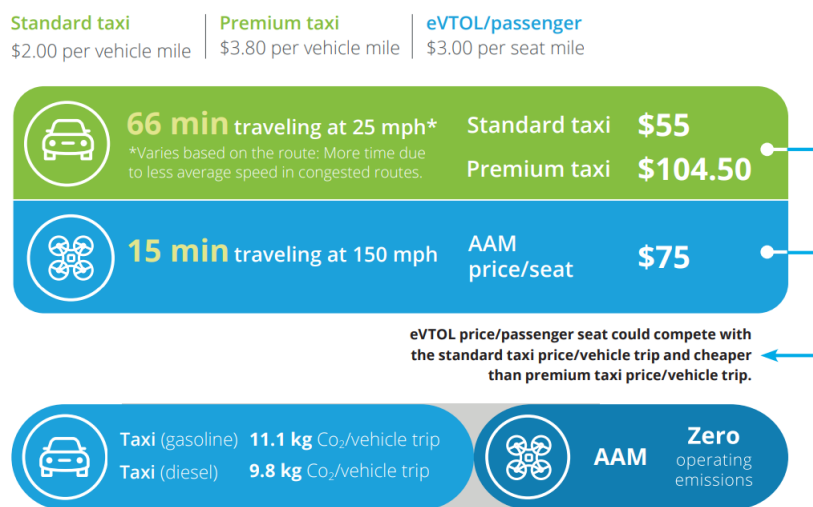


Figura 4: Confronto tra UAM e taxi terrestri in termini di costo ed emissioni per una tratta di 25 miglia [4].

I servizi standard di taxi e di ride-hailing (prenotazione di corse attraverso app) presentano diverse strutture tariffarie: le compagnie di ride-hailing sono meno costose per i passeggeri rispetto ai taxi standard tradizionali. Il prezzo standard del taxi negli Stati Uniti varia ampiamente tra 1 e 3 dollari per una media di circa 2 dollari per miglio per veicolo, mentre il prezzo del taxi premium varia da 2,50 a 5 dollari per una media di circa 3,80 dollari per miglio per veicolo. La modalità di trasporto UAM potrebbe presentare un'alternativa al mercato del taxi premium per alcuni viaggi a causa della volontà dei passeggeri di pagare per ridurre il tempo di percorrenza. Il prezzo per miglio del sedile UAM è stimato essere intorno a 3 dollari per un aeromobile eVTOL a 4 posti.

I costi del trasporto terrestre equivalgono a più miglia poiché la distanza aerea tra origine e destinazione è

più breve rispetto alla strada. In media, la distanza terrestre sarà probabilmente circa il 10% in più rispetto all'aria per un tipico viaggio in una città statunitense.

Si prevede che l'industria dell'UAM maturerà rapidamente verso un'alta frequenza di rotte per fornire viaggi aerei rapidi ed economici per brevi distanze. A differenza dell'aviazione commerciale, i posti limitati nell'eVTOL significano che per gli operatori sarà probabilmente cruciale raggiungere un fattore di carico passeggeri del 100% per rimanere competitivi.

Inoltre, il costo medio per passeggero potrebbe diminuire all'aumentare del fattore di carico passeggeri, spingendo gli operatori di eVTOL a offrire servizi UAM a prezzi più competitivi.

Gli aeromobili eVTOL offrono opzioni di viaggio più ecologiche con zero emissioni operative e potrebbero contribuire a ridurre i livelli di carbonio dai modi di trasporto correlati per il rispettivo viaggio. Il trasporto UAM è in grado di ottenere risultati significativamente migliori in termini di tempo e impronta di carbonio e potrebbe alla fine competere anche sul prezzo accedendo al mercato di massa.

1.3 Tratte extraurbane attraverso Advanced Air Mobility

Prendendo in considerazione uno studio di Deloitte [4] l'obiettivo ultimo dell'UAM è diventare un sistema di trasporto di massa, operante tra aree urbane, suburbane e rurali. Tra queste due applicazioni, il trasporto intra-città (trasporto di persone e merci all'interno delle città) offre più valore ed è proiettato a alimentare la crescita a lungo termine. Questo perché si tratta di viaggi più brevi e affrontano il problema urgente della congestione. I servizi di ride-sharing UAM potrebbero guidare il mercato per lo spostamento intra-città poiché il tempo di ripartenza potrebbe essere di soli sei o sette minuti per un viaggio di 25 miglia, e questo tempo sarebbe sufficiente per ricaricare l'aeromobile elettrico per il prossimo viaggio. Si prevede inoltre la potenzialità di ridurre il prezzo per posto passeggero di circa l'8% in cinque anni dall'inizio, con un aumento della domanda, una flotta più grande, un maggiore utilizzo degli aeromobili e del PLF. Ad esempio, un passeggero potrebbe essere in grado di viaggiare tre volte più velocemente allo stesso prezzo in un breve viaggio di 20 miglia e contribuire a ridurre circa 8-9 chilogrammi di CO₂, ad esempio, dall'aeroporto JFK al centro di New York (figura 4).

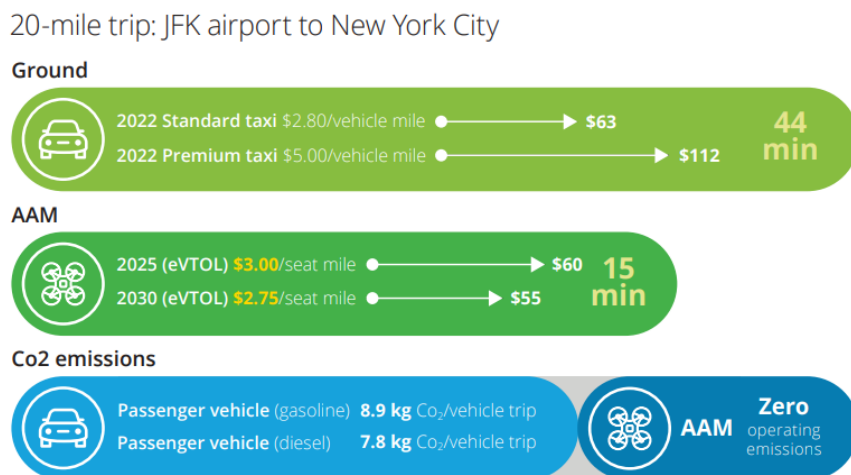


Figura 5: Confronto tra taxi terrestre e UAM per la tratta JFK-NY city [4]

Si evidenzia come per un costo molto simile, si abbiamo grossi vantaggi in termini di tempo ed emissioni. A causa dei minori costi operativi, il costo per miglio per posto dovrebbe essere inferiore per rotte più lunghe (inter-città). Il prezzo per miglio per posto è stimato essere di \$2,75 e potrebbe ulteriormente diminuire a \$2,50 entro il 2030 se la rotta matura con una maggiore domanda, una flotta più grande, un maggiore utilizzo degli aeromobili. Di solito, i viaggiatori d'affari guidano i mercati del trasporto inter-città per viaggi più veloci. Ad esempio, per un viaggio di 190 miglia tra Boston e New York City, il passeggero potrebbe essere in grado di viaggiare fino a tre volte più velocemente e tagliare circa 80 chilogrammi di CO2. Il tempo di ripartenza dell'aeromobile potrebbe essere più lungo poiché la domanda potrebbe non essere alta per volare di nuovo indietro, e potrebbe richiedere circa 60 minuti per ricaricare il veicolo. Un taxi standard per questa rotta costa \$1,50 per miglio veicolo, e un taxi premium costa \$3,70 per miglio veicolo per il passeggero per coprire 215 miglia in 258 minuti. Un biglietto aereo ha un prezzo di circa \$110. Anche se è competitivo con altre opzioni terrestri, non è fattibile data la lentezza delle procedure all'aeroporto. Il tempo di viaggio da/a l'aeroporto, le procedure di partenza/arrivo in aeroporto e il tempo di volo rendono il tempo totale di viaggio quasi uguale a quello di un taxi terrestre. Anche se il tempo di volo è praticamente identico, le funzioni associate all'aeroporto rendono il tempo di viaggio più lungo rispetto all'AAM. L'industria AAM dovrebbe mirare a processare i passeggeri in meno di cinque minuti poiché più tempo al vertiporto potrebbe ostacolare il potenziale dell'AAM come modalità alternativa di trasporto, specialmente per viaggi brevi/medi. La variazione temporale dovrebbe essere significativamente inferiore tra ciascuna modalità di connettività per offrire viaggi più veloci. Tuttavia, ci vorrebbero alcuni anni per fornire un'esperienza di viaggio senza soluzione di continuità per un passeggero.

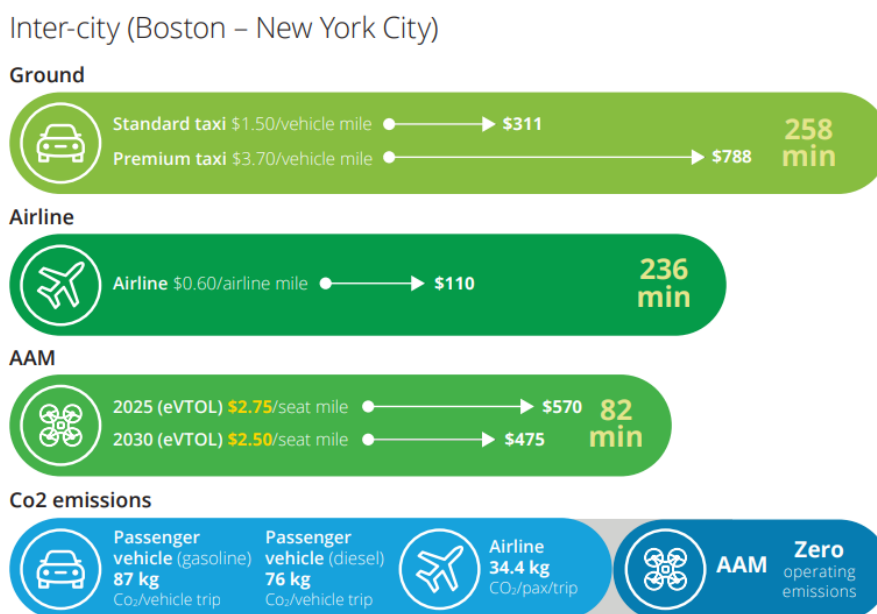


Figura 6: Confronto tra aerolinea, taxi terrestre e AAM per la tratta BST-NY[4]

Quindi anche attraverso lunghe tratte, la AAM risulta essere una valida alternativa in termini di tempo, emissione e costi.

1.4 Fattori di accettazione sociale

Al fine di valutare l'impatto sociale e l'opinione pubblica sull'UAM, tra gennaio e aprile 2021, EASA ha condotto un sondaggio su 3690 persone [3], appartenenti a sei diverse città, di ogni categoria sociale ed età. L'obiettivo generale del sondaggio era quello di generare nuove intuizioni sull'accettazione sociale dell'UAM da parte dei cittadini europei e quindi supportare la futura valutazione dell'impatto e ulteriori lavori normativi da parte dell'EASA.

I risultati hanno dimostrato risposte omogenee: un campo di gioco equo in tutta Europa, senza deviazioni significative tra i rispondenti delle sei città, e nessuna deviazione significativa in base all'età, alla composizione del nucleo familiare o all'affinità alle nuove tecnologie, sia per il nuovo utilizzo di droni per la consegna delle merci che per gli "air taxi".

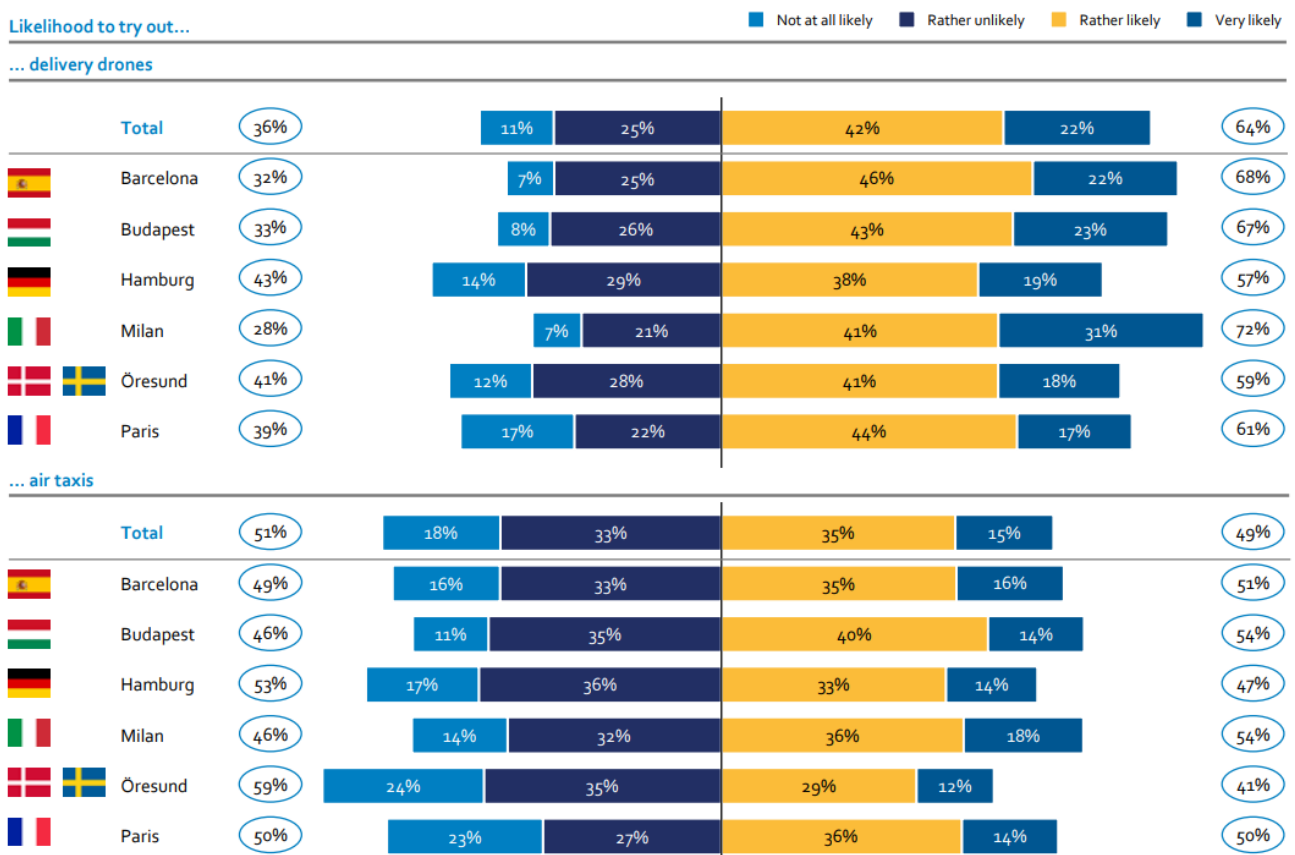


Figura 7: Interesse verso i servizi UAM nelle città interessate [3]

In generale, i rispondenti provenienti dal Sud dell'Europa (Milano, Barcellona) hanno dimostrato un'attitudine più positiva su tutti i tipi di domande rispetto a quelli provenienti dalla parte settentrionale dell'Europa (Amburgo, regione dell'Oresund).

Sulla predisposizione all'uso dei servizi dei droni, i rispondenti di Milano (+8 percento) e Barcellona (+4 percento) hanno mostrato un'attitudine più positiva rispetto alla media, mentre Amburgo (-7 percento) e la regione dell'Oresund (-5 percento) si sono dimostrati più critici.

Per quanto riguarda la predisposizione all'uso dei servizi di taxi aereo, i rispondenti di Milano (+5 percento)

e Barcellona (+2 percento) erano tra coloro che dichiaravano un'attitudine più positiva. I cittadini di Budapest erano più propensi a provare un servizio di taxi aereo (+5 percento rispetto alla media). Al contrario, i cittadini dell'Oresund (-8 percento) e di Amburgo (-2 percento) hanno mostrato il minor interesse nei servizi di taxi aereo.

All'inizio del sondaggio, ai partecipanti è stato chiesto di indicare quale sarebbe stata la loro percezione generale se le soluzioni di UAM fossero state introdotte nelle loro città. Complessivamente, la percezione dell'UAM è stata positiva: la maggior parte (83 percento) dei partecipanti si è sentita (molto o piuttosto) positiva riguardo all'introduzione dell'UAM complessivamente. Tra le città esaminate, solo il 3 percento dei partecipanti ha avuto una percezione negativa della Mobilità Aerea Urbana e probabilmente sarà difficile convincerli all'introduzione dell'UAM:

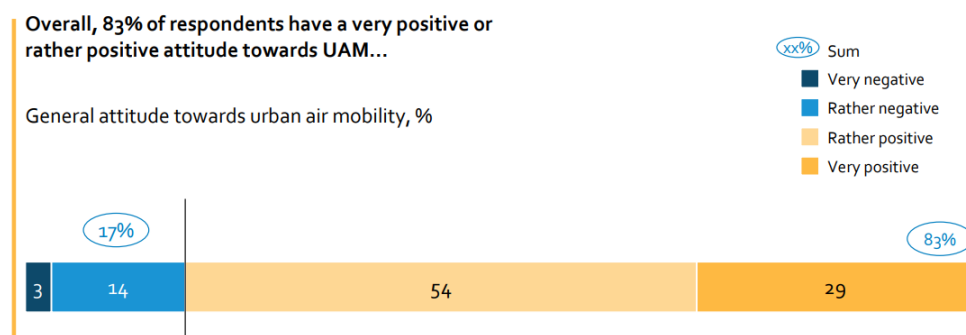


Figura 8: Attitudine sulla totalità degli intervistati [3]

Le interviste hanno indicato che l'UAM è vista come un'entusiasmante sviluppo innovativo e il fatto che l'Europa possa svolgere un ruolo di primo piano in questo settore sta suscitando considerazioni positive e buona volontà. Tuttavia, il sondaggio ha rivelato che la maggior parte degli interessati non è ancora stata esposta alle questioni relative all'UAM fino a questo momento, ad eccezione di quelle città con progetti pilota (ad esempio Amburgo o Parigi).

I taxi aerei rappresentano una potenziale minaccia alla sicurezza non solo per i passeggeri che li utilizzano. I pedoni saranno influenzati dai droni e dai taxi aerei, anche se non scelgono necessariamente di utilizzarli personalmente, e quindi l'ipotesi era che la percezione della sicurezza dei pedoni avrebbe avuto un impatto significativo sull'accettazione sociale delle operazioni di droni e taxi aerei.

Nel complesso, i risultati del questionario sono stati positivi. La maggior parte dei partecipanti ha indicato che, da pedoni, si sentirebbe al sicuro con droni e taxi aerei pilotati che volano sopra le loro teste.

Tuttavia, i risultati hanno anche mostrato che i pedoni si sentivano sempre più sicuri considerando gli aeromobili pilotati rispetto a quelli non pilotati, indipendentemente dalle dimensioni o dalle caratteristiche dell'aeromobile. Pertanto, la percentuale di persone che si sentivano al sicuro come pedoni con taxi aerei pilotati (70 percento) che volavano sopra le loro teste era molto maggiore rispetto a quelli con aeromobili non pilotati (44 percento) - e ancora superiore a coloro che si sentivano a proprio agio con droni per la consegna non pilotati (56 percento). Come previsto, il numero di persone che sarebbero probabilmente

disposte a provare un taxi aereo pilotato (75 percento) era maggiore rispetto a coloro che avrebbero provato uno non pilotato (43 percento). Non sorprende neanche che quei partecipanti identificati come potenziali utenti di taxi aerei avessero un livello più alto di comfort con i taxi aerei pilotati (+13 percento) rispetto alla media.

Le interviste qualitative hanno anche mostrato che la fiducia nei servizi pilotati era maggiore e che i partecipanti si sentivano più a loro agio con le prime operazioni pilotate dei taxi aerei.

L' elevato livello di comfort dei cittadini dell'UE con i taxi aerei pilotati, sia come pedoni per strada che come passeggeri, può essere spiegato dal fatto che gli aeromobili e le loro operazioni possono sembrare a non specialisti molto simili ai veicoli e alle operazioni dell'aviazione tradizionale, e dal fatto che l'aviazione tradizionale è percepita come molto sicura dai cittadini, almeno in Europa.

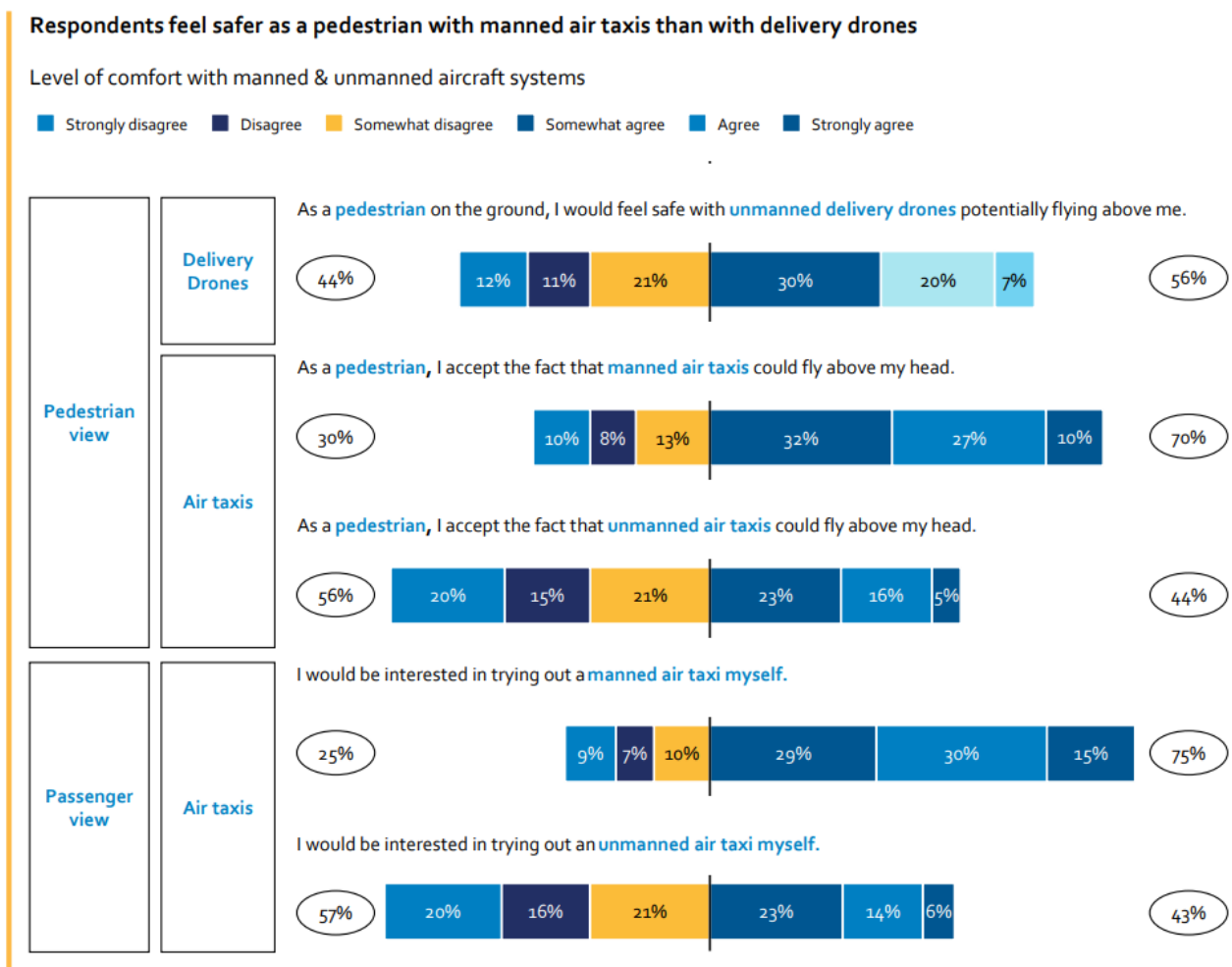


Figura 9: Percezione di sicurezza degli intervistati come passeggeri o pedoni [3]

Capitolo 2

2 eVTOL

Come illustrato in precedenza, l'UAM si basa sull'adozione di nuovi velivoli a decollo ed atterraggio verticale. La prima idea di tale tecnologia fu intuata da Nicola Tesla nel 1928 con il "Flivver" mai realizzato. Lo sviluppo di tale tecnologia risultò molto complesso per l'intrinseca difficoltà nell'instaurazione delle leggi di controllo dei velivoli.

Lo sviluppo tecnologico permise però di raggiungere grandi risultati come i convertiplani Bell Boeing V-22 Osprey e Bell-Agusta BA609 e i velivoli AV-8 Harrier II e F-35B, i quali rappresentano gli unici VTOL utilizzati attualmente a propulsione tradizionale.



Figura 10: Bell-Agusta BA609 [7] ed F35-B [6]

Questi velivoli pagano il prezzo della tecnologia VTOL in termini di costo, complessità, alto consumo di carburante e notevole inquinamento acustico.

Per far fronte a questi problemi, l'elettrificazione dei sistemi e della propulsione ha permesso di introdurre la tecnologia degli eVTOL, velivoli a decollo ed atterraggio verticale a propulsione elettrica.

È essenziale comprendere le distinzioni tra i diversi tipi di aeromobili eVTOL e come le loro caratteristiche uniche influenzino il processo di dimensionamento dell'aeromobile. L'EASA, ha delineato due caratteristiche distintive comuni agli aeromobili eVTOL. Queste sono la capacità di decollo e atterraggio verticale (VTOL) e un sistema di propulsione elettrica distribuito. Quest'ultimo consente applicazioni meno complesse dei sistemi di propulsione per la modalità di "sollevamento verticale" e "spinta in avanti" rispetto ai motori a getto e ai loro complessi schemi di orientamento della spinta impiegati dagli aeromobili VTOL convenzionali.

Gli eVTOL hanno quindi delle caratteristiche che li rendono applicabili all'UAM come il basso impatto acustico, la versatilità e la capacità di atterrare e decollare in spazi relativamente piccoli, ma al contempo hanno efficienza aerodinamica bassa a confronto con gli aeromobili convenzionali.

2.1 Classificazione

L'UAM inoltre richiede diversi tipi di configurazione degli eVTOL in base alle distanze da percorrere e ai tipi di vertipoti disponibili.

Gli aeromobili eVTOL sono suddivisi principalmente in due categorie principali: powered lift e wingless. Gli aeromobili a sollevamento motorizzato sono aeromobili alati capaci di decollo e atterraggio verticale e di generare portanza nel volo in avanti. Gli aeromobili senza ali, d'altra parte, sono aeromobili multirottore con due o più unità di sollevamento/spinta e con limitate o nulle capacità di volo in avanti portante. Gli eVTOL powered lift sono ulteriormente suddivisi in due categorie principali, a seconda che il concetto utilizzi un unico sistema elettrico/propulsivo o sistemi elettrici/propulsivi indipendenti per il sollevamento e il volo in avanti.

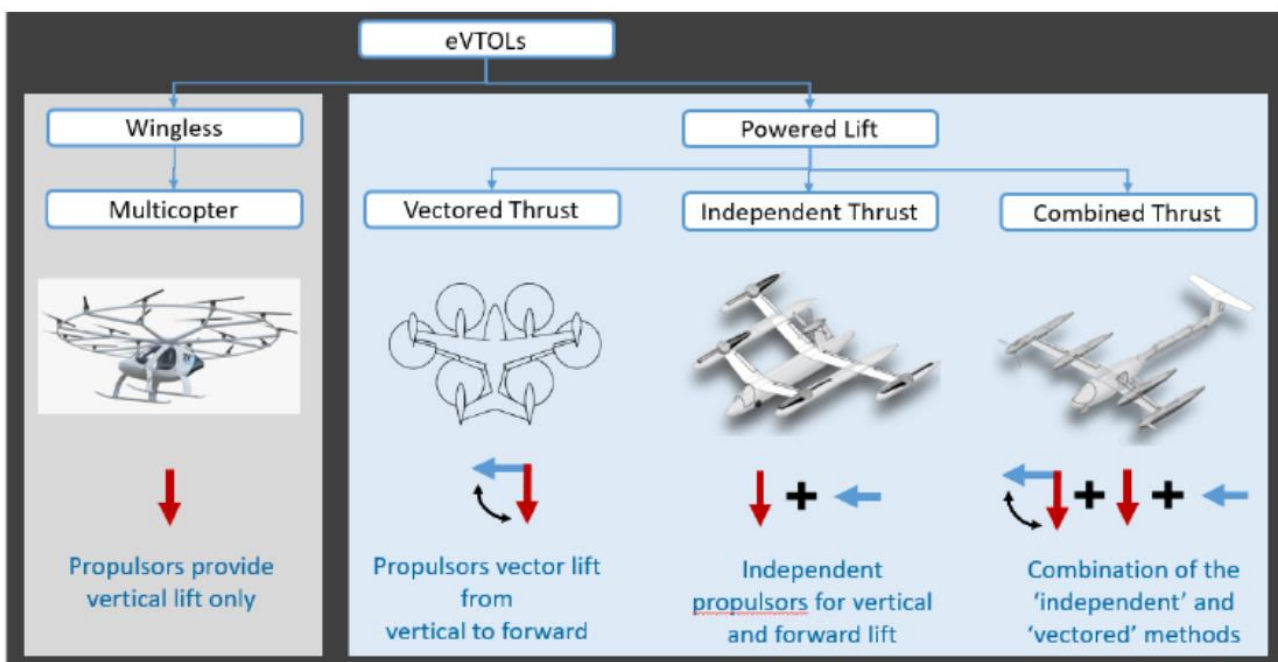


Figura 11: Classificazione degli eVTOL [8]

1. Powered Lift:

- **Vectored Thrust:** Questi sono eVTOL a sollevamento motorizzato che utilizzano tutte le loro unità di sollevamento/spinta sia per il sollevamento verticale che per la crociera. Ciò viene ottenuto ruotando (orientando) i punti di spinta risultanti contro la direzione del movimento. L'orientamento dei punti di spinta può essere ottenuto ruotando l'intero pacco ala-sistema propulsivo (Tilt Wing), ruotando l'unità di sollevamento/spinta stessa (Tilt Fan per le ventole canalizzate e Tilt Prop per le eliche) o ruotando l'intero telaio dell'aeromobile con perno sulla fusoliera (Tilt Body o Tilt Frame).
- **Independent Thrust:** Gli eVTOL a spinta indipendente sono un tipo di eVTOL a sollevamento motorizzato che utilizza diverse unità di sollevamento/spinta per il sollevamento verticale e i regimi di volo in avanti. Nessuna delle unità di

sollevamento/spinta viene orientata poiché i loro punti di spinta rimangono fissi rispetto alla direzione di volo. Questa classe di eVTOL è anche indicata come 'Lift + Cruise'.

- **Combined Thrust:** Gli eVTOL a Combined Thrust sono una fusione degli eVTOL a Vectored Thrust e Independent Thrust. Utilizzano alcune ma non tutte le loro unità di sollevamento/spinta sia per il sollevamento verticale che per la crociera. Questa categoria di eVTOL è un compromesso tra la praticità degli aeromobili Lift + Cruise e l'efficienza desiderata degli aeromobili Vectored Thrust. Gli eVTOL Combined Thrust orientano solo una parte delle loro unità di sollevamento/spinta per il sollevamento verticale e il volo in avanti mentre le altre unità di sollevamento/spinta rimangono in un ruolo fisso di supporto al sollevamento verticale.

2. Wingless:

Gli eVTOL wingless si affidano esclusivamente alla spinta delle loro unità di sollevamento/spinta sia per il sollevamento verticale che per il volo in avanti. I multicotteri sono la principale sottocategoria dell'architettura senza ali con una capacità di trasporto di due a cinque occupanti. Questi aeromobili sono progettati principalmente per l'uso nei servizi di taxi aereo e nei servizi di emergenza. I Veicoli Aerei Personali (PAV), anche se tecnicamente possiedono un'architettura multicottero, si distinguono dalla precedente sottocategoria in termini di capacità di trasporto. Come suggerisce il nome, i PAV sono eVTOL multicottero monoposto dove l'operatore si siede o sta in piedi per guidare l'aeromobile. Questi aeromobili sono generalmente considerati veicoli per appassionati con utilità significativamente inferiore rispetto ai multicotteri. A causa del basso costo dei motori elettrici disponibili in commercio necessari per alimentare questa classe di peso, i PAV sono generalmente i meno costosi da produrre. Per questo motivo, i progetti eVTOL più grandi e complessi di solito iniziano come PAV fino a quando l'architettura di propulsione non viene dimostrata.

I wingless risultano avere efficienze aerodinamiche nettamente inferiori ai powered lift.

La tipologia di eVTOL classificata come wingless, porta diversi benefici tra cui la ridondanza intrinseca dovuta ai diversi rotori presenti nella configurazione, la semplicità di controllo rispetto alle altre configurazioni e la relativamente bassa complessità del sistema. Al contempo i Wingless sono poco efficienti non avendo nessuna possibilità di planare e generare portanza da superfici alari e hanno velocità di volo limitate.

Per quanto concerne i Powered Lift, i Vectored Thrust hanno un'ottima efficienza energetica del sistema propulsivo e grazie alle superfici portanti sono in grado di aumentare l'efficienza dell'intero velivolo e di planare in situazioni di emergenza, ma hanno un controllo del volo e una relativa progettazione complessi. Gli Independent Thrust hanno il vantaggio di poter planare e sono caratterizzati da discreta efficienza energetica data la presenza di più propulsori indipendenti che rendono il controllo del volo più complicato rispetto alla categoria precedente. Il numero elevato di propulsori indipendenti porta ad un uso inefficace della propulsione.

2.2 Modelli di eVTOL

Negli ultimi anni, si è assistito a un crescente interesse da parte di numerose aziende in tutto il mondo verso gli investimenti e lo sviluppo di nuovi velivoli elettrici destinati all'Urban Air Mobility (UAM). Questa tendenza ha portato a una proliferazione di iniziative nel settore, con molte aziende che si dedicano alla progettazione e allo sviluppo di questi innovativi mezzi di trasporto aereo. Tuttavia, va notato che le aziende coinvolte nel processo di creazione di questi velivoli non si limitano solo alla fase di progettazione e sviluppo, ma spesso collaborano con altre entità per la realizzazione dei vari componenti del velivolo. Questo significa che, oltre alle aziende principali, un vasto numero di altre società è coinvolto nel processo, contribuendo in modo diretto o indiretto alla realizzazione degli eVTOL. In questo contesto, si assiste a una complessa rete di collaborazioni e partenariati che coinvolgono diverse competenze e risorse per portare avanti l'innovazione nel settore dell'UAM.

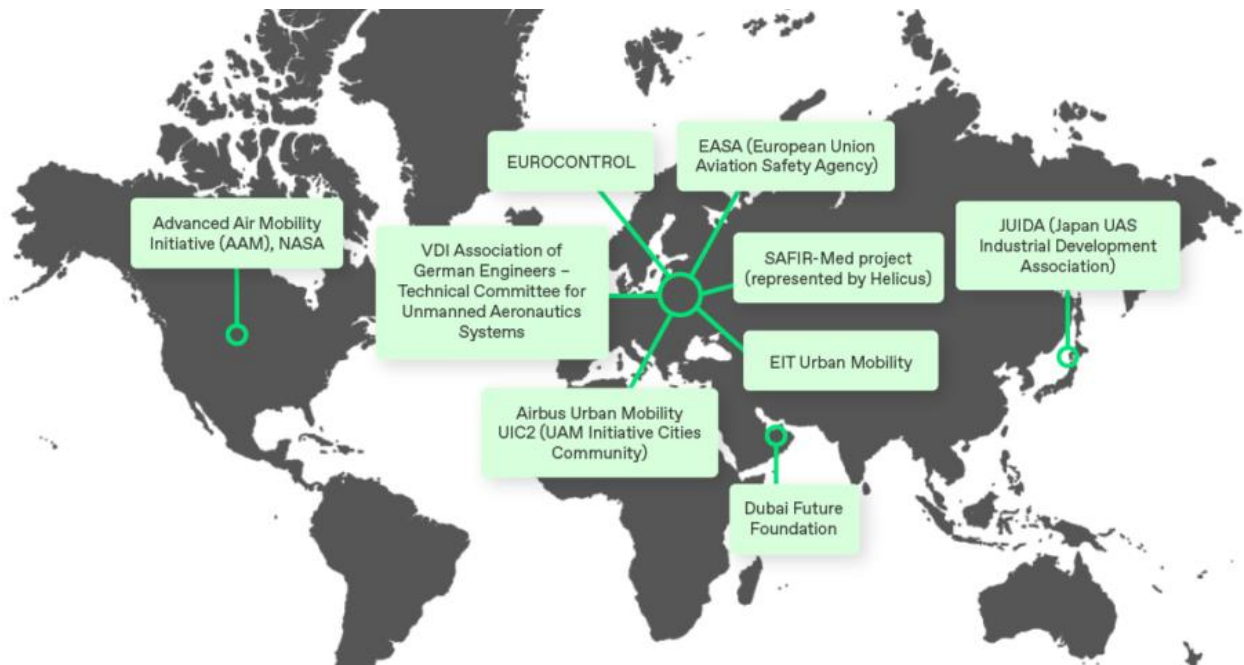


Figura 12: Alcune delle società di sviluppo degli eVTOL [9]

2.2.1 Volocity

Il VoloCity, eVTOL progettato da Volocopter, è un velivolo elettrico concepito per il trasporto urbano, rientrando nella categoria Wingless. Dotato di 18 rotori, il VoloCity è progettato per decollare e atterrare verticalmente e volare nel basso spazio aereo in modo silenzioso ed eco-sostenibile. Il velivolo è stato sviluppato conformemente agli elevati standard di sicurezza e regolamentari stabiliti dall'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA), e ha già ottenuto l'autorizzazione di tipo di progettazione (DOA). Attraverso oltre 2.000 voli di prova, svolti in diverse iterazioni di prototipi, il VoloCity è stato sottoposto a rigorosi test per garantirne l'affidabilità e la sicurezza. Inizialmente, il velivolo sarà pilotato con un pilota e un passeggero a bordo, ma è stato progettato per aprire la strada verso un servizio completamente autonomo in futuro.

I VoloCity sono progettati con sistemi ridondanti multipli per garantire un elevato grado di sicurezza operativa. Ogni componente critico, compresi rotori, motori elettrici, batterie, avionica e display, è dotato di almeno due unità di riserva. Questa configurazione supera gli standard tecnici richiesti e assicura una robustezza strutturale tale da garantire una sicurezza affidabile durante l'operatività.

Inoltre sono caratterizzati da un livello di rumore estremamente ridotto, grazie alla progettazione dei 18 rotori che operano in un range di frequenza limitato, riducendo significativamente il rumore generato durante il volo. Questo li rende quattro volte più silenziosi rispetto ai tradizionali elicotteri di dimensioni ridotte, contribuendo a minimizzare l'impatto acustico nelle aree urbane durante le operazioni di volo.

Il VoloCity si distingue per la sua affidabilità operativa, semplicità di manutenzione e ridotti costi operativi. La sua architettura meccanica ottimizzata minimizza la necessità di manutenzione e interventi di riparazione, contribuendo a ridurre i costi operativi nel lungo periodo.



Figura 13: Volocity [10]

Il Volocity è caratterizzato da un MTOW (max take-off weight) di 900 kg, possibilità di imbarcare 2 passeggeri (compreso il pilota), una velocità massima di crociera di 110 km/h e un range di 35 km, caratteristiche che lo rendono adatto al trasporto urbano.

2.2.2 Joby S4

Il Joby S4 è un eVTOL sviluppato da Joby rientrante nella categoria Powered Lift-Vectored Thrust che si distingue per le sue caratteristiche tecniche avanzate. Con una capacità di trasporto di quattro passeggeri oltre al pilota e un range di 240 km, questo è adatto al volo urbano e interurbano. È alimentato da un sistema di propulsione elettrica che garantisce zero emissioni.

Tra le sue specifiche tecniche, il Joby S4 può raggiungere una velocità massima di oltre 320 km/h, rendendolo uno dei più veloci tra gli eVTOL disponibili. Con un MTOW di circa 1900 kg, ha una capacità di carico sufficiente per il trasporto di passeggeri e bagagli.

Il Joby S4 è in grado di decollare e atterrare verticalmente, consentendo il suo utilizzo in spazi urbani ristretti. Equipaggiato con tecnologie avanzate di controllo di volo, offre stabilità e manovrabilità precise durante tutte le fasi del volo, garantendo un'esperienza di volo sicura e confortevole.

Inoltre, il S4 è dotato di un sistema di batterie ad alta capacità che gli consente di coprire lunghe distanze con una sola carica, rendendolo ideale per viaggi interurbani. Con sistemi di navigazione avanzati e sensori di rilevamento degli ostacoli, è progettato per garantire un elevato livello di sicurezza operativa in diverse condizioni di volo.

Complessivamente, il Joby S4 rappresenta una soluzione all'avanguardia per la mobilità urbana, combinando prestazioni elevate, sostenibilità ambientale e sicurezza avanzata per soddisfare le esigenze del trasporto del futuro.



Figura 14: Joby S4 [11]

2.2.3 Midnight

L'eVTOL "Midnight" sviluppato da Archer Aviation è un velivolo progettato per rivoluzionare il settore della mobilità aerea urbana. Caratterizzato da prestazioni avanzate e tecnologie innovative, il Midnight offre una combinazione di elevata efficienza, sicurezza e sostenibilità ambientale.

Il Midnight ricade nella categoria dei Powered Lift-Combined Thrust, in quanto è dotato di 12 rotori, di cui 6 orientabili.

Il Midnight ha un MTOW (Mass Takeoff Weight) di circa 5.000 libbre (circa 2.268 kg), il che lo rende idoneo a trasportare più passeggeri e carico utile. Questo MTOW consente di gestire diverse configurazioni di carico per soddisfare le esigenze di trasporto urbano.

Per quanto riguarda il range, il Midnight è in grado di coprire distanze significative con una sola carica. Con un'autonomia stimata di oltre 60 miglia nautiche (circa 111 chilometri), può coprire facilmente le distanze tipiche dei trasporti urbani, consentendo spostamenti rapidi ed efficienti tra le città e i centri urbani.

La velocità massima del Midnight è di circa 150 miglia all'ora (circa 241 chilometri all'ora), consentendo un rapido spostamento attraverso le aree urbane e suburbane. Questa velocità elevata permette di ridurre i tempi di viaggio e di aumentare l'efficienza complessiva del trasporto aereo urbano.

In termini di capacità passeggeri, il Midnight può ospitare fino a quattro passeggeri, oltre al pilota. Questa capacità lo rende ideale per il trasporto di piccoli gruppi di persone o famiglie.



Figura 15: Midnight [12]

2.2.4 Aurora Xplorer

L'Aurora eVTOL Xplorer, un innovativo progetto sviluppato da Boeing NeXt, ricade nella categoria dei Powered lift-Independent Thrust. Caratterizzato da un design all'avanguardia e tecnologie di punta, questo velivolo elettrico a decollo e atterraggio verticale offre prestazioni elevate e un livello superiore di sicurezza. Con un range operativo di circa 80 miglia, l'Aurora eVTOL Xplorer consente di coprire distanze significative con un singolo carico di batteria, offrendo un'elevata autonomia e flessibilità nelle operazioni di volo. La sua velocità massima di circa 150 mph garantisce viaggi rapidi ed efficienti tra le destinazioni, contribuendo a ridurre i tempi di trasferimento.



Figura 16: Aurora Xplorer [13]

Questo aeromobile è progettato per ospitare fino a quattro passeggeri, rendendolo ideale per una vasta gamma di applicazioni, tra cui il trasporto urbano, i viaggi regionali e i trasferimenti tra aeroporti e centri urbani.

2.2.5 Lilium Jet

Il Lilium Jet rappresenta un'innovativa soluzione di mobilità aerea, caratterizzata da un design aerodinamico e tecnologie all'avanguardia. Questo eVTOL rientra nella categoria dei Powered Lift-Vectored Thrust e offre prestazioni elevate e un'elevata efficienza energetica, rendendolo ideale per una vasta gamma di applicazioni di trasporto aereo.

Con un range operativo di oltre 300 km, consente di coprire distanze significative con un'unica carica di batteria, offrendo un'elevata autonomia e flessibilità nelle operazioni di volo. La sua velocità massima di oltre 300 km/h garantisce viaggi rapidi ed efficienti tra le destinazioni, contribuendo a ridurre i tempi di trasferimento.

Progettato per ospitare fino a cinque passeggeri, il Lilium Jet offre un'elevato livello di comfort e praticità per i viaggi aerei urbani e regionali. La sua capacità di trasporto di passeggeri lo rende una soluzione versatile per le esigenze di mobilità moderne, consentendo viaggi rapidi e comodi tra le città e le aree suburbane.

Inoltre, il Lilium Jet è stato progettato per essere leggero ma resistente, garantendo prestazioni ottimali e sicurezza durante tutte le fasi di volo.

A pieno carico esso permette un MTOW pari a 600 kg.

Grazie alla sua configurazione esso è molto efficiente e permette il volo planato in sicurezza dovuto alle 2 superfici alari.



Figura 17: Lilium Jet [14]

2.3 Infrastrutture

Per garantire il funzionamento efficiente del sistema di mobilità urbana aerea, è necessario sviluppare infrastrutture terrestri dedicate, chiamate vertiporti. Questi devono essere posizionati sia all'interno che all'esterno delle città, in base alle previsioni di traffico aereo, per integrare al meglio i movimenti aerei e terrestri.

I vertiporti possono essere classificati in tre categorie principali:

1. Vertihubs: Queste sono infrastrutture di grandi dimensioni, adatte per luoghi ad alto flusso di persone, come gli aeroporti, dove è disponibile spazio sufficiente per eseguire manutenzioni e revisioni.
2. Vertiports o Vertibases: Queste sono strutture di medie dimensioni progettate per adattarsi alle infrastrutture urbane esistenti, come i tetti degli edifici alti.
3. Vertipads: Queste sono strutture molto piccole adatte solo per decollo e atterraggio, posizionate in zone con una bassa densità di popolazione.

Le posizioni dei vertiporti possono essere variabili e includere aeroporti esistenti, piattaforme costruite sopra tetti di edifici o ferrovie, e persino piattaforme galleggianti. La scelta della posizione dipende principalmente dalle informazioni geografiche sul pendolarismo e dalla domanda complessiva di trasporto aereo nella zona.

Le stazioni di terra svolgono due funzioni principali:

1. Assicurare il decollo e l'atterraggio sicuro degli aeromobili.
2. Gestire tutte le operazioni necessarie al funzionamento degli aeromobili, inclusi carico/scarico passeggeri e merci, rifornimento, manutenzione e supporto alla navigazione.

Date le dimensioni e le caratteristiche degli eVTOL, le piattaforme di decollo e atterraggio devono essere posizionate in ampi spazi aperti, senza ostacoli circostanti. Devono essere forniti strumenti per assistere il pilota durante le fasi critiche di decollo e atterraggio, come l'ILS.

È essenziale avere un sistema di comunicazione e coordinamento tra l'aeromobile e la terra. Sono necessarie anche infrastrutture per la ricarica delle batterie o il rifornimento di idrogeno liquido per ridurre i tempi di inattività degli aeromobili.

Si prevede che le infrastrutture di terra siano suddivise in tre categorie principali, ottimizzate per dimensioni, costo e capacità operative per soddisfare le esigenze di trasporto aereo urbano di varie dimensioni e tipologie di città.

2.3.1 Configurazione dei vertiporti e volume privo di ostacoli

Integrare il trasporto aereo nella nostra vita quotidiana richiederebbe spesso che i vertiporti siano situati in aree densamente popolate e all'interno dei confini urbani, il che attualmente è più una visione che una realtà. Se i futuri vertiporti dovranno svolgere un ruolo significativo in una rete di trasporto multimodale che segue già determinati standard, dovranno essere inoltre allineati agli standard di sicurezza dell'aviazione per poter operare in primo luogo. Skyports, sviluppatore globale di infrastrutture terrestri per UAM, sostiene che "le regole dell'aviazione nazionale e internazionale e gli standard dell'industria devono essere cambiati rapidamente per consentire l'introduzione di nuovi aeromobili VTOL e infrastrutture terrestri associate". Guidate da queste esigenze, le agenzie nazionali dell'aviazione, responsabili di fornire e regolamentare le condizioni di volo sicure, stanno ora lavorando per adeguare le linee guida di progettazione e i regolamenti attuali e, dove necessario, sviluppare ed implementare nuovi. Poiché la comunità UAM ancora non ha una comprensione completa di come le operazioni VTOL stiano cambiando le specifiche e i requisiti di progettazione delle infrastrutture terrestri, ci si riferisce frequentemente alle terminologie, agli approcci e alle procedure già esistenti per gli eliporti.

