

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA ED AEROSPAZIALE



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Modello di stima parametrica del LCC di velivoli UAM e del loro sistema di supporto

Relatore:
Prof. Marco FIORITI

Studente:
Gaia SALINARO

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Sommario

L'Urban Air Mobility (UAM) rappresenta un'alternativa innovativa di mobilità urbana che prevede l'utilizzo di velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale per il trasporto di persone e merci all'interno delle aree urbane.

La crescita continua della popolazione mondiale, che tende sempre più a concentrarsi in grandi centri urbani, ha portato all'aumento del traffico nelle città. Una sfida dei nostri giorni è trovare soluzioni in grado di fronteggiare le nuove esigenze della mobilità urbana che risultino essere ecologicamente sostenibili puntando a zero emissioni di CO2 durante la loro operatività.

Il presente lavoro di tesi si concentra sull'analisi dei costi operativi dei velivoli eVTOL (Electric Vertical Take-Off and Landing) nell'ambito dell'UAM e dei costi relativi alle infrastrutture abilitanti, i vertiporti.

Si è partiti con l'analisi dello stato dell'arte e le principali caratteristiche dei velivoli eVTOL, delle infrastrutture ad essi legate e dei mercati che le regolano. Successivamente la ricerca si è incentrata sulle stime dei costi operativi a livello di velivolo e a livello di infrastruttura. La stima dei costi è un passaggio cruciale nello studio di fattibilità di una tecnologia innovativa in quanto è necessaria a sondare domanda e offerta di un eventuale mercato futuro che deve confrontarsi con un panorama commerciale già esistente e collaudato. L'UAM, infatti, è un'alternativa di mobilità del tutto innovativa che, di conseguenza, non porta con sé esempi relativi alla fase operativa, per questo è stato necessario passare in rassegna numerosi studi e pubblicazioni, in parte relativi all'aviazione comune, per riadattarli alle caratteristiche dell'UAM.

In particolare, per la stima dei costi operativi dei velivoli eVTOL è stato adottato un modello preesistente adattandolo alle nuove tecnologie previste dai velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale in grado di stimare i costi relativi al capitale, equipaggio, approvvigionamento energetico, tasse, manutenzione e amministrativi.

Per quanto riguarda i costi relativi ai vertiporti è stato necessario partire da zero con un'analisi di tipo bottom-up dei componenti dell'infrastruttura con relativi consumi energetici per poi passare ad una stima dei suoi costi operativi annui.

Entrambi i modelli sono stati sviluppati in un ambiente .xlsx e sono stati testati con diversi velivoli e configurazioni di vertiporti per valutarne il corretto funzionamento con le relative ripartizioni delle varie voci di costo e per capire, infine, se risulta essere un tipo di mobilità economicamente valida.

Abstract

Urban Air Mobility (UAM) represents an innovative alternative for urban mobility that involves the use of electric vertical takeoff and landing (eVTOL) aircraft for the transportation of people and goods within urban areas.

The continuous growth of the world population, increasingly concentrated in large urban centers, has led to an increase in traffic in cities. A challenge of our time is to find solutions capable of addressing the new needs of urban mobility that are environmentally sustainable, aiming for zero CO₂ emissions during their operation.

This thesis focuses on the analysis of the operational costs of eVTOL (Electric Vertical Take-Off and Landing) aircraft in the context of UAM and the costs related to enabling infrastructure, namely vertiports.

We started with an analysis of the state of the art and the main characteristics of eVTOL aircraft, the infrastructure associated with them, and the markets that regulate them. Subsequently, the research focused on estimating the operational costs at both aircraft and infrastructure levels. Cost estimation is a crucial step in the feasibility study of innovative technology as it is necessary to gauge the demand and supply of a potential future market that must confront an already existing and proven commercial landscape. UAM is a completely innovative mobility alternative that does not bring examples related to the operational phase, so it was necessary to review numerous studies and publications, partly related to common aviation, to adapt them to the characteristics of UAM.

In particular, for the estimation of operational costs of eVTOL aircraft, an existing model was adopted and adapted to the new technologies expected from electric vertical takeoff and landing aircraft, capable of estimating capital costs, crew, energy supply, taxes, maintenance, and administrative costs.

Regarding the costs related to vertiports, it was necessary to start from scratch with a bottom-up analysis of the infrastructure components with their respective energy consumption and then move on to estimate its annual operational costs.

Both models were developed in an .xlsx environment and were tested with different aircraft and vertiport configurations to evaluate their correct functioning with the respective breakdowns of the various cost items and to understand, ultimately, if it proves to be an economically viable form of mobility.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Storia dell'UAM	1
1.2	Velivoli eVTOL	3
1.2.1	Sistema di alimentazione	4
1.2.2	Esempi di velivoli	11
1.3	Vertiporti	14
1.3.1	Configurazione vertiporti	15
1.3.2	Progettazione di vertiporti	20
1.3.3	Comunicazioni 5G	21
1.3.4	Esempi di vertiporti	23
2	Costi operativi dell'UAM	27
2.1	Costo delle batterie	30
2.1.1	Parametri chiave delle batterie	30
2.1.2	Previsione costo batterie	33
2.1.3	Previsioni approvvigionamento litio	39
2.2	Costo dell'energia elettrica	39
2.2.1	Costi di approvvigionamento	43
2.3	Costo dell'idrogeno	45
2.4	Costo vertiporti	49
2.5	Costi antenne 5G	55
3	Modelli matematici per la stima dei costi	57
3.1	Metodi per la stima dei costi	58
3.1.1	Stima di costi per analogia	59
3.1.2	Stima dei costi parametrica	60
3.1.3	Stima dei costi ingegneristica	61
3.2	Come selezionare un modello di costo	63
4	Modello di stima dei costi operativi di un velivolo eVTOL	65
4.1	Costi Operativi Diretti (DOC)	66
4.1.1	Costi sul capitale	66
4.1.2	Costi di equipaggio	68

4.1.3	Costi per l'elettricità e l'idrogeno	69
4.1.4	Tasse	70
4.1.5	Costi di manutenzione	71
4.1.6	Costi per interruzioni operative	74
4.2	Costi Operativi Indiretti (IOC)	74
5	Modello di stima dei costi operativi di un vertiporto	76
5.1	Costi Operativi Diretti (DOC)	77
5.1.1	Costi sul capitale di un vertiporto	78
5.1.2	Costi del personale di un vertiporto	80
5.1.3	Costi per l'elettricità vertiporto	80
5.1.4	Tasse vertiporto	81
5.1.5	Costi di Manutenzione del vertiporto	82
5.2	Costi Operativi Indiretti (IOC)	83
6	Casi studio e risultati dei modelli	87
6.1	Velivoli	87
6.1.1	Validazione del modello	87
6.1.2	Risultati velivoli	91
6.1.3	Conclusioni	98
6.2	Vertiporti	99
6.2.1	Validazione del modello	100
6.2.2	Risultati vertiporti	100
6.2.3	Conclusioni	106
6.3	Sviluppi futuri	107

Elenco delle figure

1.1	Confronto percorsi tra autovettura e velivolo [4]	2
1.2	Vantaggi e svantaggi diverse configurazioni eVTOL	3
1.3	Esempio di batterie negli eVTOL [6]	5
1.4	Caratteristiche batterie al litio [17]	6
1.5	Funzionamento fuel cell [20]	7
1.6	Esempio di motore fuel cell [18]	10
1.7	Velivolo Joby Aviation - Joby S4 [3]	11
1.8	Velivolo Lilium GmbH - Lilium Jet [7]	12
1.9	Velivolo Volocopter - VoloCity [8]	12
1.10	Velivolo Archer Aviation - Midnight [9]	13
1.11	Velivolo Alaka'i- Skai [20]	14
1.12	Prototipi di varie tipologie di vertiporti proposti dalla UAP [5]	15
1.13	Layout di un vertiporto[12]	16
1.14	Sequenza operazioni vertiporto	17
1.15	Pad singolo multifunzione [13]	17
1.16	Pad a progettazione ibrida[13]	17
1.17	Pad lineare a funzione singola [13]	18
1.18	Specifiche di un OFV per vertiporti [14]	18
1.19	Distribuzione rumore nei pressi di una piattaforma singola [14]	19
1.20	Funzionamento del beamforming [19]	23
1.21	Il vertiporto della Urban Air Port - Air One [5]	24
1.22	Il vertiporto della Skyports [10]	25
1.23	Il vertiporto della Volocopter - VoloPort [11]	25
1.24	Il vertiporto Ferrovia [16]	26
2.1	Schema suddivisione costi operativi	27
2.2	Energia specifica in funzione della potenza specifica tipica velivolo eVTOL [22]	31
2.3	Profilo di volo tipico velivolo eVTOL [22]	32
2.4	Previsione costi batterie Li-Ion tramite apprendimento tecnologico [21]	34
2.5	Previsione costi batterie Li-Ion tramite stime da letteratura [21]	35
2.6	Previsione costi batterie Li-Ion secondo il parere degli esperti [21]	36
2.7	Previsione costi batterie tramite analisi bottom-up [21]	37
2.8	Previsione costi batterie per il 2050 [21]	38
2.9	Produzione energia elettrica mondiale [23]	39

2.10	Investimenti in energia pulita nello scenario delle politiche dichiarate, 2015-2030 [24]	41
2.11	Cambiamento della produzione elettrica nello Scenario Politiche Dichiarate tra il 2021 e il 2030 [24]	41
2.12	Domanda di combustibili fossili nello scenario delle politiche dichiarate, 1900-2050 [24]	42
2.13	Ordine di merito nel prezzo dell'elettricità [26]	44
2.14	Previsione costo energia elettrica fino al 2050 [31]	45
2.15	Progetti annunciati relativi all'utilizzo di idrogeno su larga scala [28]	48
2.16	Previsione sui costi dell'idrogeno verde/blu/grigio [28]	49
2.17	Schemi di traffico giornalieri per ora del giorno Seattle [29]	50
2.18	Potenziali archetipi per le infrastrutture per UAM [29]	51
2.19	Specifiche della rete in base alle dimensioni delle città [29]	52
3.1	Metodi per la stima dei costi [32]	59
3.2	Processo di stima costi parametrica [32]	60
3.3	Processo di stima costi ingegneristici [32]	62
4.1	CBS costi operativi velivoli eVTOL	66
4.2	Variabili necessarie per i costi di capitale	67
4.3	Variabili necessarie per i costi di equipaggio	68
4.4	Variabili necessarie per i costi di elettricità e idrogeno	69
4.5	Variabili necessarie tasse per inquinamento acustico	70
4.6	Variabili necessarie per i costi di manutenzione	72
4.7	Variabili necessarie per i costi di manutenzione velivoli eVTOL	73
4.8	Variabili necessarie per i costi per interruzioni operative	74
5.1	CBS costi operativi vertiporti	77
5.2	Costi componenti vertiporto	78
5.3	Variabili costi di capitale vertiporto	79
5.4	Variabili costi di equipaggio vertiporto	80
5.5	Consumi energetici annui vertiporto	81
5.6	Variabili per il calcolo costi energia elettrica vertiporto	81
5.7	Variabili per il calcolo dei costi pubblicitari vertiporto	84
5.8	Variabili per il calcolo dei costi di amministrazione vertiporto	85
6.1	Assunzioni chiave modello costi NASA [37]	88
6.2	Risultati finali modello NASA [37]	89
6.3	Risultati finali modello MDPI [22]	90
6.4	Costi operativi velivolo Lilium	91
6.5	Divisione costi operativi velivolo Lilium	92
6.6	Costi operativi velivolo Joby S4	93
6.7	Divisione costi operativi velivolo Joby S4	93

6.8	Costi operativi velivolo VoloCity	94
6.9	Divisione costi operativi velivolo VoloCity	95
6.10	Costi operativi velivolo Midnight	96
6.11	Divisione costi operativi velivolo Midnight	96
6.12	Costi operativi velivolo Skai	97
6.13	Divisione costi operativi velivolo Skai	98
6.14	Confronto valori velivoli [US\$/nm/pax]	99
6.15	Assunzioni e risultati modello McKinsey [29]	100
6.16	Assunzioni e risultati configurazioni città modello McKinsey [29]	100
6.17	Configurazione Vertipad	101
6.18	DOC e IOC di un Vertipad	102
6.19	Suddivisione costi operativi Vertipad	102
6.20	Configurazione Vertibase	103
6.21	DOC e IOC di un Vertibase	103
6.22	Suddivisione costi operativi Vertibase	104
6.23	Configurazione Vertihub	105
6.24	DOC e IOC di un Vertihub	105
6.25	Suddivisione costi operativi Vertihub	106
6.26	Risultati configurazione città	106

Capitolo 1

Introduzione

L'Urban Air Mobility (UAM) è un concetto del tutto innovativo che lentamente trasformerà il modo in cui consideriamo il trasporto urbano e la mobilità delle persone o delle merci nelle città del futuro. L'esigenza di andare a introdurre una mobilità urbana di tipo aereo nasce dalla necessità di risolvere le sfide legate alla congestione del traffico, all'inquinamento e all'efficienza dei trasporti nelle aree metropolitane.

Questo nuovo sistema di trasporto si basa sull'utilizzo di velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL) in grado di andare a decongestionare il trasporto urbano e extraurbano destinato ad aumentare a causa di un'elevata urbanizzazione delle grandi città con trend sempre in aumento.

Le caratteristiche principali degli eVTOL sono appunto la propulsione di tipo elettrica, la possibilità di decollo e atterraggio verticali, l'elevata silenziosità e il basso impatto ambientale. Attualmente esistono diverse configurazioni di eVTOL (vectored thrust, lift + cruise, multicoper wingless) con diverse possibilità di alimentazione (batteria o fuel cell).

1.1 Storia dell'UAM

La mobilità aerea urbana non è un concetto del tutto innovativo, già negli anni '40, infatti, città grandi come Los Angeles o New York disponevano di taxi aerei tramite l'utilizzo di elicotteri. Questo tipo di servizio ha ricevuto una grossa battuta di arresto verso la fine degli anni '90 a causa degli eccessivi problemi legati alla sicurezza [1]. Con l'avvento delle batterie a litio ad alta densità, start-up e progettisti, già verso la metà degli anni 2000, iniziano a intuire le potenzialità di una mobilità aerea elettrica urbana riuscendo ad ottenere già nel 2011 il primo volo con multicottero elettrico, il prototipo del Volocopter VC1. Ad oggi esistono più di 200 modelli di eVTOL, di cui solo un parte di questi è in una fase di progettazione più avanzata. Nel Settembre 2023 la Joby Aviation è una delle prime aziende ad aver consegnato il proprio velivolo elettrico a decollo e atterraggio verticale alla base militare aeronautica di Santa Cruz (USA) dove l'aeromobile verrà testato per missioni logistiche atte al trasporto sia di merci che di passeggeri per prepararsi al lancio del servizio a livello commerciale nel 2025. Anche la NASA, in collaborazione con l'aeronautica militare

americana, testerà come l'aereo di Joby possa adattarsi allo spazio aereo nazionale per implementare servizi di aero taxi [3].

In Europa, invece, si prevede che il mercato europeo dell' UAM raggiungerà i 4,2 miliardi di euro entro il 2030 con un quota globale del 31 % [2], questo perché l'Europa è molto più urbanizzata rispetto ad altre regioni del pianeta e prevede di aumentare nei prossimi anni la concentrazione di popolazione nelle grandi città con una stima di circa 340 milioni di cittadini europei residenti in grandi metropoli. Molte aziende europee ad oggi sono particolarmente concentrate sugli spostamenti in ambito sanitario e delle merci pur evidenziando un chiaro interesse ad allargarsi nel modo del trasporto civile urbano. L'UE ha investito in diversi programmi di ricerca come SESAR che ha come obiettivo lo sviluppo di un cielo digitale unificato, indice dell'interessamento da parte della comunità verso la UAM e il bisogno crescente di aumentare il traffico aereo per decongestionare quello terrestre. Per il trasporto di passeggeri, infatti, si prevede che i primi voli commerciali saranno disponibili per il 2025 anche se si tratterà di velivoli pilotati proponendolo come un servizio di lusso, per poi avere una crescita incrementale a livello di velivoli e di domanda che porterà la UAM a diventare un servizio sempre più accessibile ed economicamente vantaggioso raggiungendo una base di utenti sempre più ampia.

Uno degli aspetti che renderà certamente il mercato dell'UAM molto competitivo è il tempo. La possibilità di spostarsi senza dover entrare nel traffico urbano è sicuramente uno dei motivi principali dell'utilizzo dei velivoli eVTOL che porterà ad una drastica diminuzione del tempo di percorrenza per determinati tragitti come si può vedere in Figura 1.1. In futuro, con la completa automazione del velivolo, oltre all'effettivo risparmio in termini di tempo si introdurrà anche il vantaggio di poter permettere ai passeggeri di compiere attività slegate dalla guida con una conseguente diminuzione drastica dei costi operativi del volo in se.

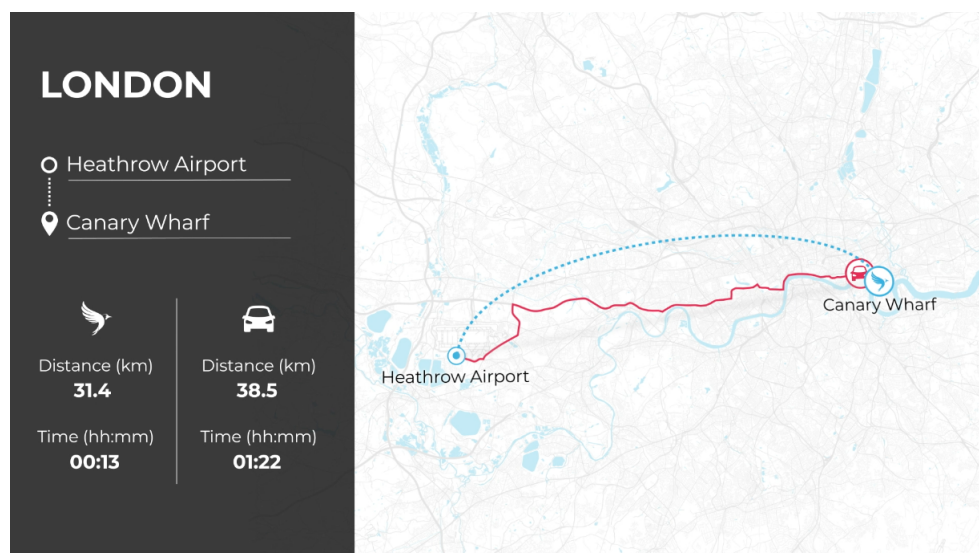


Figura 1.1: Confronto percorsi tra autovettura e velivolo [4]

1.2 Velivoli eVTOL

Come detto in precedenza ad oggi esistono più di 200 modelli di eVTOL, tra questi solo un parte è in una fase di progettazione più avanzata, il criterio principale per la loro categorizzazione è il tipo di propulsione come possiamo vedere in Figura 1.2.

Il cuore dei veicoli eVTOL della UAM, infatti, è proprio il loro sistema di propulsione elettrica altamente avanzato. Ogni veicolo è dotato di motori elettrici altamente efficienti che alimentano eliche o ventole di spinta verticale. Questi motori sono alimentati da batterie ad alta capacità, progettati per garantire una lunga autonomia di volo. La UAM si è distinta per la sua capacità di sviluppare sistemi di batterie leggere e ad alta densità energetica, garantendo che i veicoli eVTOL possano coprire distanze significative senza la necessità di ricariche frequenti.




Multirotor wingless 	Lift + cruise 	Vectored Thrust 
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ridondanza intrinseca ✓ Semplice controllo del volo ✓ Bassa complessità del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Efficienza energetica media ✓ Media difficoltà controllo del volo ✓ Possibilità di planare 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Buona efficienza energetica ✓ Uso efficiente propulsione ✓ Possibilità di planare
<ul style="list-style-type: none"> ✗ Efficienza energetica limitata nel volo in crociera ✗ Velocità di volo limitate ✗ Nessuna possibilità di planare 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Uso inefficace della propulsione ✗ Maggiore resistenza al volo orizzontale 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Progettazione più complessa ✗ Controllo del volo complesso

Figura 1.2: Vantaggi e svantaggi diverse configurazioni eVTOL

Sistema avionico

Il sistema avionico è in grado di operare in modalità semi-autonoma o completamente autonoma. In modalità semi-autonoma, il pilota fornisce le direttive principali, mentre il sistema avionico si occupa delle regolazioni dettagliate per mantenere la stabilità e la sicurezza. In modalità completamente autonoma, il veicolo è in grado di compiere operazioni di volo senza intervento umano, seguendo rotte programmate e rispettando le normative del traffico aereo. Tra le componenti principali dell'avionica dei velivoli eVTOL troviamo:

- Sistema di comunicazione: la comunicazione può essere sia interna che esterna e solitamente avviene tra pilota e passeggeri oppure esterna che può essere air-to-air (tra velivoli) oppure air-to-ground (velivolo-terra). Le comunicazioni esterne possono essere di tipo Line Of Sight (LOS) e tipicamente avvengono via VHF, oppure Beyond Line Of Sight (BLOS), di tipo HF e SATCOM.

- Sistema di navigazione: il sistema di navigazione si occupa di acquisire i dati su quota, velocità e orientamento attraverso sensori posti all'esterno del velivolo, dopodiché questi dati vengono processati e mostrati al pilota tramite display.
- Flight management: il flight management system ha come scopo il controllo del volo. Risulta essere molto importante all'interno di un velivolo non solo per la sicurezza ma anche nell'ottimizzare i vari parametri di volo e di conseguenza porta ad una riduzione dei costi operativi e carico di lavoro sui piloti.
- Surveillance & Identification: per questioni di sicurezza risulta essere vitale per un velivolo riuscire a tenere sotto controllo lo spazio a lui circostante. Il sistema TCAS ha il compito di rilevare la presenza di altri velivoli mentre tramite l'ATC trasponder che opera in diverse modalità comunica i dati del velivolo a terra o con altri velivoli.
- Autopilota: l'autopilota è un software che collabora con tutti gli altri sistemi presenti a bordo ed è in grado di ricevere i dati elaborati sulla posizione e velocità dell'aeromobile e di conseguenza attua dei comandi per mantenere la rotta prefissata.

Questi consentono una cooperazione sicura e una condivisione delle informazioni per evitare collisioni e garantire la sicurezza del volo. Per permettere tutto ciò la UAM pone una grande enfasi sull'addestramento dei piloti e degli operatori per garantire una corretta gestione del sistema avionico. Inoltre, i veicoli eVTOL sono soggetti a rigorosi controlli di manutenzione, con piani preventivi e correttivi che garantiscono la massima affidabilità e sicurezza.

1.2.1 Sistema di alimentazione

Batterie

Le batterie rappresentano un elemento fondamentale nei veicoli eVTOL, poiché forniscono l'energia necessaria per alimentare i motori elettrici che ne consentono il volo.

Per il dimensionamento delle batterie è importante tenere presente un importante compromesso fondamentale tra le dimensioni della batteria e la durata della missione. Per ottenere un'autonomia significativa, le batterie devono avere una densità energetica elevata. Le batterie al litio hanno una buona densità energetica per questo sono le più comuni nei veicoli eVTOL della UAM. I veicoli eVTOL richiedono batterie in grado di sopportare un gran numero di cicli di carica/scarica senza degradarsi rapidamente. È importante, inoltre, che i tempi di ricarica risultino essere minimizzati al massimo possibile per rendere i veicoli eVTOL più pratici per questo lo sviluppo di tecnologie di ricarica rapida e infrastrutture di ricarica efficaci sono aspetti particolarmente importanti da tener sempre presente. Secondo le attuali tecnologie le batterie dei velivoli eVTOL andranno ricaricate parzialmente o completamente alla fine di ogni missione, per permettere tutto questo la rete elettrica attuale dovrà subire grosse implementazioni per soddisfare il bisogno energetico necessario.

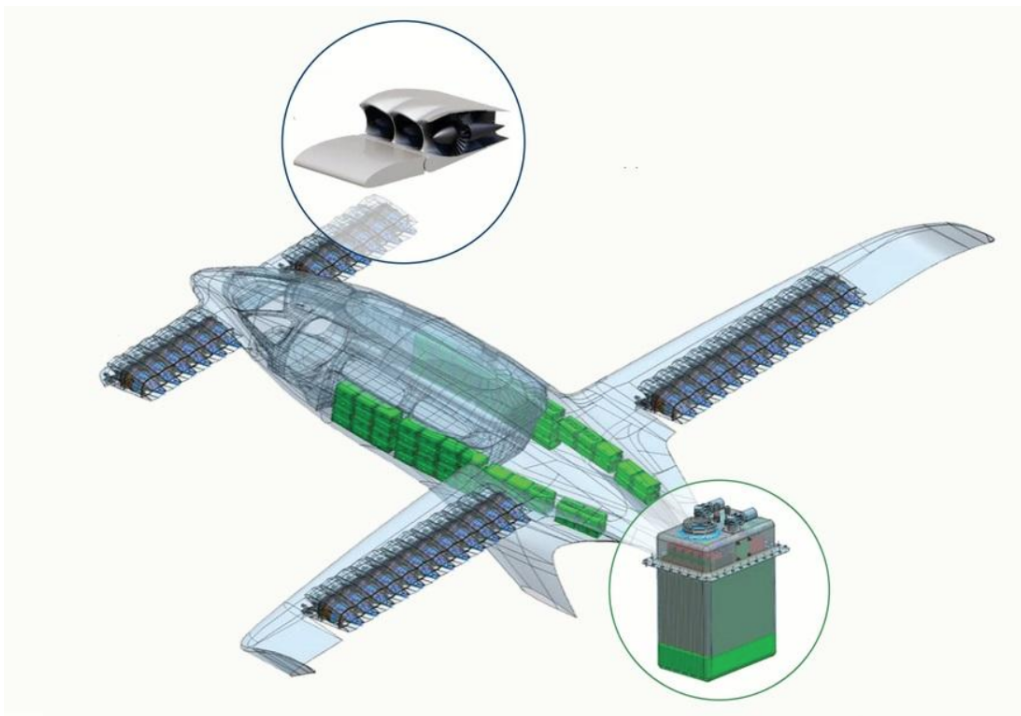


Figura 1.3: Esempio di batterie negli eVTOL [6]

Per questioni di tempo, inoltre, potrebbe essere necessaria l'intera sostituzione del pacco batterie una volta che queste sono esaurite, in quanto si è stimato un tempo di ricarica per un velivolo di tipo lift + cruise che va dai 12,5 ai 19,1 minuti con un caricabatterie da 300kW [1]. Andando ad aumentare i kW sarebbe possibile ridurre questi tempi ma comporterebbe comunque uno stress sulla rete elettrica generale oltre ad uno stress sulle batterie dovuto da un possibile innalzamento delle temperature con una conseguente diminuzione del ciclo di vita della batteria.

Come detto in precedenza le batterie maggiormente utilizzate sono le batterie a litio in quanto risultano avere le caratteristiche che più si adattano all'aviazione, tra le varie composizioni chimiche troviamo:

- Batterie a ioni di litio (Li-Ion): sono tipicamente composte da anodo + catodo che risultano essere rispettivamente in rame e alluminio immersi in soluzioni non acquose di solventi organici con all'interno di sali di litio. Il composto poi viene racchiuso all'interno di un contenitore in acciaio o alluminio questo perché quando vengono raggiunte delle temperature elevate si potrebbe presentare il rischio di esplosione. Questo tipo di batteria opera in maniera ottimale in un intervallo di temperature che va da 15° e 40° C anche se è in grado di resistere a intervalli più ampi (circa -20°/60°C) che però portano ad una diminuzione della capacità utile della batteria.
- Batterie Litio-Ossigeno (Li-O₂): Le batterie litio-ossigeno sono composte da elettroliti non acquosi più un catodo in carbonio poroso e un anodo in litio. Presenta un design abbastanza complesso in quanto durante i cicli di carica e scarica tende a cambiare peso e volume ciò nonostante è una tecnologia molto promettente per le sue caratteristiche energetiche.

- Batterie agli ioni di fluoro (F-Ion): questo tipo di batterie sono composte da un' elettrolita solido che permetta la conduzione di ioni al suo interno e che divide il catodo composto da un fluoruro metallico e un anodo metallico. Con l'impiego di questo tipo di conduzione si possono raggiungere temperature estremamente elevate fino a 150°C.
- Batterie Litio-Zolfo (Li-S): le batterie al litio-zolfo sono un tipo di tecnologia delle batterie che utilizza lo zolfo come materiale dell'elettrodo negativo (anodo) e litio come materiale dell'elettrodo positivo (catodo). Questo design è in contrasto con le tradizionali batterie agli ioni di litio, che utilizzano un materiale al carbonio come anodo. Questa tipologia di batterie ha una densità energetica teorica significativamente più elevata rispetto alle batterie al litio-ione. Ciò significa che possono immagazzinare una maggiore quantità di energia per unità di peso, rendendole interessanti per applicazioni che richiedono una maggiore autonomia o una maggiore capacità di immagazzinamento energetico. Come svantaggio però presentano sfide significative legate alla stabilità del ciclo di vita. Durante i cicli di carica e scarica, lo zolfo può subire variazioni di volume notevoli, portando a problemi di stabilità strutturale che influenzano la durata della batteria.

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

Figura 1.4: Caratteristiche batterie al litio [17]

Nella Figura 1.4 è possibile notare le principali caratteristiche e di conseguenza differenze tra le varie tipologie di batterie al litio. Da queste caratteristiche si può capire perché le batterie Li-ion sono quelle maggiormente utilizzate, in particolare per la loro potenza specifica oltre a presentare valori ottimi per quanto riguarda la densità energetica seppur con problemi di sicurezza legati alla temperatura di esercizio che possono portare a rischi di incendio. Si potrebbero adottare le batterie a ioni di sodio in sostituzione a quelle di litio in quanto presentano prestazioni migliori oltre a portare un beneficio a livello ambientale in quanto il sodio risulta essere molto più presente in natura oltre ad essere più facilmente reperibile. Sfortunatamente questa tecnologia non è ancora matura di conseguenza presenta delle limitazioni che la rendono ancora non idonea alla propulsione aeronautica.

Fuel cell

Una seconda opzione per la propulsione dei velivoli eVTOL potrebbero essere le celle a combustibile che prevedono l'utilizzo dell'idrogeno liquido. Le fuel cell riescono a produrre energia elettrica tramite una reazione chimica, che avviene in elettrodo, tra idrogeno e

ossigeno. La reazione in questione non prevede la combustione quindi non si hanno grosse limitazioni per quanto riguarda la temperatura di utilizzo. Il vantaggio di questo tipo di combustibile sta nel fatto che permette una carica rapida (circa 10 minuti) e ha come unico prodotto di scarto l'acqua mentre lo svantaggio principale risiede nello stoccaggio e nell'approvvigionamento dell'idrogeno. L'idrogeno, infatti, va mantenuto in specifici serbatoi criogenici in grado di mantenere e monitorare costantemente la temperatura in quanto risulta essere liquido solo a temperature inferiori ai -250°C . La produzione dell'idrogeno, inoltre, è abbastanza dispendiosa in termini energetici, di conseguenza, risulterebbe essere realmente a impatto 0 se e solo se questo venisse prodotto e stoccato con fonti di energia totalmente rinnovabili.

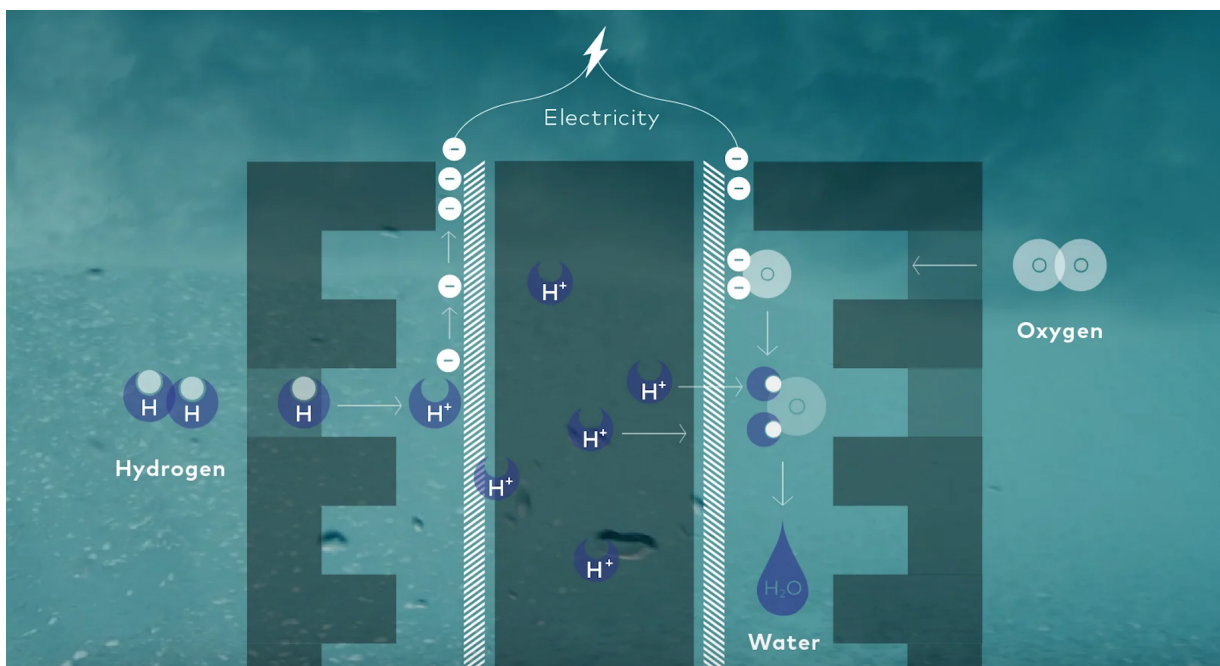


Figura 1.5: Funzionamento fuel cell [20]

Tra le varie tipologie di fuel cell troviamo :

- Alkaline (AFC): questo tipo di celle utilizzano un' elettrolita alcalino formato da acqua in cui è diluito solitamente dell'idrossido di potassio (KOH) o idrossido di sodio (NaOH) che serve per impregnare una matrice porosa a base di ossido di cerio o titanite di potassio, anodo e catodo vengono solitamente realizzati in argento. Le AFC utilizzano spesso catalizzatori a base di platino o leghe di platino per facilitare le reazioni di ossidazione e riduzione all'anodo e al catodo inoltre l'elettrolita alcalino contribuisce a migliorare la velocità delle reazioni elettrochimiche nella cella, consentendo un funzionamento più efficiente. Vennero utilizzate in alcune missioni spaziali, inclusa l'Apollo, dove sono state impiegate per fornire elettricità e acqua ai moduli spaziali. Tuttavia, nel contesto terrestre, hanno avuto limitata diffusione fino ai tempi più recenti. Queste batterie funzionano a temperatura relativamente basse rispetto ad altre tecnologie di cella a combustibile, il che può semplificare la gestione termica del sistema, vengono considerate relativamente efficienti ed emettono basse quantità

di inquinanti. L'efficienza complessiva può variare in base al tipo specifico di AFC e alle condizioni operative in quanto potrebbe avvenire il cosiddetto "avvelenamento da anidride carbonica" dovuto al fatto che l'elettrolita alcalino è in grado di assorbire CO_2 che ne riduce la potenza di conduzione.

- **Polymeric Electrolyte Membrane (PEMFC):** Le celle a combustibile a membrana a scambio protonico o a membrana polimerica elettrolitica sono un tipo di tecnologia di celle a combustibile in cui si utilizza un' elettrolita polimerico, spesso realizzato in polimero di acido perfluorosolfonico, per facilitare lo scambio di protoni attraverso la membrana durante le reazioni elettrochimiche accoppiato con un catalizzatore a base di platino o leghe di platino. Il PEMFC tende a raggiungere una temperatura moderata, generalmente compresa tra 60 e 80 gradi Celsius. Questa temperatura relativamente bassa consente tempi di avvio rapidi e semplifica la gestione termica. Sono tipi di celle note per la loro elevata efficienza, specialmente in situazioni di carico parziale, rendendole adatte per applicazioni in cui la richiesta di potenza può variare. Vengono comunemente utilizzate in applicazioni portatili, veicoli a celle a combustibile (ad esempio, auto e autobus a idrogeno), sistemi di alimentazione di emergenza e persino in alcune applicazioni stazionarie per la produzione di energia.
- **Phosphoric Acid (PAFC):** Le celle a combustibile a acido fosforico sono un tipo di tecnologia di celle a combustibile che utilizzano acido fosforico come elettrolita con elettrodi di platino disperso su una struttura di carburo di silicio. Queste celle a combustibile sono state sviluppate negli anni '60 e '70 e hanno visto diverse applicazioni commerciali, specialmente in sistemi stazionari per la produzione di energia elettrica. Questa tipologia di celle mantiene una temperatura relativamente elevata, tipicamente nell'intervallo di 150-200 °C, temperatura che può comportare tempi di avvio più lunghi e può richiedere sistemi di gestione termica più complessi rispetto ad alcune altre tecnologie di celle a combustibile. Le celle a combustibile a acido fosforico sono state impiegate principalmente in applicazioni stazionarie, come sistemi di alimentazione di emergenza, centrali elettriche distribuite e impianti di cogenerazione, dove la produzione combinata di elettricità e calore può essere sfruttata in modo efficace. Rispetto ad alcune tecnologie di cella combustibile, il PAFC tende ad avere una maggiore durata dei componenti, il che le rende adatte per applicazioni in cui la continuità operativa è critica.
- **Solid oxide (SOFC):** Le celle a combustibile a ossido solido sono un tipo di tecnologia di celle a combustibile che utilizza un' elettrolita solido, solitamente una ceramica conduttrice di ioni ossido come l'ossido di zirconio stabilizzato con ittrio o l'ossido di cerio, questo elettrolita consente il passaggio degli ioni ossido attraverso di esso durante le reazioni elettrochimiche. Le SOFC tendono a raggiungere una temperatura elevata, generalmente nell'intervallo di 500-1000°C. Questa temperatura elevata permette una maggiore efficienza nella conversione dell'energia chimica in elettricità, ma presenta sfide legate alla gestione termica e ai materiali che devono resistere a

condizioni gravi. Questo tipo di celle vengono studiate per applicazioni stazionarie, veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV) e sistemi di energia distribuita.

- Molten Carbonate (MCFC): Le celle a combustibile a carbonato fuso sono un tipo di tecnologia di celle a combustibile che utilizza carbonato fuso come elettrolita, solitamente una miscela di carbonato di litio e carbonato di potassio . Questo elettrolita è conduttore di ioni carbonato, il che consente il passaggio degli ioni attraverso di esso durante le reazioni elettrochimiche. Come catalizzatori, invece, vengono utilizzati materiali a base di nichel (Ni) sull'anodo e ossidi di metalli di transizione come catalizzatori al catodo per facilitare le reazioni di ossidazione e riduzione. Il MCFC mantiene una temperatura elevata, tipicamente nell'intervallo di 600-700° C. Questa temperatura relativamente alta consente una maggiore efficienza nella conversione dell'energia chimica in elettricità.

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

Tabella 1.1: Proprietà fuel cell [18]

Come si può notare dalla Tabella 1.1, in cui vengono messe a confronto le caratteristiche principali delle varie tecnologie di fuel cell, la tipologia che risulta essere più adatta all'aviazione risulta essere la PEMFC la quale possiede un'alta potenza specifica con dimensioni relativamente ridotte e temperature di esercizio contenute. Grazie a queste sue caratteristiche, ad oggi, è la tipologia di fuel cell maggiormente utilizzata in campo automobilistico e che con le opportune modifiche si potrebbe facilmente adattare a quello dell'aviazione.

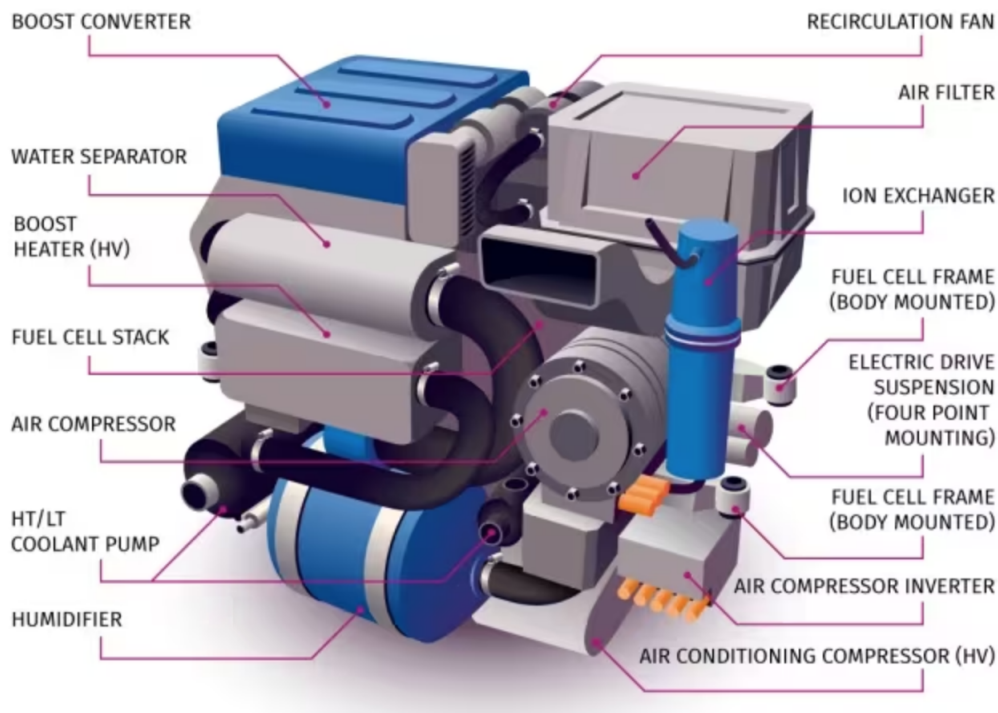


Figura 1.6: Esempio di motore fuel cell [18]

Confronto tra tecnologie

Se si vogliono mettere a confronto le due tecnologie bisogna ricordare che le batterie, in particolare quelle agli ioni di litio, rappresentano una tecnologia consolidata con prestazioni soddisfacenti, sicurezza affidabile e un'efficienza di restituzione dell'energia di circa il 90%. Tuttavia, presentano limiti quali una densità energetica non particolarmente elevata e una vita limitata a 3000 cicli, imponendo sostituzioni frequenti con relativi costi logistici e di smaltimento. Inoltre, la ricarica può richiedere più tempo rispetto al rifornimento di idrogeno, anche con la modalità di ricarica rapida.

