



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea: ottobre 2021

**Valutazione delle tendenze attuali
sull'applicabilità dei droni alla mobilità
urbana e metodologie di analisi di rischio a
terra**

Relatori:

Prof. Giorgio Guglieri
Dr. Stefano Primatesta

Candidato:

Andrea Cesana

Sommario

Ringraziamenti	IV
Abstract	V
Introduzione	1
Stato dell'arte del mercato degli aerotaxi	4
Aurora (Boeing)	4
Lilium Air Mobility	4
Joby Aviation: S4	5
Uber elevate	6
Volocopter: Volocity	6
Airbus: City Airbus	9
Airbus: Vahana	10
XTI aircraft: Trifan600	10
Ehang: EH216	10
Lift Aircraft: Hexa	13
Opener Blackfly	13
Bell: Nexus 4EX	14
Wisk: Cora	14
Kitty Hawk: Heaviside	15
Stato dell'arte del mercato dei droni da trasporto merci	15
Volocopter: Volodrone	15
Boeing: CAV	16
Flying Basket: FB3	16
Ehang	16
Pipistrel: Nuuva V300	18
Amazon Prime Air: MK27	18
Flytrex	19

Zipline	20
Airbus: Skyways	21
F-drones	22
Flirtey: Eagle	22
Wingcopter: Wingcopter 178	23
DHL: Parcelcopter 1-2-3-4	25
Wing	25
Matternet: M2V9	26
Quadro normativo	28
Categoria Open	30
Categoria Limited Open	33
Categoria Specific	34
Scenari Standard	34
PDRA	36
SORA (sintetica)	39
Categoria Certified	42
U-space	43
Analisi SORA	45
1. Descrizione del ConOps	45
2. Determinazione della classe intrinseca di rischio a terra dell'UAS (GRC: ground risk class)	46
3. Determinazione del GRC finale	48
4. Determinazione della classe iniziale di rischio aereo dell'operazione (ARC: air risk class)	56
5. Mitigazione e valutazione ARC residuo	58
6. TMPR e livelli di robustezza	60
7. Determinazione SAIL	63
8. Determinazione OSO	64
9. Considerazioni sullo spazio aereo e sulle aree terrestri adiacenti a quelle operative	66
10. Portfolio completo sulla sicurezza	67

Simulazioni analisi SORA	68
Analisi del rischio a terra	76
Metodologia suggerita da ENAC	76
Simulazioni numeriche sulla metodologia ENAC	81
Metodologia di Valavanis et al.	87
Confronto con formula ENAC	89
Metodologia di Valavanis modificata Primatesta et al.	92
Simulazioni	93
ELOS e confronto tra ENAC e Valavanis, originale e modificato	98
Sezione dei grafici singoli di variazione dei parametri	99
Confronto ENAC – Valavanis con ELOS	106
Metodologia AIS (Abbreviated Injury Scale)	108
Introduzione all’asintoto	114
Confronto tra il metodo di Valavanis, di Primatesta e AIS asintotico	117
Metodo AIS asintotico: variazione ELOS	125
Conclusioni	127
Glossario	VI
Lista delle figure	VIII
Lista delle tabelle	XI
Bibliografia	XII

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei spendere alcune parole per ringraziare tutti coloro che mi hanno accompagnato e sostenuto in questo percorso di crescita personale, e che hanno contribuito a creare gli incredibili ricordi che porterò con me per tutta la vita.

Innanzitutto, ringrazio il mio relatore Giorgio Guglieri per la possibilità offertami e Stefano Primatesta per la disponibilità, la gentilezza e la puntualità con cui mi ha guidato ed aiutato in questi mesi di lavoro. È stato un onore.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, in particolar modo ai miei genitori, che mi hanno sostenuto, supportato e sopportato in ogni momento di questo percorso e che hanno reso possibile il raggiungimento di questo traguardo.

Un sentito grazie a tutti gli amici con cui ho condiviso questi anni, sia nei momenti più piacevoli e spensierati sia in quelli più faticosi, sempre vicini e pronti a consigliarmi. Ho avuto accanto persone speciali, alcune che conoscevo da sempre e alcune che sono entrate a far parte della mia vita lungo questa avventura, ma tutte che hanno avuto il loro ruolo in questo risultato.

Ringrazio in particolare Andrea Caporali, Giovanni Cena e Domenico Cesare, colleghi e amici con cui ho condiviso ogni singolo giorno in aula e che hanno contribuito in maniera insostituibile al mio percorso.

Infine, il mio pensiero va alle persone che mi hanno accompagnato lungo questo cammino e che ora purtroppo non possono essere a festeggiare con me questo momento.

Grazie a tutti, senza di voi non sarebbe stato così memorabile.

Abstract

Lo scopo di questa tesi di laurea magistrale è di valutare l'applicabilità dei droni a servizi di mobilità urbana e non solo, spaziando da un approccio più legato alla normativa ad uno maggiormente operativo, il tutto correlato allo stato dell'arte dei prodotti al momento presenti sul mercato.

Il lavoro è strutturato partendo da un'analisi delle principali soluzioni esistenti, sia per quel che riguarda i droni per il trasporto persone che quelli per il trasporto merci, con un particolare focus sui velivoli a decollo e atterraggio verticale completamente elettrici.

Sono valutate le ultime modifiche alla normativa vigente, ed è analizzato come essa categorizzi i diversi droni e scenari operativi, intesi sia in chiave di caratteristiche di missione che del contesto, terrestre ed aereo, in cui si svolgono.

È stata effettuata una valutazione della metodologia di analisi di rischio come previsto dalla normativa Europea, attraverso il processo SORA, considerando non solo dei casi generici ma anche le possibilità offerte da analisi semplificate e standardizzate.

La tesi successivamente si concentra sulla valutazione del rischio a terra correlato alla missione, considerando quattro differenti approcci noti allo stato dell'arte: (i) il metodo adottato dalle linee guida ENAC; (ii) il metodo proposto da Valavanis et al.; (iii) il metodo modificato proposto da Primatesta et al.; e, (iv), la metodologia basata sui livelli AIS (Abbreviated Injury Scale).

Riguardo quest'ultima, è stato effettuato un lavoro di elaborazione e miglioria di come viene valutata l'influenza sul rischio del parametro ambientale di sheltering, introducendo un coefficiente correttivo con lo scopo di modellare con maggior realismo il rischio in aree con elevata protezione ambientale per la popolazione.

Dal confronto tra i diversi metodi, effettuato basandosi su droni commerciali, si è valutata l'influenza dei principali parametri operativi e del mezzo sul rischio a terra, nonché come, fissato quest'ultimo valore, si possa trovare il miglior compromesso tra le caratteristiche del velivolo, in particolare l'affidabilità, e il tipo di missione che si desidera svolgere.

Tale confronto ha permesso di valutare non solo le differenze tra i metodi, tra le assunzioni su cui si basano e tra i diversi approcci al rischio che considerano, ma anche le peculiarità, i punti di forza e i limiti di ogni processo. Un'attenzione particolare è stata dedicata al confronto tra la metodologia di Valavanis e la rielaborazione di Primatesta, riguardante una diversa formulazione dell'area di esposizione nell'impatto del drone al suolo, e alle caratteristiche che differenziano i metodi e i conseguenti risultati.

Di notevole interesse sono inoltre i risultati ottenuti con l'innovativo metodo AIS, molto promettente nel campo della mobilità urbana con droni di piccole dimensioni, e in grado di garantire missioni con elevati standard di sicurezza. Sono stati inoltre valutati i limiti attuali di tale processo di analisi del rischio e i punti su cui è possibile procedere con futuri sviluppi e valutazioni sperimentali.

Introduzione

Il mondo si trova sulla soglia di una rivoluzione in ambito di mobilità urbana nemmeno ipotizzabile solo pochi anni fa, dovuta all'esponenziale sviluppo delle tecnologie legate all'aviazione unmanned. Le prospettive di sviluppo di servizi tramite drone sono allettanti e spaziano tra un'ampia gamma di possibilità, interessando sia trasporto passeggeri che merci, in ambienti urbani o rurali, con soluzioni tecniche innovative e le cui potenzialità sono forse ancora non completamente comprese.

Lo sviluppo in prospettiva di una fitta rete di rotte commerciali predefinite, affiancate a consegne e trasporti on-demand, porta ovviamente alla sfida tecnica di realizzare velivoli a pilotaggio remoto, se non addirittura completamente autonomi e con solo monitoraggio da centri di comando.

In un futuro prossimo si ipotizza quindi che le città, ma anche zone meno densamente abitate, saranno popolate da intere flotte di velivoli unmanned con caratteristiche tecniche, masse e dimensioni molto differenti, che costituiranno l'ossatura di un nuovo paradigma di mobilità e di connessione, andando ad alterare in modo irreversibile il panorama urbano e non solo.

Le soluzioni tecniche sviluppate come concetto progettuale del drone ad oggi sono ancora le più disparate; alcune architetture sembrano maggiormente promettenti di altre, ma sostanzialmente è assente un canone affermato per il design del velivolo.

Generalmente tutti i produttori e le sperimentazioni mirano a ricercare un drone a propulsione elettrica avente caratteristiche di decollo e atterraggio verticali, nonché con la possibilità di effettuare hovering. In alcuni casi si ipotizza la presenza di un motore termico di supporto, soprattutto per mezzi pensati per un range operativo molto ampio; i velivoli derivanti da tali ipotesi normalmente risultano essere multicotteri, con spesso anche la presenza di un'ala fissa: in tale configurazione possono essere necessari sistemi di traslazione dal volo verticale a quello orizzontale con sostentamento alare.

La prospettata imminente crescita dell'utilizzo di droni come aerotaxi, per il delivery e per tutta una gamma di operazioni sia professionali che ludiche, pone in primo piano la questione della sicurezza. Tale criticità risulta crescente nel caso di ambienti operativi ad alta densità abitativa, come una città, scenario del nuovo sviluppo della mobilità urbana, nonché ipotetica sede della maggior parte dei nuovi servizi e rotte unmanned. La sicurezza delle persone presenti nell'area delle operazioni risulta essere uno dei principali punti aperti nello sviluppo delle applicazioni dei droni, nonché un forte fattore vincolante per l'espansione dei servizi unmanned e la loro possibile implementazione in scenari reali.

Per riuscire a valutare in maniera corretta i rischi correlati alla missione, principalmente riguardanti le persone a terra, ma anche possibili collisioni mid-air o con strutture, è necessario sviluppare dettagliate metodologie di analisi e previsione del rischio. A valle delle analisi sul rischio correlato alla missione, sono necessarie tutta una serie di valutazioni sull'accettabilità dell'operazione in base alla sua pericolosità e alle possibili forme di mitigazione del rischio.

Gli enti normativi, sia europei che globali, sono in fase di attenta implementazione di nuove forme di regolamentazione, di categorizzazione di droni e di operazioni, nonché di procedure per poter autorizzare una missione, previa analisi di rischio e certificazione che la pericolosità sia entro limiti accettabili. Tale livello di rischio massimo tollerabile dipende dal tipo di mezzo,

operazione, ambiente a terra, spazio aereo, e da valutazioni sulle condizioni al contorno della missione.

Un aspetto particolarmente critico, soprattutto in ottica di urban air mobility, è l'analisi di rischio a terra per le persone presenti nell'area delle operazioni. È necessario quindi sviluppare nel modo più accurato possibile una metodologia (o delle metodologie) di risk assessment, per valutare la pericolosità della missione e le eventuali mitigazioni da applicare. Uno studio sulle analisi di rischio non può che partire dallo stato dell'arte di tali metodologie e da quelle che ad oggi vengono maggiormente utilizzate, derivate principalmente da metodi studiati e perfezionati per l'aviazione generale. Il fatto che le metodologie applicate ai droni siano state sviluppate per velivoli convenzionali spesso porta ad una impostazione eccessivamente conservativa delle analisi, e quindi ad una valutazione della pericolosità della missione troppo elevata e limitante per la realizzazione dell'operazione stessa. Approfondendo l'analisi dei metodi di analisi rischio a terra, risulta evidente come sia necessario non solo sviluppare processi propri del mondo unmanned, ma anche come serva ottimizzarli per valutare droni relativamente piccoli e leggeri, che, proprio per le loro caratteristiche, sono i meno accuratamente simulati dalle metodologie ispirate all'aeronautica convenzionale. È inoltre importante mettere a punto un metodo ottimizzato su tale categoria, in quanto si ipotizza che la maggioranza dei droni utilizzati in ambito di missioni in scenari urbani, principalmente per i servizi di delivery domestico, saranno di taglia ridotta.

Seguendo la logica appena descritta, in questa tesi si analizzerà sia la normativa attuale e le sue potenzialità nella simulazione di missioni, comprensiva di tutte le relative metodiche consigliate per effettuare le analisi di rischio, sia un ulteriore set di possibili procedure di valutazione del rischio a terra. In particolare, sarà analizzata una metodologia più tradizionale come quella proposta da Valavanis et al., e una sua modifica proposta da Primatesta et al., che modifica la valutazione di un parametro caratterizzante l'impatto tra drone e popolazione per ottimizzarlo per velivoli unmanned; sarà poi introdotto e approfondito un metodo più innovativo, basato sulla Abbreviated Injury Scale (AIS).

La tesi presenterà un'analisi delle diverse metodologie e un confronto tra esse, valutando la relazione tra i parametri operativi e il rischio calcolato, nonché i limiti e le potenzialità di sviluppo e ottimizzazione. Per il metodo AIS verrà inoltre proposta una possibile miglioria volta a rendere più accurata la simulazione di missioni in scenari con fattori di protezione ambientale molto elevata, come può essere un teatro urbano, utilizzando droni di piccola taglia. Per questo metodo saranno analizzati i punti di criticità, proposte possibili miglorie e individuati gli spazi di sviluppo futuri.

Per quel che riguarda invece il quadro normativo, non solo verranno analizzati i regolamenti correnti e la categorizzazione di droni e operazioni allo stato dell'arte, ma anche come in tale scenario si inseriscano i servizi di delivery e aerotaxi, argomenti di maggiore interesse in questa trattazione. Si valuteranno inoltre i processi di simulazione e calcolo rischio missione ad oggi disponibili, quali SORA (Specific Operations Risk Assessment), PDRA (Predefined Risk Assessment) e STS (Standard Scenario): se ne analizzeranno le potenzialità e i limiti applicativi e si proporranno alcuni esempi. Sarà inoltre analizzato come il rischio a terra e in aria, legato alle operazioni, possa essere mitigato secondo la regolamentazione attuale. Una sezione specifica sarà dedicata all'esposizione del metodo di analisi rischio a terra proposto da ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), con relativi esempi ed esposizione dei limiti del processo, principalmente dovuti ad un approccio eccessivamente conservativo.

Le analisi sullo scenario attuale dei droni non possono prescindere da una presentazione delle soluzioni presenti sul mercato, sia per quel che riguarda gli aerotaxi che i droni delivery, contemplando un ampio ventaglio di soluzioni tecniche e operative. I dati reali di alcuni droni saranno inoltre usati per gli esempi proposti nella trattazione, nonché per eseguire test e confronti sui diversi metodi il più possibile realistici e contestualizzati a velivoli effettivamente presenti e adatti alle missioni ipotizzate. Per tali motivi, nella tesi è presente una sezione che accoglie la presentazione di alcuni droni, sia già disponibili in commercio che in fase più sperimentale.

L'obiettivo della tesi risulta quindi essere lo studio dello stato dell'arte sia della normativa che dei droni esistenti, nonché una panoramica sui metodi di risk assesment ad oggi maggiormente diffusi ed utilizzati. Il contributo che si prefigge di fornire è quello di non solo effettuare un confronto approfondito tra la relazione dei diversi metodi di calcolo del rischio a terra con le caratteristiche operative della missione e tecniche del drone, ma anche di proporre una miglitoria dell'innovativo metodo basato sulla AIS e una base di partenza per ulteriori futuri sviluppi ed implementazioni.

Coerentemente a tali obiettivi, il lavoro è stato suddiviso in cinque capitoli riguardanti i seguenti argomenti:

1. Analisi dello stato dell'arte degli aerotaxi presenti sul mercato
2. Analisi dello stato dell'arte dei droni delivery presenti sul mercato
3. Analisi della normativa vigente e delle sue principali caratteristiche, soprattutto in relazione alla definizione e autorizzazione di una missione rispetto al rischio ad essa correlato
4. Valutazione dei principali metodi per il calcolo del rischio a terra, comprendenti le metodologie di Valavanis e Primatesta, quella suggerita dalle linee guida ENAC, il metodo basato sulla Abbreviated Injury Scale (AIS) e la miglitoria proposta
5. Applicazione dei suddetti metodi a un campione di droni, in modo da individuare i punti di forza e di debolezza di ciascuno di essi, nonché di valutarne le potenzialità. Approfondimento sulla metodologia AIS in relazione a un fattore di rischio accettabile sempre minore, analisi delle caratteristiche specifiche della metodologia, valutazione degli attuali limiti e dei possibili sviluppi e miglitorie del metodo

Stato dell'arte del mercato degli aerotaxi

Aurora (Boeing)

L'azienda è una sussidiaria della Boeing e sta sviluppando un PAV, ovvero un passenger air vehicle, tipologia di mezzo che combina il decollo verticale con il volo ad ala fissa in crociera, su cui si concentrano gli sforzi dell'azienda. Essendo ancora in fase puramente sperimentale, sono aperti molti possibili sviluppi e modifiche, ma al momento si ipotizza la possibilità di creare tanto un modello a due posti quanto uno a quattro. Lo scopo del prototipo è di sviluppare e testare un sistema di guida completamente autonomo per un drone da trasporto passeggeri al 100% elettrico. La dimensione attuale del prototipo è di circa 9x8.5 metri e il target di autonomia per cui si sta sviluppando questo progetto è di circa 80 km. Il primo volo è stato effettuato il 23 gennaio 2019 ed è stato un take-off e landing controllato; si ipotizza che il velivolo possa essere maturo e pronto per l'immissione sul mercato solamente a partire dal 2023.



Figura 1 - Aurora

Lilium Air Mobility

Il target è la mobilità a livello regionale ad alta velocità (*high speed regional air mobility*). La descrizione che l'azienda stessa dà del suo prodotto è "*electrical vertical take-off and landing jet*", ossia un mezzo a decollo verticale, caratterizzato da un'architettura ad ala fissa che permette coprire tratte extraurbane di connettività regionale in modalità 100% elettrica.



Figura 2 - Lilium Air Mobility

La soluzione adottata è di avere un elevato numero di fan intubati solidali con i flap delle quattro semiali (due anteriori e due posteriori), che possono quindi variare il proprio angolo (*thrust vector control*) permettendo al velivolo di passare dalla configurazione di decollo verticale a quella di volo con ala fissa.

La configurazione attuale prevede trentasei eliche intubate su un mezzo di circa 14x8.5 metri, studiato per una condizione di cruise di 280 km/h a 3000 m di quota e con un range previsto al momento di 250 km. Lo sviluppo del drone mira a contenere l'impatto sonoro dei propulsori, soprattutto in fase di decollo e atterraggio, tanto è vero che al momento il livello raggiunto è inferiore ai 60 dBA a 100 metri di distanza: un tale risultato è possibile grazie alle eliche intubate di tipo DEVT (*ducted electric vector thrust*) integrate nelle semiali. Questa soluzione permette di incrementare l'efficienza aerodinamica e di ridurre l'impatto sonoro, grazie al fatto che la presenza del condotto riduce le perdite di estremità delle pale delle eliche, diminuendo conseguentemente la vorticosità e guidando il flusso. Per avere massima efficienza e controllo, sia nelle fasi a volo verticale che di cruise, ogni singolo ugello è a geometria variabile e a controllo autonomo.

La configurazione dei motori e la piccola dimensione delle eliche comportano che la fase di hovering sia estremamente dispendiosa da un punto di vista energetico, tuttavia, visto il concept di connettività extraurbana seguito nello sviluppo, questo dovrebbe comunque interessare solo un tempo minimo rispetto all'intera missione (ad esempio, nel caso di un'operazione che duri fino ad 1 h, la fase di hovering è stimata circa in 1 min). La soluzione scelta è stata quella di utilizzare dei propulsori solidali ai flap, grazie a cui sono stati ottenuti anche notevoli vantaggi dal punto di vista dell'avionica, ridotta al controllo dell'angolo dei quattro flap e alla regolazione di rpm e configurazione ugelli dei motori. Al momento, l'azienda sta sviluppando sia una versione da cinque posti che una da sette, entrambe con un posto riservato per il pilota. Nel programma di sviluppo della mobilità portato avanti da Lilium si inserisce anche la collaborazione con diverse regioni, per creare una rete di vie aeree servite da droni prodotti dalla suddetta azienda, per poter arrivare a collegare tra loro specifici vertiporti. Tali progetti sono in corso di studio sia in Florida, con quattordici possibili vertiporti, che nella regione della Baviera, per connettere le principali città e aeroporti. In una prima fase di questo progetto, si suppone di avere solo tratte di connettività regionale, ma non strettamente di urban air mobility, considerata dall'azienda una realtà non ancora sufficientemente matura, sia dal punto di vista di implementazione che di regolamentazione. In uno scenario di connettività regionale e non cittadina si riduce estremamente la complessità normativa e operativa legata alla sicurezza di un sorvolo in scenario urbano: nell'ipotesi della Lilium, ci si limita a mettere in sicurezza solamente il corridoio che permette al velivolo di allontanarsi dal vertiporto cittadino e raggiungere la campagna al di fuori dei confini dell'agglomerato urbano. A livello di infrastrutture l'azienda sta sviluppando i propri concept di vertiporti, sia a terra che sopra edifici esistenti, nonché l'integrazione con servizi di mobilità già disponibili, al fine di creare non solo una piattaforma di decollo e atterraggio, ma un vero e proprio hub di interscambio. A dicembre 2020 la Lilium ha ottenuto la certification basis dall'EASA e sta procedendo per ottenere il riconoscimento equivalente da parte della FAA.

Joby aviation: S4

Il modello Joby S4 presenta una configurazione ad ala fissa con sei motori elettrici. I propulsori hanno la possibilità di variare il proprio angolo per passare dalla configurazione di cruise a quella di vertical take-off e landing. La variazione dell'angolo avviene diversamente per i due propulsori anteriori, dove si muove solo l'elica e il proprio



Figura 3 - Joby aviation: S4

supporto, rispetto ai quattro posteriori, dove l'intera gondola motore ruota. L'aerotaxi presenta cinque posti a sedere di cui uno riservato al pilota, è stato pensato per missioni regionali di medie/grandi distanze, non per ambienti urbani. Il range, infatti, è di 150 miglia, con una velocità massima di 200 mph. Lo sviluppo del prototipo ha sempre avuto come obiettivo il mantenimento di un impatto sonoro molto ridotto, per il comfort sia dei passeggeri sia degli abitanti delle zone sorvolate. Il primo prototipo ha volato nel 2017 e al momento è in corso il processo di certificazione da parte della FAA: l'azienda ha come obiettivo quello di ottenere la certificazione del prodotto per il 2023, in modo tale da poter iniziare a proporre voli commerciali a partire dal 2024. Inoltre, per quanto riguarda la produzione, l'azienda è in trattativa con Toyota per raggiungere un accordo di collaborazione.

Uber elevate

Progetto sviluppato in associazione con Hyundai sul quale sono stati investiti molti fondi e riposte aspettative sin dalle prime fasi. Tuttavia, a causa della crisi conseguente al COVID-19, un cambiamento dei target commerciali della società ha fatto sì che il progetto fosse venduto alla Joby nel dicembre 2020. Nonostante ciò, Uber continuerà a partecipare come investitore e inoltre si occuperà dello sviluppo di app e connettività relativa al prodotto.

Volocopter: Volocity

Il concept è quello di un multicottero 100% elettrico pensato per la mobilità urbana, con diciotto propulsori fixed pitch installati al di sopra della cabina su una struttura tubolare.

I propulsori, sia per design che per posizionamento, sono stati studiati per avere bassi livelli di impatto acustico (in fase di massima criticità, ovvero all'atterraggio, non supera i 75 dBA); inoltre, grazie alle ridondanze, l'aerotaxi può sostenere una tripla failure dell'impianto propulsivo.

Il velivolo è pensato per rotte cittadine: il range è di 35-65 km con una cruise speed di 90 km/h e un payload massimo di 200 kg, corrispondente al trasporto di due persone. La MTOM è di 900 kg e il diametro del velivolo è di 9.3 m per un'altezza di 2.5 m.

L'azienda sostiene che il velivolo ha raggiunto una safety dell'ordine di 10^{-9} failure/FH.