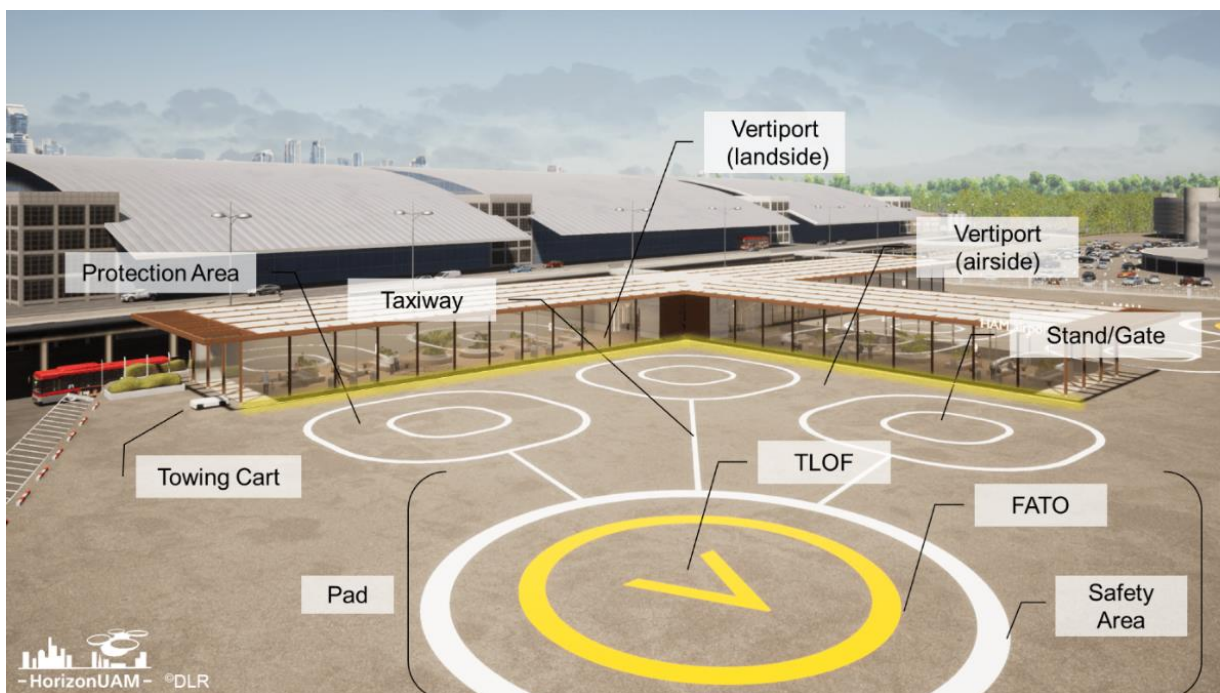


Figura 18: Configurazione di un Vertiporto [17]

La figura mostra la terminologia tipicamente utilizzata nel contesto dell'UAM e dei vertiporti. A seconda dei diversi orizzonti temporali, dei livelli di maturità e delle densità del traffico, i vertiporti possono differire negli elementi, nella capacità e nelle dimensioni. Un elemento chiave è la TLOF di dimensioni specifiche, pavimentazione, segnalazione, portanza e drenaggio, ecc. per resistere alle forze dinamiche durante l'atterraggio. Alla TLOF, l'aeromobile VTOL inizia il decollo e compie l'atterraggio finale.

La FATO è un'area definita di dimensioni specifiche su cui l'aeromobile VTOL completa la sua fase finale di avvicinamento o fase iniziale di partenza. Un'area di sicurezza dedicata circonda la FATO e fornisce un'area estesa priva di ostacoli. Stands aggiuntivi di dimensioni specifiche e area di protezione possono essere utilizzati per il parcheggio e la gestione dei passeggeri. Sono collegati da una via di rullaggio al fine di fornire una transizione sicura da un elemento all'altro. Le vie di rullaggio devono seguire requisiti predefiniti e devono fornire aree di protezione per garantire un'operazione sicura. Possono essere considerate varie modalità operative delle vie di rullaggio, come il movimento del veicolo attraverso l'aria o a terra, con conseguenti dimensioni e margini di sicurezza differenti (vedi Sezione 4.2.2).

L'obiettivo del volume privo di ostacoli (OFV) è fornire protezione sopra i vertiporti per facilitare l'introduzione dei vertiporti in aree congestionate e un ambiente popolato da ostacoli per gli aeromobili VTOL.

Le caratteristiche del volume privo di ostacoli sono le seguenti:

1. Il volume privo di ostacoli è derivato dal volume della procedura di decollo e atterraggio verticale, fornito nel Manuale di Volo (AFM), espresso in termini dei parametri elencati nella tabella in figura:

Parameter	Short description	Parameter	Minimum/maximum
h_1	Low hover height	h_1	-
h_2	High hover height	h_2	$\geq h_1$
TO_{width}	Width at h_2	TO_{width}	$\leq 5 D$
TO_{front}	Front distance at h_2	TO_{front}	$\leq 5 D$
TO_{back}	Back distance at h_2	TO_{back}	$\leq 5 D$
$FATO_{width}$	Width of the FATO	$FATO_{width}$	$\geq 1.5 D$
$FATO_{front}$	Front distance on FATO	$FATO_{front}$	$\geq 0.75 D$
$FATO_{back}$	Back distance on FATO	$FATO_{back}$	$\geq 0.75 D$
θ_{app}	Slope of approach surface	θ_{app}	$\geq 4.5\%$
θ_{dep}	Slope of departure surface	θ_{dep}	$\geq 4.5\%$

Figura 19: Parametri del volume privo di ostacoli [18]

2. Il FATO necessario per consentire all'aeromobile di eseguire una procedura di decollo e atterraggio verticale è approvato se caratterizzato dai parametri $FATO_{back}$, $FATO_{front}$ e $FATO_{width}$. $FATO_{back}$ e $FATO_{front}$ riferiti al centro del cerchio più piccolo che racchiude l'aeromobile. Dai bordi rettangolari del FATO, il volume della procedura si estende verticalmente fino all'altezza minima di volo h_1 , da cui si allarga linearmente fino all'altezza massima di volo h_2 . A quella altezza, il volume ha la larghezza TO_{width} , mentre si estende verso il retro e il davanti per le distanze TO_{back} e TO_{front} . Ai bordi posteriore e anteriore, le superfici di avvicinamento e partenza sono inclinate con gradienti θ_{app} e θ_{dep} . Alcuni aeromobili possono eseguire una virata durante la salita, in tal caso la relativa capacità di virata e salita sarà fornita nel AFM.

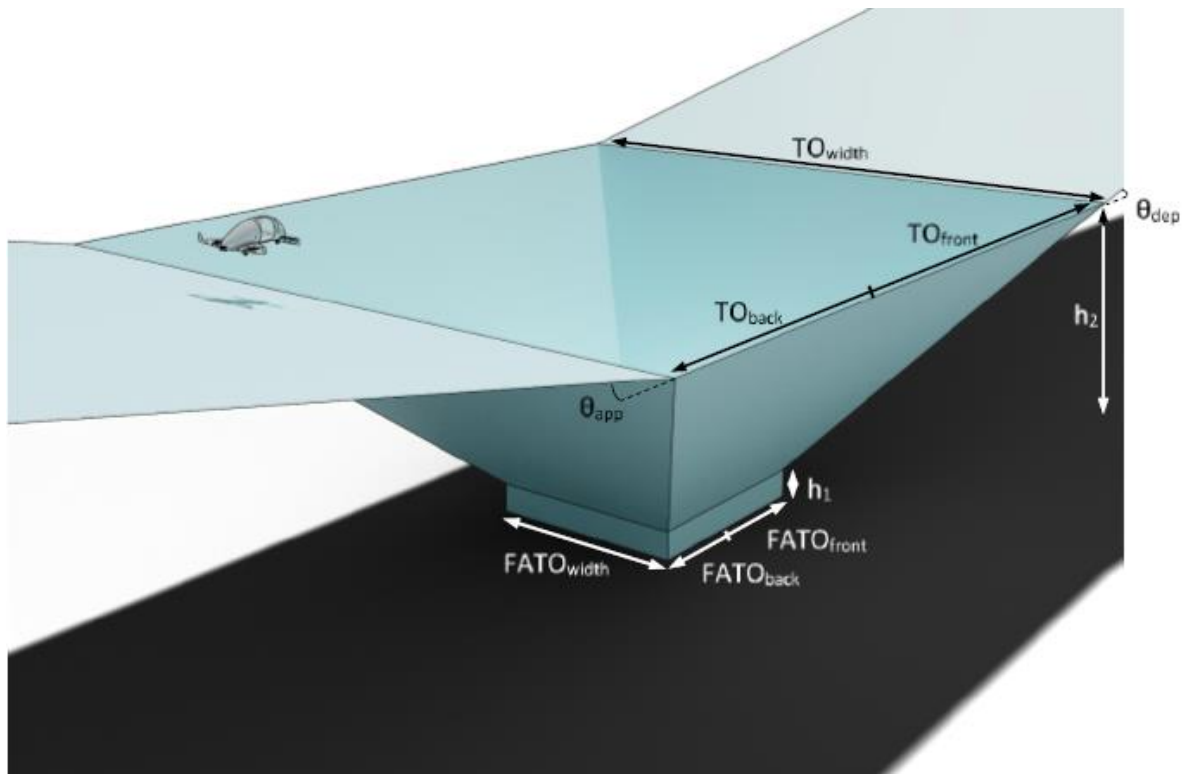


Figura 20: Illustrazione del volume libero da ostacoli secondo normativa [18]

3. Per l'approvazione del vertiporto, i parametri che definiscono la procedura devono soddisfare determinati minimi o massimi come fornito dalle tabelle precedenti.

2.3.2 Vertihubs

Simili a piccoli aeroporti per eVTOL, i vertihub - situati alla periferia di aree urbane o suburbane - probabilmente costituirebbero la principale infrastruttura terrestre per UAM. Oltre a essere luoghi di prelievo e consegna per persone e merci, un vertihub potrebbe fungere da sito centrale per gli eVTOL che volano in una specifica area geografica, con almeno un vertihub in ogni città. Gli operatori dovrebbero equipaggiare i vertihub con infrastrutture per le operazioni di manutenzione, riparazione e revisione (MRO) per la flotta, spazi di parcheggio per eVTOL a lungo raggio e un sistema centralizzato di controllo operativo per l'intera città. I vertihub potrebbero essere progettati per soddisfare le esigenze di servizio della flotta - e per garantire resilienza, al fine di garantire la continuità delle operazioni durante una perturbazione non pianificata. Dovrebbero essere prese in considerazione altre esigenze oltre alle operazioni della flotta, come la fornitura di spazi ufficio per il personale e la formazione e alloggi per piloti e ingegneri di servizio. I vertihub rappresentano la struttura più grande e probabilmente esisteranno alla periferia delle aree urbane a causa della grande impronta fisica e delle richieste sulla rete elettrica e altre infrastrutture fisiche. I vertihub avranno abbastanza spazio per conservare gli aeromobili durante la notte quando non sono in uso e serviranno anche come hub multimodali collegando i passeggeri al trasporto pubblico e ai veicoli privati. I vertihub avranno anche significative capacità di manutenzione, riparazione e revisione per consentire agli

aeromobili di sottoporsi a una manutenzione più intensiva rispetto ad altre strutture. I vertihub potrebbero anche fornire strutture per i passeggeri simili a un aeroporto, come strutture commerciali e strutture di screening dei passeggeri, se necessario.



Figura 21: Illustrazione di un Vertihub [15] [16]

2.3.3 Vertiports

I vertiports saranno posizionati nel cuore dei centri urbani e fungeranno da siti principali sia per l'imbarco e lo sbarco dei passeggeri che per quello della merce.

Rispetto ai vertihubs, i vertiports mancheranno di strutture pesanti di manutenzione, ma probabilmente avranno un personale di base per la manutenzione.

I vertiports avranno più piattaforme di atterraggio, ma probabilmente una o due aree principali di decollo e atterraggio.

Il fabbisogno di infrastrutture energetiche sarà significativo, ma non così esigente come nei vertihubs, e si limiterà a ricariche rapide e sostituzione delle batterie. È probabile che esistano anche aree di attesa per i clienti simili a quelle presenti negli eliporti o screening di base della sicurezza.

Idealmente, queste piattaforme di decollo e atterraggio sarebbero costruite e/o posizionate nel cuore della città e servirebbero come siti principali sia per l'imbarco e lo sbarco dei passeggeri che per le operazioni di decollo e atterraggio. Di conseguenza, gli operatori dovrebbero posizzarli nei pressi delle destinazioni principali come i distretti centrali degli affari, i centri commerciali e altri mezzi di trasporto come treni e metropolitane, poiché la prima e l'ultima parte del viaggio dei passeggeri e la consegna della merce dovrebbero essere integrate con altri modi di trasporto terrestre. I vertiports probabilmente dovranno ospitare più veicoli eVTOL contemporaneamente, ma potrebbero comunque richiedere significativamente meno

spazio rispetto ai vertihubs. I vertiports potrebbero essere dotati di sistemi di ricarica/ripristino veloci, avere punti di controllo di sicurezza di base e la capacità di svolgere operazioni di manutenzione MRO minori, ma probabilmente non disporranno di spazi di parcheggio per eVTOL a lungo raggio o stazioni MRO complete. Tuttavia, poiché i vertiports dovrebbero idealmente gestire un numero comparativamente elevato di passeggeri, potrebbe essere necessaria una sala d'attesa per i clienti e personale a terra per coordinare un imbarco senza problemi, nonché sistemi per la sicurezza antincendio, il controllo dell'accesso e la sorveglianza in tempo reale.



Figura 22: Illustrazione di un Vertiport [15] [16]

2.3.4 Vertistations

I vertistops saranno gli elementi più piccoli della rete di vertiports e conterranno tipicamente una o due piattaforme di atterraggio. Considerando l'impronta più ridotta, gli operatori potrebbero costruire queste strutture relativamente facilmente, magari utilizzando eliporti già in uso. Poiché le vertistations sarebbero infrastrutture periferiche, non sarebbe necessario disporre di punti di ricarica o parcheggio primari sul sito, anche se dovrebbero essere considerate capacità di base di assistenza ai clienti, come sistemi di monitoraggio meteorologico, aree di attesa, checkpoint di sicurezza, desk di assistenza, ecc. Poiché i costi di installazione sarebbero relativamente bassi, queste strutture potrebbero estendere la portata degli operatori nelle aree suburbane. Inoltre, data la posizione e le strutture disponibili presso ciascuna di queste aree di atterraggio, i servizi di prelievo e consegna della merce potrebbero essere integrati senza problemi con l'infrastruttura esistente.



Figura 23: Illustrazione di una Vertistation [15] [16]

2.3.5 Progettazione di un vertiporto

I principali enti normativi mondiali non hanno ancora sviluppato dei criteri per la progettazione e sviluppo dei vertiporti, quindi è pratica comune indirizzare la progettazione attraverso delle linee guida simili a quelle utilizzate per gli eliporti. In particolare si prevede la valutazione del vertiporto in base ai seguenti parametri:

- Ubicazione: La progettazione e la costruzione di vertiporti sui tetti degli edifici sono soggette a vincoli specifici imposti dalla pianificazione urbana, che richiedono un'analisi approfondita a livello edilizio e infrastrutturale. Questi vincoli includono diversi aspetti tecnici e normativi che devono essere presi in considerazione:
 1. Vibrazioni: Le vibrazioni generate dalle operazioni di decollo e atterraggio dei veicoli eVTOL devono essere valutate per garantire che non compromettano la stabilità strutturale degli edifici circostanti. Questa analisi richiede l'identificazione delle fonti di vibrazione e l'implementazione di misure di mitigazione, se necessario, per garantire la sicurezza e il comfort degli occupanti dell'edificio.
 2. Corrente del vento: Le condizioni di vento devono essere attentamente valutate per assicurare che il vertiporto sia progettato per resistere alle forze aerodinamiche generate dal vento. Questo include l'analisi della velocità e della direzione del vento, nonché la valutazione dell'effetto del vento sulle operazioni di decollo e atterraggio.
 3. Costruzione grezza: È essenziale valutare la capacità portante della struttura dell'edificio per determinare se è in grado di sopportare il peso aggiuntivo e le sollecitazioni dinamiche causate dalle operazioni dei veicoli eVTOL. Questa analisi comprende la valutazione della resistenza strutturale degli elementi portanti dell'edificio, come le travi e le colonne.

4. Statica e fisica delle costruzioni: L'analisi statica e strutturale è fondamentale per garantire che il tetto dell'edificio sia in grado di supportare il carico statico e dinamico dei veicoli eVTOL durante le operazioni di decollo e atterraggio. Questa analisi include la valutazione della distribuzione del carico e la verifica della resistenza dei materiali strutturali utilizzati.
 5. Requisiti di spazio: È importante assicurare che lo spazio disponibile sul tetto dell'edificio sia sufficiente per consentire le operazioni di decollo e atterraggio in sicurezza. Questo include la valutazione delle dimensioni del tetto, delle aree di atterraggio e delle distanze di sicurezza necessarie per evitare collisioni e garantire la sicurezza delle persone e delle strutture circostanti.
 6. Integrazione delle infrastrutture di ricarica: Le infrastrutture di ricarica per i veicoli eVTOL devono essere integrate nella progettazione del vertiporto, tenendo conto dei requisiti tecnici e delle normative vigenti. Questo include la progettazione di sistemi di alimentazione elettrica sicuri ed efficienti, nonché la gestione delle operazioni di ricarica in modo da garantire la disponibilità continua di energia per i veicoli.
 7. Protezione dal rumore: È importante adottare misure di mitigazione del rumore per ridurre l'impatto acustico delle operazioni dei veicoli eVTOL sulle aree circostanti. Questo può includere l'installazione di sistemi di isolamento acustico, la scelta di materiali di costruzione adatti e la pianificazione delle operazioni per ridurre al minimo il disturbo acustico per gli abitanti dell'area circostante.
- Configurazione del vertiporto: come visto nel paragrafo 2.3.1
 - Safety: nell'installazione di un vertiporto, è fondamentale garantire la massima sicurezza per l'equipaggio dell'aeromobile, i passeggeri, gli occupanti dell'edificio e terzi che si trovano nelle vicinanze dell'edificio. Una delle misure cruciali per garantire questa sicurezza è l'installazione di sistemi avanzati di protezione antincendio, come il sistema DIFFS (Deluge In-flight Fire Fighting System).
Il sistema DIFFS è progettato per rilevare e sopprimere rapidamente eventuali incendi che potrebbero verificarsi durante le operazioni di decollo e atterraggio dei veicoli eVTOL. Questo sistema utilizza una combinazione di rilevatori di fiamma e spruzzatori d'acqua automatici per individuare e estinguere tempestivamente qualsiasi incendio, garantendo una risposta rapida ed efficace.
 - Operatività simultanea su diverse macchine: è essenziale stabilire distanze di sicurezza tra le rotte di ciascun velivolo durante le fasi di avvicinamento e partenza. Secondo le raccomandazioni dell'ICAO, gli eliporti dovrebbero essere progettati in modo tale da avere almeno due superfici designate per l'atterraggio e il decollo, consentendo così la possibilità di eseguire più operazioni contemporaneamente.
Queste superfici, comunemente indicate come "piste" o "pads", devono essere posizionate in modo tale da garantire un margine di sicurezza sufficiente tra i percorsi di volo dei velivoli in

avvicinamento e partenza. Ciò assicura che le operazioni aeree possano essere condotte in modo efficiente e sicuro, minimizzando il rischio di collisioni o interferenze tra i velivoli.

L'implementazione di distanze di sicurezza adeguate e la presenza di più superfici di atterraggio/decollo contribuiscono alla gestione ottimale del traffico aereo presso gli eliporti, consentendo una maggiore capacità operativa e riducendo il potenziale per congestioni e ritardi.

2.3.6 Skyports

Skyports è un'azienda britannica fondata nel 2018 che si è specializzata nello sviluppo e nella gestione di vertiporti, infrastrutture dedicate al decollo e atterraggio di veicoli aerei a decollo verticale (VTOL) e veicoli aerei urbani (UAM). Nel novembre 2022, Skyports e Groupe ADP hanno inaugurato il loro primo vertiporto a Pontoise, situato a circa 40 km a nord-ovest di Parigi. Questo vertiporto è stato progettato per ospitare test e dimostrazioni relative alle operazioni di volo UAM, alle infrastrutture di terra, all'integrazione tecnologica e all'esperienza dei passeggeri.

Lo scopo principale del vertiporto di Pontoise è consentire a Skyports e ai principali produttori di veicoli UAM di sviluppare e dimostrare le migliori pratiche per l'integrazione del trasporto aereo urbano. Qui, i test si concentrano su vari aspetti, tra cui l'ottimizzazione degli itinerari, la gestione del traffico aereo, la sicurezza operativa e l'esperienza dei passeggeri.

Nel 2022, Skyports ha avviato una collaborazione con Joby Aviation, un'azienda leader nella produzione di veicoli eVTOL, per sviluppare e testare congiuntamente veicoli e infrastrutture a terra, al fine di ottenere il miglior risultato possibile in termini di efficienza e sicurezza operativa. Questo approccio integrato consente di affinare contemporaneamente le tecnologie degli aeromobili e l'infrastruttura di supporto a terra.

Skyports attualmente possiede e gestisce uno degli unici due eliporti commerciali a Londra, Canary Wharf, che funge da importante nodo nella rete di vertiporti della città. Canary Wharf è anche un banco di prova attivo per nuove soluzioni tecnologiche e logistiche, con un focus sull'ottimizzazione delle operazioni UAM in un ambiente urbano. Il vertiporto offre servizi di supporto per una varietà di attività, tra cui gestione del traffico aereo, sicurezza, e accoglienza dei passeggeri, rendendolo un punto chiave per il futuro della mobilità aerea urbana a Londra.



Figura 24: Vertiporto progettato da Skyports.[24]

2.3.7 Ferrovial

Ferrovial, una delle principali società infrastrutturali a livello globale, ha sviluppato piani per costruire vertiporti per il decollo e l'atterraggio di veicoli aerei urbani (UAM), come gli eVTOL. I vertiporti progettati da Ferrovial sono destinati a svolgere un ruolo cruciale nella futura infrastruttura di mobilità aerea urbana.



Figura 25: Vertiporto progettato da Ferrovial.[25]

Caratteristiche comuni nei vertiporti progettati da Ferrovial:

- **Design Modulabile:** I vertiporti sono progettati con un approccio modulare, consentendo una facile espansione o modifica per adattarsi a una crescente domanda di traffico aereo urbano. Questo design flessibile consente l'aggiunta di piste o aree di servizio aggiuntive.
- **Integrazione Tecnologica:** I vertiporti di Ferrovial sono progettati per integrare tecnologie avanzate per la gestione del traffico aereo, la comunicazione tra veicoli e la gestione dell'energia. Questi vertiporti prevedono l'uso di sistemi automatizzati per il controllo del traffico aereo e soluzioni per l'atterraggio sicuro di veicoli UAM.
- **Strutture per l'Accoglienza dei Passeggeri:** I vertiporti includono aree dedicate all'accoglienza dei passeggeri, con servizi come sale d'attesa, biglietterie, aree di sicurezza e spazi commerciali.
- **Sostenibilità:** I vertiporti di Ferrovial sono progettati con un focus sulla sostenibilità ambientale. Questo include l'uso di energie rinnovabili per alimentare le strutture, la gestione efficiente dei rifiuti e soluzioni per la riduzione delle emissioni di carbonio.
- **Sicurezza e Controllo:** Questi vertiporti incorporano rigorosi standard di sicurezza, con sistemi di sorveglianza e controllo degli accessi per garantire la sicurezza delle operazioni. Il design prevede anche misure per prevenire incidenti e gestire emergenze.
- **Integrazione con il Trasporto Terrestre:** I vertiporti di Ferrovial sono progettati per integrarsi con le infrastrutture di trasporto esistenti, come stazioni ferroviarie o hub di trasporto pubblico, per facilitare i collegamenti intermodali e migliorare l'accessibilità per i passeggeri.
- **Efficienza Operativa:** I vertiporti sono progettati per massimizzare l'efficienza operativa, con soluzioni che consentono un rapido turnover di veicoli UAM e operazioni fluide. Questi vertiporti offrono spazi sufficienti per il decollo e l'atterraggio sicuri, oltre a zone di manutenzione e ricarica per veicoli elettrici.

Queste specifiche riflettono l'approccio di Ferrovial nel progettare vertiporti che possano soddisfare le esigenze della mobilità aerea urbana del futuro, promuovendo al contempo la sostenibilità e la sicurezza.

2.3.8 Voloport

I Voloport sono vertiporti progettati da Volocopter, un'azienda tedesca pioniera nel settore della mobilità aerea urbana. Volocopter, che si dedica allo sviluppo di velivoli eVTOL, ha progettato i Voloport per essere hub chiave nella rete UAM, consentendo operazioni sicure, efficienti e integrate con il tessuto urbano.

Come per l'esempio precedente, le caratteristiche principali di questo vertiporto sono il design modulare e flessibile, la presenza di piattaforme di decollo e atterraggio, la presenza di sistemi di gestione del traffico aereo (ATM), la possibilità di integrarsi con altri metodi di trasporto, presenza di aree riservate ai passeggeri, sicurezza, protezione e sostenibilità ambientale

Spazi di stazionamento e ricarica:

I Voloport offrono aree di parcheggio per veicoli aerei, inclusi punti di ricarica elettrica per alimentare gli eVTOL. Questo consente ai veicoli di ricaricarsi rapidamente tra un volo e l'altro, garantendo la massima operatività.

Questi elementi fanno dei Voloport un elemento essenziale nell'infrastruttura dell'UAM, favorendo lo sviluppo di un trasporto aereo urbano sicuro, efficiente e sostenibile.



Figura 26: Vertiporto progettato da Voloport.[26]

2.3.9 Urban Air Port

Urban Air Port è un'azienda britannica fondata nel 2019 che si occupa della progettazione, produzione, vendita e gestione di infrastrutture terrestri, aeree e digitali per nuove forme di trasporto aereo urbano sostenibile, come aerotaxi e droni per consegne autonome. L'obiettivo dell'azienda è creare un ecosistema di mobilità a emissioni zero, basato su tecnologie e metodi di produzione altamente innovativi. I loro vertiporti sono progettati per servire quattro mercati distinti: trasporto passeggeri con aerotaxi, logistica di merci, gestione e sicurezza delle emergenze in caso di calamità, e applicazioni di difesa.

Oltre a possedere le caratteristiche dei vertiporti illustrati in precedenza, Urban Air Port promuove anche delle soluzioni logistiche, chiamate City Box, di diverse dimensioni le quali dimostrano la fattibilità dell'introduzione della tecnologia UAM in città.



Figura 27: Illustrazione della City Box XS (sx) e della City Box XXS (dx).[27]

La gamma di prodotti di Urban Air Port include:

- AirOne: Un vertiporto che può essere posizionato sia a livello del suolo sia sul tetto di edifici.
- MarineOne: Un vertiporto progettato per l'utilizzo su acqua.
- ResilienceOne: Un vertiporto destinato ad applicazioni di difesa.
- CityBox: Un'infrastruttura per la logistica di piccoli carichi.
- DocksBox: Un centro logistico per il trasporto di merci più grandi.

Il 25 aprile 2022, Urban Air Port ha inaugurato Air One, il primo vertiporto completamente operativo al mondo dedicato a droni e veicoli elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL), situato a Coventry, nel Regno Unito. Nelle settimane successive all'apertura, sono stati condotti oltre 100 voli di droni di fronte a un pubblico di 15.000 persone, tra cui rappresentanti delle istituzioni, accademici, imprenditori e cittadini.



Figura 28: Primo vertiporto al mondo, prodotto da Urban Air Port.[27]

Questi test avevano lo scopo di rendere la mobilità aerea urbana più familiare al grande pubblico e promuovere l'accettazione delle nuove tecnologie nel campo del trasporto aereo sostenibile.

2.3.10 Tecnologia 5G

La tecnologia 5G è cruciale per l'Urban Air Mobility, apportando miglioramenti significativi in termini di sicurezza, efficienza e affidabilità dei veicoli aerei urbani. Con una velocità di trasmissione dati fino a 20 Gbps, supporta la trasmissione di grandi quantità di dati, inclusi video ad alta risoluzione e dati di telemetria, fondamentali per il monitoraggio e il controllo preciso dei veicoli aerei.

Il 5G migliora la precisione della navigazione integrandosi con sistemi GNSS avanzati e RTK, raggiungendo precisioni di posizionamento centimetrico, vitali per operazioni di decollo, atterraggio e volo in aree urbane densamente popolate. La tecnologia supporta anche comunicazioni V2X (Vehicle-to-Everything), con una latenza estremamente bassa e una capacità di gestione di elevate densità di connessioni per chilometro quadrato, aumentando la consapevolezza situazionale e riducendo il rischio di collisioni.

Il 5G abilita il monitoraggio e il coordinamento in tempo reale dei veicoli UAM, utilizzando reti di sensori e sistemi di controllo distribuiti, migliorando l'efficienza dello spazio aereo e riducendo i ritardi operativi. Si integra con i sistemi UTM (Unmanned Traffic Management) per la gestione del traffico aereo non abitato, facilitando il monitoraggio e la gestione dinamica del flusso di traffico e garantendo operazioni sicure.

Le reti 5G offrono una resilienza superiore grazie alla capacità di rete distribuita e alla ridondanza delle connessioni, riducendo il rischio di interruzioni della comunicazione e mantenendo la continuità operativa. Implementano misure avanzate di cybersecurity, come crittografia end-to-end e autenticazione a più fattori, proteggendo i sistemi UAM da minacce cyber e garantendo la sicurezza dei dati trasmessi.

La capacità di trasmettere dati in tempo reale consente l'implementazione di sistemi di manutenzione predittiva, che utilizzano l'analisi dei dati per prevedere e prevenire guasti, migliorando l'affidabilità e la longevità dei veicoli aerei. Inoltre, il 5G abilita servizi avanzati per i passeggeri, come streaming video ad alta definizione e connessioni internet stabili, migliorando l'esperienza a bordo e offrendo nuove opportunità di intrattenimento e produttività.

2.4 Sistema di alimentazione

Gli eVTOL possono essere classificati per il tipo di alimentazione da cui proviene l'energia utilizzata dai propulsori e nei sistemi di bordo. In particolare le tecnologie di maggior applicazione sono quelle basate sull'utilizzo di batterie o di fuel cell.

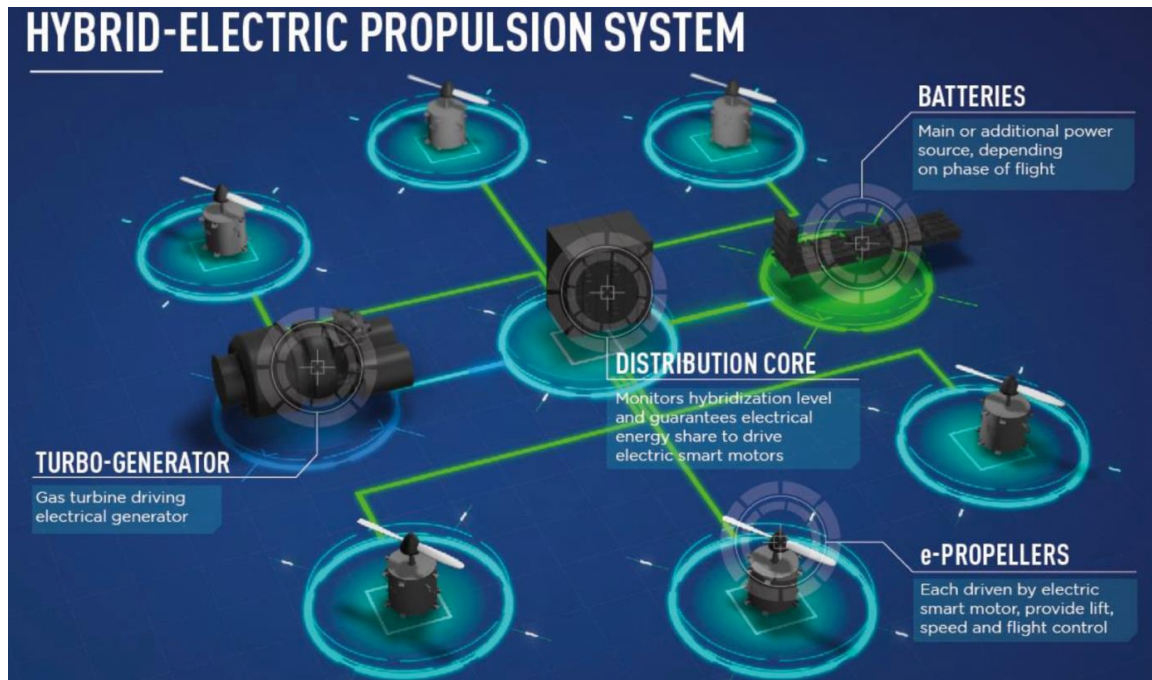


Figura 29: Schema del sistema di alimentazione del Bell Nexus [19]

2.4.1 Batterie

Le batterie rappresentano un elemento vitale nell'architettura dei veicoli eVTOL, poiché sono responsabili di fornire l'energia necessaria per alimentare i motori elettrici che consentono il volo. Quando si tratta di dimensionare le batterie, è essenziale trovare un equilibrio tra le dimensioni della batteria stessa e la durata della missione. Per garantire un'autonomia significativa, le batterie devono possedere una elevata densità energetica. Le batterie al litio sono le più comuni nell'ambito dei veicoli eVTOL della UAM, poiché offrono una buona densità energetica. Tuttavia, è importante notare che i veicoli eVTOL richiedono batterie capaci di sopportare un elevato numero di cicli di carica/scarica senza subire un rapido deterioramento.

1. Tra le varie tipologie di batterie al litio, le batterie agli ioni di litio (Li-Ion) sono le più diffuse. Queste batterie sono costituite da un anodo e un catodo immersi in soluzioni non acquose di solventi organici, con all'interno sali di litio. Tuttavia, le batterie Li-Ion possono presentare problemi di sicurezza legati alla temperatura di esercizio, che possono causare rischi di incendio.
2. Le batterie al litio-ossigeno (Li-O₂) rappresentano una tecnologia promettente, caratterizzata da un'elevata capacità energetica. Tuttavia, durante i cicli di carica e scarica, queste batterie possono

subire variazioni di peso e volume, rendendole più complesse da gestire in termini di progettazione e durata.

3. Le batterie agli ioni di fluoro (F-Ion) sono una novità nel settore, utilizzando un elettrolita solido che consente una conduzione di ioni a temperature estremamente elevate. Questa tecnologia offre un potenziale significativo per applicazioni ad alta energia, ma presenta sfide legate alla stabilità del ciclo di vita e alla gestione termica.
4. Le batterie al litio-zolfo (Li-S) rappresentano un'altra alternativa interessante, caratterizzata da una densità energetica teorica molto elevata. Tuttavia, durante i cicli di carica e scarica, lo zolfo può subire variazioni di volume significative, che influenzano la stabilità strutturale e la durata complessiva della batteria.

2.4.2 Fuel Cell

Il funzionamento delle fuel cell varia a seconda della composizione stessa. Le FC in commercio sfruttano principalmente i seguenti fenomeni:

1. Celle a combustibile a idrogeno e ossigeno (H_2/O_2): Questo tipo di fuel cell utilizza idrogeno e ossigeno come reagenti per produrre elettricità, con acqua come unico sottoprodotto. Le celle a combustibile H_2/O_2 sono comunemente utilizzate in applicazioni spaziali e stazionarie, dove la disponibilità di idrogeno è garantita. Tuttavia, la necessità di stoccare e distribuire l'idrogeno rappresenta una sfida significativa per l'adozione su larga scala.

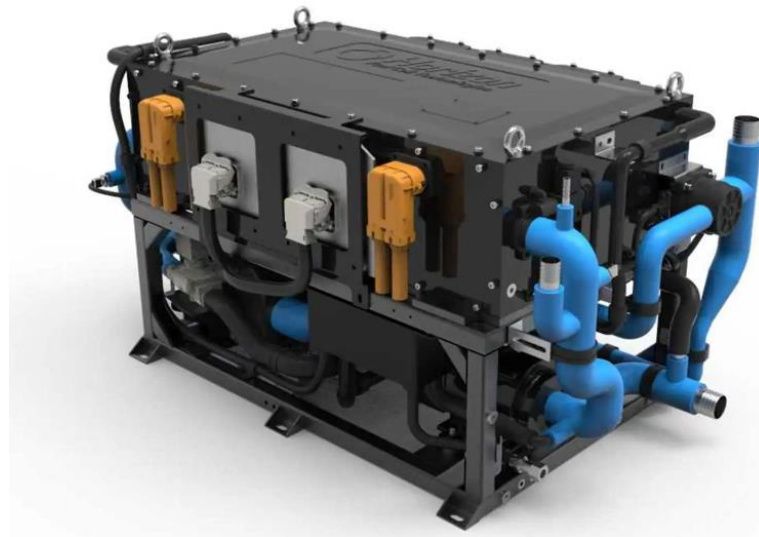


Figura 30: Esempio di fuel cell alimentata ad idrogeno e ossigeno [20]

2. Celle a combustibile a metanolo (CH_3OH): Le celle a combustibile a metanolo utilizzano metanolo come combustibile primario, che viene ossidato all'anodo per generare elettroni e protoni. Questi ioni attraversano un elettrolita e reagiscono con ossigeno all'anodo per produrre acqua e calore come prodotti. Le celle a combustibile a metanolo offrono una densità energetica più elevata rispetto alle celle a idrogeno, rendendole più adatte per applicazioni portatili come i dispositivi elettronici.

3. Celle a combustibile a etanolo (C_2H_5OH): Simili alle celle a metanolo, le celle a etanolo utilizzano etanolo come combustibile primario. L'etanolo viene ossidato all'anodo per produrre elettricità, acqua e anidride carbonica. Le celle a etanolo offrono una maggiore densità energetica rispetto alle celle a metanolo.
4. Celle a combustibile a ossido solido (SOFC): Le celle a combustibile a ossido solido utilizzano un elettrolita solido, come l'ossido di zirconio o l'ossido di cerio, per condurre ioni ossigeno tra l'anodo e il catodo. Questo tipo di fuel cell è adatto per applicazioni stazionarie e di piccola scala, come i generatori elettrici di emergenza. Le SOFC possono funzionare con vari combustibili, tra cui idrocarburi, biogas e idrogeno.
5. Celle a combustibile a membrana scambiante di protoni (PEMFC): Le PEMFC utilizzano un elettrolita polimerico per condurre protoni tra l'anodo e il catodo. Questo tipo di fuel cell è particolarmente adatto per applicazioni mobili, come gli eVTOL a idrogeno, a causa della loro alta efficienza, bassa temperatura di esercizio e rapido avvio. Le PEMFC possono funzionare con idrogeno puro o con reagenti di idrocarburi, come metano o propano, con l'uso di un reformer interno.
6. Celle a combustibile alcaline (AFC): Le celle a combustibile alcaline utilizzano un elettrolita alcalino, come l'idrossido di potassio (KOH), per condurre ioni idrossido tra l'anodo e il catodo. Questo tipo di fuel cell è stato utilizzato storicamente nelle missioni spaziali, ma è stato recentemente oggetto di ricerche per applicazioni terrestri, come sistemi di generazione di energia stazionaria e veicoli elettrici.
7. Celle a combustibile a biossido di carbonio (CO_2FC): Le celle a combustibile a biossido di carbonio utilizzano biossido di carbonio come reagente principale per produrre elettricità e carbonati come prodotto finale. Questo tipo di fuel cell è stato proposto come una tecnologia per la cattura e l'utilizzo di CO_2 derivante da processi industriali o dalla combustione di combustibili fossili, contribuendo così alla mitigazione del cambiamento climatico.
8. Celle a combustibile a sali fusi (MCFC): Le celle a combustibile a sali fusi utilizzano un elettrolita costituito da un miscuglio fuso di carbonati alcalini, come il carbonato di litio e il carbonato di potassio. Questo tipo di fuel cell è stato studiato per applicazioni di produzione di energia stazionaria e cogenerazione, dove la capacità di operare a temperature elevate e di utilizzare combustibili ricchi di anidride carbonica può essere vantaggiosa, quindi difficilmente applicabile su eVTOL.

Le FC maggiormente utilizzate sono alimentate ad idrogeno e ossigeno, nonostante non abbiano la maggior densità di energia e problemi di ricarica che verranno affrontati nel prossimo paragrafo.

Battery type	Specific energy [Wh/Kg]	Specific power [W/Kg]	Energy density [Wh/L]	Cycling efficiency [%]	Cycle life [#cycles]	OTR range [°C]	DOD [%]	Lifetime [years]	Costs [\$/kWh]	Uncertainty
Li-Ion	250-300	400-600	~600	90-95	2000-3000	-20 to 60	70-90	7-15	190	low
Li-S	500-600	~400	~1000	70-90	500-1000	-20 to 60	90-100	5-10	250-500	medium
Li-O ₂	~1100	~300	~850	60-85	500-1000	25 to 100	70-90	5-10	300-700	high
F-Ion	495	-	1650	-	-	≥150, 20	-	-	-	very high

Tipo di cella	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Dimensioni tipiche [kW]	1-100	1-100	5-400	300-3000	1000-2000
Efficienza energetica [%]	40-50	45-60	40-50	45-55	50-65
Temperatura di esercizio [°C]	80-120	60-100	150-200	600-800	500-1000
Potenza specifica [W/kg]	150-1000	80-100	~ 120	12-37	1.05-1.67
Densità di potenza [kW/m ³]	4-35	~ 1	0.8-1.9	1.5-2.6	4-20
Durata [h]	2000-3000	8000	≥ 50000	7000-8000	1000

Figura 31: Confronto tra proprietà delle batterie (superiore) e delle FC (inferiore) [21] [22]

2.5 Ricarica

Per rendere il servizio efficiente e sostenibile, gli eVTOL dovranno essere caricati alla fine di ogni tratta in modo rapido durante le operazioni di carico e scarico di merci e passeggeri.

L'operazione di ricarica nasconde insidie in termini di tempo (nel caso delle batterie) e stoccaggio (nel caso delle FC).

2.5.1 Ricarica Batterie e Ricarica veloce

Un aspetto fondamentale da considerare è la necessità di minimizzare i tempi di ricarica per rendere i veicoli eVTOL più pratici. A tal fine, lo sviluppo di tecnologie di ricarica rapida e infrastrutture di ricarica efficaci riveste un'importanza cruciale. Attualmente, le batterie dei velivoli eVTOL devono essere ricaricate parzialmente o completamente alla fine di ogni missione. Tuttavia, è importante tenere presente che questo processo richiederà una significativa capacità di rete elettrica per soddisfare il crescente bisogno energetico. Inoltre, potrebbe essere necessario considerare l'intera sostituzione del pacco batterie una volta esaurito. Ad esempio, per un velivolo di tipo lift + cruise, i tempi di ricarica variano dai 12,5 ai 19,1 minuti utilizzando un caricabatterie da 300kW. Tuttavia, aumentare la potenza del caricabatterie potrebbe comportare uno stress aggiuntivo sulla rete elettrica generale e sulle batterie stesse, a causa dell'innalzamento delle temperature e della conseguente diminuzione del ciclo di vita della batteria.

Nel contesto dei sistemi a batteria, sono due le principali tecniche di ricarica da considerare: la ricarica rapida e la sostituzione delle batterie. La ricarica rapida dipende dal design della batteria e dell'infrastruttura elettrica disponibile. Tuttavia, la creazione di tale infrastruttura può richiedere costi molto elevati. D'altra parte, la sostituzione delle batterie scariche con altre già cariche può ridurre i tempi di ricarica senza influire sui cicli di vita delle batterie. Tuttavia, questo richiederebbe un sistema automatizzato o semiautomatizzato,

oltre a spazi dedicati alla ricarica delle batterie e ulteriori costi operativi.

Inoltre, è importante che l'aeromobile sia progettato in modo da consentire una sostituzione facile e veloce delle batterie. Questo aspetto richiede non solo un design appropriato dell'aeromobile, ma anche spazi dedicati e costi aggiuntivi per il funzionamento del sistema di sostituzione delle batterie.

L'industria automobilistica ha trovato una soluzione al problema dei lunghi tempi di ricarica implementando la tecnologia di ricarica rapida (DC Fast Charging), la quale si pensa possa essere applicata anche ai velivoli per l'UAM. Tuttavia, le batterie al litio, quando sottoposte al processo di ricarica rapida, presentano alcuni svantaggi, tra cui l'aumento della temperatura delle batterie e la diminuzione del ciclo di vita, con conseguente perdita delle prestazioni nel tempo.

La rete elettrica funziona con corrente alternata (AC), mentre le batterie richiedono corrente continua (DC). Il processo di conversione della corrente da alternata a continua richiede tempo, il che può allungare i tempi di ricarica. Tuttavia, un sistema di alimentazione delle batterie in corrente continua può fornire una potenza fino a 350 kW, riducendo notevolmente i tempi di ricarica. È importante notare che l'implementazione di tale sistema richiede un'infrastruttura di terra adeguata e quindi più costosa.

Per affrontare i problemi di surriscaldamento e di deterioramento delle prestazioni delle batterie durante la ricarica rapida, è necessario sviluppare un adeguato Battery Management System (BMS). Questo sistema monitora costantemente la temperatura delle batterie e, se necessario, attiva un ciclo di raffreddamento forzato. Inoltre, il BMS regola la richiesta di energia per preservare le batterie nel tempo.

Attualmente, Tesla addebita un costo di 0,28\$ per kWh di energia prelevata da un sistema di ricarica veloce. Questo costo riflette non solo il costo dell'elettricità, ma anche i costi operativi e di manutenzione associati alla fornitura di tale servizio.

2.5.2 Ricarica Fuel Cell

Le stazioni di ricarica delle fuel cell presentano diversi problemi che richiedono attenzione per garantire un funzionamento efficiente e sicuro. Prima di tutto, la costruzione e la gestione di queste stazioni richiedono un'infrastruttura dedicata, che può essere costosa e complessa da implementare. Questo include la progettazione e la costruzione di impianti per il rifornimento di combustibile, il controllo delle emissioni e la gestione della sicurezza.

Un'altra sfida riguarda la distribuzione del combustibile. È fondamentale garantire una distribuzione uniforme e affidabile del combustibile ai veicoli alimentati a fuel cell, il che richiede sistemi di distribuzione e pompaggio sofisticati, oltre a misure di sicurezza per prevenire perdite o fughe di combustibile.

Inoltre, le stazioni di ricarica devono essere in grado di gestire diversi tipi di combustibili utilizzati nelle fuel cell, come idrogeno, metanolo o ammoniaca. Ogni tipo di combustibile presenta sfide specifiche in termini di gestione, stoccaggio e distribuzione.

La sicurezza è un'altra preoccupazione fondamentale. Data la natura infiammabile e sotto pressione del combustibile utilizzato, è essenziale adottare misure di sicurezza rigorose per prevenire incidenti, fughe di

gas o esplosioni durante le operazioni di ricarica.

I tempi di ricarica delle fuel cell possono influenzare l'efficienza operativa dei veicoli alimentati a fuel cell.

Le stazioni di ricarica devono essere progettate per garantire tempi di ricarica rapidi e ridotti, consentendo un ritorno veloce dei veicoli in servizio.

2.6 Spazio aereo

Le operazioni iniziali di UAM si prevede che facciano uso della flessibilità del quadro normativo attuale (ad es. VFR, IFR) per soddisfare le loro esigenze operative e missioni. Nel tempo, il numero di operazioni UAM dovrebbe aumentare, le specifiche località in cui gli operatori desiderano condurre le operazioni potrebbero espandersi. I corridoi possono offrire l'opportunità di rispondere a ciò che potrebbero essere nuovi livelli e tipi di domanda di servizio, sfruttando le capacità degli aeromobili senza influire negativamente sui livelli di servizio attuali.

2.6.1 Corridoi aerei

Il concetto di corridoi prevede operazioni sicure ed efficienti che potrebbero non richiedere servizi di controllo del traffico aereo (ATC) tradizionali in determinate situazioni, sono disponibili per qualsiasi aeromobile equipaggiato in modo appropriato per soddisfare i requisiti di prestazione e sarebbero creati/attuati quando fosse vantaggioso dal punto di vista operativo. I corridoi potrebbero contribuire a sostenere l'aumento del ritmo operativo attraverso capacità aumentate (ad es. prestazioni degli aeromobili), struttura del corridoio e procedure.

Ai livelli di traffico aumentati, i corridoi potrebbero essere un meccanismo per distinguere e mantenere separati i diversi quadri normativi, quelli applicabili alle operazioni rispetto a quelli che operano sotto i regolamenti attuali (ad es. IFR, VFR).

I corridoi sarebbero progettati in conformità con le considerazioni ambientali applicabili e potrebbero essere implementati in aree dove è vantaggioso dal punto di vista operativo. I corridoi possono attraversare tutte le classi di spazio aereo. Si prevede che essi possano coesistere contemporaneamente in posizioni e classi di spazio aereo con costrutti (ad es. vie/corridoi VFR, IFR) sfruttati per le operazioni iniziali.

Le operazioni all'interno dei corridoi potrebbero avere requisiti operativi di prestazione e partecipazione (ad es. condivisione dell'intento operativo, di sincronizzazione all'interno del corridoio). I requisiti di prestazione e partecipazione per un corridoio potrebbero variare tra i Corridoi stessi. Inoltre, i requisiti di prestazione e la definizione dei corridoi (ad es. volume, posizione) supportano l'accomodamento per la maggior parte delle operazioni non normali, dove l'aeromobile può completare l'operazione in sicurezza. Qualsiasi operatore che soddisfi i requisiti di prestazione e partecipazione del corridoio può operare all'interno o attraverso di esso. L'attraversamento di un corridoio da parte di un aeromobile/operator non partecipante all'ambiente (ad es. aviazione generale) rimane un concetto da approfondire.