D'altro canto, le celle a combustibile a carbonato fuso (MCFC) utilizzate per immagazzinare energia sotto forma di idrogeno offrono vantaggi in termini di durata della vita della cella superiore e costi di smaltimento inferiori rispetto alle batterie. La velocità di rifornimento delle celle a combustibile permette una continua operatività degli aeromobili. Tuttavia, ci sono considerazioni negative, come la corrosività, volatilità e infiammabilità dell'idrogeno, richiedendo misure di sicurezza aggiuntive.

L'utilizzo dell'idrogeno come mezzo di stoccaggio energetico può essere ecologicamente sostenibile se prodotto da fonti rinnovabili tramite elettrolisi. Tuttavia, l'infrastruttura necessaria per fornire costantemente idrogeno liquido a una flotta di aeromobili eVTOL è una sfida tecnologica ed economica. La produzione di idrogeno da fonti rinnovabili tramite elettrolisi richiede un notevole consumo d'acqua e può comportare dispersioni di energia nei vari passaggi del processo.

Inoltre, la produzione di elettricità tramite celle a combustibile a idrogeno emette grandi quantità di vapore acqueo, che potrebbe contribuire localmente sul clima urbano in presenza di numerosi aeromobili in una città. L'adozione su larga scala dell'idrogeno come metodo

di stoccaggio energetico richiede considerazioni approfondite sulle fonti di produzione, l'efficienza del processo e l'impatto ambientale complessivo in quanto attualmente le tecnologie esistenti per la produzione e lo stoccaggio non risultano essere particolarmente efficienti, basti pensare che 1 kg di idrogeno produce circa 16 kWh di energia mentre sono necessari all'incirca 50 kWh per produrlo senza calcolare l'energia necessaria al raffreddamento, trasporto e stoccaggio.

1.2.2 Esempi di velivoli

Joby Aviation

La Joby Aviation è un'azienda statunitense nata nel 2009 il cui velivolo di punta è il Joby S4. Si tratta di un velivolo 5 posti (4 passeggeri + 1 pilota) che per la sua propulsione utilizza 6 eliche inclinabili che si trovano sia sull'ala alta fissa che sulla sua coda a V.



Figura 1.7: Velivolo Joby Aviation - Joby S4 [3]

Un sistema di propulsione elettrica distribuita (DEP) può portare l'aereo a raggiungere la velocità di 322 km/h grazie a batterie al litio-nichel-cobalto-manganese-ossido, con un'autonomia 241 km. L'azienda prevede di far funzionare questi aeromobili come parte delle reti di ride-sharing aereo nelle città e nelle comunità di tutto il mondo, a partire dal 2025, in collaborazione con Delta e Uber, con un impianto di produzione da 500 aerei all'anno in collaborazione con Toyota .

Lilium

L'azienda Lilium GmbH è una realtà tedesca fondata nel 2015 che propone come velivolo elettrico a decollo e atterraggio verticale Lilium Jet. Il velivolo Lilium presenta una propulsione di tipo vectored thrust grazie ai suoi 36 motori posizionati lungo la parte posteriore delle ali. I motori sono in grado di compiere una rotazione fino a 90° rendendo così possibile la direzionalità della spinta con cui si riesce a garantire il controllo del velivolo in volo.

Lilium Jet è in grado di trasportare fino a 6 passeggeri più un pilota e ad una velocità di 250 km/h raggiungendo un range massimo di 250 km.



Figura 1.8: Velivolo Lilium GmbH - Lilium Jet [7]

Questo tipo di velivolo è in grado di adattarsi a diverse configurazioni e usi. È possibile avere al suo interno 4 posti spaziosi luxury, 6 posti per i voli passeggeri o una configurazione senza posti a sedere per servire il mercato della logistica.

Volocopter

La Volocopter GmbH è un'impresa tedesca nata nel 2011 specializzata nella progettazione di elicotteri multirottore elettrici. Il suo velivolo di punta è il VoloCity un eVTOL dotato di 18 rotori, alimentati da 9 batterie a litio, con i quali riesce a raggiungere una velocità massima di 110 km/h con una autonomia di 35 km. È un velivolo biposto che può prevedere o meno la presenza di un pilota. Prevede un lancio iniziale nel 2024 a Parigi seguito da Singapore, Roma e NEOM.



Figura 1.9: Velivolo Volocopter - VoloCity [8]

Archer Aviation

La Archer Aviation è un'azienda statunitense fondata nel 2018. Il suo velivolo eVTOL è il Midnight in grado di trasportare fino a 4 passeggeri. Il sistema di propulsione è composto da 12 motori di cui 6 sono mobili posizionati sul bordo d'attacco dell'ala mentre i restanti 6 sono fissi e si trovano sul bordo di fuga dell'ala alimentati da 6 pacchi di batterie a ioni di litio. Riesce a raggiungere una velocità di crociera di 241 km/h con un'autonomia di 160 km.

Archer Aviation ha iniziato a collaborare con il gruppo automobilistico Stellantis con l'obiettivo di produrre in serie l'aereo eVTOL di Archer come produttore a contratto esclusivo con il fine di dispiegare circa 6000 velivoli entro il 2030.



Figura 1.10: Velivolo Archer Aviation - Midnight [9]

Alaka'i Technologies

Alaka'i Technologies è un'azienda fondata nel 2006 pioniera nel settore della mobilità aerea con sede a Stow, MA, appena fuori Boston. Nel 2018 ha iniziato a progettare il suo primo velivolo eVTOL, Skai, un multicottero avente 6 motori fissi. Il velivolo è progettato per il trasporto di 4 passeggeri e può raggiungere i 190 km/h con un range di 644 km. Skai è uno dei pochi velivoli a decollo e atterraggio verticale ad essere stato progettato per funzionare alimentato a idrogeno. L'idrogeno liquido (LH2) viene stoccato in tre serbatoi che alimentano tre differenti fuel cell indipendenti tra loro che riducono notevolmente i tempi di rifornimento.

Alaka'i ha collaborato con Designworks, lo studio di innovazione del design del BMW Group, per sviluppare il design di Skai. Il design progettato è sicuro, semplice e affidabile consente una produzione su scala automobilistica per rendere la mobilità aerea accessibile a tutti riducendo a minimo costi di produzione.



Figura 1.11: Velivolo Alaka'i- Skai [20]

1.3 Vertiporti

Per il funzionamento dell'UAM è necessario che vengano installate delle infrastrutture di terra dedicate ed adatte, i vertiporti. Il loro posizionamento deve essere pianificato sia all'interno che all'esterno delle città a seconda dei volumi di traffico aereo previsti in modo da integrare al meglio gli spostamenti aerei con quelli terrestri. I vertiporti possono essere suddivisi in tre categorie principali:

- vertihubs: infrastrutture tipicamente più grandi da posizionare in luoghi con grande flusso di persone, con disponibilità di grandi spazi aperti come gli aeroporti dove poter effettuare manutenzioni e revisioni.
- vertibases o vertiport: sono strutture di media dimensione con l'obiettivo di potersi adattare il più possibile a infrastrutture urbane preesistenti come tetti di edifici molto alti.
- vertipads: sono strutture molto piccole atte al semplice decollo/atterraggio in zone con una minore densità di popolazione.

Le collocazioni possibili, quindi, potrebbero essere aeroporti o eliporti già esistenti, con le opportune integrazioni, piattaforme opportunamente costruite sopra tetti, ferrovie o grandi strade o ancora su piattaforme galleggianti. Le posizioni più adatte all'inserimento di un vertiporto derivano da mappe con informazioni geografiche 3D circa il pendolarismo. Lo sviluppo di una rete di vertiporti, quindi, inizia determinando la domanda complessiva raggruppata in aree di interesse. Il vincolo imposto dai tempi di trasferimento è di cruciale importanza e risulta essere il discriminante principale nella scelta della posizione in cui verrà collocato il vertiporto in quanto è uno dei fattori fondamentali per un viaggiatore che sceglierà la mobilità aerea urbana.

Un requisito fondamentale per l'installazione di questo tipo di infrastrutture è che vengano accettate dai cittadini permettendo la convivenza con strutture preesistenti. Per permettere ciò bisognerà tenere ben presente due aspetti che secondo i sondaggi preoccupano maggiormente la popolazione: sicurezza e inquinamento acustico. Fattori importanti, inoltre, per la loro collocazione sono la facilità di accesso al sito stesso e la loro connessione alla rete elettrica per permettere la ricarica dei velivoli.

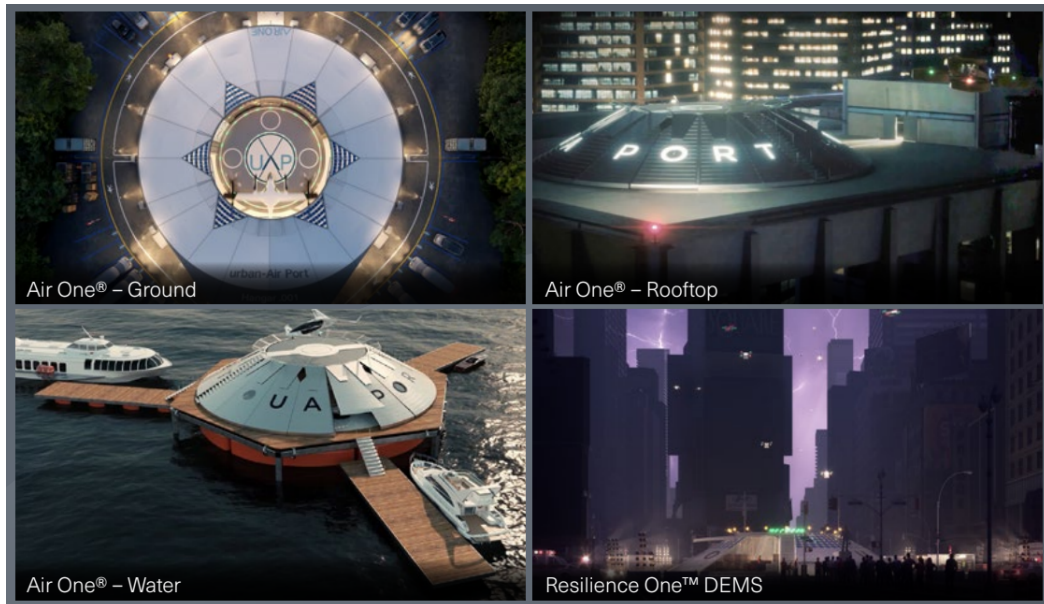


Figura 1.12: Prototipi di varie tipologie di vertiporti proposti dalla UAP [5]

Oltre alla convivenza pacifica con la popolazione è importante ricordare che il posizionamento dei vertiporti è vincolato dai percorsi che gli aerei utilizzano per decollare e atterrare su queste piattaforme. Nonostante gli eVTOL possano restare stazionari, in generale il loro avvicinamento al vertiporto avviene in maniera inclinata per ottimizzare il consumo di energia quindi saranno necessarie grandi aree libere soprattutto per garantire la sicurezza necessaria ai loro involucri di volo. Sicuramente le norme di sicurezza già esistenti per gli elicotteri potrebbero essere un importante punto di partenza sia per la progettazione che per i criteri di guida come per esempio avere i percorsi avvicinamento completamente privi di ostacoli in zone in cui vengono esaminati i modelli storici del vento.

1.3.1 Configurazione vertiporti

I vertiporti sono una realtà relativamente nuova in cui si è ancora alla ricerca di una configurazione ottimale dal punto di vista della normativa. Seguendo le linee guida di una circolare consultiva della FAA i vertiporti dovrebbero essere provvisti di alcuni elementi chiave come un percorso di avvicinamento/partenza libero da ostacoli, un'area adibita alle operazioni di terra sgombera, un'area di avvicinamento e decollo finale, un'area di sicurezza e un cono di vento più eventuali aggiunte come marcatori o illuminazione [13].

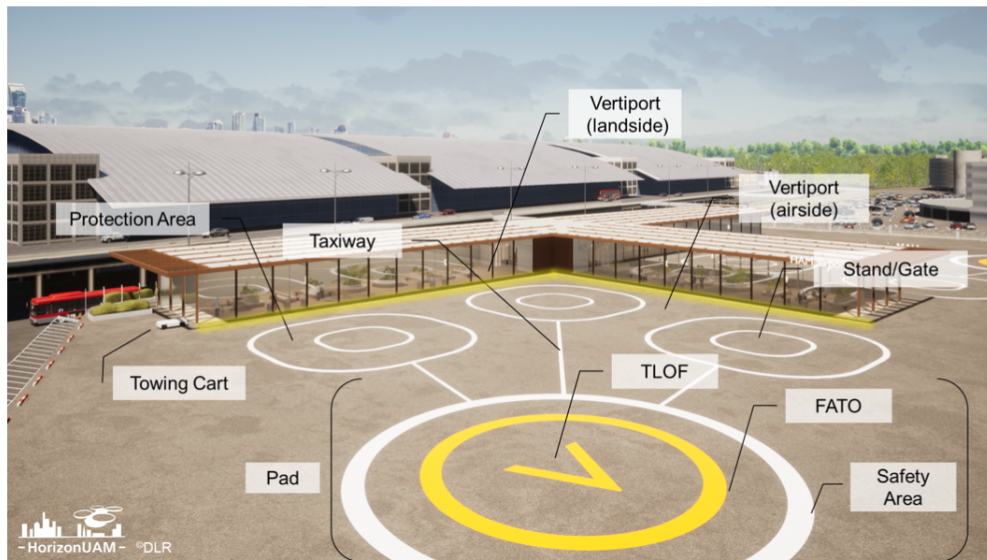


Figura 1.13: Layout di un vertiporto[12]

Gli elementi principali di un vertiporto sono:

- TLOF: l'acronimo TLOF sta per Touchdown and Lift-Off Area ed indica l'area dove avviene l'atterraggio e il decollo degli eVTOL. Generalmente è una superficie rettangolare le cui dimensioni minime sono vincolate dal diametro del rotore del velivolo eVTOL che usufruirà del vertiporto mantenendo comunque un limite inferiore di 15.2 m.
- FATO: la FATO (Final Approach and Take-Off Area) rappresenta un'area delimitata all'interno della quale il pilota completa la fase finale di avvicinamento in atterraggio o da quale inizia il decollo. Le dimensioni minime di quest'area devono essere circa due volte la dimensione massima del velivolo rispettando comunque il minimo di 30.5x61m. Al crescere dell'altitudine dalla superficie del vertiporto la FATO aumenta le sue dimensioni per garantire una maggiore sicurezza e flessibilità operativa nelle fasi di decollo/atterraggio. Nel caso siano previste più piattaforme che prevedono l'avvicinamento/partenza di più velivoli contemporaneamente deve essere garantita una distanza minima di 61 m tra le due aree FATO adiacenti.
- Area di sicurezza: l'area di sicurezza è una superficie al di fuori della FATO in grado di garantire l'integrità dei velivoli diminuendone i rischi di danno accidentale. L'area in questione si estende lungo tutti i lati della FATO per una lunghezza pari a $1/2$ della dimensione del velivolo eVTOL con un limite minimo di 9 m. Per questioni di sicurezza l'area deve rimanere del tutto sgombra ad eccezione dell'illuminazione

Nella Figura 1.13 è possibile vedere come vengono disposte queste aree all'interno di un vertiporto nella sua configurazione base.

All'interno del vertiporto vengono svolte delle operazioni base ad ogni singolo atterraggio che poi permettono nuovamente il decollo del velivolo elencate in Figura 1.14.

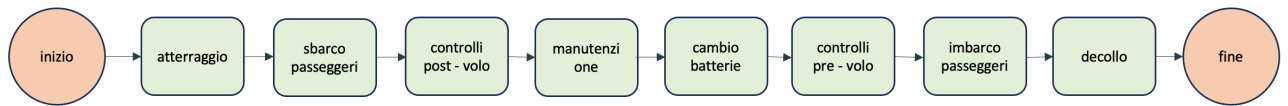


Figura 1.14: Sequenza operazioni vertiporto

I vertiporti a loro volta possono assumere tre configurazioni differenti che sono le seguenti:

- Pad singolo multifunzione: in questo tipo di configurazione tutte le operazioni del vertiporto vengono eseguite su un unico pad. Le sue dimensioni sono circa di 39x69 m e risulta avere una configurazione con la produttività inferiore rispetto ad altre configurazioni.

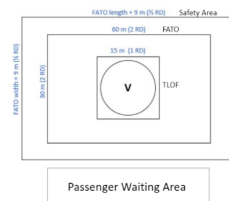


Figura 1.15: Pad singolo multifunzione [13]

- Progettazione ibrida: una progettazione di tipo ibrido prevede una piattaforma per il decollo/atterraggio per i velivoli con l'aggiunta di aree adibite alla sosta. Nelle aree di sosta avviene lo sbarco dei passeggeri, la manutenzione, la sostituzione eventuale delle batterie e l'imbarco dei nuovi passeggeri. Le dimensioni di questo tipo di pad sono di circa 70x100 m.

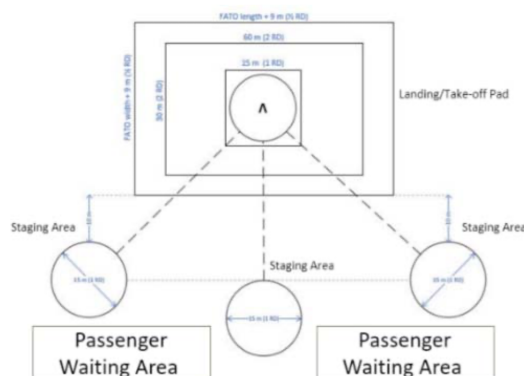


Figura 1.16: Pad a progettazione ibrida[13]

- Pad lineari a funzione singola: questo tipo di configurazione prevede che le varie operazioni avvengano ognuna su pad separati. Di conseguenza presenta pad distinti per il decollo ed atterraggio così come per l'imbarco e lo sbarco dei passeggeri ed infine

una piattaforma dedicata alla manutenzione/cambio delle batterie. Questo tipo di configurazione occuperebbe un' area di circa 69x168 m.

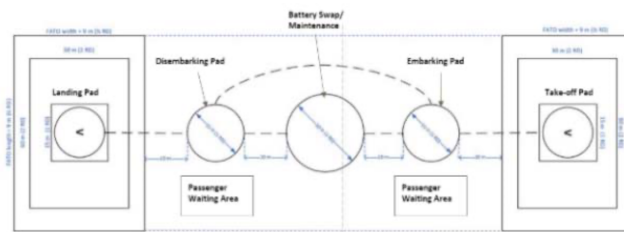


Figura 1.17: Pad lineare a funzione singola [13]

Nella progettazione di un vertiporto è importante, inoltre, definire anche i requisiti minimi per le aree di avvicinamento e partenza. Quest'area in particolare è detta OFV (Obstacle-Free Volume) che ha come obiettivo principale quello di permettere l'avvicinamento, in totale sicurezza, dei velivoli eVTOL in aree congestionate o con la presenza di ostacoli.

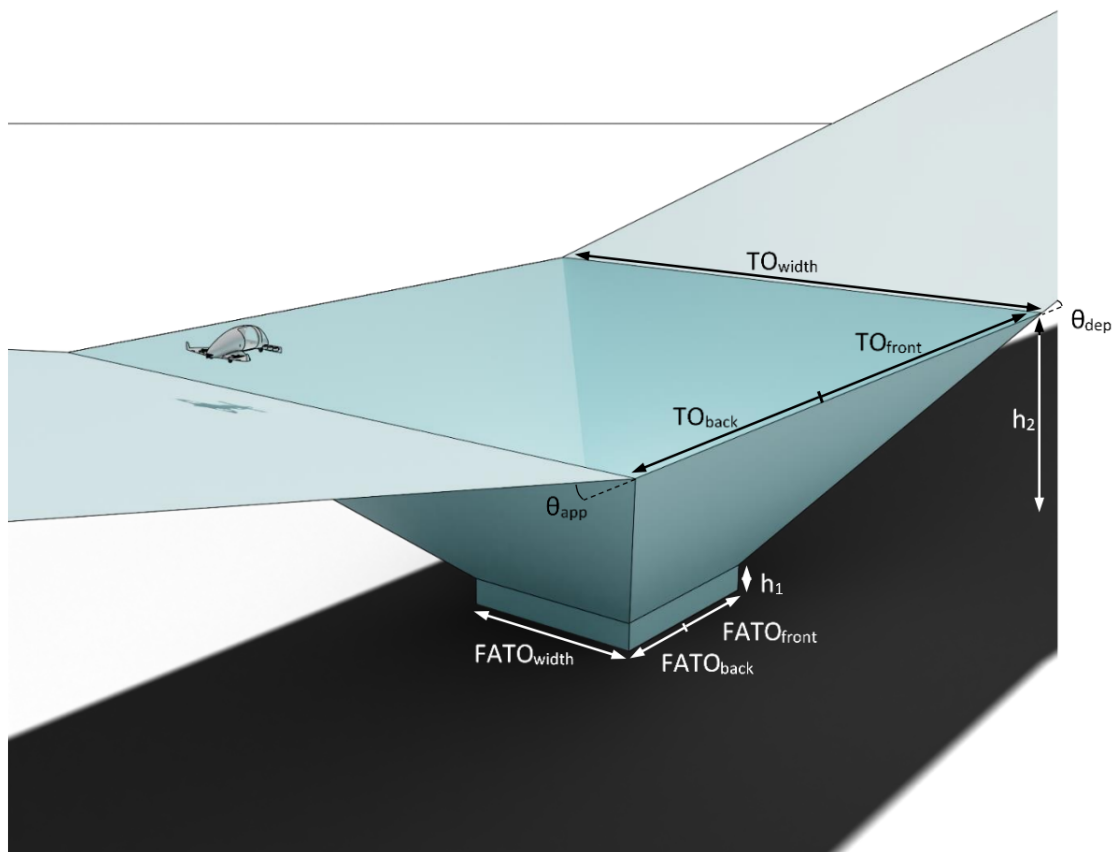


Figura 1.18: Specifiche di un OFV per vertiporti [14]

Il volume libero da ostacoli si ottiene andando a specificare determinati parametri in funzione della massima dimensione del velivolo eVTOL (D).

Parametro	Descrizione	Minimo/Massimo
h_1	altezza di volo inferiore	-
h_2	altezza di volo superiore	$\geq h_1$
TO_{width}	ampiezza a h_2	$\leq 5D$
TO_{front}	distanza frontale ad h_2	$\leq 5D$
TO_{back}	distanza posteriore ad h_2	$\leq 5D$
$FATO_{width}$	ampiezza della FATO	$\geq 1.5D$
$FATO_{front}$	distanza frontale dalla FATO	$\geq 0.75D$
$FATO_{back}$	distanza posteriore dalla FATO	$\geq 0.75D$
Θ_{app}	pendenza della superficie di avvicinamento	$\geq 4.5\%$
Θ_{dep}	pendenza della superficie di partenza	$\geq 4.5\%$

Tabella 1.2: Valori della OFV [14]

Il volume della procedura di decollo/atterraggio si estende verticalmente fino ad h_1 da cui si allarga verticalmente in maniera lineare fino ad un'altezza h_2 . Superata l'altitudine di h_2 sui bordi posteriori e anteriori del volume identificato si delimitano le superfici di avvicinamento e di partenza che presentano un'angolazione pari a Θ_{app} e Θ_{dep} . I massimi e i minimi dei parametri elencati vengono raggruppati in Tabella 1.2.

Un altro vincolo importante per la configurazione di un vertiporto è il rumore che influisce maggiormente sulle comunità adiacenti ai vertiporti. Il rumore risulta essere una funzione delle traiettorie del volo in partenza/arrivo da un vertiporto. Il livello di rumore a cui sono sottoposte le zone residenziali adiacenti a queste strutture è strettamente legata al numero di traiettorie di volo in arrivo e in partenza e dalla quantità di voli giornalieri su ciascuna di queste. Se i voli vengono distribuiti in maniera equa lungo le direzioni cardinali i residenti in prossimità delle rotte principali percepirebbero solamente il 25% del rumore totale. In particolare nei voli su singola piattaforma vengono identificate 6 direzioni principali per le traiettorie di volo in modo tale da concentrare sulla singola traiettoria solo il 17% del rumore totale.

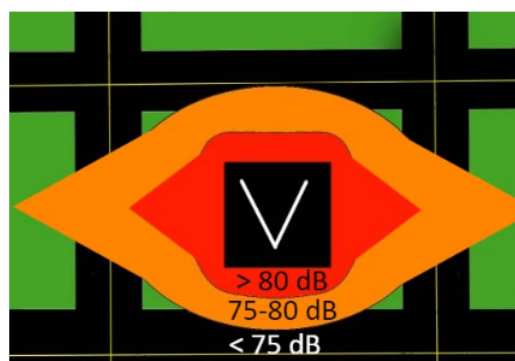


Figura 1.19: Distribuzione rumore nei pressi di una piattaforma singola [14]

1.3.2 Progettazione di vertiporti

Con l'affermarsi dell'UAM sempre più come una realtà possibile e imminente molte proposte di progettazione di vertiporti sono state sviluppate e sono tutt'ora argomento di riflessione e ricerca. Tra gli obiettivi principali c'è quello di integrare il più possibile queste strutture all'interno della mobilità urbana ad ora esistente sia pubblica che privata oltre a voler offrire un nuovo spazio pubblico per le comunità. Diversi progetti considerano, infatti, il vertiporto proprio come un'estensione della rete di trasporto pubblico riutilizzando tetti di edifici o parcheggi già esistenti trasformandoli in aree operative per imbarco/sbarco passeggeri e decollo/atterraggio velivoli. Un'analisi completa dei requisiti di progettazione dei vertiporti dovrebbe tener conto dei seguenti elementi[15]:

- **Infrastrutture:** l'ingombro del vertiporto all'interno di una realtà urbana è particolarmente discriminata per la fattibilità e la successiva implementazione dello stesso. Le dimensioni di un vertiporto dovrebbero raggiungere il giusto compromesso tra la grandezza della struttura e il numero di passeggeri che questo è in grado di servire.
- **Stima delle capacità in funzione della posizione:** i vertiporti dovrebbero essere posizionati il più possibile in specifiche zone in modo tale da riuscire a ridurre la congestione e fornire l'accesso al maggior numero e tipo di passeggeri e merci.
- **Sicurezza:** una scarsa sicurezza potrebbe portare ad un rifiuto da parte delle comunità di questo tipo di mobilità e di conseguenza portare a gravi danni al mercato dell'UAM. Sia la configurazione autonoma che quella pilotata deve garantire degli standard di sicurezza anche più alti dell'aviazione tradizionale in quanto questa si troverà a sorvolare costantemente delle aree con una altissima densità di popolazione.
- **Accettazione da parte della comunità:** l'accettazione da parte delle comunità può essere discriminata da fattori quali privacy, emissioni, qualità, costo del servizio, rumore e sicurezza. Sicuramente un fattore sicuramente favorevole sarebbe la diminuzione del tempo dei vari spostamenti.
- **Consumo energetico:** la richiesta di elettricità per il sostentamento di questo tipo di mobilità sarà molto alta e porterà grossi cambiamenti all'interno della rete elettrica attualmente esistente. Allo stesso tempo si prevede che questo tipo di tecnologia contribuirà a creare incentivi per spostarsi verso fonti di energia rinnovabili creando un maggior senso di responsabilità verso l'inquinamento da parte della CO₂.
- **Inquinamento acustico:** l'intensità del rumore è un parametro da tenere ben presente nella fase di progettazione nell'ubicazione dei vertiporti. Nell'effettuare questa analisi bisogna tener presente l'attuale livello di rumore prodotto dal traffico urbano e dell'impatto che i velivoli eVTOL avranno su di esso.
- **Restrizioni meteorologiche:** nella progettazione dei vertiporti bisognerà includere un costante monitoraggio meteorologico in tempo reale durante tutte le fasi del volo dei

velivoli eVTOL. Il monitoraggio dovrà essere, inoltre, affiancato da capacità predittive in grado di pianificare il percorso più sicuro possibile. Va sempre tenuto presente che in condizioni meteo estreme non sarà possibile l'utilizzo dei velivoli e di conseguenza sarà necessario provvedere a rimborsi o alternative via terra sempre valide.

Ad oggi non ci sono degli standard ben precisi per la progettazione dei vertiporti per questo le aziende che hanno avviato la produzione di tali infrastrutture si sono basati su criteri già esistenti per elisuperfici ed eliporti. Di conseguenza i parametri sia a livello quantitativo che qualitativo rilevanti potrebbero essere specificati in base alle seguenti normative

- Layout della piattaforma: seguendo le linee guida delle attuali SARP (Standards and Recommended Practices) dell'ICAO le dimensioni della piattaforma si basano sulle dimensioni del velivolo che dovrà ospitare (D) come descritto precedentemente.
- Criteri di ubicazione: limiti imposti dalla pianificazione urbana che portano ad un'analisi a livello edilizio ed infrastrutturale per un eventuale costruzione di vertiporti su tetti di edifici. Dovrebbero seguire le normative le vibrazioni, la corrente del vento, la costruzione grezza, la statica e la fisica delle costruzioni, i requisiti di spazio, l'integrazione delle infrastrutture di ricarica e la protezione dal rumore
- Operazioni simultanee di eVTOL: è necessario imporre distanze di sicurezza tra le rotte di ciascun velivolo in avvicinamento o partenza. L'ICAO raccomanda che gli eliporti debbano avere almeno due superfici per atterraggio/decollo che permettono di compiere più operazioni contemporaneamente.
- Norme di sicurezza: nell'installazione di un vertiporto bisogna garantire la sicurezza dell'equipaggio dell'aeromobile, dei passeggeri, degli occupanti dell'edificio e di terzi adiacenti all'edificio, è possibile questo grazie all'installazione sulle piattaforme del sistema DIFFS (sistema antincendio) .

1.3.3 Comunicazioni 5G

Tra le infrastrutture necessarie alla riuscita ottimale della mobilità aerea urbana c'è la rete di comunicazione 5G. Le sue caratteristiche principali la rendono una tecnologia ideale per supportare le operazioni UAM tra queste abbiamo:

- Latenza ultrabassa: l'UAM richiede un controllo estremamente reattivo e preciso dei velivoli per garantire la sicurezza dei passeggeri e la gestione del traffico aereo nelle aree urbane congestionate. Il 5G offre una latenza quasi in tempo reale, riducendo al minimo il ritardo nella trasmissione dei dati. Questo consente di coordinare con precisione il volo degli eVTOL e garantire una risposta istantanea alle condizioni in tempo reale

- Capacità di connessione massiccia: il 5G può connettere un gran numero di dispositivi contemporaneamente. Questo aspetto risulta essere cruciale in un ambiente UAM affollato, dove numerosi veicoli aerei e dispositivi devono comunicare tra loro e con le infrastrutture a terra
- Connettività affidabile: la sicurezza e l'affidabilità sono caratteristiche fondamentali nelle operazioni UAM. Il 5G offre una copertura uniforme e stabile, anche in aree urbane dense in modo tale da far rimanere gli eVTOL costantemente connessi alle infrastrutture di controllo del traffico aereo e ai servizi di navigazione, aumentando la sicurezza complessiva del servizio.

Nell'UAM tutti questi aspetti risultano essere vantaggiosi nelle operazioni tipiche di questo tipo di mobilità, questo perché permette di avere comunicazioni veloci e sicure. Il 5G, inoltre, supporta sistemi di navigazione avanzati necessari al supporto nel volo dei velivoli eVTOL fornendo un monitoraggio costante in tutte le fasi di volo. Infine il 5G può essere utilizzato per sistemi di identificazione e autenticazione sicuri per i veicoli aerei, garantendo che solo gli aeromobili autorizzati possano accedere alle infrastrutture e ai servizi facendo in modo che le informazioni di sicurezza possano essere scambiate in tempo reale per mitigare al massimo i rischi e rispondere rapidamente alle emergenze.

Tecnologia e design delle antenne 5G

Le antenne 5G per offrire i servizi sopracitati devono proporre una nuova tecnologia in grado di utilizzare gli array di antenne attive per fornire una migliore copertura, ridurre le interferenze e aumentare la capacità di trasporto dati. Per riuscire ad operare all'interno della gamma di frequenza ad essa assegnata sfrutta una struttura scalabile che funziona a frequenze che vanno dai 450 MHz e i 6 GHz (FR1) e tra i 24,25 e i 52,6 GHz (FR2) grazie ad una modulazione del segnale tramite un Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) che consentono una diversa spaziatura del segnale per adattarsi alle varie larghezze di canale fornite dalle diverse gamme di frequenza. Questo permette ai sistemi di comunicazione 5G di poter variare tra bande di bassa e alta frequenza in base alle richieste del carico di lavoro o ai vari casi d'uso.

Un requisito molto importante delle reti 5G è la capacità di sopportare densità particolarmente elevate di dispositivi connessi in grado di funzionare contemporaneamente pur mantenendo velocità di trasmissione dati molto elevate questo porta ad avere alte densità di celle e un uso più ampio delle tecnologie di antenna MIMO (multiple-input, multiple-output), array di antenne composto da più antenne di ricezione e trasmissione. La tecnologia MIMO utilizza il multiplexing spaziale che ha il compito di suddividere un generico segnale in flussi codificati che trasmette in maniera simultanea attraverso le diverse antenne. Di conseguenza sia i dispositivi di trasmissione che quelli di ricezione hanno più antenne ed elaborazione del segnale per codificare e decodificare segnali multiplex.

Per modellare una trasmissione e creare un modello di antenna ben definito mirato a una specifica antenna ricevente su utilizza la tecnica detta beamforming[19]. Questo

tipo di tecnologia si effettua andando a regolare la fase e l'ampiezza delle trasmissioni attraverso i diversi elementi di un'antenna, risulta essere molto utile anche nella riduzione delle interferenze in quanto è in grado di concentrare l'energia del segnale aumentandone la portata. La tecnologia beamforming 5G determina il percorso ottimale del segnale al suo ricevitore da parte del trasmittente. Il trasmittente, infatti, opera andando ad analizzare i segnali di riferimento sonori (SRS) che vengono inviati tra trasmittente e ricevitore e ne stabilisce lo stato del canale (CSI). In base al CSI il trasmittente mette in atto algoritmi di beamforming in grado di generare modelli radio sagomati ottimali alla ricezione anche in funzione della presenza o meno di edifici che possono essere sfruttati per la riflessione del segnale, allo stesso tempo, in un ambiente con molti dispositivi che utilizzano gli stessi canali l'algoritmo evita le collisioni riducendo al minimo le interferenze del segnale.

Per fare in modo che tutto questo avvenga in maniera continua i trasmittenti tracciano costantemente le apparecchiature riceventi e i relativi percorsi ottimali del segnale. Il beamforming, quindi, è una tecnologia ad alta intensità di calcolo che richiede antenne MIMO attive con robuste capacità di elaborazione del segnale.

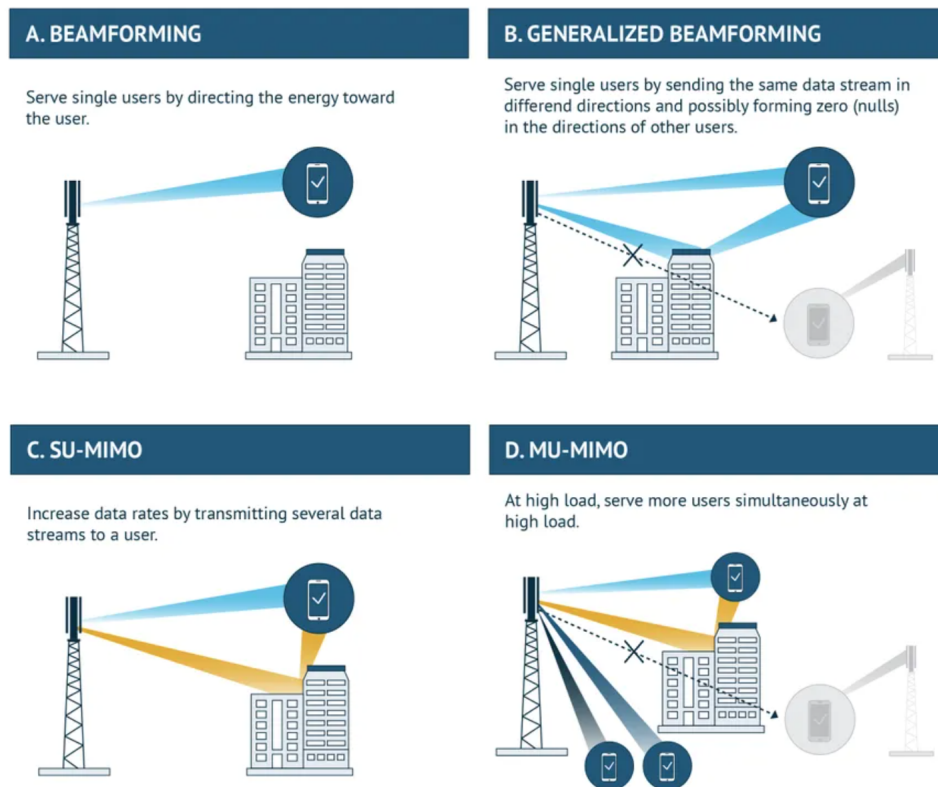


Figura 1.20: Funzionamento del beamforming [19]

1.3.4 Esempi di vertiporti

Urban Air Port

La Urban Air Port è un'azienda inglese fondata nel 2019 la quale progetta, produce, vende e gestisce infrastrutture terrestri, aeree e digitali per nuove forme di trasporto aereo urbano

sostenibile come aerotaxi e droni per consegne autonome. Hanno come obiettivo quello di creare un ecosistema di mobilità a emissioni zero puntando su tecnologie e produzioni del tutto innovative. Con i loro vertiporti sono in grado di coprire 4 mercati diversi: trasporto passeggeri con taxi aerei, logistica merci, gestione e sicurezza delle emergenze in caso di calamità e difesa. I modelli della loro flotta sono i seguenti:

- Urban-Air Port: AirOne = Ground + Roof
- MarineOne = A largo
- ResilienceOne = Difesa
- CityBox = Logistica carichi
- DocksBox = Centro logistico carichi

Il 25 aprile 2022 hanno lanciato Air One, il primo porto aereo urbano pienamente operativo al mondo per droni e velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL) a Coventry (UK). Nelle settimane successive all'inaugurazione sono stati testati più di 100 voli di droni davanti ad un pubblico di 15.000 persone appartenenti a istituzioni, mondo accademico, aziende e cittadini per rendere questo tipo di mobilità sempre più familiare al grande pubblico.



Figura 1.21: Il vertiporto della Urban Air Port - Air One [5]

Skyports

Skyports è una realtà britannica fondata nel 2018. Nel novembre 2022 Skyports e Groupe ADP hanno lanciato il loro primo vertiporto situato a 40 km a nord-ovest di Parigi, verrà utilizzato da Skyports e dai principali produttori di veicoli per testare e dimostrare operazioni di volo, infrastrutture di terra, integrazione tecnologica ed esperienza dei passeggeri nel campo dell'UAM. Sempre nel 2022 ha iniziato una collaborazione con la Joby Aviation

per riuscire a testare e sviluppare contemporaneamente velivolo e infrastruttura di terra per convergere insieme al miglior risultato possibile.



Figura 1.22: Il vertiporto della Skyports [10]

Ad oggi Skyports possiede e gestisce uno degli unici due eliporti commerciali a Londra (Canary Wharf) risulta essere un importante nodo nella rete vertiport di Londra ed è un banco di prova attivo per nuove soluzioni tecnologiche e logistiche.

VoloPort

VoloPort è una divisione dell'azienda sopracitata Volocopter GmbH. Nel 2019 hanno presentato a Singapore il primo VoloPort al mondo e grazie a questo prototipo sono stati in grado di testare l'intero percorso del cliente a terra con l'obiettivo migliorare continuamente l'esperienza dei passeggeri.

Ad oggi Volocopter collabora con EASA per condividere a pieno le conoscenze e le innovazioni nel campo delle infrastrutture per la UAM e si impegna insieme a EUROCAE nello standardizzare i vertiporti per il decollo e l'atterraggio verticale in tutto il mondo.



Figura 1.23: Il vertiporto della Volocopter - VoloPort [11]

Ferrovial

La ferrovial è una multinazionale spagnola fondata nel 1952 che si occupa di costruzione, gestione e manutenzione di infrastrutture di trasporto. Grazie al loro impegno nell'innovazione all'interno della mobilità urbana hanno deciso di avviare un loro programma dedicato alla Urban Air Mobility avendo alla base un'esperienza decennale in Ferrovial Airports.

Nel 2021 Ferrovial e l'azienda di velivoli eVTOL Lilium hanno firmato un accordo per la costruzione di una decina di vertiporti in grado di coprire in maniera strategica tutte le principali città della Florida offrendo infrastruttura e servizi a impatto zero. Hanno previsto, infatti, che quasi la totalità dei 20 milioni di abitanti della florida risiederanno a circa 30 minuti dai vertiporti Ferrovial portando una valida alternativa nel campo dei trasporti urbani quotidiani.