Figura 4 - Volocopter: Volocity

Il drone è pensato per una rete integrata di rotte cittadine tra numerosi vertiporti, per questo motivo i tempi morti a terra devono essere ridotti al minimo. Il design che consegue da questa scelta ha portato a sviluppare un velivolo con nove pacchi batteria agli ioni di litio (ridondanza multipla), facilmente e velocemente sostituibili nei vertiporti, così da non dover attendere il tempo di ricarica tra un volo e quello successivo.

Il design dell'aerotaxi è stato ottimizzato per il trasporto di due persone: inizialmente una sarà il pilota, per poi passare a velivoli per due passeggeri completamente unmanned, con l'avanzamento della maturità tecnologica e del mercato e con l'aumento dell'accettazione e della fiducia da parte degli utenti. Anche a seguito di un'analisi di mercato approfondita svolta da Volocopter (riportata in due white paper rilasciati dalla stessa), il numero di passeggeri è stato scelto come punto di ottimo, sia per quanto riguarda il progetto e la fattibilità del mezzo, sia da un punto di vista puramente economico e di occupazione dell'aerotaxi.

Infatti, l'occupazione media dei taxi tradizionali è di 1-3 passeggeri paganti a tratta, da cui deriva la scelta di un velivolo che abbia una capacità ad oggi di un passeggero, e che in un domani arriverà a trasportarne due. Anche la decisione di specializzarsi nel trasporto cittadino (massimo range: 65 km) è frutto di un'attenta analisi di mercato: è stato analizzato che nel 93% delle grosse città/megalopoli a livello globale si ha la maggior parte della popolazione urbana, nonché i principali aeroporti, in un raggio di 30-50 km dal centro. Un caso di studio riportato nei white paper prima citati è il collegamento tra Manhattan e l'aeroporto JFK a New York: un viaggio che in automobile dura 60-90 minuti e che è fortemente influenzato dal traffico locale può essere sostituito da un volo di 30 minuti con un aerotaxi, integrando facilmente le strutture aeronautiche e le aerovie già presenti nella zona per il volo degli elicotteri. Volocopter sostiene quindi che, sotto diversi punti di vista, la soluzione migliore da adottare sia quella di un mezzo piccolo e relativamente leggero, che trasporti poche persone per distanze contenute: riduzione del peso e del range implicano anche una riduzione del consumo energetico necessario alla missione e di conseguenza un circolo virtuoso che porta a batterie più leggere e con un ingombro minore.

Inoltre, sempre nell'ottica dell'azienda, un progetto più semplice e ricco di ridondanze (batterie, propulsori...) porta a un livello di sicurezza maggiore e a una sostanziale riduzione dei costi di manutenzione.

Il primo volo è stato effettuato nel 2011, mentre il primo test unmanned nel 2017 a Dubai. Recentemente si è anche svolto un test a Helsinki che ha interessato per la prima volta in contemporanea sistemi UTM e ATM dell'aeroporto, per studiare l'integrazione tra velivoli manned e unmanned.

Volocopter è stata la prima società con il permesso di far volare un manned multicopter, ed è inoltre l'unica azienda nel campo degli aerotaxi ad avere un *Design Organisational Approval* (DOA) da parte di EASA. L'azienda si sta muovendo, non solo con EASA per poter certificare sia il processo produttivo che il prodotto, ma anche con FAA, CAAS (*Civil Aviation Authority of Singapore*), CAAC (*Civil Aviation Administration of China*) e altri enti normativi sparsi sull'intero globo.

Volocopter ha poi richiesto ad EASA l'*Air Operator Certificate* (AOC) per poter iniziare l'uso di aerotaxi in abito commerciale.

Volocopter si sta impegnando nel seguente iter burocratico e di certificazioni:

- *Type certification* per l'aircraft
- *Organizational approval* per il design e la produzione dell'aircraft
- *Organizational approval* per l'organizzazione che governa l'aircraft
- Licenze per piloti e manutentori e in generale per lo staff coinvolto nelle operazioni
- *Organizational approval* per l'azienda che si occuperà della manutenzione
- *Organizational approval* per le aziende che si occuperanno del training a piloti e manutentori
- Approvazione per i Voloport
- *Organizational approval* per l'ente/azienda che gestirà i voloport

L'azienda ha inoltre illustrato nei suoi white paper come la propria offerta miri ad estendersi ben oltre il semplice mezzo, comprendendo anche la creazione e la gestione dell'intera rete di infrastrutture dedicate all'advanced urban air mobility, per integrare al meglio nuove possibilità di connessione e nuovi corridoi aerei con l'esistente scenario di collegamenti urbani. L'obiettivo è quello di creare nei prossimi anni un ecosistema di urban air mobility interamente gestito dall'azienda in collaborazione con le autorità e gli enti locali, sia per quanto riguarda l'unificazione tra nuovi e tradizionali mezzi di connessione, sia per ciò che riguarda l'introduzione di regolamenti innovativi e studiati ad hoc. La stessa azienda sta sviluppando numerosi concept di propri vertiporti: i Voloport; la prima installazione di tali piattaforme e hub annessi avrà come location Singapore, una delle città - insieme a Parigi e alcune altre - che stanno collaborando in maniera più attiva con l'azienda. La volontà di avere un'architettura proprietaria dei vertiporti si inserisce anche nel discorso più ampio di gestione della flotta di mezzi, sia per quel che riguarda il controllo, sia per la sostituzione dei pacchi batteria e la manutenzione. L'area necessaria per il take-off e landing deve essere di circa 17x17 metri e vi è la necessità che essa sia affiancata dall'intera struttura del vertiporto, visto dalla Volocopter come un punto di interscambio con le infrastrutture già esistenti in città, nonché come sede dei customer service per i passeggeri.



Figura 5 - Volocopter: Voloport

Alcuni dei punti chiave evidenziati nel white paper per poter arrivare a sviluppare un contesto di trasporto cittadino avanzato, integrato e sicuro, sono la creazione/gestione di sistemi:

- ATM: Air Traffic Management
- UTM: Unmanned aircraft system Traffic Management
- CNS: Communications, Navigation, Surveillance systems
- ATCO: Air Traffic Control Officers, per uno sviluppo futuro di gestione con ridotto impiego di risorse
- Previsioni meteo accurate, soprattutto per quanto riguarda le possibili raffiche di vento

Per poter arrivare a uno scenario sviluppato e maturo di infrastrutture avanzate di connettività 3D in città, sarà ovviamente necessario anche ripensare sostanzialmente il training a piloti, manutentori, personale di servizio e di terra impiegati nei vertiporti e nei centri di manutenzione.

Altro punto fondamentale sarà una forte integrazione digitale per la gestione dei dati di volo, del livello di carica delle batterie, del traffico, della manutenzione, nonché dell'interfaccia con il resto delle infrastrutture cittadine e con il cliente. Proprio su questo ultimo punto, Volocopter sta sviluppando un'app per favorire l'interazione con il pubblico: VoloIQ

L'azienda inoltre ha svolto un'analisi di mercato sulla risposta dei cittadini a un servizio di aerotaxi, con pilota a bordo oppure autonomo; tale analisi ha anche insistito particolarmente sul livello di accettazione di tali velivoli su temi fondamentali quali la sicurezza e il disturbo acustico, oltre che sulle aspettative che le persone hanno per tali servizi in futuro.

Sono emersi sette principi chiave:

- Sicurezza
- Sostenibilità
- Equità di accesso
- Basso impatto acustico
- Multimodal connectivity
- Sviluppo di una forza lavoro locale
- Purpose-driven data sharing

Per poter passare, in una fase più matura del servizio di aerotaxi, da un velivolo col pilota a bordo ad uno unmanned autonomo o quantomeno a pilotaggio remoto, è necessario, oltre che avere una risposta positiva dell'opinione pubblica, un'importante implementazione e sviluppo sia dei sistemi di bordo che di quelli a distanza. Saranno necessari:

- Infrared cameras
- Electro-optical cameras
- Long-range radar
- Altimetri di precisione

La rimozione del pilota è vista dall'azienda non solo come un passo di evoluzione tecnologica necessario, ma anche come uno step che permetterà un boost economico molto importante: consentirà, infatti, di raddoppiare il possibile numero di passeggeri paganti per ogni volo e di rimuovere tutti i costi legati al pilota stesso (training, aggiornamento, stipendio...), portando dunque ad una evoluzione al ribasso delle tariffe e ad un'accessibilità e un appeal maggiori agli occhi dei consumatori. Ovviamente tale passo sarà possibile solo quando il livello di sicurezza sarà sufficiente e l'accettazione, soprattutto psicologica, di un tale servizio sarà acquisita dall'utenza.

Airbus: City Airbus

Per ora è solo un dimostratore che ha svolto il primo test di volo nel 2019, ma Airbus ambisce a svilupparlo nei prossimi anni. Il drone proposto da questa azienda possiede quattro posti, è 100% elettrico e mosso da otto motori ognuno da 100 kW; sono presenti otto eliche intubate accoppiate in quattro condotti, e non è presente un'ala fissa. Al momento le batterie sono in grado di fornire 110 kWh, capaci di muovere il velivolo a una cruise speed di 120 km/h, mantenendola per un massimo di 15 minuti. Il pilotaggio è di tipo autonomo o da remoto.



Figura 6 - Airbus: City Airbus

Airbus: Vahana

Drone monoposto con tecnologia tilt-wing, al momento è sviluppato principalmente come dimostratore per lo studio di sistemi di volo autonomo (sono già stati effettuati più di 130 test). Il velivolo ha un range di 50 km e presenta otto motori ognuno da 45 kW, alimentati da un pacco batterie in grado di garantire 38 kWh. Gli otto motori sono distribuiti in modo uniforme sulle quattro semiali (due posteriori e due anteriori), tutte in grado di ruotare rispetto alla radice.



Figura 7 - Airbus: Vahana

XTI aircraft: Trifan600

È un concept di un jet privato ad ala fissa che però ha la possibilità di eseguire decolli e atterraggi verticali. Il mezzo è mosso da tre eliche intubate di notevoli dimensioni, due integrate nelle semialie con possibilità di passare dalla posizione di decollo a quella di crociera (da spinta verticale a orizzontale), una integrata nel main body dell'aereo, utile solo durante le fasi verticali, il cui vano viene richiuso nella fusoliera durante la crociera. Il



Figura 8 - XTI aircraft: Trifan600

velivolo è pensato per cinque persone più il pilota. Inizialmente il modello sarà a propulsione ibrida, ma si prevede che in futuro si arriverà al 100% di alimentazione elettrica.

Il range previsto per il velivolo è di circa 1250 km se si sfruttano le potenzialità di decollo e atterraggio verticale, mentre sale a oltre 2200 km se si utilizza come un aereo convenzionale.

Il primo test su un modello in scala 0.65:1 è stato svolto nel 2018 e ad oggi, nonostante lo sviluppo del progetto sia ancora nelle fasi iniziali, l'azienda può contare già più di ottanta preordini.

Ehang: EH216

Si tratta di un aerotaxi biposto pensato per la mobilità urbana short/medium haul, il cui design è stato sviluppato ricercando una elevata sicurezza attraverso le ridondanze e con un approccio fail-safe. Il velivolo presenta sedici motori accoppiati (il modello EH116 ne presentava solo otto) su otto bracci perimetrali pieghevoli ed è progettato per un payload massimo di 220 kg; in tale configurazione il range è di 35 km con una velocità di punta di 130 km/h. I motori brushless sono alimentati da dodici batterie in ridondanza, la cui energia è ripartita attraverso un sistema di gestione ottimizzata, risultano essere circa un terzo del peso complessivo del velivolo, mentre la fusoliera è realizzata in materiale composito (epoxy CF e lega di alluminio).

Ehang prevede, diversamente da Volocopter, uno sviluppo di un servizio di aerotaxi da subito senza pilota a bordo, ma con una gestione autonoma e/o con pilotaggio remoto utilizzando connettività 5G. L'azienda prevede di sviluppare un sistema integrato della gestione delle flotte di droni, con la creazione di aerovie controllate e vertiporti proprietari (E-port), il tutto gestito da centri operativi in cui si concentrano tutti i sistemi di controllo e monitoraggio dei droni, nonché l'eventuale gestione delle emergenze e il pilotaggio remoto.



Figura 9 - Ehang: EH216

Più nello specifico, il Command & Control Center si occuperà di:

- Monitoring
- Dispatching
- Controlling: Ehang prevede, come procedura di sicurezza, che in caso di anomalie il controllo del drone venga assunto da un pilota in remoto e non sia più autonomo
- Early-warning: in caso di problemi nello spazio aereo
- Cluster management: gestione della flotta di droni in modo coordinato e centralizzato

Ehang ha già avviato collaborazioni a livello globale per imporre il proprio prodotto in una vasta gamma di mercati, ottenendo accordi commerciali per lo sviluppo e test volti alla creazione di servizi di mobilità. Alcuni dei Paesi coinvolti sono Olanda, Corea del Sud, Austria, Cina, Qatar, Canada, USA, UAE.

Nel dicembre 2020 Ehang ha pubblicato un white paper in cui illustra i propri progetti non solo per lo sviluppo del drone, ma anche per i diversi ambiti in cui può essere utilizzato, per gli sviluppi futuri e l'espansione degli scenari operativi possibili, nonché sulla mobilità urbana in generale, sia da un punto di vista socioeconomico che di integrazione e sviluppo dell'intermodalità urbana attuale. L'azienda ha già previsto utilizzi del proprio drone al di là del servizio di aerotaxi, proponendo rotte turistiche e collegamenti con alberghi di lusso (maggio 2019, provincia Zhejiang, Cina), modifiche al velivolo per renderlo un mezzo antincendio, per trasporto merci o per assistenza medica. L'azienda inoltre è in contatto con diverse compagnie aeree per creare dei servizi integrati, che forniscano al cliente anche la connessione aeroporto-centro città, ovvero quelli che vengono spesso chiamati "last 50 km".

Per quel che riguarda il servizio di aerotaxi, Ehang ha sottolineato come la propria visione sia più prossima a quella di un bus on-demand rispetto a quella di un taxi tradizionale, con rotte predefinite tra punti fissi (base points: unici in cui autorizzare decollo e atterraggio), gestite dalla sala di controllo centrale.

Nel white paper l'azienda inoltre sottolinea quali siano i propri punti chiave riguardo la sicurezza:

- Volo autonomo, in modo da escludere i possibili errori umani
- Duplicazioni e ridondanze multiple, sia a bordo dell'aerotaxi che nelle basi operative a terra e nei sistemi di comunicazione
- Controllo fortemente centralizzato dalla sala operativa
- Sistema intelligente per evitare le collisioni
- Sistema intelligente per il monitoraggio e la diagnostica del mezzo

L'azienda sostiene inoltre che, essendo il controllo e il monitoraggio della flotta accentrato in una sola entità, risulta ottimizzata la gestione del traffico, con una visione collettiva e omnicomprensiva, che facilita non solo la gestione del servizio, ma anche la prontezza e l'efficacia della risposta a un'eventuale emergenza, nonché una fluida integrazione con il resto della città e dello spazio aereo. È un concetto di UTM diverso dall'approccio più classico di uniformazione dello spazio aereo manned e unmanned: Ehang propone dunque di gestire lo spazio aereo occupato da velivoli autonomi come un qualcosa di isolato, che solo dalla sede centrale viene omogeneizzato e integrato con tutti gli altri occupanti dello spazio aereo. Inoltre, la gestione delle rotte e il controllo anticollisione sono anch'essi accentrati nel Command & Control Center.

Ehang suppone poi di dedicare molta attenzione al customer service, sia per quel che riguarda gli E-ports, sia con la creazione di un'app per interagire col servizio.

A livello di regolamentazione, l'azienda sta lavorando e procedendo con diversi enti a livello globale per poter essere autorizzati ad espandere il proprio servizio; per citarne alcuni: EASA, CAAC, FAA, JARUS, ICAO.

Ehang, inoltre, nel suo white paper ha dedicato ampio spazio all'analisi economica del mercato aerotaxi ed in particolare alle sue possibilità di inserirsi, evidenziando come questa nuova mobilità tramite droni abbia costi estremamente ridotti rispetto all'aviazione generale (manutenzione semplice ed economica, staff minimale...) e come essa utilizzi infrastrutture sensibilmente più economiche rispetto agli aeroporti, ma anche ad autostrade o ferrovie. Inoltre, il capitale iniziale necessario a creare una flotta di droni è relativamente modesto, con un valore ipotetico di circa 300.000 di dollari per ogni EH216. Senza entrare eccessivamente nel dettaglio dell'analisi economica e di mercato condotta da Ehang, si stima che il ritorno sull'investimento iniziale sia minore di 2 anni, e che 600 h/year di utilizzo del drone, con un'occupazione media del 90% e una tariffa di 2.5 \$ per passeggero-km (1.5 \$ è la tariffa di riferimento per un taxi a New York), possano produrre un fatturato annuo superiore ai 350.000 dollari, di cui circa il 39% di profitto. Tale stima è conservativa, in quanto con economie di scala e con i prevedibili miglioramenti delle batterie, si ipotizza che in pochi anni i risultati economici possano migliorare sensibilmente. È stata inoltre effettuata un'analisi di sensitività che ha evidenziato che le batterie sono la voce di costo unitario maggiore e che ogni 1% di sua riduzione può portare a più del 2% di crescita del risultato operativo.

Lift Aircraft: Hexa

Drone monoposto con diciotto propulsori e altrettante batterie, per garantire ridondanza e capacità di sopportare failure multiple: i progettisti hanno dimostrato infatti che è possibile eseguire un atterraggio di emergenza in totale sicurezza anche con sei motori fuori uso. È presente, inoltre, un paracadute per le emergenze, che permette, considerando anche tutti gli altri aspetti progettuali, di ottenere un design complessivo del velivolo con un fattore di sicurezza superiore a 2.



Figura 10 - Lift Aircraft: Hexa

Il concept da cui è stato sviluppato il progetto è quello di permettere a ogni cliente il volo pilotato, sia in caso di trasporto (taxi) sia per rotte turistiche: tale obiettivo è raggiunto unendo una guida completamente autonoma per le fasi di decollo e atterraggio - in specifiche aree attrezzate - con una guida semplice e intuitiva una volta lontano dal suolo. Per permettere a chiunque di pilotare il drone sono da considerare due punti fondamentali: la capacità di guida in sicurezza e l'aspetto normativo. L'azienda prevede di sviluppare un supporto digitale completo per il cliente, che va da un'applicazione per ricevere informazioni su meteo e stato del velivolo, a un corso in Virtual reality da eseguire a bordo prima del decollo, per prendere dimestichezza con i comandi. È inoltre previsto un rigido checkup guidato prima di ogni missione. Per garantire la sicurezza l'intera flotta di droni deve essere monitorata da una sala controllo in cui sono presenti piloti in grado di intervenire da remoto nell'eventualità di anomalie, sia del mezzo che della guida da parte del cliente; a bordo è inoltre presente un autopilota a tripla ridondanza inseribile da parte del passeggero in qualunque momento. Dal punto di vista normativo, negli USA non è necessaria alcuna licenza per pilotare tale mezzo, poiché pesando meno di 432 lbs (circa 200 kg) rientra nella categoria ultralight. Per ridurre il peso, e per motivi di sicurezza in caso di atterraggio su una superficie non predisposta, il drone presenta infine quattro galleggianti perimetrali.

Opener Blackfly

Si tratta di un velivolo monoposto totalmente elettrico con più di 3.200 voli già effettuati per un totale di più di 30.000 miglia. Il drone è caratterizzato da otto eliche distribuite su quattro semiali, alimentate da sistemi di batterie ridondanti. Né i propulsori né le semiali



Figura 11 - Opener Blackfly

hanno la possibilità di ruotare rispetto al body del drone, ma il controllo di assetto è realizzato tramite la particolare geometria del mezzo e la regolazione degli rpm: il decollo e l'atterraggio per tale motivo non sono esattamente verticali, ma sono comunque compresi in 1 metro (con vento fino a 25 mph), ed essendo anfibo, è possibile atterrare anche in acque calme. Il drone ha inoltre la possibilità di eseguire hovering, offre funzionalità di aiuto all'atterraggio e di return-home, ma non di guida autonoma, essendo pensato per uso turistico e hobbistico a pilotaggio diretto. Coerentemente con tale target di mercato, il drone è stato progettato in modo che una sola persona possa smontarlo facilmente e velocemente per il trasporto su carrello.

Come per il Lift Aircraft Hexa, negli USA non è necessaria alcuna licenza per pilotare tale mezzo, dato che appartiene alla categoria ultralight avendo un peso di soli 142 kg. Per rientrare in tali restrizioni, il modello pensato per gli Stati Uniti presenta batterie meno potenti e più leggere rispetto alla versione internazionale (8 kWh contro 12 kWh), e di conseguenza anche la velocità di crociera e il range sono ridotti (rispettivamente: da 80 mph a 62, da 40 miglia a 25). L'impatto sonoro è contenuto, con soli 72 dBA a 150 metri di distanza.

Bell: Nexus 4EX

È un prototipo di aerotaxi che associa un'ala rigida a quattro eliche intubate con la possibilità di cambiare il proprio angolo rispetto al main body del drone (tilt-rotor), la cui propulsione, per come è stata ipotizzata, potrà essere sia di natura ibrida che completamente elettrica. Il velivolo è pensato per trasportare il pilota più quattro passeggeri a una velocità di crociera di 240 km/h per un range di circa 100 km per la versione elettrica e di oltre 240 km per quella ibrida. Per garantire la sicurezza, la progettazione ha seguito criteri improntati alla ridondanza (può atterrare con due propulsori guasti), e nonostante il progetto sia ancora acerbo e il programma di test sia ancora lungo, Bell punta ad ottenere una safety di 10^{-9} . L'azienda sta anche ipotizzando di sviluppare una variante caratterizzata da sei propulsori.



Figura 12 - Bell: Nexus 4EX (sinistra) e 6HX (destra)

Wisk: Cora

Il drone inizialmente è stato sviluppato dalla società Kitty Hawk (dal 2010), ma nel 2019 il progetto è stato acquisito da Wisk, una joint venture tra Boeing e la stessa Kitty Hawk, con facilities sia negli USA che in Nuova Zelanda. Il primo volo è stato effettuato nel 2017 e ad oggi l'azienda sta lavorando con gli enti neozelandesi per le prime prove effettive di servizio trasporto passeggeri, ottenendo, primo drone al mondo, la *Certification Basis* per il trasporto di persone con guida autonoma. Il drone biposto 100% elettrico a guida autonoma presenta un'ala fissa e un propulsore dedicato al volo di crociera, più ulteriori dodici propulsori di dimensioni più contenute utilizzati solamente per la fase di decollo e atterraggio verticale. La sicurezza del velivolo è ottenuta tramite ridondanze e affidabilità dei componenti, oltre che alla presenza del paracadute e all'utilizzo di una progettazione che escludesse possibili single point of failure. La quota di crociera prevista è tra 1500 e 5000 feet, con una velocità di di 160 km/h e un range superiore ai 40 km.



Figura 13 - Wisk: Cora

Kitty Hawk: Heaviside

È un drone monoposto 100% elettrico con configurazione canard ad ala fissa, con associati otto motori in grado di cambiare inclinazione. È pensato sia per permettere il volo pilotato dal passeggero sia per una configurazione totalmente autonoma, mentre per i test è stata sviluppata una versione a pilotaggio remoto da terra. Il decollo e l'atterraggio non sono completamente verticali (nonostante il mezzo sia in grado di eseguire hovering), tuttavia è sufficiente un'area anche non pavimentata di 30x30 feet. Al momento il range operativo è di 100 miglia con una velocità massima raggiungibile di 180 mph; tuttavia, l'azienda ipotizza notevoli incrementi di entrambi i parametri al maturare della tecnologia del drone in generale e delle batterie in particolare. Grazie alle ridondanze, la sicurezza è garantita anche in caso di failure di metà dei motori; è inoltre installato un paracadute per le emergenze.



Figura 14 - Kitty Hawk: Heaviside

Stato dell'arte del mercato dei droni da trasporto merci

Volocopter: Volodrone

La struttura del drone è estremamente simile a quella dell'aerotaxi Volocity della medesima azienda, che, partendo dalla stessa architettura e propulsione, ha modificato il payload in senso lato, sostituendo la cabina al di sotto della struttura propulsiva con una piattaforma



Figura 15 - Volocopter: Volodrone

configurabile per diverse applicazioni. Alcuni esempi possono essere: trasporto merci per fini logistici, supporto operativo per la costruzione e la manutenzione delle infrastrutture, applicazioni nel ramo agricolo (in collaborazione, ad esempio, con John Deere). Il drone è ad oggi ancora in fase di sviluppo, e più acerbo della configurazione per il trasporto di passeggeri, ma si prevede che il risultato sarà un velivolo 100% elettrico, in grado di trasportare payload di 200 kg fino a 30 km di distanza con una cruise speed di 80 km/h, in modalità completamente autonoma su rotte predefinite o con pilotaggio da remoto. Il dimostratore ha eseguito il primo volo di prova nel 2019 e al momento il progetto è in fase di sviluppo; come per il Volocity, l'azienda punta a una safety di 10^{-9} . L'azienda prevede di eseguire i primi test su possibili rotte commerciali tra la fine del 2021 e l'inizio del 2022.