L'ATC sarà coinvolto nell'implementazione ed esecuzione dei corridoi per lo spazio aereo di sua competenza. Altri utenti del NAS saranno consapevoli dei corridoi attraverso la familiarizzazione con lo spazio aereo associata alla pianificazione del volo o all'approvazione dei piani di volo o avvisi ATC.

Le considerazioni di progettazione dei corridoi dovrebbero includere:

1. Impatto minimo sulle operazioni ATS e UTM esistenti mantenendo equità per tutti gli operatori.
2. Bisogni degli stakeholder di interesse pubblico (ad es. ambiente e rumore locale, sicurezza, sicurezza).
3. Utilità degli stakeholder (ad es. necessità del cliente).

Inizialmente, i Corridoi possono supportare operazioni punto-a-punto. Con l'evoluzione delle operazioni UAM, i corridoi potrebbero essere segmentati e collegati per formare reti più complesse ed efficienti di instradamento disponibile tra i punti (ad es. vertiporti).

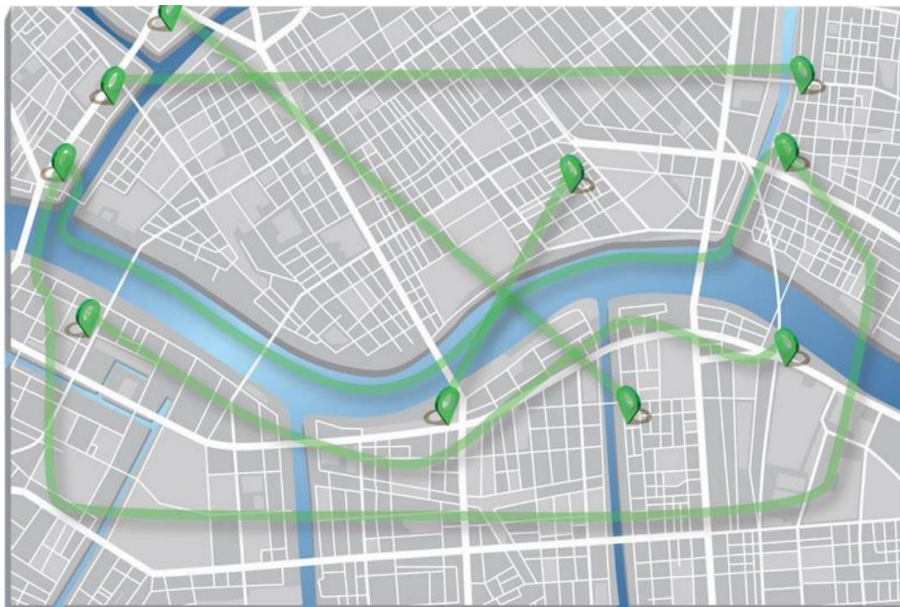


Figura 32: Esempio di corridoi UAM punto-punto [23]

Le operazioni iniziali di UAM, caratterizzate da un ritmo basso e da una bassa complessità, verranno eseguite utilizzando il quadro normativo attuale. Man mano che il ritmo e la complessità delle operazioni aumentano, le opzioni disponibili nel quadro normativo corrente (ad esempio, corridoi/flyways VFR, rotte aeree T) possono adeguarsi alla crescita. Con il continuo aumento del volume e della complessità delle operazioni, l'implementazione di corridoi semplici potrebbe diventare vantaggiosa operativamente per gli utenti dello spazio aereo e i fornitori di servizi ATS.

I corridoi UAM iniziali dovrebbero essere "semplici" nel design (ad esempio, corridoi UAM a senso unico o a pista singola in ciascuna direzione).

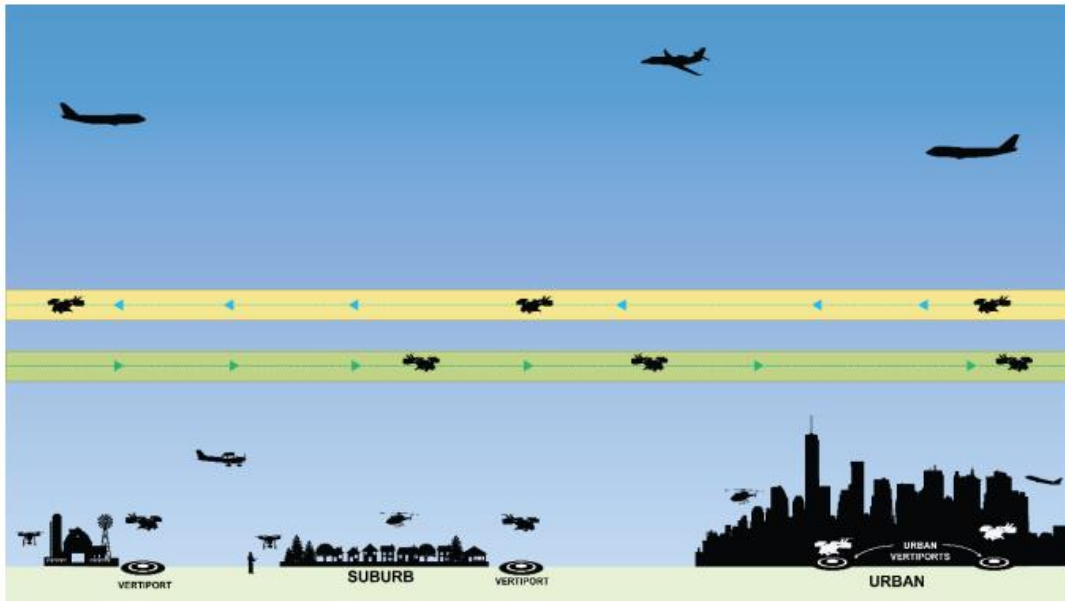


Figura 33: Struttura dei corridoi nelle fasi iniziali [23]

Con la continua crescita, la domanda operativa di UAM potrebbe superare la capacità di progettazione iniziale di un corridoio, a quel punto un'aumentata capacità potrebbe essere ottenuta attraverso una struttura aggiuntiva, inclusi binari e prestazioni migliorate (ad esempio, la capacità di ridurre in sicurezza i minimi spazi di separazione all'interno del corridoio grazie a miglioramenti nella navigazione e/o altre tecnologie). Altre opzioni includono variazioni nella topologia del corridoio per affrontare sfide specifiche come "zone di sorpasso".

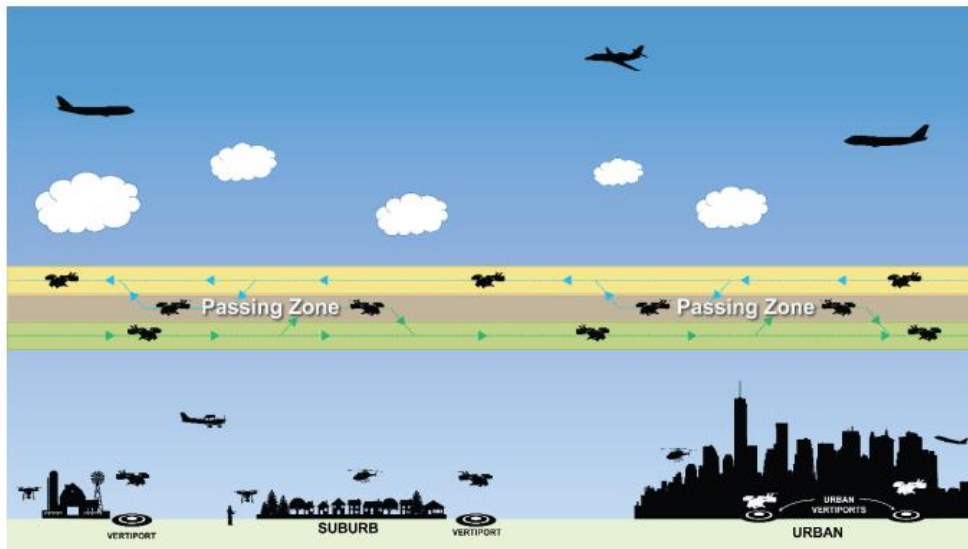


Figura 34: Zona di sorpasso verticale [23]

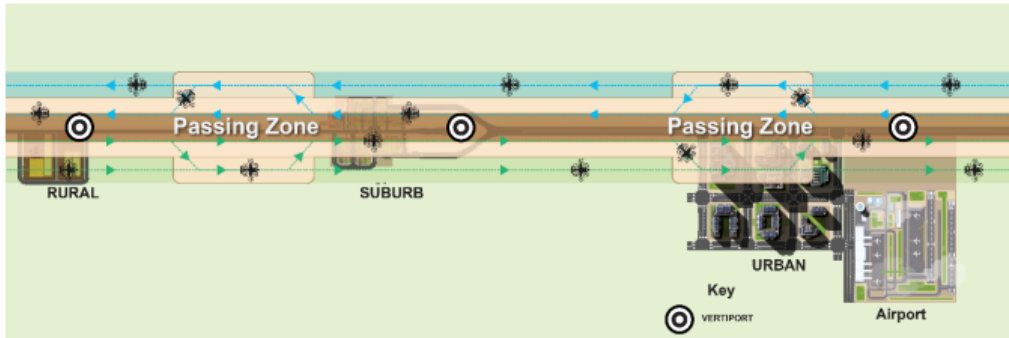


Figura 35: Zona di sorpasso laterale [23]

Un aeromobile (e l'operatore) che soddisfa i requisiti prestazionali di un corridoio relativo all'UAM, nonché quelli della classe di spazio aereo circostante (cioè ambiente ATS), può scegliere di operare nell'ambiente di servizio che ritiene vantaggioso operativamente.

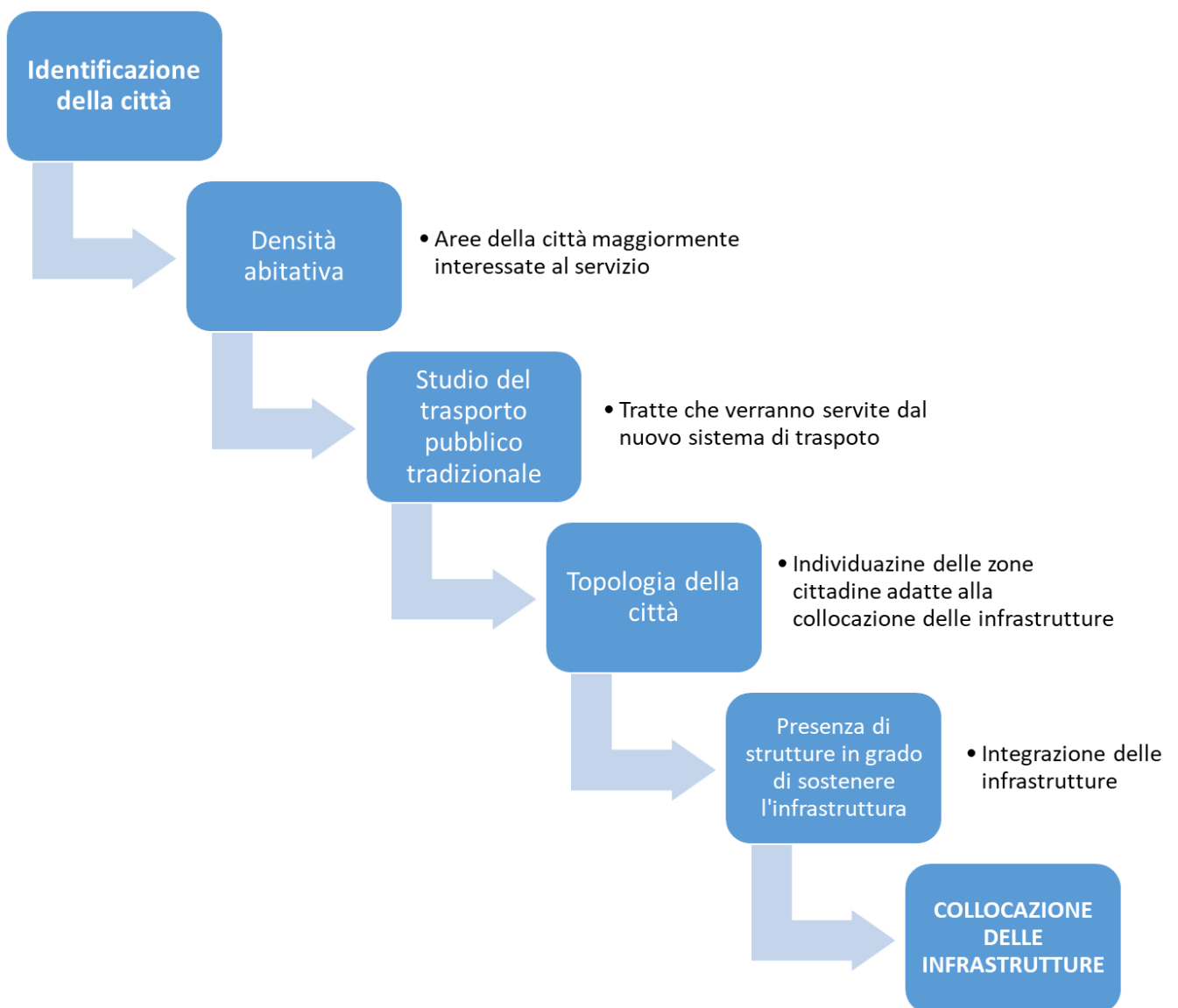
Man mano che il ritmo operativo e l'ampiezza delle prestazioni fisiche degli aeromobili continuano a crescere, il corridoio si potrebbe evolvere in composizione a più "binari". I binari riflettono una struttura interna aggiuntiva, che potrebbe richiedere anche requisiti prestazionali aumentati che supportino un ritmo operativo maggiore all'interno dello stesso corridoio.

Capitolo 3

3 Analisi della collocazione dei vertiporti e della capacità operativa

In questo capitolo verrà discussa la collocazione ottimale dei vertiporti all'interno delle città, prendendo come esempio la città di Torino.

A tal fine verranno valutati diversi aspetti relativi alla città in esame, in particolare verranno valutati:



- Densità abitativa: per permettere la collocazione ottimale dei vertiporti all'interno della città, è necessario conoscere la distribuzione della popolazione in modo tale da distribuire uniformemente il servizio.
- Flusso di utilizzo dei mezzi pubblici tradizionali: sarà necessario collocare i vertiporti in modo da poter sostituire parzialmente e alleggerire le tratte maggiormente sollecitate del trasporto pubblico tradizionale, valutando anche il numero di voli da inserire per ogni rotta.
- Topologia della città: è necessario conoscere a fondo la conformazione fisica della città, studiando le caratteristiche tecniche degli edifici e del suolo per poter individuare i principali siti predisposti all'installazione di un vertiporto.
- Presenza di strutture che possano permettere l'introduzione dell'UAM: in particolare bisogna valutare se strutture preesistenti possano sostenere la presenza di un vertiporto integrato nella loro struttura o nelle loro vicinanze.
- Potenzialità del vertiporto in base alla configurazione: ogni configurazione di vertiporto avrà una propria capacità di smaltire determinati volumi di traffico, la conoscenza di tale capacità è necessaria a determinare la configurazione adatta per ogni zona della città in base al volume di passeggeri. In particolare sarà fondamentale analizzare il numero di zone di decollo/atterraggio disponibili, i tempi di ricarica e di imbarco.
- Trasporto unidirezionale: in determinati orari e tratte il flusso sarà principalmente in una direzione, ad esempio dalle zone residenziali alle zone industriali nel mattino e viceversa nel tardo pomeriggio. Si valuteranno i metodi per permettere tale servizio e gli effetti sul costo.
- Variazione del flusso di passeggeri: sarà necessario valutare gli orari di utilizzo dei singoli vertiporti in base al flusso di passeggeri nelle diverse ore e giorni in modo tale da ridurre i costi operativi.

Da tale analisi verrà infine ottenuta una mappa riassuntiva della collocazione delle diverse configurazioni di vertiporto all'interno della città di Torino con le relative tratte e orari di servizio, specificando gli orari e le tratte di massima sollecitazione della rete.

3.1 Densità abitativa

Lo studio della densità abitativa è fondamentale per permettere in primo luogo la distribuzione uniforme del servizio, inoltre queste informazioni sono necessarie a:

- Dimensionare la domanda: la densità abitativa fornisce un'indicazione del numero di persone che risiedono in un'area specifica. Conoscere questo dato consente di prevedere la domanda potenziale per i mezzi di trasporto pubblico. Zone con densità abitativa elevata richiedono generalmente una maggiore capacità di trasporto e servizi più frequenti.
- Pianificare le rotte: la densità abitativa aiuta a identificare le aree con la più alta concentrazione di residenti o lavoratori, il che è utile per progettare le rotte dei mezzi di trasporto. La rete può essere progettata in modo da coprire efficacemente le aree ad alta densità e offrire percorsi diretti verso i principali nodi di interesse (come centri città, zone industriali, ospedali, scuole, ecc.).
- Allocare le risorse: con una chiara comprensione della densità abitativa, è possibile allocare le risorse in modo più efficiente. Le aree con densità più elevata potrebbero richiedere un numero maggiore di mezzi, mentre le zone a bassa densità potrebbero essere servite con minori frequenze o mezzi più piccoli.
- Accessibilità e copertura: la densità abitativa aiuta a determinare il livello di accessibilità richiesto in una rete di trasporto pubblico. In zone ad alta densità, la copertura del servizio dovrebbe essere più capillare, garantendo che la maggior parte dei residenti abbia facile accesso ai mezzi di trasporto. In aree meno densamente popolate, le esigenze di copertura possono essere diverse.
- Sostenibilità e riduzione del traffico: una rete di trasporto pubblico ben progettata può ridurre la dipendenza dalle auto private, soprattutto in aree ad alta densità. Conoscere la densità abitativa aiuta a progettare una rete che incentivi l'uso del trasporto pubblico, riducendo il traffico e l'impatto ambientale.
- Sviluppo urbano e crescita futura: la densità abitativa è anche un indicatore utile per prevedere lo sviluppo urbano futuro. Comprendere le tendenze di crescita può aiutare a progettare una rete di trasporto che si adatti ai cambiamenti demografici e sostenga la crescita sostenibile della città.

La densità abitativa è un fattore chiave per progettare una rete di trasporto pubblico efficiente e funzionale. Aiuta a determinare la domanda, a pianificare le rotte, ad allocare le risorse e a creare un sistema che sia accessibile, sostenibile e in grado di adattarsi alle esigenze della popolazione.

Basandosi sui dati ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) [29] raccolti fino al 2011, la popolazione Torinese risulta stabile nel nuovo millennio, pari a 872367 residenti. In netta diminuzione rispetto all'ultimo decennio del '900.

Indicatore	1991	2001	2011
Popolazione residente	962507	865263	872367
Variazione intercensuaria annua	-1.5	-1.1	0.1
Variazione intercensuaria popolazione con meno di 15 anni	-	-1.6	1.2
Variazione intercensuaria popolazione con 15 anni ed oltre	-	-1	-0.1
Incidenza superficie centri e nuclei abitati	87.2	86.9	86.9
Incidenza della popolazione residente nei nuclei e case sparse	0.2	0.2	0.2
Densità demografica	7403.3	6655.3	6709.9

Figura 36: Dati statistici relativi alla popolazione Torinese.[29]

Di pari passo con la popolazione è in calo, dal XX al XXI secolo, anche la densità abitativa passando dai 7403.3 persone al km² del 1991 ai 6709.9 persone al km² del 2011.

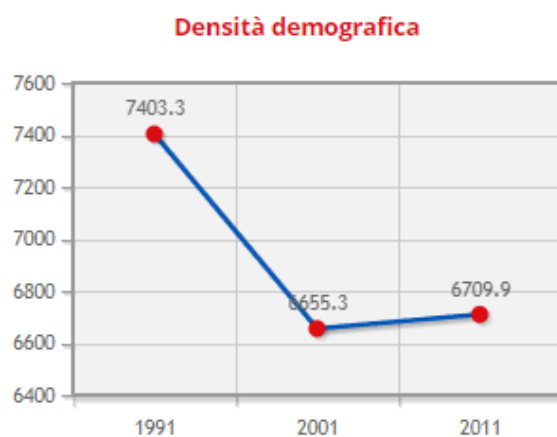


Figura 37: Variazione della densità di popolazione media Torinese.[29]

Si può però ritenere costante tale valore per le analisi che verranno condotte, quindi si assume che la densità abitativa rimarrà pressoché invariata.

Si è particolarmente interessati alla distribuzione della popolazione all'interno della città. ISTAT ha suddiviso la città di Torino in zone a differente densità di popolazione.

La mappa riportata di seguito permette di avere una prima idea sulla possibile collocazione della maggior parte delle infrastrutture UAM.

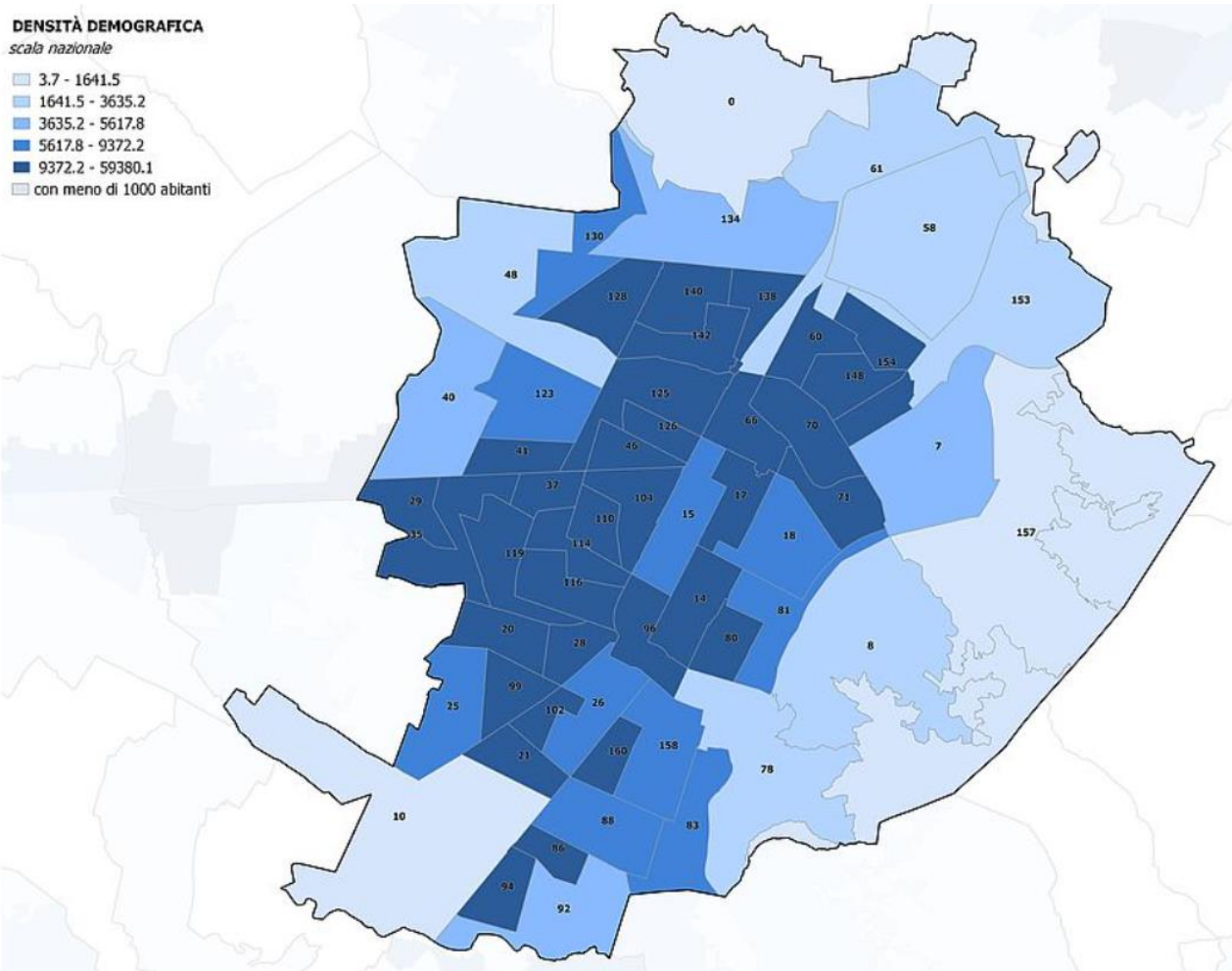


Figura 38: Distribuzione della densità di popolazione nel comune di Torino.[29]

Si evidenzia come la maggior parte della popolazione sia ubicata nella zona ovest della città, area in cui verranno allocate la maggior parte delle infrastrutture e dei servizi. In particolare si potrebbe prevedere di inserire dei vertihub e dei vertiport nelle zone interessate dalla maggior parte della popolazione, mentre nelle zone a nord e a est, in cui la densità di popolazione è molto minore, si potrebbero inserire solo alcune vertistation in zone di interesse.

3.2 Flusso di utilizzo del trasporto pubblico tradizionale

È necessario conoscere il flusso di utilizzo del trasporto pubblico tradizionale al fine di progettare la distribuzione delle infrastrutture dell'UAM per diversi motivi, tra i quali:

- Identificazione delle esigenze degli utenti: i dati sul flusso del trasporto pubblico tradizionale indicano quando e dove i passeggeri utilizzano il sistema. Questo aiuta a capire quali sono le esigenze principali degli utenti, come le destinazioni più frequentate, le ore di punta e i giorni con

maggiore traffico. Con queste informazioni, un sistema di trasporto alternativo può essere progettato per integrare o sostituire il sistema esistente in modo efficace.

- Individuazione dei punti critici e delle inefficienze: analizzare il flusso del trasporto pubblico tradizionale aiuta a individuare punti critici o inefficienze nel sistema esistente. Ad esempio, si possono identificare tratte sovraffollate, punti di congestione o tempi di attesa eccessivi. Questo permette di progettare soluzioni alternative che allevino la pressione su queste aree critiche.
- Ottimizzazione del percorso e della copertura: conoscere i flussi esistenti consente di ottimizzare il percorso e la copertura del sistema alternativo. Ad esempio, si possono creare nuove rotte che completino le esistenti, riducendo i tempi di percorrenza o migliorando la connettività. Inoltre, un'analisi dei flussi può indicare le aree sottoservite, permettendo di progettare nuovi collegamenti per soddisfare meglio le esigenze della comunità.
- Sinergia tra sistemi di trasporto: la conoscenza dei flussi esistenti aiuta a progettare un sistema di trasporto alternativo che funzioni in sinergia con il trasporto pubblico tradizionale. Questo include l'allineamento degli orari, l'integrazione delle fermate e l'adozione di biglietti unificati, facilitando così il passaggio tra diversi sistemi di trasporto.
- Risorse e infrastrutture: conoscere il flusso del trasporto pubblico tradizionale fornisce informazioni sulle infrastrutture già esistenti. Questo aiuta a capire dove potrebbero essere necessarie ulteriori risorse, come stazioni, fermate, percorsi o mezzi. Inoltre, consente di valutare se le strutture esistenti possono essere utilizzate per il sistema alternativo, riducendo i costi di costruzione e migliorando l'efficienza.
- Sostenibilità e impatto ambientale: conoscere i flussi aiuta anche a comprendere le implicazioni ambientali del sistema di trasporto tradizionale, come le emissioni di carbonio e l'impatto sul traffico. Questo permette di progettare un sistema alternativo che sia più sostenibile e riduca l'impatto ambientale complessivo, promuovendo l'uso di trasporti pubblici più ecologici.

Un primo indicatore sul volume di popolazione smaltito dal trasporto pubblico viene fornito da ISTAT, il quale ha valutato il rapporto percentuale tra la popolazione residente che si sposta giornalmente per motivi di lavoro o di studio e utilizza mezzi di trasporto collettivi (treno, autobus, metropolitana) e la popolazione residente che si sposta giornalmente per motivi di lavoro o di studio, in quanto l'incidenza percentuale degli occupati e degli studenti che si spostano giornalmente con i mezzi pubblici misura la diffusione di forme di mobilità pendolare che poggiano sul sistema del trasporto collettivo. Il mezzo di trasporto cui si fa riferimento è quello impiegato per compiere il tratto più lungo, in termini di distanza, del tragitto dal proprio alloggio di dimora abituale al luogo di studio o di lavoro.

Indicatore	1991	2001	2011
Mobilità giornaliera per studio o lavoro	61.4	62.7	64.9
Mobilità fuori comune per studio o lavoro	8.8	10.2	10.6
Mobilità occupazionale	24.3	27.2	27.8
Mobilità studentesca	3.1	4.7	3.4
Mobilità privata (uso mezzo privato)	44.1	52	48
Mobilità pubblica (uso mezzo collettivo)	29.2	23.3	28.4
Mobilità lenta (a piedi o in bicicletta)	22.2	19.7	22.7
Mobilità breve	80.5	75.3	76.1
Mobilità lunga	2.2	2.3	4

Figura 39: Indici sulla mobilità ISTAT.[30]

I valori di mobilità pubblica sono espressi in percentuale dei valori di mobilità giornaliera, ovvero il rapporto percentuale tra la popolazione residente che si sposta giornalmente dall'alloggio di dimora abituale per recarsi al luogo di lavoro o di studio e la popolazione residente di età fino a 64 anni. Quest'ultimo indicatore misura i flussi giornalieri di mobilità per motivi di lavoro e di studio, ovvero gli occupati e gli studenti che giornalmente si recano al luogo di lavoro o di studio e fanno rientro al proprio alloggio di dimora abituale. Per fare un esempio, se la popolazione inferiore ai 64 anni di una zona è pari a 100 persone, mediamente 64.9 di loro si muovono giornalmente per raggiungere il luogo di lavoro o studio, 31.2 dei quali utilizza un mezzo di trasporto pubblico.

3.2.1 Tratte servite da GTT

Si prosegue con l'analisi delle attratte delle tratte fornite da GTT (Gruppo Torinese Trasporti), le quali possono dare una chiara indicazione su quali siano le linee con maggior affluenza di passeggeri. Sfruttando la lista delle tratte, la frequenza di partenza dai capolinea e la tratta stessa, si è in grado di valutare quali zone possano essere maggiormente interessate all'introduzione del sistema di trasporto alternativo. Il sito ufficiale GTT [31], aggiornato al 2 maggio 2024, riporta le tratte disponibili e la frequenza di partenza da ogni capolinea:

(le informazioni di seguito fanno riferimenti a giorni feriali, nelle fasce orarie evidenziate in tabella)

Intervallo medio in minuti delle partenze da capolinea nelle giornate dal lunedì al venerdì dal 2 Maggio 2024 (da inizio servizio e fino alle 21)							
	Inizio servizio-6.00	6.00-7.00	7.00-9.00	9.00-12.00	12.00-16.00	16.00-20.00	20.00-21.00
2	18	16	10	14		12	15
3	20	15	8	10	11		18
4	21	12	5	6			15
5-5B	20	18	8	11	11	9	20
6			16	15		16	
8	23	18	8	13		12	19
9	21	10	9	12		11	25
10	19	16	7	9		8	20
10N	24	17	7	10		8	15
11	23	20	11	14		13	18
12	21	16	13	17		15	21
13 Bus	19	14	6	11	10	7	22
15	20	15	7	9		9	18
16cs	18	15	8	11		10	20
16cd	18	14	8	11		10	20
17(^)	24	20	7	10		11	20
17b(^)							
18	23	15	9	10		9	20
27	32	24	16	18	15	17	40
33	23	16	11	14			25
34	35	25	15	17		18	25
35	28	15	8	10	9	10	20
36	17	18	10	14		11	19
42	22	15	12	16		15	20
51	31	23	13	21		15	25
52	20	15	11	16	15	16	24
55	23	18	8	12		11	23
56	21	16	9	13			25
58(^)	12	11	8	11		9	15
58b(^)							
60	21	20	12	15		14	24
61	20	20	12	15		16	25
62	25	20	10	15		13	25
63b	24	18	15	15			18
64	22	22	13	15		16	20
67	20	15	10	16	15	14	25
68	21	15	9	12			20
71	22	16	13	17		16	20
72	20	20	7	11		12	33
72B							
74	25	20	15	22	20	18	22
75	23	17	14	18		17	22

Figura 40: Tratte Bus/Tram GTT. [31]

Effettuando un'analisi mediata sull'intera giornata, si valutano le tratte a maggior frequenza e ci si limita allo studio di esse in modo da ridurre le variabili in analisi:

- Linea 2: gestita da un bus ordinario con capienza massima di 60-70 passeggeri, frequenza di passaggi media di 15 minuti, con massima frequenza dalle 7 alle 9 e dalle 16 alle 20.

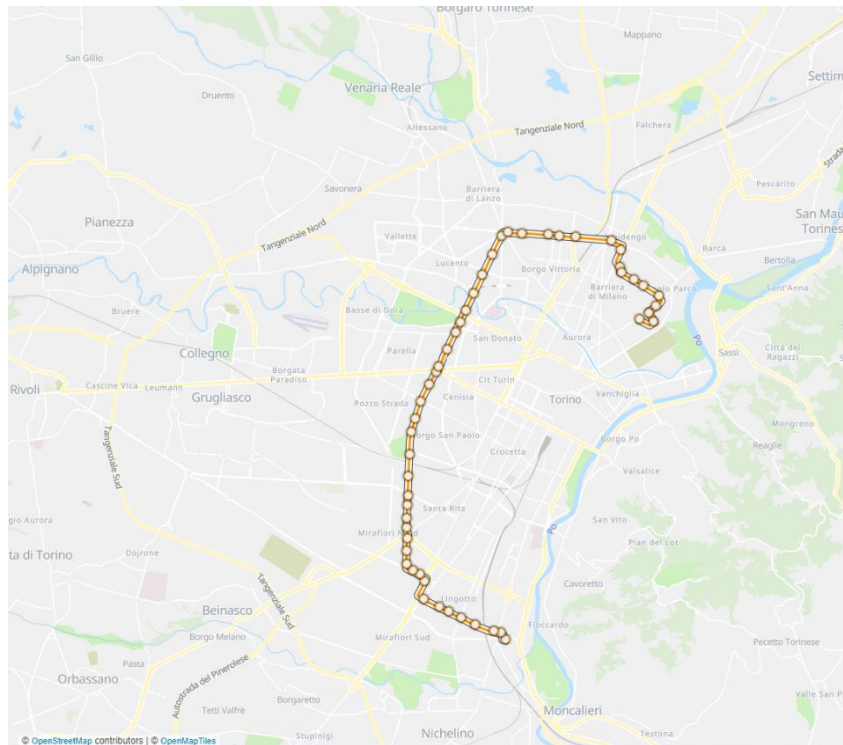


Figura 41:Tratta della linea 2.[32]

- Linea 3: gestita da un tram con capienza massima di 70-80 passeggeri, frequenza media di passaggi pari a 16 minuti con frequenza massima dalle 7 alle 9

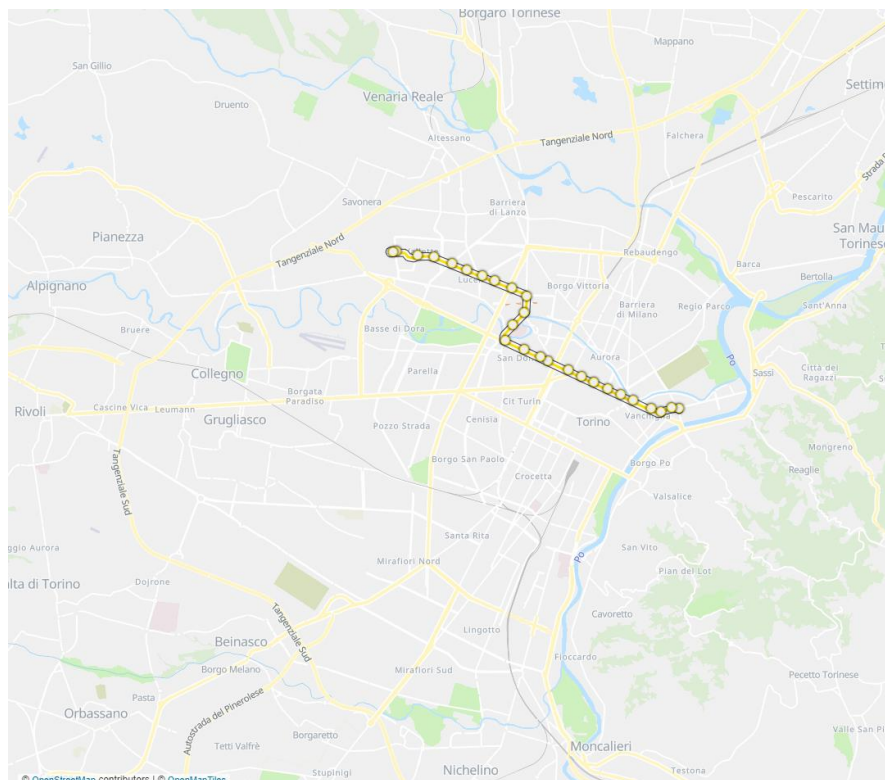


Figura 42:Tratta della linea 3.[32]

- Linea 4: servita da un tram con capienza massima di 110-120 passeggeri, frequenza media di passaggio di 10 minuti e picco della frequenza dalle 7 alle 20.

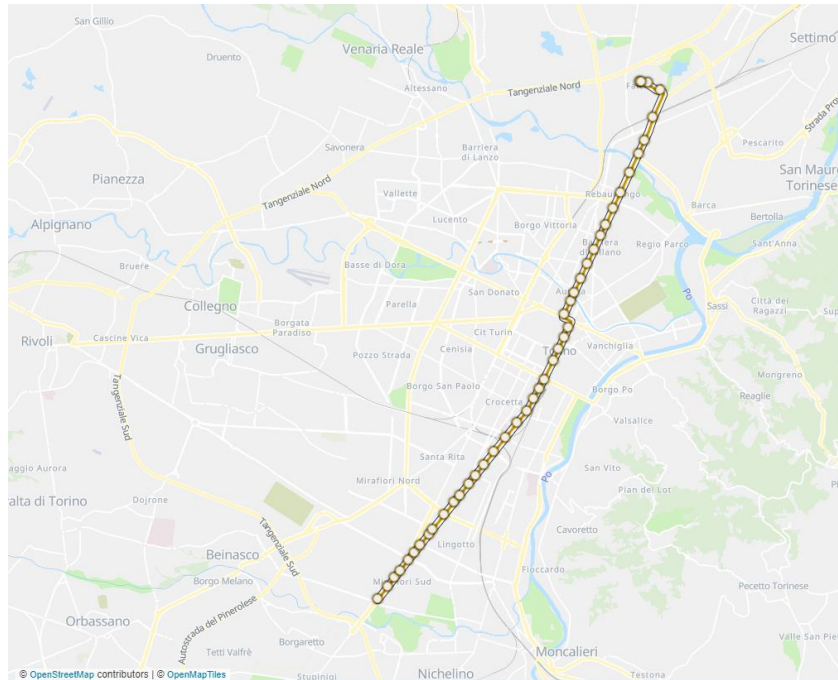


Figura 43: Tratta della linea 4.[32]

- Linea 9: servita da un tram con capienza massima di 110-120 passeggeri, frequenza media di passaggio di 12 minuti con picco dalle 7 alle 20.

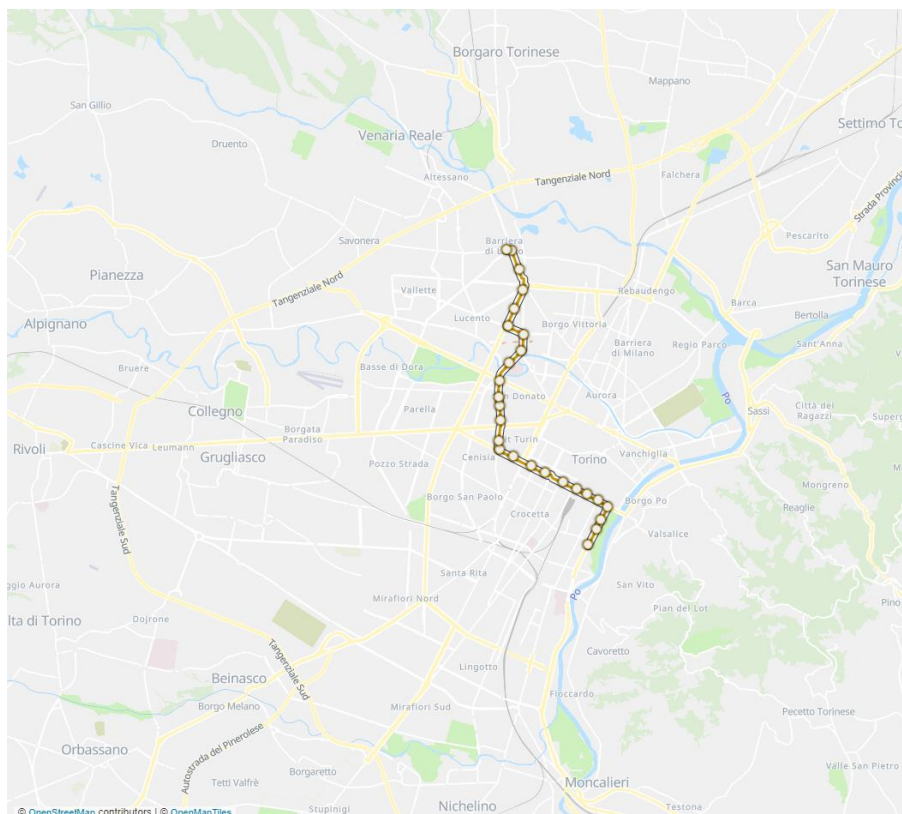


Figura 44: Tratta della linea 9.[32]

- Linea 10: servita da un tram con capienza di 110-120 passeggeri, frequenza media di passaggio di 16 minuti e picco tra le 7 e le 9 e tra le 16 e le 20.

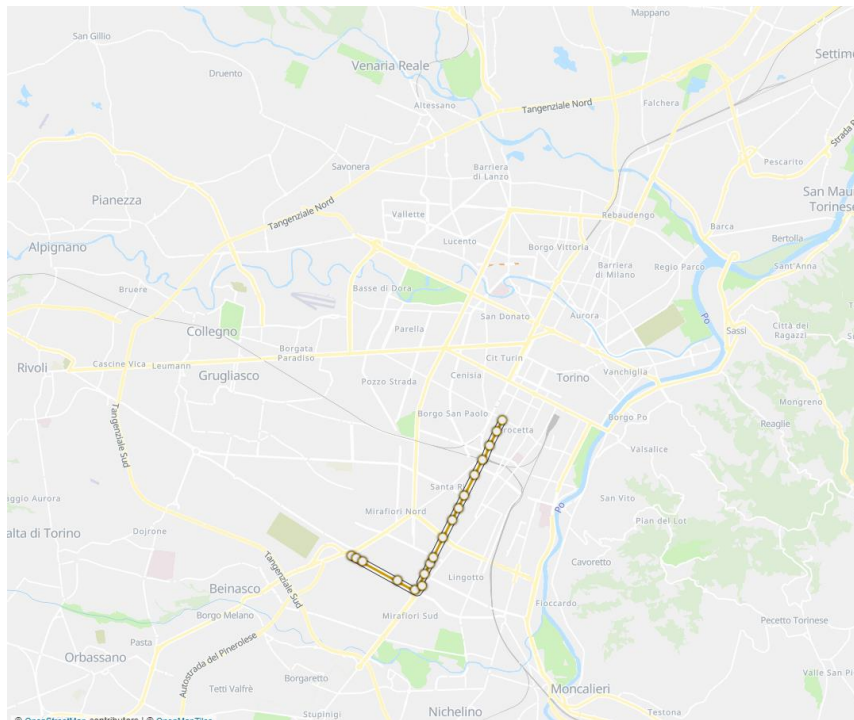


Figura 45: Tratta della linea 10. [32]

- Linea 15: servita da un tram con capienza massima di 70-80 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 15 minuti e picco dalle 7 alle 9.

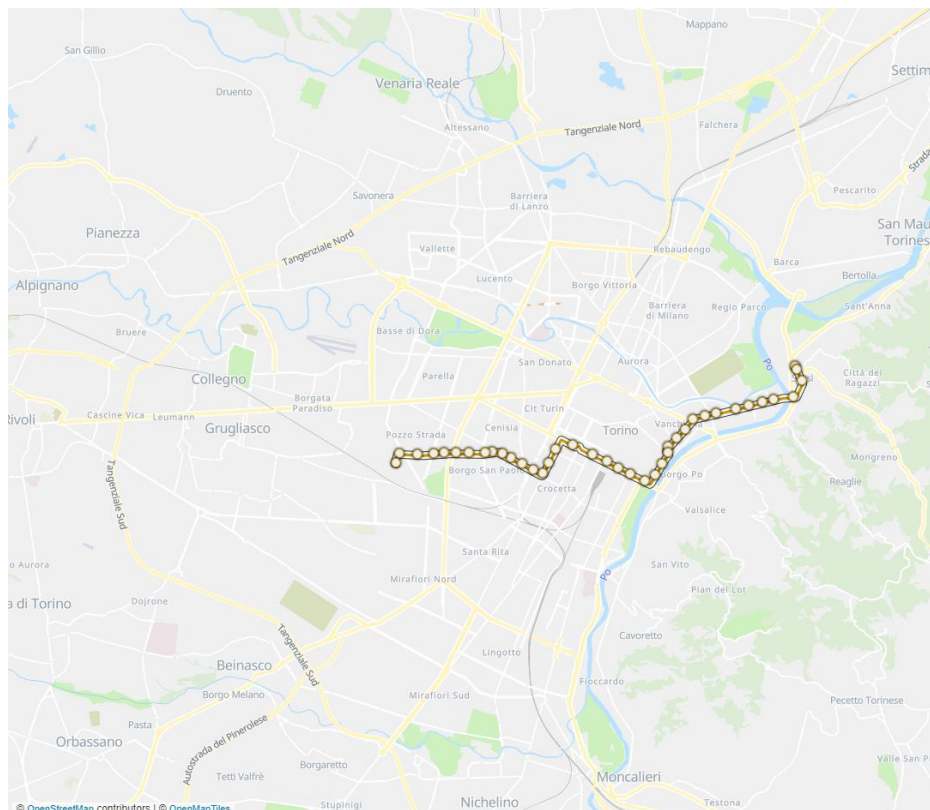


Figura 46: Tratta della linea 15. [32]

- Linea 16 corso destro: servita da un tram con capienza massima di 70-80 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 14 minuti e picco dalle 7 alle 9 e dalle 16 alle 20.

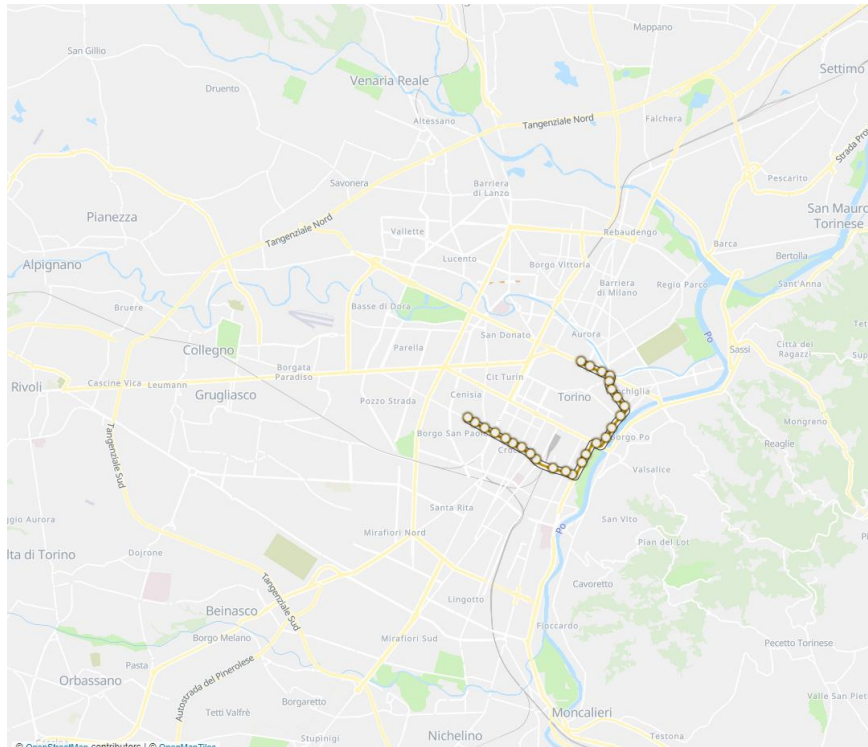


Figura 47: Tratta della linea 16CD.[32]

- Linea 16 corso sinistro: servita da un tram con capienza massima di 70-80 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 14 minuti e picco dalle 7 alle 9 e dalle 16 alle 20.