Figura 1.24: Il vertiporto Ferrovial [16]

Capitolo 2

Costi operativi dell'UAM

Il settore dell'UAM si impone di connettere le aree urbane in maniera sempre più efficiente andando a catalizzare lo sviluppo economico, in questo contesto è importante comprendere l'entità e l'importanza dei costi operativi che opportunamente gestiti possono influenzare la qualità e la sicurezza oltre che la riuscita effettiva dei servizi offerti.

Dall'addestramento di equipaggi altamente qualificati al mantenimento delle flotte di aeromobili, dalle tariffe aeroportuali alla ricerca e sviluppo di tecnologie avanzate, così come il prezzo del carburante ogni aspetto dei costi operativi contribuisce a definire il panorama competitivo dell'industria.

La mobilità aerea urbana è una fusione di innovazione, precisione e costante adattamento alle mutevoli dinamiche del mercato. Pertanto, comprendere il peso e l'impatto di ogni componente dei costi operativi è essenziale per mantenere l'equilibrio tra redditività e la capacità di offrire servizi di alta qualità. In questo contesto, l'ottimizzazione delle risorse e la ricerca di soluzioni innovative emergono come imperativi, consentendo alle compagnie aeree di prosperare in un ambiente in costante evoluzione.

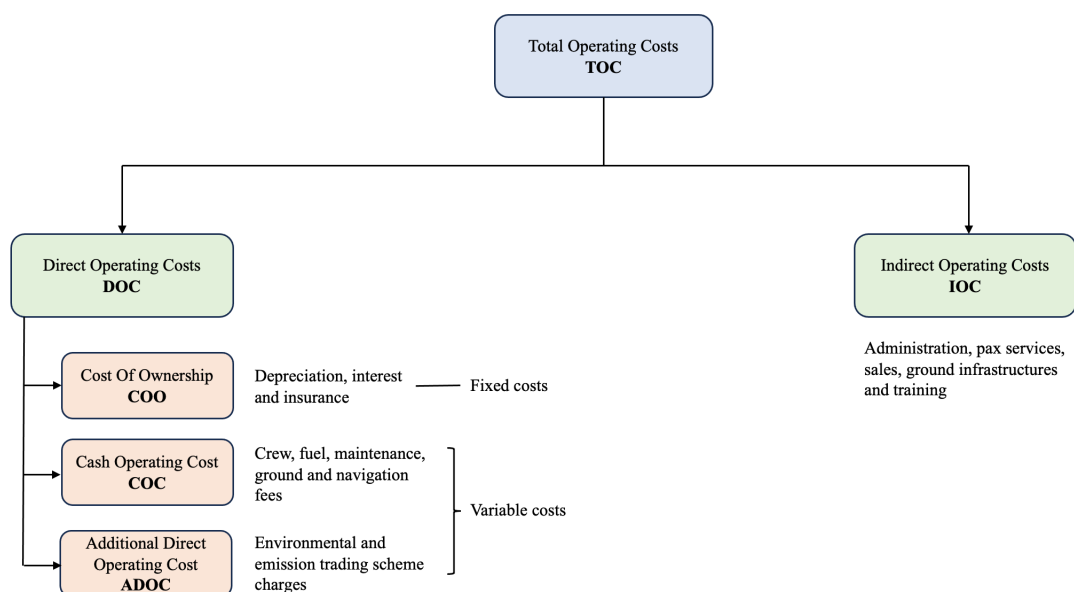


Figura 2.1: Schema suddivisione costi operativi

L' UAM è un tipo di mobilità ancora in fase sperimentale, di conseguenza, non si hanno a disposizione molti studi o esempi pratici circa i costi operativi. Si è partiti, quindi, dalle voci di costo operative tipiche presenti nell'aviazione civile apportando eventualmente le opportune modifiche.

Direct Operating Cost DOC

I costi operativi diretti sono tutte le spese direttamente associate alla produzione di beni o alla prestazione di servizi da parte di un'azienda. Questi costi sono strettamente collegati all'attività principale dell'azienda e sono direttamente attribuibili a un particolare prodotto, servizio o linea di produzione. Ne consegue che i costi operativi diretti variano proporzionalmente con il volume di produzione o l'attività svolta.

Come viene illustrato nello schema in Figura 2.1 i costi operativi diretti si dividono in costi di proprietà (COO), costi operativi del flusso di cassa (COC) e infine costi diretti operativi addizionali(ADOC). Nel dettaglio le voci elencate rappresentano:

- CCO: fanno parte dei costi di proprietà voci di costo come il deprezzamento, interessi o costi relativi alle assicurazioni. Nel caso della mobilità aerea urbana, oltre ai classici costi di deprezzamento levati al velivolo in se bisognerà aggiungere i costi legati all'acquisto e il relativo deprezzamento delle batterie. Il prezzo delle batterie, solitamente, è funzione dei kWh mentre il deprezzamento sarà funzione dei cicli di carica/scarica della batteria. La carica/scarica della batteria non è necessariamente legato ai decolli/atterraggi del velivolo in quanto non è detto che in un singolo volo la batterie venga completamente esaurita. Il campo aeronautico ha standard molto alti, di conseguenza, per mitigare i costi legati alla batterie potrebbe risultare vantaggioso riciclare le batterie in altri ambiti a terra o smantellando i pacchi batterie per il riutilizzo dei materiali.
- COC: tra i costi relativi al flusso di cassa troviamo i costi per l'equipaggio che, nel caso di una futura guida autonoma subirebbero delle drastiche variazioni oltre al fatto che, rispetto all'aviazione civile, non sono presenti assistenti di volo ma bensì solo di terra più la presenza di un eventuale pilota. Anche il costo del carburante subisce grosse variazioni in quanto nell'UAM viene del tutto sostituito dall'elettricità o eventualmente dall'idrogeno liquido. Per quanto riguarda i costi di manutenzione questi sono previsti per:
 - motori
 - avionica
 - elettrico
 - pneumatico
 - idraulico
 - flight control

– strutture

È possibile notare che mancano alcune voci tipiche dell'aviazione civile come quella relativa al carburante. Ai COC si aggiungo le spese relative alle tasse aeroportuali sia di terra che di aria.

- ADOC: nei costi operativi diretti addizionali rientrano oneri relativi ai sistemi ambientali e di scambio delle emissioni. La mobilità aerea urbana risulta essere del tutto elettrica, di conseguenza, durante le operazioni di volo e di terra non vengono emesse sostanze inquinanti di scarto nell'aria. Questo tipo di mobilità, infatti, si impone come alternativa del tutto a impatto zero ma potrebbe portare a oneri legati all'inquinamento ambientale per la produzione e lo smaltimento delle batterie o nella produzione e stoccaggio di idrogeno.

Indirect Operating Cost IOC

I costi operativi indiretti fanno parte di quella categoria di spese che, sebbene siano necessarie per il funzionamento di un'azienda, non possono essere direttamente attribuite a un particolare prodotto, servizio o processo specifico. Questi costi sono generalmente associati alle attività aziendali nel loro complesso e sostengono funzioni che contribuiscono al contesto operativo generale dell'organizzazione.

Al contrario dei costi operativi diretti, che sono strettamente legati a operazioni specifiche o a singoli prodotti, i costi operativi indiretti sono più generali e coprono un'ampia gamma di attività aziendali.

Tra i costi operativi indiretti troviamo:

- Costi amministrativi: spese per il personale e le risorse impiegate nelle funzioni amministrative, come la contabilità, le risorse umane, l'amministrazione e altre attività di supporto.
- Assistenza a terra: questi costi coprono servizi di assistenza a terra, come la gestione dei passeggeri e bagagli, il rifornimento di carburante e la manutenzione degli aeromobili a terra.
- Formazione del personale: investimenti nella formazione che beneficiano l'intero personale dell'azienda, risultano essere necessari in particolar modo in un campo così innovativo.
- Costi di distribuzione e marketing: i costi di distribuzione si riferiscono alle spese sostenute da un'azienda nel processo di consegnare i propri prodotti o servizi ai clienti finali. Le compagnie aeree, inoltre, devono investire in marketing e pubblicità per attirare clienti e promuovere i loro servizi.
- Infrastrutture di terra: le infrastrutture terrestri della mobilità aerea urbana sono sicuramente una novità nel mercato dell'aviazione. Trovare il loro valore di mercato

risulta essere una sfida in quanto in alcuni casi studio i vertiporti vengono analizzati come "System of Systems", cioè un modello che prevede l'unione delle risorse e delle capacità di un insieme di sistemi dedicati per creare un nuovo sistema , più performante rispetto a un potenziale sistema derivate dall'unione dei singoli componenti dei due.

2.1 Costo delle batterie

Il costo della batteria è una voce fondamentale nel campo dell'UAM, generalmente è possibile suddividere il costo totale in tre voci fondamentali: pacco energetico unitario, cella energetica unitaria e raffreddamento energetico unitario [22].

Il costo della batteria varia in funzione del tempo e dell'area di utilizzo oltre che al tipo di batteria per questo nella analisi viene solitamente individuato un prezzo medio. Il costo della cella rappresenta circa l'80% del costo totale del pacchetto.

Nel capitolo precedente vengono riportate le varie tipologie di batterie in funzione della diversa composizione chimica, in funzione di questa varieranno anche i rispettivi costi come riportato in Tabella 2.1

Tipo di batteria	Energia specifica [Wh/Kg]	Costo [\$/kWh]
Li-ion	250-300	190
Li-S	500-600	250-500
Li-O ₂	~ 1100	300-700
F-Ion	495	-

Tabella 2.1: Costo diverse specie di batterie (anno 2023) [17]

Come si può facilmente notare ad oggi le batterie economicamente vantaggiose sono le batterie a ioni di litio anche se con le prestazioni più basse rispetto ad altre tipologie di batterie. Si prevede, infatti, che queste verranno sostituite da batterie Li-S che con un piccolo incremento di costo riescono a raddoppiare le prestazioni seppur con una lieve diminuzione dell'efficienza di carica, aspetto fondamentale nella UAM. Sicuramente una futura implementazione di soluzioni valide per le batterie Li-O₂ porterebbe una grossa svolta nella mobilità aerea urbana grazie alle loro alte prestazioni a livello di energia specifica che in questo momento risultano essere la miglior prospettiva futura per questa tecnologia.

2.1.1 Parametri chiave delle batterie

Le prestazioni delle batterie influenzano notevolmente i parametri generali della mobilità aerea urbana come ad esempio la frequenza dei voli o la loro durata.

I parametri fondamentali relativi alle batterie di alimentazione per i velivoli eVTOL sono il tasso energetico specifico, il tasso di scarica e i cicli di vita. Questi parametri sono

legati tra di loro da relazioni non lineari complesse, di conseguenza impostare delle relazioni di tipo generale risulta essere molto complicato. Di seguito vengono brevemente illustrati i parametri prima elencati.

Energia specifica

L'energia specifica indica la massima energia immagazzinata per unità di massa:

$$e = E/m \quad (2.1)$$

Dove e rappresenta l'energia specifica, E è l'energia totale della batteria mentre m è la massa della batteria.

La Figura 2.2 indica i valori tipici dell'energia specifica in funzione della potenza specifica nel campo dell'UAM.

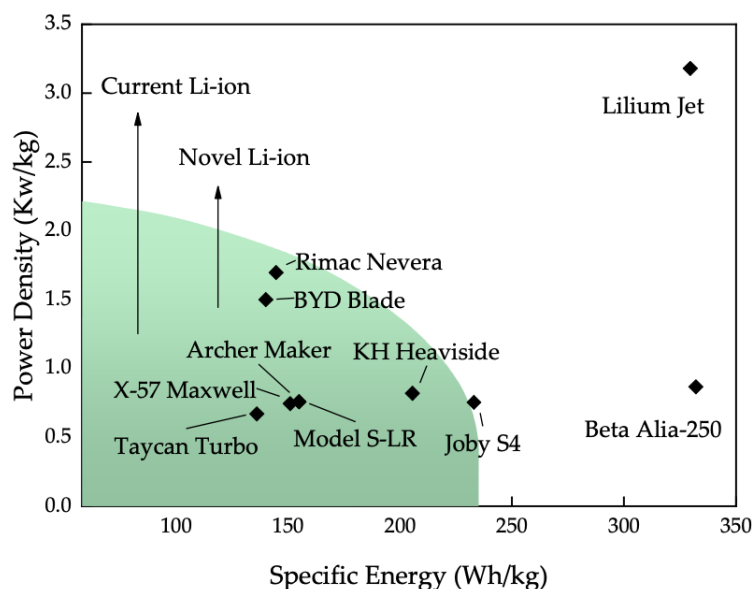


Figura 2.2: Energia specifica in funzione della potenza specifica tipica velivolo eVTOL [22]

I velivoli dell'UAM con efficienze aerodinamiche basse rispetto alle configurazioni ad ala fissa richiedono batterie con maggiore energia specifica.

Velocità di carica

La velocità di carica indica la velocità con cui una batteria viene ricaricata e viene definita come:

$$C_{charge} = 1/t \quad (2.2)$$

Dove C_{charge} è il tasso di carica mentre t rappresenta il tempo di carica in ore.

Nelle operazioni commerciali dell'UAM i velivoli eVTOL richiedono un rifornimento energetico durante i tipici 5-7 minuti di sosta. È necessario, dunque, andare a implementare il più possibile una ricarica rapida, tuttavia questo tipo di ricarica riduce i cicli di vita di

una batteria andando poi ad aumentare i costi operativi. Bisogna comunque ricordare che le attuali tecnologie di ricarica rapida riescono appena a soddisfare i requisiti della UAM.

Altri parametri

Tra i parametri fondamentali per la caratterizzazione di una batteria bisogna ricordare la velocità di scarica e i cicli di vita. I cicli di vita di una batteria indicano i cicli completi di carica/scarica che una batteria riesce ad effettuare prima che la sua capacità scenda al di sotto di un determinato livello, in generale quando una batteria scende sotto l'80% della sua capacità nominale

Gli attuali requisiti tecnologici indicano che i veicoli UAM devono utilizzare batterie con una maggiore energia a densità elevata. Queste batterie hanno un numero di cicli compreso tra 500 e 2000, a seconda del tipo di batteria.

Analogamente alla velocità di carica, la velocità di scarica è fondamentale in quanto è in grado di indicare la massima potenza in uscita dalla batteria che per i veicoli UAM è un parametro fondamentale soprattutto durante il volo verticale.

È possibile utilizzare il valore della velocità media di scarica per calcolare il costo di raffreddamento di una batteria che viene espressa come:

$$C_{discharge,avg} = \frac{E_{mission}}{E_{total}} T_{mission} \quad (2.3)$$

Dove $C_{discharge,avg}$ è la velocità di scarica media, E_{total} è l'energia totale della batteria mentre $T_{mission}$ è la durata totale della missione espressa in ore.

Profilo di volo

Una missione di tipo base viene illustrata in Figura 2.3 e consiste in una sequenza di fasi fondamentali: (A) decollo verticale, (B) transizione, (C) partenza, (D) salita, (E) crociera, (F) decelerazione, (G) avvicinamento, (H) transizione, (I) atterraggio verticale.

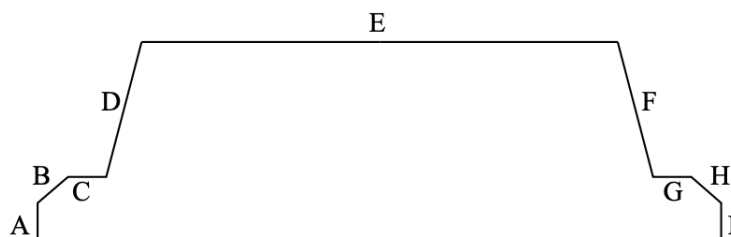


Figura 2.3: Profilo di volo tipico velivolo eVTOL [22]

I valori specifici per ogni fase sono elencati nella Tabella 2.2 dove V_{stall} è la velocità di stallo del velivolo mentre V_{cruise} è la velocità di crociera.

Fase	Velocità verticale [m/s]	Velocità orizzontale [m/s]	Altezza finale [m]
A	0-0.25	0	15
B	2.5	0-1.2 V_{stall}	91
C	0	1.2 V_{stall}	91
D	2.5	1.2 V_{stall} - V_{cruise}	457
E	0	V_{cruise}	457
F	2.5	V_{cruise} -1.2 V_{stall}	91
G	0	1.2 V_{stall}	91
H	2.5-1.5	1.2 V_{stall} - 0	15
I	1.5-0	0	0

Tabella 2.2: Valori fasi di volo velivoli eVTOL [22]

Il calcolo della potenza necessaria per ogni fase avviene tramite le seguenti correlazioni:

$$P_v = \left(\frac{fw}{FOM} \sqrt{\frac{fw/A}{2\rho}} + \frac{wV_{climb}}{2} \right) / \eta_{vertical} \quad (2.4)$$

$$P_c = (wV_{vertical} + \frac{wV}{L/D}) / \eta_{vertical} \quad (2.5)$$

Dove f è il fattore di disturbo dell'elica e della fusoliera nella modalità di volo verticale, w è il peso totale del velivolo, FOM (Figure Of Merit) è il rapporto tra la potenza ideale e quella effettiva dell'elica, A è l'area del disco dell'elica, V_{climb} è la velocità verticale di salita, $V_{vertical}$ è la componente verticale di velocità, ρ è la densità dell'aria, $\eta_{vertical}$ è l'efficienza del volo verticale, V è la velocità di volo, L/D è il rapporto portanza/resistenza, η_{cruise} è l'efficienza del volo in crociera, P_v è la potenza di volo verticale e P_c è la potenza di crociera.

Il volo di transizione presenta condizioni operative complesse e la potenza varia nel tempo. La potenza media del volo di transizione si può calcolare con le seguenti relazioni:

$$P_{tr,avg} = (P_v + P_{tr,eff})/2 \quad (2.6)$$

$$P_{tr,eff} = P_v/k \quad (2.7)$$

Dove k è il fattore di scalo della potenza cioè in rapporto tra la potenza finale e quella iniziale della transizione.

2.1.2 Previsione costo batterie

Analizzare gli sviluppi futuri delle batterie a livello di costi e tecnologie risulta essere di vitale importanza soprattutto in un campo che non è attualmente operativo ma che si vuole imporre nel panorama futuro della mobilità. Uno studio di Mauler et al. [21] effettua un'analisi andando ad analizzare 53 studi sulle previsioni dei costi delle batterie per poi andare a individuare quattro differenti metodi di previsione dei costi per il 2050.

I diversi criteri vengono di seguito analizzati:

- **Apprendimento tecnologico:**

Il modello di previsione costi tramite apprendimento tecnologico si basa sull'analisi della curva di apprendimento. Le riduzioni di costo si basano su ipotesi di apprendimento tecnologico, crescita dei volumi di produzione e attività brevettuale. Lo studio va ad identificare un parametro e ne calcola i ratei di apprendimento e si vanno a confrontare i risultati ottenuti con le aspettative future e attuali e se ne calcolano i costi.

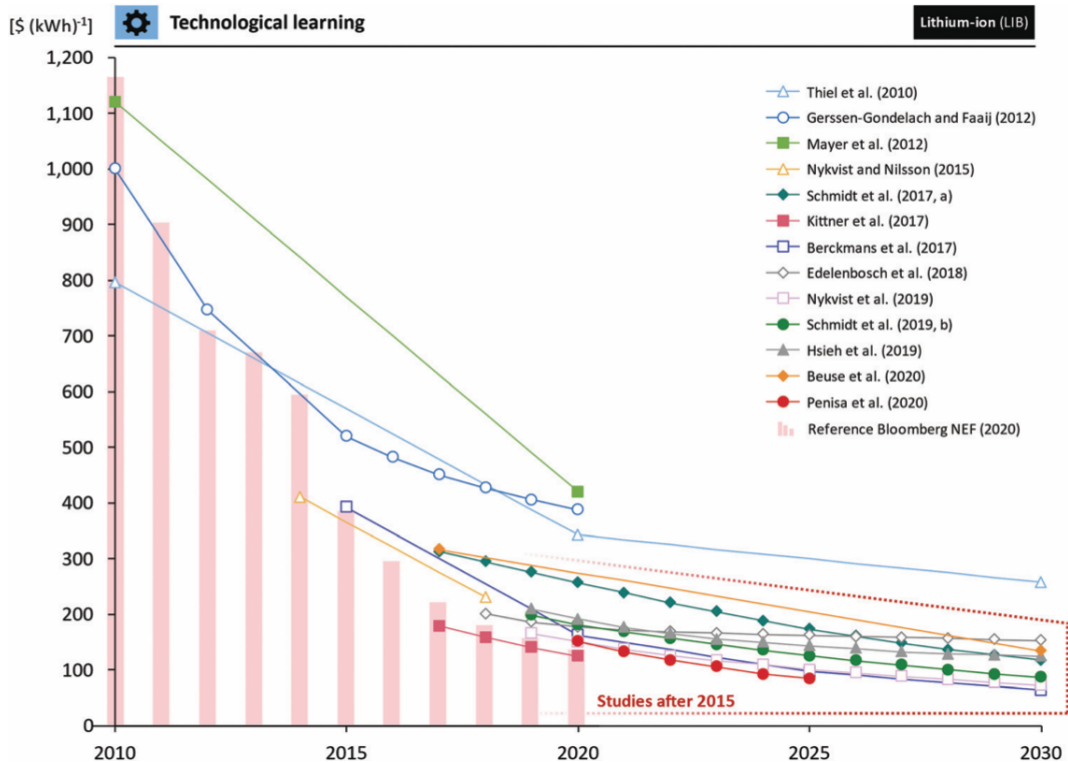


Figura 2.4: Previsione costi batterie Li-Ion tramite apprendimento tecnologico [21]

I risultati di questa analisi vengono riportati in Figura 2.4 in cui se si osserva l'andamento empirico dei valori dal 2010 al 2020 si può notare come nella prima metà del decennio si hanno forti riduzioni dei costi da 1.160 \$/kWh nel 2010 a 384 \$/kWh nel 2015. Un prezzo così alto iniziale è dovuto ai bassi volumi di produzione oltre alla variabilità dei processi di produzione trattandosi di nuove applicazioni tecnologiche. Nella seconda metà del decennio si ossercano riduzione più moderate fino ad un valore di 137 \$/kWh nel 2020. Secondo le stime per apprendimento tecnologico questo valore continuerà a diminuire fino ad arrivare ad un valore ottimista stimato di 63 \$/kWh per il 2030. Rispetto alle medie reali del settore i costi stimati le previsioni fino al 2020 risultano essere superiori rispetto a prezzi empirici osservati. L'approccio principale di questi studi prevedeva il mettere in relazione i valori previsti con un futuri fattori di apprendimento. Il valore previsto, a sua volta, è influenzato da tre

fattori principalmente che sono il tasso di apprendimento, il valore iniziale della serie temporale e il tasso di crescita previsto per il fattore di apprendimento.

- **Previsioni basate sulla letteratura:** Le previsioni basate sulla letteratura ricavano previsioni temporali sui prezzi delle batterie basandosi su fonti letterarie accademiche e non per poi venire successivamente combinate con medie specifiche nel tempo o intervalli di previsione.

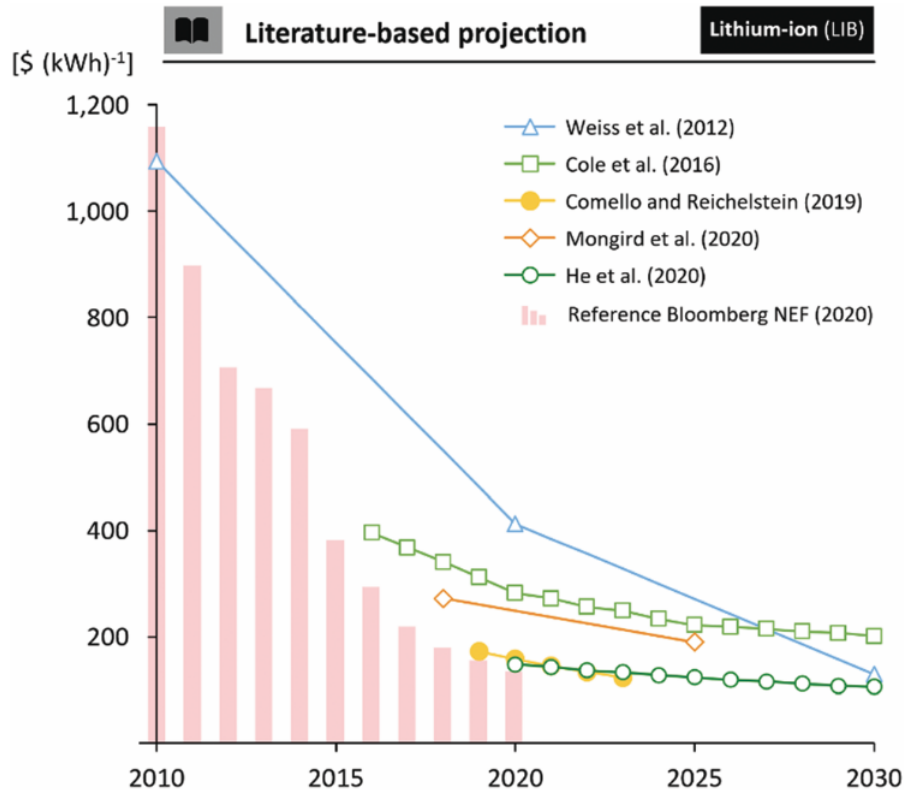


Figura 2.5: Previsione costi batterie Li-Ion tramite stime da letteratura [21]

In Figura 2.5 vengono illustrati i risultati di questo tipo di studio, analogamente con le previsioni tramite apprendimento tecnologico si può osservare una sottostima della velocità di riduzione dei costi delle batterie. In generale, comunque, tutti gli studi prevedono una diminuzione dei costi nel tempo, le differenze principali sono dovute ai diversi intervalli temporali di stima, il numero di fonti usate con il relativo anno di pubblicazione e il tipo di aggregazione di dati che viene impiegato. Le previsioni più recenti e ottimistiche stimano un costo delle batterie Li-Ion nel 2030 di circa 104 \$/kWh, un prezzo che risulta essere quasi il doppio rispetto a quello ottenuto da una stima per apprendimento tecnologico.

- **Parere degli esperti:**

Le stime di costo che vengono effettuate tramite parere degli esterni si avvalgono della consulenza di esperti del settore. I quesiti che vengono posti abbracciano vari livelli tecnologici come la produzione, i componenti o i prodotti sia a livello accademico che

a livello industriale. Il risultato di questo studio è riportato in Figura 2.6 e partono da un valore di 1170 \$/kWh nel 2013 fino ad una stima di circa 177 \$/kWh nel 2030. Le previsioni sono in linea con gli studi precedenti in quanto tutte prevedono un abbassamento dei prezzi delle batterie seppur con risultati variabili tra i vari studi. Gli esperti hanno espresso la loro difficoltà nell'andare a stimare l'andamento futuro dei prezzi a causa delle variazioni dei prezzi dei materiali, volume di produzione e evoluzione delle caratteristiche delle batterie.

Si può notare che gli esperti del mondo accademico sono più ottimisti rispetto a quelli dell'industria in quanto si aspettano miglioramenti incrementali nei materiali di composizione di anodo e catodo, nella progettazione delle celle e nella tecnologia dei pacchetti che porteranno una maggiore densità energetica a costi inferiori. Per il 2030, infatti, ci si aspetta miglioramenti nel campo dei materiali per quanto riguarda elettroliti solidi o per le sostanze chimiche a base di acqua. Nei processi di produzione, invece, ci si aspetta nuove tecniche produttive con un conseguente aumento della resa produttiva così come nuovi investimenti per la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie.

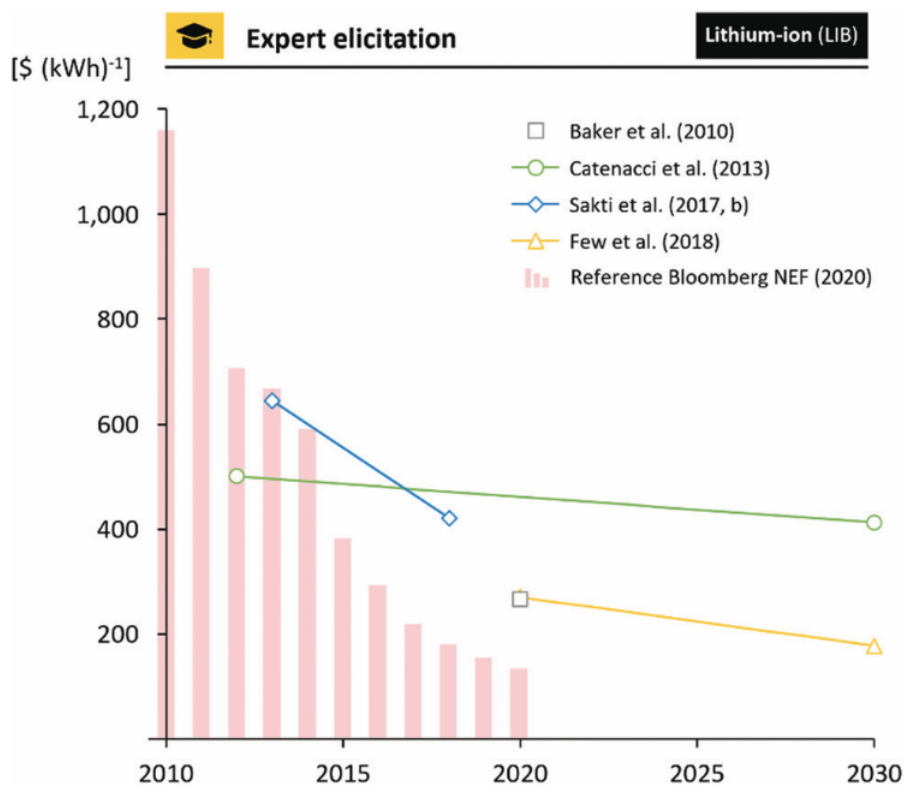


Figura 2.6: Previsione costi batterie Li-Ion secondo il parere degli esperti [21]

- **Modellazione bottom-up:**

L'analisi predittiva dei costi tramite metodo bottom-up si concentra sul tipo di tecnologia delle batterie. La batteria, infatti, viene scomposta nei suoi singoli componenti a cui vengono assegnati processi e risorse necessarie, alla fine viene effettuata una

somma che andrà ad indicare il prezzo finale. I costi stimati, di conseguenza, saranno combinazione di parametri che simulano i progressi a livello tecnologico dei singoli materiali e tecnologie. Per confrontare i valori relativi alle varie batterie ci si concentra sulla densità energetica che risulta essere un fattore importante sia per stimare i costi dei materiali si quelli relativi alla lavorazione questo perché se si aumenta la densità energetica si ottiene un rapporto migliorato tra materiali attivi e inattivi che di conseguenza porta una riduzione del consumo di energia e del costo specifico per i materiali inattivi. I prezzi dei materiali, inoltre, rappresentano dal 60 all' 80% del costo del pacco batterie. Le stime di costo delle batterie a litio varia in base alla tecnologia catodica che viene confrontata a livello di proprietà e ipotesi di prezzo e basa i risultati su un comune anodo di grafite.

Per quanto riguarda la tecnologia a ioni di lito il prezzo finale presenta molte variazioni in funzione del materiale scelto per il catodo. Le previsioni più ottimistiche calcolano un costo medio di 116 \$/kWh per le batterie Solid- state (SSB), 135 \$/kWh per le batterie Li-S e 104 \$/kWh per le Li-O₂. Il prezzo del materiale verrà poi influenzato dai vari processi di lavorazione e in funzione dell'ambiente in cui andrà ad operare.

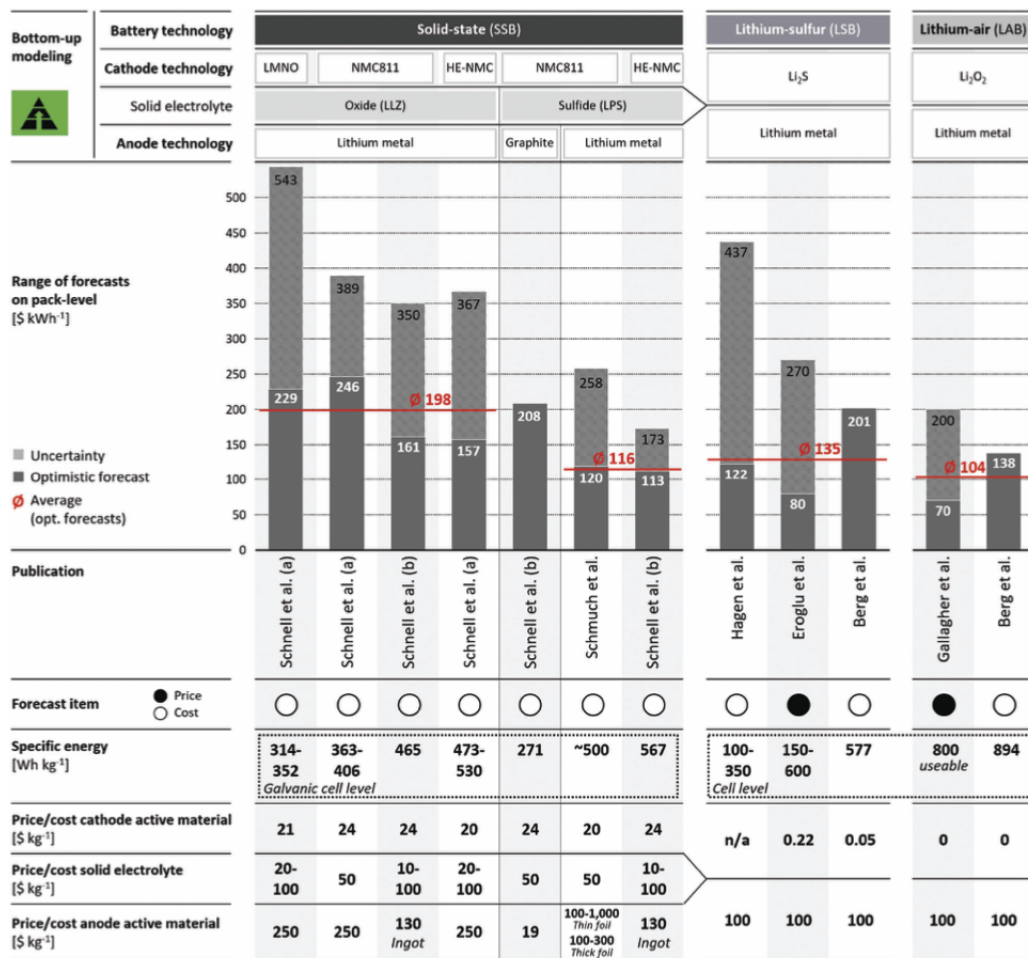


Figura 2.7: Previsione costi batterie tramite analisi bottom-up [21]

Nella Figura 2.7 vengono esaminate le varie specie di batterie tra cui quelle con elet-

trolita allo stato solido (SSB), le batterie Litio-Zolfo (LSB) e le batterie Litio-Ossigeno (Li_2O_2) le cui caratteristiche sono state analizzate nel capitolo precedente. Le batterie SSB vengono distinte in base al materiale che viene utilizzato come elettrolita e dall'analisi condotta si può notare che la soluzione migliore in funzione dell'energia specifica e del prezzo in $\$/\text{kWh}$ risiede nelle batterie allo stato solido con catodo metallico ed elettrolita in solfuro il cui costo medio è circa pari a 116 $\$/\text{kWh}$. Le batterie con una concentrazione di nichel più alta risultano avere qualità specifiche migliori e di conseguenza una più alta densità di energia ma sono tecnologie ancora troppo instabili dal punto di vista della stabilità termica e della durata del ciclo. Le batterie SSB polimeriche sono caratterizzate da elevata sicurezza e proprietà meccaniche favorevoli per il contatto tra elettrodi ed elettrolita solido ma allo stesso tempo presentano una bassa conduttività ionica a temperatura ambiente. Per l'ossido di questo tipo di batterie è stato stimato un valore medio di 198 $\$/\text{kWh}$. Attualmente, però, sia le batterie allo stato solido così come quelle a base zolfo o ossigeno non sono ancora passate al commercio su larga scala in quanto sono tecnologie ancora incerte.

Previsioni per il 2050

I vari studi di previsione di costi delle batterie a litio vengono uniti e si cerca di fare una stima dei costi delle batterie superando l'arco temporale del 2030 arrivando fino al 2050 come si può vedere nel grafico in Figura 2.8.

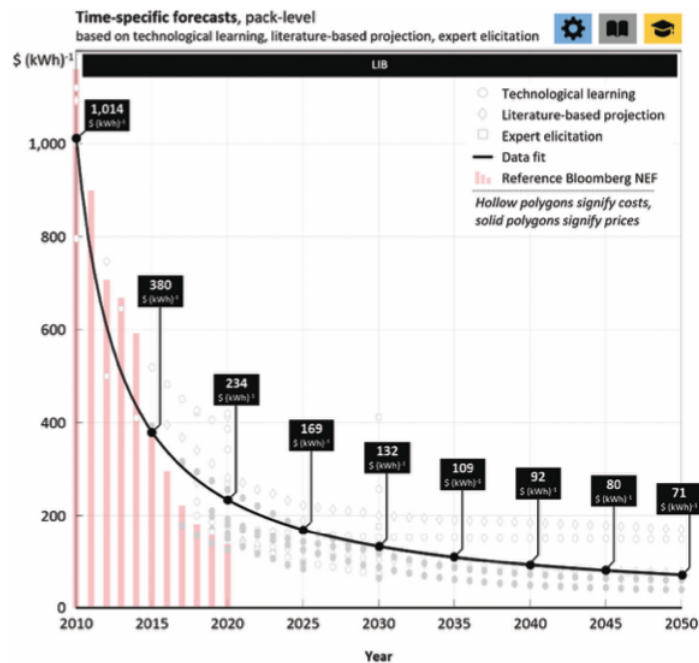


Figura 2.8: Previsione costi batterie per il 2050 [21]

Seguendo l'andamento di tutti gli studi anche in questo caso si prevede sempre una decrescita del prezzo delle batterie a litio, seppure in maniera sempre più lieve. La previsione del prezzo più ottimistico per il 2050 è di 71 $\$/\text{kWh}$. Alla luce di questi studi bisogna

sempre tener presente che le previsioni risulteranno sempre incerte in quanto i prezzi sono facilmente influenzabili dalle incertezze a livello tecnologico e di mercato .

2.1.3 Previsioni approvvigionamento litio

Il grande sviluppo della mobilità elettrica, sia terrestre che aerea, avrà un forte impatto sulla disponibilità delle risorse di litio attualmente accessibili. Si prevede, infatti, un'impennata di richieste di mezzi elettrici entro il 2030 con una simultanea sopraggiunta di carenza di litio e di conseguenza la crescita dell'offerta potrebbe non tenere il passo con quella della domanda. Si prevede, dunque, che le quotazioni del litio sono destinate a crescere nel tempo portando ad un aumento di prezzi su tutto il mercato della mobilità elettrica.

Una soluzione valida potrebbe risiedere nel sodio. Il sodio risulta essere più pesante e con meno carica elettrica immagazzinabile ma ha un costo minore e è molto più abbondante in natura. Le batterie contenenti sodio si caricano in maniera più rapida e hanno una durata maggiore. Sfortunatamente questi tipo di batterie è molto meno sviluppato a livello tecnologico, ad oggi, ma in un futuro queste sue caratteristiche potrebbero renderla un'alternativa talmente valida da investire sempre di più nella sua implementazione e ricerca .

2.2 Costo dell'energia elettrica

L'utilizzo della propulsione del tutto elettrica richiederà, ovviamente l'impiego di una grande quantità di energie elettrica in grado di ricaricare a terra le batterie che forniranno la potenza necessaria al volo. Il costo energetico viene calcolato dall'elettricità consumata dal veicolo UAM durante il volo. Tuttavia, nelle applicazioni pratiche, il consumo effettivo della rete elettrificata per la ricarica è superiore alla reale energia immagazzinata nella batteria a causa delle inefficienze delle apparecchiature. Pertanto, si presuppone un'efficienza di carica del 90% per tenere conto delle perdite di carica nella rete.

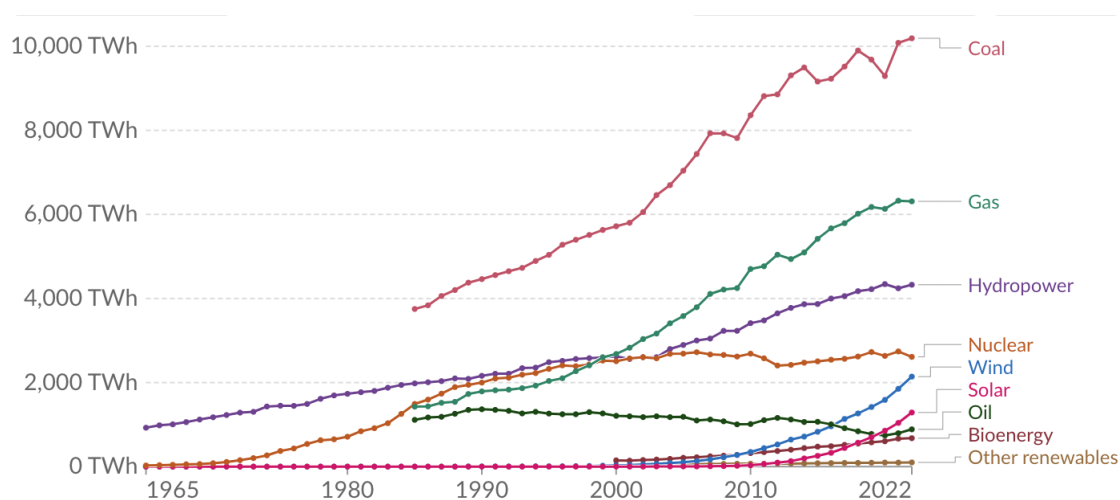


Figura 2.9: Produzione energia elettrica mondiale [23]

Inoltre, se si vuole che la mobilità aerea urbana si imponga come alternativa del tutto a impatto zero, sarà necessario garantire la richiesta di energia elettrica da fonti del tutto rinnovabili. Nella Figura 2.9 è possibile vedere le quote di produzione dell'energia elettrica globale in funzione della fonte energetica.