Boeing: CAV

È un drone sviluppato dall'agenzia sussidiaria della Boeing Horizon X, il cui primo flight test è avvenuto nel 2017; il primo volo indoor ha avuto luogo nel 2018, mentre outdoor l'anno successivo. Inizialmente il concept era di un drone da trasporto a pilotaggio remoto, ma si è evoluto nello sviluppo di una piattaforma a guida autonoma. È caratterizzato da sei dual-rotor system con dodici eliche, che permettono al mezzo, con una massa di 272 kg, di trasportare payload fino a 227 kg per un range massimo di 1.6 km. La velocità massima raggiungibile dal drone è di 37 km/h e il ceiling è fissato a 120 metri.



Figura 16 - Boeing: CAV

Flying Basket: FB3

Drone con otto propulsori accoppiati, pensato per operazioni in luoghi di complessa accessibilità e in montagna, per il rifornimento e la consegna merci sia ad attività commerciali che a baite, rifugi, aziende di manutenzione di infrastrutture montane e di ricambi per aziende agricole e forestali. Il drone è in fase di sviluppo e presenta batterie sostituibili per poter eseguire più missioni in rapida successione, presenta una MTOM di 160 kg, di cui 100 di payload, e un'autonomia che, in base al payload e alle condizioni ambientali (molto variabili in montagna), può arrivare fino a 50 minuti.



Figura 17 - Flying Basket: FB3

Ehang

- EH216: payload di 200 kg, sedici rotori accoppiati, velocità di 130 km/h per un range a massimo carico di 35 km. La ricarica completa delle batterie avviene in 120 minuti. È una derivazione dell'aerotaxi EH216 e presenta caratteristiche molto simili ad esso.
- Falcon B: payload di 5 kg, otto rotori accoppiati, velocità di 80 km/h per un range a massimo carico di 19 km. La ricarica completa delle batterie avviene in 90 minuti. Il design è caratterizzato da ridondanze e feature di sicurezza, tra cui doppio GPS e sensori, hovering automatico in risposta alle emergenze, ritorno automatico alla base.
- GD2.OX: payload di 0.45 kg, quattro rotori, velocità di 40 km/h per un range a massimo carico di 10 km. La ricarica completa delle batterie avviene in 90 minuti. Pensato specificamente per il last-mile di piccoli pacchi.



Figura 18 - Ehang: Falcon B (sinistra) e GD2.OX (destra)

Tutti i droni in fase di sviluppo da parte di Ehang per il trasporto merci sono 100% elettrici e a guida autonoma su rotte prestabilite. La missione è suddivisa in fasi: pre-flight inspection, flight registration, flight monitoring, post-flight inspections. Ehang punta, dunque, a creare una rete logica e di scambio dati riguardante l'intera flotta unmanned che permetta di gestire l'intera logistica del trasporto merci in un'area, con tracking in tempo reale di ogni singola merce da parte del venditore e del compratore.

Esempi di applicazione:

- Yonghui Superstore (provincia di Guangzhou, Cina): creazione di una flotta per consegnare prodotti alimentari e merci deperibili in un raggio di 5 km dal negozio entro massimo 30 minuti.
- DHL-Sinotrans (Area di Songshanhu, distretto di Dongguan, provincia di Guangdong, Cina): accordo commerciale siglato nel 2019 per la delivery last-mile, al fine di creare una rotta di prova di 8 km che collega l'area di Songshanhu con il centro della DHL a Liaohu. Il drone utilizzato è un Ehang Falcon B che opera tra cabine DHL, appositamente studiate per ottimizzare e automatizzare il deposito/carico dei pacchi, il customer service e per funzionare come piazzole di atterraggio e ricarica per droni. È presente un Command & Control Center della Ehang centralizzato che gestisce e monitora i droni a guida autonoma sulla rotta predefinita.



Figura 19 - Partnership tra Ehang e DHL-Sinotrans

Pipistrel: Nuuva V300

Drone in fase di sviluppo, ad ala fissa con possibilità di decolli e atterraggi verticali, con propulsione ibrida, caratterizzata da un motore a combustibile che muove l'elica utilizzata in cruise, e otto motori elettrici associati ad altrettante eliche per le fasi di take-off e landing. I motori elettrici E-811 sono sviluppati dall'azienda stessa e presentano un raffreddamento a liquido che interessa anche le batterie;



Figura 20 - Pipistrel: Nuuva V300

possiedono già la certificazione di Type certificate. Il drone è progettato come un long-range long- capacity heavy-weight cargo a guida autonoma monitorato da remoto, con le possibilità operative di un elicottero ma con un decimo dei costi. Il payload massimo è di circa 460 kg in un vano di oltre 3 metri cubi; l'ottimo di carico, tuttavia, è fissato intorno ai 300 kg, che permette di superare i 300 km di range. In condizione di ottimo, il drone presenta una massa complessiva al decollo di 1700 kg, considerando 300 kg di payload e circa 400 litri di carburante, e può raggiungere una velocità di 220km/h, mentre la massima altitudine di crociera è fissata a 6000 metri.

Il drone dovrebbe essere portato a sviluppo completo, e immesso sul mercato a partire dal 2023. L'azienda sta sviluppando anche una versione più piccola, il Nuuva V20, con un payload massimo di 20 kg. Tuttavia, allo stato attuale, il progetto risulta ancora molto acerbo. La Pipistrel sul proprio sito mostra chiaramente di concentrarsi sulla delivery, escludendo al momento qualsiasi tipo di progetto di aerotaxi, considerato dall'azienda un ambito che, per quanto potenzialmente proficuo, al momento risulta troppo penalizzato da una normativa sul trasporto di passeggeri ritenuta non matura, ma invece già adeguata per il mercato del trasporto merci.

Amazon Prime Air: MK27

Amazon ha iniziato la sperimentazione di delivery a domicilio nel 2016, con la prima consegna autonoma in UK, e ha negli anni testato diversi modelli e concept di drone. L'azienda ha svolto ricerche di mercato e analisi dei propri dati storici, e ha quindi reputato che l'ottimo di payload sia intorno ai 2 kg, valore sufficientemente contenuto da permettere consegne rapide e agevoli in città pur coinvolgendo oltre il 75% delle merci normalmente ordinate sul colosso di e-commerce. Il drone MK27 presentato nel 2019, con test in UK, USA e Canada, presenta sei eliche a calettamento fisso su un'ala perimetrale del main body perpendicolare rispetto ad esse.



Figura 21 - Amazon Prime Air: MK27

Il design combina la capacità di decollo e atterraggio verticali con un volo di crociera ad ala fissa, senza introdurre tuttavia complicazioni meccaniche: è infatti l'intero drone a cambiare assetto passando da un assetto con eliche perpendicolari al terreno a uno circa parallelo al suolo, una volta in fase di crociera. Il payload, derivato dalle analisi di mercato effettuate, è di 2.3 kg al massimo; il drone pesa circa 40 kg e ha un range di 15 miglia ad una quota prevista di 120 metri.

L'azienda al momento ha l'autorizzazione da parte del FAA per l'esecuzione di test in zone rurali, e il drone ha ricevuto dallo stesso ente uno special airworthiness certificate for training and research. Sempre FAA, nel 2020, ha conferito ad Amazon Prime Air il certificato di vettore aereo come operatore drone, grazie al quale l'azienda può passare da delivery con solo fine sperimentale ad un servizio commerciale. Nel 2020 l'azienda ha iniziato un tentativo di esternalizzazione della produzione del drone, dimostrando quindi una maggiore propensione a collaborazioni con società esterne.

Flytrex

È un drone 100% elettrico, con sei propulsori, pensato per il servizio di delivery di pacchi medio-piccoli in sobborghi urbani caratterizzati da case con il giardino. Il pacco viene inserito dal mittente in un box rigido all'interno del drone, che una volta giunto a destinazione si posizionerà in hovering stazionario a circa 3 metri dal suolo e, tramite un cavo, calerà dolcemente al suolo la scatola. Parallelamente al drone, è in corso di sviluppo l'app per tutte le fasi della consegna e il customer service, con tracking del pacco da parte sia del venditore che del cliente, nonché con la definizione della rotta e del punto di consegna a domicilio. La progettazione ricca di ridondanze e la presenza di un paracadute garantiscono la sicurezza, ed inoltre l'azienda prevede di programmare rotte che sorvolino sobborghi lontani da aree a densità abitativa troppo elevata. Sono in fase di studio diverse soluzioni caratterizzate da payload differenti, che variano da 450 gr a 3 kg; la versione al momento in fase più avanzata di test e sviluppo è quella con payload massimo, che presenta una quota di crociera di 230 feet, velocità 32 mph e range di 3.5 miglia. Questo progetto presenta però il limite tecnologico di non poter operare con venti superiori a 18 mph e in caso di pioggia: in particolare la seconda restrizione rende al momento difficoltosa l'applicazione in certi scenari operativi.



Figura 22 - Flytrex

Esempi di applicazione:

- Golf Course King's Walk (North Carolina, USA): test di delivery svolti dal 2018 con la supervisione FAA all'interno di un campo da golf, con consegna di snack e bevande on-demand, tramite app, ai clienti del golf club in ogni punto del campo.
- AHA (Reykjavick, Islanda): partnership commerciale tra Flytrex e un e-commerce per generi alimentari volta a sviluppare una consegna a domicilio rapida che non sia soggetta alle fluttuazioni temporali delle delivery su ruote, soggette al traffico. La città è stata scelta perché a causa della sua conformazione geografica, caratterizzata da presenza di molti corsi d'acqua e linea costiera frastagliata, presenta quartieri difficilmente raggiungibili in tempi brevi su strada; inoltre è un test bed efficace per lo sviluppo del drone in condizioni meteo avverse.

Zipline

È un drone 100% elettrico ad ala fissa utilizzato in Ruanda dal 2016 (già più di 8 milioni di miglia volate) per il trasporto di medicinali, sangue e beni di prima necessità in zone rurali difficilmente accessibili. Nell'area solo un settimo delle strade sono asfaltate, e sono quasi tutte concentrate nelle poche città, con le zone rurali collegate solo da pochi sentieri sterrati di difficile percorrenza. Per questi motivi il servizio di consegna tramite droni permette di rivoluzionare ed espandere enormemente l'accesso a beni essenziali da parte della



Figura 23 - Zipline

popolazione, con anche il vantaggio di tempi di trasporto marcatamente inferiori a quello su ruota. Oltre che per motivi umanitari, il Ruanda è stato scelto come area operativa e di sviluppo del drone per lo scarsissimo traffico aereo civile e il ridotto numero di aeroporti, il che permette una più semplice integrazione tra voli manned e unmanned, eseguita direttamente dalla base operativa comunicando con il centro di controllo del traffico aereo dell'aeroporto della capitale Kigali. Il drone possiede due eliche per la propulsione, entrambe in funzione al decollo, mentre una viene spenta in fase di crociera. Per quanto riguarda i sistemi di sicurezza, possiede una ridondanza almeno doppia sulla maggioranza di essi, nonché il paracadute di sicurezza: tutto ciò ha fatto sì che, in oltre cinque anni di utilizzo, non ci siano mai stati feriti. Il range è di 160 km: ipotizzando dunque partenza e ritorno dalla base operativa, esso può coprire un raggio di 80 km, con una velocità di crociera di 100 km/h. Il main body pesa 6.4 kg, le ali 2 e il pacco batterie 10 (da 1.25 kWh).

I droni Zipline presentano un design modulare e di facile e veloce assemblaggio: vengono infatti conservati disassemblati nel centro operativo, e solo alla richiesta della vengono ricomposti e lanciati nell'arco di pochi minuti. Essendo a guida autonoma, è necessario l'accesso al servizio GPS: per ridurre i tempi di lancio il modulo GPS è integrato nel pacco batterie, quindi è sempre agganciato al segnale satellitare, anche in fase di ricarica; in questo modo non è necessario che il drone appena assemblato debba aspettare la connessione con almeno quattro satelliti prima di essere lanciato. Per un motivo simile, nel modulo è presente anche lo storage dei dati di volo, che vengono scaricati in parallelo alla ricarica delle batterie nella base operativa. La centralizzazione a un singolo punto base delle operazioni permette una ottimizzazione sia della manutenzione dei droni che della gestione degli ordini e del magazzino, in modo da avere scorte accessibili velocemente in tutta l'area delle operazioni.

Nel dettaglio le operazioni pre-lancio sono le seguenti:

- Merce posizionata all'interno del main body
- Main body posizionato sulla rampa di lancio
- Ali montate sul main body
- Pacco GPS+batterie montato sul main body
- Rapida checklist. Per velocizzare le operazioni, ad esempio, le superfici mobili sono dotate di QR code e il controllo avviene in automatico tramite un'app sviluppata per mobile, solo inquadrando il codice

Il drone non ha la possibilità di eseguire decolli e atterraggi verticali, che invece avvengono, rispettivamente, attraverso una rampa inclinata con accelerazione tramite cavo di lancio (0-100 km/h in 0.3 s), e attraverso un altro cavo metallico che viene agganciato da un uncino posizionato in coda al drone. Quest'ultimo cavo, che ha il compito di "catturare" il drone in sorvolo a bassissima quota, è fissato su due bracci meccanici che adeguano la sua posizione rispetto al drone in fase di avvicinamento; l'affidabilità di tale sistema è superiore al 90%, e in caso di aggancio fallito il drone recupera automaticamente quota per eseguire un nuovo tentativo.



Figura 24 - Zipline: decollo e atterraggio

Zipline sta eseguendo anche dei test di consegna medicinali in Ghana e nel North Carolina (collaborando con la FAA nella definizione di due rotte di prova), e sta cercando di espandere i propri servizi al mercato e-commerce, sia come collegamento tra magazzini che come vera e propria consegna a domicilio.

- **Airbus: Skyways**

Si tratta di un drone totalmente elettrico con otto eliche, sviluppato da una collaborazione tra Airbus e CAAS (*Civil Aviation Authority of Singapore*), iniziata nel 2016 e che ha portato al primo flight test nel 2018, nel campus dell'università di Singapore, con consegna di pacchi fino a 4 kg tra stazioni predefinite. Nel 2019 è iniziata una nuova fase di test con un servizio di consegna merci rapida di piccole parti critiche tra il porto di Singapore e le navi nelle acque limitrofe, sfruttando corridoi aerei predefiniti: il primo volo ha consegnato un payload da 1.5 kg a una nave distante 1.5 km in 10 minuti, mentre il limite operativo è di 4 kg e 3 km.



Figura 25 - Airbus: Skyways

Nel 2020 è stato ridiscusso l'accordo commerciale per gettare le basi dello sviluppo una rete di consegne tramite droni in città, con punti chiave quali la creazione di un UTM e lo sviluppo UAM che dalle merci evolva in futuro anche verso un servizio di aerotaxi. È stata inoltre discussa la creazione di uno spazio aereo cittadino adeguato per tali operazioni, l'implementazione della tecnologia 5G nelle comunicazioni, nonché un protocollo di collaborazione per agevolare una percezione positiva del progetto da parte della popolazione.

Sempre nel 2020 è stata inserita nell'accordo commerciale la società F-drones, fondata a Singapore nel 2019, per progettare e sviluppare una nuova gamma di droni.

F-drones

La società non dispone ancora di modelli commerciali ma solamente di prototipi, pensati e sviluppati per un servizio delivery on-demand veloce ed economico, sia nelle realtà urbane che tra costa e navi (segue la collaborazione tra Singapore e Airbus). I droni in fase di sviluppo presentano caratteristiche di decollo e atterraggio verticale associati a un volo fixed-wing ottenuto con una rotazione di 90 gradi dell'intero velivolo, e possiedono una guida completamente autonoma, in modo da poter ampliare il raggio operativo dei mezzi e, ad esempio, raggiungere anche piattaforme petrolifere lontane dalla terraferma. Roadmap:



Figura 26 - F-drones

- Marzo 2019: fondazione
- Maggio 2019: primo volo del primo prototipo
- Novembre 2019: ottenimento dei permessi pervolare a Singapore
- Dicembre 2019: primo test di delivery
- Febbraio 2020: conclusione dell'ingegnerizzazione del prototipo
- Aprile 2020: ottenimento del permesso di volo BVLOS a Singapore
- Novembre 2020: prima consegna commerciale (in assoluto al mondo) di notte
- (Previsto) Autunno 2021: primi test con drone Hyperlaunch (payload 5 kg, range 50 km)
- (Previsto) 2022: primi test con drone Hyperlaunch Heavy (payload 100 kg, range 100 km)

Flirtey: Eagle

Drone sviluppato negli Stati Uniti per soddisfare le esigenze di last-mile delivery per e-commerce, generi alimentari e medicinali, è pensato per poter decollare e atterrare da basi operative di dimensioni molto ridotte installate su rimorchi, parcheggiabili a fianco delle attività commerciali, in modo da ottenere in modo rapido ed efficiente una distribuzione capillare. La consegna a domicilio è ottimizzata per i sobborghi, con il drone che staziona in hovering sopra la destinazione e tramite cavo cala dolcemente a terra il pacco da consegnare. Il volo è autonomo, programmato e gestito dal centro di controllo: per motivi di sicurezza, Flirtey sostiene la necessità di avere sempre, benché in remoto, un monitoraggio delle operazioni da parte di personale preparato (human in the loop). Il drone sviluppato è un quadricottero a propulsione elettrica che può compiere missioni in un range di 3 miglia con payload fino a 3.6 kg.



Figura 27 - Flirtey: Eagle

Roadmap:

- 2013: fondazione e prima delivery
- 2015: prima delivery effettuata con collaborazione NASA e FAA
- 2016: prima consegna 100% autonoma al mondo (sia a terra che tra terraferma e una nave)
- 2016: partnership con Domino's Pizza per le consegne in Nuova Zelanda
- 2017: lancio del primo servizio di trasporto d'urgenza di defibrillatori negli USA
- 2019: ottenimento del permesso di volo BVLOS da parte di FAA
- 2019: lancio del modello Eagle e della piattaforma software con interfaccia utente FlirteyPortal
- 2019: creazione di una routine drone delivery nel Tahoe-Reno Industrial Center (TRI Center), il più grande centro industriale degli USA e forse del mondo.
- 2020: pubblicazione da parte di FAA dei criteri di airworthiness per il type certification del Flirtey Eagle per la delivery
- 2020: collaborazione nella distribuzione di materiale sanitario in risposta alla pandemia di COVID-19 negli USA

Wingcopter: Wingcopter 178

Drone che combina i vantaggi del decollo e atterraggio verticale a quelli del volo ad ala fissa. Presenta quattro propulsori (due anteriori all'ala e due posteriori a essa) in grado di variare il proprio angolo rispetto al main body, in modo da poter eseguire le diverse fasi del volo; in fase di crociera le due eliche posteriori non sono



Figura 28 - Wingcopter: Wingcopter 178

attive e vengono semplicemente orientate con le pale ripiegate per minimizzare il drag. Il payload massimo è di 6 kg con un range di 40 km, che sale a oltre 120 in assenza di carico. La velocità di crociera in modalità fixed wing è di 150 km/h, ma il drone è in grado di raggiungere i 240 km/h se appositamente settato. Il ceiling è fissato a 5000 m e il limite di accettabilità del vento è posto a 15 m/s.

Il drone è stato progettato per adattarsi a diversi ambienti e condizioni anche avverse, inoltre il payload è altamente personalizzabile, potendo variare da delivery (utilizzo principale) ad attrezzature fotografiche o scientifiche. Nel caso di utilizzo delivery ci sono due principali soluzioni: un box rigido vincolato, posto al di sotto del main body, all'interno del quale può essere inserito il pacco, oppure delivery direttamente agganciata al di sotto del drone tramite un cavo metallico e un verricello. Nel primo caso la consegna avviene tramite atterraggio, mentre nel secondo avviene calando il pacco a terra mentre il velivolo rimane in hovering.

Esempi di applicazione:

- Vanuatu: consegna autonoma on-demand di vaccini e materiale medico in diciotto villaggi difficilmente raggiungibili sull'isola di Pentecost, caratterizzata da giungla fitta e terreno impervio. In media, la distanza coperta è di 40 km con payload di 3.5 kg.
- Irlanda: trasporto autonomo di insulina dalla terraferma all'isola di Ararin (Ovest Irlanda). L'idea è nata nel 2019 in risposta a una emergenza sanitaria avvenuta due anni prima a causa di una tempesta prolungata che ha reso estremamente difficile rifornire di insulina le comunità isolate. Il servizio è stato poi esteso al trasporto nella direzione opposta di fiale di sangue da far esaminare. La distanza coperta è di 22 km con payload da 0.5 kg.
- Italia: mappatura dell'Etna e studio dei cambiamenti topografici del vulcano ad opera della società Geomar. I voli in media durano 40 minuti raggiungendo un'altitudine di 3500 m con attrezzature del peso di circa 2 kg.
- Canada: conteggio e monitoraggio della popolazione di balene nelle acque artiche, ad opera della società Artic UAV. Le missioni sono in media di 35 minuti con un payload di 1.5 kg. Il drone è stato equipaggiato con speciali sistemi termici sia per le batterie che per i motori, in modo da poter affrontare il proibitivo ambiente artico e svolgere missioni anche con temperature inferiori a -40 °C e venti di 10 m/s. La silenziosità del drone è un fattore chiave per non disturbare la fauna locale.
- Malawi: consegna di medicinali nelle zone rurali, in cui sono presenti villaggi altrimenti pressoché isolati, soprattutto nella stagione delle piogge che rende difficilmente praticabili le poche strade presenti. Le missioni sono in media di 40 km con payload da 1 kg.
- Scozia: nella zona dell'isola di Mull sono in corso i test per consegnare la posta dalla terraferma ai villaggi sull'isola, soprattutto alle case più isolate. Durante la pandemia COVID-19 al servizio è stata affiancata una delivery di materiale medico. Le missioni in media coprono una distanza di 19 km con payload sotto il chilo. È inoltre in corso un servizio sperimentale di logistica tra due ospedali distanziati 16 km, uno sulla terraferma e uno sull'isola.
- Germania: trasporti tra due siti produttivi Merck a Gernsheim e Darmstadt, distanziati 24 km, con payload di 1 kg. La rotta, svolta in autonomia, è stata studiata attentamente essendo in una zona metropolitana caratterizzata da numerose infrastrutture quali cavi elettrici, ferrovia e autostrada.
- Norvegia: ispezione delle linee elettriche in zone isolate, svolta in maniera autonoma. La compagnia che se ne occupa è la KVS Technologies che ha sviluppato un software AI per il monitoraggio dell'infrastruttura. Le operazioni sono estremamente più sicure ed economiche di quelle svolte tradizionalmente con personale umano ed elicotteri. Le missioni normalmente prevedono attrezzature di 3 kg e durano 35 minuti.
- Tanzania: collaborazione con DHL per la consegna di materiale medico; missione di 40 minuti, payload 4 kg.

L'azienda sta sviluppando anche una versione di dimensioni e prestazioni maggiori, adottando comunque lo stesso concept, ma con otto eliche e tre cavi per la consegna di altrettanti possibili carichi: il Wingcopter 198.



Figura 29 - Wingcopter: Wingcopter 198

DHL: Parcelcopter 1-2-3-4

DHL, in collaborazione con società esterne, ha sviluppato negli anni il proprio programma delivery tramite drone, eseguendo test e servizi di prova con quattro differenti modelli successivi. Il primo volo del Parcelcopter 1 è stato eseguito nel 2013, sorvolando per 1 km il Reno con pilotaggio in VLOS. Il Parcelcopter 2 è



Figura 30 - DHL: Parcelcopter 4

stato utilizzato nel 2016 nel Mare del Nord presso l'isola di Juist, per la consegna di medicinali e beni urgenti; è stato il primo progetto europeo di consegna sul mare unmanned BVLOS, con pilotaggio autonomo monitorato da terra, su una rotta di 12 km. I primi due modelli erano entrambi quadricotteri; successivamente la sperimentazione è passata ad un birotore tilt-wing. Nel 2016 DHL ha iniziato lo sviluppo e i test del Parcelcopter 3 e del Parcelcopter Skyport, un sistema automatico di carico e scarico dei pacchi dal drone. I test sono durati tre mesi e hanno interessato la consegna di posta e piccoli payload tra due comunità montane nelle Alpi bavaresi: Reit im Winkl e Winmoosalm. Sono stati eseguiti più di 130 voli su una distanza di 8 km e con payload fino a 2 kg. Il Parcelcopter 4 è un allestimento personalizzato del Wingcopter 178 ed è in utilizzo in Tanzania dal 2018, dove sono stati effettuati più di 2200 km per il trasporto di medicinali nella zona del lago Victoria. La missione di 40 minuti, autonoma su rotta predefinita, permette di trasportare fino a 4 kg di payload. Ad agosto 2021 un portavoce dell'azienda ha ufficialmente comunicato l'abbandono del progetto di produzione di droni specifici DHL.