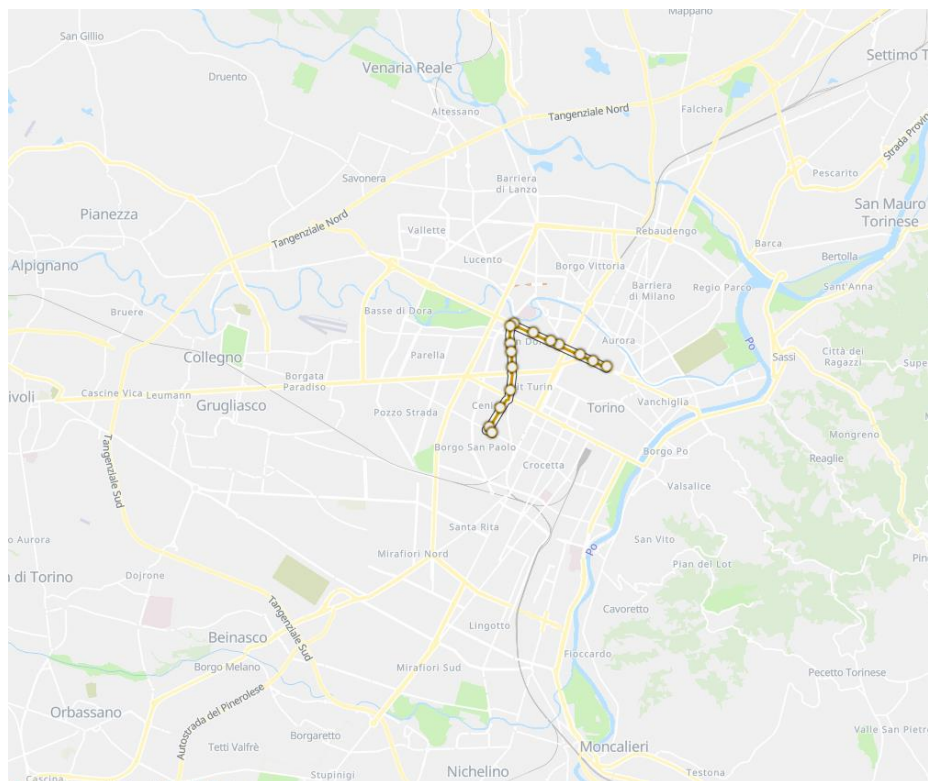


Figura 48: Tratta della linea 16CS.[32]

- Linea 17: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 13 minuti e picco tra le 7 e le 20.

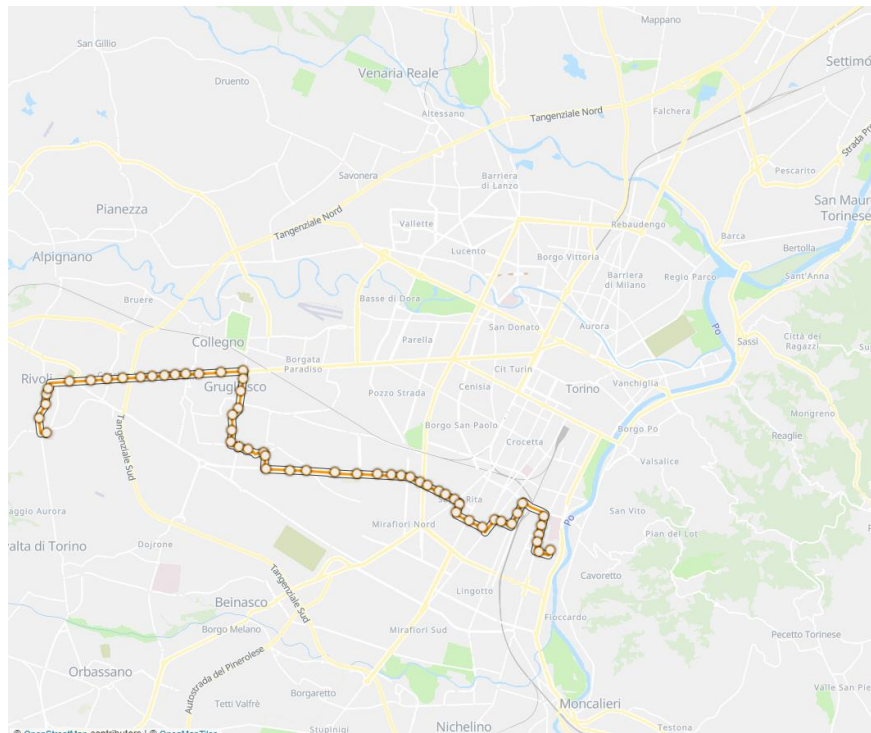


Figura 49: Tratta della linea 17.[32]

- Linea 33: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 19 minuti e picco tra le 7 e le 9.

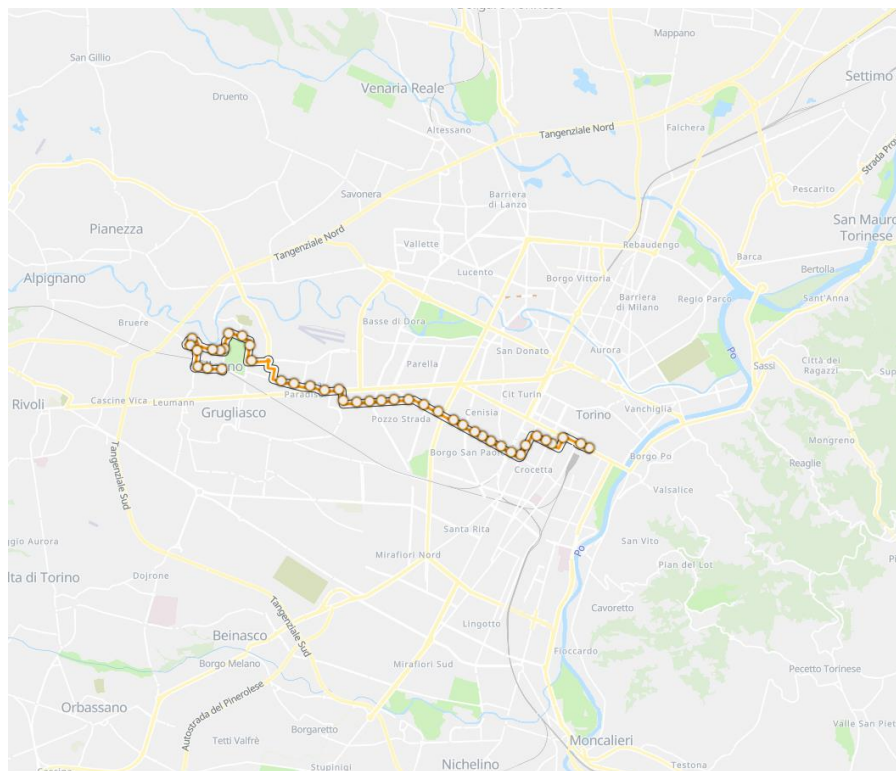


Figura 50: Tratta della linea 33.[32]

- Linea 36: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 15 minuti e picco tra le 7 e le 9 e tra le 16 e le 20.

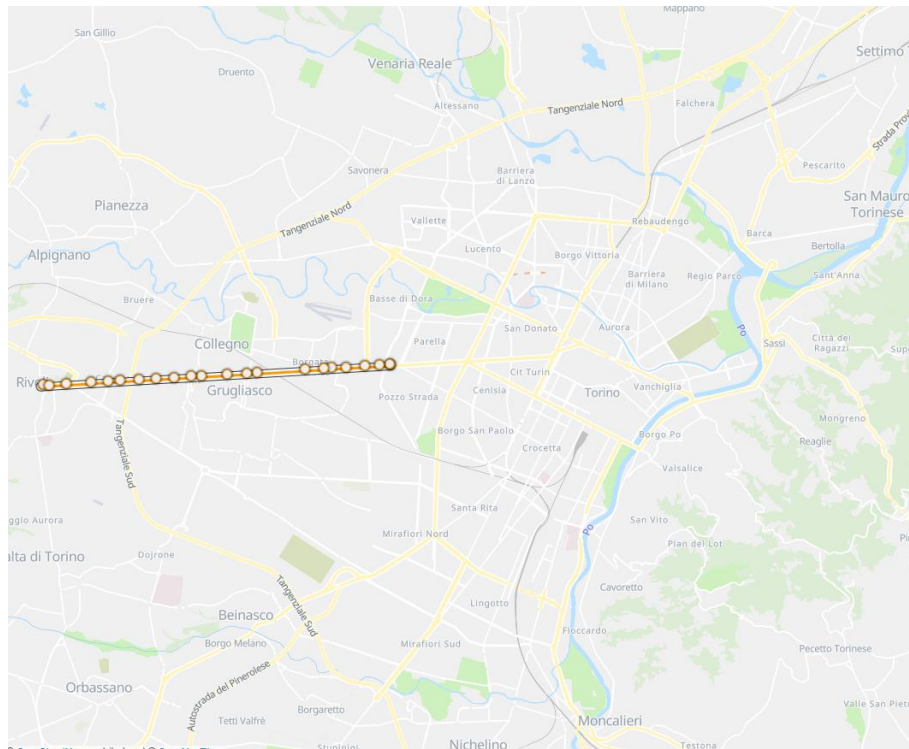


Figura 51: Tratta della linea 36.[32]

- Linea 42: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 16 minuti e picco tra le 7 e le 9.

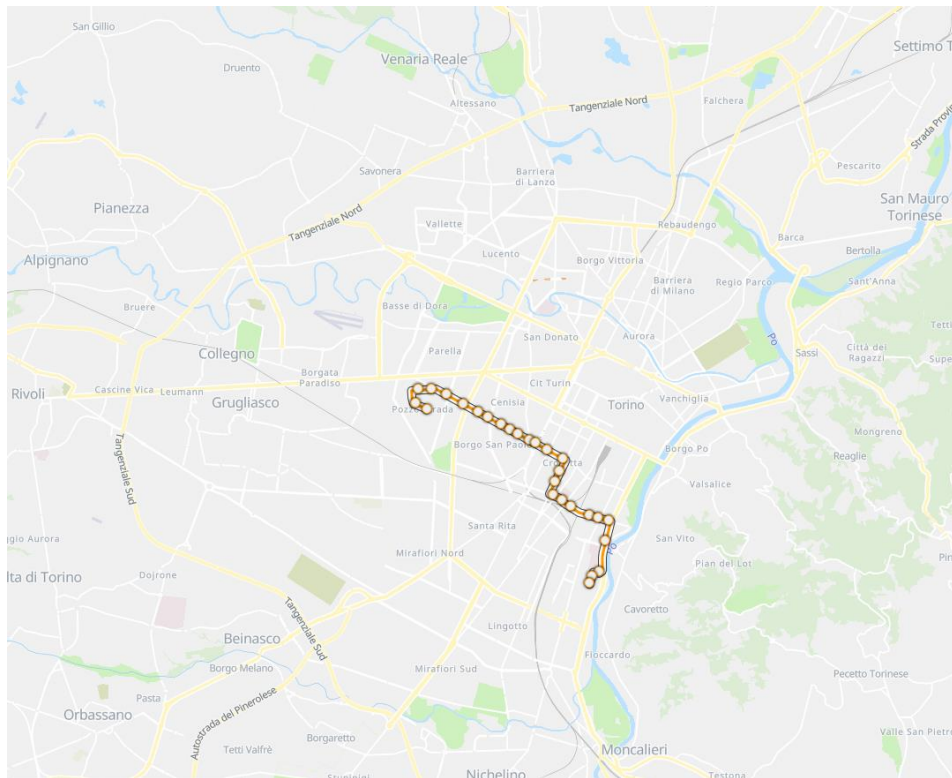


Figura 52: Tratta della linea 42.[32]

- Linea 52: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 16 minuti e picco tra le 7 e le 9.

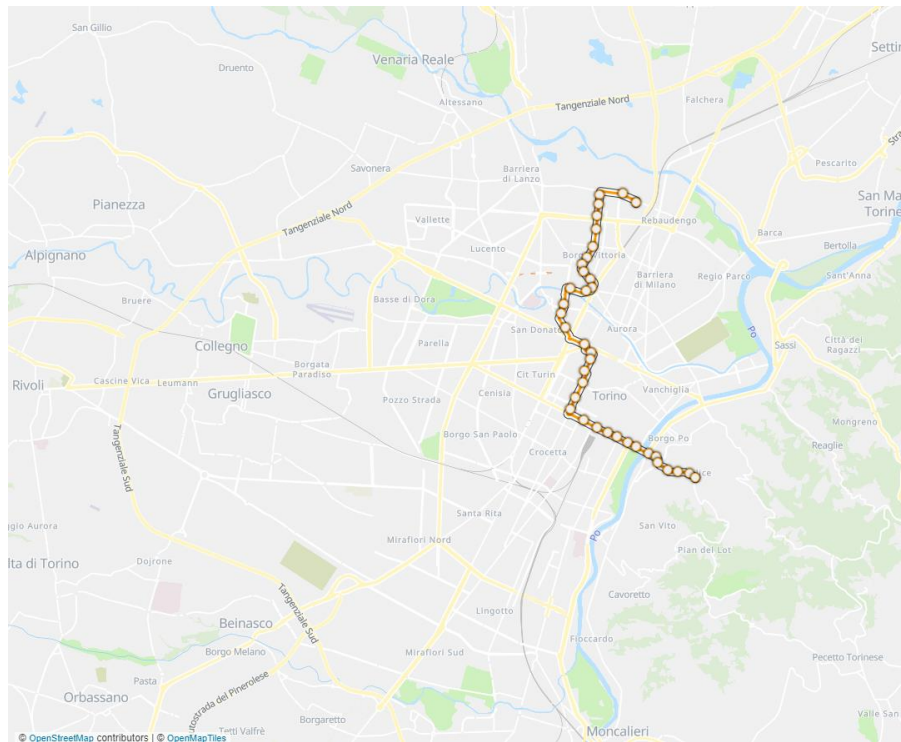


Figura 53: Tratta della linea 52.[32]

- Linea 58: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 10 minuti e picco tra le 7 e le 20.

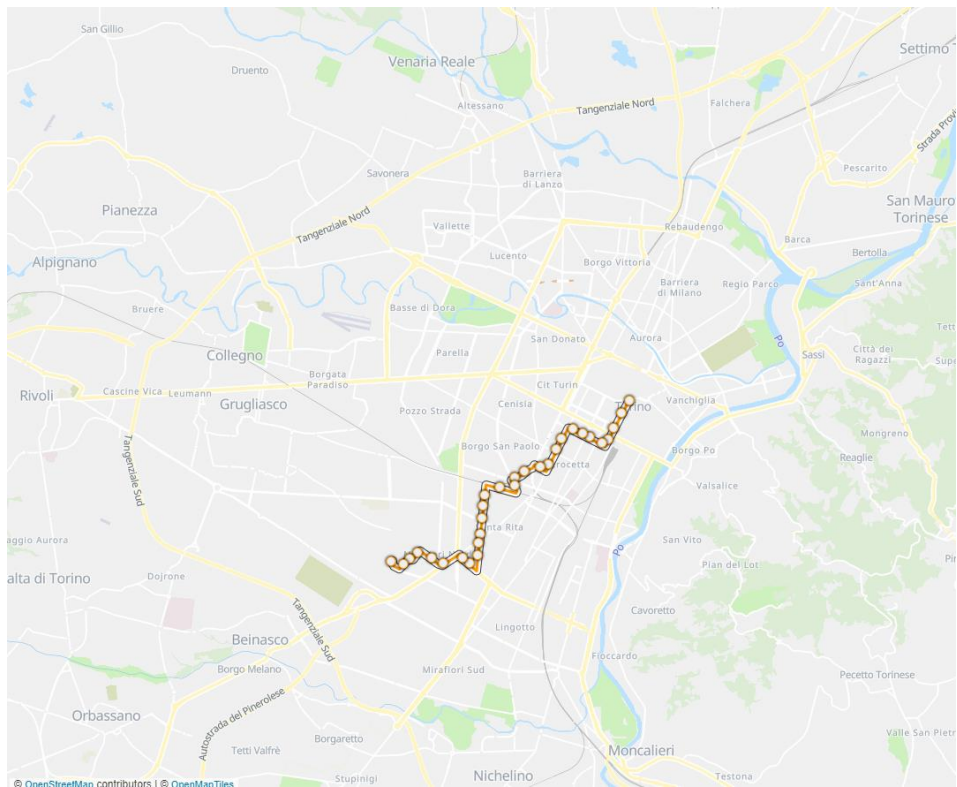


Figura 54: Tratta della linea 58.[32]

- Linea 62: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 16 minuti e picco tra le 7 e le 9.

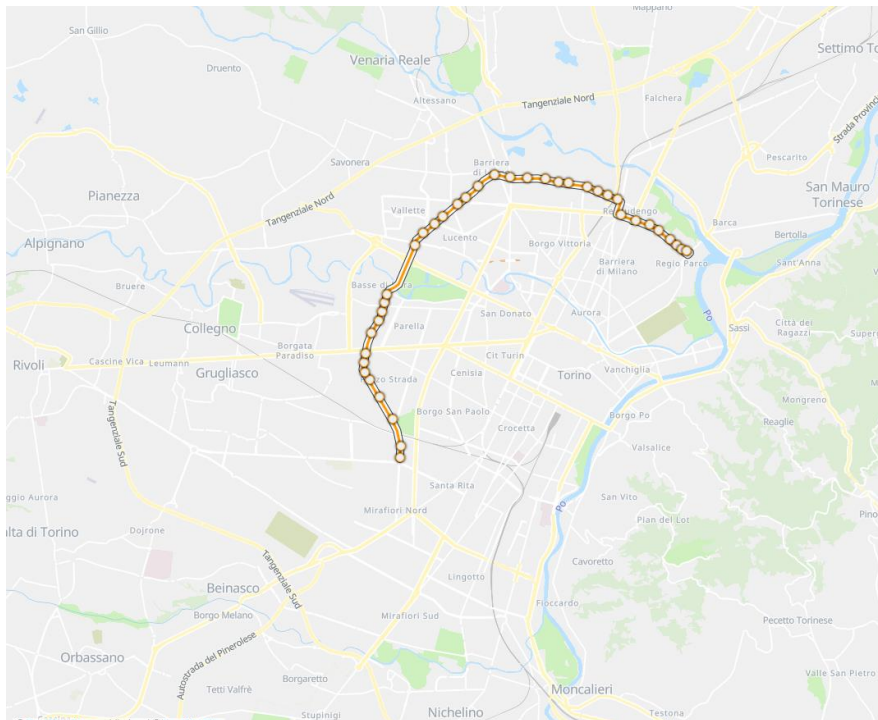


Figura 55: Tratta della linea 62.[32]

- Linea 68: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 14 minuti e picco tra le 7 e le 20.

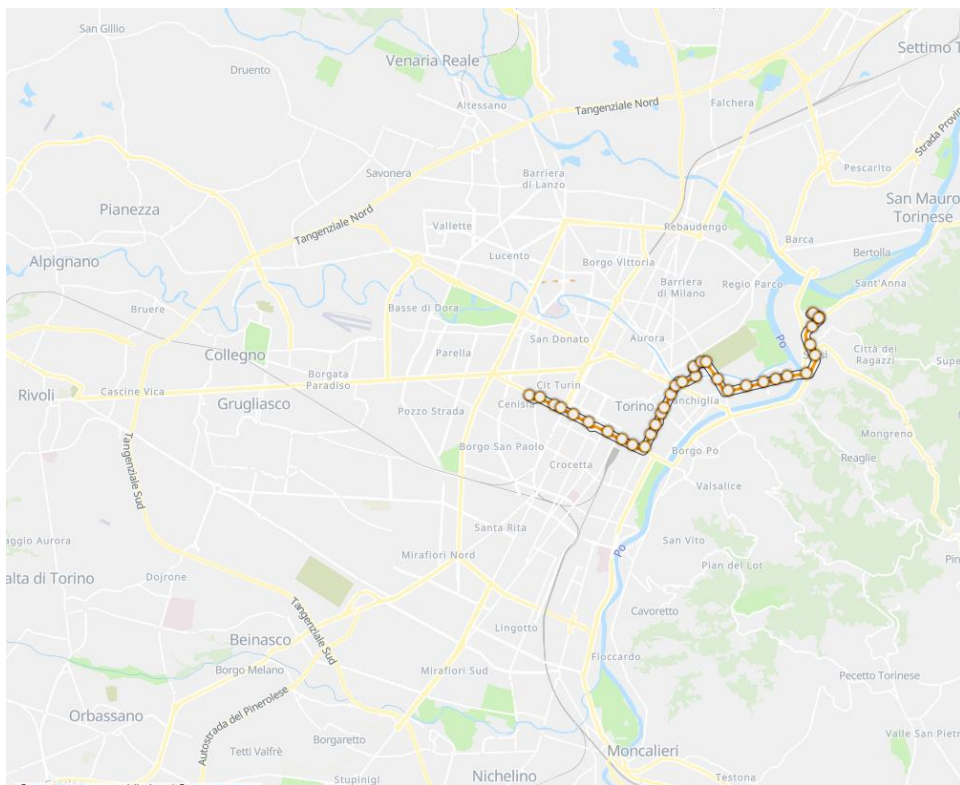


Figura 56: Tratta della linea 68.[32]

- Linea 72: servita da un bus con capienza massima di 60-70 passeggeri, con frequenza media di passaggio pari a 13 minuti e picco tra le 7 e le 20.

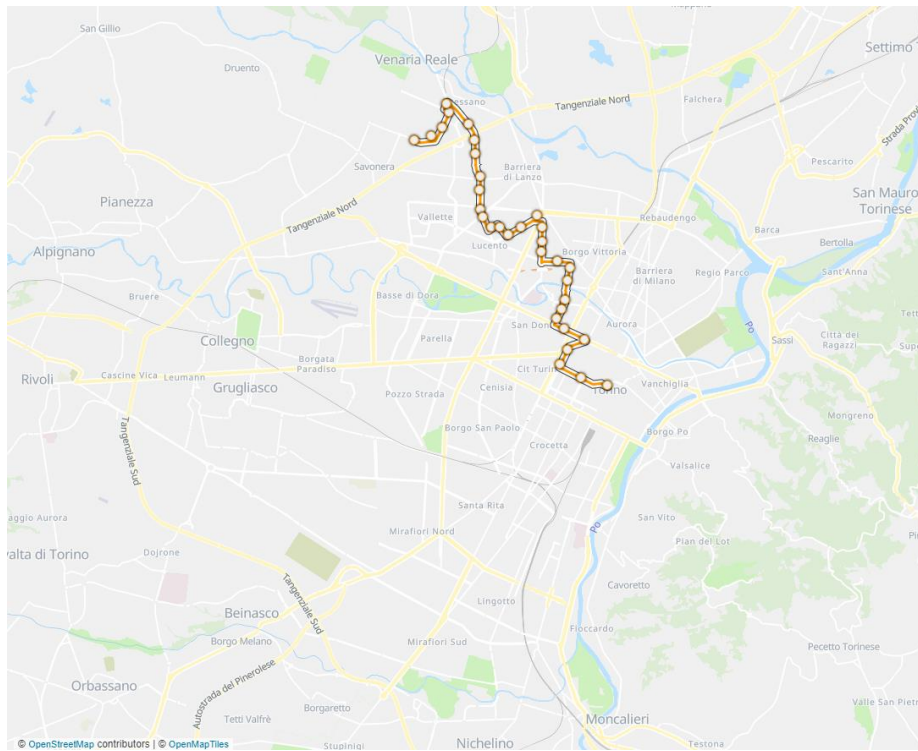


Figura 57: Tratta della linea 72.[32]

- Metro: servita da mezzi con capienza di circa 300 passeggeri, frequenza media di passaggio di 4 minuti.

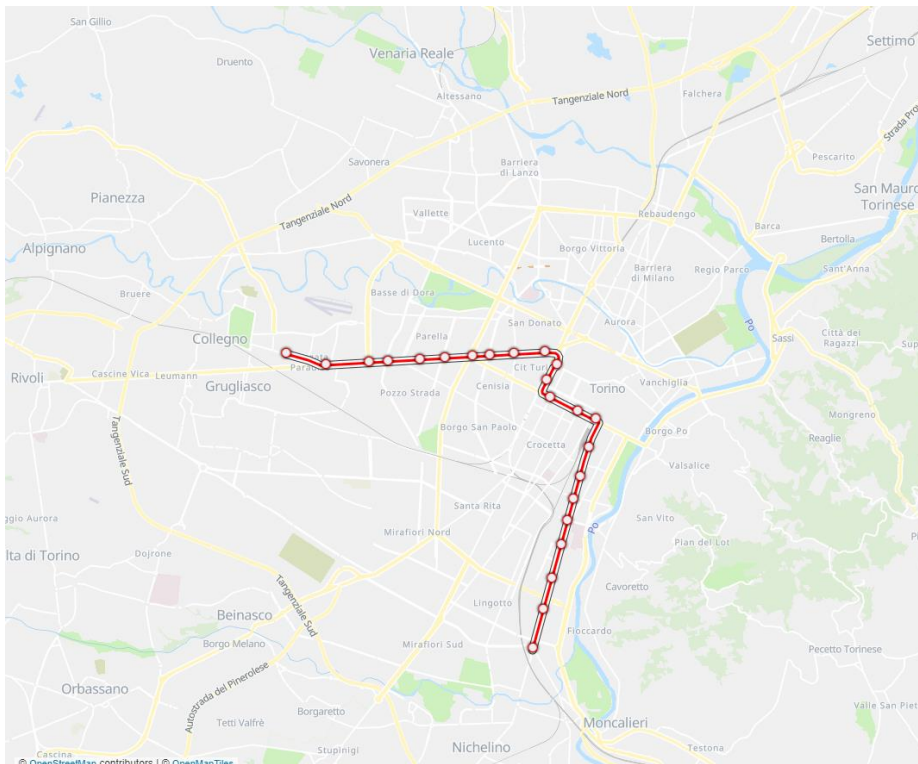


Figura 58: Tratta della linea sotterranea.[32]

Le tratte di maggior interesse riportate, mostrano come ci siano dei punti di notevole interesse strategico, nei quali sarebbe utile introdurre delle infrastrutture relative al nuovo sistema di trasporto. Le considerazioni sui punti di interesse verranno affrontate nel seguito della tesi.

3.3 Topologia del territorio

La conoscenza approfondita della topologia del territorio risulta fondamentale nella progettazione del sistema di un nuovo trasporto pubblico in quanto fornisce indicazioni fondamentali su:

- **Identificazione dei nodi chiave:** la topologia della città aiuta a individuare i nodi di interesse come centri urbani, aree residenziali dense, zone commerciali, istituti educativi e ospedali. Questi nodi diventano punti focali per il sistema di trasporto pubblico, e la loro posizione influenzerà la progettazione delle rotte e delle fermate. Questo punto è stato affrontato esaurientemente nei paragrafi precedenti.
- **Pianificazione delle rotte:** la topologia della città fornisce informazioni sulle strade principali, i percorsi più frequentati e le barriere naturali come fiumi o colline.
- **Valutazione dell'accessibilità:** conoscere la topologia aiuta a valutare l'accessibilità delle diverse parti della città. Questo è importante per garantire che il sistema di trasporto pubblico serva equamente tutte le aree, comprese quelle periferiche o meno sviluppate.
- **Ottimizzazione della rete:** la topologia della città influisce sulla disposizione e l'interconnessione delle strade, delle piste ciclabili e delle aree pedonali. Utilizzando queste informazioni, è possibile ottimizzare la rete di trasporto pubblico per massimizzare l'efficienza e la copertura, garantendo al contempo una buona integrazione con altre modalità di trasporto.
- **Sicurezza e resistenza:** La topologia influisce anche sulla sicurezza e sulla resistenza del sistema di trasporto pubblico, in particolare delle infrastrutture. È importante considerare fattori come la stabilità del terreno, la presenza di zone a rischio di alluvione o frane, e la facilità di accesso per i mezzi di soccorso in caso di emergenza.

3.3.1 Ottimizzazione della rete e nodi chiave

Risulta fondamentale valutare la rete stradale e quindi i nodi chiave forniti dalla topologia della città. La mappa di seguito riporta le arterie torinesi principali, le quali permettono di individuare siti strategici che permettano il risparmio del costo delle infrastrutture per raggiungere i vertiporti (strade, ponti).



Figura 59: Mappa topologica di Torino. [33]

3.3.2 Frane e allagamenti

Conoscere la distribuzione di frane e allagamenti prima di procedere alla progettazione delle nuove infrastrutture è essenziale per garantire la protezione delle persone e delle proprietà. Questa conoscenza consente di identificare le aree a rischio e di progettare le infrastrutture in modo da mitigare questi pericoli. Ad esempio, si possono evitare di costruire in aree soggette a frane o si possono implementare misure di protezione come barriere o drenaggi per prevenire gli allagamenti. Inoltre, la comprensione di questi fenomeni naturali consente di pianificare meglio la manutenzione delle infrastrutture esistenti e di prepararsi adeguatamente a situazioni di emergenza, riducendo così i danni e i rischi per la popolazione. Di seguito vengono riportate le mappe delle zone esposte ai maggiori rischi di frana e allagamento.

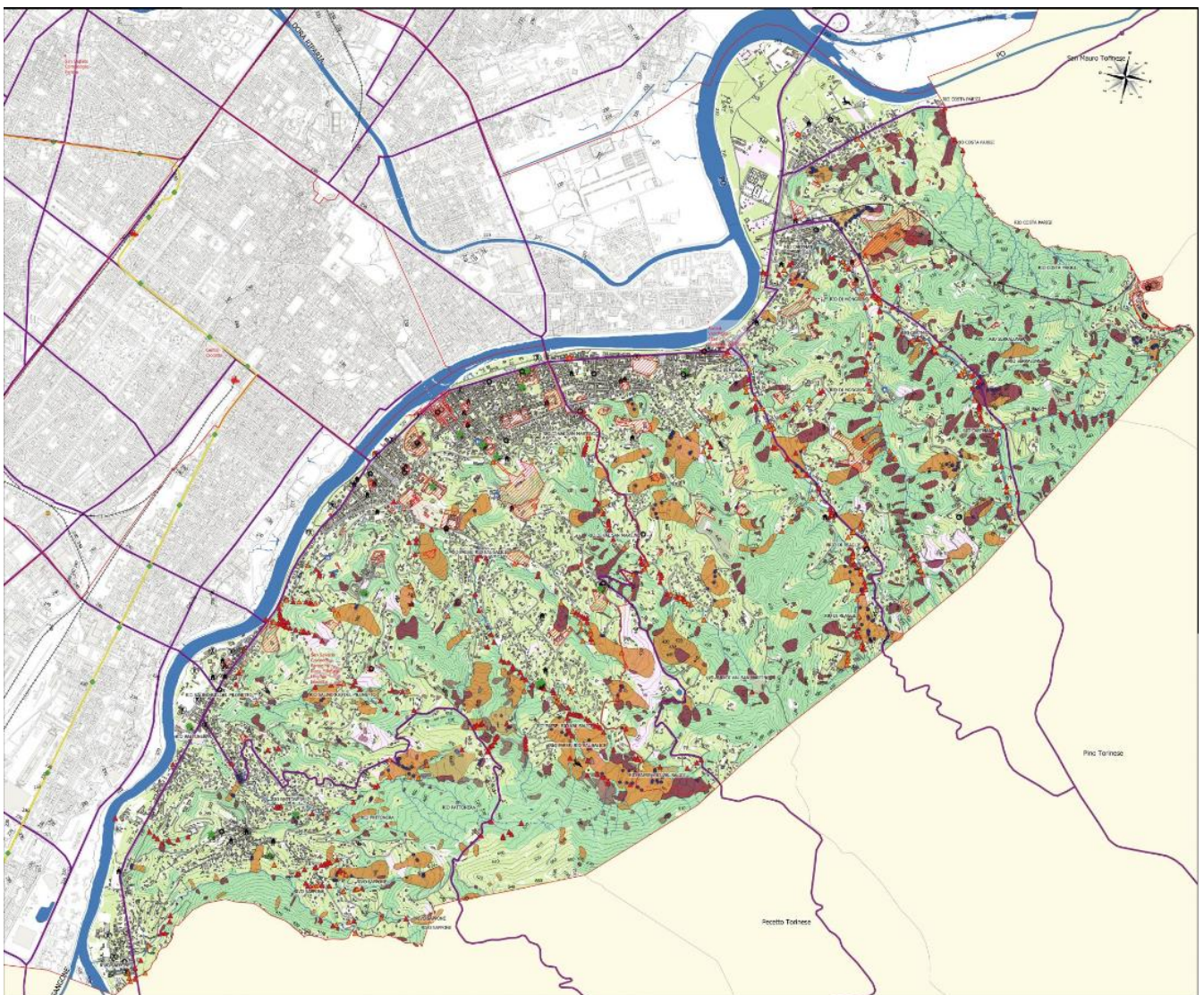


Figura 60: Mappatura delle zone a rischio frana. [34]

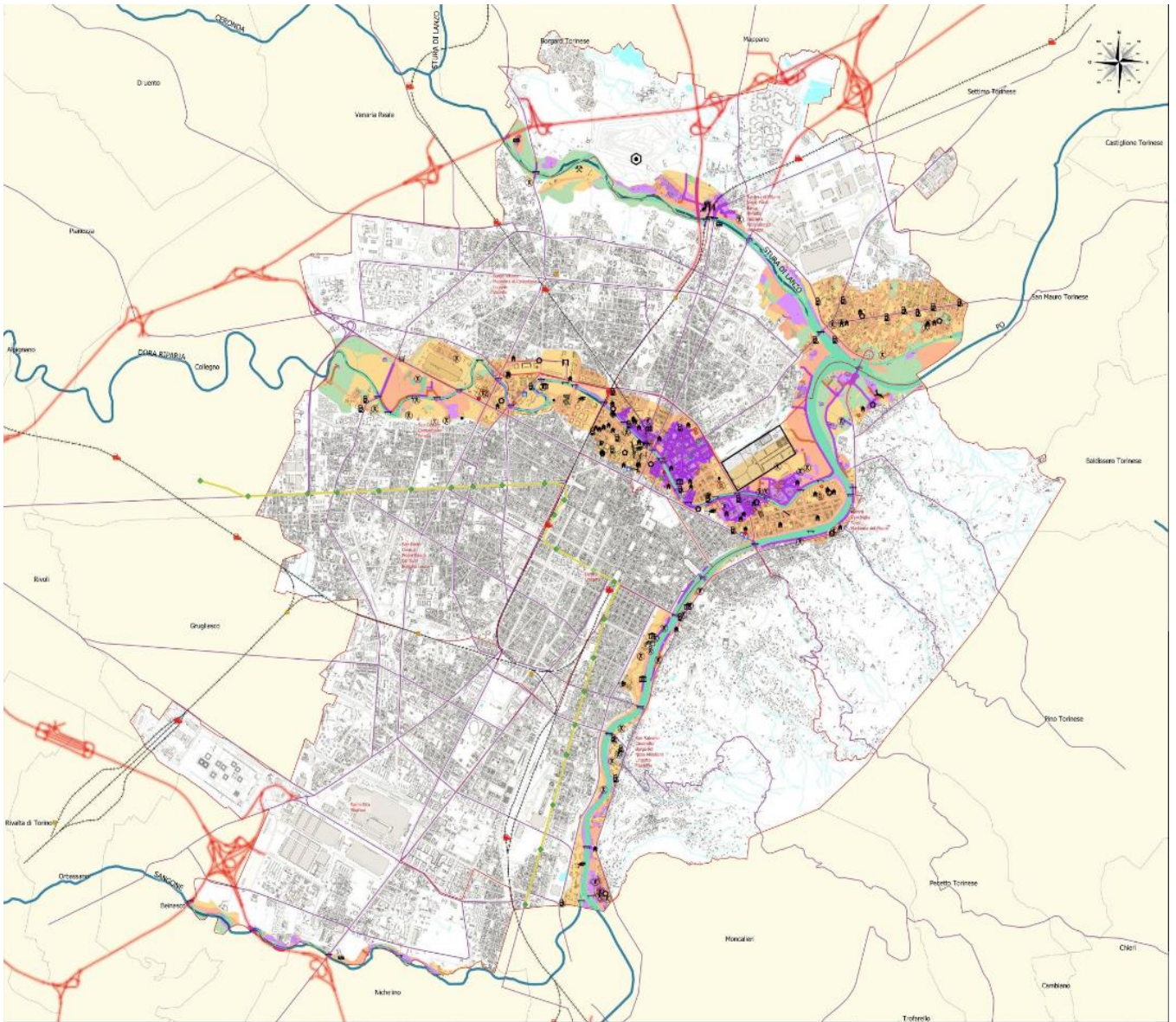


Figura 61: Mappatura delle zone a rischio allagamento.[34]

Le zone evidenziate dalle mappe, saranno con tutta probabilità escluse dalle possibili zone di costruzione dei vertiporti, a meno di alcune importanti eccezioni discusse in seguito.

Risulta essenziale anche valutare quali siano le strade a rischio allagamento, in quanto non permetterebbero la piena affluenza dei passeggeri. Di seguito è riportata la mappa delle possibili strade a rischio allagamento.

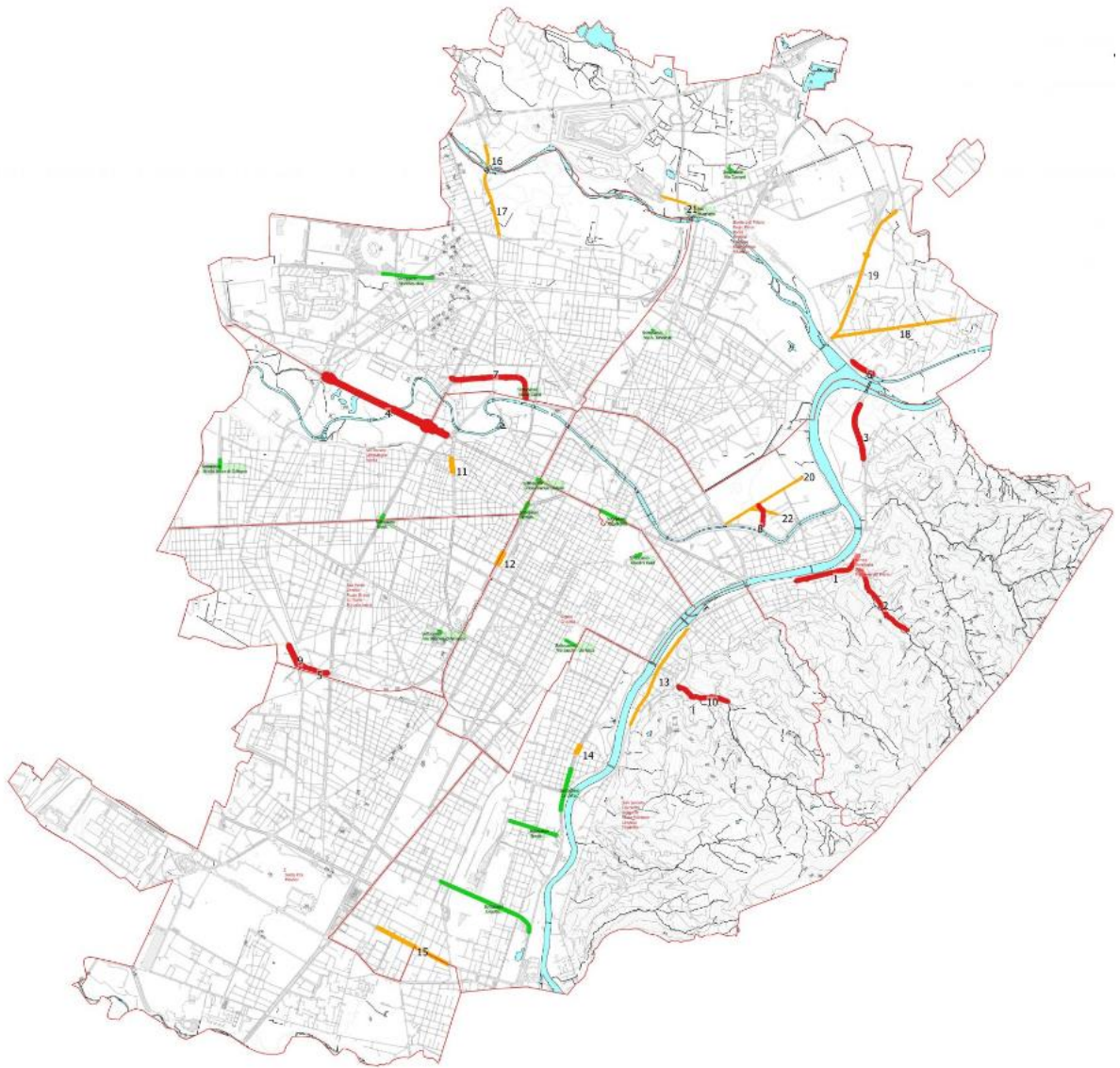


Figura 62: Mappatura delle strade a rischio allagamento.[34]

3.4 Presenza di strutture utili all'UAM

La collocazione di un vertiporto su un edificio richiede che questo soddisfi una serie di caratteristiche fondamentali per garantire sicurezza, funzionalità e conformità normativa. Le principali caratteristiche includono:

- **Struttura e Carico:**

Integrità strutturale: L'edificio deve essere progettato o rinforzato per sopportare il peso degli eVTOL (veicoli elettrici a decollo e atterraggio verticale), delle strutture del vertiporto e delle attività operative associate. Questo include la capacità di sostenere carichi statici e dinamici.

Resistenza ai carichi: La piattaforma deve poter sopportare non solo il peso degli eVTOL, ma anche il peso aggiuntivo di passeggeri, equipaggiamenti e altri materiali.
- **Accessibilità:**

Accesso verticale: Devono esserci ascensori o scale adeguati per garantire l'accesso rapido e sicuro al vertiporto sia per i passeggeri che per il personale.

Vie di fuga: È necessario prevedere vie di fuga sicure e conformi alle normative antincendio e di sicurezza.
- **Dimensioni e Spazio:**

Spazio sufficiente: L'area disponibile deve essere abbastanza grande da permettere le operazioni di decollo e atterraggio degli eVTOL in sicurezza, nonché le manovre a terra.

Area di movimentazione: Spazi adeguati per la movimentazione e il parcheggio degli eVTOL, nonché per l'imbarco e lo sbarco dei passeggeri.
- **Sicurezza:**

Protezione antincendio: Sistemi avanzati di protezione antincendio, inclusi estintori, sprinkler e sistemi di rilevamento fumi.

Recinzioni e controllo accessi: Misure di sicurezza per impedire l'accesso non autorizzato al vertiporto.
- **Supporto Tecnologico:**

Infrastrutture di ricarica: Punti di ricarica per gli eVTOL, con capacità adeguata per supportare le esigenze operative.

Connessioni di comunicazione: Infrastrutture per le comunicazioni, inclusi sistemi di controllo del traffico aereo (ATC) e reti di dati per la gestione operativa.
- **Localizzazione:**

Prossimità a reti di trasporto: Il vertiporto dovrebbe essere facilmente accessibile da altre forme di trasporto, come strade principali, trasporti pubblici o altre infrastrutture di mobilità urbana.

Compatibilità con l'ambiente urbano: Valutazioni dell'impatto acustico e visivo sull'ambiente circostante per minimizzare le interferenze con la vita urbana.

- **Normative e Regolamentazione:**
 Conformità normativa: Rispetto delle leggi e delle normative locali, nazionali e internazionali relative alla sicurezza aerea, alle costruzioni e all'operatività dei vertiporti.
 Zonizzazione e permessi: L'edificio deve essere situato in una zona che consenta l'installazione di un vertiporto e deve ottenere tutti i permessi necessari dalle autorità competenti.
- **Servizi e Comfort:**
 Servizi per passeggeri: Aree di attesa, servizi igienici, aree di ristorazione e altri servizi per migliorare l'esperienza dei passeggeri.
 Facilità di manutenzione: Aree e strutture dedicate alla manutenzione e alla riparazione degli eVTOL.

In questo paragrafo si individueranno alcune strutture presenti sul territorio torinese, in grado di sostenere la presenza del vertiporto senza modifiche o attraverso leggere modifiche strutturali. In tal modo si riduce il costo del vertiporto introducendolo in un contesto precedentemente attivo sul territorio.

3.4.1 Centro commerciale 'Lingotto'

Il centro commerciale del Lingotto può sostenere la costruzione di un vertiporto sul suo tetto grazie alla sua struttura solida e robusta, originariamente progettata per la produzione automobilistica e ora adattata a scopi commerciali. La vasta area piatta del tetto offre lo spazio necessario per un eliporto e potrebbe rispettare i requisiti di sicurezza per l'atterraggio degli eVTOL. È presente un eliporto oltre ad una pista automobilistica, questo dimostra che la struttura è sufficientemente robusta da permettere l'atterraggio e lo stazionamento di eVTOL.

Inoltre, la posizione centrale del Lingotto e la sua accessibilità da diverse vie di accesso potrebbero rendere conveniente l'utilizzo del vertiporto per gli utenti, data la grande affluenza di passeggeri dovuti alla presenza della stazione ferroviaria e dell'autostazione a pochi metri.

L'installazione di un vertiporto potrebbe anche offrire opportunità commerciali aggiuntive per il centro commerciale, attirando clienti interessati a viaggiare con eVTOL per motivi di lavoro o di svago e aumentando la visibilità del complesso commerciale.

La presenza di ampi spazi permette anche l'allocazione delle zone di parcheggio, della manutenzione, dei controlli di sicurezza e sale d'attesa per i passeggeri.

Dall'immagine seguente si evidenzia come esso abbia ampi spazi liberi circostanti per permettere un sicuro decollo e atterraggio.

Tutte queste considerazioni lo rendono un ottimo candidato per la costruzione di un vertihub.



Figura 63: Tetto del centro commerciale 'Lingotto'. [35]

3.4.2 Palazzo Sanpaolo

Il Palazzo Sanpaolo di Torino potrebbe essere un'ottima base su cui costruire un vertiporto per diverse ragioni. La sua posizione centrale e facilmente accessibile lo rende una scelta strategica, esso è posizionato in prossimità della stazione ferroviaria 'Porta Susa' e dell'autostazione su Corso Vittorio Emanuele II. Questo lo rende un ottimo candidato in termini di afflusso di passeggeri.

Le sue ampie dimensioni offrono lo spazio necessario per le infrastrutture del vertiporto, come piste di decollo e atterraggio e servizi di supporto.

La robustezza della struttura del palazzo potrebbe ridurre la necessità di opere di fondazione complesse. Inoltre, l'edificio, iconico e ben noto a Torino, garantirebbe una maggiore visibilità e prestigio al servizio di trasporto aereo urbano.

La trasformazione del Palazzo Sanpaolo in un vertiporto potrebbe stimolare lo sviluppo urbano e la rigenerazione dell'area circostante, generando un maggior interesse da parte di investitori e turisti.

Costruire il vertiporto sul tetto del palazzo comporterebbe anche alcuni aspetti negativi. Lo spazio limitato non permetterebbe l'introduzione di zone di sosta sufficienti a smaltire il numero di passeggeri previsto.

Inoltre, un problema rilevante consisterebbe far raggiungere il 39° piano a tutti i passeggeri, sfociando in una spesa elevata per la costruzione di ascensori che possano smaltire tale portata.

Per questi motivi tale edificio potrebbe ospitare al massimo un vertiporto e non un vertihub. Per la strategica posizione sarebbe preferibile un vertihub.



Figura 64: Palazzo Sanpaolo.[36]

3.5 Trasporto unidirezionale

La valutazione del trasporto unidirezionale riveste un'importanza cruciale nell'ambito della progettazione e implementazione di sistemi di Urban Air Mobility (UAM), in quanto implica l'analisi dettagliata dei flussi di traffico aereo per ottimizzare l'efficienza operativa e la sostenibilità ambientale. Tale valutazione, sottesa a complesse analisi dei dati di traffico e dei modelli di domanda, mira a minimizzare i voli vuoti e massimizzare l'utilizzo delle risorse a disposizione, assicurando la massima redditività e competitività del sistema UAM sul mercato dell'industria aerospaziale.

L'approccio alla valutazione del trasporto unidirezionale implica una serie di metodologie e strumenti analitici, tra cui l'uso di modelli di simulazione del traffico aereo, l'analisi dei flussi di passeggeri e la pianificazione strategica delle rotte e degli orari di volo. Attraverso queste metodologie, è possibile identificare le rotte a maggiore densità di traffico e le fasce orarie più critiche, consentendo una gestione più efficiente delle risorse e una migliore ottimizzazione dei servizi offerti.

Inoltre, la valutazione del trasporto unidirezionale riveste un ruolo chiave nella progettazione dell'infrastruttura necessaria per supportare il sistema UAM, inclusi i vertiporti, stazioni di ricarica e di servizio, nonché infrastrutture di supporto e manutenzione. Questa progettazione infrastrutturale deve tener conto delle esigenze specifiche del trasporto unidirezionale, garantendo una distribuzione equilibrata delle

risorse lungo le rotte più frequentate e in posizioni strategiche per ottimizzare l'efficienza operativa e la sicurezza del sistema.

In aggiunta, la valutazione del trasporto unidirezionale implica anche una considerazione approfondita degli aspetti legati alla gestione del traffico aereo, compresa l'implementazione di sistemi avanzati di controllo del traffico e di gestione della sicurezza, al fine di garantire una coordinazione efficace dei movimenti degli aeromobili e prevenire congestioni e sovraccarichi nelle rotte più frequentate.

In questa trattazione si valuta la possibilità di effettuare trasporti unidirezionali e il loro impatto economico sul servizio attraverso un'analisi semplificata che prenda in considerazione la sola valutazione della direzione del flusso di passeggeri del sistema di mobilità tradizionale.