Dal grafico è facile notare che i combustibili fossili sono ad oggi la fonte energetica principale, allo stesso tempo risultano essere anche le più inquinanti. È possibile notare, inoltre, come dagli anni 2000 si è avvenuta una rapida ascesa delle fonti energetiche rinnovabili tra cui possiamo notare l'energia eolica e solare che risultano avere avuto la crescita maggiore affiancate sempre dall'energia idrica che ha da sempre un ruolo rilevante nel panorama della produzione energetica.

Dalla Tabella 2.3 viene illustrato come le quote di energie vengano distribuite in UE, USA e Asia in base alle varie fonti energetiche.

Fonte	UE	USA	Asia
Carburanti fossili	37%	60%	68%
Energie rinnovabili	39%	21%	26%
Nucleare	22%	18%	5%
Altro	2%	1%	1%

Tabella 2.3: Suddivisione fonti energetiche nel mondo [23]

Da questi dati si può intuire come l'Asia, così come gli Stati Uniti d'America, siano al primo posto nell'utilizzo dei carburanti fossili, sfruttando maggiormente carbone e metano. Nell'Unione Europea l'uso delle tecnologie rinnovabili risulta essere particolarmente avanzato con un impiego leggermente superiore rispetto alle risorse fossili.

Bisogna ricordare, però, che le nuove politiche nei principali mercati energetici stanno spingendo, grazie a continui investimenti annuali, verso un'energia sempre più pulita con un investimento di oltre 200 miliardi di dollari entro il 2030, investimento maggiore del 50% in più rispetto agli investimenti odierni [24]. Le energie rinnovabili sono un' enorme opportunità di crescita e occupazione oltre a portare beneficio in termini di emissioni nocive di inquinanti. L' Inflation Reduction Act degli Stati Uniti si impone un aumento annuale della capacità solare ed eolica che entro il 2030 crescerà di due volte e mezzo rispetto ai valori odierni. Nuovi obiettivi, come l'utilizzo sempre maggiore di macchine elettriche, continueranno a stimolare la diffusione di energie a impatto 0. Come conseguenza si prevede una diminuzione della domanda di gas naturale e petrolio di circa il 20% e di carbone di circa il 50% per l'UE. Per quanto riguarda l'Asia, in Giappone è stato avviato il programma Green Transformation (GX) con l'obiettivo di spostare il mercato energetico verso alternative sempre meno impattanti a livello di emissioni tra cui il nucleare, l'idrogeno.

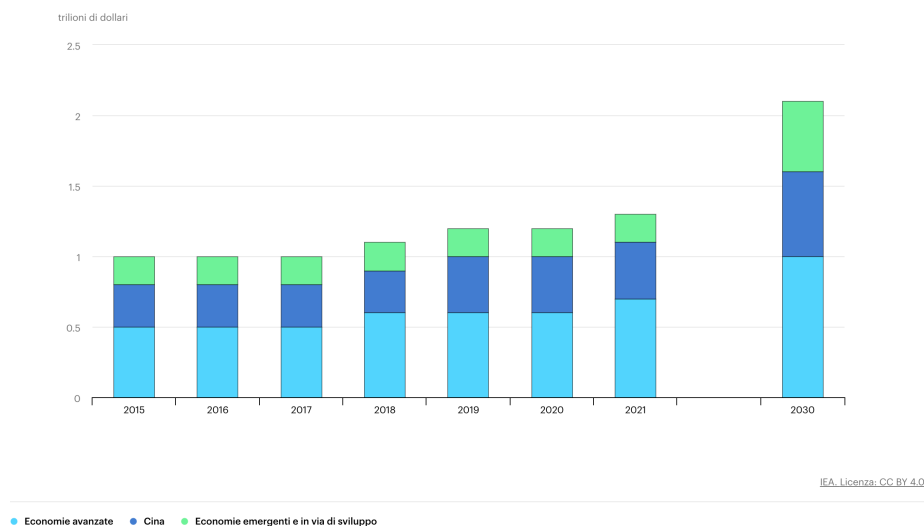


Figura 2.10: Investimenti in energia pulita nello scenario delle politiche dichiarate, 2015-2030 [24]

Nel tempo l'aumento di produzione di energia rinnovabile riuscirà a coprire la crescita della domanda nella produzione energetica, riducendo così sempre di più il contributo dei combustibili fossili all'energia elettrica. La spinta data dagli investimenti delle politiche e le prospettive economico/energetiche future faranno da carburante a uno sviluppo sempre più sostenuto delle energie rinnovabili. I paesi che daranno una maggiore spinta risultano essere India, Sud-Est asiatico, Africa e Medio Oriente. La Cina, con un consumo energetico altissimo e in costante aumento, rallenterà la sua crescita fino ad arrestarsi prima del 2030 spostandosi verso un'economia più incentrata sui servizi.

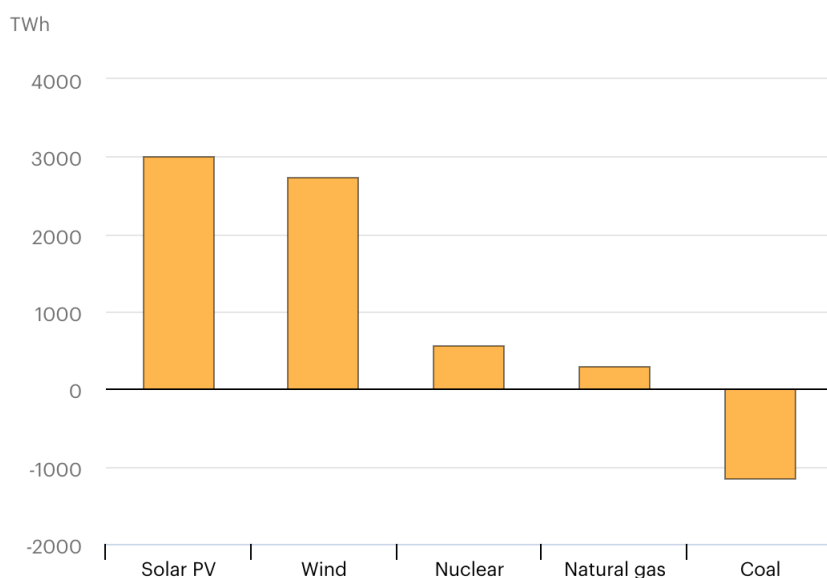


Figura 2.11: Cambiamento della produzione elettrica nello Scenario Politiche Dichiarate tra il 2021 e il 2030 [24]

Nello scenario STEPS (Stated Policies Scenario) che segue la traiettoria dettata dalle politiche attuali, l'uso del carbone diminuirà nei prossimi anni, la domanda di gas naturale raggiungerà un plateau entro la fine del decennio e l'aumento delle vendite di veicoli elettrici (EV) significherà che la domanda di petrolio andrà stabilizzandosi per poi diminuire sempre più. L'utilizzo di combustibili fossili diminuirà costantemente dalla metà degli anni 2020 in maniera costante fino a cessare del tutto.

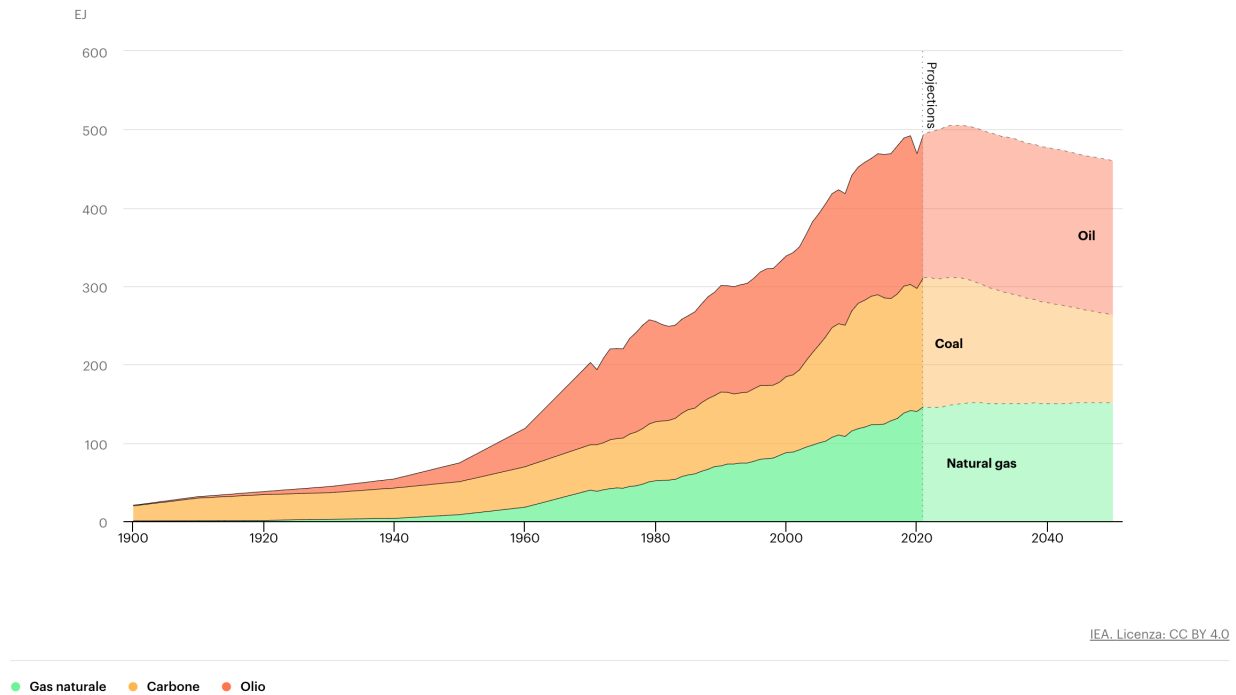


Figura 2.12: Domanda di combustibili fossili nello scenario delle politiche dichiarate, 1900-2050 [24]

La quota di energia legata ai combustibili fossili è intorno all'80% e mantiene questo valore da decenni. Secondo STEPS entro il 2030 si scenderà al di sotto del 70% per poi arrivare al 60% nel 2050. Si prevede che nel 2025 si raggiungerà il picco delle emissioni di CO₂ con circa 37 miliardi di tonnellate all'anno che scenderanno a 32 entro il 2050. Oltre allo scenario STEPS, vengono proposti altri due diversi scenari che sono l'APS e il NZE. L' Announced Pledges Scenario (APS) prevede che vengano rispettati tutti gli obiettivi imposti dai governi mentre il Net Zero Emission by 2050 Scenario (NZE) è uno scenario in cui si prendono in considerazione le tecnologie più avanzate per raggiungere l'obiettivo di un aumento di temperatura globale di solamente 1.5°C nel 2050. Tutti i vari scenari portano ad una progressiva diminuzione nell'utilizzo di fonti fossili con un conseguente impiego sempre maggiore di quelle rinnovabili. Si stima che nel 2050 considerando un aumento del fabbisogno energetico dal punto di vista dei trasporti sia aereo che terrestre con l'introduzione di velivoli di piccole dimensioni totalmente elettrici e di sistemi ibridi per quelli di taglia maggiore, si stima un fabbisogno energetico del settore di circa 470 TWh annui. Nel 2022 l'energia prodotta da fonti rinnovabili è stata circa di 8500 TWh circa il 5% della richiesta futura. Come detto in precedenza, però, l'impiego di risorse rinnovabili sarà

sempre crescente nei prossimi decenni e di conseguenza la domanda del mercato dei veicoli ibridi potrà essere facilmente soddisfatta dalla produzione mondiale di energia pulita.

2.2.1 Costi di approvvigionamento

Il costo e l'affidabilità di approvvigionamento energetico in un paese sono elementi chiave per la stima operativa dei costi per un tipo di mobilità del tutto elettrica. I prezzi dell'energia elettrica risultano essere variabili in funzione del paese che la eroga al contrario i combustibili fossili che mantengono un prezzo tendenzialmente uniforme per permettere lo scambio su vari mercati. Allo stesso tempo il costo dei combustibili va a influenzare in una certa misura il prezzo dell'elettricità.

La Commissione Europea ha proposto misure per coordinare gli sforzi di solidarietà, garantire l'approvvigionamento energetico, stabilizzare i livelli dei prezzi [25]. Allo stesso tempo dal 2019 sta mettendo un atto un aggiornamento completo del suo quadro di politica energetica per facilitare la transizione dai combustibili fossili verso un'energia più pulita per seguire le linee guida degli accordi di Parigi.

È stato imposto che ogni due anni verrà preparato un rapporto sui prezzi e sui costi dell'energia e del suo approvvigionamento. L'ultimo rapporto è stato pubblicato il 18 ottobre 2022 in cui vengono evidenziate le sfide che il settore energetico ha dovuto affrontare e i progressi compiuti sia nel breve che lungo termine.

Il prezzo finale dell'energia elettrica sarà influenzato quindi dal costo delle materie prime, dalle legislazioni o tassazioni del paese in cui viene erogata, dalle condizioni climatiche o da possibili eventi globali come guerre o pandemie. Tutte queste condizioni presentano un'eventuale variabilità dovuta al tempo e alla zona in analisi di conseguenza si è scelto di analizzare dei dati medi che aggiornati al 2023 sono:

- media mondiale costo energia elettrica ad uso domestico: 0.183 \$/kWh
- media mondiale costo energia elettrica ad uso non domestico 1.171 \$/kWh
- media costo energia elettrica Stati Uniti 0.125 \$/kWh
- media costo energia elettrica Unione Europea 0,22 \$/kWh

Date le numerose variabili che possono andare a influenzare il costo dell'energia elettrica risulta difficile riuscire a prevederne l'evoluzione nel tempo. Bisogna ricordare, inoltre, che nel mercato dell'energia elettrica il prezzo finale non dipende dalla fonte di energia iniziale, bensì quello più costoso regola tutto il mercato (Figura 2.13). Attualmente il prezzo più alto dell'energia elettrica è quella derivante da fonti fossili che blocca il prezzo dell'energia a un valore molto alto, se si riuscisse ad avere una transizione totale alle fonti rinnovabili l'intero mercato energetico ne gioverebbe con un abbassamento sostanziale dei prezzi.

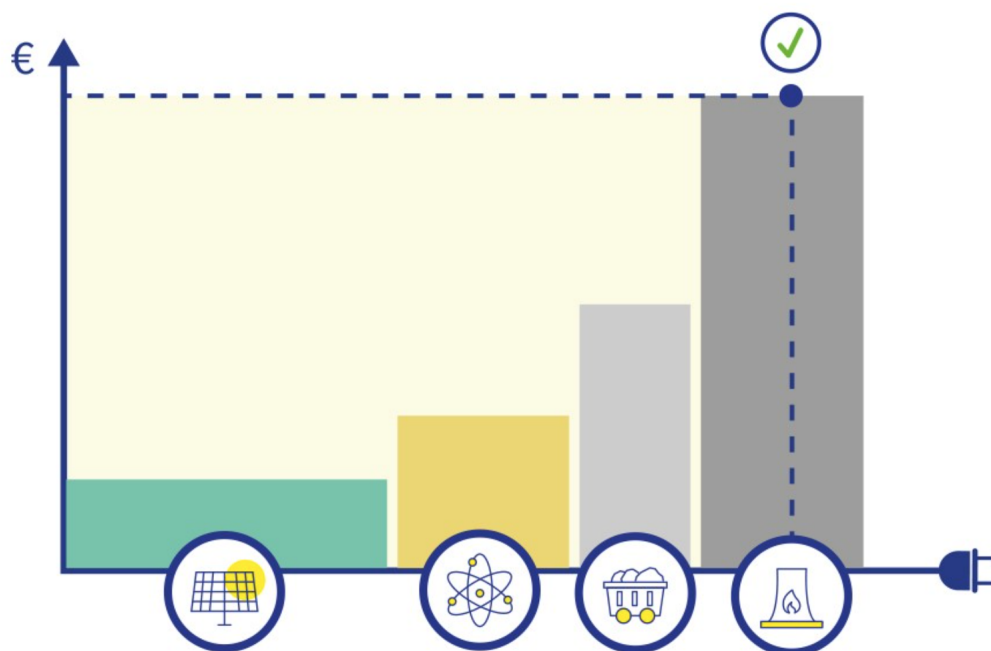


Figura 2.13: Ordine di merito nel prezzo dell'elettricità [26]

Seppur il costo dell'energia varia in funzione della fonte energetica, in tutti i casi risulta esserci una costante, il prezzo relativo al trasporto dell'energia elettrica. Questa voce di costo generalmente copre circa il 40% e si va ad aggiungere ai costi per la tassazione che variano in funzione del paese.

Per le analisi e considerazioni di questo studio verrà utilizzato il valore medio di costo dell'energia elettrica più aggiornato possibile.

Previsioni costi energia elettrica per il 2050

Il sistema energetico mondiale subirà forti cambiamenti nei prossimi decenni spronato da politiche sempre più improntate verso energie a impatto zero a causa del sempre più attuale cambiamento climatico. L'Europa, per ridurre drasticamente le importazioni di combustibili fossili e rendersi indipendente dalle importazioni, prevede uno scenario energetico futuro fortemente decentralizzato grazie all'uso delle energie rinnovabili. L'energia eolica e quella fotovoltaica, in particolare, ad oggi e soprattutto in futuro avranno un grande potenziale di crescita incentivato dal forte calo di costi. Entro il 2050 si prevede che queste tecnologie ricopriranno circa il 75% dell'offerta totale.

Come si può vedere in Figura 2.14 si prevede che nei prossimi anni il prezzo dell'energia continuerà a scendere fino a quando dal 2030 in poi l'aumento dei prezzi sull'emissione di CO₂ porterà ad un innalzamento dei prezzi dell'energia elettrica. L'aumento dei prezzi del gas porterà ad un aumento dei prezzi dell'energia elettrica tra il 2030 e il 2038 che con l'espansione degli impianti fotovoltaici causerà nuovamente una discesa dei prezzi già a partire dal 2040. Nella Figura 2.14 viene riportato il valore medio dei prezzi dell'energia in Europa mentre gli intervalli in rosso indicano le deviazioni tra i singoli Paesi dovute

principalmente dai prezzi delle materie prime che variano soprattutto in base a quanto un Paese presenta delle tecnologie rinnovabili più o meno avanzate.

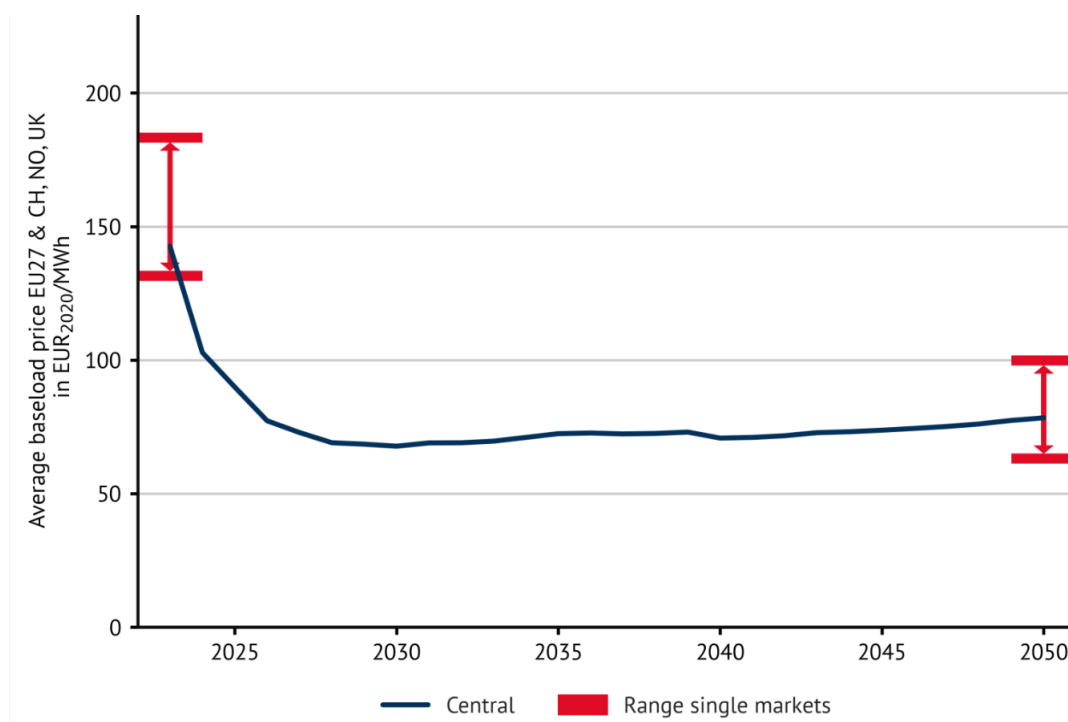


Figura 2.14: Previsione costo energia elettrica fino al 2050 [31]

2.3 Costo dell'idrogeno

L'idrogeno è una fonte energetica pulita, immagazzinabile, non inquinante e rinnovabile. Attualmente viene impiegata in diversi campi come edilizia, industria e trasporti. In natura l'idrogeno si trova combinato con altri elementi da cui deve essere separato per risultare utilizzabile singolarmente. Esistono vari metodi di produzione dell'idrogeno che variano in base alla forma originaria dell'idrogeno. Ad oggi i metodi più utilizzati per la produzione dell'idrogeno sono i reforming del metano a vapore e l'elettrolisi. Vengono identificati sette colori principali (verde, grigio, marrone o nero, blu, acqua, turchese, rosa, giallo e bianco) che differenzino l'idrogeno in base al metodo di produzione, alle risorse consumate e alla quantità di emissioni prodotte[27].

Tipi di idrogeno

- Idrogeno verde: viene detto "idrogeno pulito" in quanto è idrogeno prodotto tramite elettrolisi dell'acqua utilizzando fonti energetiche rinnovabili, di conseguenza non avviene alcuna emissione di CO2 durante tutto il processo. Ad oggi l'idrogeno verde copre solo una piccola percentuale dell'idrogeno totale ma risulta essere il più predisposto a sviluppi futuri grazie alla sua natura del tutto a impatto 0.

- **Idrogeno rosa** : l'idrogeno rosa viene prodotto tramite elettrolisi dell'acqua con energia proveniente da fonti nucleari. In Europa l'uso dell'energia nucleare non viene particolarmente promossa ma risulta essere un'alternativa valida per altre regioni come Russia e Cina.
- **Idrogeno giallo**: l'idrogeno giallo è prodotto sempre tramite elettrolisi dell'acqua utilizzando l'energia elettrica fornita dalla rete. In questo caso il quantitativo di emissioni di inquinanti dipende dalla fonte e dalla tecnologia principale in ogni determinato Paese.
- **Idrogeno grigio**: l'idrogeno grigio è un tipo di idrogeno realizzato tramite reforming del metano con il vapore. Attualmente è il tipo di idrogeno che viene maggiormente prodotto e viene tipicamente utilizzato nell'industria petrolchimica e per la produzione di ammoniaca. Il suo svantaggio principale risiede nel fatto che durante la produzione dell'idrogeno vengono emesse grandi quantità di CO₂ e di conseguenza risulta essere una tecnologia molto più impattante delle altre.
- **Idrogeno turchese**: anche questo tipo di idrogeno viene estratto dal metano tramite pirolisi. Nel processo di pirolisi è presente come sottoprodotto il carbonio solido che può essere ulteriormente utilizzato e risulta essere più facile da immagazzinare e, successivamente, può essere venduto anche per altre applicazioni.
- **Idrogeno nero**: idrogeno prodotto dal carbone, in particolare dal carbone bituminoso, è il metodo di produzione di idrogeno più inquinante in assoluto, in quanto crea un quantitativo di CO₂ pari a quella prodotta dalla combustione del combustibile originale. Viene largamente utilizzato in paesi come la Cina dove le riserve di carbone sono abbondanti.
- **Idrogeno marrone**: idrogeno del tutto simile all'idrogeno nero con la sola differenza che la fonte fossile iniziale è la lignite.
- **Idrogeno blu**: tipo di idrogeno a basso contenuto di carbonio che viene prodotto da combustibili fossili ma con il sistema CCUS (Carbon Capture Utilisation and Storage) per evitare le emissioni di CO₂. Attualmente l'idrogeno blu ha costi inferiori rispetto all'idrogeno verde e viene ugualmente classificato come idrogeno a 0 emissioni.

Valutazione economica dell'idrogeno

- **Costo idrogeno verde**: il costo dell'idrogeno verde è influenzato da diversi fattori tra cui troviamo il costo dell'elettrolisi che attualmente ha costi di produzione elevati con grandi fabbisogni energetici oltre ad avere una capacità globale limitata. Il costo operativo principale è quello relativo all'energia elettrica che alimenta la reazione, in futuro lo sviluppo delle tecnologie e un sempre maggior impiego delle fonti rinnovabili renderà l'idrogeno verde sempre più diffuso.

- Costo idrogeno rosa: i costi dell'idrogeno rosa sono simili a quelli dell'idrogeno verde in quanto anche in questo caso l'idrogeno viene estratto tramite elettrolisi dell'acqua. A variare è il costo dell'elettricità in quanto per l'idrogeno rosa viene sfruttata l'energia nucleare che risulta essere più economica rispetto l'energia prodotta da fonti rinnovabili di conseguenza anche il costo finale dell'idrogeno sarà minore.
- Costo idrogeno giallo: anche in questo caso la procedura utilizzata per calcolare i costi risulta essere simile a quella dell'idrogeno verde in quanto si sfrutta nuovamente la stessa tecnologia. In questo caso però, l'energia elettrica utilizzata è quella della rete che risulta essere un mix di energie provenienti da diverse fonti rinnovabili e non in funzione delle politiche di ogni singolo Paese.
- Costo idrogeno grigio/nero/marrone: il costo di queste varie tipologie di idrogeno dipendono principalmente dal prezzo del carbone (carbone bituminoso/lignina) o dal prezzo del metano. Attualmente è l'idrogeno con il costo minore, di conseguenza risulta essere il più diffuso, ma allo stesso tempo è uno dei più inquinanti. Ad oggi risultano essere le tecnologie più sviluppate e largamente utilizzate.
- Costo idrogeno turchese: l'idrogeno turchese è vantaggioso a livello di costi in quanto viene prodotto tramite pirolisi del metano che è un grado di consumare fino a un settimo dell'energia necessaria alla produzione di idrogeno tramite elettrolisi dell'acqua. I costi di conseguenza saranno in funzione del costo del gas metano e dell'energia per produrlo. Ad oggi non esistono ancora strutture adibite alla produzione commerciale dell'idrogeno turchese.
- Costo idrogeno blu: il costo dell'idrogeno blu è simile ai relativi all'idrogeno grigio/-nero/marrone che sono fortemente legati al costo iniziale dei combustibili fossili con l'aggiunta del costo relativo alla cattura, riutilizzo e stoccaggio della CO₂ (CCS) per evitarne il rilascio in atmosfera. Attualmente però la tecnologia del CCS è ancora acerba con costi elevati e bassa efficienza di cattura, ma con il progredire delle tecnologie a disposizione, l'idrogeno blu potrebbe rappresentare un'ottima alternativa nella transizione energetica.

Nella Tabella 2.4 vengono raggruppate le varie tipologie di idrogeno con il relativo costo e rapporto tra le emissioni di CO₂ e il quantitativo idrogeno generato.

Analizzando i dati in tabella si può subito notare che le tipologie di idrogeno più economiche sono quelle relative all'idrogeno prodotto da fonti fossili come l'idrogeno nero/marrone/grigio che allo stesso tempo risultano anche essere i più inquinanti a livello di CO₂ prodotta. L'idrogeno turchese ha un costo ipotizzato abbastanza contenuto anche se è una tecnologia che ha ancora bisogno di svilupparsi completamente per poter discutere con più certezza i suoi risultati. I metodi di estrazione dell'idrogeno che sfruttano l'elettrolisi dell'acqua presentano dei prezzi più alti, questa tecnologia ha bisogno di ulteriori migliorie per risultare competitiva sul mercato dell'idrogeno.

Tipo di idrogeno	\$/kg _{H2}	kgCO ₂ / kg _{H2}
Idrogeno verde	2.28-7.39	0
Idrogeno rosa	2.18-5.92	0
Idrogeno turchese	2	-
Idrogeno blu	0.99-2.05	1-2
Idrogeno grigio	0.67-1.31	8.5
Idrogeno nero	1.2-2	20
Idrogeno marrone	1.2-2	20

Tabella 2.4: Costo e impatto ambientale vari tipi di idrogeno

L'interesse verso l'idrogeno risulta essere sempre più crescente anche perché si prevede che nel 2050 l'idrogeno possa contribuire per oltre il 20% alla riduzione annuale delle emissioni globali [28]. Questo lo si può capire dal fatto che sono stati annunciati 684 progetti in tutto il mondo con un investimento totale di 240 milioni di dollari.

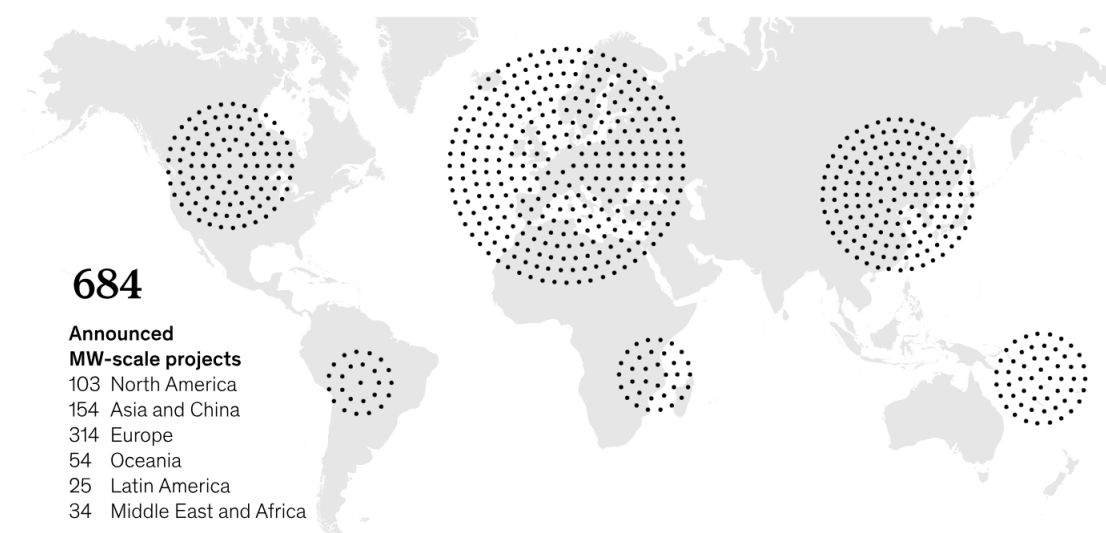


Figura 2.15: Progetti annunciati relativi all'utilizzo di idrogeno su larga scala [28]

I progetti includono applicazioni dedicate alla produzione, l'utilizzo a livello industriale e l'impiego per trasporti e infrastrutture. L'idrogeno, infatti, risulterà vitale nel processo di decarbonizzazione su scala mondiale.

Ad oggi, la maggior parte della produzione di idrogeno avviene dalla trasformazione di combustibili fossili, di conseguenza, per rendere realmente efficace il processo di decarbonizzazione sarà necessario un incremento notevole dell'idrogeno pulito (idrogeno verde/blu). Si stima, infatti, che nel 2050 la domanda di idrogeno pulito sarà pari a 660 milioni di tonnellate all'anno. Con un costo finale di produzione di circa 2 \$/kg, l'idrogeno pulito potrebbe imporsi nel mercato in maniera competitiva per numerose applicazioni.

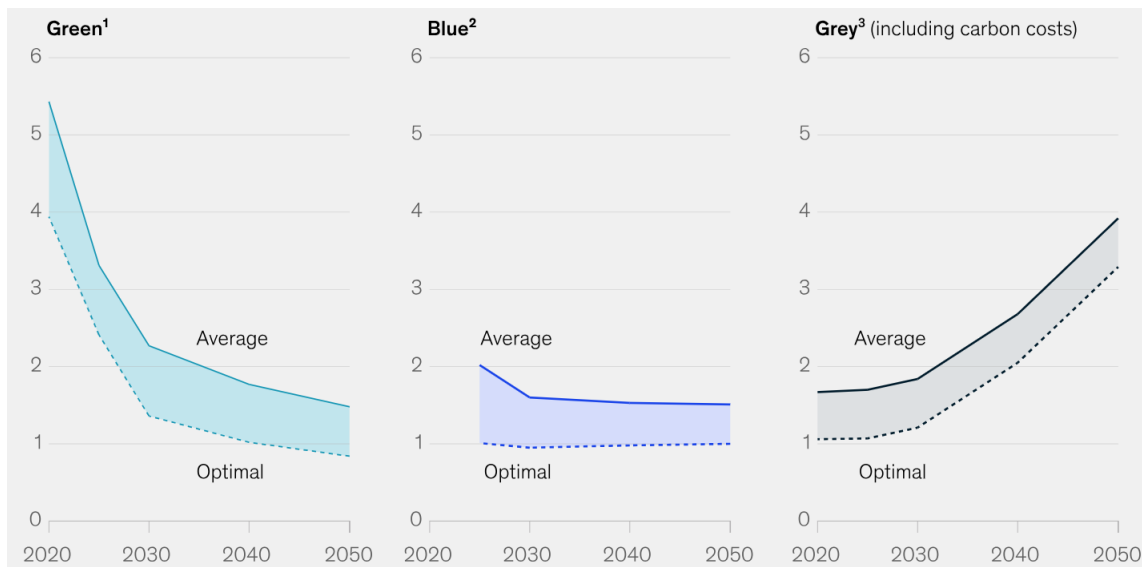


Figura 2.16: Previsione sui costi dell'idrogeno verde/blu/grigio [28]

Come si può vedere della Figura 2.16 ci sia aspetta per il 2035 un cambio di tendenze in cui le opzioni a zero emissioni che risulteranno essere più convenienti rispetto all'idrogeno proveniente da fonti fossili, tutto questo se i Paesi manterranno gli impegni presi circa la tassazione sempre più progressiva della CO₂.

Bisogna tenere sempre a mente che uno sviluppo e un utilizzo sempre maggiore dell'idrogeno porta con se numerose sfide tecnologiche ancora da affrontare che risultano essere necessarie per una diffusione generale:

- Rinnovare le infrastrutture in modo tale da pianificare la presenza di stazioni di rifornimento e stoccaggio di idrogeno liquido per il settore dei trasporti aerei, prevedendo un'eventuale presenza limitrofa di gasdotti o impianti di liquefazione.
- Necessità di portare e mantenere l'idrogeno liquido a una temperatura inferiore a -253°C.
- riconfigurare i serbatoi tradizionali dei velivoli con nuove Tecnologie criogeniche che avranno bisogno di volumi maggiori.
- Certificare tutte le nuove tecnologie introdotte in modo tale da mantenere gli alti standard di sicurezza aeronautica.

2.4 Costo vertiporti

Come è stato descritto nel capitolo precedente la realizzazione e l'integrazione dei vertiporti nell'ecosistema dei trasporti nelle città risulta essere vitale alla riuscita ottimale della mobilità aerea urbana.

Per offrire un servizio del tutto completo, quindi, i velivoli eVTOL hanno bisogno di uno spazio dedicato in cui poter decollare, atterrare, fare manutenzione, effettuare rifornimento

e sostare. Nello stimare i costi di questi servizi bisogna sempre tenere presente che i flussi di traffico da e per i vertiporti generalmente sono distribuiti in maniera non uniforme e confusionaria.

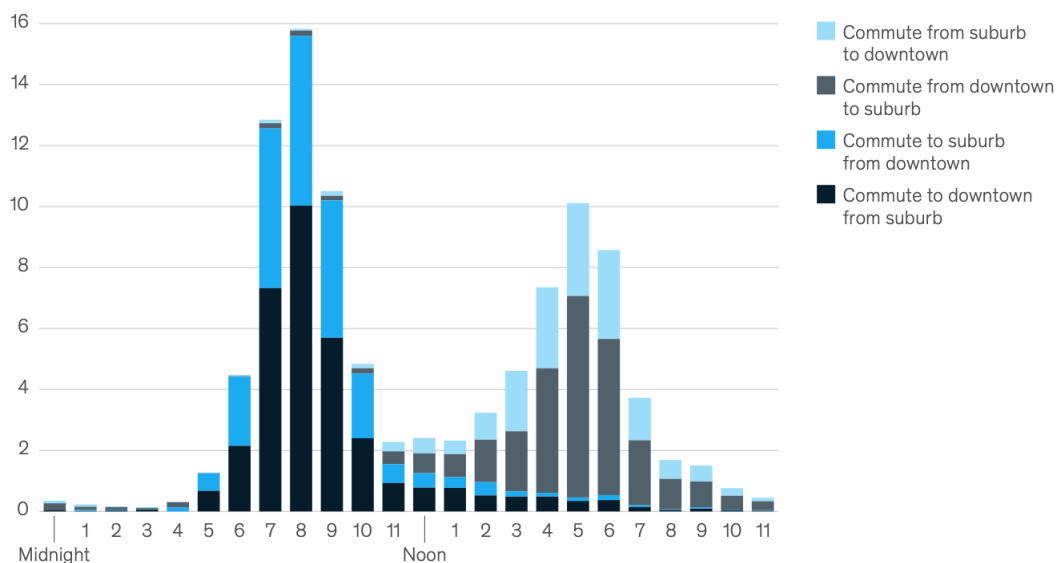


Figura 2.17: Schemi di traffico giornalieri per ora del giorno Seattle [29]

Come si vede in Figura 2.17 una città grande come Seattle si può notare una concentrazione degli spostamenti negli orari che vanno dalle 07.00 alle 12.00 e dall 15.00 alle 17.00. I vertiporti, di conseguenza, devono essere in grado di supportare il traffico dei velivoli sia nelle ore di punta sia essere in grado di accogliere tutti i velivoli nelle ore con poco traffico. Sarà necessario decidere se dimensionare le infrastrutture in funzione del massimo del traffico o seguendo un parametro "medio" per non eccedere in spese dovute al trasporto dei velivoli dai parcheggi ai siti attivi.

L'infrastruttura di terra è uno dei fattori maggiormente influenti nel determinare il mercato del trasporto aereo urbano in quanti gli unici tragitti possibili sono quelli tra un vertiporto e l'altro, di conseguenza il numero di combinazioni possibili di viaggio così come le tempistiche dipendono quasi esclusivamente dalla densità delle strutture di terra.

Nel capitolo precedente sono stati illustrati i vari tipi di infrastrutture di terra, ora si va ad analizzare le stime economiche di tali servizi.

- **Vertihub** : Si tratta delle strutture di maggiori dimensioni del tutto autonome posizionate in centri strategici con un alto tasso di traffico. Si prevede l'installazione di circa 10 aree adibite al decollo e atterraggio dei velivoli in maniera attiva con l'aggiunta di circa 20 ulteriori aree dedicate alla sosta e alla manutenzione. Oltre alle aree dedicate ai velivoli si ipotizza anche zone dedicate alla vendita al dettaglio o servizi di assistenza passeggeri.

Si stima che la costruzione di un impianto del genere abbia un costo che va dai 6 ai 7 milioni di dollari a cui vanno aggiunti i costi di gestione annui che possono andare da 15 a 17 milioni di dollari.

- **Vertibase** : Le vertibase sono strutture di medie dimensioni che possono essere sia di nuova costruzione sia ottenute dall’ammodernamento e riadattamento di strutture esistenti come parcheggi o tetti di edifici. Vengono installate in zone di medio traffico come i principali luoghi di lavoro o di vendita al dettaglio. Si ipotizzano circa 3 spazi dedicati al decollo e all’atterraggio attivi con ulteriori sei spazi dedicati alla sosta o alla manutenzione dei velivoli.

Si stima un costo che va dai 500.000 ai 800.000 dollari per la loro costruzione con l’aggiunta annua che va dai 3 ai 5 milioni di dollari per le spese operative di funzionamento.

- **Vertipad** : I vertipad sono le strutture più piccole dedicate alle semplici operazioni di base per un numero ristretto di velivoli. Anche in questo caso potrebbero essere strutture di nuova costruzione o riadattamenti di siti già esistenti in cui si prevede la presenza di un’area per il decollo e l’atterraggio più circa due zone per la sosta e la manutenzione del velivolo.

Si stima un costo per la costruzione che va dai 200.000 ai 400.000 dollari a cui bisogna aggiungere una spesa che va dai 600.000 ai 900.000 annui per i costi di funzionamento.