Wing

Progetto iniziato nel 2014 da un'azienda legata a Google in quanto società sussidiaria di Alphabet. Il drone presenta un'ala fissa e due eliche per la propulsione in fase di crociera, affiancate da un sistema a dodici eliche per permettere decollo e atterraggio verticale. Tale scelta progettuale, nonostante l'elevato numero di propulsori necessari, è stata adottata per la sua semplicità, non avendo alcuna parte mobile che deve variare il proprio angolo rispetto al main body. Il design del drone permette l'hovering, potenzialità che viene sfruttata alla consegna, per la quale è previsto di calare il payload (contenuto in un apposito box di cartone) da un'altezza di circa 7 metri tramite un cavo.



Figura 31 - Wing

L'intera manovra avviene in autonomia, incluso il rilascio del pacco, senza quindi bisogno di interventi da parte del destinatario. Il drone presenta un range di 6 miglia, una velocità massima di 110 km/h e un payload massimo di 1.6 kg.

Project Wing sta sviluppando anche un UTM per gestire le rotte dei droni ed evitare possibili collisioni, sfruttando i dati provenienti da Google, comprese le valutazioni in tempo reale su assembramenti di persone, nonché le mappature degli edifici e della topografia del terreno.

I primi test del drone sono stati eseguiti in Australia e dal 2017 sono stati introdotti due servizi di delivery, nella zona rurale del Googong vicino a Canberra e nella regione del Tuggeranong. A seguito dell'attivazione di tali servizi l'azienda ha ricevuto critiche riguardo l'impatto sonoro del drone, verificato nel 2019 anche dal governo australiano e dal CASA; sono pertanto in corso di sviluppo nuovi propulsori e pale delle eliche per ovviare a tale problematica.

Oltre che in Australia, Wing lavora negli USA, in particolare in collaborazione con Fedex e FAA, per sviluppare un sistema di delivery a Christiansburg in Virginia e nella California rurale. Proprio FAA ha conferito ad Alphabet's Wing il certificato di airline come operatore drone, grazie al quale l'azienda può passare da consegne con solo fine sperimentale a delivery commerciale.

Dal 2019 sono in corso anche test in Finlandia su una rotta di 10 km, ottimo testbed per le condizioni atmosferiche avverse e le temperature basse.

Con l'appoggio diretto di Google, Wing sta sviluppando l'app Opensky che permette a chiunque voglia pilotare un drone di conoscere la regolamentazione locale. È una piattaforma che permette di pianificare un'operazione in base alle proprie esigenze e all'ambiente normativo in cui si opera, al momento presente solo in Australia ma in fase di estensione a molti altri Paesi.

Matternet: M2V9

Quadricottero di 13.2 kg compreso un payload massimo di 2 kg. Il range è di 15 km a una velocità massima di poco inferiore ai 60 km/h, con una quota di crociera prevista di 110 metri. Il drone presenta feature di sicurezza sia legate alla ridondanza nel design sia alla presenza di un paracadute di emergenza. Matternet è stata la prima organizzazione al mondo ad essere certificata per operazioni commerciali BVLOS di connettività e logistica.



Figura 32 - Matternet: M2V9

Al momento il drone viene usato solo per delivery in ambito medico in diverse sedi europee, ma in generale il concept del mezzo è quello di un last-mile delivery; l'azienda ha eseguito analisi di mercato e ha individuato come infatti circa il 90% delle consegne a domicilio rientri nel limite del payload di 2 kg. Il sistema di gestione dei dati di pilotaggio, autonomo su rotte preprogrammate e con monitoraggio da remoto, è affidato all'applicativo proprietario Cloud Platform.

Negli USA Matternet sta collaborando con UPS, tramite la sua associata UPS Flight Forward Inc., per sviluppare una rete di delivery tramite drone, prima incentrata sulle sedi ospedaliere, per poi espanderla in futuro al last-mile delivery in generale. La società UPSFF, fondata a luglio 2019, nell'ottobre dello stesso anno è stata la prima azienda a ottenere dalla FAA la certificazione Part 135 Standard, che consente di gestire una rete illimitata di consegna mediante droni negli Stati Uniti. Matternet è inoltre al lavoro con FAA per ottenere il type certificate per il drone, e quindi di ricevere la verifica sul soddisfacimento dei requisiti di sicurezza necessari. La prima collaborazione operativa tra Matternet e UPS è avvenuta a marzo 2019, con un testbed nelle strutture ospedaliere di Raileigh (North Carolina), su un percorso predefinito di circa 12.5 miglia svolto in autonomia dal drone.

L'azienda ha di recente siglato una partnership con Japan Airlines, per il progetto "Drone logistics project", localizzato a Tokyo. Il concept è una rete delivery medica basata su rotte predefinite BVLOS in centro alla capitale nipponica, tra l'ospedale St. Luke international hospital e il magazzino logistico Medical Corps East Tokyo warehouse, con la possibilità in futuro di estendere il servizio a un più generale delivery di e-commerce nella città.

A Berlino, nel 2020, è iniziato un progetto gestito da Matternet con lo scopo di creare una rete logistica tra le diverse sedi di Labor Berlin, che è il più grande gruppo ospedaliero e di laboratori di Europa, è distribuito su tredici sedi nella città e necessita del trasporto di fino a 15000 campioni al giorno. L'inizio del progetto riguarderà tre sedi, con la previsione di espanderlo gradualmente. Per poter implementare tale rete è necessario uno sforzo congiunto tra Matternet, UTM providers e Navigation Services providers in Germania, per integrare i droni nello spazio aereo di Berlino.

Il principale e sicuramente più maturo progetto sviluppato da Matternet si svolge dal 2017 in Svizzera, con la collaborazione di Swiss Post, tra sedi ospedaliere a Lugano. Nel 2019 il servizio è stato ampliato a Zurigo, ed è in fase di valutazione l'estensione anche a Berna. Tali collegamenti sono basati su rotte predefinite in un ambiente complesso come può essere quello cittadino, con densità abitative elevate, infrastrutture e condivisione dello spazio aereo. Matternet ha eseguito negli anni più di tremila missioni, con solamente due incidenti degni di nota, entrambi a Zurigo, uno a gennaio e l'altro a maggio 2019. Gli incidenti non hanno causato vittime, e in entrambi i casi sono stati causati da una non corretta finalizzazione della procedura di emergenza in caso di perdita di segnale GPS: in un caso non si è aperto il paracadute di emergenza, nell'altro si è aperto ma hanno ceduto i tiranti e inoltre il segnale acustico di emergenza non si è attivato.

Un team di esperti ha analizzato nel dettaglio gli incidenti suggerendo modifiche e miglioramenti progettuali, senza tuttavia stravolgerne il concept, ritenuto valido. È stato inoltre consigliato di sviluppare un safety management system in linea con l'ICAO Annex 19, oltre che di aumentare la cooperazione tra Matternet, Swiss Post e FOCA (Federal Office of Civil Aviation, Svizzera) nella gestione dei processi decisionali, nella partecipazione al Safety Board per le operazioni e nel continuo mantenimento e verifica dei requisiti per la licenza operativa in Svizzera.

Quadro normativo

L'ambiente normativo a cui si rapporta il dinamico mercato dei droni, commerciali e per il trasporto umano, è in rapida evoluzione e aggiornamento, nel complesso percorso per portare a una regolamentazione che sia unificata a livello europeo, e in un'ottica lungimirante, a livello globale in futuro. Il fine ultimo deve essere quello di permettere lo sviluppo di servizi unmanned in un contesto di sicurezza e tutela delle persone e dell'ambiente. Uno dei punti chiave dell'intero processo normativo è bilanciare la spinta propositiva delle aziende, e delle numerose start up del settore, volta a creare servizi innovativi rispetto all'intero panorama aeronautico convenzionale, con l'esigenza di impedire operazioni pericolose per la popolazione, sotto la spinta della rapida evoluzione tecnologica e del ventaglio di possibilità che ne consegue. In particolare, l'esigenza di analizzare il rischio sulle persone è intrinseca agli scenari operativi in cui i servizi con droni si stanno inserendo: la maggior parte di essi, infatti, riguarda città e metropoli con alta densità abitativa e quindi con un elevato numero di persone esposte al rischio. Una differenza sostanziale rispetto all'aeronautica generale è che, nel caso dei droni, in quasi tutti i servizi, il rischio umano non è valutato dal punto di vista del passeggero, come invece avviene per un liner classico, ma come conseguenza dell'impatto in caso di problematiche al mezzo.

EASA, in collaborazione con le varie agenzie nazionali e con numerose aziende di spicco del settore, nell'ultimo periodo ha ampiamente lavorato per adeguare la normativa ed evolverla: tale sforzo ha portato ad un sostanziale aggiornamento della regolamentazione tra la fine del 2020 e l'inizio del 2021, con ancora numerosi ampliamenti e affinamenti necessari previsti per l'anno corrente e l'immediato futuro.

EASA ha reso disponibile la regolamentazione sui suoi canali ufficiali, e, nel tentativo di rendere maggiormente accessibile il servizio, ha pubblicato un documento che non solo raccogliesse gli articoli e le regole in senso stretto tramite le Implementing Rules (IR), ma anche i correlati Acceptable Means of Compliance (AMC), Guidance Material (GM) e Delegated Rules (DR). Sono inoltre presenti anche le EASA Executive Director Decisions (ED).

In particolare, la normativa vigente in ambito unmanned può essere così riassunta:

Implementing Rules (IR)		
<i>Incorporated Commission Regulation</i>	<i>Regulation amendment</i>	<i>Applicability date</i>
Regulation (EU) 2019/947	Initial issue	31/12/2020
Regulation (EU) 2020/639	Amendment 1	2/6/2020
Regulation (EU) 2020/746	Amendment 2	6/6/2020
Delegated Rules (DR)		
<i>Incorporated Commission Regulation</i>	<i>Regulation amendment</i>	<i>Applicability date</i>
Regulation (EU) 2019/945	Initial issue	1/7/2019
Regulation (EU) 2020/1058	Amendment 1	9/8/2020
Acceptable Means of Compliance & Guidance Material (AMC & GM)		
<i>Incorporated ED Decisions</i>	<i>AMC/GM Issue No, Amendment No</i>	<i>Applicability date</i>
ED Decision 2019/021/R	Issue 1	11/10/2019
ED Decision 2020/022/R	Issue 1, Amendment 1	18/12/2020

Tabella 1 - Quadro normativo di riferimento

Di particolare interesse pratico è la nuova suddivisione delle operazioni con droni in tre categorie, non più basata principalmente sull'utilizzo del velivolo, hobbistico o commerciale in senso lato, ma incentrata sul rischio relativo all'ambiente operativo e al tipo di mezzo utilizzato. Inoltre, per semplificare l'accesso al mondo unmanned da parte di un pubblico sempre più vasto, viene introdotta una categorizzazione di droni con marchiatura CE, affiancando una semplificazione del processo normativo e di autorizzazione per mezzi certificati.

Lo sviluppo della normativa per le tre categorie è ancora ampiamente in corso, con continui affinamenti e integrazioni, al fine di ottenere un quadro di regolamenti che soddisfi le singole necessità di ogni genere di utilizzo, con un continuo feedback e interscambio tra le aziende del settore e gli enti normativi per una collaborazione virtuosa. Trattandosi di una profonda modifica al regolamento, sono previsti periodi di sovrapposizione con regolamenti già esistenti, e la creazione di una normativa temporanea addizionale per facilitare la transizione alla nuova realtà.

Le tre categorie sono: Open, Specific e Certified. Nel seguito si analizzeranno sommariamente le caratteristiche di ogni categoria, e i limiti attuali nonché le possibilità di sviluppo della normativa.

Categoria Open

Categoria dedicata a droni piccoli e leggeri, con conseguente livello molto contenuto di rischio. Non è presente alcuna distinzione tra operazioni di tipo commerciale piuttosto che hobbistico, ed inoltre, essendo missioni con un rischio correlato relativamente basso, il livello di precauzioni e training del pilota necessario sono contenuti.

Le operazioni in questa categoria sono da realizzarsi esclusivamente in VLOS (visual line of sight), ovvero con costante contatto visivo del drone da parte del pilota.

La categoria Open è pensata per l'utilizzo di droni con marchiatura CE, in particolare dallo 0 al 4; al crescere del numero cresce il limite superiore della massa ammissibile per il drone. Oltre a limitazioni sulla massa, ad ogni marchiatura sono legate anche altre condizioni, tra cui la velocità massima, il limite di quota operativa raggiungibile, l'impatto sonoro, l'identificazione digitale, il Geo-awareness, la presenza di luci standardizzate a bordo e il numero seriale. Tutte queste distinzioni sono riportate nella tabella riassuntiva seguente:

UAS		Operation		Drone Operator/pilot		
Class	MTOM	Subcategory	Operational restrictions	Drone Operator registration	Remote pilot competence	Remote pilot minimum age
Privately built	< 250 g	A1 (can also fly in subcategory A3)	- may fly over uninvolved people (should be avoided when possible) - no flying over assemblies of people	No, unless camera / sensor on board and a drone is not a toy	- no training needed	No minimum age
C0					- read user manual	16*, no minimum age if drone is a toy
C1	< 900 g	A2 (can also fly in subcategory A3)	- No flying expected over uninvolved people (if it happens, should be minimised) - no flying over assemblies of people	Yes	- read user manual - complete online training - pass online theoretical exam	16*
C2	< 4 kg		- no flying over uninvolved people - keep horizontal distance of 30 m from uninvolved people (this can be reduced to 5 m if low speed function is activated)	Yes	- read user manual - complete online training - pass online theoretical exam - conduct and declare a self-practical training - pass a written exam at the NAA (or at recognized entity)	16*
C3	< 25 kg	A3	- do not fly near people - fly outside of urban areas (150 m distance)	Yes	- read user manual - complete online training - pass online theoretical exam	16*
C4						
Privately built						

Figura 33 - Categoria Open

Si può notare come nessun drone autorizzato a missioni Open superi i 25 kg e come in generale si consideri come quota massima 120 metri (equivalenti a circa 400 feet): tale quota coincide con il limite del VLL, very low level, ovvero dello spazio aereo più prossimo al suolo, tradizionalmente non impegnato dall'aeronautica generale tranne che per scenari di emergenza (sia che si tratti di anomalie sia che si tratti di mezzi di soccorso e delle forze dell'ordine) o in prossimità di aeroporti ed eliporti. Proprio tale separazione tra aviazione unmanned e manned è alla base della mitigazione del rischio di collisioni aeree tra droni e altre tipologie di mezzi.

Inoltre, le operazioni non possono essere svolte in spazi aerei riservati, come aeroporti, aree di particolare interesse naturalistico e prossime a specifiche infrastrutture.

Essendo una categoria creata per accogliere al suo interno le operazioni più semplici e meno pericolose, non è necessario coinvolgere nessun ente, nazionale o meno, per le autorizzazioni o le dichiarazioni. La sicurezza è assicurata tramite le limitazioni operative, le limitazioni sulla massa e quindi sull'energia cinetica all'impatto, il controllo sui requisiti di progettazione e realizzazione dei droni e con un set di regole operative.

Le operazioni non possono coinvolgere né il trasporto di merci pericolose né il sorvolo di assembramenti di persone, entrambe condizioni considerate troppo pericolose per una categoria a basso rischio connesso come la Open.

In Italia, ENAC ha adottato il regolamento europeo ma con un'aggiunta relativa ad un sistema di identificazione e mappatura digitale: ogni drone dovrà avere un codice di riconoscimento tramite QR code applicato su di esso, e dovrà inoltre essere registrato sul portale d-flight. La società d-flight S.p.A. fa parte del Gruppo ENAV (Ente nazionale per l'assistenza al volo), e persegue lo sviluppo e l'erogazione di servizi per la gestione del traffico aereo a bassa quota di aeromobili a pilotaggio remoto (APR) e qualsiasi attività ad essi connessa. Sul portale gli utenti hanno la possibilità di registrare i propri droni nella banca dati italiana, e aver assegnato un codice univoco di identificazione per ciascuno di essi, oltre che ottenere le necessarie informazioni per volare con i droni in sicurezza ed in conformità alle normative vigenti.

Le operazioni in tale categoria si dividono in 3 sottocategorie: Open A1, Open A2 e Open A3.

Tali sottocategorie vengono spesso identificate, rispettivamente, anche come *Fly over*, *Close from people* e *Far from people*: tali definizioni permettono di comprendere in maniera molto più intuitiva e immediata la differenziazione tra di esse e gli ambiti operativi che coprono, in relazione all'ambiente e alle persone potenzialmente coinvolte in caso di emergenza.

La classificazione riguarda il peso massimo possibile: ovviamente, il drone può essere tanto più pesante quanto più l'operazione si svolge lontano dalle persone, quindi al calare della possibilità di impatto, poiché il rischio viene valutato combinando l'energia cinetica del drone con la possibilità che colpisca una persona.

Anche il livello di addestramento necessario al pilota per volare è differente per ogni sottocategoria, variando da un semplice esame online fino ad una prova addizionale teorica; in ogni caso il training necessario è limitato, essendo tutti scenari a rischio contenuto. Nel caso di droni con peso inferiore ai 250 grammi non è necessaria alcuna certificazione del pilota, essendo considerati mezzi inoffensivi.

La categoria A1 è l'unica ad avere un livello di sicurezza sufficiente a permettere il sorvolo di persone, sempre con l'esclusione di assembramenti. La discriminante tra gruppo di persone e assembramento è vaga e qualitativa; tuttavia, un GM dall'EASA indica che un assembramento è una situazione in cui il numero di persone è sufficientemente alto da rendere difficoltoso l'evitare un drone in caduta.

Nella tabella sottostante sono riportate sinteticamente tali differenziazioni:

Open A1	Open A2	Open A3
CE markings: C0 and C1	CE markings C2	CE markings C2, C3 and C4
Maximum weight: 900 grams	Maximum weight 4 kg	Maximum weight 25 kg
Flights are permitted over random people, but not over crowds	Flight are permitted at a safe distance from people	Flights are permitted far away from people and settlements
Training requirement:	Training requirement::	Training requirement::
The remote pilot of a device weighing more than 250 grams must have completed the online examination	Online examination and supervised additional theoretical knowledge examination	Online examination

Figura 34 - Distinzione tra Categoria Open A1, A2 e A3

Categoria Limited Open

Per facilitare la transizione dalla situazione attuale, transitoriamente è stata definita la categoria Limited Open, disciplinata dall'articolo 22 del regolamento 947/2019, che permette di continuare ad utilizzare i droni di oggi che non hanno ancora la nuova marcatura di classe e che quindi non rispettano uno o più requisiti previsti nella 945/2019. È l'anello di congiunzione tra il mondo dei droni leggeri secondo la regolamentazione passata e la categoria Open che li inquadra nel nuovo contesto normativo. Tale categoria rimarrà in vigore fino al 01/01/2023, ovvero per due anni dall'entrata in vigore della normativa del 01/01/2021, e aiuterà gli operatori ed i piloti ad aggiornare la propria flotta e i propri scenari operativi.

In particolare, EASA ha pubblicato una tabella sintetica e di facile lettura per permettere di inquadrare nel nuovo panorama operativo i droni privi di marchiatura CE:

UAS		Operation		Drone Operator/pilot		
Class	MTOM	Subcategory	Operational restrictions	Drone Operator registration	Remote pilot competence	Remote pilot minimum age
Privately built	< 250 g	A1 (can also fly in subcategory A3)	- may fly over uninvolved people (should be avoided when possible) - no flying over assemblies of people	No, unless camera / sensor on board and a drone is not a toy	- no training needed	No minimum age
C0					- read user manual	16*, no minimum age if drone is a toy
C1	< 900 g		- No flying expected over uninvolved people (if it happens, should be minimised) - no flying over assemblies of people	Yes	- read user manual - complete online training - pass online theoretical exam	16*
C2	< 4 kg	A2 (can also fly in subcategory A3)	- no flying over uninvolved people - keep horizontal distance of 30 m from uninvolved people (this can be reduced to 5 m if low speed function is activated)	Yes	- read user manual - complete online training - pass online theoretical exam - conduct and declare a self-practical training - pass a written exam at the NAA (or at recognized entity)	16*
C3	< 25 kg	A3	- do not fly near people - fly outside of urban areas (150 m distance)	Yes	- read user manual - complete online training - pass online theoretical exam	16*
C4						
Privately built						

Figura 35 - Categoria Specific

Come si può notare, la similitudine con la tabella caratterizzata dalle marchiature CE è evidente; tuttavia, con restrizioni maggiori sul sorvolo di persone (A1) o sulla vicinanza con esse (A2); è inoltre presente qualche lieve differenza sulle richieste di competenza e certificazione del pilota.

Categoria Specific

È una categoria a coefficiente di rischio superiore alla Open, pur non arrivando a necessitare degli standard dell'aviazione generale in ambito di sicurezza e certificazione dei droni e delle operazioni. L'ambiente operativo e le tipologie di mezzi utilizzabili sono meno vincolanti rispetto alla categoria Open: nel caso più generale non sono presenti né un limite di peso né particolari limitazioni alle scelte progettuali dei mezzi, inoltre gli scenari di missione possono essere molto più variegati e personalizzabili.

Le operazioni in questa categoria possono essere sia VLOS che BVLOS, sono molto flessibili, non avendo limitazioni esplicite stringenti; tuttavia, l'analisi di rischio è il punto chiave che determina la fattibilità della missione in tale categoria.

Per garantire la sicurezza delle operazioni non ci si affida solamente a limitazioni stringenti, come per la Open, ma si utilizza una strategia più complessa e tutelante, eseguendo vere e proprie analisi di rischio, comprendenti aspetti sia riguardanti l'ambiente operativo che il mezzo, per accertare se la missione presenta un coefficiente di rischio accettabile.

In particolare, la categoria Specific consente diversi approcci possibili, alcuni dei quali maggiormente vincolanti ma semplificati per quanto riguarda realizzazione e regolamentazione, altri che permettono, per step successivi, di poter pianificare operazioni completamente personalizzate, per cui tuttavia è necessario un preciso e articolato iter normativo e organizzativo. In ordine di crescente complessità, e conseguentemente di libertà di azione, si hanno: *scenari standard*, *analisi di rischio PDRA*, *analisi di rischio SORA*.

Scenari standard (STS): sono la condizione più semplice, con pianificazione e analisi rischio già standardizzate. Le limitazioni sono relativamente stringenti, paragonabili a quelle di una classe Open estesa a categorie di droni superiori, con la sicurezza garantita attraverso una rigida configurazione del mezzo e della missione.

In caso di missione STS basta una dichiarazione, e non serve una autorizzazione dall'Ente Nazionale, cosa che velocizza notevolmente il processo organizzativo della missione.

A livello europeo, ad oggi sono disponibili due scenari standard, utilizzabili però solamente con droni aventi la nuova marchiatura CE. I droni C5 e C6, compatibili con tali missioni, al momento non sono ancora presenti sul mercato, ma possono comunque essere realizzati tramite appositi kit di conversione di droni C3.

I due scenari sono:

- STS-01: pensato per la classe C5, per droni non ad ala fissa con MTOM inferiore a 25 kg e guida VLOS.
- STS-02: pensato per la classe C6, a prescindere dell'architettura, con MTOM inferiore a 25 kg e guida VLOS e BVLOS.