Analizzando i dati raccolti da GTT [31] e incrociandoli con le tratte selezionate nel paragrafo 3.2.1 si valuta che (le valutazioni seguenti sono riferite ai giorni feriali):

- Linea 2: il flusso risulta equamente distribuito nelle due direzioni fino alle 6, dalle 9 alle 16 e dalle 20 fino a fine servizio, Dalle 6 alle 9 risulta preponderante il flusso dalle periferie al centro città, dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 3: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Linea 4: il flusso risulta equamente distribuito nelle due direzioni fino alle 6, dalle 9 alle 16 e dalle 20 fino a fine servizio, Dalle 6 alle 9 risulta preponderante il flusso dalle periferie al centro città, dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 9: il flusso dal capolinea nord al sud risulta preponderante fino alle 16, dalle 17 a fine servizio si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 15: il flusso risulta equamente distribuito dal capolinea est fino alla fermata 'Vittorio Veneto' per tutta la durata del servizio. Dal capolinea ovest fino alla fermata 'Vittorio Veneto' si ha flusso quasi unidirezionale dalle 6 alle 13, dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 16: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Linea 17: il flusso risulta preponderante da Rivoli a centro città di Torino da inizio servizio fino alle 14. Dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 33: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Linea 36: il flusso risulta preponderante da Rivoli a città di Torino da inizio servizio fino alle 14. Dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.

- Linea 42: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Linea 52: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Linea 58: il flusso risulta preponderante dal capolinea sud al capolinea ovest dalle 6 alle 9. Dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 62: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Linea 68: il flusso risulta preponderante dal capolinea nord a centro città dalle 6 alle 13. Dalle 16 alle 20 si palesa il fenomeno opposto.
- Linea 72: il flusso risulta equamente distribuito in entrambe le direzioni per tutta la durata del servizio.
- Metro: il flusso di passeggeri risulta molto condizionato a seconda dell'orario. Dalle 5:30 alle 6:30 e dalle 15 alle 18 si verifica un flusso unidirezionale dal centro città verso i capolinea, dalle 7 alle 13 si palesa il fenomeno opposto. Nelle restanti fasce orarie, il flusso di passeggeri risulta omogeneo.
- La linea diretta per l'aeroporto di Caselle Torinese gestita da ARRIVA non evidenzia gradie discrepanze tra le due direzioni del flusso.

Questo tipo di considerazioni non influiscono direttamente sul posizionamento delle infrastrutture ma hanno notevole rilevanza sul costo del servizio.

Si stima che a causa di tale flusso unidirezionale il costo del servizio debba aumentare del 30% per far fronte ai viaggi senza passeggeri.

3.6 Collocazione delle infrastrutture

Al fine di individuare i siti adatti all'introduzione delle nuove infrastrutture relative alla fase iniziale del sistema UAM, vengono forniti dei livelli di importanza ai singoli parametri illustrati nel paragrafo 3.5.

Attraverso tale punteggio saranno ricavate le zone di maggior interesse, le quali verranno intrecciate con la topologia della città necessaria a stabilire quali siano i siti disponibili all'introduzione di tali infrastrutture.

I parametri di spicco risultano essere la densità abitativa e il flusso di utilizzo del trasporto pubblico tradizionale.

I dati relativi alla densità abitativa vengono normalizzati attraverso la massima densità abitativa torinese.

$$\rho = \frac{\text{densità abitativa}}{\text{densità abitativa massima}}$$

I dati relativi al flusso di utilizzo dei mezzi pubblici tradizionali viene normalizzato attraverso il flusso massimo registrato.

$$\phi = \frac{\text{flusso di utilizzo dei mezzi pubblici}}{\text{flusso massimo di utilizzo dei mezzi pubblici}}$$

Al flusso di utilizzo dei mezzi pubblici viene conferito un peso specifico maggiore, pari al doppio di quello conferito alla densità abitativa, in quanto tale indicatore risulta essere di maggior rilievo per la caratterizzazione di un nuovo sistema di trasporto pubblico.

Il punteggio totale da conferire ad ogni zona della città in esame viene valutato attraverso la relazione:

$$\epsilon = \rho + 2\phi$$

Tale punteggio può variare da 0 (punto di minimo interesse) a 3 (punto di massimo interesse).

Nella seguente pagina vengono riportati i punteggi ottenuti secondo la seguente scala cromatica:

- Da 0 a 0.5: nessun colore;
- Da 0.51 a 1: giallo;
- Da 1.1 a 2: arancione;
- Da 2.1 a 3: rosso.

Tali risultati vengono poi incrociati con le mappe topologiche della città in modo tale da valutare i siti adatti alle nuove infrastrutture.

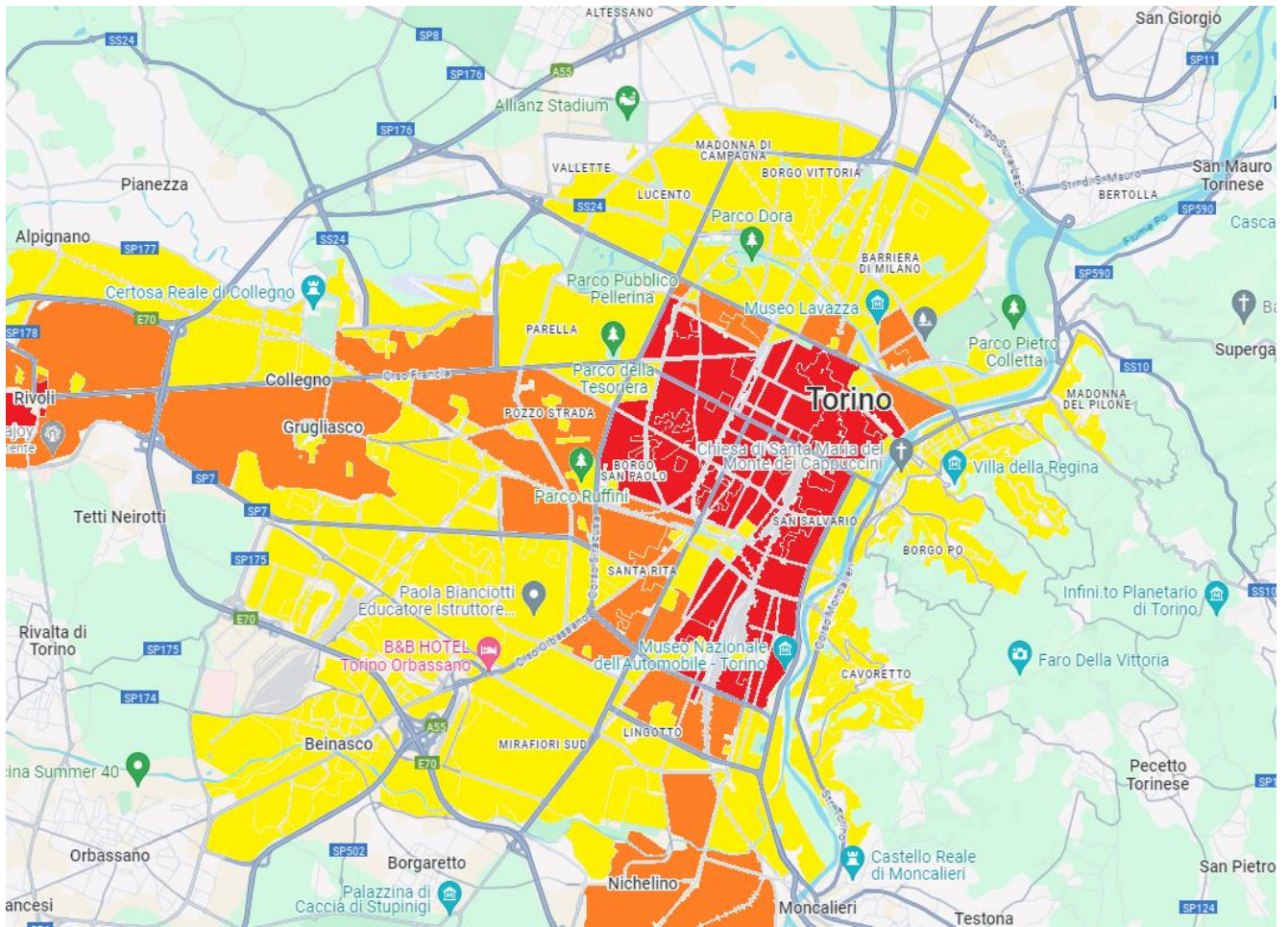


Figura 65: Punteggio(€)

Analizzando le informazioni riportate in precedenza, la distribuzione migliore infrastrutture relative all'UAM per la fase iniziale del progetto, risulta essere quella riportato nelle figure di seguito. Verranno indicati esclusivamente i vetihub e i vertiport, le vertistation non hanno grosse restrizioni di costruzione e bassi costi, potranno essere introdotte anche su richiesta. Si stima che per la città di Torino, nelle fasi iniziali del progetto il numero di vertistation si aggiri intorno alle 30 crescendo anche del 200% annualmente. Le città di medie dimensioni hanno come limite di saturazione delle vertistation 350-400 unità. Queste stime sono fatte in base alla densità abitativa media e al tenore medio di vita, per valutare la percentuale della popolazione che potrebbe permettersi una vertistation privata. Il limite di saturazione è dato dalla somma di vertistation pubbliche e private.

In rosso verranno indicati i vertihub, in verde i vertiporti.

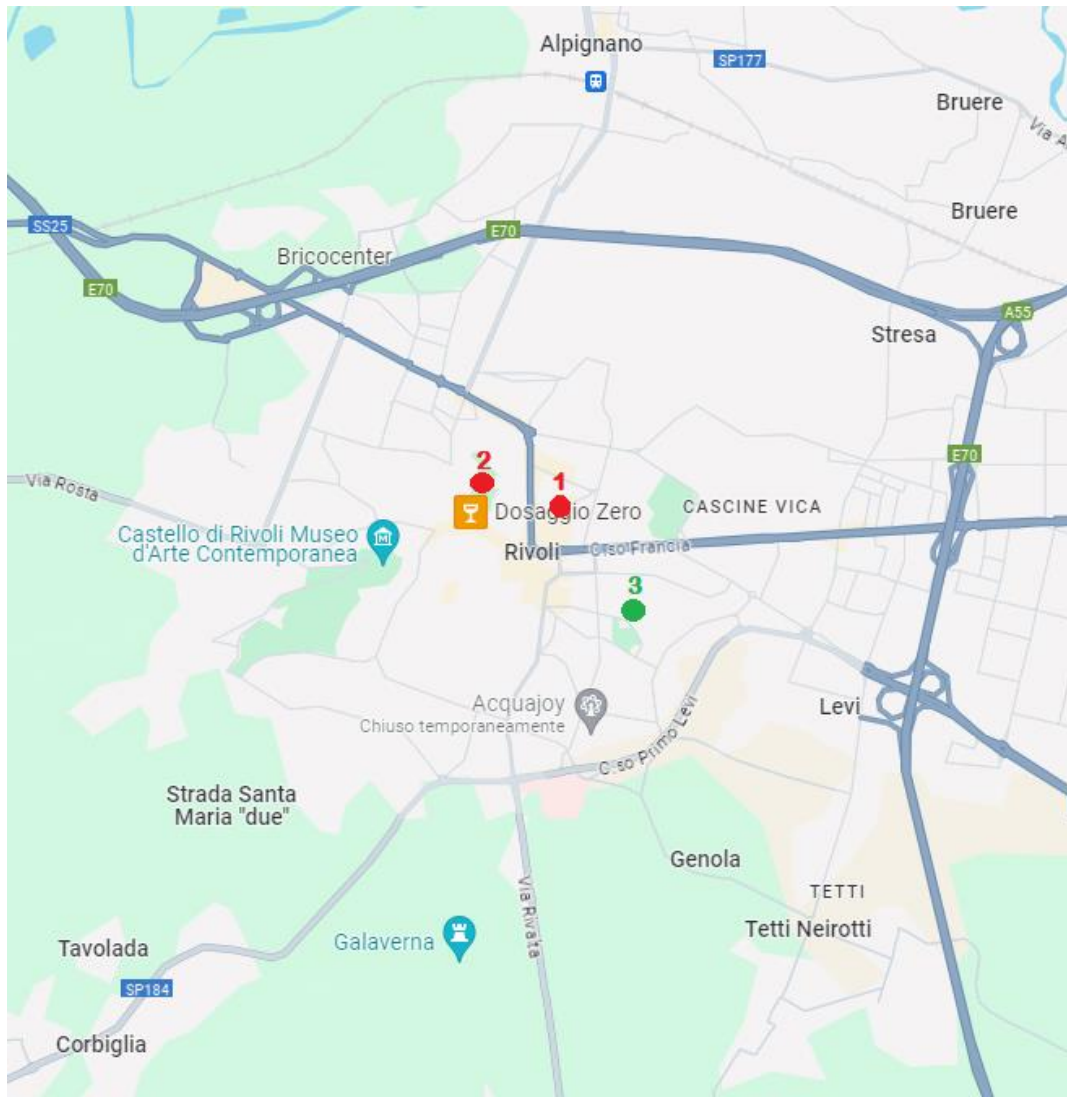


Figura 66: Collocazione infrastrutture nella zona di Rivoli.

- 1: Vertihub posizionato nell'ex centro sportivo 'Rugby Rivoli', posizionamento centrale di strategico interesse, superficie sufficiente all'introduzione di un vertihub. (3 pads)
- 2: Vertihub posizionato nel campo di via Palestro. Ampio spazio disponibile per la collocazione di un vertihub. (3 pads)
- 3: Vertiporto posizionato in ampia zona in Str. Nuova Tetti. Spazio disponibile ristretto ma sufficiente all'introduzione del vertiporto. (1 pad)

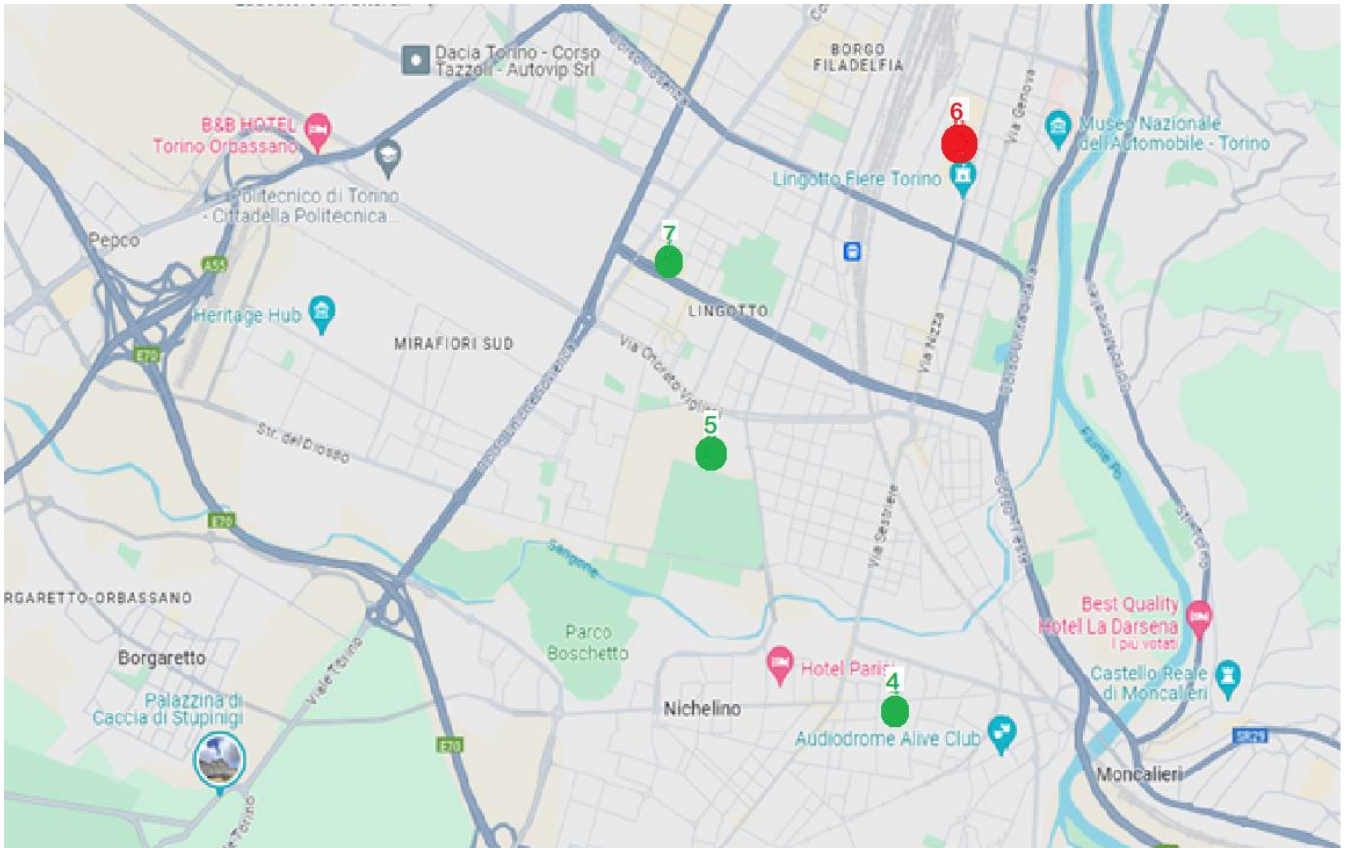


Figura 67: Collocazione delle infrastrutture Torino sud.

- 4: Vertiporto nel parco in Via dei martiri a Nichelino. Non è necessario un vertihub, a causa della bassa densità abitativa. (2 pads)
- 5: Vertiporto introdotto nel golf club Colonnetti. In questa zona non è necessario introdurre un vertihub. (2 pads)
- 6: Grande vertihub sul tetto del centro commerciale lingotto, discusso nel paragrafo 3.4.1. (6 pads)
- 7: Vertiporto posizionato Corso Traiano, la posizione strategica permette di sfruttarlo per servire il centro industriale adiacente. (2 pads)
- 8: Vertiporto nel parco di via Sabaudia, nonostante la bassa densità abitativa risulta molto utile per attirare viaggiatori da Collegno e Grugliasco. (2 pads)
- 9: Vertiporto in Via Madonna delle salette: strategico per servire l'adiacente zona industriale. (2 pads)

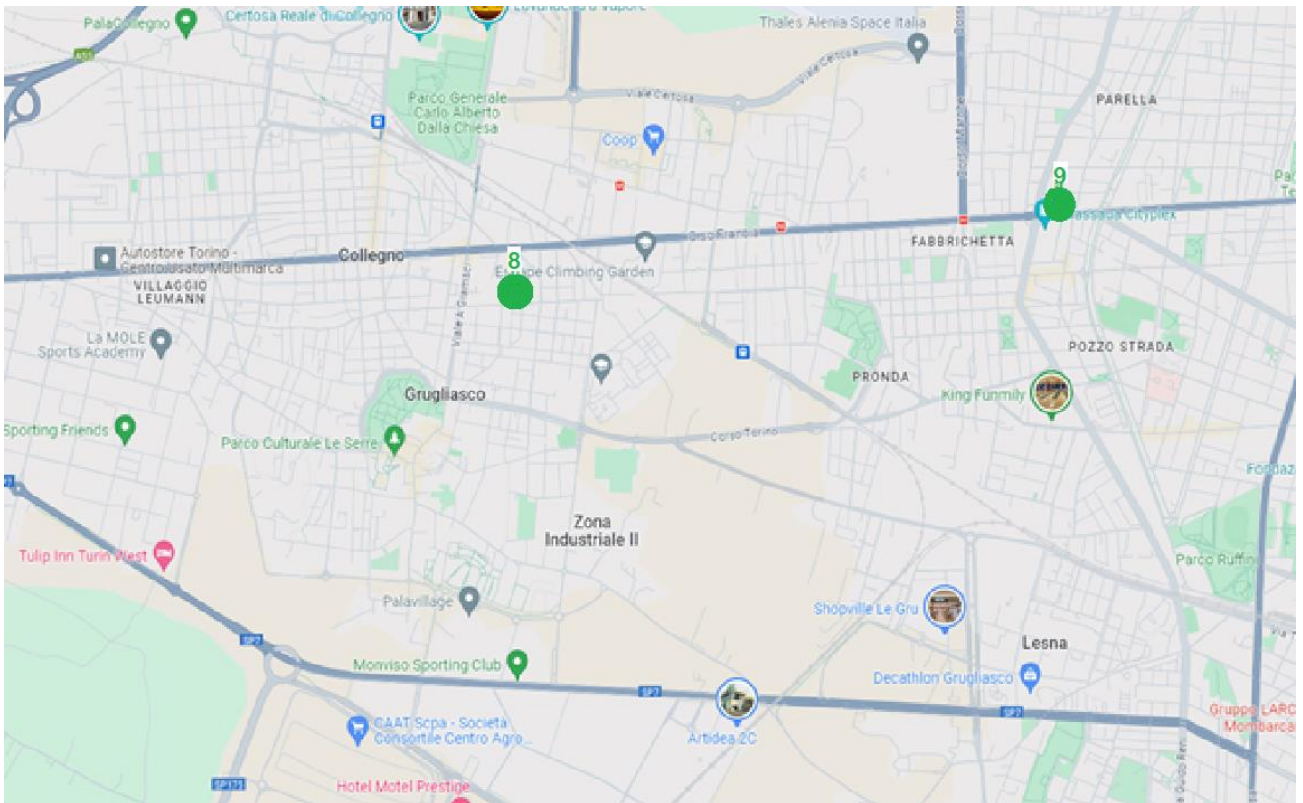


Figura 68: Collocazione delle infrastrutture Torino ovest.

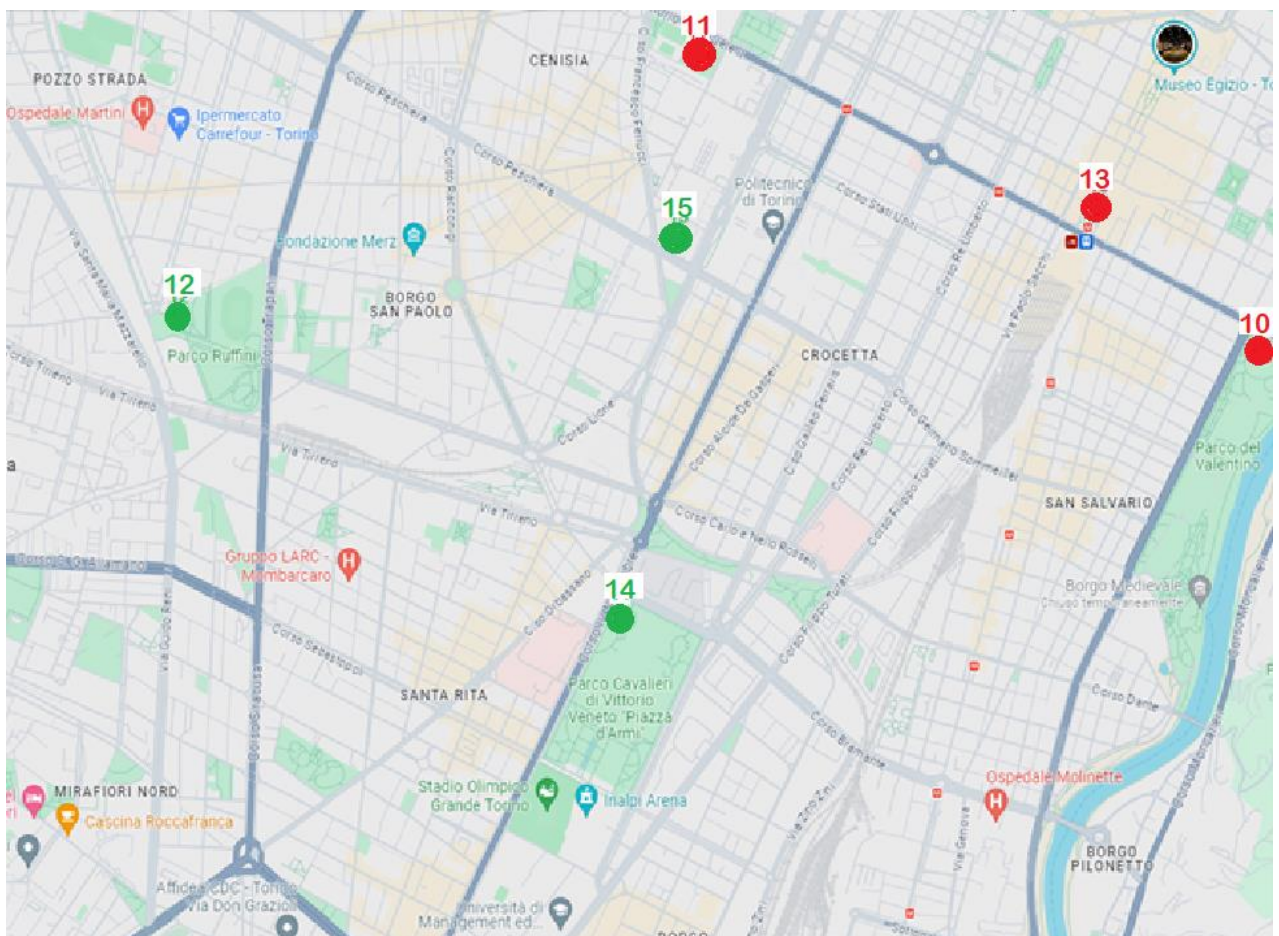


Figura 69: Collocazione delle infrastrutture Torino Centro.

- 10: Importante vertihub nell'estremo nord del parco del Valentino. Snodo fondamentale della rete UAM. In questa zona si ha grande densità abitativa e intersezione con i mezzi di trasporto tradizionale, inoltre è utile per tutti i passeggeri che abitano nella zona est di Torino, dove non verranno introdotti vertiporti a causa del rischio frane. I costi di questo hub saranno molto elevati dovuti alle dimensioni e alla zona a rischio idrico.
Il terreno dovrà essere bonificato, la struttura dell'hub sarà sopraelevata per arginare il rischio dovuto alle esondazioni del fiume Po. (6 pads)
- 11: Vertihub di fondamentale importanza posizionato nel parco su corso Vittorio Emanuele II. È stato scelto di posizionare in vertihub in questo punto per sostituire l'ipotetico hub del palazzo Sanpaolo per ovviare ai problemi ed ottenere i benefici elencati nel paragrafo 3.4.2. Si avrà il bisogno di regolare il traffico aereo dovuto alla presenza dell'alto palazzo adiacente. (5 pads)
- 12: Vertiporto posizionato nel Parco Ruffini. Utile a smaltire l'elevata densità abitativa di queste zone. Non è presente sufficiente spazio per un vertihub a causa dei numerosi impianti sportivi. (2 pads)
- 13: Vertihub posizionato sul piazzale antistante alla stazione di Porta Nuova. Necessario a smaltire il flusso di passeggeri in arrivo a e in partenza dalla stazione adiacente e utile ai turisti intenzionati a raggiungere il centro storico. (4 pads)
- 14: Vertiporto posizionato all'estremo nord di piazza d'armi. Utile a smaltire il flusso dovuto alla presenza dello stadio olimpico 'Grande Torino' e alla grande densità abitativa della zona. (2 pads)
- 15: Vertiporto posizionato nel parcheggio del Politecnico di Torino. Utile allo smaltimento dei passeggeri per e dal politecnico stesso oltre che da tutta la zona 'Crocetta' ad alta densità abitativa. (1 pad)
- 16: Vertihub posizionato nel parco Aurelio Peccei che sia in grado di smaltire l'alta densità di popolazione della zona e i passeggeri della stazione Torino Dora. (4 pads)
- 17: Vertiporto posizionato nel Parco della Tesoreria necessario a smaltire il numero di passeggeri derivante dall'elevata densità abitativa della zona. (2 pads)
- 18: Vertihub e hangar di dimensioni notevoli adiacenti all'aeroporto di Caselle Torinese. Necessario a collegare l'aeroporto con la città, smaltendo un flusso elevato di passeggeri. Esso dovrà fungere anche da luogo di manutenzione e deposito per gli eVTOL. (10 pads)

Non sono stati introdotti vertiporti nel centro storico a causa del divieto di costruzione di nuove infrastrutture.

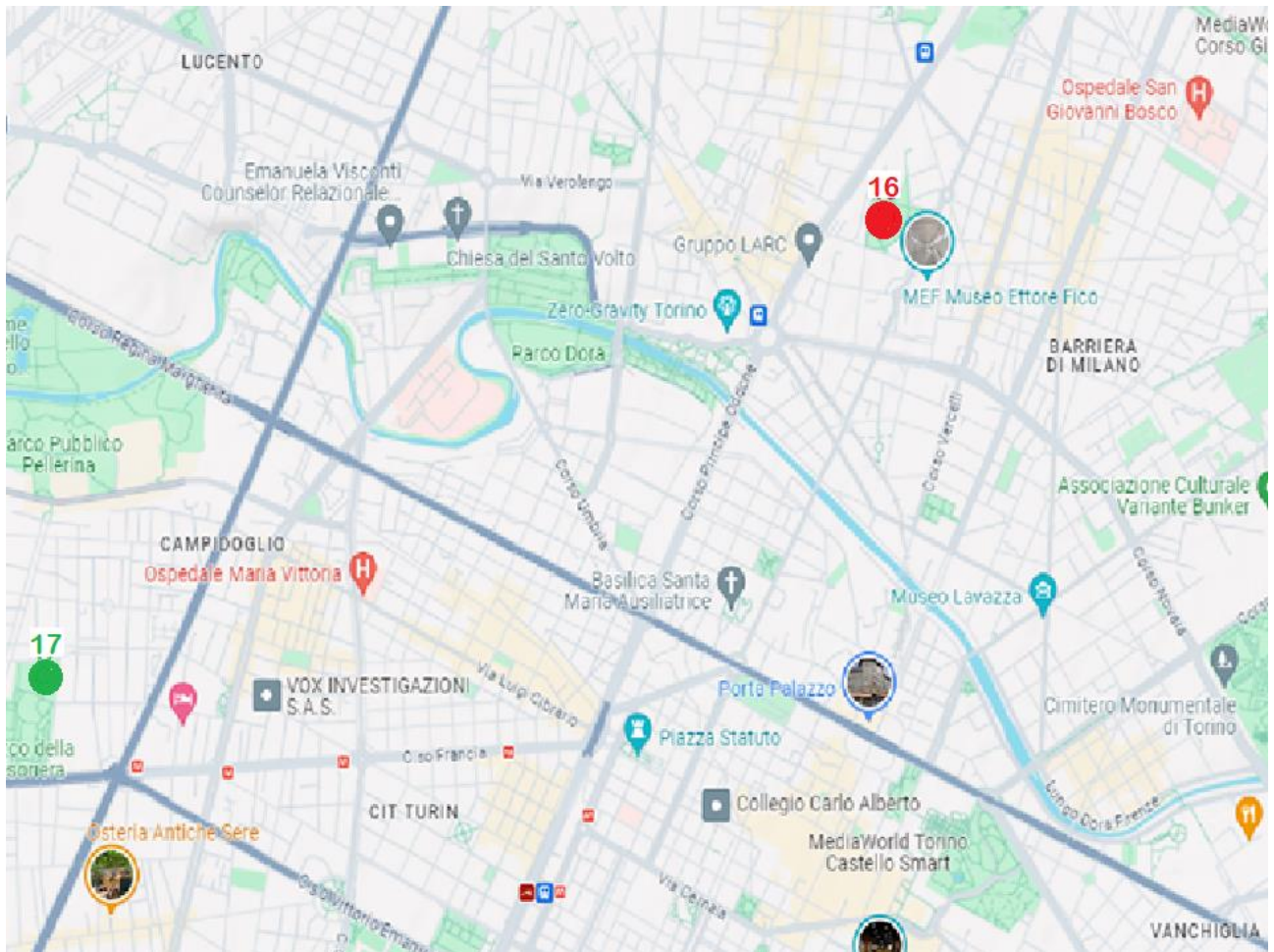


Figura 70: Collocazione delle infrastrutture Torino Nord.

Nella zona nord di Torino il numero delle infrastrutture risulta minore in quanto non sono presenti siti adatti alla costruzione, inoltre la presenza del fiume Dora rende le poche zone libere inadatte alla costruzione.

Riassumendo, si prevede che in totale vengano adoperati:

- Vertihub: 8 strutture per un totale di 41 pads.
- Vertiport: 10 strutture per un totale di 18 pads.
- Vertistation: 30 strutture per un totale di 30 pads.

3.7 Potenzialità del vertiporto

La potenzialità di un vertiporto, intesa come la capacità di gestire un certo numero di decolli e atterraggi di eVTOL in un determinato lasso di tempo, è un elemento cruciale per diversi motivi:

- Efficienza operativa: una maggiore capacità di gestione dei decolli e degli atterraggi consente al vertiporto di gestire un volume più elevato di traffico aereo urbano. Questo porta a una maggiore efficienza operativa e riduce i tempi di attesa per i passeggeri.

- Sostenibilità del sistema di trasporto: un vertiporto con una maggiore capacità può supportare un numero maggiore di viaggiatori e aiutare a ridurre la congestione del traffico e le emissioni di gas serra legate al trasporto su strada, contribuendo così alla sostenibilità ambientale.
- Scalabilità del servizio: una capacità flessibile consente al vertiporto di adattarsi dinamicamente alle variazioni della domanda di trasporto pubblico, consentendo una scalabilità del servizio in base alle esigenze degli utenti e agli eventi o alle situazioni emergenziali.
- Attrattività per gli utenti: un vertiporto con una capacità elevata è più attraente per i passeggeri, poiché offre maggiore flessibilità nelle prenotazioni dei voli e riduce i tempi di attesa e i possibili disagi legati alla congestione.
- Competitività del servizio: un vertiporto con una maggiore capacità può essere più competitivo sul mercato, attirando un maggior numero di operatori e utenti e contribuendo alla crescita e alla diffusione del trasporto aereo urbano.
- Pianificazione infrastrutturale: La conoscenza della potenzialità del vertiporto è essenziale per la pianificazione e lo sviluppo delle infrastrutture aeroportuali, consentendo di dimensionare adeguatamente gli spazi e le risorse necessarie per gestire il traffico aereo urbano.

Al fine di valutare la potenzialità di un vertiporto è utile conoscere: la tipologia del vertiporto in analisi, il numero di pads per il decollo e l'atterraggio nonché la loro disposizione, il tempo di ricarica medio dell'eVTOL considerato, il tempo necessario ad effettuare i controlli, il tempo necessario allo sbarco e all'imbarco dei passeggeri, le normative che regolano gli spazi aeroportuali e la conseguente gestione del traffico aereo.

Nelle seguenti trattazioni verrà utilizzato come esempio l'eVTOL 'Volocity', il quale rappresenta la soluzione aerea migliore per gli spostamenti cittadini, con un Range di 35 km e tempo di ricarica rapida delle batterie pari a 8 minuti. La sostituzione del pacco di batterie richiederebbe ad un manutentore esperto circa 11 minuti, ottenendo grossi vantaggi sulla vita operativa delle batterie.

Il tempo necessario ai controlli verrà in questa analisi trascurato, si prevede che esso sia molto minore del tempo necessario agli eVTOL per decollare/atterrare, in quanto tali controlli sono meno accurati di quelli aeroportuali.

Il tempo totale di imbarco e sbarco dei passeggeri può variare a seconda della configurazione del vertiporto.

Le norme riguardanti il traffico aereo dell'UAM sono ancora in fase decisionale, ci si basa quindi su quanto viene esposto nella normativa per il traffico di elicotteri. Essa riporta che il velivolo approcciante debba attendere che il velivolo in fase di decollo abbia concluso la fase di allontanamento dall'eliporto prima di iniziare la fase di approccio.

Valutate le alte prestazioni del Volocity, si stima che siano necessari circa 3 minuti dalla chiusura del portellone alla fine della fase di allontanamento dal vertiporto.

La fase di discesa si stima duri circa 2 minuti.

3.7.1 Vertihub

La capacità dei vertihub varia ampiamente a seconda del numero di pads dedicati all'atterraggio presenti.

Si procede attraverso la valutazione di un vertihub a configurazione doppia (due pads).

Di fondamentale importanza è l'analisi del numero di velivoli che necessitano di ricarica immediata. Il

Volocity ha un range di 35 km, quindi può effettuare fino a due tratte in sicurezza (tratta media stimata all'interno della città di Torino pari a 12 km). Se tutti i velivoli provenissero da altri vertihubs cittadini si avrebbe la necessità di ricarica per il 50% di essi. Bisogna però introdurre la presenza di velivoli provenienti da vertistation e da vertihub presenti fuori città (ad esempio dall'aeroporto di Caselle).

La necessità di ricarica sale quindi al 70-85%.

Si valuta quindi il tempo necessario allo spostamento dell'eVTOL dal pad di atterraggio alla zona di ricarica per permettere il decollo/atterraggio di altri velivoli. Per questa configurazione di verihub si stima un tempo necessario da 2 ai 4 minuti.

Valutando il caso peggiore, di massima attesa, risultano necessari circa 16 minuti dall'atterraggio alla fine della fase di allontanamento, sostituendo completamente il pacco batterie.

Durante la ricarica si ha il tempo sufficiente all'atterraggio e al decollo di un eVTOL. Quindi utilizzando un solo pad, in 16 minuti si potrebbero avere 2 decolli.

Questa configurazione porta allo smaltimento di 32 passeggeri utilizzando il Volocity e 64 utilizzando il Joby S4.

Aumentando il numero di pads disponibili cresce la portata di passeggeri smaltibili, quasi in proporzionalità diretta (si paga un leggero aumento dei tempi di imbarco e sbarco e dei tempi di trasporto dell'eVTOL alle zone di ricarica).

3.7.2 Vertiport

Per i vertiporti valgono le stesse considerazioni introdotte per i vertihubs, con la differenza di avere un tetto massimo di 2 pads e un numero limitato di zone di ricarica o stazionamento.

3.7.3 Vertistation

Le vertistation non hanno la capacità di ricarica, quindi il tempo minimo che intercorre tra una fase di approccio e la fase di allontanamento è pari al tempo necessario a compiere le due fasi appena indicate più il tempo di sbarco/imbarco.

Il tempo minimo necessario, valutando lo scenario peggiore, è di 7 minuti.

3.8 Orari e regimi di funzionamento

Definire gli orari di funzionamento dei vertiporti durante la progettazione del sistema di trasporto UAM (Urban Air Mobility) è essenziale per una serie di motivi tecnici e operativi che contribuiscono all'efficienza, alla sicurezza e alla sostenibilità del sistema nel suo complesso.

Innanzitutto, la definizione degli orari di funzionamento permette di ottimizzare l'efficienza operativa del sistema di UAM. Stabilendo fasce orarie specifiche per le operazioni di decollo e atterraggio, è possibile ridurre la congestione del traffico aereo, distribuendo in modo uniforme il carico di lavoro e garantendo che i vertiporti possano gestire il volume previsto di eVTOL senza sovraccarichi. Questo consente di pianificare le operazioni in modo da evitare periodi di inattività e massimizzare l'utilizzo delle infrastrutture.

Inoltre, la determinazione degli orari di funzionamento contribuisce significativamente alla gestione della sicurezza. Operare all'interno di finestre temporali ben definite consente di coordinare meglio le operazioni tra i diversi vertiporti e i veicoli aerei, riducendo il rischio di incidenti e migliorando la capacità di risposta in caso di emergenze. La sincronizzazione delle operazioni di decollo e atterraggio minimizza le interferenze e ottimizza l'uso dello spazio aereo.

La pianificazione degli orari di funzionamento è anche fondamentale per la sostenibilità ambientale del sistema UAM. Riducendo i periodi di attività al minimo necessario e concentrando le operazioni durante le ore di maggiore domanda, è possibile diminuire il consumo energetico e le emissioni acustiche e inquinanti. Questo approccio è particolarmente importante nelle aree urbane densamente popolate, dove la riduzione dell'impatto ambientale è cruciale per l'accettazione sociale del nuovo sistema di trasporto.

Gli orari di funzionamento influiscono direttamente sull'integrazione del sistema di UAM con altre modalità di trasporto pubblico. Pianificare le operazioni dei vertiporti in modo coordinato con gli orari dei treni, degli autobus e delle metropolitane facilita i trasferimenti multimodali, migliorando l'accessibilità e la comodità per i passeggeri. Questo approccio integrato favorisce un'esperienza di viaggio più fluida e incentivante per l'utenza.

Un altro aspetto rilevante è la gestione del personale e delle risorse tecniche. Definire gli orari di funzionamento consente una pianificazione efficace delle risorse umane, assicurando che il personale necessario per le operazioni di volo, la manutenzione e la sicurezza sia disponibile nei momenti critici. Questo migliora l'efficienza operativa e riduce i costi di gestione.

Obiettivo ultimo di questa analisi è la definizione delle tasse vertiportuali. Per definirle infatti, si ha bisogno di ipotizzare degli orari e dei regimi di funzionamento in modo da stimare il numero di decolli e atterraggi giornalieri e quindi annuali. Una volta individuati si potranno ridistribuire i costi operativi (valutati nel prossimo capitolo) su ogni decollo e atterraggio fornito.

Si utilizzano per l'analisi seguente i dati riportati da GTT [31] sul flusso orario dei passeggeri.

Si assume che il servizio vertiportuale abbia orario effettivo dalle 5:00 alle 22:00 e con regimi di funzionamento come di seguito (si assumono tali regimi invariati nei giorni festivi e feriali):

- 5:00-7:00: risulteranno operativi esclusivamente i vertihub al 50% dell'operatività massima e le vertistation private.
- 7:00-10:00: la totalità dei vertihub, vertiport e vertistation risultano operativi a massimo regime.
- 10:00-15:00: la totalità dei vertihub, vertiport e vertistation risultano operativi al 70% dell'operatività massima.
- 15:00-20:00: la totalità dei vertihub, vertiport e vertistation risultano operativi a massimo regime.
- 20:00-22:00: risulteranno operativi esclusivamente i vertihub al 50% dell'operatività massima e le vertistation private.

Nella seguente tabella vengono riportate le stime precedentemente effettuate, valutando il numero di decolli annuali effettuabili, questo dato sarà necessario alla stima delle tasse vertiportuali.

Da stime semplificate basate sui dati riportati da GTT [31] si prevede che nel fine settimana e nei giorni festivi, tale flusso si riduca dell'81%. I giorni festivi nell'arco dell'anno, in media risultano ammontare a 31%. Tale analisi viene considerata nella valutazione dei decolli annuali.

	VERTIHUB	VERTIPOINT	VERTISTATION
N° of FACILITIES	8	10	30
N° PADS	41	18	30
MAXIMUM HOURLY OPERATION PER PAD (T-O/h)	6,7 Cap 3.7.1	7,5 Cap 3.7.2	8,6 Cap 3.7.3
OOMGE	13,5	11,5	11,5
DAILY FLIGHTS	3708	1552	2967
DAILY TAKE-OFFS	8227		
ANNUAL TAKE-OFFS	2432840		

OOMGE: ore di operatività massima giornaliera equivalente, il numero di ore di funzionamento riportate al massimo regime (es: 2h al 50%, OME=1h).

$$OOMGE = \sum Op \times h_{Op}$$

Op: percentuale di operatività momentanea.

h_{Op}: durata del periodo di 'Op' in ore.

$$DAILY FLYGHTS = OOMGE \times MAXIMUM HOURLY OPERATION PER PAD \times N^{\circ} PADS$$

$$DAILY TAKE - OFFS = \sum DAILY FLIGHTS$$

$$ANNUAL TAKE - OFFS = DAILY TAKE - OFF \times OPERATIVE DAYS$$

OPRATIVE DAYS: Giornate lavorative.

La stima riportata fa riferimento esclusivamente alla fase iniziale del progetto, in cui la presenza del servizio non è ancora diffusa in modo capillare.

Capitolo 4

4 Stima dei costi operativi e di produzione dei vertiporti

I costi operativi nell'ambito della Urban Air Mobility (UAM) sono di fondamentale importanza per una serie di motivi cruciali. In primo luogo, il settore dell'UAM mira a connettere le aree urbane in modo sempre più efficiente, stimolando lo sviluppo economico. Comprendere l'entità e la rilevanza dei costi operativi è essenziale, poiché una gestione appropriata di questi costi può influenzare direttamente la qualità, la sicurezza e il successo complessivo dei servizi offerti.

Elementi come la formazione di equipaggi altamente qualificati e la manutenzione delle flotte di aeromobili giocano un ruolo chiave nella determinazione dei costi operativi. Le tariffe aeroportuali, la ricerca e lo sviluppo di tecnologie avanzate, insieme al costo del carburante, sono fattori che devono essere considerati attentamente. La formazione di piloti e personale di terra deve garantire alti standard di competenza e sicurezza, richiedendo continui investimenti. Allo stesso modo, la manutenzione degli aeromobili deve essere costante e rigorosa per assicurare la sicurezza e l'efficienza operativa.

Il settore della mobilità aerea urbana è caratterizzato da una continua innovazione, precisione e adattamento alle dinamiche di mercato in costante evoluzione. Per mantenere l'equilibrio tra redditività e capacità di offrire servizi di alta qualità, è fondamentale comprendere il peso e l'impatto di ogni componente dei costi operativi. In questo contesto, l'ottimizzazione delle risorse e la ricerca di soluzioni innovative sono imperativi. Soluzioni come l'adozione di tecnologie energeticamente più efficienti o l'automazione di alcune operazioni possono contribuire a ridurre i costi e migliorare l'efficienza.

Poiché l'UAM è ancora in fase sperimentale, mancano molti studi o esempi pratici consolidati sui costi operativi. Pertanto, si sono considerate le voci di costo tipiche dell'aviazione civile, apportando le necessarie modifiche per adattare al contesto specifico della mobilità aerea urbana. Questo approccio include l'analisi dei costi per la creazione di infrastrutture specifiche per l'UAM, come i vertiporti, che devono essere costruiti e mantenuti per supportare operazioni sicure ed efficienti.

4.1 Costo dell'energia elettrica

Per adottare una propulsione completamente elettrica sarà necessario un significativo apporto di energia per ricaricare le batterie a terra, le quali alimenteranno il volo. Il consumo energetico del vertiporto è determinato dall'elettricità utilizzata dal veicolo durante il volo e dall'utilizzo di energia elettrica nella struttura. Tuttavia, il consumo reale della rete elettrica per la ricarica supera l'energia effettivamente immagazzinata nella batteria a causa delle inefficienze. Pertanto, si assume un'efficienza di carica del 90% per considerare le perdite nella rete. Per raggiungere un impatto zero, è essenziale che l'energia elettrica

provenza da fonti completamente rinnovabili. I combustibili fossili sono attualmente la principale fonte di energia, ma anche la più inquinante.

Come riportato da [37], [38] e [39], è evidente che dal 2000 le fonti rinnovabili come l'eolico e il solare sono cresciute rapidamente, insieme all'energia idroelettrica che ha sempre avuto un ruolo importante nella produzione energetica.

I dati illustrano che:

- UE: 37% Carburanti fossili, 39% da rinnovabili, 22% dal Nucleare e il 2% da fonti minori;
- USA: 60% Carburanti fossili, 21% da rinnovabili, 18% dal Nucleare e il 1% da fonti minori;
- Asia: 68% Carburanti fossili, 26% da rinnovabili, 5% dal Nucleare e il 1% da fonti minori;

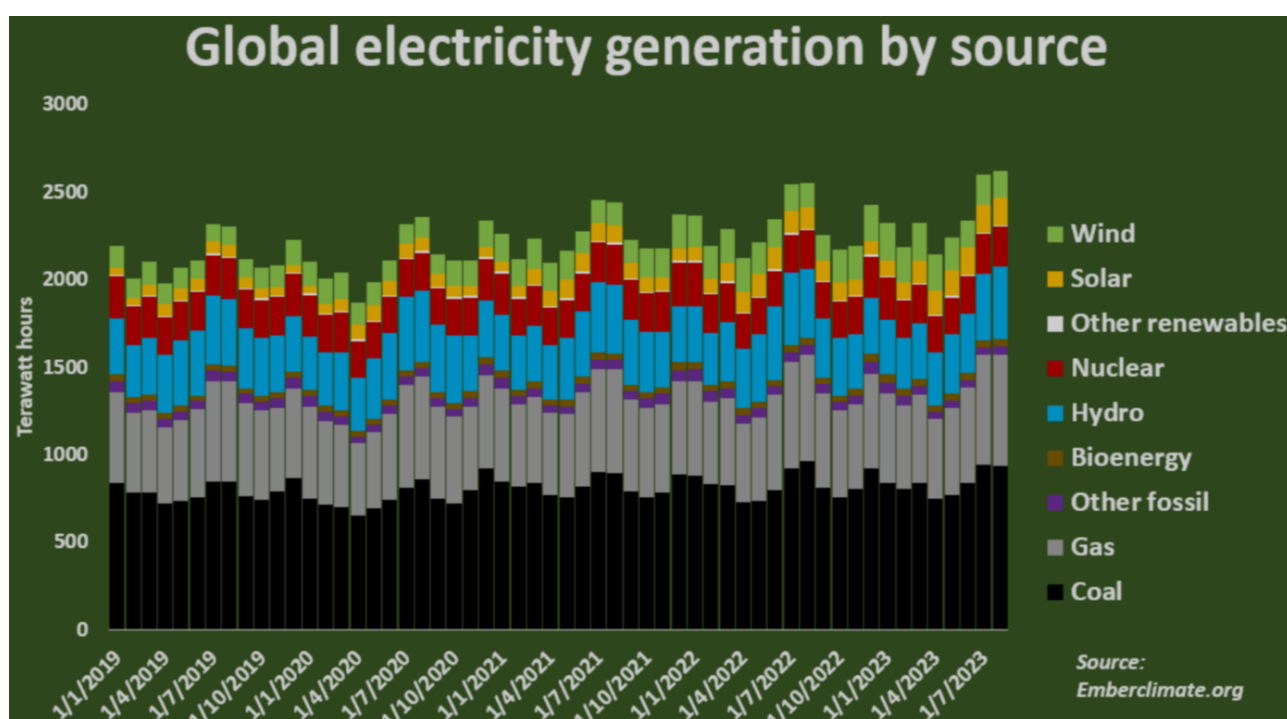


Figura 71: Produzione mondiale di energia elettrica per fonti.[37]

Da questi dati si evince che l'Asia e gli Stati Uniti sono i maggiori utilizzatori di combustibili fossili, sfruttando principalmente carbone e metano. Nell'Unione Europea, l'uso delle tecnologie rinnovabili è avanzato, con un impiego leggermente superiore rispetto ai combustibili fossili.