Potential archetypes for urban-air-mobility infrastructure, illustrative

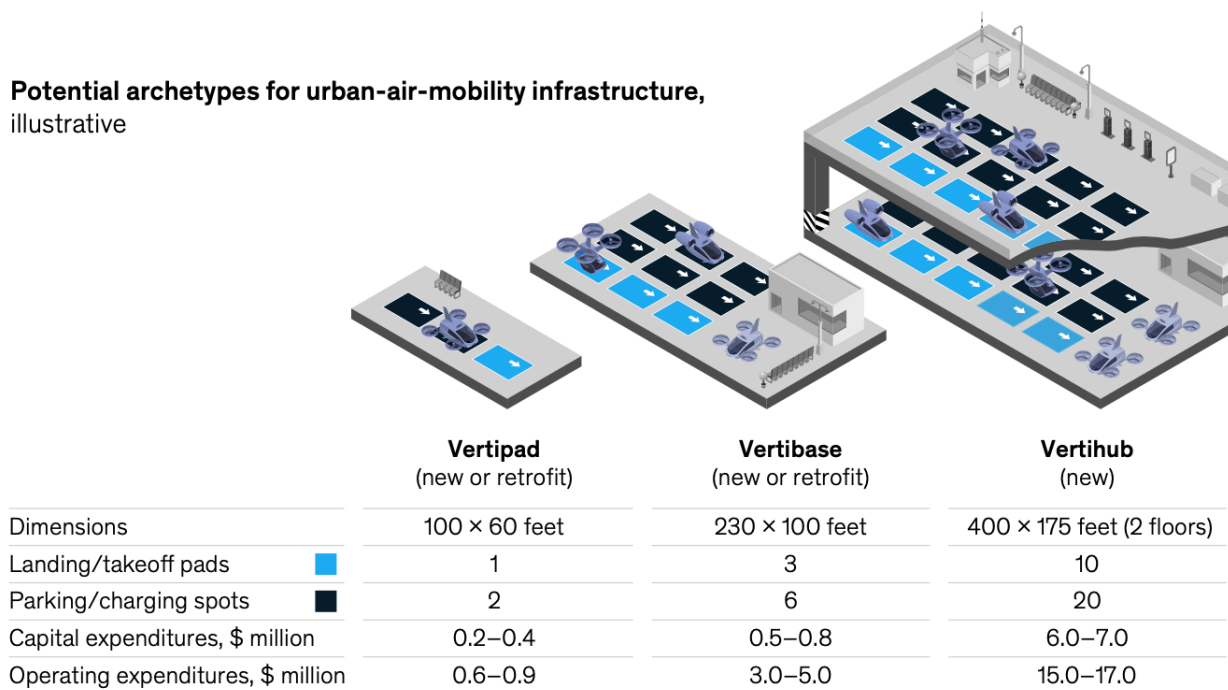


Figura 2.18: Potenziali archetipi per le infrastrutture per UAM [29]

In ogni città si ipotizza un mix dei vari tipi di infrastrutture per coprire e soddisfare i bisogni del traffico aereo urbano. In particolare sono state ipotizzate due tipi di reti principali: una per grandi città densamente popolate e una seconda per città di medie dimensioni con la presenza di quartieri sia urbani che suburbani.

- **Città grandi:** Per le città di grandi dimensioni si prevedono dalle 85 alle 100 piattaforme di decollo e atterraggio così distribuite:

- vertihub: situati negli aeroporti principali e nei maggiori centri di pendolarismo delle città.
- vertibase: dalle 10 alle 15 piattaforme nei principali luoghi di partenza/arrivo
- vertipad: da 5 a 10 vertibase in aree di interesse mirato o ad uso privato

Una rete di infrastrutture di queste dimensioni avrebbe un costo complessivo che va dai 35 ai 45 milioni di dollari a cui bisogna aggiungere una spesa che va dai 110 ai 130 milioni di dollari per le spese operative di funzionamento.

- **Città medie:** Per le città con dimensioni medie si prevede la costruzione da 38 a 65 piattaforme per il decollo e l'atterraggio dei velivolo eVTOL suddivise in:

- vertihub: uno situato nell'aeroporto principale e 1/2 nei maggiori centri delle città.
- vertibase: dalle 5 alle 10 piattaforme nei principali centri di lavoro e distretti commerciali
- vertipad: da 3 a 5 vertibase nella periferia o stazioni pendolari

La costruzione di una tale rete di infrastrutture costerebbe tra i 15 e i 20 milioni di dollari con l'aggiunta di una spesa che va dai 35 ai 50 milioni di dollari annui per le spese relative al funzionamento.

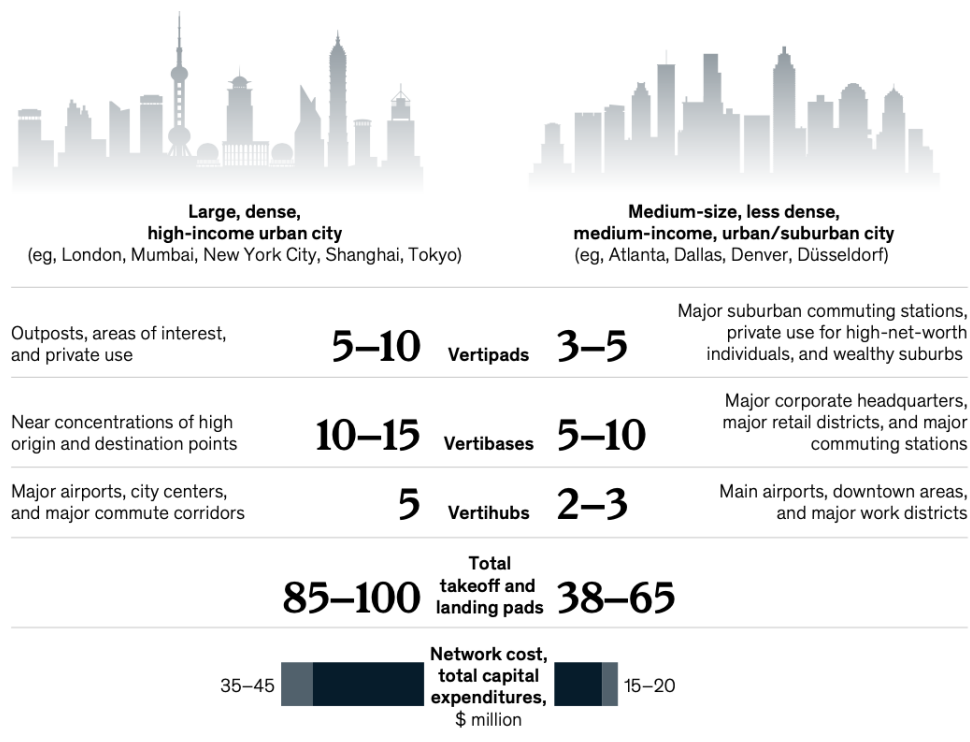


Figura 2.19: Specifiche della rete in base alle dimensioni delle città [29]

Valutazione economica vertiporti

Il costo legato all'impiego dei vertiporti è di vitale importanza per capire la fattibilità di infrastrutture terrestri con un notevole investimento economico, di seguito 4 studi che valutano gli aspetti economici associati all'utilizzo della rete di UAM.

- Pareggio economico con un mercato piccolo di categoria alta: in questo caso si ipotizza di fornire un servizio limitato ad una fetta di mercato premium con una spesa per le infrastrutture di circa 150 \$ per viaggio (esclusi i costi di ricarica/rifornimento). Analizzando questo tipo di scenario i fornitori di UAM raggiungerebbero il pareggio sui costi fissi nel caso in cui si verificano i seguenti scenari:
 - Città grandi e densamente popolate: si prevedono circa 2000 viaggi al giorno con una media di circa un volo ogni 60 minuti che aumenterebbe a un volo ogni 20 minuti nelle ore di punta.
 - Città di medie dimensioni: si ipotizzano circa 750 viaggi giornalieri distribuiti mediamente uno ogni 100 minuti che durante gli orari di punta diventerebbe uno ogni 30 minuti.

Con i prezzi elencati in precedenza e la frequenza dei viaggi descritta si arriverebbe ad una tariffa passeggeri che va dai 50\$ ai 75\$ a seconda del numero di passeggeri per viaggio. Una tariffa del genere è pienamente in linea con i costi attuali dei voli di breve durata in elicottero o viaggi premium in auto. Di conseguenza si può ipotizzare una buona riuscita dell'UAM in questo tipo di mercato.

- Tempi di spostamento rapidi per ottenere costi di viaggio bassi: è necessario garantire tempi di trasporto molto rapidi per permettere alle tariffe passeggero di arrivare a costi molto economici fino a 25\$ viaggio per persona. Per raggiungere una cifra del genere è necessario garantire un numero di viaggi giornalieri pari 10.000 in una grande città e 3.500 in una città di medie dimensioni. In generale si dovrebbe arrivare in media ad un viaggio ogni 5 minuti per singola piattaforma all'interno della rete. Oltre ad essere una sfida in termini di mercato risulta essere una sfida anche a livello logistico in quanto nel lasso di tempo che trascorre tra un volo e il successivo sarà necessario effettuare l'atterraggio, lo sbarco e l'imbarco dei passeggeri, il trasferimento dei bagagli, la ricarica o sostituzione delle batterie e la preparazione al decollo.
- Ritorno del capitale investito escludendo costi di ricarica e rifornimento: come si è visto in precedenza è possibile coprire i costi operativi grazie agli oneri di atterraggio e decollo ma i costi relativi alla costruzione e messa in opera della rete UAM risultano essere un grosso investimento. La realizzazione dei vertiporti così come le attrezzature per la manutenzione, illuminazione e altro potrebbero arrivare a costare tra i 15 e i 45 milioni di dollari. In questo caso si ipotizza che una volta messo in opera il vertiporto il traffico da e verso l'infrastruttura cresca nell'arco dei 5 anni successivi, coloro che forniscono tale servizio potrebbero addebitare un margine che va dal 15 al 20% sulle

tasse di sbarco per ottenere un adeguato ritorno sul loro investimento di capitale. Tali percentuali potrebbero con il tempo diminuire con l'aumento del traffico passeggeri.

- Influenza del costo di ricarica: come si è detto in precedenza i velivoli eVTOL vengono alimentati esclusivamente a batterie o tramite celle a combustione. Le infrastrutture UAM dovrebbero dotarsi di stazioni di ricarica super veloci che ad oggi sono ancora in via sperimentale, oltre a dover pagare le utenze dell'energia prelevata che potrebbero portare a far costare l'infrastruttura di ricarica circa il 65/75% della spesa totale del capitale, con l'elettricità che ricopre circa il 30/35% delle spese operative annuali stimate.

Sommario

Dalla seguente analisi si può concludere che l'esito desiderato delle infrastrutture UAM e cioè la capacità di evolversi e supportare la realtà dell'UAM è legato ai seguenti fattori fondamentali:

- Fonti di entrate accessorie: gli operatori delle infrastrutture di terra per la UAM potrebbero sfruttare fonti di entrata accessorie non legate all'aviazione (vendita al dettaglio, servizi al cliente o tariffe di integrazione) in particolare nei primi periodi in cui è necessario un grosso investimento iniziale con profitti futuri.
- Investimenti da parte di privati o aziende: potrebbe risultare utile aprire le porte degli investimenti a aziende esterne o privati in grado di contribuire a sostenere il mercato iniziale.
- Sovvenzioni da parte del settore pubblico: proporre la mobilità aerea urbana a settore pubblico dei trasporti per migliorare il benessere della popolazione e del turismo con relativi investimenti da parte delle amministrazioni.
- Progetti iniziali su piccola scala e di riadattamento: prima di partire con grosse infrastrutture particolarmente dispendiose bisognerebbe incoraggiare viaggi che utilizzano piattaforme già esistenti (come eliporti) o intraprendere progetti su piccola scala. Bisognerebbe, inoltre, concentrarsi su rotte molto trafficate da un pubblico con una maggiore disponibilità nel pagare. Con il crescere del mercato e della domanda si potrebbe iniziare a pensare a infrastrutture più grandi per un'offerta maggiore.
- Soluzioni modulari per le infrastrutture: Oltre al voler riadattare eliporti esistenti si deve orientare la produzione verso soluzioni modulari in grado di convertire velocemente un qualsiasi spazio in un vertipad come ad esempio i tetti di garage o edifici.

2.5 Costi antenne 5G

La tecnologia 5G, come analizzato in precedenza, risulta essere indispensabile al corretto funzionamento dell'UAM. La rete 5G richiede l'implementazione di infrastrutture avanzate per supportare la trasmissione ad alta velocità di dati e la connettività ultra - affidabile. Tra gli elementi chiave di questa infrastruttura, le antenne 5G giocano un ruolo centrale, garantendo la copertura efficiente e la capacità di trasmissione richieste dalla nuova generazione di reti mobili.

Dal punto di vista economico la costruzione di un' antenna 4G risulta essere molto più economica rispetto ad un' antenna 5G, infatti, una stazione base 4G ha un costo che può variare dai 12.000 ai 15.000 dollari mentre per una stazione 5G nella media si prevede un costo di circa 20.000 dollari. Tutto questo si traduce in una differenza che va dagli 8.000 ai 10.00 dollari per passare da una stazione base 4G ad una equivalente 5G. La differenza di costo sta nel fatto che la rete 5G è in grado di fornire una velocità in Gigabyte che porta con se una maggiore complessità nella costruzione. È facilmente ipotizzabile, inoltre, che con il tempo i costi relativi alla costruzione di un'infrastruttura 5G diminuiscano con il tempo grazie ad un miglioramento delle tecnologie in quanto ad oggi ci troviamo ancora in una fase iniziale delle sue applicazioni.

Il costo totale di una stazione 5G dipende da diversi fattori tra cui troviamo il numero di utenti che riceveranno una connessione da questa. Una stazione base 5G, ad esempio, in grado di garantire la connessione a 50.000 utenti avrà un costo di 20.000 dollari, di conseguenza si avrà un costo per cliente di circa 0.50 \$. Con l'aumento del numero di utenti aumenterà in contemporanea il costo per la costruzione della stazione base. Nella tabella 2.6 [30] vengono riportati alcuni esempi in cui si può vedere come il costo della rete sia vincolato al numero di utenti serviti.

Numero utenti	Costo stimato
50.000	\$20.000
70.000	\$25.000
80.000	\$30.000

Tabella 2.5: Correlazione numero di utenti/costo stimato delle antenne 5G

Le antenne 5G, inoltre, si presentano in diverse forme e dimensioni, ciascuna progettata per soddisfare specifiche esigenze di copertura e capacità. Tra le tipologie più comuni troviamo le antenne Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output), Macro Cell e Beamforming come descritto nel capitolo precedente. Ognuna di queste presenta caratteristiche distintive che influenzano i relativi costi come si può vedere in Tabella 2.6.

Tipo di antenna	Costo minimo	Costo massimo
su-MIMO	\$45.000	\$ 69.000
m-MIMO	\$85.000	\$ 369.000
Beaforming	\$45.000	\$60.000
Macro Cell	\$91.000	\$ 125.000

Tabella 2.6: Costo antenne 5G in base alla tipologia

Per i requisiti di sicurezza e per le dimensioni della rete ipotizzati una tecnologia di tipo m-MIMO è quella che soddisfa maggiormente gli obiettivi della UAM in quanto sfrutta un elevato numero di antenne per migliorare significativamente la capacità, la copertura e l'efficienza dello spettro radio.

Capitolo 3

Modelli matematici per la stima dei costi

La stima dei costi è uno studio multidisciplinare di fondamentale importanza in tutte le fasi di una tecnologia, partendo da quelle progettuali seguite da quelle operative e infine di dismissione .

La capacità di valutare con precisione i costi associati a un determinato progetto fornisce una base solida per prendere decisioni informate e per garantire il successo e la sostenibilità nel lungo periodo. L'obiettivo principale della stima dei costi è fornire una previsione accurata dei costi totali di un progetto, consentendo agli stakeholder di pianificare e allocare risorse in modo efficiente, minimizzando i rischi di costi eccessivi o ritardi nell'esecuzione del progetto oltre ad avere un peso importante sulle scelte di componenti e tecnologie da impiegare.

Nel contesto della ricerca attuale, lo studio della stima dei costi si concentra sull'analisi dei costi operativi dei velivoli eVTOL nell'ambito dell'Urban Air Mobility e dei costi relativi alle infrastrutture abilitanti, come i vertiporti. Questo settore emergente richiede una valutazione dettagliata dei costi associati all'adozione e all'operatività di nuove tecnologie di trasporto aereo urbano, al fine di comprendere appieno l'impatto economico e finanziario delle iniziative di UAM. Questo tipo di mobilità risulta essere del tutto innovativa con nessun esempio operativo di utilizzo, è un passaggio necessario per sondare la fattibilità economica di un tipo di mobilità che si affaccia su un panorama già esistente e funzionante.

LCC: Life Cycle Cost

Il totale complessivo dei costi di un progetto viene definito Life Cycle Cost (LCC), uno step fondamentale per la gestione dei progetti e della loro economia per valutare e comprendere i costi totali associati a un determinato prodotto, sistema o infrastruttura per l'intera durata del suo ciclo di vita, dalla sua progettazione e produzione fino alla sua dismissione e smaltimento.

Seguendo le direttive NASA [32] il LCC è suddiviso in quattro voci principali:

- I costi di ricerca, sviluppo, test e valutazione (RDT&E, Research, Development, Test, and Evaluation): rappresentano gli investimenti finanziari necessari per condurre attività di ricerca scientifica, sviluppo tecnologico, test e valutazione di nuovi prodotti, processi o servizi.
- Costi di approvvigionamento e produzione: rappresentano le spese sostenute da un'azienda per ottenere i materiali e le risorse necessarie per produrre beni o servizi. In particolare vengono prodotti equipaggiamenti necessari al servizio che vengono installati, integrati e testati.
- Costi operativi e di supporto: rappresentano le spese sostenute da un'azienda per mantenere le proprie attività in funzione e supportare le operazioni quotidiane. Questi costi includono sia costi diretti che indiretti che è necessario sostenere durante tutta la vita operativa di un servizio.

Per ognuna di queste fasi è necessario organizzare lo studio il cui livello di complessità andrà ad influire sull'accuratezza dell'analisi. Il lavoro viene diviso in tre step principali:

1. Definizione del progetto: si analizzano gli stakeholders e gli obiettivi della stima e eventuali aspettative. Vengono raccolti i dati e poi inseriti all'interno di una Work Breakdown Structure (WBS) in cui vengono suddivise e catalogate le varie voci di costo e come si correlano tra di loro. Con l'avanzare dello studio si potrebbero aggiungere o rivedere informazioni e di conseguenza anche alcuni passaggi potrebbero essere rivisitati.
2. Metodologia di costo: si selezionano metodologie, approcci e quadri di riferimento per la stima. Si stabiliscono le regole di base e le ipotesi per il processo di stima dei costi. Man mano che vengono prese determinate scelte e raccolti eventuali dati è possibile andare a perfezionare sempre più il modello a seconda dei casi o delle richieste.
3. Stima dei costi: fase conclusiva del processo in cui vengono effettivamente calcolati i costi e costantemente monitorati durante la fase operativa per fare in modo di mantenere il costo stimato. Questi passaggi sono fondamentali per una stima completa e coerente nel tempo

Come si può notare il processo di stima dei costi prevede diversi passaggi che si attuano in sequenza ma che al loro interno prevedono delle iterazioni. Spesso i risultati ottenuti inizialmente vengono rivisti e modificati in funzione di nuovi input o output non soddisfacenti.

3.1 Metodi per la stima dei costi

Durante il processo di stima dei costi è importante identificare la metodologia di costi o eventuali combinazioni più adatte allo studio in funzione dei dati disponibili e del grado di precisione finale che si desidera.

Esistono tre metodi base principali per la stima dei costi; stima dei costi per analogia, stima dei costi parametrica, e stima dei costi ingegneristica.

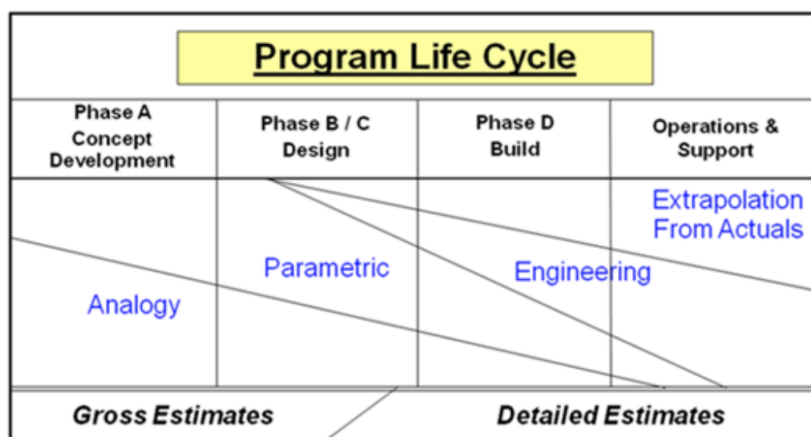


Figura 3.1: Metodi per la stima dei costi [32]

Nella Figura 3.1 si può vedere come cambiano le tipologie di stima nell'arco della vita di un progetto, questo accade in quanto i dati a disposizione nel tempo aumentano e diventano sempre più accurati.

3.1.1 Stima di costi per analogia

Il metodo di stima dei costi per analogia sfrutta il costo di sistemi simili per poi adeguarli al nuovo sistema in esame con le dovute differenze per stimarne il costo.

Nell'utilizzare questa tecnica è necessario identificare un sistema valido già esistente che risulti essere simile al progetto proposto in funzionamento, progettazione o ambito operativo. I dati relativi a un sistema già collaudato, che è rappresentativo di un tipo di ambiente che si vuole stimare, risulta essere la base da cui partire per effettuare una prima stima. Questi dati, poi, vengono adeguati in maniera soggettiva a rialzo o ribasso in base al livello di analogia tra il sistema di partenza e quello che si vuole analizzare.

Nell'andare a modificare in maniera soggettiva un metodo che è già stato validato si va compromettere la validità oggettiva del modello, gli interventi soggettivi, quindi, dovrebbero essere ridotti al minimo e essere sostituiti da dati storici o analisi che risultano essere più affidabili a livello di dati accurati.

Si utilizza l'analogia quando si ha a disposizione un modello di stima costi valido a cui fare riferimento e una discreta quantità di informazioni tecniche utili per permettere aggiustamenti adeguati e coerenti. La stima dei costi per analogia è inoltre molto utilizzata quando si vogliono stimare i costi di un sistema generico con una bassa accuratezza e definizione.

Quando si effettuano modifiche a un modello esistente per crearne uno ex-novo relativo a realtà diverse si cerca di fare particolarmente attenzione al parere degli "esperti" per approssimare il sistema con la maggior affidabilità possibile. Tra i punti di forza si trovano:

- Basato su dati storici reali;

- Metodo di stima veloce;
- Di facile comprensione;
- Preciso per piccole modifiche rispetto al modello originale.

Allo stesso tempo la stima dei costi per analogia presenta degli aspetti critici che sono i seguenti:

- In alcuni casi, si basa su un singolo dato storico;
- Può essere difficile identificare un'analogia appropriata;
- Richiede un processo di normalizzazione per risultare precisa ;
- È basata sull'estrapolazione e sul parere di esperti.

3.1.2 Stima dei costi parametrica

La stima di costi parametrica è una metodologia che sfrutta e utilizza relazioni statistiche tra i costi storici e eventuali variabili a essi collegati relative alle prestazioni caratteristiche del sistema, della produzione o del carico del personale.

In generale viene selezionata una stima parametrica dei costi quando si hanno a disposizione dati chiave per la stima come ad esempio volume o peso dei componenti. Per sviluppare una stima dei costi parametrica è necessario andare bene ad analizzare le variabili che in passato hanno influenzato la variazione di costo che dipendono dalle caratteristiche e dalla complessità del progetto. Il vantaggio principale di questo metodo è che la stima può essere condotta abbastanza rapidamente e poi può essere replicata con eventuali aggiustamenti o migliorie. Nella Figura 3.2 vengono elencati i vari passaggi relativi a questo tipo di stima.

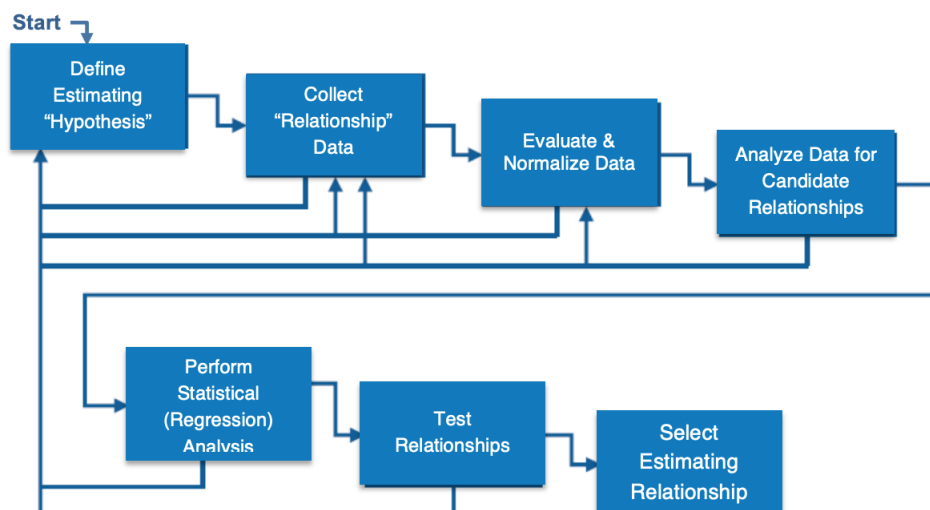


Figura 3.2: Processo di stima costi parametrica [32]

L'obiettivo principale di questo tipo di analisi è generare delle CER (Cost Estimating Relationship) cioè una relazione matematica in grado di correlare il costo di un progetto

con uno o più parametri che lo definiscono. Si generano, quindi, delle vere e proprie equazioni che correlano una variabile "dipendenti" con una o più variabili "indipendenti". In generale la variabile dipendente è la voce di costo mentre quella indipendente è un parametro caratteristico del sistema.

I CER che vengono calcolati hanno comunque bisogno di essere analizzati e controllati periodicamente per garantire che rispecchino durante tutte le fasi di stima dei costi i risultati attesi e che siano coerenti con la realtà. Per fare questo tipo di analisi spesso si utilizzano strumenti di modellazione come Microsoft Excel o simili disponibili in commercio.

I punti di forza della stima dei costi parametrica sono i seguenti:

- I CER, una volta sviluppati, sono un ottimo strumento per provare in maniera rapida diverse configurazioni;
- È in grado di prevedere in maniera statisticamente informazioni sui costi;
- È un metodo oggettivo;
- Risulta essere un metodo affidabile in quanto basato su dati storici e su metodo scientifico.

Il metodo di stima dei costi parametrica presenta anche degli svantaggi:

- Spesso è complicato arrivare alle CER e non sono di facile comprensione per tutti;
- È un processo che richiede tempo e di conseguenza anche costi per avere come risultato dei dati attendibili;
- Diventa un metodo poco predittivo se si esce dall'intervallo di operatività.

3.1.3 Stima dei costi ingegneristica

La stima di costi ingegneristica viene chiamata anche stima "dal basso" o stima "bottom-up" in quanto nello andare allo stimare i costi si effettua una costruzione ingegneristica in grado di produrre una stima dettagliata dei costi complessivi di un progetto. Il costo di un'attività viene stimato andando a scorporare ogni singola attività o componente, valutandone i costi e infine faccendone la somma con le spese generali .

In questo specifico metodo di stima si prevede la produzione di una WBS (Work Breakdown Structure) cercando di arrivare al livello più basso di dettaglio delle risorse utilizzate all'interno di un progetto. Questo tipo di divisione viene anche definita come CBS (Cost Breakdown Structure) o CES (Cost Estimating Structure). Generalmente vengono selezionati dei tecnici "esperti" da affiancare all'analista dei costi in grado di aiutarlo nella preparazione delle stime di tipo tecnico. Il suo compito principale è quello di revisionare la stima in modo tale da poterne certificare coerenza e completezza a livello di progetto.

Nella Figura 3.3 vengono illustrati i passaggi fondamentali per effettuare una stima dei costi di tipo ingegneristico.

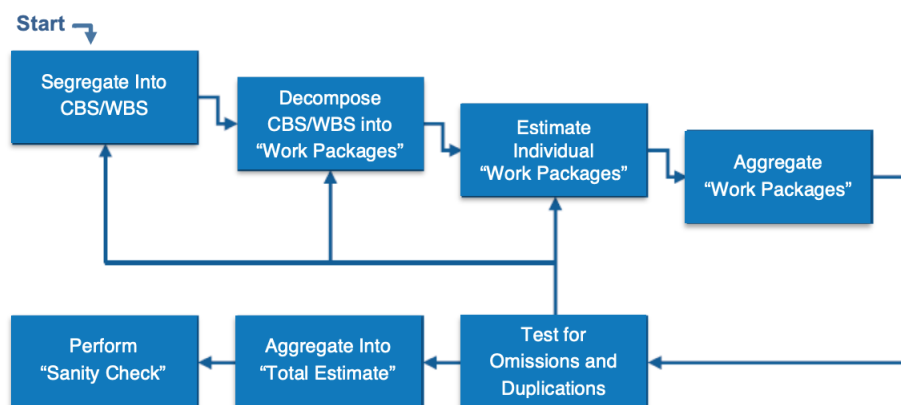


Figura 3.3: Processo di stima costi ingegneristici [32]

Questi passaggi si riferiscono al stima vera e propria dei costi ma bisogna sempre ricordarsi che a questi fondamentali passaggi vanno aggiunte attività come la ricerca di documentazione alla base delle stime su questioni come orari, salari, tasse, spese generali o aliquote.

Anche in questo caso si possono presentare situazioni in cui non esiste alcuna documentazione a riguardo ed è necessario fare affidamento alla comunità ingegneristica che fornirà un parere professionale ed esperto che andrà a sopperire a lacune della letteratura per mancanza di dati empirici.

Tra i punti di forza di questa tipo di stima di costi troviamo:

- Metodo di stima costi intuitivo;
- La stima dei costi ha un'elevata credibilità conferita dalla base delle stima per ciascun elemento;
- Gli elementi all'interno della stima non sono concatenati tra loro di conseguenza l'errore sul singolo elemento non compromette tutta la stima;
- È in grado di fornire informazioni dettagliate ed eccellenti sulle principali voci di costo che contribuiscono alla stima totale.
- Il modello creato potrà essere riutilizzato per valutare e comprendere meglio il peso delle singole voci all'interno di un progetto.

Come i metodi di stima precedenti anche per la stima dei costi ingegneristica esistono svantaggi tra cui troviamo:

- Metodo di stima costoso che richiede un grosso impegno a livello di tempo e budget stanziato per avere in output una stima coerente e priva di errori;
- Non è in grado di essere reattivo a eventuali variazioni o scenari differenti;
- È necessario produrre nuove stime per ogni scenario alternativo.

- Non si riesce a fornire una visione dei fattori che influenzano le voci di costo ;
- Le relazioni che si vengono a formare tra le varie voci di costo devono essere imposte in maniera esterna.

3.2 Come selezionare un modello di costo

Come descritto in precedenza, esistono molti modelli e metodologie per stimare i costi questo perché non esiste in modello unico che può essere applicato per tutti gli scopi o impieghi. I modelli di stima possono variare notevolmente in funzione dei dati che si hanno a disposizione e dalle relazioni che si vengono a creare tra loro. Esistono modelli che hanno bisogno di numerosi pacchetti di dati per sviluppare CER mentre altri modelli richiedono meno input e risultano essere più automatizzati così come ci sono modelli basati su un solo metodo di stima e altri che ne combinano più varietà. Per selezionare o costruire un modello di stima dei costi è necessario effettuare tre attività principali:

- Considerare tutte le opzioni disponibili ed effettuare una selezione adeguata e coerente con i risultati che si vogliono ottenere. Nel caso non siano a disposizione modelli in grado di far fronte alle richieste dell'utente si può valutare l'opzione di creare un modello ex-novo per l'attività o il progetto in esame.
- Assicurarsi che, sia nel caso di un modello già esistente o di un modello creato su commissione, questo risulti essere validato.
- Fare in modo che le assunzioni che vengono fatte all'interno del modello abbiano riscontri scientifici provabili.

In commercio sono disponibili numerosi modelli di stima dei costi parametrici che sono in grado di generare delle stime in funzione di parametri come peso, volume o quantità. Quando è possibile reperire tali input è possibile fare affidamento su questi modelli. Quando, invece, sono stati identificati molti fattori di costo si hanno a disposizione un grosso numero di parametri tecnici da inserire in input è possibile andare sempre di più ad aumentare e perfezionare il livello di stima dell'indagine.

I modelli per la stima dei costi più sofisticati dovrebbero essere calibrati su basi di dati empirici storici normalizzati in forma generica.

È necessario che nelle fasi preliminari di progetto venga dedicato del tempo alla definizione del modello, il suo utilizzo e come avverrà l'integrazione dei dati raccolti. Una volta definito il modello con dei dati preliminari è necessario validarlo e una volta validato si può procedere con correzioni, modifiche o aggiornamenti.

Tre pratiche fondamentali per impostare un modelli di costi:

- Controllare numerose volte i dati inseriti sia prima che dopo l'esecuzione del modello. Questo serve a garantire un certo grado di accuratezza a tutto il modello e a tenere costantemente sotto controllo i dati in input;

- Sarebbe auspicabile fare un controllo incrociato del modello cercando metodi alternativi di stima per determinati punti in modo tale da garantire un ulteriore controllo sul modello di stima originale ;
- Mantenere sempre aggiornate le informazioni all'interno del modello in modo tale da ridurre al minimo le variazioni o le possibilità di errore.

Capitolo 4

Modello di stima dei costi operativi di un velivolo eVTOL

Nel Capitolo 2 viene descritto cosa rappresentano e come si individuano i costi operativi all'interno di un progetto. I costi operativi si dividono in due voci principali: costi operativi diretti (DOC) e costi operativi indiretti (IOC). I costi operativi diretti comprendono tutte le voci di costo legate alle operazioni di volo come deprezzamento del capitale, assicurazione, carburante, equipaggio, manutenzione, e tasse aeroportuali o amministrative strettamente legate alla navigazione. I costi operativi indiretti, invece, comprendono tutte le voci di costo che deve affrontare una compagnia che non siano legate al velivolo o alla singola missione come ad esempio i servizi marketing, assistenza a terra, amministrazione e i servizi per i passeggeri.

Il modello di costo implementato prevede l'inserimento di input da parte dell'utente in funzione del modello di velivolo selezionato, questi dati inseriti vengono processati dalle CER (Cost Estimating Relationship) apposite per ogni voce di costo che riescono a restituire in output i costi operativi totali annui di un velivolo elettrico a decollo e atterraggio verticale. Il modello utilizzato è stato preso a partire da un modello preesistente del Politecnico di Torino [33] sul LCC dei velivoli regionali ibrido-elettrici. È stato necessario apportare delle modifiche a tale modello in funzione del fatto che i velivoli eVTOL, sono del tutto elettrici o alimentati a idrogeno e, di conseguenza, all'interno del modello sono state eliminate le CERs relative alla propulsione tradizionale a combustione e tutta la componentistica ad essa legate come ad esempio i costi di fuel, manutenzione o inquinamento ambientale con l'aggiunta di nuove equazioni dedicate ai nuovi componenti. Altre modifiche sono legate al numero di passeggeri trasportabili in quanto il modello originale prevede un numero di posti a sedere all'interno del velivolo molto più alto rispetto ai velivoli eVTOL.

Molte altre voci con annesse CER per la loro stima sono risultate valide per la valutazione dei costi operativi dei velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale in quanto frutto di un'attenta e lunga ricerca dei metodi di stima costi per l'aviazione. In questi casi è stato semplicemente necessario andare ad aggiornare i valori ottenuti al tasso di inflazione odierno rispetto all'anno di pubblicazione per ottenere dei valori attuali più veritieri possibili. Tutte le voci di costo relative alla ricerca e allo sviluppo dei componenti eVTOL

(RDT&E) sono il risultato di un lavoro di tesi precedente svoltasi al Politecnico di Torino [34] a cui il seguente studio si collega.

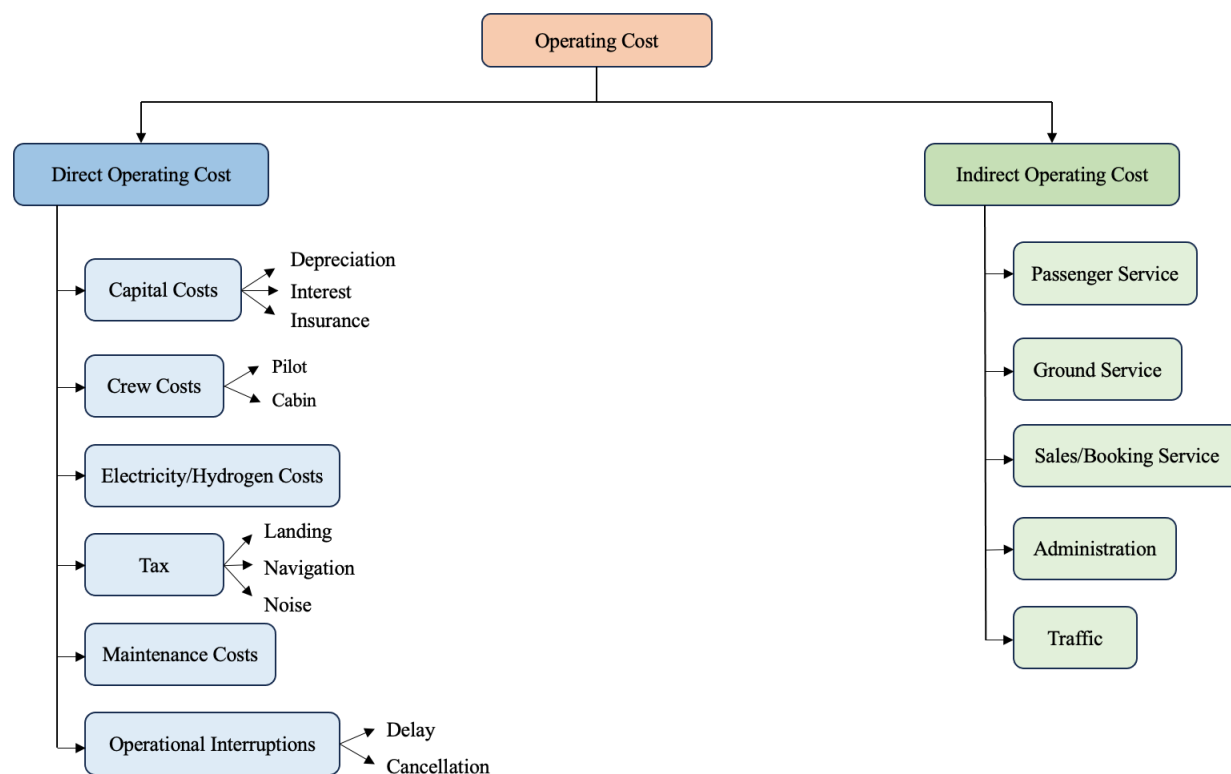


Figura 4.1: CBS costi operativi velivoli eVTOL

4.1 Costi Operativi Diretti (DOC)

I costi operativi diretti si dividono in sei voci principali come si può vedere nella Figura 4.1 e sono: costi relativi al capitale, costi di equipaggio, costi per elettricità/idrogeno, tasse, costi di manutenzione e costi per interruzioni operative. Il modello è stato sviluppato in ambiente .xlsx in cui vanno inserite le specifiche del velivolo e si ottiene come risultato le voci di costo annue prima elencate che sommate tra loro sono in grado stimare il valore annuo dei costi operativi diretti di un velivolo eVTOL.

4.1.1 Costi sul capitale

I costi sul capitale raggruppano le voci di costo relative al mantenimento del proprio capitale utile per finanziare le proprie attività. Nello specifico vengono calcolate tre voci di costo fondamentali:

- Spese di ammortamento dell'investimento iniziale necessarie a ripartire il costo del velivolo in un determinato periodo di tempo;
- Oneri dovuti agli interessi sul capitale investito;

- Costi di assicurazione per velivolo e passeggeri.

$$DOC_{cap} = DOC_{dep} + DOC_{int} + DOC_{ins} \quad (4.1)$$

Le variabili necessarie per il calcolo dei costi di capitale che vanno immesse come input all'interno del modello sono raccolte ed elencate in Figura 4.2.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
MTOW	Peso del velivolo	kg	Massa totale di tutte le componenti del velivolo al decollo
AC	Prezzo del velivolo	US\$	Prezzo finale del velivolo sommando costi di sviluppo e produzione
n-seats	Numero di passeggeri	-	Numero massimo di passeggeri imbarcabili
FH	Flight Hours	h	Durata della missione dal decollo all'atterraggio
BH	Block Hours	h	Durata complessiva della missione, comprese le fasi di rullaggio
Range	Range	nm	Distanza percorsa durante la missione
n-trips	Numero di viaggi annui	-	Numero di viaggi che il velivolo compie in un anno
CEF	Fattore di scala dei costi	-	Fattore di scala che tiene conto dei livelli di inflazione aggiornati al 2024
res	Valore residuo	%	Valore di mercato del velivolo alla fine del deprezzamento, in percentuale sul totale del velivolo
Pdep	Periodo di deprezzamento	anni	Durata del periodo di deprezzamento
AFC	Costo airframe	%	Valore dell'airframe, in percentuale sul prezzo totale del velivolo
EC	Costo motore	%	Valore di mercato del motore, in percentuale sul prezzo totale del velivolo
Pint	Periodo di interessi	anni	Anni previsti per il pagamento degli interessi
IR	Tasso di interessi	%	Percentuale annua come interesse sul valore del velivolo
PV	Valore attuale	US\$	Valore di mercato attuale del velivolo
FV	Valore futuro	US\$	Valore di mercato del velivolo al termine del periodo di interessi

Figura 4.2: Variabili necessarie per i costi di capitale

Andando ad analizzare nello specifico le varie voci di costo che compongono i costi sul capitale troviamo:

Costi di deprezzamento (DOC_{dep})

$$DOC_{dep} = 1.5 \cdot \left((1 - res) \frac{AC}{P_{dep}} + AFS \frac{AFC}{P_{dep}} + ES \frac{EC}{P_{dep}} \right) \quad (4.2)$$

L'equazione 4.2 calcola il valore annuo dei costi di deprezzamento di un velivolo. In questa voce di costo sono compresi i costi relativi all'acquisto del velivolo e dei relativi pezzi di ricambio iniziali. Il prezzo finale del (AC) velivolo è stato calcolato andando a sommare i costi di sviluppo e produzione e andando ad aggiungere un margine che potesse rappresentare un eventuale guadagno dell'azienda produttrice. I costi relativi ai pezzi di ricambio dell'airframe (AFS) sono stati calcolati in percentuale sul prezzo finale di produzione dell'airframe successivamente sono stati rapportati con il valore complessivo del velivolo. Per quanto riguarda il costo dei pezzi di ricambio del motore (ES) è stata utilizzata la medesima procedura dell'airframe.