Le ulteriori differenze tra i due scenari standard proposti dall'EASA sono raccolte nella seguente tabella riassuntiva:

STS#	Edition/date	UAS characteristics	BVLOS/VLOS	Overflown area	Maximum range from remote pilot	Maximum height	Airspace	Notes
STS-01	June 2020	Bearing a C5 class marking (maximum characteristic dimension of up to 3 m and MTOM of up to 25 kg)	VLOS	Controlled ground area that might be located in a populated area	VLOS	120 m	Controlled or uncontrolled, with low risk of encounter with manned aircraft	
STS-02	June 2020	Bearing a C6 class marking (maximum characteristic dimension of up to 3 m and MTOM of up to 25 kg)	BVLOS	Controlled ground area that is entirely located in a sparsely populated area	2 km with an AO 1 km, if no AO	120 m	Controlled or uncontrolled, with low risk of encounter with manned aircraft	

Table 1 — List of STSs published as 'Appendix 1 for standard scenarios supporting a declaration' to the Annex to the UAS Regulation

Figura 36 - Caratteristiche STS-01 e STS-02

Come si può notare, in nessuna missione standard è possibile avere droni superiori ai 25 kg di peso e i 3 m di dimensione caratteristica; sono inoltre presenti condizioni limitanti sul pilotaggio del velivolo, VLOS nel caso STS-01 e BVLOS molto limitato come range nel caso STS-02, con anche la necessità di utilizzare degli osservatori ausiliari (AO) per aiutare il pilota. Per entrambi gli scenari lo spazio aereo deve presentare un ridotto rischio di incontro, e quindi di possibile collisione con velivoli manned, ed è prevista una quota limite delle operazioni di 120 metri.

Le missioni del secondo scenario presentano un possibile rischio intrinseco maggiore rispetto al primo, sia a causa del tipo di guida, sia a causa del tipo di drone: per tale motivo l'area di sorvolo, in ogni caso di tipo controllato, deve essere localizzata in una zona a bassa densità abitativa, mentre nel caso STS-01 può essere compresa in una zona a densità maggiore.

Lo spazio aereo, nel caso in cui sia non controllato, può comunque subire limitazioni all'utilizzo stabilite dagli Enti preposti di ogni singolo Stato europeo, qualora si reputi che sia presente un tasso di probabile incontro con velivoli manned troppo elevato; nel caso di spazio aereo controllato è necessaria un'esplicita autorizzazione da parte dei suddetti Enti.

Si richiede inoltre che tutte le persone presenti nell'area delle operazioni, che comprende area operativa vera e propria (contingency area) più un'area circostante di sicurezza (buffer area), siano informate dell'operazione e delle relative procedure di emergenza e delle precauzioni prese.

La dimensione dell'area di buffer dipende dalle caratteristiche operative della missione e dal tipo di mezzo utilizzato, ed è definibile tramite una tabella fornita dall'EASA:

3.6 For the operation of untethered UA, the ground risk buffer should cover a distance beyond the external limit(s) of the contingency area. That distance should be at least as defined below:

Maximum height above ground	Minimum distance to be covered by the ground risk buffer for untethered UA	
	with an MTOM of up to 10 kg	with an MTOM of more than 10 kg
30 m	10 m	20 m
60 m	15 m	30 m
90 m	20 m	45 m
120 m	25 m	60 m

Figura 37 - Caratteristiche area di buffer

L'Italia presenta due scenari standard: IT-STS-01 e IT-STS-02. Tali scenari sono una derivazione di quelli EASA e non sarà più possibile utilizzarli dopo il 2 dicembre 2021. Dopo tale data sarà necessario usare lo standard europeo, quindi non verranno ulteriormente analizzati.

È importante notare come solo ed esclusivamente per gli scenari standard sia necessario avere droni con marchiatura CE, non rilevante negli altri tipi di operazioni rientranti nella categoria Specific, i quali prevedono che l'operatore effettui un'analisi di rischio, predefinita o meno, che deve essere validata dall'Ente Nazionale preposto ad autorizzare la missione.

EASA sta sviluppando analisi di rischio predefinite per determinate tipologie di missione. Tali analisi, definite PDRA (predefined risk assessment), benché limitate ai soli scenari operativi considerati, sono semplificate rispetto alle SORA complete, e permettono una più rapida gestione della missione e della sua organizzazione da parte dell'operatore.

PDRA: al momento ne esistono quattro tipi, illustrati negli AMC dell'articolo 11 del regolamento 947/2019, di cui due generiche (tipologia G) e due derivanti dalle STS (tipologia S):

- PDRA-S01: derivante da STS-01, quindi con limite a 25 kg e 3 m in VLOS. Copre le stesse operazioni del relativo STS, tuttavia senza obbligare all'uso di droni marchiati C5.
- PDRA-S02: derivante da STS-02, quindi con limite a 25 kg e 3 m in BVLOS. Copre le stesse operazioni del relativo STS, tuttavia senza obbligare all'uso di droni marchiati C6.
- PDRA-G01: pensata per droni con dimensione caratteristica inferiore ai 3 m e un'energia cinetica di impatto al suolo inferiore ai 34 kJ. Le operazioni possono essere BVLOS su aree poco popolate e in spazi aerei non controllati con poco rischio di incontro con velivoli manned. La quota operativa è fissata ad un massimo di 150 metri e in un raggio contenuto dall'operatore.
- PDRA-G02: pensata per droni con dimensione caratteristica inferiore ai 3 m e un'energia cinetica di impatto al suolo inferiore ai 34 kJ. Le operazioni possono essere BVLOS su aree poco popolate e in spazi aerei riservati per la missione, quindi senza rischio di incontro con velivoli manned. Il raggio operativo legato alla missione non presenta specifici limiti.

La seguente tabella riporta sinteticamente le caratteristiche principali delle varie analisi predefinite:

PDRA#	Edition/date	UAS characteristics	BVLOS/VLOS	Overflown area	Maximum range from remote pilot	Maximum height	Airspace	AMC# to Article 11	Notes
PDRA-S01	1.0/July 2020	Maximum characteristic dimension of up to 3 m and MTOM of up to 25 kg	VLOS	Controlled ground area that might be located in a populated area	VLOS	120 m	Controlled or uncontrolled, with low risk of encounter with manned aircraft	AMC4	
PDRA-S02	1.0/July 2020	Maximum characteristic dimension of up to 3 m and MTOM of up to 25 kg	BVLOS	Controlled ground area that is entirely located in a sparsely populated area	2 km with an AO 1 km, if no AO	120 m	Controlled or uncontrolled, with low risk of encounter with manned aircraft	AMC5	
PDRA-G01	1.1/July 2020	Maximum characteristic dimension of up to 3 m and typical kinetic energy of up to 34 kJ	BVLOS	Sparsely populated area	If no AO, up to 1 km	150 m (operational volume)	Uncontrolled, with low risk of encounter with manned aircraft	AMC2	
PDRA-G02	1.0/July 2020	Maximum characteristic dimension of up to 3 m and typical kinetic energy of up to 34 kJ	BVLOS	Sparsely populated area	N/a	As established for the reserved airspace	As reserved for the operation	AMC3	

Table 2 — List of PDRA published as AMC2-5 Article 11 to the UAS Regulation

Figura 38 - Caratteristiche PDRA-S01, PDRA-S02, PDRA-G01 e PDRA-G02

Riguardo i primi due casi della tabella, analogamente agli scenari STS-01 e 02, si possono osservare le medesime differenze tra PDRA-S01 e 02, con specifiche sia sullo spazio aereo che sul ceiling, oltre che sullo spazio terrestre sottostante, sempre controllato, ma nel secondo caso maggiormente restrittivo per quanto riguarda la densità abitativa.

Le due PDRA di tipologia “G”, diversamente dalle due “S”, non presentano vincoli sulla massa del drone, ma sull’energia cinetica all’impatto, vincolata ad un massimo di 34 kJ. Tale limite può essere raggiunto sia a causa della crescita del peso del drone che della sua velocità all’impatto, parametro dipendente sia dalla quota operativa che dalla velocità traslazionale del drone. Come per le altre PDRA e STS, il limite dimensionale del drone è fissato a 3 m.

Le missioni di tipologia “G” sono pensate per il volo BVLOS su aree con densità abitativa bassa, a causa del rischio intrinseco maggiore che hanno rispetto ad altri scenari. È necessaria sia un’area di buffer a terra, anch’essa con una densità abitativa bassa, che una air buffer zone, per mitigare ulteriormente il rischio di collisioni aeree.

La principale differenza tra le due PDRA riguarda il volume operativo. Il caso G01 prevede uno spazio aereo non controllato con ceiling a 150 metri e raggio pari a 1 km in caso di pilota senza assistenti - o 1 km dall’assistente più vicino al drone nel caso siano presenti AO - interamente compreso in uno spazio aereo non controllato con basso rischio di collisione con velivoli manned.

Il caso G02 prevede invece uno spazio aereo riservato per la missione: il motivo di tale restrizione è per mitigare l’aumento di rischio della missione dovuto all’assenza di un limite di distanza tra pilota e drone in missione BVLOS. L’area delle operazioni coincide con lo spazio aereo riservato a disposizione; anche per questo motivo non è presente un ceiling, in quanto determinato anch’esso dal volume riservato.

In generale, le considerazioni sull’area di buffer e sulle persone coinvolte a terra sono analoghe a quelle già precedentemente analizzate per i casi standard.

A livello italiano esistono nove PDRA (identificati come IT-PDRA), con la regolamentazione in rapida modifica per aggiornarsi e adeguarsi a quella europea. In particolare, gli scenari sono pensati per missioni BVLOS, e suddivisi in tre gruppi di tre: il primo per le missioni su zone rurali, il secondo su zone poco popolate ma comunque considerabili urbane, il terzo su aree densamente abitate. Un'ulteriore classificazione in tre gruppi, questa volta non consequenziali è: vicino ad ostacoli, con NOTAM (notice to airmen: avvisi di notifica sulle condizioni in un determinato settore dello spazio aereo), con visual observer (assistenza umana al pilota con osservatori ausiliari). In tutti i casi si suppone che l'area di sorvolo sia un controlled ground, ovvero che tutte le persone potenzialmente interessate dall'operazione e/o da un'eventuale emergenza siano informate e istruite.

IT-PDRA	Area rurale	Area poco popolata	Area molto popolata
Vicino a ostacoli	1	4	7 – cancellato
NOTAM	2 – sostituito	5	8 – cancellato
Visual observer	3 – sostituito	6	9 – cancellato

Tabella 2 - Classificazione IT-PDRA

Dal 16 aprile 2021, l'Italia partecipa con l'Europa alla definizione e standardizzazione di analisi di rischio predefinite comuni; per questo motivo, dei nove scenari nazionali, solamente quattro verranno mantenuti per coordinazione con l'EASA e per la momentanea assenza di un equivalente a livello europeo: i numeri 1, 4, 5 e 6. Essi corrispondono ai tre scenari di sorvolo di aree poco popolate e ad uno scenario di missione in area rurale. Le restanti cinque tipologie di IT-PDRA verranno sostituite da scenari europei già esistenti (2 e 3), oppure eliminate a causa di incompatibilità con le linee guida EASA (7, 8 e 9). In dettaglio:

- IT-PDRA-01: BVLOS su area rurale, con volo prossimo a ostacoli. I limiti sul drone sono 25 kg di peso e 3 m di dimensione caratteristica, mentre quelli sull'operazione sono la quota massima fissata a 120 metri e la distanza massima del volo che non deve superare i 2 km dal pilota. Non è possibile eseguire test di volo autonomo.
- IT-PDRA-02: sostituito dal PDRA-G02 europeo.
- IT-PDRA-03: sostituito dal PDRA-G01 europeo.
- IT-PDRA-04: BVLOS su area poco abitata, con volo prossimo a ostacoli. Le limitazioni sono le stesse del IT-PDRA-01, a meno del tipo di area su cui si svolge l'operazione.
- IT-PDRA-05: BVLOS su area poco abitata, con NOTAM relativo allo spazio aereo interessato. Le limitazioni su drone e quota sono le stesse delle PDRA già descritte, come l'impossibilità di eseguire volo autonomo. Il massimo distanziamento accettabile tra pilota e drone è di 6 km per i mezzi ad ala fissa, 2 km per i multicotteri. Lo spazio aereo è segregato per mezzo del NOTAM, riducendo quindi pressoché a zero il rischio di collisioni in volo.
- IT-PDRA-06: BVLOS su area poco abitata, con osservatori ausiliari di supporto al pilota. Le limitazioni su mezzo e quota massima sono le stesse degli altri casi. In questa tipologia di operazioni è presente una visual air risk mitigation ottenuta tramite il supporto umano al pilota, con il volo previsto entro un raggio di 2 km dal pilota e 1 km dall'osservatore (AO) più vicino al drone.

- IT-PDRA-07, IT-PDRA-08, IT-PDRA-09: non sono più validi a causa della mancata conformità con l'aggiornamento SORA da parte di EASA; infatti, è richiesta una mitigazione del rischio correlato all'impatto del velivolo a terra non compatibile con la densità abitativa elevata ipotizzata dai tre scenari operativi in esame.

SORA (sintetica): *Nel presente capitolo verrà brevemente introdotta la metodologia SORA, alla quale sarà più avanti dedicata un'intera sezione.*

Nei prossimi anni, L'EASA prevede di sviluppare numerose nuove STS e PDRA per velocizzare e semplificare le procedure per l'autorizzazione di una missione. Tuttavia, nel caso in cui l'operazione da effettuare non ricada né in un caso coperto da STS né in uno compreso nelle PDRA, è necessario effettuare un'analisi di tipo SORA completa.

L'acronimo SORA sta per Specific Operations Risk Assessment e indica un processo di analisi di rischio sviluppato da JARUS e riferito ad una specifica operazione unmanned, in relazione sia con il drone utilizzato che con le condizioni ambientali, aeree e terrestri, che la contraddistinguono.

È un tipo di analisi pensata per essere applicabile a ogni tipo di drone, a prescindere da classe, dimensione, peso e architettura, nonché per cercare di coprire il maggior numero possibile di scenari e tipologie di operazioni. Tuttavia, è importante ricordare che tale tipo di analisi è propria della categoria Specific, e non copre quindi le operazioni di trasporto persone, riservate alla categoria Certified.

Per delineare i confini di tale analisi, si noti che intenzionalmente sono escluse da essa valutazioni di natura socioeconomica, come ad esempio l'impatto finanziario delle operazioni o le implicazioni sulla privacy dei cittadini, essendo argomenti che, per quanto importanti, non sono pertinenti al rischio missione.

L'analisi SORA valuta in dieci punti come la missione si relazioni al rischio, sia per gli esseri umani e le infrastrutture a terra, che per le collisioni aeree con mezzi appartenenti all'aviazione generale manned (Rispettivamente Ground e Air Risk). È necessario sottolineare come, essendo il processo SORA in continuo aggiornamento ed evoluzione, la versione attuale valuta nell'air risk solamente le possibili collisioni tra droni e aviazione manned, non valutando al momento l'evento, che sarà costantemente in crescita in futuro con l'aumento dei velivoli unmanned, di possibili collisioni tra due droni.

Oltre alla valutazione del rischio a terra e in aria, dipendente dall'ambiente operativo, si considerano anche diverse metodologie di mitigazione di tale rischio, per riuscire a calcolare in maniera più accurata il possibile impatto e la pericolosità di collisioni o impatti incontrollati. Si ha dunque una valutazione del rischio intrinseco iniziale, e poi di quello residuo post mitigazione, sia per il Ground Risk che per l'Air Risk.

Per quanto riguarda il rischio di collisioni del drone in analisi con aviazione manned, si ha uno step ulteriore che riguarda la valutazione del livello e delle performance delle tecniche di mitigazione, analizzando anche le diverse procedure a disposizione nello scenario operativo in analisi, per il tipo di missione ipotizzata (si hanno differenze tra VLOS e BVLOS, per fare un esempio). Si ha inoltre una valutazione del livello di robustezza correlato a tali mitigazioni.

In base alla combinazione tra la classe di rischio finale terrestre e aereo, si ottiene una valutazione quantitativa del livello di SAIL (Specific Assurance and Integrity Level) dell'operazione, che risulta essere la rappresentazione numerica del livello di rischio correlato alla missione nel suo complesso. Ad ogni livello di SAIL corrisponde una differente evoluzione del processo SORA, che va ad interessare le misure di sicurezza necessarie per svolgere l'operazione.

Successivamente all'analisi di rischio più propria, il processo SORA, in base al SAIL, passa a determinare gli OSO (Operational Safety Objective), ovvero il livello dei requisiti di sicurezza da garantire nel corso della missione, con il relativo grado di robustezza necessario. Ovviamente, più il livello di rischio è elevato (SAIL alto), maggiore sarà la severità delle numerose misure di sicurezza e relativa robustezza da garantire.

Terminato il processo SORA, prima di sottoporlo alla valutazione da parte dell'Ente preposto ad autorizzare la missione, vengono svolte anche delle valutazioni relative all'area adiacente alla zona direttamente interessata dall'operazione, oltre che ulteriori considerazioni sui volumi di spazio aereo attigui. Durante la missione si cerca di garantire che nessuna failure porti allo sconfinamento dall'area operativa prevista; tuttavia, è opportuno aver effettuato anche una valutazione dei dintorni in caso si verifichi un'emergenza.

Se l'analisi SORA viene considerata corretta e avente un rischio complessivo accettabile, l'Ente nazionale preposto può autorizzare la missione in categoria Specific. Invece, nel caso in cui l'autorizzazione venga rifiutata, oppure il livello di SAIL sia eccessivo, il processo SORA deve essere ripetuto variando le condizioni iniziali per aumentare la sicurezza dell'operazione. Nell'eventuale impossibilità di variare le ipotesi della missione, l'unica soluzione rimanente è svolgere la missione nella categoria di rischio superiore, ovvero in Certified.

A prescindere dal fatto che la missione sia autorizzata tramite STS, PDRA o SORA, prima di concludere la trattazione della categoria Specific, è opportuno analizzare le differenze tra tale categoria e quella Certified. Tale argomento è illustrato nel GM1 Article 3 della Regulation 2019/947 in relazione all'Articolo 6 della UAS Regulation e all'Articolo 40 della Regulation 2019/945; il primo definisce il confine tra le due classi da un punto di vista operativo, il secondo da un punto di vista tecnico.

Una operazione UAS appartiene alla categoria Certified quando, basandosi sull'analisi del rischio, l'Autorità competente non ritiene che il rischio possa essere sufficientemente mitigato senza:

- Certificato dell'airworthiness del UA
- Certificato dell'operatore del UAS
- Licenza del pilota remoto, a meno che il drone sia autonomo

Le operazioni sono sempre nella categoria Certified quando:

- Vengono trasportate persone. Anche per questo motivo l'analisi SORA non prevede in alcun punto l'ipotesi di persone a bordo.
- Vengono trasportate merci pericolose che in caso di incidente possono risultare molto dannose per terze parti. Il trasporto di materiali pericolosi non può ricadere in nessuna tipologia Specific di STS o PDRA, mentre è possibile, in casi particolari, che la missione avvenga in categoria Specific previa SORA e relativa autorizzazione da parte dell'Ente nazionale regolatore, e certificazione che il contenitore per il trasporto presenti caratteristiche di sicurezza sufficienti a prevenire una dispersione del contenuto in caso di impatto al suolo
- Sono condotte sopra assembramenti di persone con droni di dimensione caratteristica superiore ai 3 m. Nonostante ipoteticamente un mezzo di dimensione inferiore ai 3 m con SORA approvata possa effettuare tale missione in categoria Specific, nelle Q&A di un incontro EASA del 10/12/2020 con operatori del settore è presente tale discussione, che fa presupporre che nella maggior parte dei casi esse andranno a ricadere in tipologia Certified.

Q. In the future (actual discussions on AMC 1 Art 11 Reg UE 2019/947), the Cat SPECIFIC should allow flights over Assy of people. So Cat CERTIFIED or SPECIFIC? (edited)

A. It depends on the risk assessment, larger drone (more than 1 m) most probably will fall in the certified category.

Figura 39 - Q&A: Sorvolo assembramenti di persone

In generale, per le operazioni in categoria Specific esiste anche una certificazione di approvazione ottenibile da parte dell'operatore, il LUC: Light UAS operator Certificate (Riferimento: Article 12, Regulation 947/2019).

Gli operatori di droni possono richiedere all'Ente Nazionale preposto di certificare che l'organizzazione è in grado di svolgere l'analisi del rischio della missione in modo autonomo. I requisiti che deve avere l'organizzazione sono indicati nella Parte C della Regulation 947/2019.

L'Ente Nazionale può fornire diversi privilegi LUC in base al grado di maturità dell'organizzazione in esame; tali privilegi permettono all'operatore di autorizzarsi le missioni senza far richiesta di approvazione all'Ente Nazionale.

I privilegi, che possono essere assegnati singolarmente o in maniera multipla, sono i seguenti:

- Condurre operazioni negli scenari STS senza dichiarazione
- Autorizzarsi autonomamente operazioni con analisi di rischio PDRA senza richiedere validazione
- Autorizzarsi autonomamente operazioni con analisi SORA senza richiedere autorizzazione di terze parti

Categoria Certified

La categoria certified comprende le missioni a maggior rischio, per le quali valgono le regole dell'aviazione generale. Sono comprese tutte le operazioni di trasporto passeggeri e di trasporto di merci pericolose, nonché il sorvolo di assemblamenti di persone. Per garantire la sicurezza, i droni dovranno essere certificati come un aeromobile (type certificate, certificate of airworthiness); inoltre l'operatore e il pilota dovranno anch'essi possedere le autorizzazioni e le licenze equivalenti a quelli del mondo manned. Si prevede che tale similitudine tra mondo manned e unmanned vada a diminuire con l'evolversi della tecnologia, che porterà a una riduzione dell'impiego umano, soprattutto a livello di necessità di piloti, e ad una diffusione generalizzata della guida autonoma BVLOS. Per consentire le operazioni nella categoria certificata sarà dunque necessario modificare quasi tutti i regolamenti aeronautici, compito gravoso e di lunga durata. Al momento la normativa per tale settore operativo, relativamente ai droni, è ancora incompleta e immatura, e contiene solo accenni della futura evoluzione pubblicati da EASA. Proprio l'agenzia ha annunciato che una pubblicazione ufficiale della regolamentazione adattata per la categoria certified sarà disponibile a fine 2021 o inizio 2022.

Per il momento si sa che, analogamente a quanto avviene in categoria Open, saranno presenti tre sottocategorie, in questo caso più propriamente definite come tipi di operazioni:

- Tipo 1: grossi cargo autonomi con guida IFR (instrument flight rules) su rotte internazionali, o comunque long-haul. Come esempio viene riportato un Airbus A320 modificato in fase di sviluppo per coprire in modo autonomo la rotta New York-Parigi
- Tipo 2: volo autonomo anche in scenari urbani, sia per delivery che per aerotaxi
- Tipo 3: analogo alla tipologia 2, con però la sostanziale differenza della presenza di un pilota a bordo. La tipologia 3 è vista come uno step intermedio, necessario per la transizione al tipo 2

Lo spazio aereo per la gestione di tali missioni e l'integrazione tra manned e unmanned dovrà necessariamente essere servito da U-space (vedi sezione successiva); anche per questo motivo si reputa tale categoria non ancora sufficientemente matura.

In generale, le tre categorie possono essere riassunte in maniera sintetica con l'immagine a lato.

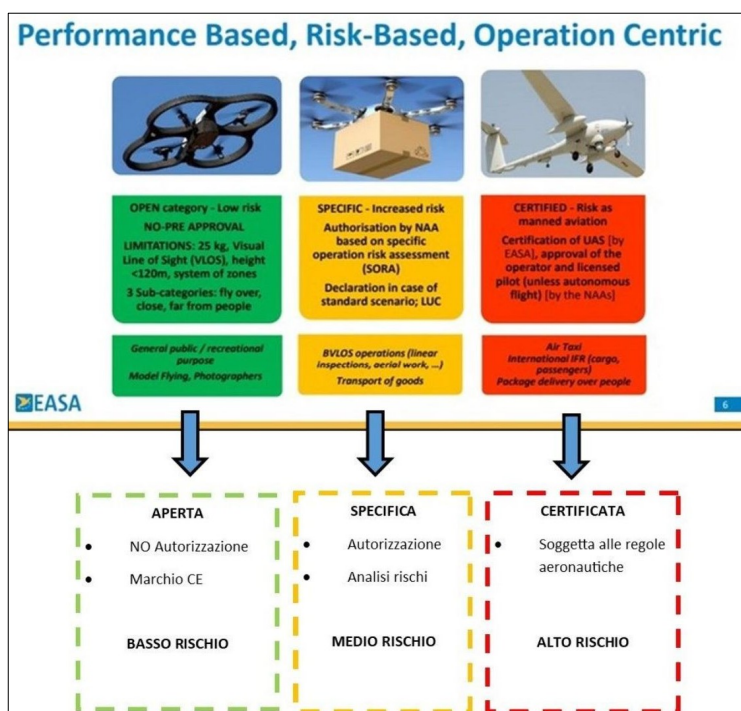


Figura 40 - Confronto tra le categorie Open, Specific e Certified

U-space

U-space è il fornitore di servizi UTM per EASA, necessari per l'integrazione tra traffico manned e unmanned e per la mitigazione del conseguente rischio di impatti mid-air. Gli spazi aerei interessati dalle operazioni unmanned non sono assolutamente da considerare segregati o esclusivi, ma, anzi, da condividere in modo armonico con l'aviazione generale, e U-space, con i suoi servizi, favorisce questa coordinazione ed unificazione. In particolare, il servizio interesserà prevalentemente lo spazio aereo VLL in cui avvengono la maggior parte delle operazioni unmanned: si presume che la maggioranza degli usi professionali dei droni in volo VLL possa essere ottenuta con la categoria Specific, e solo in minima parte con droni di categoria Certified, mentre la quasi totalità delle attività hobbistiche e delle operazioni semplici ricadranno in categoria Open.