Le nuove politiche energetiche nei principali mercati globali stanno promuovendo l'energia pulita con investimenti annui crescenti, che supereranno i 200 miliardi di dollari entro il 2030, un aumento del 50% rispetto agli attuali investimenti. Le energie rinnovabili rappresentano una grande opportunità di crescita economica e occupazionale, oltre a ridurre le emissioni inquinanti. Negli Stati Uniti, l'*Inflation Reduction Act* prevede un aumento significativo della capacità solare ed eolica entro il 2030, con una crescita di due volte e mezzo rispetto ai livelli attuali. Questo, insieme all'uso crescente di veicoli elettrici, ridurrà la

domanda di gas naturale e petrolio del 20% e di carbone del 50% nell'UE. In Giappone, il programma Green Transformation mira a ridurre le emissioni attraverso l'uso di nucleare e idrogeno.

L'aumento della produzione di energia rinnovabile coprirà la crescente domanda, riducendo il contributo dei combustibili fossili. Le politiche e le prospettive economiche ed energetiche future guideranno lo sviluppo delle energie rinnovabili. Paesi come India, Sud-Est asiatico, Africa e Medio Oriente stanno accelerando la transizione energetica. La Cina, con il suo alto consumo energetico, rallenterà la crescita entro il 2030, spostandosi verso un'economia più orientata ai servizi.

Secondo lo scenario STEPS (Stated Policies Scenario), l'uso del carbone diminuirà, la domanda di gas naturale raggiungerà un plateau e la crescente diffusione dei veicoli elettrici stabilizzerà e poi ridurrà la domanda di petrolio. La quota di energia da combustibili fossili, attualmente all'80%, scenderà al 70% entro il 2030 e al 60% entro il 2050. Le emissioni di CO₂, previste a un picco di 37 miliardi di tonnellate annue nel 2025, scenderanno a 32 miliardi entro il 2050.

Oltre allo scenario STEPS, esistono altri due scenari: l'Announced Pledges Scenario (APS), che presuppone il rispetto degli impegni governativi, e il Net Zero Emission by 2050 Scenario (NZE), che considera le tecnologie avanzate per limitare l'aumento della temperatura globale a 1.5°C entro il 2050. Tutti questi scenari indicano una diminuzione progressiva nell'uso dei combustibili fossili a favore delle energie rinnovabili. Si stima che nel 2050 il fabbisogno energetico dei trasporti, compresi quelli aerei e terrestri, richiederà circa 470 TWh annui.

Nel 2022, la produzione di energia rinnovabile è stata di circa 8500 TWh, coprendo solo il 5% della futura richiesta energetica. Tuttavia, l'uso delle risorse rinnovabili continuerà a crescere, permettendo di soddisfare la domanda dei veicoli ibridi con la produzione mondiale di energia pulita. Il costo e l'affidabilità dell'approvvigionamento energetico sono cruciali per stimare i costi operativi della mobilità elettrica. I prezzi dell'energia elettrica variano tra i paesi, al contrario dei combustibili fossili che mantengono prezzi uniformi per facilitare lo scambio sui mercati.

La Commissione Europea ha proposto misure per coordinare gli sforzi di solidarietà, garantire l'approvvigionamento energetico e stabilizzare i prezzi. Dal 2019, sta aggiornando il quadro politico energetico per facilitare la transizione dai combustibili fossili verso l'energia pulita, seguendo le linee guida degli accordi di Parigi. È previsto un rapporto biennale sui prezzi e i costi dell'energia, l'ultimo dei quali è stato pubblicato il 18 ottobre 2022, evidenziando le sfide e i progressi del settore energetico.

Il prezzo dell'energia elettrica è influenzato dal costo delle materie prime, dalle legislazioni e dalle condizioni climatiche o eventi globali come guerre o pandemie. Le variabili sono molteplici, ma i dati medi aggiornati al 2023 indicano:

- Costo medio mondiale dell'energia elettrica per uso domestico: 0.183 \$/kWh [38];
- Costo medio mondiale per uso non domestico: 1.171 \$/kWh [38];

- Costo medio negli Stati Uniti: 0.125 \$/kWh [38];
- Costo medio nell'Unione Europea: 0.22 \$/kWh [38].

Nel mercato dell'energia elettrica, il prezzo finale non dipende dalla fonte iniziale di energia, ma il costo più elevato regola tutto il mercato. Attualmente, il prezzo più alto è quello dell'energia da fonti fossili. Una completa transizione alle fonti rinnovabili abbasserebbe significativamente i prezzi. Tuttavia, il costo del trasporto dell'energia elettrica rimane una costante, coprendo circa il 40% dei costi complessivi, insieme alla tassazione variabile per paese. Per questo studio, si utilizzerà il valore medio del costo dell'energia elettrica più aggiornato possibile.

Il sistema energetico globale cambierà notevolmente nei prossimi decenni, guidato da politiche sempre più orientate verso energie a impatto zero per contrastare il cambiamento climatico. L'Europa, per ridurre drasticamente le importazioni di combustibili fossili e diventare autosufficiente, prevede uno scenario energetico decentralizzato basato sulle rinnovabili. L'energia eolica e fotovoltaica avranno un grande potenziale di crescita, incentivato dal calo dei costi. Entro il 2050, si prevede che queste tecnologie copriranno circa il 75% dell'offerta totale.

Come esempio, nella figura seguente si illustrano le valutazioni effettuate dall'ente energetico Canadese.

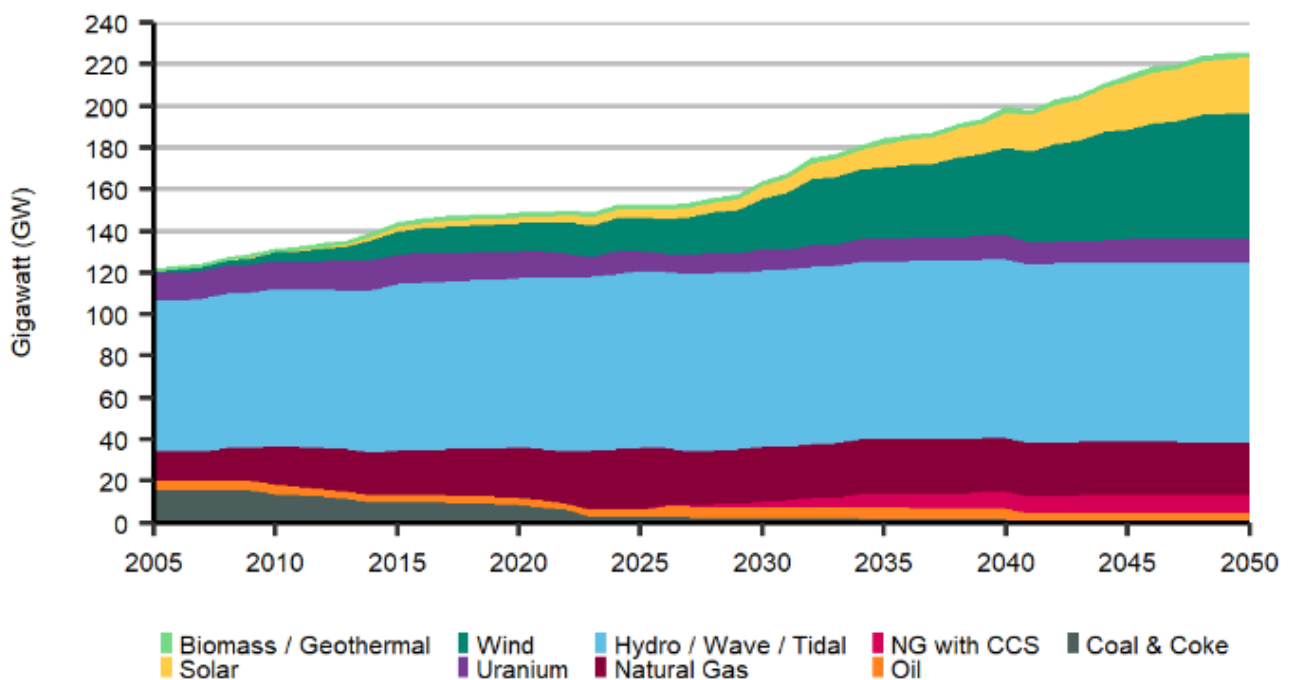


Figura 72: Previsioni della produzione energetica Canadese.[38]

4.2 Costo delle antenne 5G

L'implementazione delle reti 5G comporta una serie di costi significativi, suddivisi in costi di costruzione (CapEx) e costi operativi (OpEx). In primo luogo, c'è l'acquisto delle antenne e delle apparecchiature. Le

stazioni base 5G (gNodeB) hanno un costo che varia tra \$100,000 e \$200,000 [41]. Le unità radio (RU), che gestiscono la trasmissione e la ricezione del segnale, costano tra \$10,000 e \$50,000 [41], mentre le unità baseband (BBU), che elaborano i segnali digitali, hanno un costo compreso tra \$5,000 e \$20,000 [41].

Per quanto riguarda l'infrastruttura e l'installazione, la costruzione di una nuova torre di telecomunicazioni può costare tra \$100,000 e \$300,000 [41], a seconda dell'altezza e della localizzazione. Gli aggiornamenti e i retrofit alle torri esistenti per ospitare le nuove antenne 5G possono costare tra \$15,000 e \$50,000 [41] per torre. Inoltre, i costi di manodopera per l'installazione delle antenne e delle apparecchiature possono raggiungere \$10,000-\$30,000 [41] per sito.

La posa dei cavi in fibra ottica necessaria per il backhaul delle reti 5G può costare tra \$20,000 e \$60,000 [41] per miglio, inclusi i costi di scavo e installazione. Le apparecchiature di backhaul, necessarie per gestire il traffico di dati tra le stazioni base e la rete core, aggiungono ulteriori costi variabili a seconda della tecnologia e della capacità.

Le licenze spettrali, necessarie per l'acquisizione delle bande di frequenza 5G, possono variare enormemente e raggiungere miliardi di dollari. Inoltre, i costi per ottenere i permessi di costruzione dalle autorità locali possono variare da poche migliaia a decine di migliaia di dollari per sito.

La manutenzione ordinaria delle antenne e delle apparecchiature, inclusi controlli periodici, pulizia, aggiornamenti software e hardware, può variare da \$5,000 a \$15,000 [41] per sito all'anno. I costi imprevisti per riparazioni e sostituzioni di componenti guasti possono aggiungere ulteriori \$2,000 a \$10,000 [41] per sito all'anno.

Il consumo energetico delle antenne 5G è significativo, con costi dell'elettricità variabili in base alla localizzazione, ma mediamente stimabili tra \$5,000 e \$20,000 [41] per sito all'anno. I costi di leasing per il terreno o la struttura su cui è installata l'antenna variano da \$10,000 a \$50,000 [41] per sito all'anno, a seconda della localizzazione e degli accordi contrattuali.

Le operazioni di rete comportano costi per il personale addetto alla gestione e al monitoraggio della rete, inclusi ingegneri, tecnici e operatori di rete, stimati tra \$50,000 e \$200,000 [41] all'anno per una rete regionale. I canoni per l'utilizzo delle reti di backhaul, inclusi i costi per la banda larga e la connettività in fibra, possono raggiungere decine di migliaia di dollari all'anno per sito.

La costruzione di un numero maggiore di antenne 5G su vasta scala può portare a economie di scala, riducendo i costi unitari per apparecchiature e installazione. Tuttavia, sono necessari elevati investimenti iniziali, che possono essere ammortizzati nel tempo con la diffusione della rete e l'aumento del numero di utenti.

In letteratura si trovano esempi di costi di antenne 5G a seconda della tipologia:

- Massive MIMO (multiple input-multiple output): circa \$350K [41];
- MIMO: circa \$60K [41];
- Beamforming: \$55K [41];
- Macro Cell: \$105K [41].

Le celle che soddisfano i requisiti richiesti dall'UAM sono le Massive MIMO in grado di fornire un elevato numero di utenti contemporaneamente.

4.3 Modelli di stima dei costi

Valutare i costi relativi al nuovo sistema di trasporto UAM è di fondamentale importanza per molteplici ragioni, che abbracciano aspetti economici, tecnologici, operativi e ambientali.

Innanzitutto, la sostenibilità economica del sistema UAM dipende da una comprensione approfondita e dettagliata dei costi associati. Questi includono non solo i costi iniziali di sviluppo e implementazione delle infrastrutture, ma anche i costi operativi a lungo termine. La costruzione di infrastrutture complesse, come le stazioni base 5G, le piattaforme di decollo e atterraggio, e la produzione dei veicoli aerei stessi, richiede investimenti significativi. Senza una valutazione accurata dei costi, è difficile garantire che il progetto sia finanziariamente sostenibile nel lungo periodo. Questo tipo di analisi finanziaria è essenziale per evitare sorprese economiche che potrebbero compromettere la realizzazione e l'operatività del sistema.

La pianificazione degli investimenti è un'altra area chiave che beneficia di una valutazione dettagliata dei costi. Conoscere i costi associati consente ai responsabili delle decisioni di pianificare meglio gli investimenti necessari, decidere la scala e il ritmo di tali investimenti, e identificare le fonti di finanziamento più appropriate. Ad esempio, può essere determinante decidere tra fondi pubblici, privati o partnership pubblico-privato per ottimizzare l'allocazione delle risorse finanziarie.

L'efficienza delle risorse è strettamente legata alla valutazione dei costi. Un'analisi dettagliata permette di identificare aree in cui è possibile ridurre i costi senza compromettere la qualità o la sicurezza del sistema UAM. Questo è particolarmente importante in un settore emergente come quello dell'UAM, dove le risorse possono essere limitate e la concorrenza per finanziamenti può essere intensa. Ridurre i costi in modo efficiente può liberare risorse che possono essere reindirizzate verso altre aree critiche del progetto.

Un altro aspetto fondamentale riguarda l'accessibilità e i prezzi per i consumatori. Comprendere i costi operativi e di sviluppo è essenziale per stabilire tariffe accessibili per i servizi di trasporto UAM. Se i costi sono troppo elevati, i prezzi per i consumatori potrebbero diventare proibitivi, limitando l'adozione e l'accessibilità del sistema. Questo potrebbe portare a una scarsa diffusione del servizio, vanificando gli sforzi di sviluppo. Al contrario, una gestione efficace dei costi può contribuire a offrire prezzi competitivi, aumentando il numero di utenti e la sostenibilità economica del sistema.

L'impatto ambientale e la sostenibilità sono altri aspetti cruciali che richiedono una valutazione attenta dei costi. L'adozione di tecnologie avanzate, come le reti 5G, che sono inizialmente più costose ma offrono maggiore efficienza, può ridurre il consumo energetico complessivo e le emissioni. Questo è fondamentale per garantire che il sistema UAM sia non solo economicamente sostenibile, ma anche ecologicamente responsabile. La sostenibilità ambientale è diventata un criterio importante per l'approvazione e il supporto di nuovi progetti da parte dei governi e delle comunità.

La conformità regolamentare è un altro motivo per cui è importante valutare i costi del sistema UAM. Ogni nuova tecnologia o sistema di trasporto deve rispettare le normative e i requisiti legali, che possono includere standard di sicurezza, protezione dei passeggeri e normative ambientali. Le analisi finanziarie possono aiutare a identificare le aree in cui sono necessari investimenti per soddisfare questi requisiti, garantendo che il sistema sia conforme alle leggi e regolamenti vigenti, e riducendo il rischio di ritardi o problemi legali.

In un settore altamente innovativo come l'UAM, valutare i costi è essenziale per mantenere un vantaggio competitivo. Investire in tecnologie avanzate e infrastrutture efficienti può posizionare le aziende e le città come leader nel mercato emergente del trasporto aereo urbano. Questo può attirare ulteriori investimenti, talenti e opportunità di crescita, consolidando la posizione del sistema UAM come una componente chiave della mobilità futura.

Infine, comprendere i costi è essenziale per valutare il ritorno sugli investimenti (ROI). Per gli investitori, una chiara visione dei costi e dei potenziali ricavi aiuta a prendere decisioni informate. Un'analisi accurata dei costi può aiutare a prevedere i tempi di recupero degli investimenti e i potenziali profitti, rendendo il settore UAM più attraente per gli investimenti di capitale. Senza una valutazione dettagliata dei costi, gli investitori potrebbero essere riluttanti a impegnare fondi, rallentando lo sviluppo e l'adozione del sistema.

Nell'intero Life Cycle i costi nell'ambito aereospaziale si suddividono tipicamente in:

- I costi di Ricerca, Sviluppo, Test e Valutazione (RDT&E) nell'ambito dell'UAM rappresentano una componente critica per l'implementazione e il successo di questa nuova forma di trasporto. Questi costi includono diverse fasi e attività essenziali per sviluppare, testare e implementare efficacemente i veicoli e le infrastrutture necessarie per l'UAM. La fase di Ricerca e Sviluppo (R&D) comprende lo sviluppo concettuale e la progettazione iniziale dei veicoli UAM e delle infrastrutture di supporto. I costi in questa fase includono la progettazione e l'ingegneria, che comportano la creazione di prototipi e modelli di simulazione per veicoli e infrastrutture. Inoltre, è necessario investire in materiali e tecnologie, sviluppando e testando nuovi materiali e tecnologie avanzate come batterie ad alta capacità e sistemi di propulsione elettrica. I costi del personale includono l'assunzione e la formazione di ingegneri, scienziati e altri esperti tecnici necessari per portare avanti il progetto. Dopo la fase di sviluppo iniziale, è necessario eseguire una serie di test rigorosi per garantire che i veicoli e le infrastrutture soddisfino gli standard di sicurezza e prestazioni richiesti. I costi associati includono la prototipazione e la produzione, che comportano la costruzione di prototipi di veicoli

UAM e delle infrastrutture necessarie per supportarli, come le piattaforme di decollo e atterraggio. I test di volo e di terra sono necessari per verificare le prestazioni, la sicurezza e l'affidabilità dei veicoli e delle infrastrutture. Inoltre, ci sono costi per la certificazione e la conformità, che includono le spese per ottenere l'approvazione dalle autorità di regolamentazione secondo le normative locali e internazionali.

Lo sviluppo e la manutenzione delle infrastrutture necessarie per l'UAM, comprese le stazioni di ricarica, le piattaforme di decollo e atterraggio, e le reti di comunicazione come il 5G, sono anch'esse parte dei costi di RDT&E.

La formazione di piloti, tecnici di manutenzione e altri operatori è essenziale per garantire il funzionamento sicuro ed efficiente del sistema UAM. Questo comporta lo sviluppo e l'implementazione di programmi di formazione per il personale operativo, nonché costi associati alle simulazioni e all'addestramento pratico per garantire che il personale sia adeguatamente preparato a gestire i veicoli e le infrastrutture UAM.

- I costi di produzione rappresentano una componente essenziale e complessa che coinvolge vari aspetti della fabbricazione, assemblaggio e messa in opera dei veicoli aerei urbani e delle infrastrutture di supporto. Questi costi comprendono diverse categorie principali.

I materiali utilizzati nei veicoli UAM, come leghe leggere di alluminio, compositi in fibra di carbonio e batterie ad alta capacità, sono spesso costosi e rappresentano una parte significativa dei costi di produzione, dato che devono soddisfare rigorosi standard di sicurezza e prestazioni.

La produzione dei veicoli UAM coinvolge l'integrazione di numerosi componenti e sistemi, tra cui motori elettrici, sistemi di propulsione, avionica, sensori, sistemi di controllo del volo e sistemi di comunicazione. Ogni componente deve essere acquistato, testato e integrato nel veicolo, aumentando così i costi complessivi. L'assemblaggio richiede strutture specializzate e personale qualificato, includendo l'assemblaggio della fusoliera, l'installazione dei sistemi di propulsione, la configurazione dei sistemi elettronici e la verifica delle prestazioni. La manodopera qualificata e le attrezzature necessarie per l'assemblaggio rappresentano una parte significativa dei costi di produzione.

Gli strumenti e le attrezzature di produzione sono fondamentali. La produzione di veicoli UAM richiede strumenti e attrezzature specializzate, come stampi per compositi, macchine CNC per la lavorazione dei metalli e banchi di prova per i sistemi di propulsione. Queste attrezzature devono essere acquistate, mantenute e, a volte, personalizzate per soddisfare le specifiche esigenze di produzione. Per migliorare l'efficienza e ridurre i costi, molti processi di produzione possono essere automatizzati. L'implementazione di sistemi robotici e di automazione richiede un investimento iniziale significativo, ma può portare a risparmi a lungo termine riducendo la manodopera necessaria e aumentando la precisione e la velocità di produzione.

- I costi operativi nell'ambito sono cruciali per la sostenibilità economica del sistema. Questi costi si suddividono principalmente in due categorie: quelli legati alle infrastrutture e quelli relativi ai

velivoli. Ciascuna di queste categorie include una varietà di spese necessarie per garantire il funzionamento sicuro ed efficiente del sistema UAM.

Per quanto riguarda le infrastrutture, uno dei principali costi operativi è la manutenzione dei vertiporti. Questi punti di decollo e atterraggio devono essere costantemente mantenuti per garantire la sicurezza e l'efficienza delle operazioni. La manutenzione comprende la pulizia, le riparazioni strutturali e la sostituzione di componenti usurati. Un altro aspetto fondamentale è la gestione dell'energia, in particolare la ricarica delle batterie dei velivoli elettrici. Questo comporta la creazione e la manutenzione di stazioni di ricarica avanzate, che devono essere capaci di fornire energia in modo rapido e sicuro. La rete di comunicazione e gestione del traffico aereo richiede infrastrutture tecnologiche avanzate e una manutenzione continua per garantire una connettività affidabile e sicura. Questi sistemi includono radar, sensori, server e software di gestione del traffico, tutti elementi che richiedono aggiornamenti regolari e supporto tecnico.

Un altro costo significativo è il personale di terra. Operazioni sicure e efficienti richiedono una forza lavoro qualificata per la gestione del traffico aereo, il supporto ai passeggeri e la manutenzione delle infrastrutture. Questo include addetti alla sicurezza, tecnici, ingegneri e operatori. Le spese amministrative, come la gestione delle operazioni quotidiane, il coordinamento con le autorità locali e la gestione delle emergenze, rappresentano un ulteriore costo operativo. Queste spese comprendono anche l'assicurazione delle strutture e la gestione delle normative e della conformità. Passando ai costi operativi dei velivoli, la manutenzione regolare è un aspetto essenziale. Gli eVTOL richiedono ispezioni periodiche, riparazioni e sostituzioni di componenti per garantire la sicurezza e l'affidabilità. La gestione delle batterie è un elemento critico, poiché le batterie devono essere monitorate, sostituite periodicamente e smaltite in modo sicuro alla fine del loro ciclo di vita. I costi di energia per la ricarica delle batterie rappresentano un'altra spesa significativa, in quanto il consumo di energia deve essere gestito per massimizzare l'efficienza e ridurre i costi operativi. Anche l'assicurazione dei velivoli è un costo operativo rilevante, poiché le polizze devono coprire danni, incidenti e responsabilità. I costi del personale di volo, inclusi piloti, co-piloti e addetti alla manutenzione, devono essere considerati, poiché questi professionisti richiedono una formazione continua e devono essere altamente qualificati per operare in sicurezza. Le spese legate alla gestione del traffico aereo, come l'uso delle infrastrutture di controllo del traffico e le tasse aeroportuali, sono ulteriori costi operativi che devono essere gestiti.

In questa trattazione si è interessati alla valutazione del costo di produzione e i costi operativi delle infrastrutture principali. Al fine di valutare tali spese, possono essere utili 3 tipi di modelli per la valutazione del costo: Stima per Analogia, Stima Parametrica e Stima Bottom-Up.

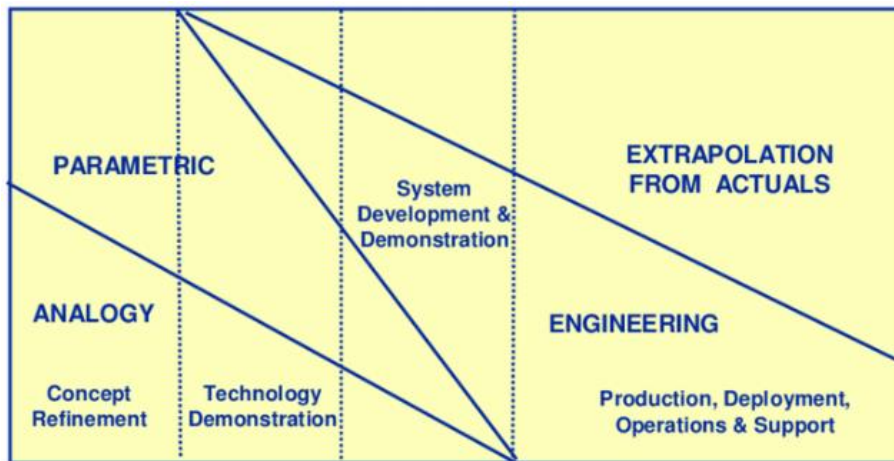


Figura 73: Ripartizione dei modelli di stima durante il progetto. [40]

1. Il metodo dell'analogia confronta un nuovo sistema con uno analogo per il quale sono disponibili dati accurati sui costi e sui dettagli tecnici. Deve esserci una correlazione ragionevole tra il sistema proposto e quello di riferimento. Si effettua una valutazione soggettiva delle differenze tra il nuovo sistema d'interesse e il sistema di riferimento. Il metodo dell'analogia viene generalmente utilizzato nelle prime fasi del processo di stima dei costi. Questo avviene all'inizio della vita di un potenziale programma di acquisizione, quando potrebbero esserci pochi dati disponibili e si possono incontrare dei costi e tecnologie che subiscono rapidi cambiamenti.

Per preparare una stima dei costi basata sul metodo dell'analogia, si inizia ottenendo una valutazione tecnica delle differenze tra i sistemi da ingegneri o altri esperti. Successivamente, si valuta l'impatto economico di queste differenze tecniche e di eventuali altri fattori che potrebbero essere cambiati rispetto a quando il modello esistente è stato progettato e prodotto (ad esempio, un maggiore uso della progettazione e produzione assistita da computer). Sebbene l'esempio precedente mostri una stima per analogia eseguita a livello di sistema, il metodo dell'analogia può essere applicato anche a livello di sottosistema o componente. Il metodo dell'analogia può essere applicato anche a processi, come la formazione, che fanno parte della struttura degli elementi di costo del programma. Ogni applicazione individuale del metodo dell'analogia a questi livelli inferiori non deve necessariamente utilizzare lo stesso sistema come base; piuttosto, si sceglie l'elemento più simile in ogni caso.

Uno svantaggio chiave del metodo dell'analogia è la soggettività intrinseca nel quantificare il costo delle differenze tecniche e di altro tipo tra l'elemento di riferimento e quello nuovo. Tuttavia, il metodo dell'analogia tende ad essere un modo relativamente veloce ed economico di stimare i costi del programma e può essere eseguito a un alto livello della WBS con relativamente pochi dettagli tecnici sul nuovo sistema.

2. Il metodo parametrico, utilizza l'analisi di regressione su un database di due o più sistemi simili per sviluppare Cost Estimating Relationships (CER) che stimano il costo basandosi su una o più caratteristiche di prestazione o di progettazione del sistema (ad esempio, velocità, raggio d'azione, peso, spinta). Il metodo parametrico è più comunemente utilizzato nelle fasi iniziali della descrizione

del prodotto. Anche se durante questa fase un programma di acquisizione non è in grado di fornire informazioni dettagliate, può specificare requisiti di sistema di alto livello e caratteristiche di progettazione.

Le CER sviluppate utilizzando il metodo parametrico possono essere facilmente utilizzate per valutare gli effetti sui costi dei cambiamenti nella progettazione, nelle prestazioni e nelle caratteristiche del programma.

Una considerazione critica nella stima dei costi parametrica è la somiglianza dei sistemi nel database sottostante, sia tra loro che rispetto al sistema che si sta stimando. Un buon database parametrico deve essere attuale e accurato, contenendo i dati più recenti disponibili che riflettono tecnologie simili a quelle del sistema di interesse. Inoltre, come per la stima per analogia, i dati parametrici devono essere normalizzati per rappresentare un dato anno economico ed eliminare eventuali effetti di quantità e inflazione.

Inoltre, il database deve essere omogeneo. Un dato un sistema deve essere coerente con lo stesso dato per ogni altro sistema incluso nel database.

La validità di una CER è generalmente giudicata dalle sue statistiche di regressione, che misurano l'accuratezza dell'adattamento della CER ai punti di dati campione utilizzati per sviluppare la stessa. La statistica di regressione più comunemente utilizzata è il coefficiente di determinazione (R^2), sebbene vi siano altre statistiche di regressione come l'Errore Standard (SE) e il Coefficiente di Varianza (CV).

Gli analisti devono assicurarsi che il valore dei parametri del nuovo sistema rientri nell'intervallo dei valori dei parametri per i sistemi esistenti. In caso contrario, potrebbe non essere una buona stima indipendentemente da quanto siano buone le statistiche di regressione. Ad esempio, una CER sviluppata da dati su aerei che viaggiano a una velocità inferiore a quella del suono potrebbe non prevedere bene i costi per un sistema destinato a viaggiare a velocità supersoniche.

La stima mediante il metodo parametrico è appropriata relativamente presto nel ciclo di vita del programma quando non è disponibile una specifica di progettazione dettagliata, ma è disponibile un database di sistemi simili e una specifica delle prestazioni. Il metodo parametrico è anche utile come controllo rispetto a una stima effettuata utilizzando un altro metodo.

La stima mediante il metodo parametrico ha molti vantaggi rispetto ad altri metodi di stima. Poiché la CER si basa su più di un singolo punto di dati, la stima parametrica è meno rischiosa rispetto alla stima per analogia. Il maggior svantaggio della stima parametrica è che tale tecnica è limitata dalla quantità e dalla qualità dei dati.

3. Metodo Bottom-Up: derivato sommando stime dettagliate dei costi dei singoli pacchetti di lavoro e aggiungendo oneri appropriati, il metodo ingegneristico o "bottoms-up" di analisi dei costi è il più dettagliato tra tutte le tecniche e il più costoso da implementare. Questo metodo riflette una costruzione dettagliata dei costi di manodopera, materiali e spese generali. La stima ingegneristica viene tipicamente eseguita quando il design è definitivo, sono previsti pochi cambiamenti di

progettazione, i dati sono disponibili per popolare la WBS, i disegni e le specifiche sono completi e le operazioni di produzione sono ben definite in termini di manodopera e materiali.

Le stime dei costi ingegneristici possono essere molto accurate poiché coprono in modo esaustivo il lavoro da svolgere grazie alla struttura di suddivisione del lavoro (WBS). Queste stime utilizzano anche una visione dettagliata delle risorse e dei processi specifici utilizzati per eseguire il lavoro. Tuttavia, è necessario un notevole impegno di tempo e sforzo per produrre e documentare una tale stima, rendendo impraticabile l'uso di questo metodo per tutti gli elementi dei costi di un programma di acquisizione. Inoltre, potrebbero non esistere informazioni sufficienti per utilizzare efficacemente questo metodo, in particolare nelle prime fasi del programma quando si sa poco sui dettagli del design e dei processi produttivi dell'elemento. Infine, i fattori utilizzati per estrapolare altri costi dalla manodopera diretta e dai materiali potrebbero non riflettere accuratamente la base aziendale o le strutture attuali dell'azienda.

La fonte e la struttura di una stima ingegneristica forniscono molti più dettagli rispetto alle stime per analogia o parametriche. Pertanto, una stima ingegneristica consente una migliore visibilità sui fattori che determinano i costi. Tuttavia, il compromesso è che produrre una stima ingegneristica è laborioso, lento e costoso. Inoltre, ci sono ancora rischi. Un piccolo errore a un livello inferiore può tradursi in un errore enorme.

4.4 Costi di produzione dei vertiporti

Conoscere i costi di produzione dei vertiporti è cruciale per diversi motivi che riguardano la pianificazione, l'implementazione e l'operatività dell'UAM. La comprensione accurata di questi costi permette una gestione efficiente delle risorse e garantisce che i progetti dei vertiporti siano economicamente sostenibili e allineati con gli obiettivi di sviluppo urbano e tecnologico.

In primo luogo, la conoscenza dei costi di produzione dei vertiporti è fondamentale per la pianificazione del budget. Sapere quanto costa costruire un vertiporto permette agli investitori e ai pianificatori urbani di allocare le risorse finanziarie in modo appropriato, evitando sprechi e assicurando che i fondi siano sufficienti per completare il progetto. Questo è particolarmente importante nei progetti pubblici e privati su larga scala, dove il superamento del budget può comportare ritardi significativi e costi aggiuntivi.

In secondo luogo, i costi di produzione influenzano direttamente la fattibilità economica del progetto UAM. Se i vertiporti sono troppo costosi da costruire, il modello di business dell'UAM potrebbe non essere sostenibile a lungo termine. La comprensione dei costi di produzione aiuta a identificare le componenti critiche e le aree dove si possono ottimizzare i costi senza compromettere la funzionalità e la sicurezza.

Dal punto di vista della regolamentazione e delle politiche pubbliche, i costi di produzione dei vertiporti sono rilevanti per lo sviluppo di normative e incentivi. Le autorità di regolamentazione possono utilizzare queste informazioni per stabilire standard di costruzione, offrire incentivi fiscali o sovvenzioni per supportare lo

sviluppo dell'infrastruttura UAM, e garantire che la rete di vertiporti si integri bene con l'infrastruttura urbana esistente.

Infine, la trasparenza sui costi di produzione dei vertiporti è importante per attrarre investitori. Gli investitori privati cercano progetti con costi chiari e prevedibili per ridurre i rischi associati ai loro investimenti. Fornire stime dettagliate dei costi di produzione può aumentare la fiducia degli investitori e facilitare la raccolta di capitali necessari per sviluppare e scalare il sistema UAM.

I costi di interesse per la produzione dei vertiporti si possono dividere come segue.

4.4.1 Costo di produzione ed installazione dei pads

In particolare si prevede che tali piattaforme vengano prefabbricate in aziende specializzate e che quindi il loro costo sia soggetto a riduzione all'aumentare del numero di pads prodotti dovuto ad un determinato fattore di apprendimento. In particolare si prevede che i costi relativi alla produzione del primo elemento siano suddivisi in (per la stima seguente vengono utilizzati i costi relativi ad un eliporto):

1. **Materiali di Costruzione:** La piattaforma di atterraggio dovrà essere costruita con materiali resistenti e duraturi, come il cemento armato e l'acciaio.
2. **Produzione e Prefabbricazione:** I componenti prefabbricati della piattaforma, prodotti in fabbrica e pronti per essere assemblati sul sito.
3. **Manodopera e Installazione:** I costi associati al trasporto dei componenti prefabbricati e alla loro installazione sul sito designato.
4. **Progetto della Superficie della Piattaforma:** La superficie della piattaforma deve essere progettata per supportare il peso e la pressione dei veicoli VTOL durante il decollo e l'atterraggio.

Valutando quindi il caso peggiore, il costo massimo di un pad si stima attorno a \$325000 [42].

Il costo tende a diminuire durante la produzione a causa del fattore di apprendimento. Il fattore di apprendimento è un concetto che descrive come l'efficienza produttiva migliora con l'aumentare dell'esperienza accumulata durante la produzione. In termini semplici, man mano che un'organizzazione produce più unità di un prodotto, diventa più efficiente e riduce il tempo e il costo necessari per produrre ogni unità aggiuntiva.

Il fattore di apprendimento quantifica la riduzione dei costi unitari di produzione per unità con l'aumentare del numero di unità prodotte. È rappresentato da una percentuale che indica di quanto diminuiscono i costi ogni volta che il volume di produzione raddoppia. La relazione tra il numero di unità prodotte e costo per unità è spesso rappresentata da una curva di apprendimento. Questa curva mostra una diminuzione esponenziale del costo per unità in funzione dell'aumentare del numero di unità prodotte. La formula comune per descrivere questa relazione è:

$$C_n = C_1 \times n^b$$

Dove C_n è il costo necessario alla produzione dell' n -esima unità, C_1 è il costo di produzione della prima unità, n è il numero di unità prodotte e b è l'esponente di apprendimento pari al rapporto tra il logaritmo dello slope e il logaritmo di 2: $b = \frac{\ln(\text{slope})}{\ln(2)}$.

Lo slope o percentuale di apprendimento, rappresenta l'efficienza guadagnata. Ad esempio, un tasso di apprendimento del 90% significa che ogni volta che il volume di produzione raddoppia, il tempo o il costo per produrre ciascuna unità diminuisce al 90% del valore precedente.

Il fattore di apprendimento è influenzato da diversi elementi. Con l'aumentare della produzione, i lavoratori diventano più esperti e abili nel loro lavoro, riducendo errori e aumentando l'efficienza. L'azienda può identificare e implementare miglioramenti nei processi di produzione, riducendo sprechi e tempi morti. L'adozione di nuove tecnologie e attrezzature può automatizzare e ottimizzare parti del processo produttivo. Inoltre, con l'aumento della produzione, l'azienda può ottenere materiali e componenti a costi inferiori grazie agli acquisti in grandi volumi.

Tuttavia, il fattore di apprendimento ha alcuni limiti. Il miglioramento dell'efficienza non è infinito; dopo un certo punto, i guadagni marginali possono ridursi. Inoltre, variazioni nei processi produttivi o cambiamenti significativi nella progettazione del prodotto possono influenzare il tasso di apprendimento.

Nello studio in esame viene ipotizzato un fattore di apprendimento pari all'85% ipotizzando una filiera produttiva composta al 50% da produzione manuale e al 50% di produzione automatizzata.

Le stesse considerazioni possono essere fatte per i pad di parcheggio con alcune differenze dovute alle caratteristiche meccaniche meno stringenti:

5. **Materiali di Costruzione:** La piattaforma di atterraggio dovrà essere costruita con materiali resistenti e duraturi, come il cemento armato e l'acciaio.
6. **Produzione e Prefabbricazione:** I componenti prefabbricati della piattaforma, prodotti in fabbrica e pronti per essere assemblati sul sito.
7. **Manodopera e Installazione:** I costi associati al trasporto dei componenti prefabbricati e alla loro installazione sul sito designato.
8. **Progetto della Superficie della Piattaforma:** La superficie della piattaforma deve essere progettata per supportare il peso e la pressione dei veicoli eVTOL.

Valutando quindi il caso peggiore, il costo massimo di un pad di parcheggio si stima attorno a \$130000 [42]. Come nel caso precedente, anche a questo valore dovrà essere corretto attraverso il fattore di apprendimento.

4.4.2 Costo dei Charger

Il costo dei caricabatterie per eVTOL, può variare notevolmente in base a diversi fattori come la capacità di ricarica, la tecnologia utilizzata, l'infrastruttura di supporto e le esigenze specifiche del velivolo.

- Caricabatterie standard per eVTOL: i caricabatterie standard, progettati per ricaricare eVTOL a velocità moderate, possono costare tra i \$5,000 e i \$7,000 [43]. Questi sistemi sono sufficienti per operazioni con esigenze di ricarica meno intensive o per flotte più piccole.
- Super Charger per eVTOL: I super charger, progettati per fornire ricariche rapide e ad alta potenza, possono avere costi significativamente più elevati, che vanno dai \$20.000 ai \$50.000 [43]. Questi sistemi sono ideali per operazioni con alta frequenza di voli e necessità di ricariche rapide per minimizzare i tempi di inattività.

Questi costi includono generalmente l'hardware del caricabatterie, i sistemi di gestione dell'energia e i componenti di sicurezza necessari. Tuttavia, possono esserci ulteriori costi associati all'installazione, che dipendono dalla complessità dell'infrastruttura richiesta e dalla necessità di eventuali aggiornamenti alla rete elettrica esistente. Ad esempio, l'installazione di super charger potrebbe richiedere potenziamenti significativi delle linee elettriche e trasformatori più potenti.

Altri fattori che possono influenzare il costo totale includono la distanza del sito di installazione dalla rete elettrica principale, le esigenze di raffreddamento del sistema (soprattutto per i super charger ad alta potenza), i costi di manutenzione e supporto a lungo termine.

Inoltre, il rapido sviluppo tecnologico nel campo degli eVTOL e delle infrastrutture di ricarica potrebbe portare a una riduzione dei costi nel tempo, man mano che la tecnologia diventa più diffusa e le economie di scala vengono raggiunte.

4.4.3 Costo degli hangar

Il costo approssimativo di un hangar da 60 metri quadrati può variare notevolmente in base a diversi fattori come il tipo di costruzione, i materiali utilizzati, la località e le specifiche esigenze del cliente. Tuttavia, è possibile fornire una stima generale.

Il costo dei materiali varia a seconda del tipo di struttura scelta. Gli hangar possono essere costruiti in metallo, acciaio o legno, e ognuno di questi materiali ha un costo differente. Gli hangar prefabbricati in acciaio sono tra i più comuni per la loro durabilità e facilità di assemblaggio. Il costo della costruzione di un hangar può includere le fondamenta, l'assemblaggio della struttura, l'installazione di porte e altri elementi strutturali. In generale, i costi di costruzione per un hangar prefabbricato in acciaio possono variare da 100 a 150 dollari per metro quadrato. Oltre ai materiali e alla costruzione, ci possono essere ulteriori costi per

l'impianto elettrico, il riscaldamento, la ventilazione e l'isolamento. Questi costi aggiuntivi possono variare in base alle specifiche necessità del cliente e alle condizioni climatiche locali.

Tenendo conto di questi fattori, è possibile stimare il costo approssimativo di un hangar. Se consideriamo un costo medio di 1200 dollari per metro quadrato, il costo totale per i materiali e la costruzione sarebbe di circa 13200 dollari ($60 \text{ m}^2 * 220 \text{ \$/m}^2$). Supponendo costi aggiuntivi per l'impianto elettrico, il riscaldamento, la ventilazione e l'isolamento, il costo totale potrebbe salire a \$13500 [44].

Il costo non subisce variazioni dovute al fattore di apprendimento in quanto è una tecnologia assodata e in produzione da tempo, ciò ha fatto assestare i costi ai valori indicati in precedenza.

4.4.4 Costo dell'impianto di sicurezza

I sistemi di sicurezza di un vertiporto includono una varietà di tecnologie e attrezzature, come telecamere di sorveglianza, recinzioni di sicurezza, sistemi di controllo degli accessi, illuminazione di sicurezza e sistemi di rilevamento di intrusione.

- Le telecamere di sorveglianza sono un elemento fondamentale per la sicurezza di un vertiporto. Il costo delle telecamere varia in base al tipo (analogiche o digitali, fisse o mobili, con o senza visione notturna) e alla risoluzione. Una telecamera di sorveglianza di buona qualità può costare fino a \$1.000 [45]. Per coprire adeguatamente un vertiporto di medie dimensioni, potrebbero essere necessarie da 10 a 20 telecamere, per un costo totale che può variare dai \$2.000 ai \$20.000.
- Le recinzioni di sicurezza sono essenziali per prevenire accessi non autorizzati. Il costo delle recinzioni può variare a seconda del materiale e dell'altezza. Per un perimetro di 500 piedi, il costo può variare dai \$2.500 ai \$7.500 [46].
- I sistemi di controllo degli accessi, come tornelli e lettori di badge, sono necessari per gestire l'accesso alle aree riservate. Supponendo che siano necessari 5 punti di accesso, il costo totale si aggira attorno ai \$10.000 [47].
- L'illuminazione di sicurezza è cruciale per garantire visibilità e sicurezza durante le operazioni notturne. Il costo dell'illuminazione di sicurezza varia a seconda della quantità di luci necessarie e del tipo di illuminazione (LED, alogene, ecc.).
- I sistemi di rilevamento di intrusione è necessario per la protezione degli impianti e delle persone. Il costo di tale impianto si stima essere intorno ai \$7.000, circa cento rilevatori [48].

Il costo totale di prima produzione di un impianto di sicurezza si stima essere pari a \$49.500. Tale valore tende a diminuire nel tempo grazie al fattore di apprendimento che in questo caso evidenzia uno slope pari a 0,8 in quanto la produzione è quasi totalmente manuale.

4.4.5 Costo dell'impianto antincendio

Il costo di un impianto antincendio per un vertiporto può variare notevolmente a seconda della complessità e delle dimensioni dell'impianto, nonché delle specifiche normative locali e delle tecnologie utilizzate. Gli elementi chiave di un impianto antincendio includono:

- Un sistema di rilevamento del fumo e del calore, essenziale per la rapida identificazione degli incendi. Questi sistemi includono rilevatori di fumo fotoelettrici e rilevatori di calore a soglia fissa o di aumento termico.
- Gli estintori automatici, che intervengono direttamente sul focolaio dell'incendio, variano nel costo a seconda del tipo e del numero necessari. Comprendendo estintori a polvere, a schiuma, a CO₂, o estintori speciali per rischi specifici.
- Un sistema di sprinkler, che è fondamentale per la protezione continua e automatica contro gli incendi, può avere un costo significativo a seconda della copertura dell'intera area del vertiporto. Questo sistema include tubazioni, ugelli sprinkler, valvole di controllo e riserve d'acqua.
- Gli idranti antincendio, inclusi i collegamenti alle reti idriche, sono essenziali per la fornitura di acqua ad alta pressione necessaria per combattere incendi di grandi dimensioni. Comprendendo il posizionamento strategico degli idranti e le infrastrutture per garantire un'adeguata pressione dell'acqua.
- I sistemi di allarme, che includono sirene e sistemi di notifica automatica agli occupanti del vertiporto e ai servizi di emergenza, sono fondamentali per garantire una risposta rapida in caso di incendio. Includendo pannelli di controllo, sirene, luci stroboscopiche e interfacce di comunicazione.

Da queste stime, il costo massimo di prima produzione di un impianto antincendio per un vertiporto si aggira attorno ai \$4.000 [49]. Tale valore tenderà a ridursi con la produzione come visto nel paragrafo precedente.

4.4.6 Costo della cabina di controllo

Il costo di una cabina di controllo per un vertiporto può variare significativamente in base a diversi fattori, tra cui la dimensione, il livello di tecnologia e automazione, le specifiche normative locali, e le funzionalità richieste:

- **Struttura fisica:** la costruzione della cabina di controllo, compresi materiali di costruzione, isolamento, finestre resistenti agli urti e all'intemperie. Questo include anche le installazioni elettriche e idrauliche di base.
- **Attrezzature di comunicazione:** sistemi avanzati di comunicazione radio, telefoni, intercom, e altre apparecchiature di comunicazione necessarie per gestire il traffico dei velivoli.
- **Sistemi informatici e software:** computer, server e software necessari per il monitoraggio e la gestione del traffico aereo e delle operazioni di terra. Questo include sistemi di radar, tracciamento GPS, e software di gestione del traffico.

- Sistemi di visualizzazione e monitoraggio: schermi ad alta risoluzione, console di controllo, e altri dispositivi di visualizzazione e monitoraggio.
- Arredamento e comfort: l'arredamento della cabina, inclusi sedie ergonomiche, scrivanie, e altri mobili necessari per il comfort degli operatori.
- Sistemi di alimentazione di riserva: generatori di emergenza e sistemi di backup per garantire la continuità operativa in caso di interruzione di.
- Installazione e configurazione: i costi di manodopera per l'installazione e la configurazione di tutti i sistemi e le attrezzature.

In totale si stima che i costi necessari alla costruzione di una cabina di controllo per vertiporti di piccole dimensioni si aggira attorno ai \$55.000 (secondo preventivo da [50]) mentre per i vertiporti di grandi dimensioni si possono raggiungere i \$142.000 (secondo preventivo da [50]).

Anche questa voce, come le precedenti. È soggetta a riduzione dei costi dovuto al fattore di apprendimento.

Si ipotizza che vertiporti aventi fino a 3 pads di decollo/atterraggio utilizzino cabine di controllo di piccole dimensioni.

4.4.7 Costo dell'Area Passeggeri

Il costo di una zona passeggeri per un vertiporto con una capacità di 30 persone può variare notevolmente in base a vari fattori.