È stato inserito il coefficiente correttivo pari a 1.5 in quanto il modello sottostimava questa voce di costo che grazie a questa modifica risulta essere in linea con i risultati attesi.

Si ipotizza, infine, che al termine del periodo di deprezzamento sia supposto un valore residuo del velivolo relativo al riutilizzo di alcuni componenti che possono essere riutilizzati in altri ambiti o applicazioni.

Costi per gli interessi (DOC_{int})

$$DOC_{int} = \frac{IR(PV - FV)}{1 - (1 + IR)^{-P_{int}}} - \frac{PV}{P_{int}} \quad (4.3)$$

I costi per gli interessi vengono calcolati nel caso in cui l'acquisto dei velivoli è avvenuto tramite un intermediario come ad esempio una banca che ne richiede gli interessi. Gli interessi sono in funzione del valore attuale del velivolo (PV) e di un ipotetico valore futuro (FV) a termine del periodo di interessi e il valore di questi ultimi (IR). Il valore degli interessi viene facilmente influenzato dal mercato globale e dalle tassazioni a livello locale. Il totale annuo del valore degli interessi si calcola con la formula ripresa nell'equazione 4.3.

Costi assicurativi (DOC_{ins})

$$DOC_{ins} = 0.1 \cdot AC \quad (4.4)$$

L'ultima voce relativa ai costi di capitale è quella relativa ai costi assicurativi che comprendono sia i costi relativi al velivolo sia quelli per i passeggeri legati ad eventuali risarcimenti in caso di incidente.

Per velivoli eVTOL i costi di assicurazione vengono calcolati come il 10% del valore di mercato del velivolo come espresso nell'equazione 4.4.

4.1.2 Costi di equipaggio

Nei costi di equipaggio sono presenti i costi relativi agli stipendi del personale e i costi necessari alla loro formazione. Le nuove variabili necessarie al calcolo dei costi di equipaggio sono elencate in Figura 4.3

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
n-cockpit	Numero di piloti	-	Numero di piloti necessari a manovrare il velivolo
n-crew	Numero di assistenti di volo	-	Numero di assistenti di volo necessari

Figura 4.3: Variabili necessarie per i costi di equipaggio

Tra il personale rientrano i piloti (Cockpit Crew) e gli assistenti di volo (Cabin Crew). I salari annui di entrambi vengono calcolati moltiplicando le ore di volo annue per la paga oraria pari a 100\$/h per i piloti e 50 \$/h per gli assistenti di volo come parametro generico ma che può essere eventualmente modificato in funzione della zona in esame.

$$DOC_{CockpitCrew} = BH \cdot LR_{Cockpit} \cdot n_{Cockpit} \cdot n_{trips} \quad (4.5)$$

$$DOC_{CabinCrew} = BH \cdot LR_{Cabin} \cdot n_{Cabin} \cdot n_{trips} \quad (4.6)$$

Nel nostro caso specifico si è ipotizzata l'assenza degli assistenti di volo, di conseguenza in parametro n_{Cabin} è impostato su 0 ma si lascia comunque all'utente la possibilità di poterlo variare.

I costi di formazione vengono calcolati in funzione della massa totale del velivolo al decollo (MTOW) secondo una relazione che si ricava da dati statistici come espresso nell'equazione 4.7.

$$DOC_{CrewTrainig} = 0.0184\left(\frac{MTOW}{1000}\right)^3 - 9.1399\left(\frac{MTOW}{1000}\right)^2 + 1621.7\left(\frac{MTOW}{1000}\right) + 87034.3 \quad (4.7)$$

4.1.3 Costi per l'elettricità e l'idrogeno

A seconda del tipo di impianto propulsivo, i motori degli eVOTL possono essere alimentati da energia elettrica o da idrogeno. Le nuove variabili da inserire all'interno del modello per il calcolo di tali valori sono riportati in Figura 4.4.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
Eflight	Energia elettrica richiesta	kWh	Quantità di energia richiesta dal velivolo per specifica missione
Eprice	Costo energia elettrica	US\$/kWh	Prezzo di mercato dell'energia elettrica nel 2024
eff-chargeE	Efficienza di ricarica elettrica	-	Efficienza che tiene conto delle perdite che si hanno lungo il processo di ricarica elettrica
LH2flight	Idrogeno richiesto	kg	Quantità di idrogeno richiesto dal velivolo per specifica missione
LH2price	Costo idrogeno	US\$/kg	Prezzo di mercato dell'idrogeno nel 2024
eff-chargeLH2	Efficienza di ricarica idrogeno	-	Efficienza che tiene conto delle perdite che si hanno lungo il processo di ricarica dell'idrogeno

Figura 4.4: Variabili necessarie per i costi di elettricità e idrogeno

Il velivolo è del tutto alimentato a batterie installate a bordo, di conseguenza, l'energia utilizzata (Eflight) è relativa a tutte le fasi della missione. Il costo annuale di energia utilizzata, quindi, sarà pari all'energia utilizzata per singola missione moltiplicata per il costo al kWh dell'energia al prezzo di mercato più aggiornato disponibile moltiplicato a sua volta per il numero di viaggi annui del velivolo.

$$DOC_{elettricity} = \frac{E_{price} \cdot E_{flight}}{\eta_{chargeE}} n_{trips} \quad (4.8)$$

Nel calcolare il costo dell'energia richiesta in un anno vanno tenute presente le perdite dovute al processo di ricarica andando a dividere l'equazione per il valore di efficienza di ricarica elettrica imposte pari a 0.85.

$$DOC_{LH2} = \frac{LH2_{price} \cdot LH2_{flight}}{\eta_{chargeLH2}} n_{trips} \quad (4.9)$$

In maniera analoga vengono calcolati i costi relativi all'idrogeno liquido per i velivoli alimentati da fuel cell. Anche in questo caso si moltiplica la quantità di idrogeno relativa alla singola missione per le ore di missione annue il tutto moltiplicato per il costo al kg dell'idrogeno più aggiornato possibile. Anche per l'idrogeno il tutto viene diviso per l'efficienza di ricarica dell'idrogeno liquido.

4.1.4 Tasse

Nei costi relativi alle tasse rientrano tutti gli oneri delle spese governative e aeroportuali che riguardano sia la fase di navigazione che quella di atterraggio a cui vanno aggiunte le tassazioni per l'inquinamento acustico.

Nel modello originale in questa sezione erano presenti i costi relativi agli oneri legati alle emissioni di sostanze inquinanti e di CO₂. Negli ultimi anni, infatti, per promuovere il rispetto ambientale nelle industrie e nei trasporti sono state inserite tassazioni in funzione delle emissioni inquinanti prodotte. Questo vale anche per il settore dell'aviazione che è sempre più spronato ad optare per tecnologie sempre più a impatto zero. Si prevede, infatti, che in futuro questo tipo di tassazioni saranno sempre più onerose in modo tale da far progredire una transazione verde nell'aviazione.

Le sostanze inquinanti che solitamente vengono prese in considerazione sono gli ossidi di azoto (NO_x) e gli idrocarburi incombusti (HC) che vengono tassati in funzione delle quantità emesse durante la fase operativa espresse in grammi. Infine si valutano solitamente le emissioni di CO₂ le cui emissioni sono regolate a livello di tassazioni dall'Emission Trading Scheme (ETS) dell'Unione Europea. Questo programma ha come obiettivo quello di contenere le emissioni di CO₂ andando a porre un tetto massimo per la produzione di anidride carbonica oltre il quale si viene tassati o sanzionati.

Nel caso specifico dei velivoli eVTOL le tassazioni relative alle sostanze inquinanti sono state tutte poste a zero. I velivoli del nostro studio sono del tutto elettrici e, di conseguenza, non emettono sostanze inquinanti nell'aria durante la loro vita operativa. Nel caso di velivoli alimentati da fuel cell avviene l'emissione nell'aria di vapor d'acqua che ad oggi non è ancora tassata come emissione.

Le tassazioni calcolate, quindi, sono solo quelle relative alla navigazione, atterraggio e inquinamento acustico.

$$DOC_{tax} = DOC_{nav} + DOC_{landing} + DOC_{noise} \quad (4.10)$$

Le nuove variabili da inserire all'interno del modello sono riportate in Figura 4.5.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
Cnoise	Tassa sul rumore	US\$/dB	Ammontare della tassa sul rumore per decibel emessi
Lapp	Livello di rumore certificato - Approach	EPNdB	Livello di rumore registrato sul sentiero di approccio a 2 km dalla pista
Lflyover	Livello di rumore certificato - Flyover	EPNdB	Livello di rumore registrato sul sentiero di decollo a 6,5 km dal rilascio dei freni
Llateral	Livello di rumore certificato - Lateral	EPNdB	Livello di rumore registrato durante il decollo a 450 m dall'asse della pista
Td	Soglia - Aeroporto di partenza	EPNdB	Livello di rumore concesso dall'aeroporto di partenza
Ta	Soglia - Aeroporto di arrivo	EPNdB	Livello di rumore concesso dall'aeroporto di arrivo

Figura 4.5: Variabili necessarie tasse per inquinamento acustico

Tasse aeroportuali e governative

Gli oneri relativi all'atterraggio dipendono fortemente dall'aeroporto, nel nostro caso vertiporto, in cui si atterra in quanto dipende da oneri governativi e servizi offerti. Si è cercato quindi di generalizzare questo dato per avere una stima più coerente possibile a livello mondiale.

$$DOC_{landing} = MTOW_t \cdot K_{landing} \cdot CEF \cdot n_{trips} \quad (4.11)$$

Come si può vedere nell'equazione 4.11, la variabile da cui dipende il costo è la massa del velivolo al decollo espressa in tonnellate ($MTOW_t$). Il valore di $K_{landing}$ dipende dalla regione interessata per il calcolo, il risultato dell'equazione da come valore il valore annuale dei costi relativi alla tassazione per l'atterraggio.

È prevista un'ulteriore tassazione relativa al sorvolo dello spazio aereo di un determinato Paese che offre servizi di assistenza alla navigazione.

$$DOC_{nav} = K_{nav} \cdot Coeff_1 \cdot Range_{nm} \cdot \sqrt{\frac{MTOW_{lb}}{1000}} \cdot CEF \cdot n_{trips} \quad (4.12)$$

Nell'equazione utilizzata per stimare le tasse relative alla navigazione si utilizza il valore della distanza percorsa durante la missione ($Range_{nm}$) espresso in miglia nautiche e il peso del velivolo al decollo ($MTOW_{lb}$) espresso in libbre, il tutto si moltiplica per una costante di navigazione (K_{nav}) relativa al tipo di volo che nel nostro caso è stata impostata pari a 0.65 US\$/nm/lb per voli a corto raggio.

Tasse sul rumore

La tassa sul rumore per i velivoli è richiesta da parte degli aeroporti di atterraggio e arrivo di una missione.

Nel caso dei velivoli eVTOL gli spostamenti avvengono all'interno delle città di conseguenza all'interno del nostro modello non è stata fatta differenza tra aeroporto di arrivo e di partenza.

$$DOC_{noise} = C_{noise} \cdot (10^{(L_{app}-Ta)/10} + 10^{(\frac{L_{flyover}+L_{lateral}}{2}-Td)/10}) \cdot n_{trips} \quad (4.13)$$

L'equazione con cui viene calcolato il costo relativo a tale tassazione è quello consigliato dal Transport Aircraft Noise Classification Group in cui le voci relative al rumore sono espresse in EPNdB (Effective Perceived Noise Level in Decibels) cioè il livello di rumore effettivamente percepito a tre distanze standard dall'arrivo e dalla partenza come viene specificato in Figura 4.5.

4.1.5 Costi di manutenzione

La manutenzione ordinaria dei velivoli è necessaria a mantenere l'aeronavigabilità del velivolo oltre a permettere di mantenere alti standard di sicurezza. I costi associati alla manutenzione si suddividono in due voci principali: i costi di manutenzione diretti (DMC) che sono legati all'impiego di materiali e di personale addetto e i costi legati alle spese generali come infrastrutture e strumentazione necessaria detti Maintenance Burden che pur non essendo costi operativi diretti vengono comunque inseriti all'interno dei costi manutentivi per avere una visione completa dei costi necessaria tale attività. Nel nostro modello vengono distinti i costi in due grosse categorie:

- Costi di manutenzione tradizionali;
- Costi di manutenzione propulsione elettrica o a idrogeno.

Questo perché il modello di riferimento utilizzato è in grado di calcolare i costi manutentivi dei velivoli tradizionali con propulsione a combustione che nel nostro caso non avviene. Quello che si è fatto, quindi, è stato stimare i costi di manutenzione dell'aircraft utilizzando il modello di riferimento [33] eliminando le voci relative alla propulsione per combustione. Per sopperire a questo vuoto sono state introdotte formule specifiche per la nuova componentistica relativa all'alimentazione tramite batterie o fuel cell con relativi motori.

Costi di manutenzione tradizionali

I costi di manutenzione diretti (DMC) vengono suddivisi per ogni componente del velivolo. Nel modello i costi di manutenzione tradizionali vengono calcolati con l'ausilio di un tool creato dal Politecnico di Torino [34] in cui si inseriscono i valori riportati in Figura 4.6 come input che vengono processati tramite apposite CER che sono in grado di ottenere in output il valore dei costi operativi diretti (DMC).

Nome	Unità	Descrizione
Dimensione flotta	-	Numero di velivoli della compagnia soggetti a manutenzione
Utilizzo	FH/day	Numero di ore di volo giornaliero
Lunghezza fusoliera	m	Lunghezza della fusoliera
Età medi adel velivolo	anni	Numero di anni trascorsi dalla data di certificazione del velivolo
Età del tipo di velivolo	anni	Media del numero di anni dei velivoli che compongono la flotta
Numero di pneumatici	-	Numero totale di ruote del velivolo

Figura 4.6: Variabili necessarie per i costi di manutenzione

Con i valori forniti si calcola il costo di ciascuna attività manutentiva tramite specifiche CER costruite nel corso degli anni tramite il raggruppamento di dati empirici relativi alla manutenzione di velivoli tradizionali.

Per i costi indiretti relativi alla manutenzione risulta complicata la costruzione di un'apposita CER per effettuarne il calcolo. Per ovviare a tale problema si assume che i costi di manutenzione indiretti (Maintenance Burden) siano pari a una percentuale fissa dei costi totali di manutenzione. Dai dati empirici risulta che generalmente i costi diretti sono pari circa al 60% del totale mentre quelli indiretti ne ricoprono circa il 40%. Di conseguenza una volta che si ha a disposizione il valore dei costi operativi diretti risulta quasi immediato il calcolo di quelli indiretti tramite le seguenti formule:

$$DOC_{Maint_{tot}} = DMC \cdot \frac{100}{60} \quad (4.14)$$

I costi relativi al Maintenance Burden saranno quindi pari a:

$$DOC_{maint_{burden}} = 0.4 \cdot DOC_{maint_{tot}} \quad (4.15)$$

Per ottenere, infine, i costi di manutenzione annui va moltiplicato il valore appena calcolato, relativo alla singola ora di volo, per la durata media di una missione e per il numero di viaggi previsti in un anno.

$$DOC_{maint_{year}} = DOC_{maint} \cdot FH \cdot n_{trips} \quad (4.16)$$

Costi di manutenzione propulsione elettrica o a idrogeno

Come spiegato in precedenza, per il sistema propulsivo dei velivoli eVTOL il modello che calcola i costi di manutenzione per i velivoli tradizionali non risulta essere più valido. Il sistema descritto fino ad ora, infatti, è in grado di calcolare solo i costi manutentivi per l'impianto di propulsione a combustione che su questo tipo di velivoli non è presente.

Per tutte le nuove componenti del velivolo relative all'alimentazione a batterie o fuel cell sono state impostate delle relazioni apposite in grado di stimare i costi relativi alla loro manutenzione. Le variabili che regolano le CERs per costi manutentivi relativi alle voci sopracitate sono riportate in Figura 4.7.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
Price,battery	Costo della batteria	US\$	Prezzo di mercato del pacco batterie
Price,cable	Costo dei cavi elettrici	US\$	Prezzo di mercato dei cavi elettrici
Price,Emotor	Costo del motore elettrico	US\$	Prezzo di mercato dei motori elettrici
ncycles,flight	Porzione di batteria per missione	-	Frazione della batteria utilizzata per la singola missione sul totale
ncycles,max	Cicli massimi batteria	-	Cicli massimi di carica e scarica della vita operativa della batteria
MTBMAi	Intervalli manutenzione	h	Intervalli regolari di ore per effettuare la manutenzione
Maint,cost	Spesa attività di manutenzione	US\$	Percentuale sul prezzo di acquisto del componente per la manutenzione

Figura 4.7: Variabili necessarie per i costi di manutenzione velivoli eVTOL

Per le batterie si è previsto il ricambio di queste una volta raggiunti il numero di cicli massimi di utilizzo in base al tipo di batteria selezionato ($n_{cycles,max}$). Si è tenuto conto del fatto che durante la singola missione non viene utilizzata l'intera carica di una batteria, si tiene conto di questo con il valore $n_{cycles,flight}$ che esprime la percentuale di batterie utilizzata per una singola missione sul totale di carica. Le batterie, inoltre, alla fine della loro vita operativa nell'aviazione, possono essere riutilizzate in altri ambiti con altri scopi o semplicemente possono essere riciclate parti di esse, si è dato un valore della batteria al termine della sua vita operativa detto $RES_{Battery}$.

Noti questi dati è possibile calcolare il costo di manutenzione annuo delle batterie come:

$$DOC_{maint,battery} = \frac{Price_{battery} \cdot (1 - Res_{battery})}{n_{cycles,max}} \cdot n_{cycles,flight} \cdot n_{trips} \quad (4.17)$$

Per gli altri componenti del sistema propulsivo dei velivoli elettrici sono state sviluppate specifiche CERs in cui si tiene in considerazione la spesa relativa all'acquisto di pezzi di ricambio e di eventuali attività manutentive come $MaintCost_i$. Si ipotizzato, inoltre che tali spese avvengono a intervalli regolari espressi in ore detti Mean Time Between MAintenance ($MTBMA_i$). Il prezzo dei vari componenti in esame deriva da il modello di costi per sviluppo e produzione velivoli eVTOL [34] ($Price_i$).

La spesa annua per la manutenzione della componentistica relativa alla propulsione elettrica sarà quindi pari a:

$$DOC_{maint,i} = \frac{Price_i \cdot MaintCost_i}{MTBMA_i} \cdot BH \cdot n_{trips} \quad (4.18)$$

4.1.6 Costi per interruzioni operative

Nell'aviazione tradizionale le compagnie aeree sono soggette a costi ulteriori qualora presentassero ritardi o cancellazioni. Quando questo avviene le compagnie aeree devono essere in grado di provvedere ad un eventuale rimborso totale o parziale del costo del biglietto.

Per i velivoli eVTOL è stato necessario andare a modificare le CERs dell'aviazione classica in quanto questa prevede un numero di passeggeri molto più alto rispetto a quello tipico dei velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale. Le variabili da inserire per calcolare i costi relativi alle interruzioni operative vengono riportati in Figura 4.8.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
CR	Tasso di cancellazione	-	Tasso medio di cancellazione dei voli in un anno
n-seats	Numero di posti passeggeri	-	Numero massimo di passeggeri imbarcabili
Ccanc	Costo di cancellazione	US\$	Costo di cancellazione medio per passeggero
DR	Tasso medio di ritardo	-	Tasso medio di ritardo dei voli in un anno
Flight,price	Costo singolo biglietto	US\$	Prezzo di mercato di un biglietto
Refound	Percentuale di rimborso	-	Percentuale sul totale del biglietto che viene rimborsata

Figura 4.8: Variabili necessarie per i costi per interruzioni operative

Per calcolare i costi relativi al ritardo si è usata la seguente relazione:

$$DOC_{delay} = Refound \cdot DR \cdot n_{seats} \cdot Flight_{price} \cdot n_{trips} \quad (4.19)$$

In cui DR è il tasso medio in un anno dei velivoli mentre $Refound$ rappresenta la percentuale di spesa che viene rimborsata sul totale del biglietto in caso di importanti ritardi.

Per quanto riguarda i costi di cancellazione questi vengono calcolati utilizzando la seguente formula:

$$DOC_{cancellation} = CR \cdot C_{canc} \cdot n_{seats} \cdot n_{trips} \quad (4.20)$$

In questo caso si ipotizza una spesa media di cancellazione (C_{canc}) che si moltiplica per il tasso medio di cancellazione dei voli in anno (CR). Il tutto viene moltiplicato per i posti a sedere disponibili sul velivolo (n_{seats}) e per il numero di viaggi annui (n_{trips}) per avere come risultato la spesa annua totale.

4.2 Costi Operativi Indiretti (IOC)

I costi operativi indiretti sono tutte quelle voci di costo non imputabili ad un singolo servizio, prodotto o processo. Si tratta di costi che generalmente si riferiscono ad attività

aziendali nel loro complesso. Nel caso specifico dell'aviazione di velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale si dividono in cinque voci principali:

- Servizio passeggeri: comprende tutti i servizi e l'assistenza che viene messa a disposizione a bordo per i viaggiatori;
- Costi di terra: spese relative all'infrastruttura di terra che comprendono sia l'ammortamento che il mantenimento delle strutture ma anche i costi relativi al personale di terra;
- Costi di vendita, prenotazione e pubblicità: spese relative al supporto alla vendita, gestione delle prenotazioni e interfaccia con i clienti e costi di marketing pubblicitario;
- Spese generali: costi relativi all'amministrazione e gestione del servizio;
- Servizi di traffico: spese per la gestione dei passeggeri e dei bagagli.

A differenza dei costi operativi diretti, in questo caso, si è scelto di mantenere le CERs dei costi operativi indiretti invariate rispetto al modello originale [33] in quanto questi non vengono influenzati dal tipo di propulsione. Di seguito troviamo le equazioni per calcolare le prime quattro voci di costo:

$$IOC_{PaxService} = 0.0079 \cdot Coeff3 \cdot n_{seats} \cdot Range \cdot n_{trips} \cdot CEF \quad (4.21)$$

$$IOC_{Ground} = 0.0092 \cdot Coeff3 \cdot n_{seats} \cdot Range \cdot n_{trips} \cdot CEF \quad (4.22)$$

$$IOC_{Rserve\&sales} = 0.0076 \cdot Coeff3 \cdot n_{seats} \cdot Range \cdot n_{trips} \cdot CEF \quad (4.23)$$

$$IOC_{General\&Adm} = 0.0072 \cdot Coeff3 \cdot n_{seats} \cdot Range \cdot n_{trips} \cdot CEF \quad (4.24)$$

Queste prime quattro voci sono tutte in funzione della distanza percorsa durante la missione dal velivolo ($Range$) e vengono corrette tramite l'inserimento del valore $Coeff3$ che tiene conto del cambiamento dell'inflazione dall'anno di pubblicazione che è pari a 1.34.

La voce di costo relativa ai servizi di traffico, infine, viene calcolata sfruttando la seguente formula:

$$IOC_{TrafficService} = 13 \cdot Coeff4 \cdot n_{seats} \cdot Paxload \cdot n_{trips} \cdot CEF \quad (4.25)$$

Il valore di riferimento per i servizi di traffico è 13\$/passeggero, prezzo che viene aggiornato all'anno corrente tramite l'inserimento di un coefficiente correttivo di inflazione ($Coeff4$). In questo caso il tutto viene moltiplicato per il numero effettivo di passeggeri imbarcati e di conseguenza il tasso di riempimento del velivolo ($Paxload$) in quanto la spesa è applicata solo ai passeggeri che vengono imbarcati in maniera effettiva.

Capitolo 5

Modello di stima dei costi operativi di un vertiporto

I vertiporti sono stati descritti nel Capitolo 2 come strutture specializzate progettate per il decollo e l'atterraggio di velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL). Queste infrastrutture sono essenziali per facilitare il trasporto aereo urbano, il trasporto merci e altre operazioni aeree.

Un vertiporto tipico è dotato di piattaforme di decollo e atterraggio appositamente progettate per consentire un accesso agevole ai velivoli eVTOL. Possono essere situati su grattacieli, edifici, piattaforme offshore o in altre aree urbane e remote.

Il posizionamento dei vertiporti all'interno della rete di trasporti urbana è uno dei principali discriminanti nel determinare il mercato del trasporto aereo urbano in quanto gli unici tragitti possibili possono avvenire esclusivamente tra un vertiporto e l'altro. Tutto questo a sua volta regolerà il numero di combinazioni di viaggio possibili con relative tempistiche andando a dimensionare totalmente il servizio all'interno di un centro urbano. Per capire quanto un'opera urbanistica del genere sia attuabile ma soprattutto sostenibile nel lungo termine a livello di spese è stato necessario andare ad analizzare i costi operativi annui di tale infrastruttura.

In questo caso la sfida è stata ancora più impegnativa in quanto ad oggi, se a livello di velivolo si è già arrivati ad una prototipazione avanzata, per quanto riguarda le infrastrutture si hanno veramente pochi esempi operativi e nessuna applicazione urbana esistente. Per ovviare a questo problema si è fatto riferimento alle normative in vigore per gli eliporti e aeroporti oltre a prendere in esame letteratura sperimentale relativa ai vertiporti.

Il modello di costi operativi sviluppato è stato fatto a partire da zero cercando di dare prima una stima del capitale investito per ogni singola configurazione di vertiporto esistente (vertihub, vertibase, vertipad) andando a stimare, tramite un'analisi bottom-up anche i consumi energetici complessivi della struttura. Successivamente seguendo le linee guida generali dei costi operativi questi sono stati suddivisi in due grosse categorie: costi operativi diretti (DOC) e costi operativi indiretti (IOC).

Come nel caso precedente il modello di costo prevede l'inserimento di input per configurare il vertiporto con le caratteristiche desiderate, tali valori vengono processati da apposite

CERs che restituiscono in output i costi operativi annui dell'infrastruttura. Non avendo a disposizione numerosi dati storici spesso è stato necessario fare delle assunzioni cercando sempre di supportare tali decisioni da evidenze scientifiche.

Il modello è stato del tutto sviluppato in ambiente .xlsx e oltre a calcolare i costi operativi di un singolo vertiporto è in grado di stimare i costi operativi annui che una città deve affrontare per sostenere tale infrastruttura all'interno della propria rete urbana. L'utente, infatti, può selezionare il numero di vertihub, vertibase e vertipad da inserire all'interno del contesto urbano e in base a questo creare una rete più o meno fitta di piattaforme a disposizione del servizio di mobilità aerea interna urbana.

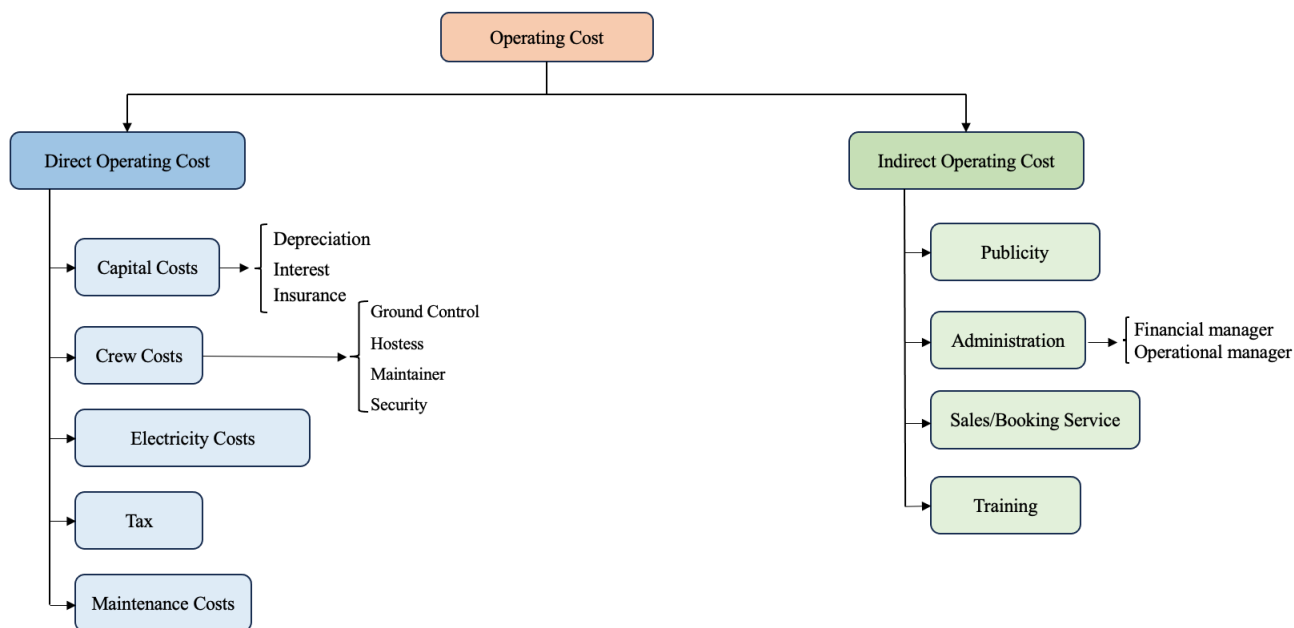


Figura 5.1: CBS costi operativi vertiporti

5.1 Costi Operativi Diretti (DOC)

Nel caso di vertiporti i costi operativi diretti si dividono in cinque voci principali :

- Costi di capitale;
- Costi di equipaggio;
- Costi di elettricità;
- Tasse;
- Costi di manutenzione.

Come si può vedere in Figura 5.1 alcune di queste voci a loro volta presentano sottocategorie in grado di rendere l'analisi sempre più accurata

5.1.1 Costi sul capitale di un vertiporto

Per stimare i costi di capitale è stato prima necessario valutare e studiare il capitale delle diverse configurazioni di vertiporto. Per fare ciò sono state analizzate numerose pubblicazioni relative ai vertiporti per poter andare a stilare una lista completa delle varie componenti che sono presenti all'interno di un vertiporto. Una volta fatto ciò si è cercato di assegnare un valore unitario per ogni singola componente che poteva essere opportunamente moltiplicato per il numero con cui si desiderava configurare la propria infrastruttura. In questo modo era possibile generare diverse configurazioni con strutture più o meno grandi o magari andando a inserire o eliminare elementi superflui per una configurazione ma magari necessari per un'altra. Con questo approccio si dà all'utente la possibilità di poter configurare l'infrastruttura a proprio piacimento e eventualmente valutare il peso, a livello economico, della presenza o meno di un servizio.

Il risultato di tale analisi è raccolto all'interno della Figura 5.2

Componente	Costo [US\$]	Descrizione
Pad decollo/atterraggio	\$300.000	Piattaforma per il decollo e l'atterraggio dei velivoli eVTOL
Pad parcheggio	\$150.000	Piattaforma per il parcheggio dei velivoli eVTOL
Charger normale	\$10.000	Charger per la carica dei velivoli eVTOL che permette una carica standard
Supercharger	\$200.000	Charger per la carica dei velivoli eVTOL che permette una carica veloce
Impianto idrogeno liquido (200l)	\$30.000	Impianto necessario a mantenere l'idrogeno liquido criogenico
Hangar (60m2)	\$80.000	Hangar per parcheggio dei velivoli eVTOL
Sistema di sicurezza	\$5.000	Sistema di videosorveglianza del sito
Sistema antincendio	\$20.000	Sistema di sicurezza per estinguere incendi in maniera manuale
Cabina di controllo (40m2)	\$73.000	Cabina per i controllori di terra
Area passeggeri (40m2)	\$50.000	Area per la sosta dei passeggeri durante le fasi di imbarco/sbarco
Faro	\$2.000	Faro per la segnalazione del vertiporto
5G antenna	\$45.000	Antenna per telecomunicazioni 5G
Parcheggio (10 auto)	\$8.000	Parcheggio per personale e passeggeri del vertiporto

Figura 5.2: Costi componenti vertiporto

Una volta noto il capitale iniziale investito per la costruzione del vertiporto è possibile andare a calcolare i costi operativi annui di capitale che si dividono a loro volta in :

- Spese di ammortamento della spesa iniziale ;
- Oneri di interessi sul capitale investito;
- Costi di assicurazione.

$$DOC_{cap} = DOC_{dep} + DOC_{int} + DOC_{ins} \quad (5.1)$$

Le variabili necessarie da inserire all'interno del modello come input per il calcolo dei costi di capitale annui sono riportate in Figura 5.3

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
res	Valore residuo	%	Valore di mercato del velivolo alla fine del deprezzamento, in percentuale sul totale del velivolo
VC	Prezzo del velivolo	US\$	Prezzi di mercato del vertiporto
P _{int}	Periodo di interessi	anni	Anni previsti per il pagamento del vertiporto
P _{dep}	Periodo di deprezzamento	anni	Durata del periodo di deprezzamento
IR	Tasso di interessi	%	Percentuale annua come interesse sul valore del vertiporto
FV	Valore futuro	US\$	Valore di mercato del vertiporto al termine del periodo di interessi

Figura 5.3: Variabili costi di capitale vertiporto

Le varie voci di costo prima elencate sono state calcolate seguendo le relazioni di seguito descritte.

Costi di deprezzamento

I costi annui relativi a deprezzamento di un vertiporto sono stati calcolati usando la seguente relazione:

$$DOC_{dep} = (1 - res) \frac{VC}{P_{dep}} \quad (5.2)$$

Il costo finale del vertiporto (VC) viene preso dalla somma del capitale descritta precedentemente. Si ipotizza un periodo di deprezzamento (P_{dep}) del vertiporto pari a 40 anni al termine del quale l'infrastruttura presenterà un valore residuo (res) pari al 40% del valore iniziale. Come si può facilmente notare i valori in questo caso sono molto più alti rispetto a quelli dei velivoli che tendono a perdere di valore in meno tempo.

Costi per gli interessi

I costi relativi agli interessi annui su un vertiporto si calcolano tramite la seguente relazione:

$$DOC_{int} = \frac{IR(VC - FV)}{1 - (1 + IR)^{-P_{int}}} - \frac{VC}{P_{int}} \quad (5.3)$$

Questi costi vengono calcolati nel caso in cui l'acquisto del vertiporto sia avvenuto con l'ausilio di intermediari come le banche. Si è mantenuta una struttura molto simile a quella relativa ai velivoli in quanto gli interessi su un bene non vengono particolarmente influenzati dal bene in questione, bensì, da parametri come il valore iniziale del vertiporto (VC), il valore del vertiporto alla fine del periodo di deprezzamento (FV), il periodo per il pagamento degli interessi (P_{int}) e il valore degli interessi (IR) espressi in percentuale.

Costi assicurativi

L'ultima voce dei costi di capitale è quella relativa ai costi assicurativi che viene calcolata annualmente utilizzando la seguente formula:

$$DOC_{ins} = 0.01 \cdot VC \quad (5.4)$$

I costi assicurativi di un vertiporto saranno pari al 1% del valore di mercato iniziale del vertiporto come riportato nell'Equazione 5.4.

5.1.2 Costi del personale di un vertiporto

$$DOC_{Crew} = DOC_{ControlCrew} + DOC_{HostessCrew} + DOC_{MaintainerCrew} + DOC_{SecurityCrew} \quad (5.5)$$

Nei costi che riguardano l'equipaggio rientrano i costi relativi al personale che lavora all'interno del vertiporto. All'interno del personale sono stati individuate quattro categorie di lavoratori principali necessarie al funzionamento operativo del vertiporto che vengono inserite nel modello come input. Tali variabili sono riportate in figura 5.4

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
n-control	Numero di controllori di terra	-	Numero di controllori per il traffico aereo del vertiporto
n-hostess	Numero di assistenti di terra	-	Numero di assistenti di terra necessari all'assistenza passeggeri
n-maintainer	Numero di manutentori	-	Numero di personale addetto alla manutenzione dei velivoli
n-security	Numero di vigilanti	-	Numero di personale addetto alla sicurezza del vertiporto

Figura 5.4: Variabili costi di equipaggio vertiporto

Tra il personale individuato rientrano i controllori di terra (*ControlCrew*), gli assistenti di terra (*HostessCrew*), i manutentori del vertiporto (*MaintainerCrew*) e il personale addetto alla sicurezza (*SecurityCrew*).

$$DOC_{ControlCrew} = Lr_{ControlCrew} * n_{ControlCrew} \quad (5.6)$$

$$DOC_{HostessCrew} = Lr_{HostessCrew} * n_{HostessCrew} \quad (5.7)$$

$$DOC_{MaintainerCrew} = Lr_{MaintainerCrew} * n_{MaintainerCrew} \quad (5.8)$$

$$DOC_{SecurityCrew} = Lr_{SecurityCrew} * n_{SecurityCrew} \quad (5.9)$$

Come si può vedere nelle equazioni appena elencati i costi relativi agli stipendi del personale vengono calcolati andando a moltiplicare il numero di lavoratori per la corrispettiva paga annuale che varia in funzione della mansione. Facendo la somma di tutti gli elementi si ottiene il valore annuo dei costi operativi diretti relativi al personale.

5.1.3 Costi per l'elettricità vertiporto

Per quanto riguarda i consumi dell'aeroporto è stata effettuata una stima molto simile a quella relativa ai costi di capitale. In questo caso si è cercato di stimare i consumi energetici annui delle componenti del vertiporto di cui in precedenza erano stati stimati i costi. Anche in questo caso è stata effettuata un'analisi di tipo bottom-up la cui somma riusciva a dare in output il valore medio dei consumi annui a livello energetico di un vertiporto.

In questo tipo di analisi, come nella precedente, è possibile andare a personalizzare il consumo di una determinata configurazione di vertiporto (vertihub, vertibase e vertipad)

oppure decidere l'eventuale presenza o meno dei determinate apparecchiature o servizi o magari modificarne il numero per valutare come questi impattino sui consumi energetici di un vertiporto e di conseguenza sui suoi costi operativi annui.

Il risultato di tale analisi è riportato in Figura 5.5

Componente	Consumi [kWh/year]	Descrizione
Pad decollo/atterraggio	1641,60	Piattaforma per il decollo e l'atterraggio dei velivoli eVTOL
Pad parcheggio	0,00	Piattaforma per il parcheggio dei velivoli eVTOL
Charger normale	50000,00	Charger per la carica dei velivoli eVTOL che permette una carica standard
Supercharger	60000,00	Charger per la carica dei velivoli eVTOL che permette una carica veloce
Impianto idrogeno liquido (200l)	220,00	Impianto necessario a mantenere l'idrogeno liquido criogenico
Hangar (60m2)	735,80	Hangar per parcheggio dei velivoli eVTOL
Sistema di sicurezza	220,00	Sistema di videosorveglianza del sito
Sistema antincendio	0,00	Sistema di sicurezza per estinguere incendi in maniera manuale
Cabina di controllo (40m2)	2700,00	Cabina per i controllori di terra
Area passeggeri (40m2)	2200,00	Area per la sosta dei passeggeri durante le fasi di imbarco/sbarco
Faro	219,00	Faro per la segnalazione dle vertiporto
5G antenna	21000,00	Antenna per telecomunicazioni 5G
Parcheggio (10 auto)	1146,00	Parcheggio per personale e passeggeri del vertiporto

Figura 5.5: Consumi energetici annui vertiporto

Il vertiporto è del tutto alimentato da energia elettrica di di conseguenza ai consumi ad essa legati sono in funzione delle variabili riportate in Figura 5.6

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
Etot	Energia elettrica richiesta	kWh	Quantità di energia richiesta dal vertiporto per il funzionamento operativo annuo
Eprice	Costo energia elettrica	US\$/kWh	Prezzo di mercato dell'energia elettrica nel 2024
eff-chargeE	Efficienza di ricarica elettrica	-	Efficienza che tiene conto delle perdite che si hanno lungo la rete e durante i processi di ricarica

Figura 5.6: Variabili per il calcolo costi energia elettrica vertiporto

Il costo operativo annuo legato al consumo di energia elettrica si calcola con la seguente equazione:

$$DOC_{electricity} = \frac{E_{tot} \cdot E_{price}}{\eta_{charge}} \quad (5.10)$$

L'energia totale utilizzata all'interno del vertiporto (E_{tot}) viene presa direttamente dall'analisi bottom-up precedentemente descritta per poi essere moltiplicata per il prezzo più aggiornato possibile dell'energia elettrica (E_{price}). Il tutto viene diviso per il valore η_{charge} che rappresenta eventuali perdite nel circuito elettrico o perdite che si hanno durante il processo di ricarica.

5.1.4 Tasse vertiporto

I vertiporti, strutture dedicate all'atterraggio e al decollo di velivoli verticali, sono soggette a una serie di imposte che devono essere considerati all'interno della stima dei costi operativi annuali.

In questo momento non ci sono vertiporti attivi e per loro non è stata ancora impostata una vera e propria legislazione di conseguenza si è cercato di ipotizzare eventuali voci di costo legate a questi oneri che possono variare a seconda della giurisdizione e delle

normative locali, oltre che dalle dimensioni e dall'uso specifico del vertiporto. Di seguito vengono elencate le voci principali individuate:

- **Tasse di proprietà e tasse immobiliari:** I vertiporti che possiedono terreni o strutture immobiliari possono essere soggetti a tasse di proprietà e tasse immobiliari. Queste tasse sono basate sul valore della proprietà e sono spesso stabilite dalle autorità locali.
- **Tasse ambientali e di gestione dei rifiuti:** I vertiporti potrebbero essere soggetti a tasse ambientali o di gestione dei rifiuti se sono coinvolte in attività che possono avere un impatto sull'ambiente circostante. Queste tasse possono essere applicate per la gestione dei rifiuti generati dal vertiporto o per eventuali impatti ambientali delle attività aeree.
- **Tasse sul reddito o sui profitti:** Se il vertiporto è gestito come un'azienda commerciale, potrebbe essere soggetto a tasse sul reddito o sui profitti derivanti dalle sue attività. Queste tasse sono basate sul reddito generato dal vertiporto e sono soggette alle leggi fiscali locali.