Il servizio è in rapido sviluppo ma non ha ancora raggiunto né i livelli di maturità né la capillarità sul territorio necessari per ipotizzare scenari di integrazione di intere flotte di droni autonomi; anche dallo sviluppo di tali apparati di supporto passa il futuro della urban air mobility.

Questi servizi e procedure si basano su un alto livello di digitalizzazione e automazione delle funzioni, sia che si trovino a bordo del drone stesso, sia che facciano parte dell'ambiente terrestre.

U-space fornisce una cornice di supporto per le operazioni dei droni, nonché un'interfaccia chiara ed efficace per l'aviazione manned, i fornitori di servizi ATM e le autorità.

Viene in seguito riportata una roadmap di sviluppo di U-space, per fornire servizi sempre più completi e necessari a sostenere il crescente numero di droni nello spazio.

U-space services

	Foundation	▶ Registration ▶ Registration assistance ▶ e-identification ▶ Geo-awareness ▶ Drone aeronautical information management
	Initial	▶ Tracking (Position report submission) ▶ Surveillance data exchange ▶ Geo-fence provision (includes dynamic geo-fencing) ▶ Operation plan preparation /optimisation ▶ Operation plan processing ▶ Risk analysis assistance ▶ Strategic Conflict Resolution ▶ Emergency Management ▶ Incident/ Accident reporting ▶ Citizen reporting service ▶ Monitoring ▶ Traffic information ▶ Navigation infrastructure monitoring ▶ Communication infrastructure monitoring ▶ Legal recording ▶ Digital logbook ▶ Weather information ▶ Procedural interface with ATC
	Enhance	▶ Dynamic Capacity Management ▶ Tactical Conflict Resolution ▶ Geospatial information service ▶ Population density map ▶ Electromagnetic interference information ▶ Navigation coverage information ▶ Communication coverage information ▶ Collaborative interface with ATC
	Full	▶ Integrated interfaces with manned aviation ▶ Additional new servicesw

SOURCE: Based on list from U-space concept of operations – Edition 3 [see annex 1 for the full description]

Figura 41 - Roadmap di sviluppo di U-space

Al momento la fase di sviluppo raggiunta è la U-2, non compatibile con uno scenario di operazioni autonome di ampia complessità e su larga scala, per le quali è necessario il raggiungimento del servizio completo, al livello U-4.

U-space prevede la creazione di tre tipi di spazio aereo VLL interessato al volo unmanned: X, Y e Z, con numero e livello di servizi presenti via via crescente.

- X: non viene offerto alcun servizio di risoluzione dei conflitti.
- Y: viene offerta solo la risoluzione dei conflitti prima del volo.
- Z: vengono offerte la risoluzione dei conflitti prima del volo e la separazione durante il volo.

Parallelamente, la densità e la complessità delle operazioni che possono verificarsi nei vari spazi aerei saranno a rischio crescente: il volo BVLOS sarà possibile solo in Y e Z, mentre il volo completamente autonomo solo in Z.

In particolare, lo spazio aereo di tipo Y sarà disponibile già a partire dalla fase U-2, mentre lo spazio aereo di tipo Z sarà suddiviso ulteriormente in Zu e Za, controllati rispettivamente da UTM e ATM. Za è un normale spazio aereo controllato, come avviene già per l'aviazione generale, ed è quindi già utilizzabile, mentre Zu sarà disponibile solamente da U-3.

Inoltre, la zona Z sarà particolarmente adatta a gestire il rischio collegato all'integrazione tra volo manned e unmanned, autonomo o meno, soprattutto in prossimità di aeroporti e in VLL, in coordinamento con i mezzi di soccorso o di polizia che possono occupare i medesimi livelli di volo.

Tale suddivisione è derivante dalla volontà di garantire il massimo dei servizi di assistenza nei casi in cui essi siano realmente necessari, limitando lo sforzo tecnologico ed economico nelle aree meno critiche. Lo spazio aereo Z, necessario per il volo autonomo, non implica tuttavia nessuna imposizione sulla categoria di operazioni necessarie: benché a livello di rischio e analisi SORA sia probabile che la missione debba essere classificata come Certified, è altresì possibile che essa possa rientrare nella categoria Specific, sebbene con limitazioni e requisiti più rigidi. Tale possibilità è ammessa da un estratto delle Q&A di un incontro EASA del 10/12/2020 con operatori del settore, qui riportato per completezza:

A. Autonomous operations are allowed in the specific category. We do not expect that they can be allowed based only on a declaration (using standard scenario). An operator with a LUC may have the privilege to self authorize their operations.

Figura 42 - Q&A: operazioni autonome

Analisi SORA

Come già introdotto nella precedente sezione, l'analisi SORA sviluppata da JARUS è un riferimento di settore in merito alle autorizzazioni per la categoria di operazioni Specific. Il processo di sviluppo di STS e PDRA, per quanto importante e in rapida crescita, non permette ancora di coprire un sufficiente ventaglio di scenari di missione; per questo motivo, al giorno d'oggi, l'analisi SORA completa rimane il metodo principale per ottenere l'approvazione per una missione Specific.

Per di più, gli scenari STS e PDRA sono molto restrittivi nel caso di un'ampia serie di missioni e servizi, con particolari limitazioni per ambienti con densità abitative significative o droni di dimensioni importanti: tali casi predefiniti infatti coprono le missioni con un tasso di rischio più contenuto, benché nella categoria Specific.

Chiaramente, per una analisi completa, e per vagliare le possibilità delle missioni in categoria Specific, e quindi indirettamente le potenzialità offerte dal nuovo regolamento europeo, è necessario considerare anche casi operativi più critici dal punto di vista del rischio, spingendosi a verificare la fattibilità di missioni con grandi droni su ambienti urbani con alta densità di persone esposte. La metodologia SORA fornisce un processo logico per analizzare il ConOps (concept of operations) proposto per la missione, e per stabilire un livello adeguato di confidenza che la missione possa essere condotta con un livello di rischio accettabile.

Prima di effettuare operativamente alcuni test incrociando scenari e droni, è necessario approfondire la struttura di un'analisi SORA, negli step successivi del processo, negli annex, e nei particolari che la contraddistinguono.

Nel dettaglio, i dieci punti di un Specific Operations Risk Assessment sono:

1. Descrizione del ConOps

È il riassunto stesso dell'intera operazione, dei suoi dettagli, del suo fine, dell'ambiente operativo e dei mezzi coinvolti in essa. È un insieme di considerazioni raccolte in modo schematico e organizzato, unito ad un prospetto operativo della missione e del fine, oltre che a valutazioni sull'ambiente e sulle eventuali criticità.

La prima fase dell'analisi SORA prevede quindi che il richiedente raccolga e fornisca le informazioni tecniche, operative e di sistema necessarie per valutare il rischio associato al funzionamento previsto dell'UAS.

Il dettaglio formale per la raccolta e la presentazione dei dati viene fornito in allegato alla documentazione SORA stessa, in modo da uniformare e standardizzare il più possibile il processo di richiesta per l'autorizzazione.

Lo sviluppo del ConOps risulta essere in molti casi un processo iterativo, pertanto, quando viene applicato il processo SORA nella sua completezza, possono essere identificate ulteriori mitigazioni e limitazioni necessarie, che richiedono dettagli tecnici aggiuntivi, procedure e altre informazioni da fornire e/o aggiornare nel ConOps.

Tale processo ciclico dovrebbe arrivare a produrre un ConOps completo, che descriva nel modo più accurato e dettagliato possibile la missione dal punto di vista tecnico e operativo, e che contenga anche informazioni sulla cultura della sicurezza dell'operatore UAS, essendo essenzialmente un'analisi di rischio.

2. *Determinazione della classe intrinseca di rischio a terra dell'UAS (GRC: ground risk class)*

È uno dei passaggi chiave della determinazione del rischio complessivo della missione, e quindi dell'ottenimento o meno dell'autorizzazione. L'analisi del rischio a terra rappresenta una sezione importante del processo di valutazione di una missione, ed è ovviamente strettamente correlata sia al tipo di drone utilizzato che, soprattutto, all'ambiente operativo in cui l'attività si svolge.

Infatti, in questa sezione il rischio è valutato come la possibilità di colpire delle persone presenti nell'area interessata dalle operazioni, in caso di malfunzionamento del drone.

L'area interessata è da valutare sia in correlazione al volume operativo della missione, che comprende sia il flight geography volume che il contingency volume, sia alla rotta 4D prevista, considerando quindi i movimenti spaziotemporali del drone.

L'area di buffer a terra normalmente viene valutata con un rapporto 1:1 tra dimensione dell'area e quota operativa del drone (esempio: una quota di 120 metri comporta un buffer di almeno 120 metri a terra); tale calcolo è valido per il caso di traiettorie balistiche.

La metodologia operativa per determinare il GRC intrinseco è organizzata con una tabella, avente in input la dimensione caratteristica del drone, l'energia di impatto al suolo in caso di avaria, il tipo di missione e la densità abitativa dell'area coinvolta nelle operazioni.

In particolare, si hanno:

- Quattro categorie di limite di dimensione caratteristica.
- Quattro categorie di limite di energia di impatto prevista: tale energia viene calcolata considerando la velocità terminale del drone (massima velocità di caduta possibile) e utilizzando la formula

$$E = \frac{1}{2} mV^2$$

- Tale calcolo risulta conservativo, ovvero tendenzialmente sovradimensionato, in quanto non è garantito che la velocità di impatto al suolo del drone sia effettivamente quella terminale. In base alle caratteristiche geometriche del drone, alla sua massa e alla quota a cui avviene l'avaria, è possibile calcolare tale velocità; EASA propone un calcolatore online, sviluppato da NASA, per aiutare in tale valutazione.
- Due tipologie di missione: VLOS oppure BVLOS.
- Nell'analisi SORA le eventuali EVLOS sono da considerarsi al pari di missioni BVLOS.
- Quattro categorie di ambiente: area controllata, scarsamente popolata, popolata e assembramento di persone.

Dai primi due parametri, entrambi relativi al drone utilizzato, si ottiene un unico dato di input, che li combina valutando la condizione più gravosa tra le eventuali due possibili. Gli altri due parametri, valutati con tutte le loro possibili combinazioni, permettono invece di ottenere un input che determini completamente l'ambiente operativo correlato alla missione.

L'output di tale tabella risulterà essere il GRC intrinseco alla missione, valutato senza ancora introdurre nessuna possibile mitigazione, ma relativo solamente al drone utilizzato, ai parametri di missione e all'ambiente in cui si svolge.

La tabella appena descritta è la seguente:

Intrinsic UAS ground risk class				
Max UAS characteristics dimension	1 m / approx. 3 ft	3 m / approx. 10 ft	8 m / approx. 25 ft	>8 m / approx. 25 ft
Typical kinetic energy expected	< 700 J (approx. 529 ft lb)	< 34 kJ (approx. 25 000 ft lb)	< 1 084 kJ (approx. 800 000 ft lb)	> 1 084 kJ (approx. 800 000 ft lb)
Operational scenarios				
VLOS/BVLOS over a controlled ground area ³	1	2	3	4
VLOS over a sparsely populated area	2	3	4	5
BVLOS over a sparsely populated area	3	4	5	6
VLOS over a populated area	4	5	6	8
BVLOS over a populated area	5	6	8	10
VLOS over an assembly of people	7			
BVLOS over an assembly of people	8			

Figura 43 - SORA: classificazione UAS e scenario operativo

Come si può notare, il valore del GRC è crescente al crescere del rischio, dovuto sia alla dimensione e all'energia di impatto del drone che alla pericolosità della missione, la quale dipende dal numero di persone coinvolte da un'eventuale emergenza e dalla sua complessità (VLOS o BVLOS). Il valore di GRC intrinseco varia da 1 a 10, con il valore più basso nel caso di droni piccoli su aree controllate - ovvero prive di persone non coinvolte nelle operazioni - e il più elevato relativo a operazioni BVLOS con droni di grandi dimensioni su aree densamente popolate.

Come già accennato nelle sezioni precedenti, si noti come il sorvolo di assembramenti in categoria Specific sia ipoteticamente possibile solo per droni di dimensione inferiore al metro; il valore di GRC intrinseco tuttavia è alto, suggerendo che difficilmente l'analisi SORA completa porterà ad una missione autorizzabile.

Per operazioni su assembramenti di persone, siano esse VLOS o BVLOS, il rischio risulta essere troppo elevato in caso di droni di categorie di dimensione e/o energia di impatto superiori, rendendo impossibile il prosieguo anche solo del processo SORA. Il rischio risulta essere eccessivo, rendendo impossibile realizzare la missione a prescindere da qualsiasi altra considerazione e possibile mitigazione.

3. Determinazione del GRC finale

Il rischio che un UAV colpisca una o più persone può essere mitigato in diversi modi, e a tali mitigazioni corrisponde quindi un calo del valore del GRC. Si parla più propriamente di un processo di valutazione su diversi dettagli e caratteristiche dell'operazione e dello scenario in cui si svolge, che permette di modificare il valore di GRC calcolato al punto precedente, e di passare da un valore di rischio a terra intrinseco alla missione ad uno finale post mitigazione.

Le mitigazioni sono legate al grado di robustezza a loro associato, che è un parametro dovuto alla combinazione del guadagno in termini di sicurezza fornito dalle misure di mitigazione e del relativo livello di assurance e integrity. Robustezza, integrity e assurance presentano tre possibili livelli: basso, medio, alto; il livello di robustezza desiderato può essere raggiunto lavorando su entrambi i parametri di input: l'integrity è il guadagno di sicurezza fornito da ciascuna mitigazione, mentre la assurance è legata alla verifica che il guadagno di sicurezza dichiarato è stato raggiunto.

Il livello di integrity è più direttamente correlato al tipo di mitigazione effettuata, mentre il livello di assurance dipende dal metodo di prova scelto per verificare la diminuzione del rischio ottenuta:

- Un basso livello di assurance si ha quando il richiedente dichiara semplicemente che è stato raggiunto il livello di integrity richiesto.
- Un medio livello di assurance si ha quando il richiedente fornisce prove a sostegno del raggiungimento del livello di integrity richiesto.
- Un alto livello di assurance si ha quando l'integrity raggiunta è stata ritenuta accettabile da una terza parte competente.

La tabella che esprime la robustezza in funzione dei parametri di input è la seguente:

	Low assurance	Medium assurance	High assurance
Low integrity	Low robustness	Low robustness	Low robustness
Medium integrity	Low robustness	Medium robustness	Medium robustness
High integrity	Low robustness	Medium robustness	High robustness

Figura 44 - SORA: legame tra integrity, assurance e robustness

Le mitigazioni del GRC sono tre e sono riportate e analizzate nell'Annex B del AMC 1 dell'Article 11 della Regulation 947/2019, contrassegnate dalla lettera "M" anteposta ad un numero crescente.

Per ognuna delle mitigazioni sono presenti dettagliate tabelle esplicative che illustrano quali criteri è necessario soddisfare per poterle applicare: normalmente ogni mitigazione ha criteri multipli che devono essere valutati, e ad ognuno di essi è associato uno specifico set di parametri per determinare sia il grado di integrity che di assurance che può essere raggiunto. Tali valutazioni permettono quindi non solo di determinare se una mitigazione sia applicabile o meno al caso in corso di valutazione con l'analisi SORA, ma anche con quale specifico livello di robustezza associata.

Una mitigazione con la propria robustezza permette di modificare, tramite i valori indicati nella successiva tabella, il livello di rischio a terra relativo all'operazione in analisi, permettendo dunque di calcolare, a partire dal GRC intrinseco, il GRC finale della missione.

Mitigation Sequence	Mitigations for ground risk	Robustness		
		Low/None	Medium	High
1	M1 — Strategic mitigations for ground risk ¹	0: None -1: Low	-2	-4
2	M2 — Effects of ground impact are reduced ²	0	-1	-2
3	M3 — An emergency response plan (ERP) is in place, the UAS operator is validated and effective	1	0	-1

Figura 45 - SORA: legame mitigazioni per ground risk e robustness

Come si può notare, le mitigazioni possono abbassare il GRC, lasciarlo invariato, o addirittura peggiorarlo nel caso di mitigazione M3 raggiunta con livello di robustezza più basso oppure non raggiunta per nulla.

Le mitigazioni sono uno strumento molto efficace per poter lavorare sul GRC, che a sua volta ha un impatto determinante sulla valutazione del SAIL e in ultimo della fattibilità della missione nel suo complesso.

Si può osservare come la mitigazione M1 sia quella con peso maggiore, arrivando ad un valore di -4 se ottenuta con robustezza elevata.

Le mitigazioni, anche raggiunte solamente con grado di robustezza medio, possono abbassare notevolmente il GRC iniziale fino a livelli di rischio a terra accettabile, rendendo possibili missioni che altrimenti difficilmente sarebbero fattibili.

Una successiva sezione di esempi pratici di SORA evidenzierà come il grado di robustezza medio possa essere raggiunto in un numero relativamente alto di casi e scenari di missione.

Una volta calcolato il GRC finale, sarà possibile passare allo step successivo del processo SORA solo se il valore sarà pari o inferiore a 7; in caso contrario sarà necessario ripercorrere i primi tre step dell'analisi e variare parametri e condizioni fino ad ottenere un livello accettabile, oppure passare in categoria Certified.

Passando dunque all'analisi nel dettaglio delle tre possibili mitigazioni, sono riportate e brevemente commentate le tabelle presenti nell'Annex B:

- Mitigazione M1

La mitigazione M1 è una mitigazione strategica volta a ridurre il numero di persone a rischio durante l'operazione, lavorando su due criteri: la creazione di un'area di buffer e la valutazione del numero di persone effettivamente esposte al pericolo di incidenti.

		Level of integrity		
		Low	Medium	High
M1 — Strategic mitigations for ground risk	Criterion #1 (Definition of the ground risk buffer)	A ground risk buffer with at least a 1:1 rule ¹ or for rotary wing UA defined using a ballistic methodology approach acceptable to the competent authority.	The ground risk buffer takes into consideration: (a) improbable ² single malfunctions or failures (including the projection of high energy parts such as rotors and propellers) which would lead to an operation outside the operational volume; (b) meteorological conditions (e.g. wind); (c) UAS latencies (e.g. latencies that affect the timely manoeuvrability of the UA); (d) UA behaviour when activating a technical containment measure; and (e) UA performance.	Same as medium ³
	Comments	¹ If the UA is planned to operate at an altitude of 150 m, the ground risk buffer should be a minimum of 150 m.	² For the purpose of this assessment, the term 'improbable' should be interpreted in a qualitative way as 'Unlikely to occur in each UAS during its total life, but which may occur several times when considering the total operational life of a number of UAS of this type'. ³ The distinction between a medium and a high level of robustness for this criterion is achieved through the level of assurance (Table 3 below).	
	Criterion #2 (Evaluation of people at risk)	The applicant evaluates the area of operations by means of on-site inspections or appropriate appraisals to justify lowering the density of the people at risk (e.g. a residential area during daytime when some people may not be present or an industrial area at night time for the same reason).	The applicant evaluates the area of operations by use of authoritative density data (e.g. data from the U-space data service provider) relevant for the proposed area and time of operation to substantiate a lower density of people at risk. If the applicant claims a reduction, due to a sheltered operational environment, the applicant: (a) uses a UA of less than 25 kg and not flying above 174 knots ⁴ , and (b) demonstrates that although the operation is conducted in a populated environment, it is reasonable to consider that most of the non-involved persons will be located within a building ⁵ .	Same as medium.
	Comments	N/A	⁴ as per MITRE presentation given during the UAS Technical Analysis and Applications Center (TAAC) conference in 2016 titled 'UAS EXCOM Science and Research Panel (SARP) 2016 TAAC Update' - PR 16-3979 ⁵ The consideration of this mitigation may vary based on the local conditions.	N/A

Figura 46 - SORA: mitigazione M1, integrity

Per quel che riguarda la definizione del livello di integrity, si può notare che nel criterio 1, per il livello medio e alto, assume importanza la valutazione dettagliata sia delle caratteristiche progettuali del drone che delle condizioni meteorologiche previste durante l'operazione, mentre nel criterio 2 si valuta come l'ambiente e l'orario del giorno possano influire sulle persone realmente associabili ad un'emergenza. In particolare, è molto interessante la possibilità di abbassare il rischio tramite l'analisi dello sheltering delle persone presenti nell'area, ovvero il fatto che una particolare conformazione ambientale (esempio: edifici industriali) possano schermare le persone dall'impatto, diretto o meno, con il drone in avaria.

		Level of assurance		
		Low	Medium	High
M1 — Strategic mitigations for ground risk	Criterion #1 (Definition of the ground risk buffer)	The applicant declares that the required level of integrity is achieved ¹ .	The applicant has supporting evidence to claim that the required level of integrity has been achieved. This is typically done by means of testing, analysis, simulation ² , inspection, design review or through operational experience.	The claimed level of integrity is validated by a competent third party.
	Comments	¹ Supporting evidence may or may not be available.	² When simulation is used, the validity of the targeted environment used in the simulation needs to be justified.	N/A
	Criterion #2 (Evaluation of people at risk)	The applicant declares that the required level of integrity has been achieved ³ .	The density data used for the claim of risk reduction is an average density map for the date/time of the operation from a static sourcing (e.g. census data for night time ops). In addition, for localised operations (e.g. intra-city delivery or infrastructure inspection), the applicant submits the proposed route/area of operation to the applicable authority (e.g. city police, office of civil protection, infrastructure owner etc.) to verify the claim of a reduced number of people at risk.	Same as medium; however, the density data used for the claim of risk reduction is a near-real time density map from a dynamic sourcing (e.g. cellular user data) and applicable for the date/time of the operation.
	Comments	³ Supporting evidence may or may not be available	N/A	N/A

Figura 47 - SORA: mitigazione M1, assurance

Il livello di assurance, per entrambi i criteri, è la discriminante tra la categoria media e alta di integrity, per cui assume un ruolo ancora più importante. Mentre la distinzione tra i livelli di assurance del criterio 1 ricalca quanto detto in generale sui vari gradi di verifica necessari, per il criterio 2 vengono introdotte modifiche specifiche per il livello medio e alto. Per il livello medio viene introdotta la necessità di avere a disposizione dati statistici sulla densità media delle persone esposte al rischio nelle varie fasce orarie, nonché di effettuare ulteriori considerazioni, insieme con l'autorità competente, su infrastrutture o aree particolari interessate da un numero elevato di persone potenzialmente coinvolte. Per il livello alto sono presenti considerazioni simili, con tuttavia la fondamentale differenza che le verifiche sulla densità di persone esposte al rischio deve essere dinamica, con mappe di densità aggiornate pressoché in tempo reale. È presente anche una mitigazione M1 esclusivamente ideata per le missioni con cavo di sicurezza; non essendo di interesse per questo lavoro, non verrà analizzata ulteriormente.

- Mitigazione M2

La mitigazione M2 mira a diminuire gli effetti correlati ad un impatto al suolo del drone in avaria intervenendo sulle dinamiche dell'evento, tra cui l'area di collisione, la velocità di caduta, l'energia trasferibile nel contatto.

Gli interventi relativi a questo tipo di mitigazione, quindi, riguardano principalmente le caratteristiche del drone in termini di sicurezza e prevenzione nei confronti di violenti impatti a terra, in modo da ridurre le probabilità che ci siano vittime nel caso di collisione fortuita tra macchina e uomo.

Ad esempio, un tipico intervento in questa tipologia di mitigazione è l'installazione a bordo del drone di un paracadute di emergenza, che permetta al mezzo di ridurre notevolmente la sua velocità di caduta in caso di perdita di controllo.