- La costruzione della zona passeggeri, compresi materiali di costruzione, isolamento, finestre, porte, e sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e aria condizionata). Questo include le installazioni elettriche e idrauliche di base.
- Sedie, tavoli, panchine, e altri mobili necessari per il comfort dei passeggeri. Questo include anche i servizi igienici e le aree di attesa.
- Schermi per le informazioni sui voli, sistemi di annunci pubblici, e altre attrezzature di comunicazione.
- Sistemi di sorveglianza, rilevatori di metallo, scanner per bagagli e altre attrezzature di sicurezza.
- I costi di manodopera per l'installazione e la configurazione di tutte le attrezzature e sistemi.

Il massimo costo stimato per la prima produzione di una zona passeggeri è pari a \$20000 [51] a cui verrà applicato un fattore di apprendimento correttivo.

4.4.8 Costo del faro

Il costo del faro per vertiporti, valutandolo sul costo associato agli eliporti, è assestato attorno ai \$3099 [52] ed essendo una struttura ampiamente applicata, non è soggetta a riduzione.

4.4.9 Costo delle antenne 5G

Il costo delle antenne 5G è stato ampiamente affrontato nel paragrafo 4.2, in cui il costo di prima produzione è stato valutato pari a \$105.00. Tale costo tenderà a diminuire grazie ad un fattore di apprendimento pari a 0.85, prevedendo che la produzione sia divisa equamente tra manuale e automatizzata.

4.4.10 Costo del Parcheggio Interrato

Il costo di un parcheggio interrato per 10 auto (100 m²) è significativamente più elevato rispetto a un parcheggio di superficie, a causa delle complessità ingegneristiche, delle necessità strutturali e dei sistemi di sicurezza aggiuntivi. In particolare:

- Scavo e movimento terra: lo scavo per creare uno spazio sotterraneo è una delle fasi più costose. Il cui costo varia a seconda della profondità, delle condizioni del terreno e dell'accessibilità del sito.
- Struttura di sostegno: la costruzione delle pareti e del soffitto in cemento armato per garantire la stabilità e la sicurezza della struttura.
- Sistema di drenaggio: un adeguato sistema di drenaggio è essenziale per prevenire l'accumulo di acqua.
- Pavimentazione: la pavimentazione dell'area può essere realizzata con materiali resistenti come il cemento.
- Ventilazione: i sistemi di ventilazione sono necessari per garantire un'adeguata circolazione dell'aria e prevenire l'accumulo di gas di scarico.
- Illuminazione: l'installazione di un sistema di illuminazione adeguato.
- Ascensori e rampe: Se necessario, l'installazione di ascensori o rampe per l'accesso ai piani inferiori.

Con le valutazioni riportate, il costo di un parcheggio interrato per 50 posti macchina può raggiungere \$106000 [52].

4.5 Costi operativi dei vertiporti

I costi operativi dei vertiporti sono una componente cruciale per la sostenibilità e l'efficienza del sistema UAM. Questi costi comprendono diverse categorie essenziali per garantire il funzionamento sicuro e continuo delle strutture. Tra i principali elementi figurano i costi di manutenzione delle infrastrutture fisiche, come le piste di decollo e atterraggio e gli hangar, che necessitano di cure costanti per mantenere la loro funzionalità e sicurezza. Inoltre, le spese per il personale, inclusi i tecnici, il personale di controllo del traffico aereo e il personale di supporto a terra, rappresentano una parte significativa dei costi operativi, poiché la gestione di un vertiporto richiede competenze specializzate e una presenza continua.

A questi si aggiungono i costi energetici, che comprendono non solo l'elettricità per alimentare le strutture e i sistemi di illuminazione, ma anche l'energia necessaria per ricaricare gli eVTOL, la cui domanda è destinata

a crescere con l'aumento del traffico aereo. Le spese per la sicurezza sono essenziali per prevenire incidenti e garantire la sicurezza dei passeggeri e del personale. Inoltre, i costi amministrativi, che includono la gestione delle operazioni quotidiane, la pianificazione logistica e l'assicurazione, contribuiscono al quadro complessivo dei costi operativi.

La distinzione principale all'interno dei costi operativi può essere fatta tra Costi operativi Diretti ed Indiretti:

- Costi operativi Diretti (DOC):

I costi operativi diretti rappresentano tutte le spese strettamente connesse alla produzione di beni o alla fornitura di servizi da parte di un'azienda. Questi costi sono intrinsecamente legati all'attività principale dell'impresa e possono essere attribuiti direttamente a un particolare prodotto, servizio o linea di produzione. Di conseguenza, i costi operativi diretti tendono a variare proporzionalmente con il volume di produzione o l'entità dell'attività svolta.

I costi operativi diretti si suddividono in costi di proprietà (COO), costi operativi del flusso di cassa (COC) e costi operativi diretti aggiuntivi (ADOC):

1. Costi di proprietà (COO): questi includono spese quali il deprezzamento, gli interessi e i costi assicurativi. Nel contesto dell'UAM, oltre ai tradizionali costi di deprezzamento degli aeromobili, bisogna considerare i costi associati all'acquisto e al deprezzamento delle batterie. Il prezzo delle batterie è generalmente determinato dai kilowattora (kWh), mentre il deprezzamento dipende dai cicli di carica/scarica. Poiché le batterie non si esauriscono necessariamente con ogni volo, il loro ciclo di vita può essere gestito in modo da ottimizzare i costi. Inoltre, a causa degli elevati standard del settore aeronautico, potrebbe essere vantaggioso riciclare le batterie per altri usi terrestri o smontare i pacchi batteria per riutilizzarne i materiali.
2. Costi operativi del flusso di cassa (COC): questi costi comprendono le spese per l'equipaggio, che nella prospettiva di una futura guida autonoma potrebbero subire significative variazioni. Rispetto all'aviazione civile, l'UAM non richiede assistenti di volo, ma solo personale di terra e, eventualmente, un pilota. Anche il costo del carburante varia notevolmente poiché viene sostituito dall'elettricità o, in alcuni casi, dall'idrogeno liquido. I costi di manutenzione previsti includono interventi su motori, avionica, sistemi elettrici, pneumatici, sistemi idraulici, controllo del volo e strutture. In aggiunta, i COC includono le tasse aeroportuali, sia per le operazioni a terra che per quelle in volo.
3. Costi operativi diretti aggiuntivi (ADOC): questi costi comprendono oneri relativi ai sistemi ambientali e di scambio delle emissioni. La mobilità aerea urbana, essendo principalmente elettrica, non produce emissioni inquinanti durante le operazioni di volo e a terra. Tuttavia, ci potrebbero essere costi legati all'inquinamento ambientale derivanti dalla produzione e dallo smaltimento delle batterie, nonché dalla produzione e dallo stoccaggio di idrogeno.

Comprendere e gestire accuratamente ciascuna di queste componenti dei costi operativi diretti è essenziale per mantenere un equilibrio tra redditività e la capacità di offrire servizi di alta qualità nel settore UAM. L'ottimizzazione delle risorse e l'adozione di soluzioni innovative sono imperativi per consentire alle compagnie aeree di prosperare in un ambiente in continua evoluzione.

- **Costi Operativi Indiretti**

I costi operativi indiretti per l'UAM includono tutte quelle spese essenziali per il funzionamento complessivo di un'azienda, che non possono essere direttamente attribuite a un singolo prodotto, servizio o processo specifico. Questi costi sono generalmente associati alle attività aziendali nel loro insieme e supportano funzioni che contribuiscono all'ambiente operativo generale dell'organizzazione.

A differenza dei costi operativi diretti, che sono strettamente legati a operazioni specifiche o a singoli prodotti, i costi operativi indiretti sono di natura più generale e coprono una vasta gamma di attività aziendali.

Tra i costi operativi indiretti per l'UAM troviamo:

1. **Formazione del personale:** gli investimenti nella formazione del personale sono essenziali, soprattutto in un settore così innovativo come quello della mobilità aerea urbana. La formazione continua garantisce che tutto il personale sia aggiornato sulle ultime tecnologie e pratiche operative.
2. **Personale di terra:** questi costi riguardano i servizi di assistenza a terra, come la gestione dei passeggeri e dei bagagli, il rifornimento di carburante e la manutenzione degli aeromobili quando non sono in volo. Questi servizi sono fondamentali per garantire operazioni fluide e sicure.
3. **Costi amministrativi:** questi includono le spese per il personale e le risorse impiegate nelle funzioni amministrative, come contabilità, risorse umane e altre attività di supporto. Il personale amministrativo svolge un ruolo cruciale nel mantenere l'efficienza operativa dell'azienda.
4. **Costi di distribuzione e marketing:** questi costi includono le spese sostenute per consegnare prodotti o servizi ai clienti finali e per le attività di marketing e pubblicità necessarie per attirare clienti e promuovere i servizi offerti. Per le compagnie aeree, il marketing efficace è fondamentale per costruire una base di clienti solida e per la promozione dei propri servizi.

Sulla base del modello di costo illustrato in [39] lo si implementa ed ottimizza come segue.

4.5.1 Modellazione dei DOC

In questa sezione si illustra il metodo con il quale vengono parametrizzati i Costi Operativi Diretti, partendo dalla base del modello illustrato in [62]:

- **Costi sul capitale**

Per stimare i costi sul capitale è stato necessario effettuare una valutazione sul costo di produzione dei vertiporti, come riportato nel paragrafo 4.4. Nel modello è stata inoltre inserita la possibilità di selezionare il vertiporto e le sue caratteristiche in base al numero di pad di decollo/atterraggio.

Noto l'investimento iniziale sul vertiporto, si possono valutare i costi sul capitale, i quali si dividono in:

1. **Ammortamento dell'investimento iniziale:** è un processo contabile e finanziario che consente di distribuire il costo di un bene o di un investimento iniziale su un periodo di tempo prestabilito. Questo processo permette di riflettere in maniera accurata l'utilizzo del bene e la sua diminuzione di valore nel tempo. Il metodo più comune per calcolare l'ammortamento è il metodo a quote costanti, ma esistono anche altri metodi come l'ammortamento a quote decrescenti e l'ammortamento in base all'utilizzo effettivo del bene. L'ammortamento offre vari vantaggi, tra cui riflettere l'usura e il deterioramento del bene. Con il tempo, i beni fisici perdono valore a causa dell'usura e di eventuali danni. L'ammortamento consente di registrare questa perdita di valore in modo sistematico e coerente.

Il metodo a quote costanti segue l'utilizzo della formulazione:

$$DOC_{dep} = (1 - res) \frac{VC}{P_{dep}}$$

VC: costo di produzione del vertiporto.

P_{dep} : rappresenta il periodo di deprezzamento al termine del quale il valore dell'infrastruttura risulta essere pari al 'res' del valore iniziale. Il periodo usualmente adoperato per le infrastrutture dei trasporti è di 40 anni.

res: valore residuo dell'infrastruttura al termine del periodo di deprezzamento.

2. **Interessi:** sono le spese sostenute per il denaro preso in prestito. Questi costi rappresentano il compenso che il mutuatario deve pagare al prestatore per l'uso dei fondi per un periodo di tempo specifico. Gli interessi possono essere calcolati in base a vari metodi, come il tasso fisso o variabile, e possono essere composti annualmente, mensilmente o secondo altre frequenze stabilite nel contratto di prestito. I costi di interesse influenzano il costo totale dell'indebitamento e sono una componente chiave nella pianificazione finanziaria e nella gestione del debito.

Valutando il tasso fisso, tale costo può esser valutato attraverso la formulazione:

$$DOC_{int} = \frac{IR(VC - FV)}{1 - (1 + IR)^{-P_{int}}} - \frac{VC}{P_{int}}$$

FV: valore del vertiporto alla fine del periodo di deprezzamento.

P_{int} : periodo concordato con il creditore per il pagamento.

IR: valore percentuale degli interessi.

3. Assicurazione: comprende diverse coperture essenziali per proteggere l'infrastruttura e le operazioni dai rischi finanziari associati a possibili incidenti, danni o responsabilità legali. Questi costi includono l'assicurazione per la struttura fisica del vertiporto, che copre danni causati da eventi naturali, incendi, vandalismo e altri rischi. Inoltre, l'assicurazione per la responsabilità civile è fondamentale per proteggere il vertiporto da richieste di risarcimento per incidenti che possono coinvolgere passeggeri, personale o terzi, sia a terra che durante le operazioni di decollo e atterraggio. Altre polizze possono includere l'assicurazione contro il terrorismo, la copertura per l'interruzione dell'attività, che protegge contro le perdite di reddito derivanti da eventi imprevisti, e l'assicurazione per la responsabilità ambientale, che tutela contro i danni causati da inquinamento o contaminazione. Per questo tipo di infrastruttura, il costo dell'assicurazione si aggira intorno all'1% del valore iniziale.

$$DOC_{ins} = 0.01 \cdot VC$$

In conclusione i costi sul capitale possono essere valutati come la somma delle tre voci elencate in precedenza:

$$DOC_{cap} = DOC_{dep} + DOC_{int} + DOC_{ins}$$

- **Costi del personale**

I costi del personale di un vertiporto sono associati allo stipendio delle categorie necessarie al funzionamento della struttura stessa:

1. Controllori di volo: svolgono un ruolo cruciale nella gestione e sicurezza delle operazioni di decollo e atterraggio degli eVTOL. Essi sono responsabili di monitorare e dirigere il traffico aereo in prossimità del vertiporto, garantendo che gli eVTOL operino in sicurezza e in conformità con le normative aeronautiche. Questo include il coordinamento dei movimenti degli aeromobili in arrivo e in partenza, fornendo istruzioni precise ai piloti su rotte, altitudini e sequenze di atterraggio e decollo. Inoltre, i controllori di volo devono gestire le comunicazioni tra i piloti e il vertiporto, fornendo aggiornamenti su condizioni meteorologiche, eventuali ostacoli e altri fattori che possono influenzare le operazioni di volo. Essi sono anche addestrati per rispondere prontamente a situazioni di emergenza, coordinando le procedure di soccorso e comunicando con le squadre di emergenza.

$$DOC_{ControlCrew} = Lr_{ControlCrew} \cdot n_{ControlCrew}$$

Lr rappresenta il salario annuale lordo.

2. **Assistenti di terra:** svolgono una serie di compiti fondamentali per garantire il corretto funzionamento delle operazioni a terra e la sicurezza dei passeggeri e degli aeromobili. Le loro responsabilità includono la gestione del carico e scarico dei passeggeri, la movimentazione dei bagagli, e l'assistenza nell'imbarco e sbarco. Inoltre, si occupano del rifornimento e della manutenzione degli eVTOL, controllando che siano pronti per il volo e segnalando eventuali problemi tecnici ai tecnici specializzati. Gli assistenti di terra sono anche responsabili di guidare gli eVTOL nelle manovre di parcheggio e posizionamento all'interno del vertiporto, utilizzando segnali manuali o attrezzature specifiche per assicurarsi che gli aeromobili si muovano in modo sicuro e coordinato. Inoltre, forniscono supporto nella gestione delle emergenze, collaborando con i controllori di volo e le squadre di emergenza per eseguire evacuazioni o interventi necessari.

$$DOC_{HostessCrew} = Lr_{HostessCrew} \cdot n_{HostessCrew}$$

3. **Sicurezza:** gli addetti alla sicurezza in un vertiporto hanno un ruolo cruciale nel garantire la protezione di passeggeri, personale e infrastrutture. Le loro responsabilità includono il controllo degli accessi, assicurandosi che solo persone autorizzate possano entrare nelle aree riservate del vertiporto. Eseguono controlli di sicurezza sui passeggeri e sui bagagli, utilizzando attrezzature come scanner e metal detector per prevenire l'ingresso di oggetti proibiti o pericolosi, monitorano costantemente le telecamere di sorveglianza e altre tecnologie di sicurezza per rilevare attività sospette o anomalie. Gli addetti alla sicurezza sono anche addestrati a rispondere rapidamente a situazioni di emergenza, come incendi, evacuazioni o minacce alla sicurezza, coordinando le operazioni di risposta e assistendo le forze dell'ordine e i servizi di emergenza. Svolgono anche ispezioni regolari delle strutture del vertiporto per identificare e mitigare potenziali rischi di sicurezza, implementando misure preventive e correttive.

$$DOC_{SecurityCrew} = Lr_{SecurityCrew} \cdot n_{SecurityCrew}$$

- **Costi per l'energia elettrica**

Le valutazioni sull'energia elettrica consumata annualmente saranno valutate moltiplicando i singoli consumi elettrici per le ore operative annuali (18 ore al giorno per 292 giorni):

$$CONS\left[\frac{kW}{yr}\right] = cons [kW] \times 18\left[\frac{h}{day}\right] \times 292\left[\frac{day}{yr}\right]$$

Al fine di valutare il costo dell'energia elettrica utilizzata nei vertiporti, bisogna valutare il consumo energetico di ogni singolo componente del vertiporto:

1. Pad di decollo/atterraggio: si stima che il consumo di potenza elettrica per l'illuminazione (illuminazione ambinetale e stradale) per ogni Pad sia di circa 5W [54] che moltiplicati per le ore operative, determina un consumo di potenza elettrica annuo pari a 26.28 kWh.
2. Pad di parcheggio: inserendo il consumo dell'illuminazione sulla taxiway e l'illuminazione del singolo slot di parcheggio con potenza pari a 3W [54], il consumo si stima pari a 15.77 kWh all'anno.
3. Il consumo dei charger normali e dei supercharger viene valutato attraverso la capacità delle batterie degli eVTOL ed il numero di decolli annui. Si assume che l'eVTOL sia in grado di effettuare due tratte con una sola ricarica, andando a ricaricare completamente la propria batteria ogni 2 decolli. Si assume un rendimento di ricarica pari al 92% (mediato tra charger normale e supercharger). Si può valutare il consumo annuo dei Charger attraverso la formulazione:

$$CONS = \frac{\eta NC}{2}$$

η : rendimento di ricarica.

N : numero di decolli annui.

C : capacità della batteria.

4. Il consumo energetico degli Hangar è derivante dalla loro illuminazione (il consumo energetico dei tool per la manutenzione verrà valutato nel paragrafo di studio della manutenzione). Tale consumo si stima attorno ai 70.93 kWh [55] all'anno per ogni hangar.
5. Il sistema di sicurezza ha un consumo energetico derivante dall'utilizzo di videocamere, sensori di movimento, trasmissione del segnale e delle attrezzature per il controllo dei passeggeri e dei bagagli. Il consumo energetico annuo varia a seconda delle dimensioni dell'impianto, aggirando intorno ai 70 kWh [56] all'anno.
6. Il sistema antincendio è caratterizzato da un consumo energetico irrisorio derivante dai soli rilevatori di fumo e consumo degli allarmi in stand-by.
7. La cabina di controllo è caratterizzata da consumi energetici elevati dovuti all'utilizzo di sistemi di controllo energetici e all'illuminazione. Il consumo annuo varia a seconda delle dimensioni e si stima intorno ai 120 kWh [57].

8. La zona adibita ai passeggeri è caratterizzata da un consumo variabile in base alle dimensioni della stessa in quanto essi sono dipendenti dall'area da illuminare. I consumi energetici annuali possono ammontare a 110 kWh [58].
9. Il faro di segnalazione è composta da una potente fonte luminosa, tipicamente fari allo Xeno, aventi consumo energetico annuo pari a circa 78.84 kWh [59].
10. Il consumo dell'antenna 5G risulta rilevante nel computo totale. Essa deve smaltire grossi flussi di dati ad estrema velocità, portando il consumo energetico di questo servizio a circa 4204 kWh [60] all'anno.
11. Il parcheggio per le auto (100 m²) sarà dotato di barra automatica ed illuminazione per un consumo di 2 W/m² [61] totale annuo di circa 845 kWh .

Il costo dell'energia elettrica sarà quindi valutato attraverso il consumo annuo (E_{tot}) moltiplicato per il costo dell'energia elettrica valutato nel paragrafo 4.1.

$$DOC_{ec} = E_{tot} \cdot 1,171\$/kWh$$

- **Tasse**

Le tasse che un vertiporto deve pagare variano in base alla localizzazione, la struttura legale dell'operatore e le normative locali, statali e nazionali. La tassa sulla proprietà è una tassa annuale calcolata sul valore della proprietà immobiliare dove è situato il vertiporto e l'importo varia a seconda delle valutazioni locali delle proprietà e delle aliquote stabilite dai governi locali. La tassa sulle attività commerciali è una tassa imposta per le attività commerciali, basata sui ricavi annuali o sul tipo di attività svolta e può includere licenze commerciali o tasse sui servizi specifici forniti. Le imposte sul reddito aziendale riguardano i profitti generati dal vertiporto, che possono essere soggetti a imposte sul reddito a livello federale, statale e, in alcuni casi, municipale. Le aliquote possono variare significativamente.

L'IVA o imposte sulle vendite si applicano se il vertiporto offre servizi soggetti a imposta, come il noleggio di spazi o servizi di manutenzione.

Tasse ambientali possono includere tasse specifiche per l'uso del suolo, la gestione dei rifiuti, l'emissione di rumori o l'inquinamento ambientale, e sono particolarmente rilevanti per le operazioni che coinvolgono velivoli.

Le imposte sui dipendenti includono le imposte sul reddito dei dipendenti, contributi previdenziali, assicurazione contro gli infortuni sul lavoro e altri obblighi fiscali legati al personale (queste tasse sono state incluse nei costi del personale).

La tassa per l'utilizzo di infrastrutture pubbliche si applica se il vertiporto utilizza infrastrutture pubbliche, e potrebbe essere soggetto a tasse o canoni per l'uso di strade, ponti o altre infrastrutture.

Le tasse per licenze e permessi possono includere le tasse per ottenere e rinnovare le licenze operative, i permessi di costruzione e altri permessi necessari per operare legalmente. Le imposte sulla pubblicità si applicano se il vertiporto utilizza cartelloni pubblicitari o altre forme di pubblicità fisica, e potrebbero essere applicabili imposte locali sulla pubblicità.

Questi costi fiscali variano ampiamente a seconda della giurisdizione e delle specifiche circostanze operative del vertiporto.

In particolare la tassazione italiana si aggira attorno al 4% annuo del valore iniziale dell'immobile, di cui la maggior parte è imputabile alle tasse di proprietà.

$$DOC_{tax} = 0,04 \cdot VC$$

- **Manutenzione**

La manutenzione di un vertiporto risulta fondamentale per il funzionamento continuo del sistema di trasporto. In particolare, risulta necessaria la manutenzione per ogni elemento presente all'interno del vertiporto:

1. **Manutenzione dei pad di decollo/atterraggio e parking:** include diverse attività essenziali per garantire la sicurezza e l'efficienza operativa. Il controllo regolare delle superfici è fondamentale per rilevare e riparare eventuali cricche o danni causati dai cicli di carico a fatica e dalle condizioni atmosferiche. È necessario verificare l'integrità e la funzionalità delle luci di segnalazione e dei sistemi di illuminazione, sostituendo le lampadine difettose e assicurando che i segnali siano chiaramente visibili. Inoltre, va effettuata la pulizia periodica delle superfici per rimuovere detriti, ghiaccio o altre ostruzioni che potrebbero compromettere le operazioni di decollo e atterraggio. I sistemi di drenaggio devono essere ispezionati e mantenuti per prevenire accumuli d'acqua. Infine, è importante controllare e mantenere i dispositivi antincendio presenti sul pad, assicurando che siano pronti all'uso in caso di emergenza.
2. **Manutenzione dei charger:** è necessario eseguire ispezioni regolari per rilevare eventuali danni fisici, usura dei cavi e connessioni allentate. Il sistema di raffreddamento deve essere controllato e mantenuto per prevenire surriscaldamenti. I software di gestione e controllo devono essere aggiornati periodicamente per ottimizzare le prestazioni e la sicurezza. Inoltre, è importante pulire le stazioni di ricarica per rimuovere polvere e detriti che potrebbero compromettere la connessione elettrica. Infine, i dispositivi di sicurezza, come i sistemi di protezione da sovraccarico e cortocircuito, devono essere testati e verificati per assicurarsi che funzionino correttamente in caso di anomalie.
3. **Manutenzione degli Hangar:** include diverse attività essenziali per garantirne l'integrità e la funzionalità. È necessario effettuare ispezioni periodiche delle strutture portanti e delle coperture per rilevare eventuali danni o corrosioni, procedendo a riparazioni tempestive. I

sistemi di illuminazione e ventilazione devono essere controllati e mantenuti efficienti per assicurare un ambiente di lavoro sicuro. Le porte degli hangar, soprattutto quelle automatiche, richiedono controlli regolari e lubrificazione delle parti mobili per evitare malfunzionamenti. Inoltre, è fondamentale verificare e mantenere in buono stato i sistemi antincendio e di sicurezza, assicurandosi che estintori, allarmi e rilevatori siano operativi. Infine, la pulizia generale dell'hangar, inclusa la rimozione di polvere e detriti, contribuisce a mantenere un ambiente sicuro.

4. Manutenzione dell'impianto di sicurezza e antincendio: è vitale effettuare controlli periodici su tutti i rilevatori di fumo, sensori di calore e allarmi antincendio per assicurarsi che siano funzionanti e correttamente calibrati. Gli estintori devono essere ispezionati regolarmente per verificarne la pressione e la carica, sostituendo quelli scaduti o danneggiati. I sistemi di irrigazione antincendio, come sprinkler e idranti, richiedono test periodici per assicurare una distribuzione efficiente dell'acqua in caso di emergenza. Anche le uscite di emergenza e le luci di sicurezza devono essere controllate per garantire che siano sempre operative e accessibili. È importante aggiornare regolarmente i protocolli di sicurezza e formazione del personale per mantenere un alto livello di preparazione in caso di emergenza. Anche l'impianto di sicurezza necessita di manutenzione, in particolare i software, gli schermi e le telecamere di sorveglianza nonché i rilevatori di movimento e le recinzioni.
5. Manutenzione della cabina di controllo: gli apparati di comunicazione devono essere ispezionati e testati regolarmente per assicurarsi che funzionino correttamente, sostituendo componenti usurati o difettosi. I sistemi radar e di monitoraggio devono essere calibrati e aggiornati periodicamente per mantenere l'accuratezza del controllo del traffico aereo. Le postazioni di lavoro e le console dei controllori devono essere pulite e mantenute in ordine per prevenire malfunzionamenti causati da polvere e sporco. I software utilizzati per la gestione del traffico aereo devono essere aggiornati con le ultime versioni per garantire la sicurezza informatica e migliorare le funzionalità operative. Bisogna condurre sessioni di formazione periodiche per il personale per garantire che siano aggiornati sulle procedure operative e sulle emergenze.
6. Manutenzione dell'area destinata ai passeggeri: le superfici e gli arredi devono essere puliti regolarmente per mantenere un ambiente igienico. I sistemi di climatizzazione e ventilazione devono essere ispezionati e mantenuti per garantire il funzionamento efficiente e un'adeguata qualità dell'aria. Gli impianti di illuminazione devono essere controllati e le lampadine sostituite prontamente per garantire una buona visibilità. Le segnalazioni di sicurezza e le uscite di emergenza devono essere verificate per assicurarsi che siano sempre chiaramente visibili e funzionanti. I servizi igienici devono essere puliti frequentemente e riforniti di materiali di consumo come sapone e carta igienica. Le attrezzature tecnologiche,

come schermi informativi e sistemi di annunci, devono essere controllate e aggiornate per fornire informazioni accurate e tempestive ai passeggeri.

7. Manutenzione del faro e dell'antenna 5G: per il faro, è necessario effettuare controlli regolari delle lampade e delle lenti per assicurarsi che siano pulite e funzionanti, sostituendo le componenti difettose immediatamente. Il sistema elettrico del faro deve essere ispezionato periodicamente per prevenire guasti. Per l'antenna 5G, è fondamentale monitorare le prestazioni per garantire una trasmissione dati ottimale e intervenire prontamente in caso di malfunzionamenti. Le connessioni e i cablaggi devono essere controllati per evitare problemi di connessione. Inoltre, l'antenna stessa deve essere mantenuta libera da ostruzioni e pulita da eventuali accumuli di sporco o detriti. Aggiornamenti software e firmware devono essere eseguiti regolarmente per mantenere l'efficienza e la sicurezza del sistema di comunicazione.
8. Manutenzione del parcheggio per le automobili: la pavimentazione deve essere ispezionata regolarmente per identificare e riparare crepe, buche o altri danni che potrebbero compromettere la sicurezza dei veicoli. Le segnaletiche orizzontali e verticali devono essere ben visibili e ritoccate o sostituite quando necessario. I sistemi di illuminazione devono essere controllati e mantenuti per assicurare che l'area sia adeguatamente illuminata. I sistemi di drenaggio devono essere mantenuti efficienti per prevenire accumuli d'acqua o allagamenti. Le sbarre d'accesso e le attrezzature automatiche devono essere regolarmente ispezionate e sottoposte a manutenzione per garantire il loro corretto funzionamento.

Il costo annuale totale di manutenzione viene stimato sulla totalità delle voci viste in precedenza. Da una stima approssimativa, tale costo si aggira intorno al 5% del valore iniziale del vertiporto.

$$DOC_{main} = 0,05 \cdot VC$$

4.5.2 Modellazione dei IOC

Segue la modellizzazione dei Costi Operativi Indiretti partendo dalla base del modello illustrato in [62]:

- **Marketing e Pubblicità**

Comprendono diverse voci che possono essere suddivise in varie categorie, ognuna con specifiche tecniche e necessità di risorse. La creazione di campagne pubblicitarie, ad esempio, richiede un team di professionisti tra cui grafici, copywriter, fotografi e videomaker. Questi professionisti sviluppano contenuti visivi e testuali che rispecchiano l'immagine e i valori del vertiporto. La produzione di materiali pubblicitari può includere spot televisivi, video promozionali, banner digitali, post sui social media, e articoli di marketing. Ognuno di questi elementi comporta costi variabili a seconda della complessità e della qualità richiesta.

La gestione delle campagne pubblicitarie su diverse piattaforme rappresenta un altro costo significativo. Questa gestione richiede competenze specifiche in digital marketing e l'utilizzo di

software avanzati per la gestione delle campagne. I costi di gestione includono non solo il personale qualificato, ma anche l'allocazione di budget per l'acquisto di spazi pubblicitari su diverse piattaforme, inclusi social media, motori di ricerca, siti web, e media tradizionali come giornali, radio e TV. Ogni piattaforma ha tariffe differenti basate su vari fattori come il targeting, il pubblico, e la durata delle campagne.

La partecipazione a fiere ed eventi del settore è un'altra fonte di spesa. Questi eventi sono cruciali per la visibilità e le relazioni pubbliche del vertiporto, ma comportano costi per la prenotazione di spazi espositivi, la progettazione e allestimento di stand, e la produzione di materiali promozionali come brochure, gadget, e presentazioni. Inoltre, i costi di viaggio, alloggio e vitto per il personale inviato a questi eventi rappresentano una voce di spesa importante.

Le attività di pubbliche relazioni e la gestione della reputazione richiedono spesso il coinvolgimento di agenzie esterne specializzate in PR. Queste agenzie si occupano di relazioni con i media, organizzazione di conferenze stampa, e gestione delle crisi reputazionali. Il costo dei servizi di PR può variare notevolmente a seconda della portata delle attività richieste e della reputazione dell'agenzia coinvolta.

Inoltre, l'analisi e il monitoraggio delle campagne pubblicitarie sono fondamentali per valutarne l'efficacia e ottimizzare le strategie future. Questo processo richiede l'uso di software di analisi dei dati e strumenti di monitoraggio delle performance, che comportano costi di licenza e abbonamento. Inoltre, è necessario disporre di personale qualificato in data analytics per interpretare i dati e fornire raccomandazioni strategiche.

Una stima approssimativa dei costi della pubblicità e marketing può essere effettuata attraverso la formulazione:

$$IOC_{pub} = 0,005 \cdot VC + n_{marketing} \cdot Lr_{marketing}$$

I costi relativi alla pubblicità del vertiporto ammontano a circa lo 0,5% dell'investimento iniziale sul vertiporto, al quale viene sommato il prodotto tra il numero degli impiegati adibiti a tale compito e il loro stipendio annuo lordo.

- **Costi di amministrazione**

I costi di amministrazione legati ad un intero sistema di vertiporti riflettono la necessità di coordinamento e gestione efficiente di tutte le operazioni. Essi comprendono salari e stipendi per il personale amministrativo, inclusi dirigenti, amministratori, responsabili delle risorse umane, contabili, e addetti alla gestione delle relazioni con i clienti. La retribuzione di queste figure è spesso significativa, in quanto rappresentano ruoli chiave per il funzionamento del sistema.

Un altro costo rilevante è rappresentato dai sistemi informatici e software di gestione. Questi

includono software di gestione operativa, sistemi di gestione delle risorse umane, programmi per la contabilità e il controllo di gestione, e software di pianificazione e analisi. Questi strumenti richiedono investimenti iniziali per l'acquisto delle licenze, nonché costi continui per aggiornamenti, manutenzione e supporto tecnico.

Le spese legate agli uffici amministrativi comprendono l'affitto degli spazi, le utenze (come energia elettrica, acqua, riscaldamento), i costi di arredamento e manutenzione degli uffici, e le forniture di materiale di consumo (cancelleria, dispositivi di stampa, ecc). Questi costi possono variare significativamente a seconda della localizzazione e delle dimensioni degli uffici.

I costi legali e di conformità sono un'altra voce importante. Essi includono le spese per consulenze legali, tasse di registrazione e licenze, assicurazioni, e costi per la conformità alle normative locali, nazionali e internazionali. In un settore altamente regolamentato come quello dei vertiporti, mantenere la conformità alle normative è cruciale e può comportare costi significativi.

Le attività di comunicazione interna ed esterna, inclusi i sistemi di comunicazione aziendale, le piattaforme di collaborazione interna contribuiscono anch'esse ai costi amministrativi. Questi strumenti sono fondamentali per il coordinamento delle operazioni e per la promozione dell'immagine e dei servizi del sistema di vertiporti.

Di fondamentale importanza è la gestione delle relazioni con i fornitori e i partner commerciali richiede risorse dedicate. Le attività di procurement, negoziazione dei contratti, e gestione delle forniture sono essenziali per mantenere l'efficienza operativa e possono comportare costi amministrativi significativi.

I costi amministrativi possono essere stimati approssimativamente attraverso la relazione:

$$IOC_{amm} = n_{finance} \cdot Lr_{finance} + n_{op} \cdot Lr_{op}$$

In questa stima sono state suddivise le figure professionali in due macro categorie, una prima adibita all'analisi e gestione finanziaria, la seconda all'analisi e gestione operativa. Come visto in precedenza n rappresenta il numero di operatori, Lr lo stipendio annuale lordo.

- **Costi di mercato**

Questi costi possono variare a seconda della complessità del sistema, del numero di vertiporti coinvolti e delle specifiche tecnologie e servizi implementati.

Costi di gestione delle prenotazioni: questi comprendono le spese per software e piattaforme di gestione delle prenotazioni, nonché il personale dedicato alla gestione delle prenotazioni, al servizio clienti e all'assistenza tecnica. Potrebbero essere necessari sistemi di pagamento online sicuri e integrati.

Costi di vendita diretta: questi includono le spese per il personale di vendita, agenti commerciali,

formazione del personale e viaggi per incontri con clienti potenziali. Anche le commissioni e gli incentivi per i venditori possono rientrare in questa categoria.

Costi di commissione e intermediazione: se il sistema di vertiporti utilizza intermediari o agenzie per facilitare la vendita e la prenotazione, le commissioni pagate a questi intermediari rappresentano un costo significativo.

Costi di sviluppo e manutenzione del sito web e dell'app: la creazione e la manutenzione di una piattaforma online per la prenotazione e la gestione delle vendite richiede investimenti in sviluppo web, sicurezza informatica e aggiornamenti continui per garantire un servizio affidabile ed efficiente.

I costi di mercato possono essere approssimati attraverso la relazione:

$$IOC_{mark} = n_{seller} \cdot Lr_{seller} + Software_{cost} \cdot n_{seller}$$

Si somma quindi il salario annuo degli addetti alle vendite con il costo annuale dei software.

- **Costi di formazione**

La formazione iniziale per il personale amministrativo e di terra include corsi teorici e pratici, materiali didattici e certificazioni necessarie. Questo può comprendere anche l'addestramento su normative di sicurezza, procedure operative standard, gestione delle emergenze e uso di attrezzature specifiche. I costi dei formatori e istruttori includono la retribuzione dei formatori interni o esterni, le spese di viaggio e alloggio per istruttori esterni, e eventuali onorari per consulenti specializzati che offrono sessioni di formazione. La formazione richiede spazi adeguati come aule, simulazioni e aree di addestramento pratico. I costi associati includono l'affitto o la manutenzione di queste strutture, l'acquisto o il noleggio di attrezzature specifiche e le spese per materiali didattici e dispositivi di simulazione. Il personale di un vertiporto deve mantenere le proprie competenze aggiornate. Questo include corsi di aggiornamento periodici, formazione su nuove tecnologie e procedure e certificazioni aggiuntive richieste per rimanere al passo con le evoluzioni del settore e garantire il rispetto delle normative in continua evoluzione. Esso viene stimato pari al 2% dello stipendio annuale degli operatori stessi (manutentori, controllori, amministratori, venditori, addetti alla sicurezza, ecc.).

$$IOC_{train} = 0,02 \cdot Lr_{tot}$$

Capitolo 5

5 Costo delle infrastrutture

In questo capitolo vengono illustrate ed analizzate le conclusioni sul costo delle infrastrutture necessarie per il funzionamento degli eVTOL. Tali conclusioni sono basate su quanto evidenziato nei modelli economici esposti nei precedenti capitoli e sulla generalizzazione dell'applicazione sulla città di Torino.

Verranno illustrati in dettaglio la ripartizione percentuale e l'ammontare totale dei costi di produzione e i costi operativi delle infrastrutture, per giungere in conclusione ad una valutazione approssimata delle tasse vertiportuali intese come costo per ogni atterraggio/decollo.

5.1 Costi di produzione

Capire i costi di realizzazione dei vertiporti è essenziale per vari aspetti legati alla pianificazione, implementazione e operatività dell'UAM. Una conoscenza approfondita di questi costi consente una gestione ottimale delle risorse, assicurando che i progetti siano finanziariamente sostenibili e in linea con gli obiettivi di sviluppo urbano e tecnologico.

Innanzitutto, la conoscenza dei costi di costruzione dei vertiporti è determinante per una corretta pianificazione del budget. Conoscere l'entità degli investimenti necessari permette a investitori e pianificatori di destinare le risorse economiche in modo oculato, evitando sprechi e assicurando che il finanziamento sia sufficiente per portare a termine il progetto. Questo è particolarmente critico in progetti di grande scala, dove sforamenti di budget possono causare ritardi e costi aggiuntivi.

In secondo luogo, i costi di produzione hanno un impatto diretto sulla fattibilità economica del sistema UAM. La conoscenza di questi costi aiuta a individuare aree critiche e opportunità di ottimizzazione, garantendo che l'infrastruttura sia costruita senza sacrificare la funzionalità e la sicurezza.

Infine, la trasparenza sui costi di realizzazione è cruciale per attrarre investitori privati. Questi cercano progetti con costi ben definiti e prevedibili per minimizzare i rischi.

Utilizzando le formulazioni indicate nel capitolo precedente e applicandole al sistema di trasporto implementato nel capitolo 3 e applicato alla città di Torino si è in grado di identificare quali siano i costi necessari alla produzione delle infrastrutture di un sistema di UAM nella sua fase iniziale.

La ripartizione percentuale di tali costi viene illustrata nella seguente figura:

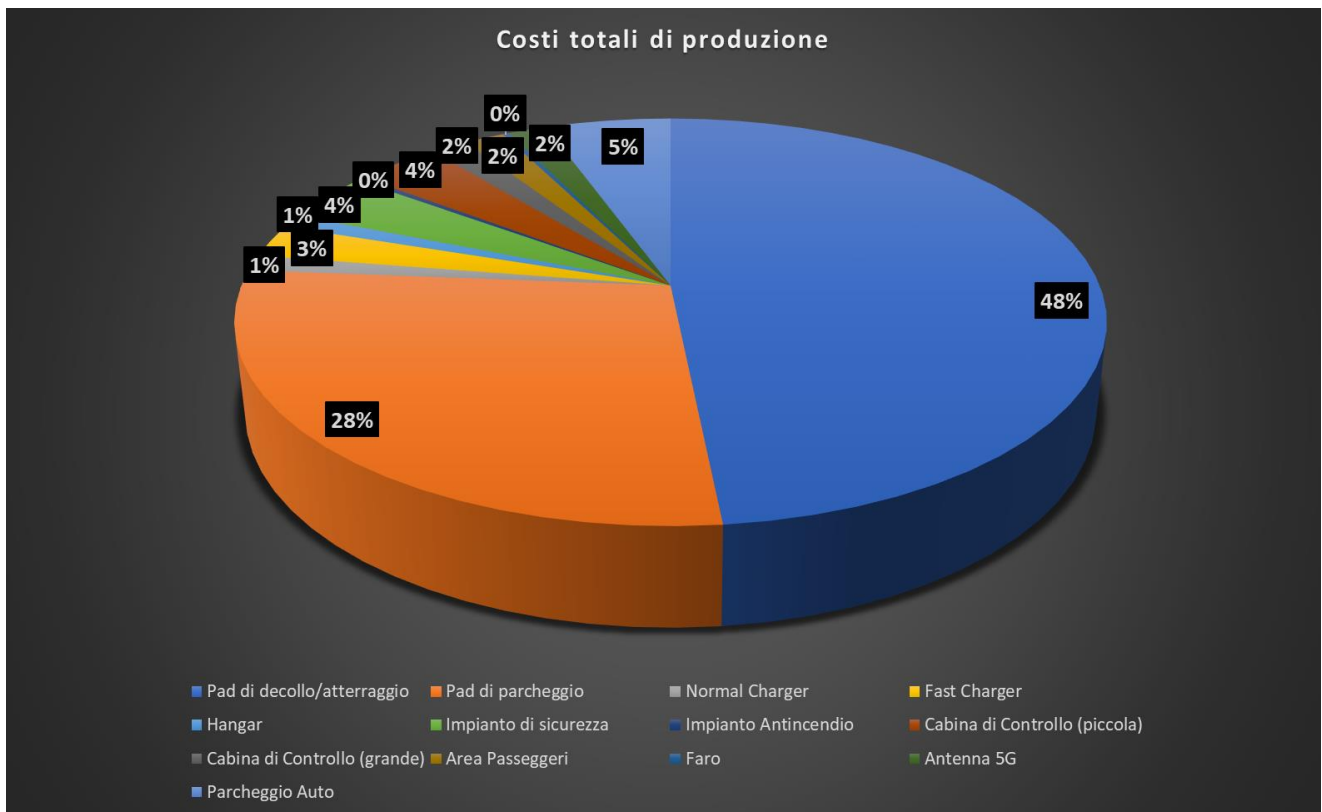


Figura 74: Ripartizione percentuale dei costi di produzione

Tale ripartizione è stata valutata attraverso la simulazione sulla città di Torino, ma potrebbe essere generalizzata in quanto si basa su considerazioni generali.

Dalla figura si evidenzia come il costo maggioritario (~48%) sia imputabile ai pad di decollo ed atterraggio, i quali, oltre ad essere in gran numero, devono possedere elevata rigidezza e resistenza, caratteristiche da ricercare in materiali pregiati, costosi e con standard di sicurezza adeguati dato il compito cruciale ad essi imputato.

La figura evidenzia anche l'importante contributo dei pad di parcheggio (~28%). Essi possiedono caratteristiche strutturali inferiori rispetto alla categoria precedente, ma devono in ogni caso garantire solidità e rigidezza elevate. L'insieme di queste due categorie copre circa i tre quarti del costo di produzione totale del sistema.

Voci come l'installazione dei charger standard (~1%), degli Hangar di parcheggio e manutenzione (~1%), dell'impianto antincendio (~0%) e del faro di segnalazione (~0%) ricoprono un ruolo marginale nel computo del costo totale.

I fast charger a differenza dei charger standard ricoprono circa il 3% del costo totale. La netta differenza nel costo di produzione ed installazione risiede nella potenza erogabile, essi hanno bisogno di un impianto elettrico adeguato che richiede sforzi economici ingenti.

L'impianto di sicurezza ha un costo rilevante (~4%) in quanto, in tale voce vengono inseriti tutti gli apparati relativi alla sicurezza: Scanner, metal detector, tornelli, videosorveglianza, sensori infrarossi, recinzioni di confine, ecc...

Le cabine di controllo risultano essenziali al fine di garantire la sicurezza e il coordinamento del traffico aereo. Il costo dei software, dell'hardware all'avanguardia e della costruzione della cabina stessa, portano il costo a lievitare fino a circa il 6% del totale.

Le valutazioni sul costo dell'antenna 5G sono riportate nel paragrafo 4.2.

Per quanto concerne il test torinese, il costo totale per la produzione di 8 Vertihub, 10 Verstiport e 30 Vertistation ammonta a circa 40 M\$ ripartiti come segue:

	Costo di prima produzione del pad [\$]	Numero di impianti totali	Costo medio [\$]	Total production Cost [\$]
Pad di decollo/atterraggio	325000,00	89	219226	19511195
Pad di parcheggio	130000,00	131	85724	11229926
Normal Charger	7000,00	107	4670	499707
Fast Charger	50000,00	29	36351	1054197
Hangar	13500,00	32	13500	432000
Impianto di sicurezza	49500,00	49	31820	1559207
Impianto Antincendio	4000,00	53	2557	135526
Cabina di Controllo (piccola)	55000,00	42	35755	1501746
Cabina di Controllo (grande)	142000,00	6	110879	665276
Area Passeggeri	20000,00	55	12752	701387
Faro	3099,00	38	3099	117762
Antenna 5G	105000,00	8	84741	677932
Parcheggio Auto	106000,00	21	106000	2226000

5.2 Costi Operativi

I costi operativi sono essenziali per garantire il funzionamento quotidiano di un'azienda o di un'organizzazione, poiché comprendono tutte le spese ricorrenti necessarie per mantenere attive le operazioni. Questi costi includono tutte le voci analizzate nel capitolo 4.

I costi operativi servono principalmente a garantire che l'azienda possa continuare a funzionare senza interruzioni. Senza di essi, un'azienda non potrebbe sostenere la propria attività nel tempo. Inoltre, comprendere e monitorare attentamente questi costi è cruciale per valutare la redditività di un'azienda. L'utile

operativo, calcolato sottraendo i costi operativi dai ricavi, è una misura fondamentale per determinare quanto sia efficiente e sostenibile l'attività.

Inoltre, i costi operativi influenzano direttamente la capacità di un'azienda di adattarsi e crescere in risposta alle condizioni del mercato. Una gestione efficiente di questi costi può liberare risorse per investimenti in innovazione, espansione e miglioramento dei processi, contribuendo così a migliorare la competitività dell'azienda. Al contrario, costi operativi troppo elevati possono limitare la capacità di un'azienda di investire nel futuro, rendendola meno flessibile e più vulnerabile alle fluttuazioni economiche.

Dalla simulazione effettuata sulla città di Torino, risulta la distribuzione percentuale dei costi operativi seguente:

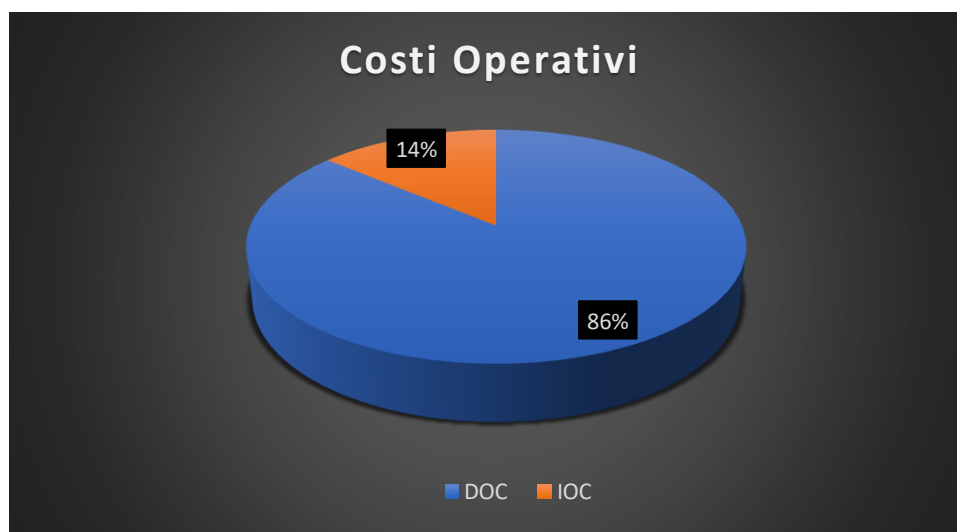


Figura 75: Ripartizione percentuale dei Costi Operativi

Generalizzando, si evidenzia come i Costi Operativi Diretti siano maggioritari (~86%) e quanto i costi relativi alla ricarica e al personale sono ingenti in confronto ai costi relativi all'amministrazione e alla pubblicità (come si vedrà, sono le voci preponderanti all'interno di queste categorie)

5.2.1 Costi Operativi Diretti

I Costi Operativi Diretti (DOC) sono imputabili al singolo vertiporto e attraverso la generalizzazione del modello sviluppato nei capitoli precedenti si è in grado di illustrare la ripartizione percentuale di tali costi.