Non avendo molti dati a disposizione si è deciso di unire tutte queste voci sotto una sola voce di tasse che è stata calcolata con la seguente formula:

$$DOC_{tax} = 0.25 \cdot VC \quad (5.11)$$

I costi annui relativi alle tasse sono stati imposti pari a circa il 25% del valore del costo di capitale del vertiporto, pari al 20% legata alla tassazione che solitamente viene imposta ai beni immobiliari che sono la voce maggiore di costi più un 5% per le restanti voci di costo prima citate.

5.1.5 Costi di Manutenzione del vertiporto

La manutenzione è un aspetto cruciale nell'operatività di un vertiporto, poiché assicura che le strutture, le attrezzature e le infrastrutture siano in condizioni ottimali per garantire la sicurezza e l'efficienza delle operazioni aeree. Anche in questo caso, non avendo esempi operativi, si è cercato di individuare le principali operazioni di manutenzione principali e sono state individuate le voci di seguito elencate:

- **Manutenzione delle piattaforme di atterraggio:**

Le piattaforme di atterraggio devono essere controllate regolarmente per garantire la sicurezza degli atterraggi e dei decolli. Ciò include la riparazione di crepe, la pulizia delle superfici da detriti e la segnalazione di eventuali danni o irregolarità. I costi di manutenzione delle superfici di atterraggio possono variare in base alle dimensioni del vertiporto e al tipo di materiale utilizzato per le superfici di atterraggio.

- **Manutenzione degli edifici e delle strutture:**

I vertiporti possono avere una serie di edifici e strutture, tra cui terminali passeggeri, hangar, torri di controllo e altre infrastrutture. La manutenzione di queste strutture può includere la riparazione di tetti, la verniciatura, la manutenzione degli impianti elettrici e idraulici, nonché la pulizia e la manutenzione generale degli edifici.

- **Manutenzione degli equipaggiamenti e delle attrezzature:**

I vertiporti utilizzano una vasta gamma di equipaggiamenti e attrezzature per supportare le operazioni aeree, tra cui sistemi di illuminazione, segnaletica, sistemi di comunicazione e attrezzature di sicurezza. La manutenzione di questi equipaggiamenti è essenziale per garantire che siano operativi e sicuri per l'uso. Ciò può includere la manutenzione preventiva, la riparazione di guasti e l'aggiornamento tecnologico.

- **Manutenzione dei sistemi di navigazione e controllo del traffico aereo:**

I vertiporti possono essere dotati di sistemi di navigazione e controllo del traffico aereo per garantire la sicurezza e l'efficienza delle operazioni aeree. La manutenzione di questi sistemi è fondamentale per garantire che siano in grado di fornire servizi di navigazione e controllo affidabili, precisi e sicuri.

Come per i costi relativi alle tasse, anche in questo caso si è cercato in studi o pubblicazioni un valore cumulativo che potesse rappresentare tutte le voci di costo prima elencate.

Il valore annuo dei costi di manutenzione è pari a:

$$DOC_{maint} = 0.05 \cdot VC \quad (5.12)$$

In alcuni studi, infatti si è individuato che il valore che viene mediamente investito nella manutenzione è pari al 5% del capitale iniziale investito per i piccoli aeroporti [36], di conseguenza si è scelto tale valore per calcolare i costi generali di manutenzione annuali di un vertiporto.

5.2 Costi Operativi Indiretti (IOC)

Mentre i costi diretti come quelli relativi alla manutenzione delle piattaforme di atterraggio e decollo o di parcheggio e all'assistenza a terra sono più evidenti e tangibili, i costi operativi indiretti rivestono un ruolo altrettanto cruciale nel garantire un funzionamento efficiente e sicuro del vertiporto.

Questi costi indiretti comprendono una vasta gamma di spese che non sono immediatamente associate alle operazioni giornaliere del vertiporto ma che contribuiscono in modo significativo alla sua operatività complessiva e alla soddisfazione delle esigenze degli utenti. Essi abbracciano aspetti quali la gestione amministrativa, la sicurezza, la conformità normativa, lo sviluppo delle risorse umane e la gestione delle relazioni con gli stakeholder.

Come è possibile vedere in Figura 5.1 le voci principali relative ai costi operativi indiretti sono:

- Costi per la pubblicità e il marketing ;
- Costi di amministrazione;
- Costi per i servizi di vendita e prenotazione;
- Costi per la formazione del personale.

Di seguito si analizzano nel dettaglio le voci appena elencate.

Costi per la pubblicità e il marketing

Nell'ambito dei vertiporti, la pubblicità e il marketing svolgono un ruolo cruciale nel promuovere il vertiporto, attrarre passeggeri e operatori, e consolidare la sua posizione competitiva nel mercato dell'aviazione. I costi associati alla pubblicità e al marketing rappresentano quindi un investimento strategico per garantire una visibilità efficace del vertiporto.

Tra le voci di costi principali relative alla pubblicità sono state individuate :

- Pubblicità tradizionale: Questo include spese per pubblicità su mezzi tradizionali come stampa (giornali, riviste), radio e televisione.
- Pubblicità online: La pubblicità digitale è diventata sempre più importante, questo può includere spese per annunci sui motori di ricerca, sui social media e su altri siti web pertinenti. I costi per la pubblicità online dipendono dalla strategia di targeting e dalla quantità di traffico desiderata.
- Personale: I costi per il personale dedicato al marketing e alla pubblicità devono essere considerati comprendendo i salari dei dipendenti e la formazione e lo sviluppo professionale.

Le variabili da inserire per calcolo dei costi pubblicitari sono riportate in Figura 5.7.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
n-marketing	Numero di personale addetto	-	Numero di personale addetto al marketing e alla pubblicità
VC	Costo vertiporto	US\$	Prezzo di mercato vertiporto

Figura 5.7: Variabili per il calcolo dei costi pubblicitari vertiporto

Il totale dei costi investiti annualmente in pubblicità viene calcolato come:

$$IOC_{pub} = 0.05 \cdot VC + n_{marketing} * Lr_{marketing} \quad (5.13)$$

Per calcolare i costi relativi alla pubblicità si è stimato possano essere pari al 5% del costo di mercato di un vertiporto a cui bisogna sommare i costi del personale che se ne occupa andando a moltiplicare lo stipendio medio annuo per il numero di lavoratori assunti.

Costi di amministrazione

I costi di amministrazione svolgono un ruolo fondamentale nel garantire un funzionamento efficiente e affidabile del vertiporto. Questi costi includono una vasta gamma di spese necessarie per gestire e supervisionare le operazioni quotidiane, nonché per soddisfare le esigenze amministrative di un vertiporto.

Nel caso dei costi di amministrazione le spese calcolate sono relative al personale che si occupa di tali attività.

Le variabili necessarie al calcolo di tali spese sono raccolte in Figura 5.8.

Variabile	Nome	Unità	Descrizione
n-finance	Numero di personale addetto	-	Numero di personale addetto alla gestione delle finanze
n-op	Numero di personale addetto	-	Numero di personale addetto alla gestione operativa del vertiporto

Figura 5.8: Variabili per il calcolo dei costi di amministrazione vertiporto

L'equazione per il calcolo di tali costi è la seguente:

$$IOC_{amm} = n_{finance} \cdot Lr_{finance} + n_{op} \cdot Lr_{op} \quad (5.14)$$

Tra le figure professionali individuate per la gestione amministrativa di un vertiporto sono stati individuati: il responsabile della gestione delle finanze che si occupa della supervisione e della gestione efficace delle attività finanziarie del vertiporto oltre ad un manager operativo che risulta essere responsabile della supervisione e dell'implementazione delle attività operative quotidiane del vertiporto.

Il costo di tale spesa viene stimato andando a moltiplicare in numero di personale previsto per tali mansioni ($n_{finance}$, n_{op}) per il corrispettivo salario annuale ($Lr_{finance}$, Lr_{op}), infine viene effettuata la somma tra le due voci.

Costi di prenotazione e vendita

I costi associati alla prenotazione e alla vendita sono necessari per creare un tramite tra il vertiporto ed eventuali clienti.

Vengono calcolati sfruttando la seguente formula:

$$IOC_{selling} = n_{seller} \cdot Lr_{seller} + Software_{cost} \cdot 12 \cdot n_{seller} \quad (5.15)$$

Il costo annuo dei servizi di prenotazione e vendita viene quindi calcolato andando a sommare lo stipendio annuo del personale dedicato più il costo relativo all'utilizzo di un software per la prenotazione e la vendita di servizi. Tale valore si calcola moltiplicando per 12 il costo mensile medio di un software che effettua tali prestazioni per il numero di personale ad avere accesso alla piattaforma.

Costi di formazione

I costi di formazione del personale in un vertiporto includono una serie di spese associate alla preparazione e alla crescita professionale degli addetti che lavorano nella struttura.

Questi costi sono fondamentali per garantire che il personale sia adeguatamente preparato, competente e in grado di svolgere le proprie mansioni in modo sicuro ed efficiente. I costi di formazione del personale in un vertiporto sono un investimento importante per garantire la sicurezza, l'efficienza e il successo complessivo del vertiporto.

Si è fatta assunzione che questi costi fossero in funzione degli stipendi di tutto il personale che opera nel vertiporto infatti tali costi si calcolano con la seguente relazione:

$$IOC_{trainig} = DOC_{crew} \cdot 0.15 \quad (5.16)$$

Per stimare i costi relativi alla formazione del personale è stata moltiplicata la somma di tutti gli stipendi del personale per (DOC_{crew}) per 0.15 in quanto si è ipotizzato che il 15% della somma investita per mantenere l'organico del vertiporto venga reinvestita in formazione e aggiornamento.

Capitolo 6

Casi studio e risultati dei modelli

Per valutare il corretto funzionamento dei modelli sviluppati e la correttezza dei risultati ottenuti sono state effettuate simulazioni con casi reali.

Nel caso del modello di costi operativi per i velivoli sono stati inseriti valori reali di velivoli non ancora in commercio ma ad un livello di progettazione molto avanzato mentre per i costi operativi di un vertiporto sono state testate diverse configurazioni dell'infrastruttura all'interno di realtà urbane.

Entrambi i modelli sono stati validati con studi o pubblicazioni che stimavano complessivamente i costi operativi dei casi in questione.

6.1 Velivoli

I costi operativi dei velivoli sono stati calcolati su 5 velivoli esistenti diversi :

- Liliium della Liliium GmbH;
- Joby S4 della Joby Aviation;
- VoloCity della Volocopter;
- Midnight della Archer Aviation;
- Skai della Alaka'i Technologies.

I dettagli dei velivoli sopra elencati sono descritti all'interno del Capitolo 1. Nella scelta dei velivoli si è cercato di prendere in considerazione diversi tipi di propulsione e diverse configurazioni passeggeri per avere un campionario più ampio e rappresentativo possibile.

6.1.1 Validazione del modello

Per validare il modello di stima dei costi operativi per i velivoli elettrici a decollo e atterraggio verticale sono stati utilizzati principalmente due pubblicazioni che riportavano i risultati finali delle loro analisi: *Urban Air Mobility Market Study* [37] della NASA e *The Impact of Battery Performance on Urban Air Mobility Operations*[22] della MDPI.

Urban Air Mobility Market Study

Lo studio principale su cui si è fatto affidamento è una ricerca condotta dalla NASA (*Urban Air Mobility Market Study* [37]) sul potenziale mercato futuro dell'UAM e dei velivoli eVTOL in cui venivano riportati i valori di alcune voci di costi operativi dei velivoli prendendo dati reali su un grosso campionario di velivoli esistenti e facendo assunzioni verosimili di un eventuale funzionamento operativo.

Componente di costo	Passaggi chiave	Assunzioni chiave		
		Parametro	Min	Max
Costi di capitale e assicurazione	<ul style="list-style-type: none"> Il costo del capitale è la somma del costo di ammortamento e del costo finanziario Valore residuo dell'aeromobile trascurabile L'assicurazione dell'aeromobile è la somma della responsabilità civile e dell'assicurazione della struttura, calcolata come percentuale del prezzo dell'aeromobile 	Vita del veicolo (flight hours)	12k	15k
		Tasso di deprezzamento (%)	5%	10%
		Tasso finanziario (%)	5%	10%
Costo dell'energia e batterie	<ul style="list-style-type: none"> L'energia richiesta è stata calcolata come la somma dell'energia richiesta in ciascuna fase del volo Il dimensionamento del pacco batterie è stato effettuato in base alla missione più lunga e si è ritenuto che il riciclaggio delle batterie fosse trascurabile 	Energia specifica batterie (Wh/kg)	300	400
		Costo specifico della capacità della batteria (\$/kWh)	200	250
		Efficienza conversione energetica (%)	90%	98%
Costo dell'equipaggio	<ul style="list-style-type: none"> Si presuppone un pilota impiegato a tempo pieno per aeromobile e un membro dell'equipaggio di terra impiegato a tempo pieno nei primi anni di servizio Ogni membro dell'equipaggio segue una formazione annuale 	Salario annuale pilota (US\$)	50k	90k
		Salario annuale equipaggio di terra (US\$)	20k	30k
Costi dell'infrastruttura	<ul style="list-style-type: none"> Costo dell'infrastruttura calcolato estrapolando l'architettura e la costruzione in stile garage per adattarsi a un velivolo La stessa infrastruttura è stata utilizzata anche per parcheggiare l'aereo durante la notte. 	Costo di un supercharger (US\$)	200k	300k
		Costo di un charger regolare (US\$)	10k	20k
Costi di manutenzione	<ul style="list-style-type: none"> Calcolato in base al numero di missioni moltiplicando il rapporto tra le ore di manodopera di manutenzione e le ore di volo e il tasso di avvolgimento dei meccanici 	Costo manutentore (US\$/h)	\$60	\$100
		Ore di manutenzione per ora di volo	0.25	1

Figura 6.1: Assunzioni chiave modello costi NASA [37]

Nello studio in questione sono stati applicati sei tipi di eVTOL differenti configurazione da 1 fino a 5 posti. Il risultato riportato in output era espresso in costo per passeggero per

miglia nautiche facendo una media tra le varie configurazioni di velivolo. Con questi valori è stato costruito un range di costo con cui andare a confrontare i valori in uscita del nostro modello espressi nella medesima misura.

Nella Figura 6.1 sono riportate le assunzioni principali fatte durante lo studio dei costi operativi dei velivoli eVTOL usati per validare il nuovo modello. I risultati ottenuti dallo studio NASA sono raccolti in Figura 6.2. Vengono riportati come intervalli tra il prezzo più alto e il più basso delle varie configurazioni. Il modello risulta valido se i risultati che si ottengono appartengono all'intervallo indicato più un margine del 20% imposto come margine che può ovviare a variazioni dovute all'inflazione o per assunzioni iniziali differenti.

Costi operativi	
Voce	US\$/nm/pax
Capitale	1,08-1,87
Equipaggio	0,53-2,03
Elettricità/idrogeno	0,20-0,24
Tasse	0,63-1,53
Manutenzione	0,72-1,88
Costi indiretti	0,88-2,00

Figura 6.2: Risultati finali modello NASA [37]

The Impact of Battery Performance on Urban Air Mobility Operations

Lo scopo principale di questo studio non è la stima dei costi operativi dei velivoli eVTOL bensì valutare come le caratteristiche delle batterie influenzano i costi operativi diretti di un velivolo elettrico a decollo e atterraggio verticale. Nel fare questo, però, è stato sviluppato un modello di costo che stima i costi operativi diretti di alcuni velivoli campione su un profilo di volo standard e ne riporta i risultati.

Anche nel caso di questo modello venivano fatte delle assunzioni che rimanevano costanti per tutti i velivoli e sono le seguenti:

- tempo di volo annuale: 200 ore
- tasso di ammortamento del velivolo: 0.1
- costo di acquisizione batteria: 400 \$/kWh
- numero massimo di cicli batteria: 2000

Sono stati analizzati quattro velivoli: VoloCity, Archer Maker, Wisk Cora e Joby S4. Sono stati utilizzati i white paper forniti dalle aziende produttrici per le specifiche dei vari velivoli e sono stati ipotizzati profili di volo specifici per ogni velivolo riportati in tabella 6.1

Parametro	VoloCity	Archer Maker	Wisk Cora	Joby S4
Passeggeri	1	1	1	4
Velocità di crociera (m/s)	49.2	67.1	25.0	73.8
Range (km)	35.4	96.6	99.8	214.4
MTOW (kg)	900.0	1508.0	1224.0	2177.0
Capacità batteria (kWh)	83.3	74.0	63.0	200.0
L/D	2.5	11.3	13.9	13.8

Tabella 6.1: Specifiche dettagliate di quattro veicoli commerciali UAM [22]

Ipotizzando profili di volo diversi con velivoli con tipi di propulsione e configurazione interna differenti i risultati non risultano essere molto omogenei tra loro pur rimanendo nello stesso ordine di grandezza. I risultati dei costi operativi diretti calcolati all'interno dello studio sono riportati in Figura 6.3.

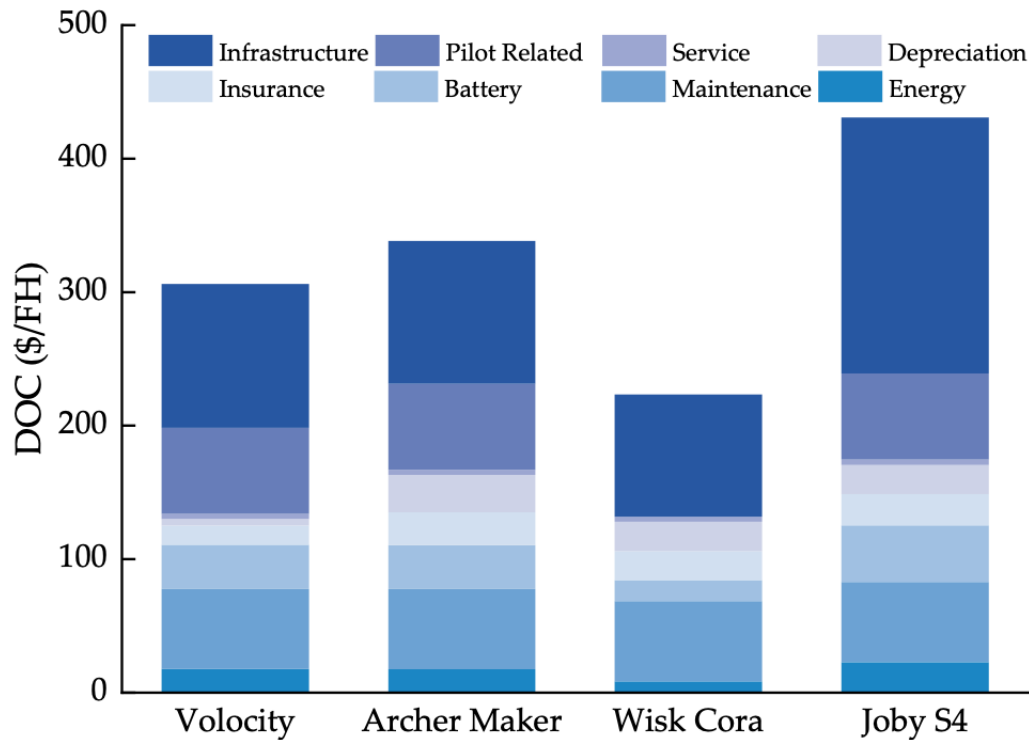


Figura 6.3: Risultati finali modello MDPI [22]

Il risultato finale è espresso in dollari per ora di volo che vanno da un massimo di 420 US\$/FH per il velivolo Joby S4 fino a un minimo di 220 US\$/FH per il velivolo Wisk Cora.

Per la validazione del nuovo modello tali risultati sono stati adattati al nuovo profilo di volo della nostra analisi e normalizzati con le caratteristiche di altri modelli di velivolo che non sono presenti all'interno del modello MDPI.

6.1.2 Risultati velivoli

Il campione di velivoli esaminati presenta configurazioni interne che vanno da 2 a 7 posti e presentano tutti e tre i tipi di propulsione: vectored thrust, lift + cruise, multirotor wingless. Tutti i velivoli analizzati sono stati testati su una missione di volo standard media che potesse coprire sia piccoli spostamenti urbani sia grandi spostamenti extraurbani. Le assunzioni che sono state fatte in generale sono le seguenti:

- numero viaggi annuali velivolo: 4380;
- durata media della missione: 0.3 h;
- distanza media missione: 30km;
- valore residuo percentuale del velivolo a fine deprezzamento: 5%;
- periodo di deprezzamento: 20 anni;

Questi valori resteranno standard per tutti i velivoli mentre i restanti valori varieranno con le caratteristiche fiche del velivolo in esame.

Lilium

Il primo velivolo analizzato è il Lilium prodotto dalla Lilium GmbH. Il Lilium è un velivolo 7 posti con un peso totale di 3175 kg alimentato da 36 motori di tipo vectored thrust.

Si è ipotizzata la presenza di un solo pilota, e nessun assistente di volo, che effettua in un anno 4380 volte la missione standard prima descritta. Si è fatta assunzione che il velivolo consumi per ogni missione circa 16 kWh.

Andando a ottenere tutte le specifiche fisiche e di costi del velivolo e facendo le assunzioni precedentemente descritte all'interno del modello di calcolo dei costi operativi si ottengono i risultati riportati in Figura 6.4.

COSTI OPERATIVI TOTALI				
Voce	\$/anno	\$/viaggio	\$/nm/passeggero	
Capitale	\$725.285,29	\$165,59		\$1,46
Equipaggio	\$269.216,95	\$61,47		\$0,54
Elettricità	\$116.003,01	\$26,48		\$0,23
Tasse	\$387.185,26	\$88,40		\$0,78
Manutenzione	\$431.290,50	\$98,47		\$0,87
Interruzioni operative	\$87.381,00	\$19,95		\$0,18
Costi operativi indiretti	\$477.309	\$108,97		\$0,96
TOTALE	\$2.493.670,58	\$569,33		\$5,02

Figura 6.4: Costi operativi velivolo Lilium

I costi operativi annui del velivolo Lilium per l'utilizzo precedentemente descritto ammontano a circa 2.5 milioni di US\$ che per ogni miglio nautico per passeggero è di circa 5,02 US\$ che risulta essere perfettamente in linea con le stime fatte dal modello NASA [37] così come le singole voci di costo.

Rispetto al modello NASA [37] utilizzato per validare il nostro studio non vengono calcolati i costi relativi alle interruzioni operative, di conseguenza non è possibile valutare l'esattezza del risultato. Il valore dei costi relativo alle interruzioni operative viene comunque considerato valido in quanto il totale dei costi operativi risulta essere all'interno del range prestabilito e di conseguenza viene valutato come un valore verosimile in linea con le altre voci di costo.

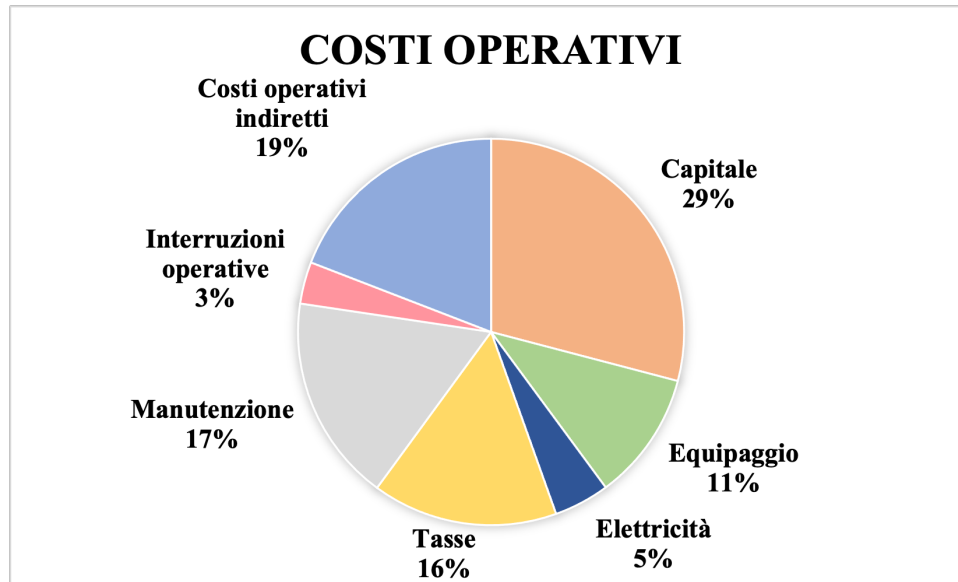


Figura 6.5: Divisione costi operativi velivolo Lilium

In figura 6.5 si può notare in maniera visiva immediatamente come sono distribuite le voci di costo e quali tra queste sono predominanti. Le voci principali di costo sono quelle relative ai costi operativi indiretti (19%), costi di capitale (29%) e costi di manutenzione (17%).

I costi operativi indiretti sono composti da più voci di costo sommate tra loro, come descritto nel Capitolo 4, tali voci si riferiscono principalmente a servizi di assistenza al passeggero e di conseguenza sono strettamente legati al numero di passeggeri imbarcabili dal velivolo. Il velivolo Lilium è il velivolo eVTOL del nostro studio con il numero più alto di passeggeri trasportabili, di conseguenza, il valore dei costi operativi indiretti risulta essere una voce importante.

Il Lilium è il velivolo più grande e più costoso analizzato, di conseguenza, date le sue dimensioni, presenta il costo iniziale più elevato che è il principale responsabile degli alti costi relativi al capitale.

I costi di manutenzione, come tutte le altre voci di costo, hanno valori coerenti con quelli relativi al modello utilizzato per la validazione di conseguenza l'analisi nel complesso risulta corretta e coerente con i valori tipici dell'aviazione e in linea con il modello per la validazione.

Joby S4

Il velivolo Joby S4 viene prodotto dalla Joby Aviation e presenta all'interno 5 posti con un peso complessivo di 2177 kg. Anche in questo caso si tratta di un velivolo vectored thrust ma di dimensioni più piccole che utilizza per la propulsione 6 eliche inclinabili. La missione di volo e la frequenza è la medesima del velivolo precedente con la differenza che il velivolo Joby consuma circa 10 kWh per effettuarla. Inserendo all'interno del modello i valori derivati dalle assunzioni fatte e descritte in precedenza oltre alle specifiche fisiche del velivolo e di costi relativi alla componentistica si ottengono i costi operativi annui del velivolo che sono riportati in Figura 6.6.

COSTI OPERATIVI TOTALI			
Voce	\$/anno	\$/viaggio	\$/nm/passeggero
Capitale	\$435.572,21	\$99,45	\$1,23
Equipaggio	\$221.921,61	\$50,67	\$0,63
Elettricità	\$72.501,88	\$16,55	\$0,20
Tasse	\$313.557,81	\$71,59	\$0,88
Manutenzione	\$367.073,49	\$83,81	\$1,03
Interruzioni operative	\$62.415,00	\$14,25	\$0,18
Costi operativi indiretti	\$340.935	\$77,84	\$0,96
TOTALE	\$1.813.976,70	\$414,15	\$5,11

Figura 6.6: Costi operativi velivolo Joby S4

Il totale dei costi operativi annui dell'eVTOL Joby S4 sono pari a circa 1.8 milioni di US\$, tale risultato riportato in US\$/nm/pax è pari a 5.11 US\$. Il risultato si scosta in maniera molto lieve da quello relativo al Lilium (meno del 2%) in quanto sono velivoli con lo stesso tipo di propulsione e configurazioni simili.

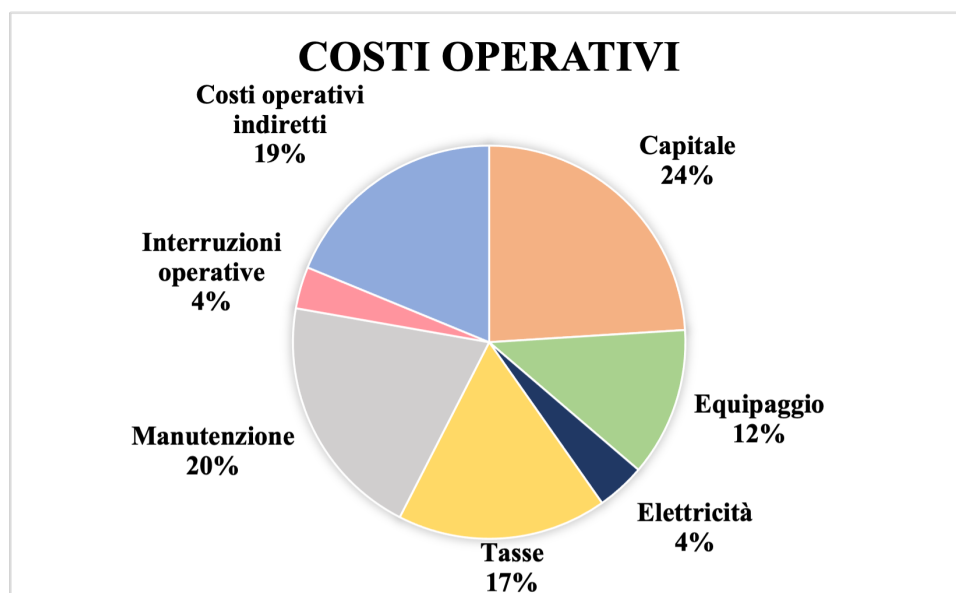


Figura 6.7: Divisione costi operativi velivolo Joby S4

Il totale dei costi risulta in linea con i modelli utilizzati per la validazione di conseguenza l'analisi viene ritenuta valida.

Il velivolo Joby S4 presenta una configurazione simile al velivolo Lilium ma sono comunque presenti delle differenze in particolare si può notare che il velivolo Lilium ha costi di capitale per passeggero più alti probabilmente perché si tratta di un velivolo più grande e dispendioso. Allo stesso tempo il velivolo Joby S4 presenta dei costi di manutenzione più alti probabilmente dovuti ad una maggiore complessità dei sottosistemi. In generale il prezzo più conveniente per passeggero per miglio nautico risulta essere quello del velivolo Lilium, questo probabilmente perché, se confrontati a pieno carico, le spese vengono suddivise in più passeggeri e di conseguenza ammortizzate.

Nella Figura 6.7 è possibile analizzare la suddivisione dei costi operativi annui del velivolo in esame. Anche in questo caso le voci di costo più importanti sono quelle relative ai costi operativi indiretti (19%), costi di manutenzione (20%) e costi di capitale (24%).

I valori realmente interessanti, se messi a confronto con il velivolo precedente, sono quelli relativi ai costi di equipaggio (12%) . I costi di equipaggio aumentano in quanto, nel modello, lo stipendio del pilota è in funzione delle ore di volo e svolgendo missioni identiche risulta essere molto simile ma andando a dividere questo numero per una quantità maggiore di passeggeri la sua percentuale all'interno del totale aumenterà, in questo specifico caso di un punto percentuale.

Su una missione media come quella in esame, a parità di tipo di propulsione, risulterà più conveniente, a livello di carburante, il velivolo Joby S4, questo molto probabilmente è dovuto al fatto che il velivolo Lilium presenta un numero nettamente superiore di motori rispetto al Joby S4.

VoloCity

Il velivolo VoloCity è prodotto dall'azienda Volocopter ed è un velivolo eVTOL in grado di trasportare due passeggeri con un peso complessivo di 900 kg. Il tipo di propulsione che impiega questo velivolo è la multicopter messa in atto da 18 rotori che si trovano sul velivolo. Per compiere la missione standard imposta per il modello il VoloCity consuma circa 6 kWh. Avendo a disposizione i valori fisici del velivolo in aggiunta alle stime di costo di uno studio precedente ([34]) e imponendo le assunzioni generali per l'analisi si ottengono i costi operativi del velivolo VoloCity riportati in Figura 6.8.

COSTI OPERATIVI TOTALI				
Voce	\$/anno	\$/viaggio	\$/nm/passeggero	
Capitale	\$125.921,93	\$28,75	\$0,89	
Equipaggio	\$141.586,44	\$32,33	\$1,00	
Elettricità	\$43.501,13	\$9,93	\$0,31	
Tasse	\$197.924,71	\$45,19	\$1,39	
Manutenzione	\$322.584,04	\$73,65	\$2,27	
Interruzioni operative	\$24.966,00	\$5,70	\$0,18	
Costi operativi indiretti	\$136.374	\$31,14	\$0,96	
TOTALE	\$992.858,13	\$226,68	\$7,00	

Figura 6.8: Costi operativi velivolo VoloCity

I costi operativi annui del velivolo Volocity ammontano a circa 992 mila US\$ che si traducono in una spesa per miglio nautico per passeggero di circa 7 US\$. Il valore, pur

essendo più alto rispetto ai velivoli precedenti, è in linea con il range prefissato all'inizio della modellazione per questo l'analisi viene considerata valida. Nonostante il totale dei costi operativi complessivi risulti essere più basso dei velivoli precedentemente analizzati si può notare una crescita del prezzo per miglia nautiche per passeggero molto probabilmente dovuta al fatto che le spese affrontate vanno suddivise in un numero inferiore di passeggeri. Le voci di costo che si discostano un po' di più dai restanti velivoli sono quelle relative ai costi di capitale e ai costi di manutenzione. I costi di capitale sono più bassi rispetto alle precedenti ma comunque non sfiorano per più del 20% (massima tolleranza imposta) il valore prefissato per la validazione. Questo abbassamento dei costi di capitale probabilmente è dovuto al fatto che il capitale iniziale del velivolo è molto basso essendo un velivolo di piccole dimensioni. Lo stesso scenario al contrario lo si può notare per i costi di manutenzione che sfiorano il range imposto sempre senza superare il 20%, questo molto probabilmente è legato alla complessità delle parti del velivolo. Pur essendo 7 US\$/nm/pax un valore alto rientra all'interno del range generale imposto di conseguenza i dati ottenuti vengono considerati verosimili. La divisione dei costi in percentuale è raffigurata in figura 6.9 dove è possibile capire in maniera visiva le principali voci di costo.

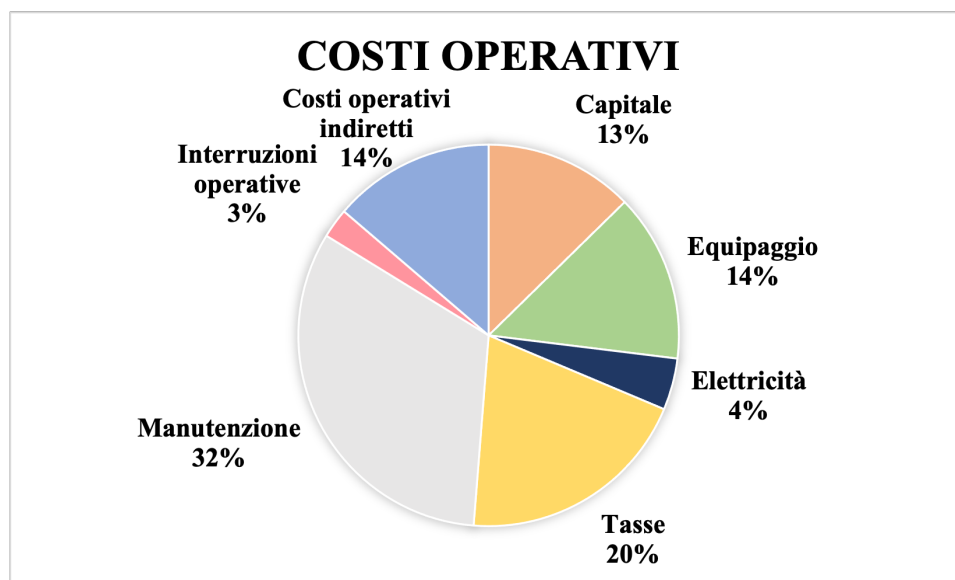


Figura 6.9: Divisione costi operativi velivolo VoloCity

Nel caso del velivolo VoloCity le principali voci di costo sono quelle relative ai costi di manutenzione (32%), tasse (20%) e costi di equipaggio (14%). L'anomalia legata ai costi di manutenzione è stata spiegata precedentemente mentre per i costi di equipaggio e tasse questi valori alti sono dovuti al fatto che testando i velivoli sullo stesso tipo di missione con la stessa durata i costi di equipaggio e tasse risultano essere molto standard per ogni velivolo, ciò che cambia sono i passeggeri che in certo senso devono dividersi tale spesa. Il velivolo VoloCity è il più piccolo dello studio e presenta solo due posti a sedere e di conseguenza i valori dei costi relativi all'equipaggio e alle tasse risultano essere più alti rispetto ad altre configurazioni con più posti passeggeri. Tale valore continua ad essere valido in quanto rientra all'interno del range prefissato per la validazione del modello. Le

restanti voci di costo sono perfettamente in linea con i risultati attesi per questo vengono valutate anch'esse valide.

Midnight

Il velivolo Midnight è prodotto dalla Archer Aviation e presenta 5 posti passeggeri con un peso complessivo di 3175 kg. La propulsione utilizzata da questo eVTOL è di tipo combined thrust messa in atto da 12 rotori di cui 6 mobili e 6 fissi. Per compiere la missione standard impostata nel modello il velivolo consuma circa 10 kWh. Nel modello vengono inseriti i valori fisici del velivolo, le componenti di costo divise per sottosistemi e le assunzioni imposte in precedenza e si ottengono i costi operativi annui riportati in Figura 6.10.

Come si può vedere il totale annuo dei costi operativi ammonta a 1.8 milioni di US\$, tale valore corrisponde a circa 5,15 US\$ per passeggero per miglia nautica percorsa. Tale valore è perfettamente in linea con il range imposto all'inizio dello studio per la validazione del modello.

COSTI OPERATIVI TOTALI			
Voce	\$/anno	\$/viaggio	\$/nm/passeggero
Capitale	\$483.982,30	\$110,50	\$1,36
Equipaggio	\$223.491,65	\$51,03	\$0,63
Elettricità	\$72.501,88	\$16,55	\$0,20
Tasse	\$245.547,19	\$56,06	\$0,69
Manutenzione	\$396.548,92	\$90,54	\$1,12
Interruzioni operative	\$62.415,00	\$14,25	\$0,18
Costi operativi indiretti	\$340.935	\$77,84	\$0,96
TOTALE	\$1.825.421,64	\$416,76	\$5,15

Figura 6.10: Costi operativi velivolo Midnight

Il valore 5,15 US\$/nm/pax si avvicina molto di più ai valori relativi ai velivoli con propulsione di tipo vectored thrust rispetto ai valori relativi al VoloCity e cioè una propulsione di tipo multirotor.

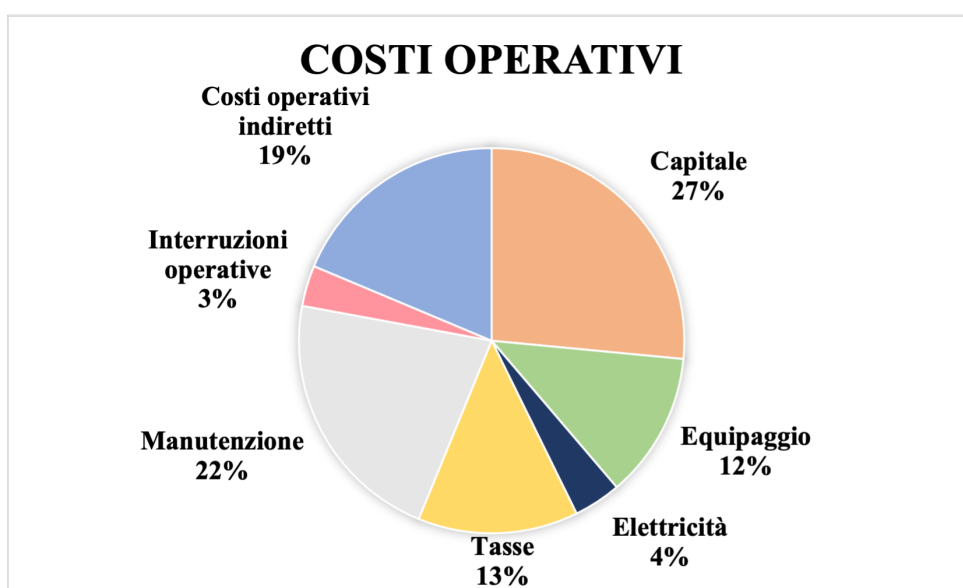


Figura 6.11: Divisione costi operativi velivolo Midnight

Questo potrebbe derivare anche dal fatto che il Midnight è in grado di trasportare 5 passeggeri che è una configurazione più simile ai velivoli Lilium o Joby S4 rispetto alla configurazione due posti del VoloCity.

Nella Figura 6.11 è possibile analizzare come le varie voci di costo vengono suddivise tra loro e quali sono quelle preponderanti.

Come si può notare la suddivisione dei costi operativi è in linea con gli altri velivoli analizzati e, anche in questo caso le voci principali sono quelle relative ai costi di capitale (27%), i costi di manutenzione(22%) e i costi operativi indiretti (19%).

Da questi dati si può capire che la configurazione combined thrust è molto simile alla configurazione vectored thrust in cui si hanno variazioni dell'ordine di uno o due punti percentuali anche per voci come quelle relative all'elettricità, da questo si può ipotizzare che probabilmente i due tipi di propulsione presenteranno consumi simili.