		Level of integrity		
		Low/None	Medium	High
M2 — Effects of UA impact dynamics are reduced (e.g. parachute)	Criterion #1 (Technical design)	Does not meet the 'medium' level criterion	(a) Effects of impact dynamics and post impact hazards ¹ are significantly reduced although it can be assumed that a fatality may still occur. (b) When applicable, in case of malfunctions, failures or any combinations thereof that may lead to a crash, the UAS contains all the elements required for the activation of the mitigation. (c) When applicable, any failure or malfunction of the proposed mitigation itself (e.g. inadvertent activation) does not adversely affect the safety of the operation.	Same as medium. In addition: (a) When applicable, the activation of the mitigation is automated ² . (b) The effects of impact dynamics and post impact hazards are reduced to a level where it can be reasonably assumed that a fatality will not occur ³ .
	Comments	N/A	¹ Examples of post impact hazards include fires and the release of high-energy parts.	² The applicant retains the discretion to implement an additional manual activation function. ³ Emerging research and upcoming industry standards will help applicants to substantiate compliance with this integrity criterion.
	Criterion #2 (Procedures, if applicable)	Any equipment used to reduce the effect of the UA impact dynamics is installed and maintained in accordance with the manufacturer's instructions. ⁴		
	Comments / Notes	⁴ The distinction between a low, a medium and a high level of robustness for this criterion is achieved through the level of assurance (Table B.7 below).		
	Criterion #3 (Training, if applicable)	Personnel responsible for the installation and maintenance of the measures proposed to reduce the effect of the UA impact dynamics are identified and trained by the applicant. ⁵		
	Comments / Notes	⁵ The distinction between a low, a medium and a high level of robustness for this criterion is achieved through the level of assurance (Table B.7 below).		

Figura 48 - SORA: mitigazione M2, integrity

Come si può notare, solo il primo criterio presenta una descrizione dettagliata, mentre gli altri due concedono maggiore discrezionalità all'operatore che presenta l'analisi SORA e all'Ente che deve approvarla.

Sempre nel secondo e terzo criterio è evidente un riferimento all'esecuzione, da parte dell'operatore o di chi per esso, di un programma di manutenzione consono a quanto indicato dal produttore del drone, ed effettuato da personale appositamente addestrato. Per tali criteri, la distinzione tra i diversi livelli di integrity è correlata alla relativa assurance.

Il primo criterio, invece, è più propriamente di natura tecnica e legato alla necessità di una progettazione che ponga la riduzione della fatalità del drone, in caso di impatto, al centro dello sviluppo del velivolo. È indicata la necessità che il mezzo non solo abbia dei dispositivi specifici per mitigare il rischio di ferire gravemente o uccidere una persona in caso di impatto, ma che essi si attivino correttamente e che non interferiscano con altre funzionalità del drone in fasi operative non di emergenza. Per poter accedere ad un livello di integrity alto serve inoltre che l'attivazione delle misure di mitigazione sia automatizzata, e che in generale si raggiunga un livello di riduzione della pericolosità tale da considerare un eventuale impatto pressoché non letale per eventuali persone coinvolte nell'incidente.

		Level of assurance		
		Low/None	Medium	High
M2 — Effects of UA impact dynamics are reduced (e.g. parachute)	Criterion #1 (Technical design)	The applicant declares that the required level of integrity has been achieved ¹ .	The applicant has supporting evidence to claim that the required level of integrity is achieved. This is typically ² done by means of testing, analysis, simulation ³ , inspection, design review or through operational experience.	The claimed level of integrity is validated by EASA against a standard considered adequate by EASA and/or in accordance with means of compliance acceptable to EASA (when applicable).
	Comments	¹ Supporting evidence may or may not be available.	² The use of industry standards is encouraged when developing mitigations used to reduce the effect of ground impact. ³ When simulation is used, the validity of the targeted environment used in the simulation needs to be justified.	
	Criterion #2 (Procedures, if applicable)	(a) Procedures do not require validation against either a standard or a means of compliance considered adequate by the competent authority. (b) The adequacy of the procedures and checklists is declared.	(a) Procedures are validated against standards considered adequate by the competent authority and/or in accordance with means of compliance acceptable to that authority. (b) The adequacy of the procedures is proven through: (1) dedicated flight tests; or (2) simulation, provided that the representativeness of the simulation means is proven for the intended purpose with positive results.	Same as medium. In addition: (a) Flight tests performed to validate the procedures cover the complete flight envelope or are proven to be conservative. (b) The procedures, flight tests and simulations are validated by a competent third party.
	Comments	N/A		N/A
	Criterion #3 (Training, if applicable)	Training is self-declared (with evidence available)	(a) Training syllabus is available. (b) The UAS operator provides competency-based, theoretical and practical training.	(a) Training syllabus is validated by a competent third party. (b) Remote crew competencies are verified by a competent third party.
	Comments	N/A	N/A	N/A

Figura 49 - SORA: mitigazione M2, assurance

Il primo criterio, quello di natura più propriamente tecnica, presenta un livello di definizione del livello di assurance che varia da una semplice dichiarazione nel caso basso, alla necessità di fornire prove nel caso medio, fino al dover dimostrare che siano stati raggiunti standard di validazione determinati dall'EASA nel caso alto.

Il criterio relativo alle procedure, nonostante dettagli e precisazioni aggiuntive, presenta anch'esso la consueta discriminazione tra le diverse categorie, con assurance bassa che è sufficiente venga dichiarata dall'operatore, media che deve essere verificata tramite test e simulazioni, e alta che deve essere validata da terze parti con l'aggiunta di prove di volo addizionali per la verifica.

Il terzo criterio, relativo al training dei manutentori e degli addetti alle features di sicurezza del velivolo in generale, indica che per assurance bassa basta una dichiarazione delle metodologie di addestramento, mentre per quella media è necessario fornire la programmazione del training eseguita, che deve inoltre riguardare sia l'ambito teorico che pratico. Per la categoria di assurance alta si eseguono le stesse verifiche che per quella media, con tuttavia l'aggiunta che sia il programma di training che l'effettivo livello di preparazione del personale devono essere verificati da terze parti competenti.

- Mitigazione M3

Mitigazione garantita dall'esistenza di un ERP (Emergency Response Plan) dettagliato ed efficace predisposto dall'operatore. In sintesi, è la definizione di un piano di emergenza di pronto intervento in risposta ad una perdita di controllo, non recuperabile, del drone.

L'esito degli eventi a seguito di un impatto al suolo dipende fortemente dal caso e non può essere gestito tramite procedure di emergenza, ma solamente con una risposta efficace all'evento catastrofico. L'ERP proposto da un richiedente è dunque diverso dalle procedure di emergenza relative all'operazione, e dovrebbe comprendere sia un piano per limitare gli effetti dell'incidente (ad esempio: informare tempestivamente i soccorsi), sia per informare gli altri occupanti dello spazio aereo, collaborando e allertando tramite servizi ATM.

		Level of integrity		
		Low/None	Medium	High
M3 — An ERP is in place, UAS operator validated and effective	Criteria	No ERP is available, or the ERP does not cover the elements identified to meet a 'medium' or 'high' level of integrity	The ERP: (a) is suitable for the situation; (b) limits the escalating effects; (c) defines criteria to identify an emergency situation; (d) is practical to use; (e) clearly delineates the duties of remote crew member(s).	Same as medium. In addition, in case of a loss of control of the operation, the ERP is shown to significantly reduce the number of people at risk, although it can be assumed that a fatality may still occur.
	Comments	N/A	N/A	N/A

Figura 50 - SORA: mitigazione M3, integrity

In questo caso si ha un solo criterio per valutare l'integrità della mitigazione. I livelli di integrità sono definiti in maniera qualitativa valutando l'efficacia dell'ERP proposto a adattarsi a diverse situazioni, limitare il livello degli effetti e della mortalità a seguito dell'incidente, essere di facile lettura e dettagliato nella definizione dei compiti, in modo da facilitare un rapido e preciso intervento di risposta. Per la categoria di integrità alta è inoltre necessario dimostrare come l'ERP abbassi significativamente le probabilità di avere vittime.

		Level of assurance		
		Low/None	Medium	High
M3 — An ERP is in place, UAS operator validated and effective	Criterion #1 (Procedures)	(a) Procedures do not require validation against either a standard or a means of compliance considered adequate by the competent authority. (b) The adequacy of the procedures and checklists is declared.	(a) The ERP is developed to standards considered adequate by the competent authority and/or in accordance with means of compliance acceptable to that authority. (b) The ERP is validated through a representative tabletop exercise ¹ consistent with the ERP training syllabus.	Same as medium. In addition: (a) The ERP and the effectiveness of the plan with respect to limiting the number of people at risk are validated by a competent third party. (b) The applicant has coordinated and agreed the ERP with all third parties identified in the plan. (c) The representativeness of the tabletop exercise is validated by a competent third party.
	Comments	N/A	¹ The tabletop exercise may or may not involve all third parties identified in the ERP.	N/A
	Criterion #2 (Training)	Does not meet the 'medium' level criterion	(a) An ERP training syllabus is available. (b) A record of the ERP training completed by the relevant staff is established and kept up to date.	Same as medium. In addition, competencies of the relevant staff are verified by a competent third party.
	Comments	N/A	N/A	N/A

Figura 51 - SORA: mitigazione M3, assurance

L'assurance comporta invece valutazioni sia sulle procedure che sulla preparazione delle persone coinvolte nella gestione dell'emergenza, e per questo sono presenti due criteri.

Per le procedure vale la seguente differenziazione sulla validazione del ERP: per la fascia bassa basta una dichiarazione autonoma dell'operatore, per quella media serve un adeguamento a standard accettabili per l'Ente autorizzatore, mentre per l'alta è necessaria una verifica dei processi da parte di terze parti autorizzate.

Per quel che riguarda il criterio relativo all'addestramento del personale coinvolto, il livello di assurance media si ottiene con la presentazione del programma di training e con la presenza di documenti che dimostrino che l'addestramento è continuamente aggiornato ed effettuato, mentre per il livello più alto è necessario in aggiunta che le competenze dello staff siano verificate da terze parti.

L'analisi del rischio a terra ha un ruolo fondamentale nello studio di fattibilità di una missione e nella valutazione della sua sicurezza. In particolare, il secondo criterio della mitigazione M1, che mira ad analizzare la reale natura dell'esposizione al rischio delle persone a terra, è ampliabile ad una dettagliata analisi della correlazione tra ambiente operativo e probabilità di avere vittime in caso di incidente. Tale studio può portare a valutare in modo molto più specifico la correlazione tra le diverse variabili legate al tipo di missione, al drone, allo scenario operativo e alla possibilità che un incidente sia fatale per la popolazione coinvolta.

Nel successivo capitolo della tesi verrà svolto uno studio più dettagliato dell'analisi di rischio a terra, con diversi approcci e numerose valutazioni della suddetta analisi e della fatalità di un incidente.

4. Determinazione della classe iniziale di rischio aereo dell'operazione (ARC: air risk class)

La determinazione del rischio di collisione aerea tra un drone coinvolto nell'operazione in analisi e un velivolo appartenente all'aviazione generale è un punto cruciale nello studio di fattibilità di una missione. Il rischio dovuto al possibile impatto, infatti, oltre a interessare in modo più o meno grave, a seconda di numerose variabili, le persone a bordo del velivolo colpito, può portare a conseguenze anche catastrofiche sulla popolazione presente nell'area sottostante al volume operativo.

Per l'analisi SORA vale l'ipotesi che un qualsiasi scontro tra drone e velivolo manned risulti catastrofico.

Proprio la definizione del tipo di spazio aereo in cui è incluso il volume operativo e delle sue caratteristiche è il punto di partenza per la determinazione della classe di rischio ARC.

Le categorie in cui viene suddiviso lo spazio aereo in funzione del rischio sono quattro, denominate "ARC" seguito da una lettera compresa tra "a" e "d", dal minore al maggiore rischio di collisione.

Se la mappatura dello spazio aereo in funzione del rischio di collisioni è stata già fatta dall'autorità competente oppure da un service provider (esempio: U-space), allora la classe di rischio è direttamente determinabile; in alternativa bisogna valutare e considerare numerosi parametri per risalire all'ARC corrispondente.

Alcune delle variabili che influenzano la determinazione della classe di rischio sono:

- La quota operativa massima
- Il fatto che sia o meno uno spazio aereo controllato, typical o atypical
- La presenza di aeroporti nelle vicinanze
- Il tipo di area al suolo interessata dal volume aereo dell'operazione

Per ricavare il tipo di spazio aereo interessato dalla missione in assenza di servizi coordinati per la sua definizione, EASA propone il seguente diagramma:

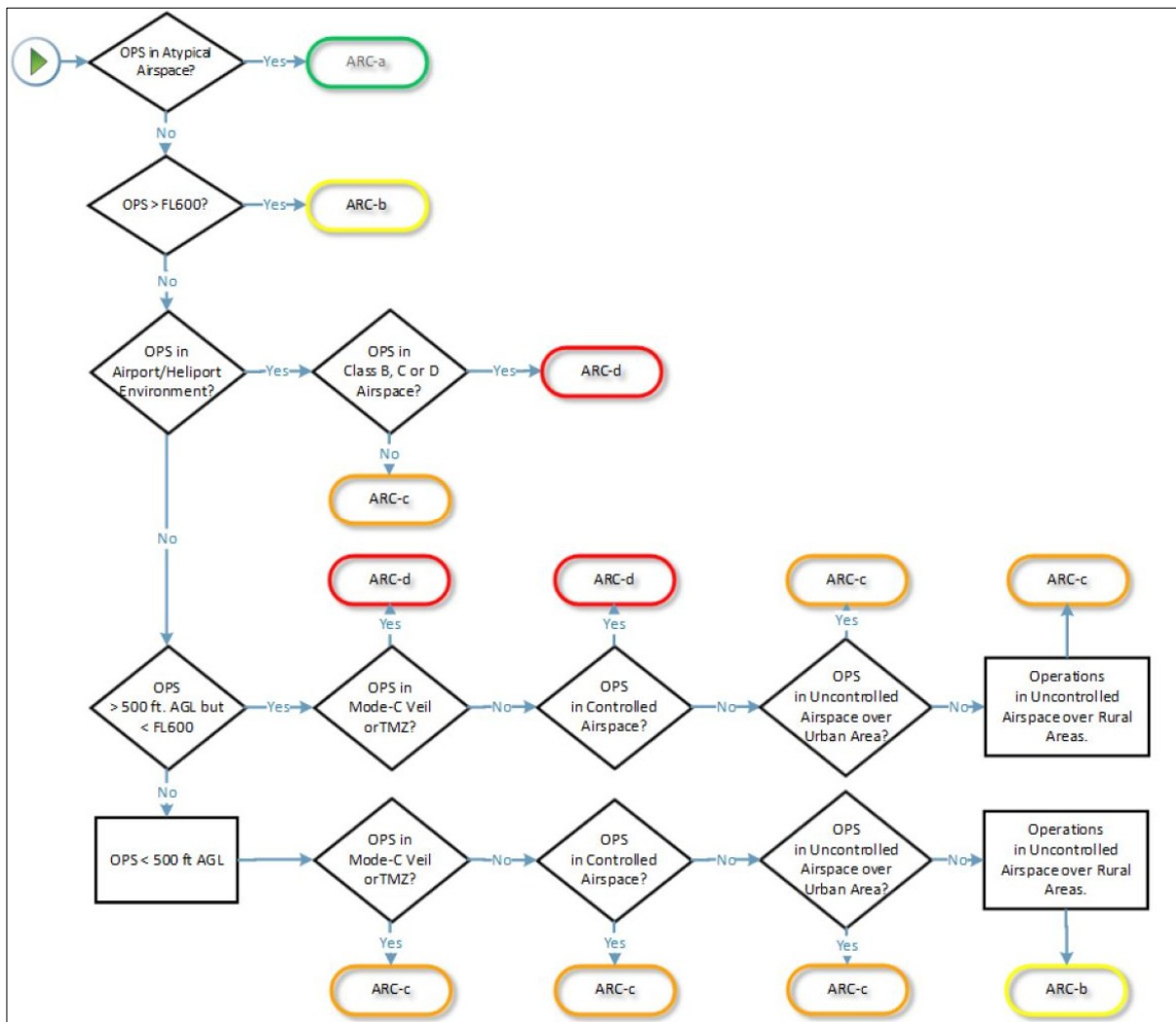


Figura 52 - SORA: determinazione ARC iniziale

L'ARC è una classificazione qualitativa della probabilità secondo cui un UAS incontrerebbe un aereo con equipaggio, e rappresenta un'assegnazione iniziale del rischio di collisione per lo spazio aereo in esame, prima che vengano applicate le mitigazioni. Essendo il processo di assegnazione dell'ARC relativamente generico, l'effettivo rischio di collisione in uno specifico volume operativo locale potrebbe essere molto diverso da quanto valutato: a prescindere dall'ARC iniziale sono quindi fondamentali le mitigazioni, trattate nel successivo punto dell'analisi SORA. Bisogna comunque sottolineare come in linea di massima il processo di assegnazione ARC sia conservativo, e come l'autorità competente possa definire l'ARC di uno specifico spazio aereo diversamente da quanto indicato nel diagramma precedente, per tener conto di valutazioni specifiche e locali.

La tipologia ARC-a è generalmente definita come uno spazio aereo in cui il rischio di collisione tra un UAS e un aeromobile con equipaggio è accettabile senza la necessità di alcuna mitigazione tattica, che invece è consigliabile e/o necessaria negli spazi aerei di categoria ARC-b, ARC-c e ARC-d.

È importante sottolineare che, qualora l'operazione UAS si estenda su ambienti dello spazio aereo di caratteristiche differenti, il richiedente dovrà eseguire una valutazione del rischio aereo per l'intera gamma di categorie comprese nel volume operativo.

5. Mitigazione e valutazione ARC residuo

Come già accennato nel punto precedente, è possibile che il volume operativo dell'UAS possa avere un rischio di collisione diverso da quello assegnato dall'ARC iniziale, pertanto, nell'Annex C è illustrato come un operatore, nel caso ritenga che l'ARC assegnato sia troppo alto, possa attivare un processo di richiesta di abbassamento dell'ARC. Se invece il richiedente suppone sia stato assegnato un ARC corretto, l'intero punto 5 del processo SORA può essere tralasciato, e l'ARC residuo coinciderà con l'ARC iniziale, senza modifiche.

Il punto 5 è l'unico passaggio opzionale del SORA, in quanto, benché la mitigazione dell'ARC sia di notevole importanza, è possibile che non sia direttamente gestibile dall'operatore, in quanto basata su servizi maggiormente legati allo spazio aereo e agli enti che se ne occupano. In generale, comunque, in casi dubbi un approccio privo di mitigazioni ARC è la strategia maggiormente conservativa.

La valutazione dell'ARC residuo e le possibili tecniche di mitigazione del rischio di collisione tra un UAV e un aereo con equipaggio sono analizzate nel dettaglio nell'Annex C, e permettono di valutare e considerare come diverse strategie di mitigazione possano influenzare ed abbassare l'ARC iniziale dello spazio aereo interessato dall'operazione.

Nell'Annex C sono presenti tre tipologie di mitigazioni possibili:

- Strategiche, attraverso l'applicazione di restrizioni operazionali
- Strategiche, attraverso l'applicazione di regole e servizi comuni a tutti i velivoli di uno spazio aereo
- Tattiche, spiegate più in dettaglio nell'Annex D, legato al punto 6 del processo SORA.

Le prime due categorie sono mitigazioni applicabili prima del decollo, e possono essere o meno sotto il controllo dell'operatore. L'ultima categoria, invece, riguarda mitigazioni applicabili dopo il decollo, ovvero durante la missione vera e propria, e sono legate ai TMPR (tactical mitigation performance requirement). Le prime due hanno il compito di abbassare l'ARC iniziale all'ARC residuo, l'ultima a mitigare ulteriormente quest'ultimo.

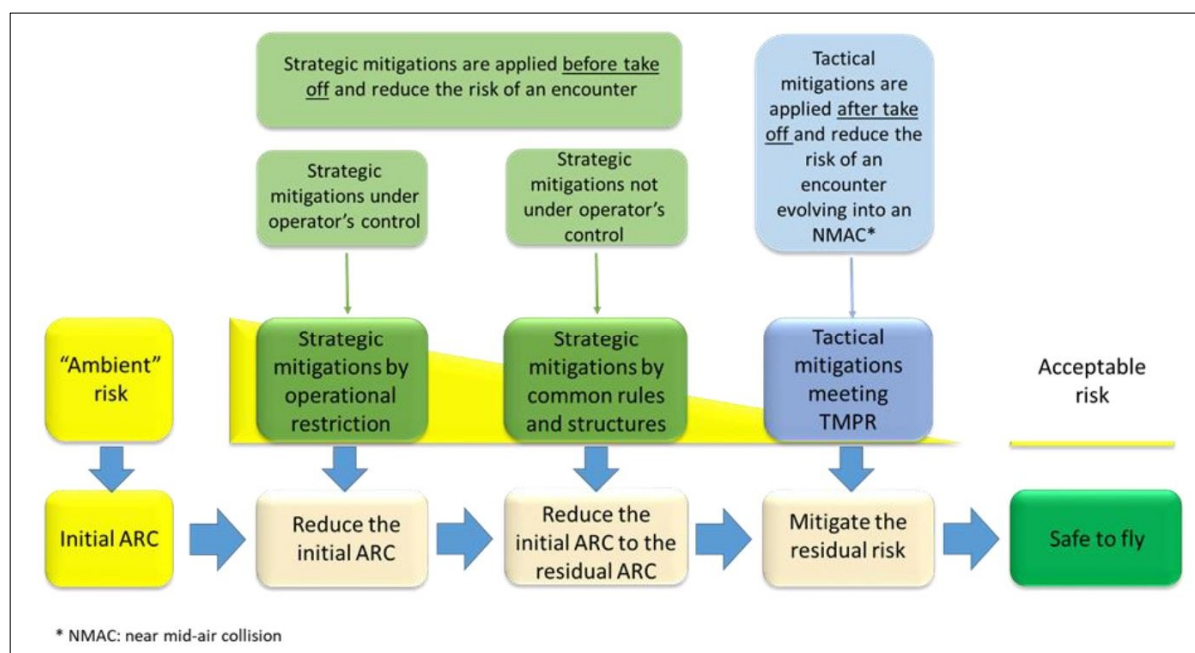


Figura 53 - SORA: mitigazione ARC

Le mitigazioni del primo tipo influiscono sui parametri operativi della missione, andando a limitare il volume geografico dell'operazione, variando la finestra temporale in cui si svolge la missione, o restringendone l'estensione oraria, in modo da abbassare il rischio di incontri aerei.

Le mitigazioni del secondo tipo mirano invece ad uniformare tutti i partecipanti dello spazio aereo interessato dall'operazione, con l'applicazione delle medesime metodologie per abbassare il rischio di collisioni attraverso l'uso di un set comune di regole dell'aria e infrastrutture (esempio: trasponder, luci anticollisione...). In futuro, U-space potrebbe essere un provider di tali servizi e un facilitatore per la standardizzazione; un primo step potrebbe prevedere spazi aerei comuni ma con ancora corridoi aerei riservati ai velivoli unmanned per abbassare il rischio.

Per il processo di richiesta di riduzione dell'ARC iniziale e in associazione alle mitigazioni strategiche, SORA non propone un rigido metodo, ma piuttosto generiche linee guida per indirizzare l'operatore nella procedura di effettivo abbassamento del rischio rispetto a quanto inizialmente previsto. Per quel che riguarda l'ARC iniziale, nell'annex è indicato più nel dettaglio come dodici possibili scenari di missione - e relativo rischio di collisione - analizzati, denominati AEC (Airspace Encounter Category), confluiscono nei quattro tipi di ARC; il parametro chiave del processo è la valutazione della prossimità tra velivoli, ovvero della densità di aircraft nello spazio aereo. Sono presenti tabelle che mettono in correlazione uno scenario operativo con il proprio AEC, il proprio density rating iniziale e il conseguente ARC, in modo da classificare l'intera gamma di scenari possibili. Esiste anche una tabella che correla ogni AEC (quindi ogni scenario) con l'ARC iniziale e un ipotetico ARC ridotto, acquisibile tramite autorizzazione dell'Ente preposto, previa dimostrazione da parte dell'operatore di uno specifico density rating necessario ad abbassare il rischio. Il richiedente, dunque, ha la possibilità di ottenere un abbassamento della classe di rischio di impatto aereo se riesce a dimostrare come nell'ambiente operativo di interesse si abbia una probabilità di incontro con mezzi manned tipica di una classe di rischio inferiore a quella altrimenti assegnata.