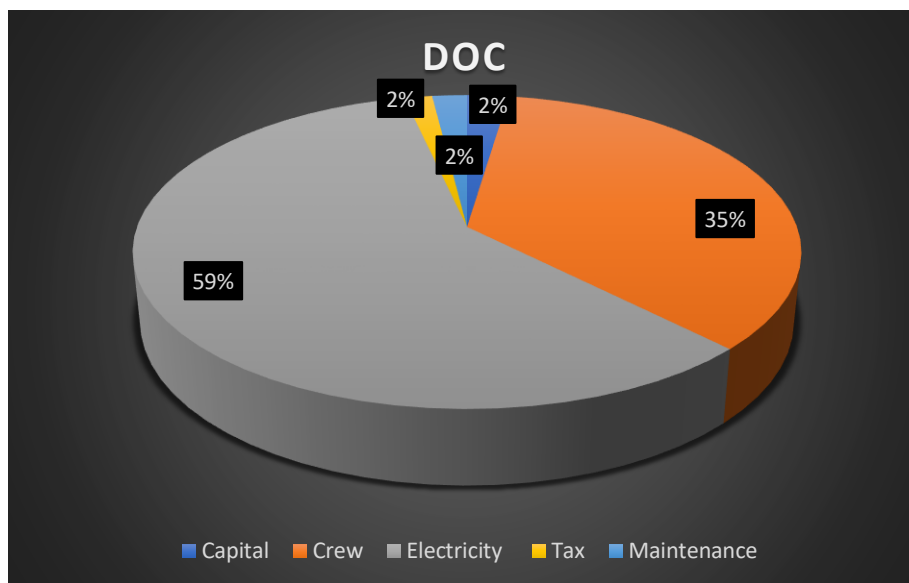


Figura 76: Ripartizione percentuale dei Costi Operativi Diretti

Dalla figura si evidenzia come la voce del costo relativa al consumo energetico sia la preponderante (~59%), tale valore include anche il costo di ricarica degli eVTOL, il quale potrebbe essere imputato ai costi operativi diretti degli eVTOL. Se così fosse, il costo del consumo energetico sarebbe irrilevante (~1%) in confronto al costo della manutenzione (dal ~2% attuale al ~5% nel secondo caso), delle tasse (da ~2% al ~4%), ai costi sul capitale (dal ~2% al ~6%) e al costo del personale che passerebbe dal 35% all'85%.

Focalizzandoci sui DOC imputabili alle infrastrutture dell'esempio illustrato, essi ammontano nella città di Torino a circa 103 M\$ all'anno (42 M\$ se non si considera la ricarica degli eVTOL).

Di seguito si ritrovano le singole voci di costo per la città di Torino.

DIRECT OPERATIVE COST		
Item	Costo (con costo di ricarica) [\$]	Costo (escluso costo di ricarica) [\$]
Capital	2.417.924	2.417.924
Crew	36.201.000	36.201.000
Electricity	60.661.930	93.977
Tax	1.612.475	1.612.475
Maintenance	2.015.593	2.015.593
TOTAL	102.908.923	42.340.969

5.2.2 Costi Operativi Indiretti

I costi operativi indiretti, a differenza della categoria precedente, non possono essere attribuiti alla singola struttura, ma vengono distribuiti sull'intero sistema di infrastrutture.

Dalle valutazioni effettuate in precedenza, la distribuzione percentuale degli IOC risulta quella illustrata in figura:

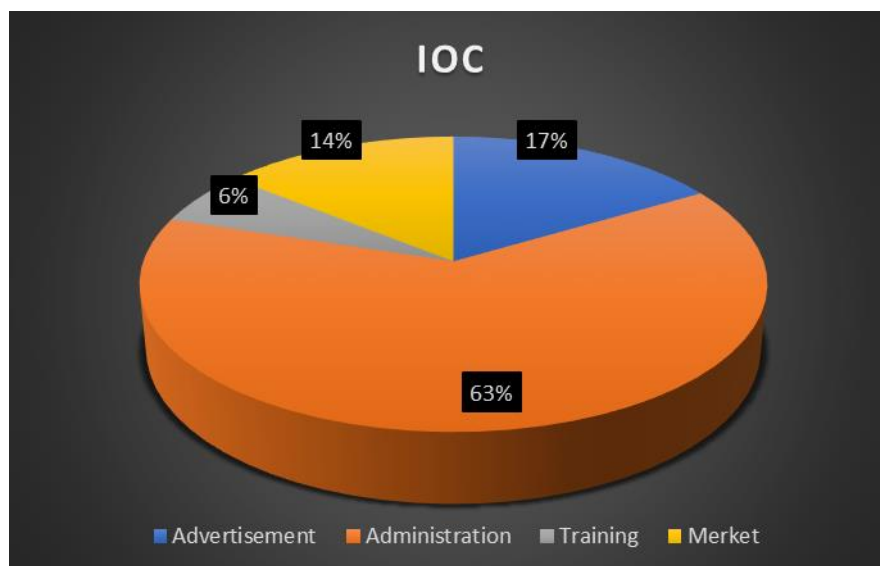


Figura 77: Ripartizione percentuale dei Costi Operativi indiretti

Dalla figura si evidenzia come il costo preponderante sia relativo ai costi di amministrazione (~63%), relativi agli stipendi del personale amministrativo, dei dirigenti ecc... nonché il costo dei software, degli apparati elettronici e del supporto tecnico. Tale costo è prevedibilmente elevato in quanto gli stipendi del personale addetto all'amministrazione e dei dirigenti sono spesso ingenti

Circa il 17% dei IOC è ricoperto dai costi relativi alla pubblicità, illustrati in modo dettagliato nel capitolo 4.5.2. Sono necessari grandi investimenti sulla pubblicità al fine di promuovere un nuovo metodo di trasporto urbano e convincere gli ipotetici clienti ad adottare questo tipo di soluzione. Il costo relativo alla vendita diretta del servizio al cliente ricopre circa il 14% degli IOC. Tale spesa risulta essenziale al fine di permettere al cliente di ottenere un semplice e rapido acquisto del servizio voluto-

Infine, circa il 6% è ricoperto dai costi di addestramento del personale di terra e dei manutentori. Il costo del singolo addestramento è solitamente elevato ma viene fornito una tantum solo in caso di necessità. Nello specifico del test sulla città di Torino, la ripartizione di tali costi è indicata nella tabella successiva:

INDIRECT OPERATIVE COST	
Item	Costo (\$)
Advertisement	2.725.593
Administration	10.480.000
Training	980.020
Market	2.340.300
TOTALE	16.525.913

5.3 Tasse vertiportuali

Le tasse vertiportuali possono essere interpretate come il costo per il servizio offerto dal sistema vertiportuale. Esse possono distinguersi in tasse di: decollo e atterraggio, di parcheggio, di utilizzo delle infrastrutture, tasse di sicurezza e tasse per la manutenzione.

Al fine di semplificare tale trattazione si prendono in considerazione i soli decolli ed atterraggi previsti nell'arco dell'anno per un regime di funzionamento standard del sistema, in modo tale da standardizzare la suddivisione dei costi operativi su base annua. Viene quindi ripartito in modo equo il costo dell'utilizzo di tutti i servizi, compresa manutenzione e parcheggio.

La valutazione delle tasse vertiportuali per ogni decollo/atterraggio può essere quindi effettuata attraverso la formulazione:

$$Tax = \frac{Annual\ Operating\ Cost}{Annual\ TO} + profit$$

I costi operativi annuali vengono quindi divisi per il numero di decolli all'intero dell'anno. A tale valore viene poi sommato un profitto, fattore determinante per la sopravvivenza dell'azienda e del sistema, necessario a rendere gli investimenti iniziali sostenibili e fruttuosi. Solitamente il valore della voce di profitto si aggira attorno al 5%.

Dalle valutazioni effettuate nei capitoli precedenti e sfruttando la simulazione effettuata attraverso la città di Torino, le tasse vertiportuali risultano pari a:

	Incluso il costo di ricarica eVTOL	Escluso il costo di ricarica eVTOL
Tassa per ogni TO/L [\$]	53,11	26,18

A tali tasse dovrà esser sommato il profitto in base alle decisioni e politiche aziendali.

Tali tasse andranno a sommarsi ai costi del servizio, come verrà illustrato nel paragrafo 6.1.

Capitolo 6

6 Analisi parametrica del costo relativo al sistema di trasporto

In questo capitolo, l'attenzione si concentra sull'analisi dei costi relativi al sistema di trasporto basato sugli eVTOL, considerando variabili chiave che incidono sulla sostenibilità e l'efficienza economica del servizio. L'obiettivo è fornire una valutazione approfondita e integrata di come diverse componenti, come le infrastrutture, le ore operative dei vertiporti e la scelta del modello di eVTOL, influenzino il costo complessivo del servizio.

Le analisi parametriche sono essenziali per comprendere come questi fattori si interconnettano e quali strategie possano ottimizzare l'utilizzo delle risorse. I costi operativi, infatti, sono strettamente legati alla gestione delle infrastrutture e alla configurazione del servizio, influenzando la redditività e la sostenibilità nel lungo termine. Inoltre, l'ottimizzazione del modello di eVTOL da utilizzare rappresenta un elemento cruciale per garantire che le operazioni siano non solo economicamente vantaggiose, ma anche in grado di soddisfare le esigenze del mercato e di adattarsi a eventuali variazioni nella domanda.

Questo capitolo mira a offrire una comprensione chiara delle dinamiche economiche che regolano il sistema di trasporto UAM, fornendo strumenti analitici per prendere decisioni strategiche informate e per migliorare la competitività del servizio in un settore in rapida evoluzione.

6.1 Costo del servizio

In questo paragrafo viene valutato come il costo del servizio inteso come prezzo indicato al cliente per percorrere una tratta standard.

Il costo del servizio per singola tratta può essere valutato secondo la formulazione seguente

$$C_{Velocity} = \frac{C_{eVTOL} \times t_h + Tax}{N^{\circ} \text{ pass}}$$

Il costo della tratta risulta quindi pari al costo operativo orario dell'eVTOL (C_{eVTOL}) moltiplicato per il tempo di volo della tratta (t_h) in ore, ad esso dovrà sommarsi il costo delle tasse vertiportuali valutate nel paragrafo precedente (Tax). Dividendo il valore ottenuto per il numero di passeggeri si ottiene il costo della singola tratta per ogni passeggero.

Come tratta standard verrà utilizzata una media degli spostamenti ipotizzati nella simulazione sulla città di Torino, ovvero uno spostamento di circa 7 km.

Utilizzato un modello di stima dei costi operativi degli eVTOL sviluppato dal Politecnico di Torino e non ancora pubblicato in data corrente, si valuta che il costo orario del Volocity prodotto da Volocopter (ovvero il modello di eVTOL utilizzato per le valutazioni precedenti) sia pari a \$333 per ogni ora di volo, includendo i costi di ricarica delle batterie.

In base alle valutazioni effettuate nel paragrafo 3.7 si evidenzia come per una tratta standard siano necessari circa 15 minuti compreso il tempo di decollo, allontanamento, crociera, discesa ed atterraggio.

Affrontando un esempio pratico come quello indicato in questa trattazione, ovvero la città di Torino, utilizzando un Volocity a due posti, per una tratta di 7 km, il costo del servizio per il singolo passeggero si aggirerebbe intorno ai **\$54,01**, escluse le spese di profitto. Costo elevato rispetto ai mezzi di trasporto tradizionali, ma va sottolineato anche il contesto in cui è stata fatta questa valutazione, ovvero che questo costo è indicativo per la fase iniziale del progetto, in cui il sistema di trasporto è nella fase iniziale. Si prevede che tale costo possa diminuire notevolmente una volta che il servizio sia capillarizzato. Inoltre i vantaggi di tale sistema di trasporto, analizzati nel capitolo 1, rendono il servizio competitivo anche a costi nettamente maggiori dei sistemi di trasporto pubblico tradizionale.

6.2 Variazione del numero di infrastrutture

Si vuole ora effettuare uno studio parametrico che permetta di valutare gli effetti sul costo del servizio della variazione del numero di infrastrutture.

Variare il numero delle infrastrutture utilizzate dal servizio permette di ridurre i costi, ma allo stesso tempo riduce le entrate in quanto diminuisce il flusso di passeggeri erogabile dal sistema. Si procederà con l'analisi mantenendo costante il prezzo del servizio valutato nel paragrafo 6.1.

6.2.1 Variazione del numero di Vertistation

Mantenendo inalterato il numero di vertiport e vertihub si procede attraverso lo studio del profitto al variare del numero di vertistation.

Il profitto annuo verrà valutato attraverso la differenza fra ricavi e costi:

$$\pi = R - C$$

I ricavi vengono valutati attraverso il prodotto del prezzo del servizio al cliente per il numero di passeggeri annui:

$$R = C_{Volocity} \times TO_{yr} \times N^{\circ}pass$$

In cui TO_{yr} indica i decolli annui all'interno dell'intero sistema vertiportuale.

I costi vengono invece valutati attraverso la somma dei costi operativi annuali delle infrastrutture e degli eVTOL:

$$C = C_{eVTOL} + C_{vertiporti}$$

Effettuando uno studio parametrico applicato sulla città di Torino in cui il numero delle vertistation varia da 0 a 50 si ottiene il seguente andamento di costi, ricavi e profitto.

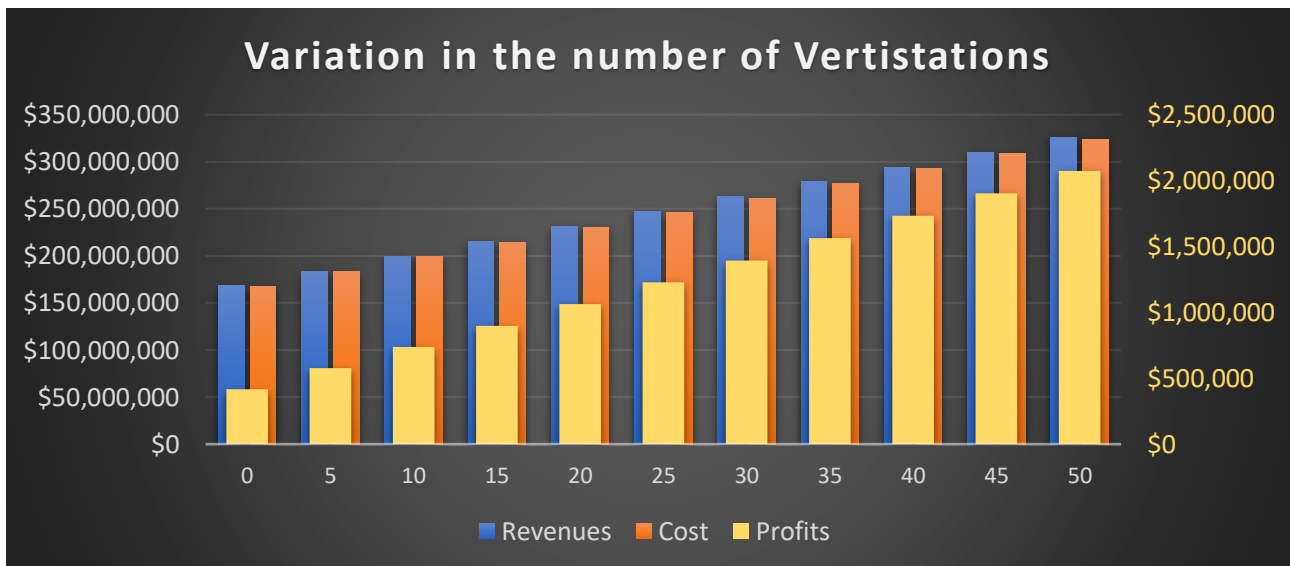


Figura 78: Ricavi, Costi e profitto al variare del numero delle Vertistation

Si evidenzia come all'aumentare del numero delle vertistation, ovviamente crescano i costi relativi al mantenimento delle infrastrutture e degli stessi eVTOL. Con essi, aumentano anche i ricavi ottenuti dalla vendita del servizio ad un numero maggiore di passeggeri raggiunti grazie all'aumento del flusso erogabile.

Degno di nota è l'andamento crescente del profitto con l'aumentare delle infrastrutture. Questo dimostra che la vertistation è un'infrastruttura sostenibile, ovvero che, in determinate condizioni al contorno, produce profitto, ha quindi un buon rendimento, con costi inferiori ai ricavi. Tale trend ha dei limiti riguardanti la saturazione del sistema dipendente dalla città in cui è applicato, maggiori sono le dimensioni della città e maggiore sarà tale limite di saturazione.

6.2.2 Variazione del numero di Vertiport

La trattazione ora procede utilizzando come variabile infrastrutture più grandi come i vertiport. In particolare, verranno mantenuti costanti e pari a 2 i vertiport aventi un solo pad di decollo, in quanto essi rappresentano un utilizzo di nicchia. Invece verranno fatti variare i vertiport che possiedono 2 pad di decollo.

Anche in questo paragrafo verranno utilizzati i criteri esposti nel paragrafo 6.2.1. Inoltre viene mantenuto costante il numero di vertistation (30) e di vetihub (8).

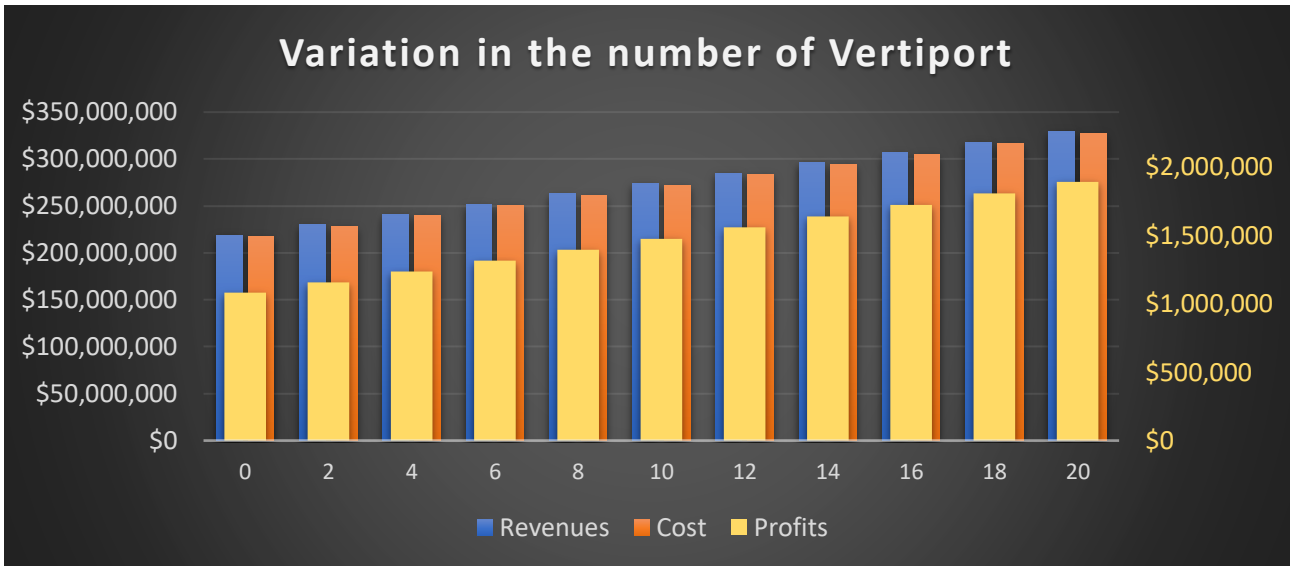


Figura 79: Ricavi, Costi e profitto al variare del numero dei Vertiport.

Anche in questa simulazione sono evidenti gli effetti positivi dell'introduzione di Vertiport che dimostrano come tale infrastruttura possa essere economicamente sostenibile. Come nel caso precedente, il numero di Vertiport introducibili all'interno del sistema deve essere regolato in base alle dimensioni della città in cui viene applicato.

6.2.3 Variazione del numero di Vertihub

In questa sezione viene analizzato il ruolo dei vertihub in termini di sostenibilità economica. Come in precedenza, il numero delle vertistation e dei vertiport sarà mantenuto costante. Sarà invariato anche il costo del servizio al cliente, in modo tale da valutare l'effetto diretto della variazione del numero di vertihub sul profitto.

Data la grande varietà di configurazioni, si decide di far variare i vertihub con 4 pad di decollo disponibili, ovvero i più versatili.

Si utilizzano nuovamente le formulazioni:

$$\pi = R - C \quad R = C_{Velocity} \times TO_{yr} \times N^{\circ}pass \quad C = C_{eVTOL} + C_{vertiporti}$$

Sull'asse orizzontale verrà indicato il numero di vertihub con 4 pad di decollo, ma all'interno della valutazione saranno presenti anche: 2 vertihub a 3 pad, 1 vertihub a 5 pad, 2 vertihub a 6 pad e 1 vertihub a 10 pad.

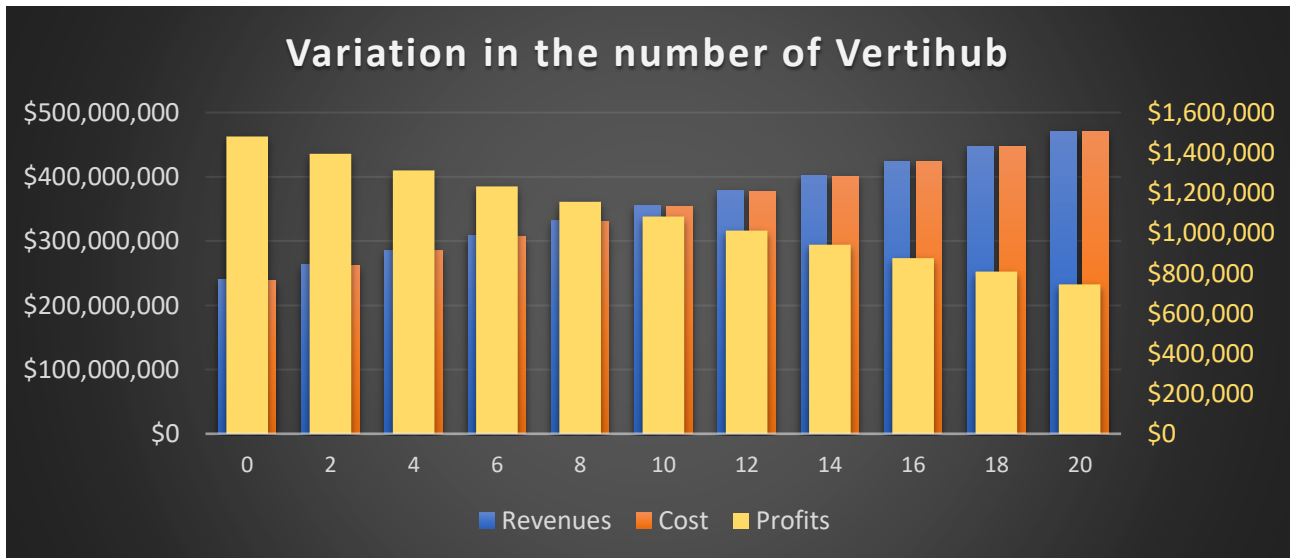


Figura 80: : Ricavi, Costi e profitto al variare del numero dei Vertihub.

Dall'analisi appena effettuata si evidenzia che vertihub, in particolare i vertihub a 4 pad (ma tali conclusioni possono essere ampliate a tutte le configurazioni di vertihub), non sarebbero economicamente sostenibili se all'interno del sistema di trasporto non ci fossero anche vertiport e vertistation.

Tale conclusione deriva dall'osservazione che all'aumentare dei vertihub i costi e ricavi crescano, ma i primi hanno una rapidità di crescita maggiore, portando quindi i ricavi a diminuire.

Le cause di questo comportamento possono essere imputate al ruolo stesso dei vertihub, i quali hanno il compito di permettere lo stazionamento, la manutenzione e la ricarica degli eVTOL, con relative spese di gestione. Tali servizio sono essenziali per il sistema di trasporto, in quanto non possono essere forniti dalle vertistation e parzialmente dai vertiport.

Si conclude che, **un sistema di trasporto UAM richiede la compresenza di molteplici configurazioni infrastrutturali, poiché la mera implementazione di vertihub risulterebbe economicamente insostenibile. Ciononostante, l'ecosistema UAM necessita imprescindibilmente dei servizi erogati da tali infrastrutture specializzate.**

6.3 Variazione del numero di ore operative dei vertiporti

In questa sezione si ricerca il numero ottimale di ore operative delle infrastrutture e quindi del servizio UAM cittadino. L'analisi in esame risulta necessaria in quanto una variazione di ore operative incide sui costi operativi e sulle entrate. Bisogna quindi valutare quale siano gli orari operativi che massimizzino le entrate minimizzando i costi, raggiungendo quindi il profitto di ottimo.

Come parametro di valutazione si utilizza nuovamente il profitto, illustrato approfonditamente nei paragrafi precedenti.

Nel proseguo della trattazione saranno considerate le variazioni dei vertiport e dei vertipad, in quanto le ore operative delle vertistation hanno bassa influenza sul computo totale delle spese: Questa osservazione è giustificata dai pochi servizi offerti dalle vertistation e con essi risultano bassi i costi operativi di gestione.

Al fine di generalizzare la trattazione, si assume che la richiesta del servizio sia sufficientemente elevata da permettere il massimo sfruttamento delle corse, indipendentemente dall'orario di funzionamento.

Viene quindi fatto variare il numero di OOMGE (paragrafo 3.8) per i vertiport e le vertistation.

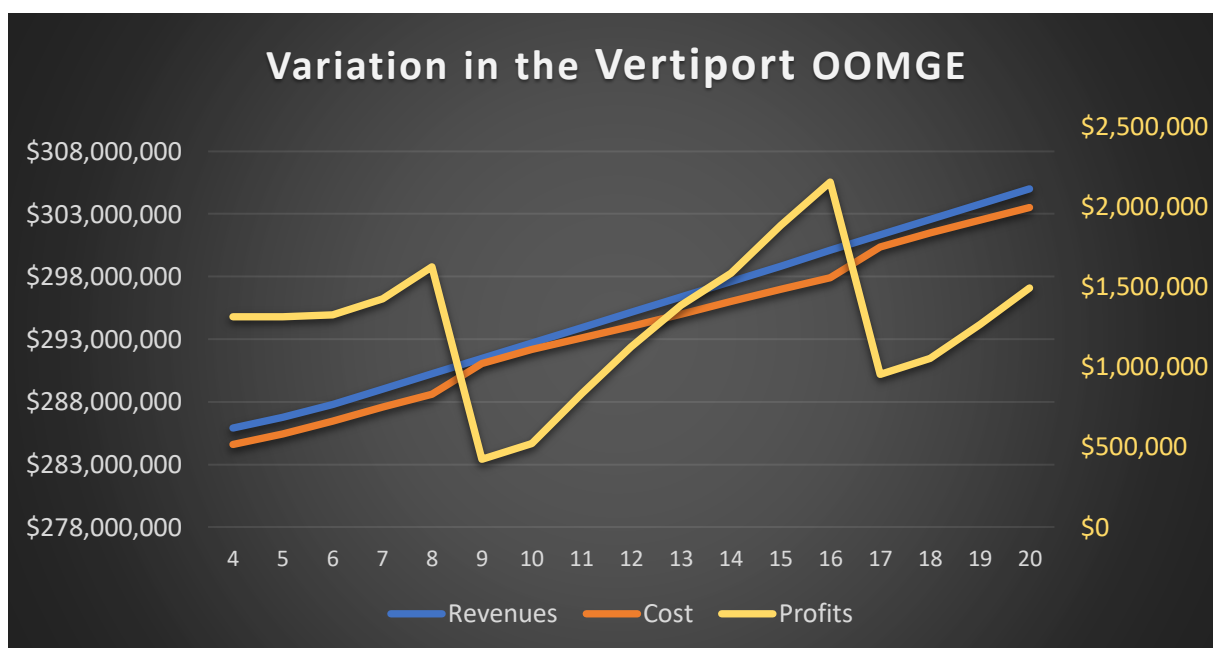


Figura 81: Ricavi, Costi e profitto al variare delle OOMGE dei Vertiport.

Nell'illustrazione, la curva dei ricavi e dei costi è sovrapposta in quanto la scala è logaritmica.

Dall'analisi appena effettuata si osserva che i ricavi hanno un andamento pressoché lineare in quanto l'aumento di ore operative ha implicazioni dirette sul flusso dei passeggeri smaltibile e quindi un maggior numero di clienti paganti.

I costi invece seguono criteri diversi. Essi dipendono non solo dalle spese fisse correlate direttamente al tempo di utilizzo (come illuminazione, ricarica, ecc..) ma anche da voci dipendenti dal tempo in modo non lineare, come ad esempio le spese del personale. Sono proprio queste voci a rendere interessante l'analisi.

Osservando la curva del profitto, si evidenzia come cresca all'aumentare delle OOMGE fino a raggiungere dei picchi per poi crollare. Si hanno delle diminuzioni repentine del valore del profitto in corrispondenza di 9 e 17 OOMGE, in corrispondenza delle ore massime giornaliere erogabili da 1 o 2 operatori. Queste osservazioni indicano che il superamento delle 8 (o delle 16) ore lavorative richiede l'assunzione di una nuova squadra di personale qualificato e con essa le spese necessarie a sostenerla.

Al fine di massimizzare il profitto le ore operative del personale devono essere sfruttate al massimo, si evidenziano infatti dei picchi in corrispondenza delle massime ore operative giornaliere. In particolare **il massimo valore del profitto si ha in corrispondenza delle 16 OOMGE, ovvero le massime ore giornaliere del personale diviso in due turni.**

In linea teorica il valore di profitto massimo si otterrebbe in corrispondenza delle 24 OOMGE, tale assunzione sarebbe in contrasto con le osservazioni pratiche, in quanto in determinati orari la richiesta del servizio è molto bassa (come evidenziato nel capitolo 3) ottenendo spese superiori alle entrate.

Le stesse osservazioni possono essere effettuate per i Vertihub come dimostrato dal grafico sottostante.

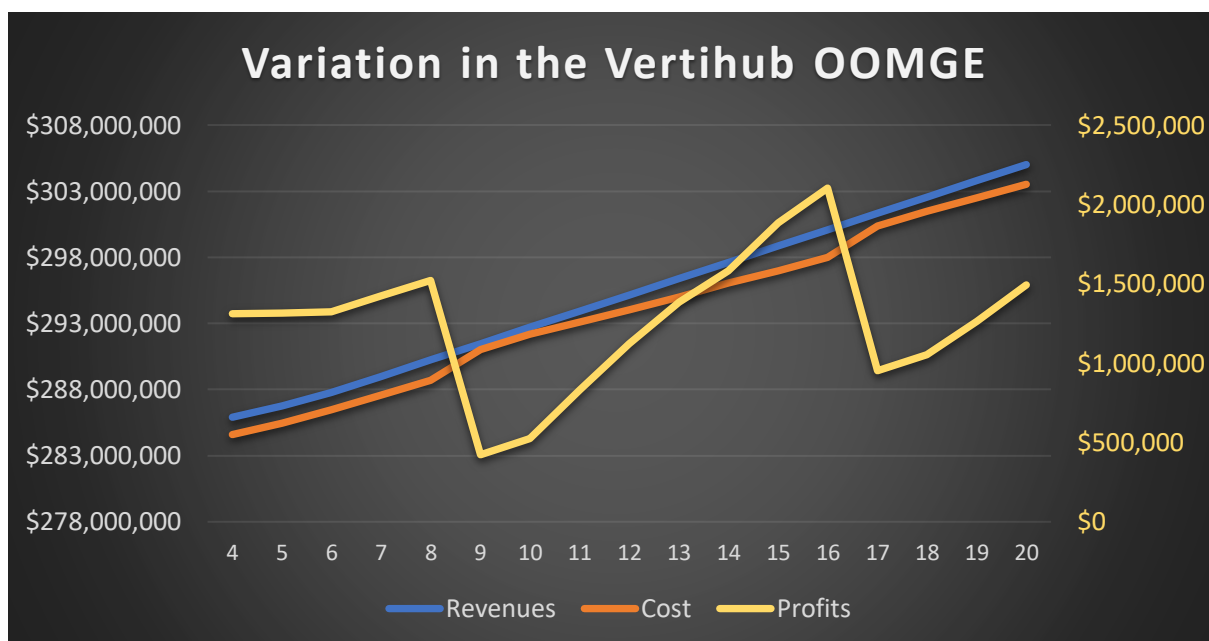


Figura 82: Ricavi, Costi e profitto al variare delle OOMGE dei Vertihub

6.4 Analisi di ottimo del modello di eVTOL da utilizzare per il servizio

In questa sezione viene effettuato un confronto fra due differenti configurazioni di eVTOL, al fine di valutare quale sia il mezzo economicamente più vantaggioso in modo da rendere il sistema di trasporto più sostenibile.

Nel paragrafo 6.1 è stato analizzato il costo del servizio utilizzando come riferimento il Volocity prodotto da Volocopter, risultando in un costo di servizio pari a circa \$54,01 (profitto escluso).

Si vuole ora analizzare il costo del servizio attraverso l'utilizzo del Joby S4, un eVTOL dotato di 4 posti. Si affronta tale processo sull'osservazione che sia molto probabile trovare non solo 2 ma anche 4 clienti che vogliano usufruire del servizio per ogni tratta.

Utilizzando nuovamente la formulazione:

$$C_{JobyS4} = \frac{C_{eVTOL} \times t_h + Tax}{N^{\circ} pass}$$

Il costo operativo orario del Joby S4, attraverso valutazione effettuate con un modello di stima del Politecnico di Torino, ammonta a circa \$443,78. Il tempo della tratta standard rimane invariato rispetto alla valutazione precedente, come anche l'ammontare delle tasse vertiportuali. Il numero di passeggeri invece viaria da 2 a 4.

Il costo stimato per ogni tratta standard e per ogni passeggero con l'utilizzo di un Joby S4 ammonta a \$34,28.

Confrontando i due costi attraverso la formulazione:

$$Diff\% = \left(1 - \frac{C_{JobyS4}}{C_{Volocity}}\right) \times 100$$

Il costo della soluzione offerta dal Joby S4 risulta il 36,51% inferiore rispetto al servizio offerto dal Volocity, con la differenza che il cliente non dovrà dividere la cabina con un solo passeggero ma con 3 di essi. A tal proposito, il Joby S4 garantisce una cabina di maggiori dimensioni e comfort con conseguenti variazioni nel costo di manutenzione.

Questa soluzione offre quindi un servizio molto competitivo, confrontabile con il costo dei taxi premium con il vantaggio di poter bypassare il traffico cittadino.

Le analisi effettuate portano a concludere che per il sistema UAM sia più vantaggioso adoperare un velivolo a 4 posti (come il Joby S4) rispetto ad un velivolo biposto.

Capitolo 7

7 Conclusioni

L'analisi della collocazione ottimale dei vertiporti ha evidenziato come la densità abitativa e lo studio del trasporto urbano tradizionale influenzino fortemente l'efficienza operativa e la sostenibilità del sistema UAM. Nella simulazione applicata a Torino, le aree urbane con maggiore densità hanno mostrato una riduzione dei costi operativi grazie alla maggiore domanda e alla prossimità con altre infrastrutture di trasporto.

Nell'ambito della presente ricerca, è stata condotta un'analisi approfondita dei costi associati al sistema di Mobilità Aerea Urbana (UAM). In particolare, l'attenzione si è focalizzata sui costi relativi alla realizzazione delle infrastrutture, evidenziando come la componente più significativa sia rappresentata dalle piattaforme di decollo, atterraggio e stazionamento, che incidono fino al 76% del costo totale di produzione. È opportuno sottolineare che tali costi potrebbero essere mitigati attraverso economie di scala, nonché mediante l'ottimizzazione dei processi produttivi e installativi delle infrastrutture, oltre che da possibili riduzioni dei prezzi delle materie prime derivanti da acquisti in volumi maggiori.

L'analisi dei costi operativi delle infrastrutture ha rivelato una ripartizione tra Costi Operativi Diretti (DOC) pari all'86% e Costi Operativi Indiretti (IOC) pari al 14%. All'interno dei DOC, la voce preponderante è risultata essere quella relativa ai costi di ricarica degli eVTOL (veicoli elettrici a decollo e atterraggio verticale), sebbene si possa argomentare che tale voce potrebbe essere più propriamente ascritta ai DOC degli eVTOL stessi. Escludendo questa componente, emergerebbero come prioritari i costi relativi al personale necessario per l'operatività e la manutenzione delle infrastrutture. Per quanto concerne gli IOC, questi risultano dominati dalle spese amministrative e pubblicitarie.

Attraverso un'analisi dettagliata di queste voci di costo e mediante l'applicazione delle formulazioni espresse nel capitolo 5, è stato possibile quantificare le tasse vertiportuali, intese come oneri per ciascuna operazione di decollo o atterraggio effettuata dagli eVTOL. Nel contesto specifico della città di Torino, tali tasse sono state stimate in 26 dollari.

La ricerca ha inoltre affrontato la valutazione del prezzo del servizio e delle strategie di utilizzo finalizzate alla riduzione dei costi. Dalle analisi condotte e dalle formulazioni elaborate, è emerso che il prezzo del servizio al cliente per una tratta standard di circa 7 km si attesterebbe intorno ai 54 dollari. Un risultato di particolare rilevanza è emerso dall'osservazione che, sostituendo il velivolo Volocity biposto con un modello a quattro posti come il Joby S4, si otterrebbe una riduzione del prezzo del servizio del 36,5%, rendendo così il sistema di trasporto UAM potenzialmente competitivo rispetto ai mezzi di trasporto convenzionali.

Una delle valutazioni cruciali ha riguardato la variazione del numero di infrastrutture. È emerso che un sistema di trasporto UAM richiede necessariamente la compresenza di molteplici configurazioni

infrastrutturali, poiché l'implementazione esclusiva di vertihub risulterebbe economicamente insostenibile. Ciononostante, l'ecosistema UAM dipende in modo imprescindibile dai servizi erogati da tali infrastrutture specializzate.

In conclusione, lo studio di ottimizzazione delle ore operative ha portato a determinare che, al fine di massimizzare il profitto, sarebbe necessario che le infrastrutture operassero per 16 ore giornaliere.

Le analisi e le considerazioni presentate in questo studio si propongono di delineare un percorso metodologico per i progettisti e gli stakeholder interessati all'implementazione di un sistema di Mobilità Aerea Urbana (UAM). L'obiettivo primario è quello di fornire una panoramica dettagliata delle spese da prevedere e delle potenziali strategie da adottare nel contesto di tale implementazione.

Inoltre, il presente lavoro offre un'analisi approfondita e articolata delle voci di costo inerenti al sistema UAM. Questa disamina dettagliata si configura come un prezioso substrato informativo per future ricerche e studi volti all'ottimizzazione economica del sistema. Le informazioni e i dati qui presentati possono fungere da solida base empirica per ulteriori indagini e analisi comparative, contribuendo così all'avanzamento della conoscenza nel campo della mobilità aerea urbana e alla sua progressiva ottimizzazione sotto il profilo economico-finanziario.

In conclusione, questo studio si propone non solo come guida operativa per i progettisti, ma anche come risorsa scientifica per la comunità accademica e professionale impegnata nello sviluppo e nel perfezionamento dei sistemi UAM, fornendo un contributo significativo alla letteratura esistente in questo innovativo settore della mobilità urbana.

Bibliografia

- [1] <https://www.statista.com/chart/30844/average-travel-time-per-10km/>
- [2] <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>
- [3] <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf>
- [4] <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/eri-advanced-air-mobility.pdf>
- [5] <https://it.wikipedia.org/wiki/VTOL>
- [6] <https://www.aviation-report.com/f35b-aeronautica-militare-schierati-in-islanda-per-consolidare-capacita-air-expeditionary/>
- [7] <https://www.aerospace-technology.com/projects/ba609/>
- [8] https://www.researchgate.net/publication/357592339_Investigation_of_a_Mission-based_Sizing_Method_for_Electric_VTOL_Aircraft_Preliminary_Design
- [9] <https://airmour.eu/partners/>
- [10] <https://www.volocopter.com/en/solutions/volocity>
- [11] <https://aviationweek.com/aerospace/advanced-air-mobility/joby-building-first-certification-test-s4-evtol>
- [12] <https://www.designboom.com/technology/meet-midnight-evtol-chicago-first-air-taxi-sustainable-low-noise-mobility-03-25-2023/>
- [13] <https://aviationweek.com/business-aviation/aurora-evtol-crash-caused-vibration-affecting-flight-controls>
- [14] <https://elettronauti.it/lilium-avanza-nellespansione-globale-con-accordi-strategici-in-texas-e-nelle-filippine/>
- [15] https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5103_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM/DI_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM.pdf
- [16] <https://uam-vertiports.com/vertiport/>
- [17] <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/7/179>
- [18] <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/136259/en>
- [19] <https://evtol.news/news/bell-nexus-partners-connect>

- [20] <https://insideevs.it/news/456633/idrogeno-cella-combustibile-hyzon-motors-densita-energetica/>
- [21] Yu Bin, Tamim Peter Sidiki - April 2020 - Material solutions to increase tank-to-wheel efficiency reliability of fuel cells. Envalor, <https://www.dsm.com/engineeringmaterials/en-US/insights/blog/material-solutions-increase-tank-to-wheel-efficiencyreliability-of-fuel-cells.html>
- [22] Bills A., Sripad S., Fredricks W.L., Singh M., Viswanathan V.- 2020 - Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Electrify Commercial Aircraft. ACS Energy Letters.
- [23] https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0_0.pdf
- [24] <https://skyports.net/skyports-to-develop-europes-first-test-vertiport-in-paris/>
- [25] <https://www.ferrovial.com/en/business/airports/vertiports/>
- [26] <https://www.volocopter.com/en/solutions/voloport>
- [27] <https://static1.squarespace.com/static/5f5e4d72d2b0854b18ad41cf/t/628b5a011366c727338332d0/1653299721939/UAP+Product+Brochure+2022-screen.pdf>
- [28] <https://www.wired.it/article/taxi-volanti-vertiporto-coventry/>
- [29] <https://ottomilacensus.istat.it/sottotema/001/001272/1/>
- [30] <https://ottomilacensus.istat.it/sottotema/001/001272/14/>
- [31] https://www.gtt.to.it/cms/risorse/urbana/intervalli_sito.pdf
- [32] <https://moovitapp.com/torino-222/lines/4/628945/1/it?ref=2&customerId=4908>
- [33] <https://www.alamy.it/mappa-di-torino-mappa-vettoriale-dettagliata-dell-area-amministrativa-della-citta-di-torino-poster-con-strade-e-fiumi-su-sfondo-grigio-image395801720.html>
- [34] <https://protezionecivile.comune.torino.it/rischi/idrogeologico/>
- [35] <https://www.cascinaroccafranca.it/18-1-conferenza-sul-lingotto/>
- [36] <https://zeroemission.eu/unico-in-europa-il-grattacielo-intesa-sanpaolo-di-torino-ottiene-la-doppia-certificazione-lead/>
- [37] <https://www.reuters.com/markets/commodities/fossil-fuels-still-dominate-global-power-systems-2023-11-30/>

- [38] <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2021electricity/>
- [39] <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/31284/1/tesi.pdf>
- [40] https://www.researchgate.net/figure/Cost-Estimating-Techniques-as-a-Function-of-Acquisition-Phases_fig2_235040583
- [41] https://go.matrixx.com/Strategy-Analytics-5G-Positioning-and-Pricing_ebook.html
- [42] https://unioncountyor.gov/wp-content/uploads/2018/03/LGD_Appendix-H_Cost-Estimates.pdf
- [43] <https://www.idtechex.com/es/research-article/electric-vehicles-in-construction-2023-2043/29306>
- [44] <https://www.mototok.com/blog/the-real-airplane-hangar-cost-buy-build-or-rent>
- [45] <https://www.duepstore.it/videosorveglianza.html?srsltid=AfmBOopRKR4d70ID5xuKLV85e-p56FS8C158JjUS8mTMuSOGGfH4aJQ5>
- [46] https://www1.comune.fi.it/materiali/bandi/avvisi_2017/20160104CO090069_STIMA-COSTI-DELLA-SICUREZZA.pdf
- [47] https://www.omnitekstore.it/214-dispositivi-elettromeccanici-motorizzati?srsltid=AfmBOoouNLs3H3vc8mqIPf415CtqLu942gW2s7_yZAzZqwn3RIR4PAMQ
- [48] <https://www.vergleiche.eu/en/produkt/easy-security-camera-set/>
- [49] <https://www.edilnet.it/guida/consulenza-impianti-antincendio-quanto-costa-596>
- [50] <https://fecheliports.com/heliports/>
- [51] <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr161/sr161-015.pdf>
- [52] https://www.alibaba.com/product-detail/25000cd-Airport-Rotating-Beacon-White-and_1600816583536.html?spm=a2700.7724857.0.0.2ba0600bhA3Umn
- [53] <https://pripark.com.au/2022/03/18/australian-car-park-construction-costs/>
- [54] <https://www.cdt-en.com/helipad-lighting/heliport-perimeter-light1-180.html>
- [55] <https://icenergysolutions.com/24000-sq-ft-hangar-case-study/>
- [56] <https://www accuratesecurity.com/blog/how-much-power-does-a-home-security-system-use/#:~:text=The%20good%20news%20is%20that,of%20security%20system%20you%20install.>
- [57] <https://www accuratesecurity.com/blog/how-much-power-does-a-home-security-system-use/#:~:text=The%20good%20news%20is%20that,of%20security%20system%20you%20install.>
- [58] <https://centaur.reading.ac.uk/96014/1/Revised%20manuscript%20with%20no%20changes%20marked.pdf>

- [59] <https://www.cdt-en.com/helipad-lighting/heliport-beacon-light-178.html>
- [60] <https://ehtrust.org/science/reports-on-power-consumption-and-increasing-energy-use-of-wireless-systems-and-digital-ecosystem/>
- [61] https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lmc_voll_final.pdf
- [62] <https://webthesis.biblio.polito.it/31284/>

Ringraziamenti

Al compimento di questo percorso accademico durato più di 5 anni, non basterebbe un intero libro per ringraziare tutte le persone che sono state fondamentali per il mio successo.

Un ringraziamento agli amici di sempre, Gabriele, Filippo, Paolo, Samuel, Francesco, Giorgio, Fabiano, Lorenzo e Giovanni. Ma un grazie speciale va Salvatore, spalla a spalla fin dal primo giorno, fondamentale per superare le sfide quotidiane e non lasciarsi sopraffare dalle difficoltà di questo percorso.

Grazie ai miei compagni di avventura, Andrea, Cristian, Matteo, Antonio, Carlo, Giacomo, Alfredo, Mario necessari a rendere rigogliose e divertenti le giornate buie dei lunghi inverni torinesi.

Un grande grazie a Daria, alla sua pazienza e tenacia nel rassicurarmi nei momenti più duri e a rendere migliori le giornate difficili, a dimostrare un bene profondo nella calma o nella tempesta.

Ringrazio la famiglia, papà, i nonni, gli zii, le zie, i cuginetti e le cugiette per avermi fatto vivere momenti speciali.

Grazie a mio fratello, da sempre un punto di riferimento, ma che nell'ultimo periodo ha avuto un ruolo cruciale nel mio benessere mentale, sempre pronto a farmi staccare per recuperare una giornata iniziata male, sempre bravo a capire quando qualcosa non va, sempre in prima fila a fare il tifo.

Grazie mamma, per aver reso possibile il mio percorso, per aver sempre creduto in me. Grazie per avermi fatto forza quando non ne avevo, per avermi risollevato quando ero a terra, per avermi sempre fatto ricordare che non sono solo. Per aver successo in questo percorso è fondamentale la determinazione, in questo sei stata cruciale, in quanto non era sufficiente la soddisfazione personale, spesso la volontà di renderti orgogliosa mi ha portato a dare il massimo e a superare ogni ostacolo.

Ora è il momento di ringraziare un amico speciale, la prima persona che mi ha avvicinato a questo mondo, Maurizio, questa tesi la dedico a te. Ricordo ancora quei giorni di indecisione in cui tu mi dicevi che dovevo ad ogni costo continuare con gli studi. Ricordo la mia bassa autostima, non credevo di esser fatto per questo percorso, ma hai sempre creduto in me e mi hai portato in spalla fino a questo momento. Ricordo i primi esami, montagne da scalare, scoraggianti, mi hai insegnato a prendere un grande problema e a dividerlo in tanti piccoli problemini facili da superare. Ricordo le sorprese a Torino, alla scoperta della città e del buon cibo, probabilmente non avrei scoperto questo lato positivo senza di te. Non scorderò mai il tuo contributo alla mia salute mentale, il tuo non è un lavoro, è un'opera di bene verso il prossimo. Mi hai insegnato a studiare me stesso, a capire i momenti negativi e a superarli senza caderci dentro. Il tuo contributo è stato fondamentale per proseguire il percorso, spesso ho avuto momenti di debolezza in cui tutto sembrava andare a rotoli, proprio in quei momenti io mi rifugiavo nelle tue parole. Non ricordo però un solo momento in cui tu non sia riuscito a strapparmi un sorriso, ma anche una grassa risata, in ogni momento, in ogni luogo. Ti voglio bene Mauri, questo è per te.

COLOSSUS has been funded by the European Union under Grant Agreement no 101097120. The Swiss participation in the COLOSSUS project is supported by the Swiss State Secretariat for Education, Research and Innovation (SERI) under contract number 22.00609.