Skai

Il velivolo Skai è prodotto dalla Alaka'i Technologies e presenta 5 posti passeggeri con un peso complessivo di 1815 kg. La propulsione è di tipo multicopter e avviene tramite 6 rotori fissi. Per la missione standard imposta nello studio il velivolo Skai consuma circa 10 kWh. Come per i casi precedenti si inseriscono i valori del velivolo sia fisici che economici e si impostano le condizioni al contorno e assunzioni precedentemente descritte. I risultati ottenuti in output dal modello sono raccolti in Figura 6.12.

COSTI OPERATIVI TOTALI			
Voce	\$/anno	\$/viaggio	\$/nm/passeggero
Capitale	\$226.828,58	\$51,79	\$0,64
Equipaggio	\$221.347,69	\$50,54	\$0,62
Elettricità	\$72.501,88	\$16,55	\$0,20
Tasse	\$284.130,43	\$64,87	\$0,80
Manutenzione	\$319.830,97	\$73,02	\$0,90
Interruzioni operative	\$62.415,00	\$14,25	\$0,18
Costi operativi indiretti	\$340.935	\$77,84	\$0,96
TOTALE	\$1.527.989,25	\$348,86	\$4,31

Figura 6.12: Costi operativi velivolo Skai

Per mantenere operativo il velivolo Skai vengono impiegati annualmente circa 1.5 milioni di US\$, il prezzo di tale servizio per ogni passeggero per miglia nautiche è di 4.31 US\$. La cifra di 4.31 US\$ è la più bassa dello studio, pur rimanendo all'interno dell'intervallo di validità dello studio, questo lo si spiega andando ad analizzare i dati di partenza del velivolo VoloCity.

Tale velivolo risulta essere anche esso un velivolo multicopter con un peso pari alla metà dello Skai e un carico pari a due passeggeri ma con un costo di capitale iniziale molto simile al velivolo Skai che riesce a imbarcare più del doppio dei passeggeri. I costi elevati del VoloCity sono quindi da imputare al fatto che, con entrambi i velivoli a pieno carico, il velivolo Skai presenta dei valori inferiori per passeggero per miglio nautico sia per il capitale che per il consumo energetico che per le spese di equipaggio e manutenzione. L'unico valore anomalo del velivolo Skai è quello relativo al capitale questo è dovuto al fatto

che se lo andiamo a confrontare con un velivolo con configurazione simile (5 posti) presenta un prezzo iniziale d'acquisto nettamente inferiore. Il totale complessivo dei costi operativi è all'interno del range imposto, di conseguenza, nel complesso, l'analisi viene considerata valida e coerente.

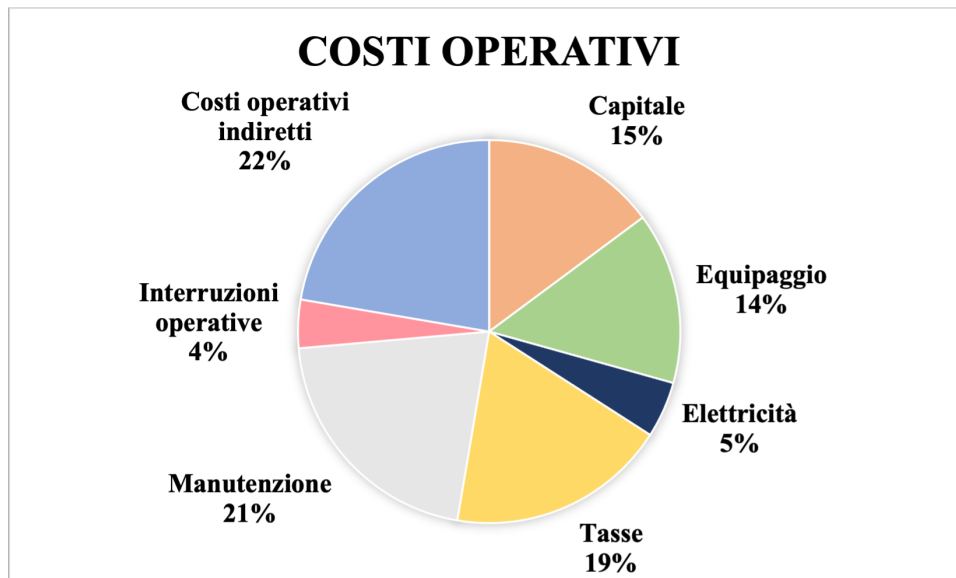


Figura 6.13: Divisione costi operativi velivolo Skai

La suddivisione percentuale dei costi operativi del velivolo Skai è rappresentato in Figura 6.13. Anche in questo caso le suddivisioni percentuali rispecchiano l'andamento riscontrato negli altri velivoli in esame con le voci principali di costo che si trovano nei costi operativi diretti (22%), costi di manutenzione (21%) e tasse (19%). Le restanti percentuali di suddivisione dei costi, ad esclusione dei costi di capitale precedentemente affrontati, risultano coerenti con gli altri velivoli e in generale con i risultati attesi, di conseguenza l'analisi viene considerata valida.

6.1.3 Conclusioni

Per concludere possiamo considerare in generale l'analisi valida e coerente con i risultati attesi. Le modifiche effettuate al modello di partenza permettono di stimare in maniera verosimile i costi operativi dei velivoli eVTOL.

Il limite principale del modello è stato individuato nelle stime dei costi di capitale per i velivoli più economici di piccole dimensioni come il VoloCity e il velivolo Skai che comunque è in grado di stimare con coerenza. Al contrario risulta particolarmente performante sui costi di equipaggio e costi relativi ai consumi elettrici una volta nota la missione da percorrere. Così come i costi operativi indiretti e i costi relativi alle interruzioni operative che rimangono pressoché invariati per le varie configurazioni di velivoli in quanto sono esclusivamente in funzione del numero di passeggeri e parametri che rimangono costanti all'interno della missione.

I risultati ottenuti dall'analisi messi a confronto tra di loro sono riportati in Figura 6.14.

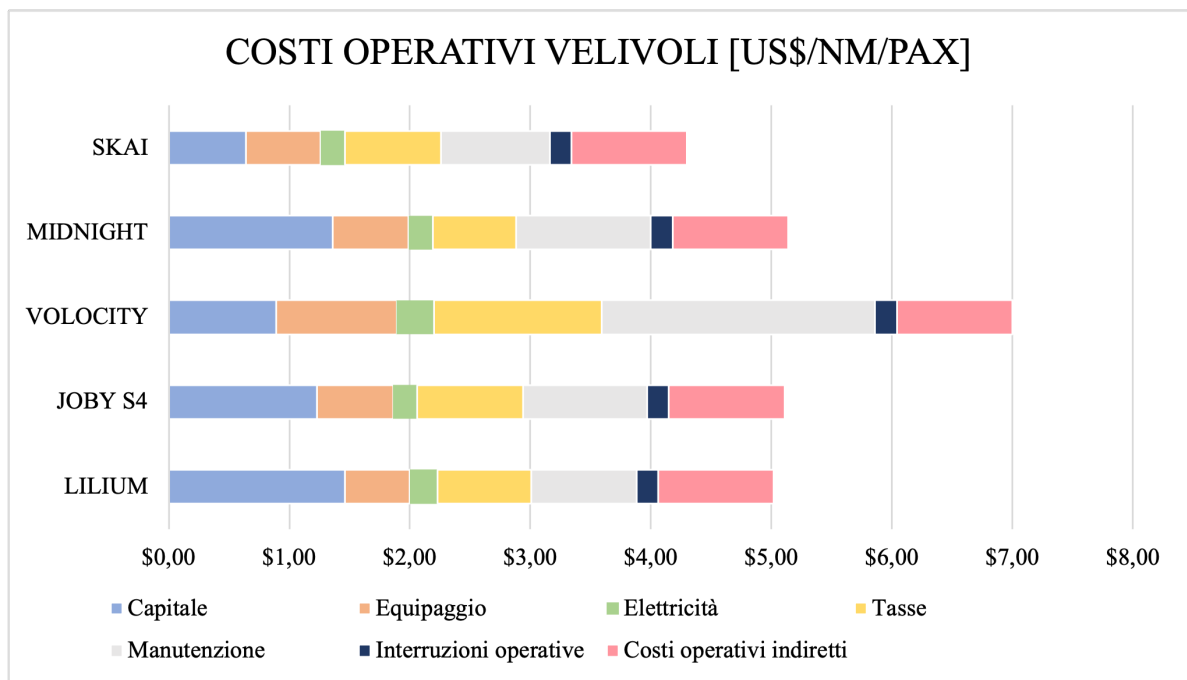


Figura 6.14: Confronto valori velivoli [US\$/nm/pax]

Come si può notare tutte le configurazioni portano a risultati che hanno ordini di grandezza molto simili tra loro con il valore minimo per il velivolo Skai che risulta essere il più conveniente e il valore massimo del velivolo Volocity che risulta essere il più dispendioso. Tale risultato era facilmente prevedibile vedendo i valori iniziali di peso, costo iniziale e numero di passeggeri trasportabili dei velivoli analizzati.

La media di tutti i valori ottenuti è pari a 5.31 US\$/nm/pax, per vedere se tale valore potesse essere competitivo sul mercato dei trasporti si è cercato qualche servizio ad oggi operativo simile e il suo costo al pubblico. Il servizio individuato è Uber Select, un servizio di alta categoria di taxi urbano che avviene su strada tramite vetture. Il costo di tale servizio è di 5,28 US\$/nm , considerando che gli spostamenti tramite Uber Select avvengono via terra quindi con tempistiche maggiori e eventualmente la presenza di traffico si può facilmente affermare che il servizio offerto dagli eVTOL è un servizio economicamente competitivo.

Il vero successo della Urban Air Mobility a questo punto dipenderà esclusivamente dalla rete di infrastrutture a terra in grado di servirla. In quanto se i punti di partenza e arrivo non sono particolarmente vicini all'utente, quest'ultimo molto probabilmente continuerà a preferire i percorsi via terra. Se, invece, con i velivoli eVTOL un utente fosse messo in condizioni di potersi spostare ovunque sicuramente il suo utilizzo sarebbe esponenziale in quanto competitivo con le soluzioni ad oggi offerte per tempistiche maggiori.

6.2 Vertiporti

I costi operativi dei vertiporti sono stati studiati e analizzati per le tre configurazioni principali descritte nel Capitolo 1:

- Vertihubs;

- Vertibases;
- Vertipads.

Si è inoltre cercato di configurarli e combinarli insieme tra di loro per simulare l'operatività all'interno di una città e di conseguenza calcolarne i costi annui.

6.2.1 Validazione del modello

Il modello di costi operativi di un vertiporto è stato validato confrontandosi con i risultati ottenuti dallo studio *To take off, flying vehicles first need places to land* [29] della McKinsey Center of Future Mobility. Purtroppo non esistono ancora esempi operativi di vertiporti attivi, di conseguenza, gli studi sui costi operativi sono molto limitati e soprattutto si basano su valori dettati da assunzioni di esperti che, per ora, non sono ancora stati validati da valori reali. Nello studio utilizzato per la validazione del modello sono state fatte determinate assunzioni sulla configurazione dei vari tipi di vertiporto riportati in Figura 6.15.

Tipo	Pad decollo/atterraggio	Pad parcheggio	Costi operativi [US\$/year]
Vertipad	1	2	0.6-0.9 milioni
Vertibase	3	6	3-5 milioni
Vertihub	10	20	15-17 milioni

Figura 6.15: Assunzioni e risultati modello McKinsey [29]

Per quanto riguarda tutte le componenti accessorie di un vertiporto, sono state ipotizzate e configurate come spiegato nel Capitolo 5. I risultati ottenuti dallo studio McKinsey [29] sono riportati in Figura 6.15 e si presentano sotto forma di intervalli. Alla fine di ogni prova si confrontava il valore in output con l'intervallo ipotizzato dallo studio e se c'era corrispondenza l'analisi era ritenuta valida.

Tale studio, inoltre, simulava i costi operativi di una configurazione di vertipad, vertibase e vertihub distribuiti ipoteticamente in un contesto urbano ne calcolava i costi operativi. I risultati di tale analisi sono riportati in Figura 6.16 e permettono di prevedere quanto è necessario investire annualmente in questo tipo di infrastruttura per mantenerla operativa.

MODELLO MCKINSEY				
Densità	Vertipad	Vertibase	Vertihub	Costi operativi totali [US\$/year]
Media	3-5	5-10	2-3	35-50 milioni
Grande	5-10	10-15	5	110-130 milioni

Figura 6.16: Assunzioni e risultati configurazioni città modello McKinsey [29]

6.2.2 Risultati vertiporti

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dall'analisi con il modello di costi operativi sviluppato. Per ciascun tipo di vertiporto sono state ipotizzate delle configura-

zioni verosimili a livello di componentistica e personale che vengono specificate in ogni configurazione.

L'utente può comunque modificare tali configurazioni per effettuare una stima più coerente possibile con i propri dati.

Vertipad

Il vertipad è l'infrastruttura più piccola e semplice studiata. La struttura viene descritta nel Capitolo 1 e tutte le sue specifiche utilizzate in particolare all'interno dell'analisi sono riportate in Figura 6.17.

Vertipad		Vertipad	
Componente	Numero componenti	Personale	Numero personale
Pad decollo/atterraggio	1	Controllore di terra	2
Pad parcheggio	2	Assistente di terra	2
Charger normale	1	Manutentore	2
Supercharger	0	Adetto alla sicurezza	0
Impianto idrogeno liquido (200l)	0	Adetto al marketing	0.25
Hangar (60m ²)	0	Adetto alle vendite	0.25
Sistema di sicurezza	1	Gestore delle finanze	0.25
Sistema antincendio	1	Manager operativo	0.25
Cabina di controllo (40m ²)	1		
Area passeggeri (40m ²)	1		
Faro	1		
5G antenna	1		
Parcheggio (10 auto)	1		

Figura 6.17: Configurazione Vertipad

Come si può vedere dalle componenti si tratta di strutture essenziali atte al semplice decollo/atterraggio in zone periferiche. Si è ipotizzato, inoltre, che per mansioni relative al marketing, vendite, finanze e operatività fosse necessario solamente un singolo addetto al controllo di più piattaforme in particolare 2 addetti ogni 8 piattaforme in modo tale da poter effettuare turni come per il restante personale.

Una volta inseriti tali dati all'interno del modello si riceve in output i costi operativi annui che il vertipad sostiene che vengono riportati in Figura 6.18.

Per sostenere annualmente un vertipad vengono impiegati circa 831 mila US\$ spartiti in 694 mila US\$ di costi operativi diretti e 136 mila US\$ di costi operativi indiretti. Tale risultato è perfettamente in linea con l'intervallo di valori proposti dallo studio McKinsey [29] utilizzato per validare il modello, di conseguenza l'analisi viene ritenuta valida. Per riuscire a capire meglio come questi costi sono ripartiti e quali sono le voci principali i risultati ottenuti sono stati inseriti nei grafici in Figura 6.19.

COSTI OPERATIVI DIRETTI		COSTI OPERATIVI INDIRETTI	
Voce	Totale [US\$/year]	Voce	Totale [US\$/year]
Capitale	\$39.345	Servizi di vendita e prenotazione	\$10.060
Equipaggio	\$357.500	Pubblicità	\$41.600
Elettricità	\$144.325	Amministrazione	\$45.000
Tasse	\$115.200	Formazione	\$40.250
Manutenzione	\$38.400	TOTALE	\$136.910
TOTALE	\$694.770		

Figura 6.18: DOC e IOC di un Vertipad

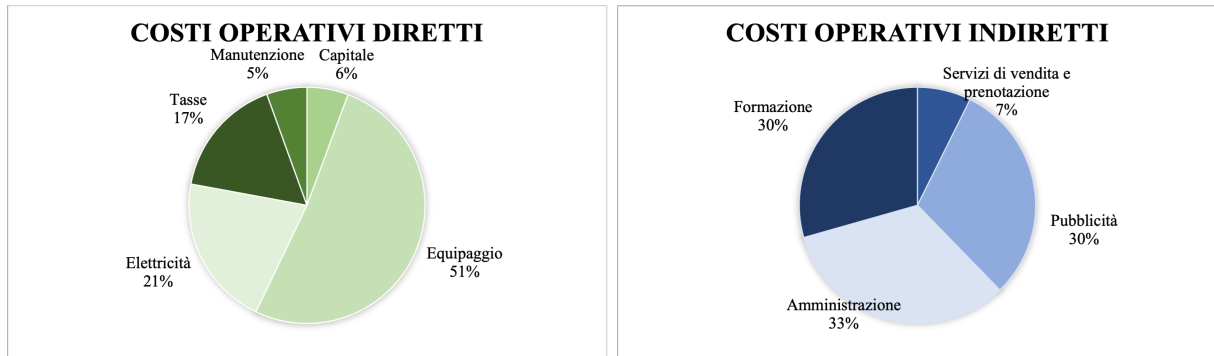


Figura 6.19: Suddivisione costi operativi Vertipad

La spesa principale da affrontare per mantenere operativo un vertiporto è sicuramente quella relativa ai costi del personale (51%). Tale dato è in linea con la letteratura esaminata [36] e risulta essere il più alto delle tre configurazioni in quanto avere un addetto per ogni mansione su una singola piattaforma risulta dispendioso rispetto a configurazioni più grandi ma è il giusto compromesso per mantenere una piattaforma funzionante lungo tutto l'arco della giornata, per quanto nelle altre configurazioni tale dato si scosta di pochi punti percentuali.

Al secondo posto troviamo la spesa per l'elettricità (21%) che sono necessariamente molto legate all'utilizzo che viene fatto, nel nostro caso è stato ipotizzato un utilizzo medio molto simile all'analisi dei velivoli che è stata precedentemente illustrata. Diminuendo o aumentando l'afflusso di velivoli e la loro eventuale ricarica tale dato può crescere o diminuire.

A seguire troviamo i valori relativi alle tasse (17%), al capitale (6%) e alla manutenzione (5%) che sono in linea con i valori tipici di aeroporti [36]. I costi di capitale sono molto più bassi rispetto ai velivoli in quanto le infrastrutture si deprezzano molto meno e in molto più tempo rispetto ai velivoli.

Guardando i costi operativi indiretti si nota che le componenti di costo maggiori sono quelle relative ai costi di amministrazione (33%), costi di pubblicità (30%) e costi di formazione (30%). Rispetto alle altre configurazioni di vertiporto il vertbase presenta alti costi di formazione e bassi costi di amministrazione. Questo accade perché la formazione del personale pesa di più su una piccola infrastruttura, allo stesso tempo i costi di ammi-

nistrazione sono più bassi in quanto tale spesa viene divisa in più piattaforme e si tratta di gestione di operazioni molto semplici.

Vertibase

L'infrastruttura vertibase è una via di mezzo tra il vertipad e il vertihub. La configurazione scelta è riportata in Figura 6.20. Come si può vedere dalle varie componenti si tratta di una struttura di media dimensione da poter inserire in un contesto urbano preesistente come tetti o parcheggi.

Vertibase		Vertibase	
Componente	Numero componenti	Personale	Numero personale
Pad decollo/atterraggio	3	Controllore di terra	6
Pad parcheggio	6	Assistente di terra	6
Charger normale	3	Manutentore	4
Supercharger	3	Adetto alla sicurezza	2
Impianto idrogeno liquido (200l)	1	Adetto al marketing	1
Hangar (60m2)	4	Adetto alle vendite	1
Sistema di sicurezza	2	Gestore delle finanze	2
Sistema antincendio	6	Manager operativo	2
Cabina di controllo (40m2)	2		
Area passeggeri (40m2)	2		
Faro	0		
5G antenna	1		
Parcheggio (10 auto)	2		

Figura 6.20: Configurazione Vertibase

Il personale ipotizzato si è ottenuto andando a scalare le ipotesi fatte per il vertipad.

Una volta che si inseriscono nel modello i dati riportati in Figura 6.20 questo restituisce in output i valori raccolti in Figura 6.21.

COSTI OPERATIVI DIRETTI		COSTI OPERATIVI INDIRETTI	
Voce	Totale [US\$/year]	Voce	Totale [US\$/year]
Capitale	\$162.503	Servizi di vendita e prenotazione	\$40.240
Equipaggio	\$1.566.000	Pubblicità	\$318.600
Elettricità	\$870.569	Amministrazione	\$360.000
Tasse	\$475.800	Formazione	\$192.600
Manutenzione	\$158.600	TOTALE	\$911.440
TOTALE	\$3.233.472		

Figura 6.21: DOC e IOC di un Vertibase

Il vertibase per essere operativo sostiene una spesa annua di 4.14 milioni di US\$ divisi in 3.2 milioni di US\$ per i costi operativi diretti e 911 mila US\$ per i costi operativi indiretti. Il risultato ottenuto dal modello rispecchia le aspettative imposte dal modello McKinsey [29] e, di conseguenza, l'analisi viene definita valida.

Si può vedere come questi costi sono distribuiti e di conseguenza le voci principali guardando la Figura 6.22

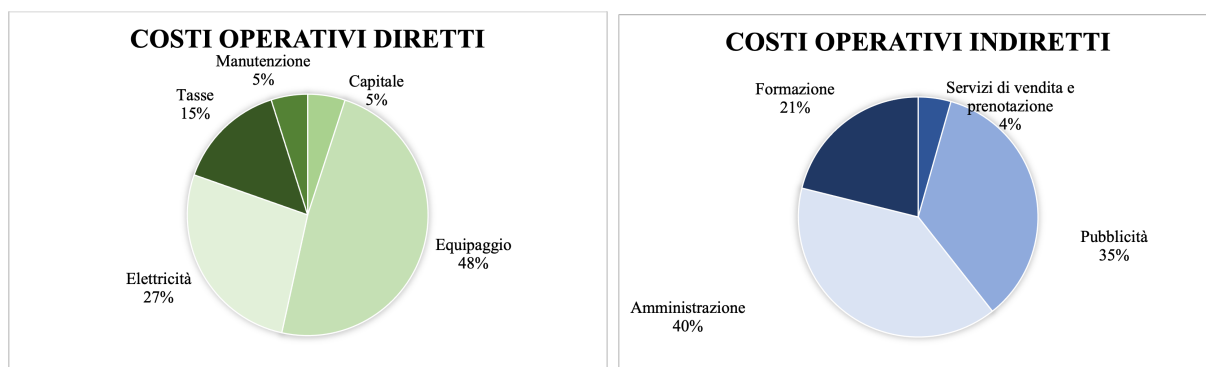


Figura 6.22: Suddivisione costi operativi Vertibase

Per quanto riguarda i costi operativi diretti, come per il caso precedente, le voci principali sono quelle relative all'equipaggio (48%), seguito dai costi legati al consumo di elettricità (27%) e i costi legati alle tasse (15%). Questi dati sono perfettamente in linea con le quote attese. Il fatto che il vertiporto abbia dimensioni maggiori riesce ad ammortizzare meglio le spese relative al personale per quanto ne preveda in assoluto un numero maggiore. Stesso ragionamento vale per i costi di capitale e i costi delle tassazioni. Al contrario la percentuale di costi dedicata all'utilizzo di energia elettrica aumenta di sei punti percentuali, questo sicuramente è dovuto al fatto che si tratti di una struttura più completa e performante in grado di offrire maggiori servizi, ma anche al fatto che rispetto alla configurazione pad precedente in questa è prevista la presenza di un supercharger (6.20).

Per quanto riguarda i costi operativi indiretti anche per il vertibase le voci principali di costo sono quelle relative alla amministrazione (40%), seguite dai costi pubblicitari (35%) e da quelli di formazione (21%).

Trattandosi di una struttura più grande, il vertibase riesce meglio ad ammortizzare i costi di formazione ma ne investe di più in amministrazione in quanto, questo tipo di configurazione necessita una divisione amministrativa in sede dedicata per la struttura al contrario di quanto accadeva per il vertipad la cui sede amministrativa era a capo di più strutture.

Vertihub

L'ultima configurazione di vertiporto analizzata è quella relativa al vertihub. Nello specifico la componentistica scelta e il personale ipotizzato sono riportati in Figura 6.23.

Si può subito notare dal numero di elementi scelti e di personale che si tratta di una struttura molto grande adatta a sostenere il traffico di molti velivoli eVTOL. Per questi aspetti tali strutture vengono solitamente posizionate in luoghi con un grande flusso di persone come gli aeroporti e dove è possibile svolgere mansioni non ordinarie come le manutenzioni straordinarie.

Una volta inseriti i dati relativi alla configurazione del vertiporto in questione si ottengono i output i risultati riportati in Figura 6.24. Un vertihub per essere operativo spende annualmente circa 15 milioni di US\$ divisi in 12 milioni di US\$ di costi operativi diretti e 3.27 milioni di US\$ per i costi operativi indiretti.

Vertihub		Vertihub	
Componente	Numero componenti	Personale	Numero personale
Pad decollo/atterraggio	10	Controllore di terra	15
Pad parcheggio	20	Assistente di terra	30
Charger normale	8	Manutentore	10
Supercharger	8	Adetto alla sicurezza	10
Impianto idrogeno liquido (200l)	5	Adetto al marketing	8
Hangar (60m2)	8	Adetto alle vendite	8
Sistema di sicurezza	4	Gestore delle finanze	8
Sistema antincendio	10	Manager operativo	8
Cabina di controllo (40m2)	4		
Area passeggeri (40m2)	5		
Faro	1		
5G antenna	2		
Parcheggio (10 auto)	4		

Figura 6.23: Configurazione Vertihub

I valori ottenuti in output rientrano nel range imposto per la validazione del modello [29] e di conseguenza l'analisi viene considerata corretta.

La distribuzione delle varie voci di costo e quali sono le principali lo si può vedere in Figura 6.25.

COSTI OPERATIVI DIRETTI		COSTI OPERATIVI INDIRETTI	
Voce	Totale [US\$/year]	Voce	Totale [US\$/year]
Capitale	\$1.129.397	Servizi di vendita e prenotazione	\$321.920
Equipaggio	\$5.775.000	Pubblicità	\$787.800
Elettricità	\$2.415.617	Amministrazione	\$1.440.000
Tasse	\$1.871.200	Formazione	\$721.500
Manutenzione	\$935.600	TOTALE	\$3.271.220
TOTALE	\$12.126.814		

Figura 6.24: DOC e IOC di un Vertihub

I costi operativi diretti seguono in generale l'andamento delle configurazioni precedenti, infatti la voce principale di costo è quella relativa ai costi del personale (48%) seguita dai costi per il consumo energetico (20%) e infine le tasse (15%).

Rispetto alla configurazione precedente si ha un leggero aumento dei costi di capitale sicuramente legati al fatto che si tratta di di una infrastruttura di dimensioni molto grandi con un capitale iniziale particolarmente elevato che porta con se costi elevati annui legati al capitale. Aumentano anche i costi di manutenzione legati sempre alla grandezza della

struttura e diminuiscono lievemente i costi legati all'elettricità che probabilmente messi a confronto con cifre così grandi diminuiscono in percentuale pur aumentando in valore assoluto.

Per quanto riguarda i costi operativi indiretti la voce principale di costo è quella relativa ai costi di amministrazione (44%). Il vertihub, infatti, come infrastruttura si avvicina molto a quella aeroportuale che di conseguenza ha bisogno di un grosso impiego di personale dedicato alla gestione operativa e finanziaria di questa grande infrastruttura. Nel caso del vertihub i costi pubblicitari e di formazione diminuiscono ammortizzati dalla grande dimensione del vertiporto mentre quelli relativi alla prenotazione e vendita di servizi crescono leggermente molto probabilmente a causa del grosso flusso di utenti da gestire.

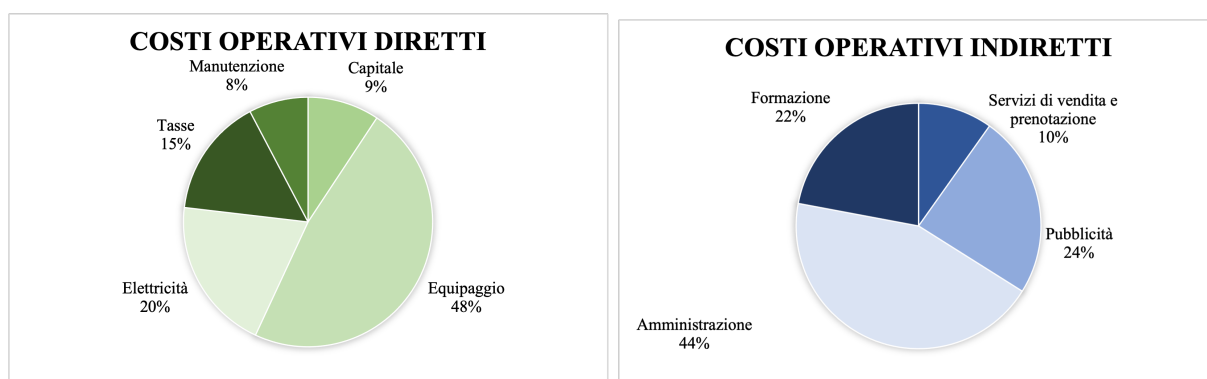


Figura 6.25: Suddivisione costi operativi Vertihub

6.2.3 Conclusioni

Dai risultati ottenuti il modello si può definire corretto e in generale coerente i risultati previsti dallo studio utilizzato per la validazione [29] e in generale con la letteratura a disposizione per infrastrutture simili come gli aeroporti [36]. Nello studio fatto, i vertiporti sono stati configurati secondo le direttive del modello Mckinsey [29] utilizzato per la validazione in modo tale da avere una maggior corrispondenza possibile e coerenza dei risultati ma in generale un utente può configurare la propria infrastruttura in base alle caratteristiche richieste da uno specifico caso.

Il modello risulta particolarmente valido per calcolare i costi relativi al personale e i costi di capitale, al contrario i costi relativi all'energia elettrica e alle tasse sono stati calcolati in maniera generale ma andrebbero specificati per l'utilizzo in particolare e in base al Paese in cui sorgerà il vertiporto in quanto la tassazione varia in base alla legislazione.

TYPE OF CITY					
Density	Vertipad	Vertibase	Vertihub	Total operative cost	
Medium		3	5	2	\$54.015.667
Large		5	10	5	\$122.597.689

Figura 6.26: Risultati configurazione città

Con l'ausilio del nostro modello è stata simulata una potenziale configurazione urbana seguendo le direttive del modello McKinsey [29] per poter validare i risultati. I valori ottenuti sono riportati in Figura 6.26.

I risultati sono in linea con quelli previsti per tanto vengono considerati verosimili per l'utilizzo operativo di tale infrastruttura all'interno di un contesto urbano.

Si è provato, inoltre, a stimare il valore di tale servizio per i velivoli eVTOL per farlo si sono presi i costi operativi totali e sono stati sottratti i costi relativi ai charger, in quanto la ricarica viene effettuata a spese del velivolo in funzione del proprio pacco batterie o tipo di alimentazione prevista. Tale valore è stato diviso per il numero di voli annui medi previsti da un velivolo per il numero di piattaforme e atterraggio disponibili nel vertiporto in modo tale da calcolare il valore per il semplice atterraggio. Per il vertipad tale valore è pari a 170US\$, per il vertibase 273 US\$ e per il vertihub di 325\$. I valori sono diversi in quanto andando ad aumentare le dimensioni del vertiporto i servizi offerti sono diversi e il loro costo è incluso all'interno di tale cifra. Mediamente la cifra spesa sarà pari a 192 US\$ che è inferiore rispetto a un tariffa standard di un eliporto che si aggira attorno ai 480US\$ [39]. Se si vuole, inoltre, stimare una tariffa per la sosta è necessario sommare al valore relativo all'atterraggio circa il 10% ogni 4 ore [39].

I vertiporti da noi ipotizzati risultano essere più economici rispetto agli eliporti già esistenti anche se questo dato è strettamente collegato al tipo di utilizzo. Se l'afflusso di velivoli dovesse essere minore di quello ipotizzato, infatti, il prezzo risulterebbe maggiore al contrario rendendo questo tipo di mobilità sempre più integrata e accessibile a tutti si otterrebbe abbassamento dei costi rendendo la mobilità aerea urbana sempre più alla portata di tutti.

6.3 Sviluppi futuri

Velivoli

Il modello di costo sviluppato riesce a stimare in maniera coerente i costi operativi dei velivoli eVTOL. Gli aspetti critici rilevati sono relativi ai costi delle tassazioni.

In futuro con una realtà operativa dei velivoli eVTOL le informazioni a disposizione saranno migliori e più affidabili di conseguenza il modello sarà più performante, in particolare conoscere i profili del rumore di ogni singolo velivolo e come le città in futuro decideranno di tassare questo tipo di inquinamento acustico renderà l'analisi sempre più affidabile e in grado di rispecchiare la realtà. Così come ad oggi non sono state ancora deliberate tassazioni circa la navigazione e atterraggio dei velivoli elettrici sul contesto urbano che in questo studio sono state solo ipotizzate.

Si prende inoltre in considerazione che in uno scenario futuro possano essere tassate anche le emissioni di vapore d'acqua, principale prodotto di scarto delle fuel cell, e che, di conseguenza vengano introdotte tassazioni dovute a tali emissioni.

Fino a quando i velivoli eVTOL non saranno operativi nel contesto urbano non si avrà mai la totale certezza dell'esattezza del modello creato.

È certo che il mercato degli eVTOL si sta affacciando sempre di più nel mercato dei trasporti urbani e non è che sicuramente diventerà un'alternativa valida per spostamenti veloci e a impatto zero. Il successo di questo tipo di mobilità risiede nell'infrastruttura su cui si poggierà che sarà in grado di creare una rete più o meno fitta di spostamenti possibili di cui l'utente potrà usufruire. È necessario inoltre che l'energia impiegata provenga da fonti rinnovabili che grazie alle politiche green messe in atto da molti governi stanno prendendo una fetta sempre più ampia di mercato e che, a lungo termine, risultano essere l'unica alternativa possibile.

Dalle stime fatte in questo studio l'UAM risulta essere una realtà competitiva nel mondo dei trasporti e, se si ipotizza un incremento di mercato, il costo di tale servizio scenderà sempre più. Il costo del servizio potrebbe ricevere ulteriori diminuzioni se si pensa al fatto che la maggior parte dei velivoli eVTOL nasce per navigare tramite guida autonoma, questo vuol dire che nel momento in cui viene regolamentata e messa in atto questo tipo di navigazione i costi di equipaggio vengono quasi del tutto annullati rendendo il costo di tale servizio sempre più competitivo e alla portata di tutti.

Vertiporti

Il modello creato per la stima dei costi operativi dei vertiporti riesce a fare delle stime corrette e coerenti con gli studi fatti a riguardo e al mercato attuale di infrastrutture simili come gli aeroporti. Per la natura del modello, in particolare la parte relativa alla configurazione iniziale dell'infrastruttura, è possibile in futuro andare ad arricchire il modello con componenti sempre più dettagliate o eventuali nuove componenti previste da una futura normativa.

Non esistono a oggi vertiporti operativi e, di conseguenza, neanche una rete di questi, i costi ipotizzati risultano verosimili seguendo le direttive di studi o di applicazioni simili. La certezza dell'esattezza di tale analisi si avrà solo quando ci sarà un funzionamento effettivo di tale rete di infrastrutture al servizio dei velivoli eVTOL.

Per il futuro bisognerà sicuramente regolamentare le aree adibite ad accogliere i vertiporti per fare in modo che la comunità possa accettarle tranquillamente all'interno di un contesto urbano già affollato. Sarà necessario, inoltre adeguare la rete elettrica esistente a sopportare un aumento di carico dovuto all'inserimento di uno o più vertiporti all'interno delle città e alla ricarica dei velivoli.

È un lavoro che sicuramente richiederà un grosso investimento economico e del tempo per avere un'affettiva applicazione ma la Urban Air Mobility potrebbe essere l'alternativa vincente per spostamenti rapidi e a impatto zero in grandi centri urbani ormai da tempo congestionati.

Bibliografia

- [1] Garrow, L. A., German, B. J., & Leonard, C. E. - 2021 - *Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 132, 103377.
- [2] EIT Urban Mobility - 2022 - *Urban Mobility Next 8 Expectations and success factors for Urban Air Mobility in Europe* .
- [3] Joby Aviation - Sep 25, 2023 - *Joby Delivers First eVTOL Aircraft to Edwards Air Force Base Ahead of Schedule*. <https://www.jobyaviation.com/news/joby-delivers-first-evtol-edwards/>
- [4] Vertical Aerospace - *Official website*. <https://vertical-aerospace.com/>
- [5] Urban Air Port ltd - 2022 - *Product Brochure*. <https://static1.squarespace.com/static/5f5e4d72d2b0854b18ad41cf/t/628b5a011366c727338332d0/1653299721939/UAP+Product+Brochure+2022-screen.pdf>
- [6] Aviation Week Network - Oct 4, 2021 - *Aviation Promising Early Market For Advanced Battery Makers*. <https://aviationweek.com/aerospace/urban-unmanned-aviation/aviation-promising-early-market-advanced-battery-makers>
- [7] Lilium GmbH *Official website* . <https://lilium.com/jet>
- [8] Volocopter *Official website*. <https://www.volocopter.com/en/urban-air-mobility>
- [9] Archer Aviation *Official website*. <https://www.archer.com/midnight>
- [10] Skyports *Official website*. <https://skyports.net/vertiports/>
- [11] VoloPort *Official website*. <https://www.volocopter.com/en/solutions/voloport>
- [12] Karolin Schweiger, Lukas Preis - 19 July 2022 - *Urban Air Mobility: Systematic Review of Scientific Publications and Regulations for Vertiport Design and Operations*. Licensee MDPI, Basel, Switzerland

- [13] Megan Taylor, Asya Saldanli, Andy Park - 2020 - *DESIGN OF A VERTIPORT DESIGN TOOL*. Center for Air Transportation Systems Research at George Mason University, Fairfax, Virginia
- [14] European Union Aviation Safety Agency - March 2022 - *Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)* .EASA, Cologne, Germany
- [15] Salehi, Vahid, Wang, Shirui - August 2021- *APPLICATION OF MUNICH AGILE CONCEPTS FOR MBSE AS A HOLISTIC AND SYSTEMATIC DESIGN OF URBAN AIR MOBILITY IN CASE OF DESIGN OF VERTIPORTS AND VERTISTOPS* .Institut of Enigneering Design of Mechatronik Systems, GOTHENBURG, SWEDEN.
- [16] Ferroviai vertiport *officila website* . <https://www.ferrovial.com/en/business/airports/vertiports/>
- [17] 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.
- [18] Yu Bin, Tamim Peter Sidiki - April 2020 - *Material solutions to increase tank-to-wheel efficiency & reliability of fuel cells*. Envalior, <https://www.dsm.com/engineering-materials/en-US/insights/blog/material-solutions-increase-tank-to-wheel-efficiency-reliability-of-fuel-cells.html>
- [19] David Talbott - December 2020 - *5G Antenna Design* - Wevolver - <https://www.wevolver.com/article/5g-antenna-design>
- [20] Alaka'i *Official website* - <https://www.alakai.com/>
- [21] Lukas Mauler, Fabian Duffner, Wolfgang G. Zeier, Jens Leker - 2021 - *Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050* - Royal Society of Chemistry
- [22] Xiaotao Qiao, Guotao Chen, Weichao Lin and Jun Zhou - 2023 - *The Impact of Battery Performance on Urban Air Mobility Operations* - School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China
- [23] Our World in Data - 2022 - *Electricity production by source, World* - <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-production-by-source>
- [24] IEA (International Energy Agency) - 2022 - *World Energy Outlook 2022* - <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [25] Eurostat - 2023 - *Electricity price statistics* - <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php>

- [26] Council of the European Union - 2023 - *Infographic - How is EU electricity produced and sold?* - <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>
- [27] Jose M. Marín Arcos, Diogo M. F. Santos - 2023 - *The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production* - Center of Physics and Engineering of Advanced Materials (CeFEMA), Laboratory for Physics of Materials and Emerging Technologies (LaPMET), Chemical Engineering Department, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisbon, Portugal
- [28] Bernd Heid, Alma Sator, Maurits Waardenburg, and Markus Wilthaner - 2023 - *Five charts on hydrogen's role in a net-zero future*- McKinsey Sustainability
- [29] Tore Johnston, Robin Riedel, and Shivika Sahdev - 2020 - *To take off, flying vehicles first need places to land*- McKinsey Center for Future Mobility
- [30] J. Chuton - 2023 - *A huge investment on 5G Base station for a faster network*- <https://howmuchhub.com/5g-base-station-cost/>
- [31] Alex Schmitt - 2022 - *EU Energy Outlook 2050: How will the European electricity market develop over the next 30 years?*- Energy BrainBlog- <https://blog.energybrainpool.com/en/eu-energy-outlook-2050-how-will-the-european-electricity-market-develop-over-the-next-30-years/>
- [32] NASA - 2015 - *NASA Cost Estimating Handbook Version 4.0*
- [33] M. Fioriti, N. Viola - 2019 - *O.1.1.1-41 Cost model maintenance report- Life Cycle cost module* - Clean sky
- [34] Rel. M. Fioriti, Can. F.Sclifò - 2023 - *Modello di stima dei costi per velivoli UAM* - Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- [35] Rel. M. Fioriti, Can. M. Borghi - 2023 - *Sviluppo di un modello per la stima dei costi di velivoli con propulsione ibrido-elettrica* - Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- [36] Jinha Jeong- 2005 - *An investigation of operating cost of airport* - The University of British Columbia
- [37] Nancy Mendonca, Jonnelle Goff- 2018 - *Urban Air Mobility Market Study* - NASA
- [38] Melanie Boudreau, Uber - 2019 - *Changes to time and distance rates for Uber Black, SUV, Select* - <https://www.uber.com/en-CA/blog/time-distance-rates-black-canada/>
- [39] The London Heliport Ltd - 2024 - *FEES CHARGES* - <https://londonheliport.co.uk/wp-content/uploads/2024/02/CHARGES-1-Feb-2024.pdf>