Invece una mitigazione in senso stretto può al massimo abbassare l'ARC solamente di una categoria, e tale processo non è applicabile a tutti i casi AEC (ad esempio non vale per 7-8-9-10). Nel caso fosse applicabile un processo di mitigazione per ridurre l'ARC, da parte del richiedente è necessario che vengano dimostrati i seguenti punti:

- Il drone possiede un dispositivo di cooperazione elettronico, luci di navigazione e anticollisione
- È stato implementato un processo per verificare la presenza di altri velivoli nello spazio aereo
- È stato implementato un processo per informare gli altri velivoli della presenza del drone nello spazio aereo
- Si ha il permesso di volo nello specifico spazio aereo della missione
- Si ha compliance con i diversi regolamenti vigenti sia per il mezzo che per lo spazio aereo
- Se nella VLL esiste una struttura per UAS (esempio: U-space), essa deve coinvolgere tutti gli UAS presenti
- Nella VLL sono state implementate procedure di separazione
- L'operatore può comunicare direttamente con il controllo del traffico aereo

Il ventaglio di mitigazioni tattiche disponibili per contenere il rischio di collisioni aeree durante la missione, e applicabili direttamente nel corso dell'operazione, è spiegato in maniera più approfondita nell'Annex D. Il DAA, ovvero le caratteristiche della gestione di detect and avoidance applicate a una missione, può essere ottenuto in molti modi, con sistemi a terra o in aria, anche combinati, con l'utilizzo di diverse architetture e sistemi, con o senza umani nel loop. È possibile dunque combinare diverse tactical mitigations per abbassare l'ARC, considerando però con estrema attenzione che la sovrapposizione tra diversi sistemi non provochi effetti negativi e problematicità impreviste.

6. TMPR e livelli di robustezza

I TMPR sono i Tactical Mitigation Performance Requirement, ovvero i requisiti necessari a livello di performance delle mitigazioni tattiche per ogni categoria di ARC, con i relativi livelli di robustezza da garantire. Sono direttamente collegati ai sistemi e alle procedure di detect and avoidance (DAA), ovvero di gestione del rischio delle collisioni aeree tramite meccanismi di identificazione di un velivolo ed eventuali manovre necessarie per evitare l'impatto.

Il fine è quello di ridurre il rischio residuo di collisioni in volo, intervenendo non a monte della missione ma direttamente nel corso dell'operazione, partendo da semplici e intuitive procedure see and avoid applicate in VLOS, per arrivare a complessi e dettagliati sistemi DAA e mitigazioni tattiche necessarie per classi di ARC superiori.

Per le operazioni BVLOS è dunque presente una tabella che correla l'ARC residuo, calcolato nei punti precedenti del processo SORA, con il livello dei TMPR necessari e la relativa robustezza assegnata:

Residual ARC	TMPRs	TMPR level of robustness
ARC-d	High	High
ARC-c	Medium	Medium
ARC-b	Low	Low
ARC-a	No requirement	No requirement

Figura 54 - SORA: legame ARC, TMPR e robustezza

Più è alto il livello di rischio, più aumenta il livello di TMPR e robustezza necessaria, il tutto valutato in relazione allo spazio aereo di interesse operativo per la missione e alle possibili evoluzioni del traffico aereo che si possono avere localmente nello sviluppo dell'operazione.

Nel dettaglio, ogni TMPR ha delle caratteristiche specifiche:

- **Alto TMPR:** la categoria ARC-d riguarda lo spazio aereo in cui il tasso di incontro di aerei con equipaggio è maggiore e/o le mitigazioni strategiche disponibili sono basse. Per questo motivo il rischio di collisione residuo risultante è alto, e di conseguenza anche il TMPR è elevato.

Lo spazio aereo dovrà quindi disporre di servizi integrati per limitare il rischio di collisioni, con regole stringenti e procedure dettagliate, nonché utilizzando tecnologie innovative in costante aggiornamento e sviluppo.

I livelli di prestazione di tali mitigazioni tattiche sono generalmente superiori a quelli degli altri ARC, per permettere ai droni di inserirsi in un contesto di spazio aereo condiviso senza limitare nessuna operazione, pur mantenendo il massimo grado possibile di sicurezza.

- **Medio TMPR:** è richiesto per le operazioni in uno spazio aereo in cui la probabilità di incontrare aeromobili con equipaggio non è eccessiva e/o le mitigazioni strategiche disponibili sono medie. Le operazioni con un TMPR medio, in uno spazio aereo categorizzato ARC-c, è previsto siano supportate da sistemi attualmente già utilizzati e ampiamente collaudati nell'aviazione generale, per aiutare il pilota remoto nel rilevamento di altri velivoli con equipaggio. Le manovre per evitare il traffico potrebbero essere più avanzate rispetto a un TMPR basso.
- **Basso TMPR:** è richiesto per le operazioni nello spazio aereo con classificazione ARC-b, in cui la probabilità di incontrare un altro aeromobile con equipaggio è bassa, ma non trascurabile, e/o dove le mitigazioni strategiche coprono la maggior parte del rischio, lasciando un rischio di collisione residuo ragionevolmente basso. Le operazioni con un TMPR basso sono supportate da una tecnologia di livello non elevato, con sistemi tradizionali e ampiamente collaudati, progettati per aiutare il pilota remoto a rilevare altri aeromobili, e presentano semplici strategie per evitare le collisioni. Ad esempio, per le operazioni al di sotto dei 120 m, le manovre per evitare il traffico si basano principalmente su una rapida discesa ad un'altitudine in cui si prevede che gli aerei con equipaggio non operino mai.

Nessun requisito di prestazione è necessario per la categoria ARC-a, propria di uno spazio aereo in cui si prevede che il tasso di incontro di aeromobili con equipaggio sia estremamente basso, con conseguente mancanza della necessità di TMPR. È generalmente definito come uno spazio aereo in cui il rischio di una collisione tra un UAS e un aereo con equipaggio è accettabile senza l'aggiunta di alcuna mitigazione tattica.

I dettagli dei diversi TMPR, del loro rapporto con la robustezza e le varie categorie ARC sono esplorati negli annex del regolamento, in particolare nell'Annex D, con riferimenti stretti all'Annex C e ai punti precedenti del processo di analisi SORA.

Nell'Annex D viene illustrato nel dettaglio come ad ogni livello ARC sia correlato un livello di performance richiesto dai TMPR, e un conseguente obiettivo di system risk ratio da raggiungere, più stringente al crescere della classe ARC e quindi del rischio connesso.

Air-Risk Class	TMPR	TMPR system risk ratio objectives
ARC-d	high performance	system risk ratio ≤ 0.1
ARC-c	medium performance	system risk ratio ≤ 0.33
ARC-b	low performance	system risk ratio ≤ 0.66
ARC-a	No performance requirement	No system risk ratio guidance; although the UAS operator/applicant may still need to show some form of mitigation as deemed necessary by the competent authority

Figura 55 - SORA: legame ARC, TMPR e system risk ratio

Le valutazioni sui TMPR, e i relativi livelli di performance in generale, sono più qualitative che quantitative, e si traducono in means of compliance per aiutare l'operatore UAS a passare dal system risk ratio al procedimento per arrivarci, lavorando sui functional requirements.

Nell'Annex D sono riportati inoltre criteri qualitativi per le diverse funzioni e livelli dei TMPR, suddivisi in cinque sottofunzioni di DAA, illustrate attraverso esaustive e dettagliate tabelle, che forniscono anche la differenziazione per i vari livelli di ARC, i quali permettono di valutare le mitigazioni tattiche del rischio applicabili in corso d'opera alla missione.

Le sottofunzioni di scopo sono:

- Detect
- Decide
- Command
- Execute
- Feedback loop

Senza entrare troppo nel dettaglio, le tabelle contengono requisiti sistemici e operativi per le diverse classi di rischio e di scopo, con un approccio che unisce valutazioni qualitative e parametri tecnici, schemi procedurali da seguire in casi di emergenza, valutazioni sul rapporto uomo-macchina con considerazioni sui possibili ritardi delle trasmissioni e delle reazioni, indicazioni sulle manovre da eseguire per evitare collisioni, e numerose ulteriori considerazioni.

Nell'annex sono inoltre riportati i parametri per calcolare il livello di integrity e assurance di tali mitigazioni, il primo quantitativo e valutato in perdite della mitigazione su flight hours, il secondo che segue lo schema classico di autodichiarazione, verifica con test e simulazioni, verifica di terze parti.

		TMPR: N/A (ARC-a)	TMPR: Low (ARC-b)	TMPR: Medium (ARC-c)	TMPR: High (ARC-d)
Level of integrity	Criteria	Allowable loss of function and performance of the Tactical Mitigation System: < 1 per 100 Flight Hours (1E-2 Loss/FH)	Allowable loss of function and performance of the Tactical Mitigation System: < 1 per 100 Flight Hours (1E-2 Loss/FH)	Allowable loss of function and performance of the Tactical Mitigation System: < 1 per 1 000 Flight Hours (1E-3 Loss/FH)	Allowable loss of function and performance of the Tactical Mitigation System: < 1 per 100 000 Flight Hours (1E-5 Loss/FH)
	Comments / Notes	<i>The requirement is considered to be met by commercially available products. No quantitative analysis is required.</i>	<i>The requirement is considered to be met by commercially available products. No quantitative analysis is required.</i>	<i>This rate is commensurate with a probable failure condition. These failure conditions are anticipated to occur one or more times during the entire operational life of each aircraft.</i>	<i>A quantitative analysis is required.</i>
		TMPR: N/A (ARC-a)	TMPR: Low (ARC-b)	TMPR: Medium (ARC-c)	TMPR: High (ARC-d)
Level of assurance	Criteria	N/A	The operator declares that the tactical mitigation system and procedures will mitigate the risk of collisions with manned aircraft to an acceptable level.	The operator provides evidence that the tactical mitigation system will mitigate the risk of collisions with manned aircraft to an acceptable level.	The evidence that the tactical mitigation system will mitigate the risk of collisions with manned aircraft to an acceptable level is verified by a competent third party.
	Comments / Notes	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 56 - SORA: legame TMPR, integrity e assurance

7. Determinazione SAIL

È la determinazione del livello complessivo finale di rischio dell'operazione, incrociando i dati relativi a GRC e ARC calcolati in precedenza, entrambi considerati post mitigazione.

Il SAIL rappresenta il livello di confidence che l'operazione UAS si svolga con un livello di pericolosità contenuto, rimanendo coerente con quanto descritto nei ConOps e determinato nei punti precedenti dell'analisi SORA.

Dal livello SAIL raggiunto dipenderà il punto successivo dell'analisi SORA, riferito ai requisiti di sicurezza che si devono garantire in base al rischio complessivo della missione.

Se il livello di GRC risulta maggiore di 7 non è possibile valutare il SAIL: l'operazione non può essere eseguita in categoria Specific, e bisogna iterare il processo SORA con parametri differenti, oppure passare a una missione in Certified.

La tabella per la determinazione del valore del SAIL a partire da GRC e ARC è la seguente:

SAIL determination				
	Residual ARC			
Final GRC	a	b	c	d
≤2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
>7	Category C operation			

Figura 57 - SORA: determinazione SAIL

Come si può notare, tendenzialmente al crescere del parametro GRC, il suo peso diventa prevalente rispetto a quello dell'ARC nella determinazione e differenziazione dei diversi livelli SAIL.

8. Determinazione OSO

Gli OSO sono gli operational safety objectives, ovvero dei requisiti di sicurezza, legati alle operazioni, da raggiungere e verificare, con un certo grado di robustezza, in correlazione con il grado di rischio complessivo della missione, espresso dal valore di SAIL.

È importante sottolineare come nel processo SORA sia espressa una categorizzazione degli OSO e una loro assegnazione in base al livello di rischio desunto da dati storici.

La metodologia qualitativa per effettuare la determinazione degli OSO propone ventiquattro categorizzazioni, suddivise in diverse macrocategorie, con un livello di robustezza specifico da garantire in base al SAIL:

- O è opzionale
- L è consigliato con bassa robustezza
- M è consigliato con media robustezza
- H è consigliato con elevata robustezza

I vari OSO sono raggruppati in base al rischio che contribuiscono a mitigare, quindi alcuni OSO possono essere ripetuti nella tabella.

Le macrocategorie sono:

- Problemi tecnici del drone
- Deterioramento di sistemi esterni di supporto all'operazione
- Errore umano
- Condizioni operative avverse

La tabella seguente è un elenco consolidato degli OSO comuni che storicamente sono stati utilizzati per garantire operazioni UAS sicure: frutto dell'esperienza accumulata, è un solido punto di partenza per determinare gli obiettivi di sicurezza richiesti per una specifica operazione.

OSO number (in line with Annex E)		SAIL					
		I	II	III	IV	V	VI
	Technical issue with the UAS						
OSO#01	Ensure the UAS operator is competent and/or proven	O	L	M	H	H	H
OSO#02	UAS manufactured by competent and/or proven entity	O	O	L	M	H	H
OSO#03	UAS maintained by competent and/or proven entity	L	L	M	M	H	H
OSO#04	UAS developed to authority recognised design standards ⁴	O	O	L	L	M	H
OSO#05	UAS is designed considering system safety and reliability	O	O	L	M	H	H
OSO#06	C3 link performance is appropriate for the operation	O	L	L	M	H	H
OSO#07	Inspection of the UAS (product inspection) to ensure consistency with the ConOps	L	L	M	M	H	H
OSO#08	Operational procedures are defined, validated and adhered to	L	M	H	H	H	H
OSO#09	Remote crew trained and current and able to control the abnormal situation	L	L	M	M	H	H
OSO#10	Safe recovery from a technical issue	L	L	M	M	H	H
	Deterioration of external systems supporting UAS operations						
OSO#11	Procedures are in-place to handle the deterioration of external systems supporting UAS operations	L	M	H	H	H	H
OSO#12	The UAS is designed to manage the deterioration of external systems supporting UAS operations	L	L	M	M	H	H
OSO#13	External services supporting UAS operations are adequate for the operation	L	L	M	H	H	H
	Human error						
OSO#14	Operational procedures are defined, validated and adhered to	L	M	H	H	H	H
OSO#15	Remote crew trained and current and able to control the abnormal situation	L	L	M	M	H	H
OSO#16	Multi-crew coordination	L	L	M	M	H	H
OSO#17	Remote crew is fit to operate	L	L	M	M	H	H
OSO#18	Automatic protection of the flight envelope from human error	O	O	L	M	H	H
OSO#19	Safe recovery from human error	O	O	L	M	M	H
OSO#20	A human factors evaluation has been performed and the human machine interface (HMI) found appropriate for the mission	O	L	L	M	M	H
	Adverse operating conditions						
OSO#21	Operational procedures are defined, validated and adhered to	L	M	H	H	H	H
OSO#22	The remote crew is trained to identify critical environmental conditions and to avoid them	L	L	M	M	M	H
OSO#23	Environmental conditions for safe operations are defined, measurable and adhered to	L	L	M	M	H	H
OSO#24	UAS is designed and qualified for adverse environmental conditions	O	O	M	H	H	H

Figura 58 - SORA: elenco OSO e relazione con SAIL

Come si può notare, quelli relativi al drone si riferiscono principalmente alla produzione e manutenzione del mezzo, al suo sviluppo e alle caratteristiche tecniche e di sicurezza, oltre che alle competenze dell'operatore e del suo team.

Quelli relativi ai sistemi esterni riguardano principalmente la valutazione della loro efficienza e dell'eventuale deterioramento, con riferimento anche alle procedure sviluppate per compensare tale fenomeno e mantenere un adeguato livello di sicurezza.

Gli OSO correlati alla mitigazione del possibile errore umano riguardano principalmente due aspetti: preparare il personale e verificare che sia all'altezza, addestrato e pronto a ogni evenienza, con procedure ben definite e validate, e assicurarsi che i sistemi automatici, e la loro interfaccia, siano il più possibile a prova di errore umano.

In riferimento alle condizioni ambientali avverse, gli OSO sono calibrati per assicurarsi che tanto il team quanto le procedure e il drone stesso siano pronti ad affrontare un ambiente mutevole e diverso da quanto preventivato, a rispondere ai cambiamenti e ad adattarsi mantenendo sempre la sicurezza dell'operazione.

I dettagli dei vari OSO sono descritti e analizzati nell'Annex E, in cui non solo è presente una spiegazione qualitativa ma comunque più approfondita di ogni OSO, ma per ognuno di essi è presente la classificazione e la diversificazione tra i tre casi di integrity e assurance disponibili, in modo che il richiedente possa ottenere il livello di robustezza necessario per ogni singolo caso in base al SAIL dell'operazione. Ovviamente, a SAIL maggiore corrisponde una robustezza necessaria maggiore, che implica processi e verifiche più stringenti sia in ambito di integrity, quindi di caratteristiche tecniche e operative, sia di assurance, ovvero di verifica delle performance.

Ulteriori dettagli e le tabelle appena descritte possono essere reperite nell'Annex E, AMC 1, Article 11 della Regulation 947/2019.

9. Considerazioni sullo spazio aereo e sulle aree terrestri adiacenti a quelle operative

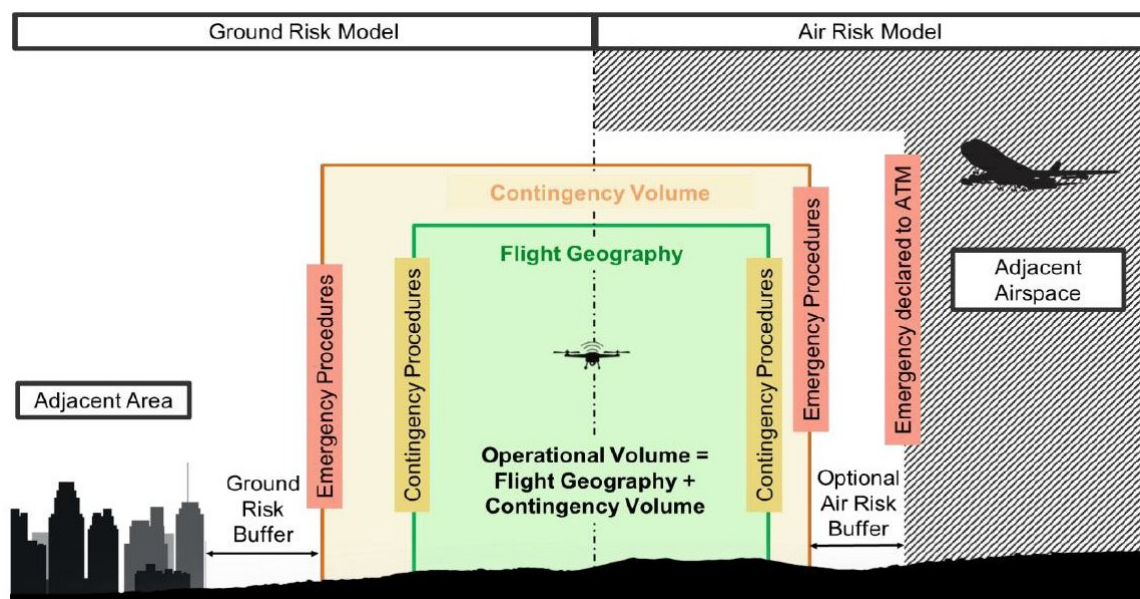


Figura 59 - SORA: aree adiacenti

Come evidenziato dal grafico, nel complesso delle considerazioni operative relative alla missione in analisi ha importanza anche valutare le aree adiacenti a quelle direttamente interessate, sia da un punto di vista del suolo che dello spazio aereo.

Le aree di interesse possono variare in base alle diverse fasi del volo, nonché in risposta a variazioni della missione rispetto a quanto pianificato, e ovviamente a causa di eventuali imprevisti e perdite di controllo del drone durante le operazioni.

I requisiti di sicurezza dipendono da valutazioni sia sulle caratteristiche del drone che su quelle delle aree interessate, e in casi di particolare pericolosità sono previste limitazioni e performance tecniche da rispettare per garantire un contenimento superiore in caso di emergenza. Tali precauzioni sono di maggiore importanza nel caso in cui le aree adiacenti a quelle dell'operazione coinvolgano ambienti ad alta densità abitativa e/o zone di spazio aereo con alto rischio di incontro di velivoli con equipaggio.

Poiché non è possibile prevedere tutte le situazioni locali, è importante sottolineare che l'operatore UAS, coordinandosi con l'autorità competente, dovrebbe valutare caso per caso la definizione delle aree adiacenti, sia aeree che terrestri, da considerare nelle analisi.

10. Portfolio completo sulla sicurezza

È l'ultima tappa del processo SORA, un sommario dei differenti aspetti della sicurezza valutati per la missione, con le mitigazioni e le contromisure da adottare per contenere il rischio, e garantire quindi un adeguato livello di fiducia che l'operazione possa essere condotta in sicurezza.

Sono da considerare i diversi aspetti del rapporto tra richiedente, Autorità, service provider e in generale l'ambiente operativo, nonché condensare in un unico esposto:

- le mitigazioni utilizzate per modificare il GRC intrinseco;
- le mitigazioni strategiche per l'ARC iniziale;
- le mitigazioni tattiche per l'ARC residuo;
- le considerazioni sull'area/spazio aereo adiacente
- gli OSO

L'operatore UAS deve accertarsi di soddisfare eventuali requisiti aggiuntivi che non sono stati identificati esplicitamente dal processo SORA (ad esempio la protezione ambientale); inoltre deve garantire la coerenza tra il caso studiato nel processo SORA e le condizioni operative effettive, ovvero al momento del volo.

Simulazioni analisi SORA

Dopo aver analizzato nel dettaglio il processo SORA, verranno riportati alcune simulazioni di interesse pratico di analisi svolte con tale metodo, avendo modo di poter osservare operativamente le implicazioni che le variazioni di alcuni parametri hanno sul rischio complessivo della missione. È importante ricordare ancora una volta che si stanno analizzando missioni comprese nella categoria Specific e non rientranti nei casi standard proposti da EASA come agevolazione dell'iter autorizzativo.

In particolare, i casi analizzati sono sei, incrociando tre caratteristiche ambientali in chiave di densità abitativa dell'area terrestre interessata, e due tecniche del drone, con variazioni di massa e dimensione del velivolo.

	Area rurale	Area poco popolata	Area molto popolata
Massa < 25 kg	Caso A	Caso B	Caso C
Massa > 25 kg	Caso D	Caso E	Caso F

Tabella 3 - Simulazioni analisi SORA: casi analizzati

Per tutti i casi, le missioni ipotizzate sono di delivery in BVLOS tra due punti, con droni di massa inferiore o superiore a 25 kg: tale parametro è quello scelto come differenziatore sulle caratteristiche del drone, e la dimensione viene dedotta di conseguenza. Il limite dei 25 kg non è casuale, ma è legato alle caratteristiche delle STS e PDRA, che pongono tale valore come soglia per i casi standardizzati possibili; in questa trattazione si è quindi scelto di avere tre casi che ricadessero nella limitazione e tre superiori ad essa. Inoltre, per avere dei dati con un fondamento reale, si è scelto di ricondursi a due droni esistenti sul mercato e trattati nella prima sezione della tesi: il Matternet M2 per la categoria più leggera e il Volocopter Volodrone per l'altra. È importante specificare come ci si sia ispirati ad essi per i dati di massima, senza nessuna presunzione di utilizzarli come testbed e di analizzare nello specifico le loro potenzialità. Nella seguente tabella, combinando i dati dei droni e della quota operativa, e utilizzando il calcolatore NASA suggerito nel processo SORA, si riporta l'energia di impatto per i due velivoli.

	Drone leggero	Drone pesante	Unità di misura
MTOM	13.2	800	kg
Dimensioni	80 x 80 x 26	Diametro: 800, altezza: 230	cm
Quota operativa	120	120	m
Cd (consigliato NASA)	0.7	0.7	-
Velocità terminale	21.72	19.08	m/s
Energia cinetica	3114	145619	J

Tabella 4 - Simulazione analisi SORA: caratteristiche dei droni

Nota: il calcolatore NASA non permette di calcolare droni di dimensioni elevate, tuttavia, essendo le formule in chiaro, è possibile ricavare manualmente i valori ricercati.

1. ConOps	
A-B-C-D-E-F	Delivery BVLOS tra due punti noti

2. GRC iniziale			
	Energia e dimensione	Ambiente operativo	GRC iniziale
A	3114 J, circa 1 metro	BVLOS, area poco popolata	4
B	3114 J, circa 1 metro	BVLOS, area poco popolata	4
C	3114 J, circa 1 metro	BVLOS, area molto popolata	6
D	145619 J, 8 metri	BVLOS, area poco popolata	5
E	145619 J, 8 metri	BVLOS, area poco popolata	5
F	145619 J, 8 metri	BVLOS, area molto popolata	8

Nota: a livello di GRC, in SORA non si ha distinzione tra area rurale e poco popolata, unificate nella seconda

Intrinsic UAS ground risk class				
Max UAS characteristics dimension	1 m / approx. 3 ft	3 m / approx. 10 ft	8 m / approx. 25 ft	>8 m / approx. 25 ft
Typical kinetic energy expected	< 700 J (approx. 529 ft lb)	< 34 kJ (approx. 25 000 ft lb)	< 1 084 kJ (approx. 800 000 ft lb)	> 1 084 kJ (approx. 800 000 ft lb)
Operational scenarios				
VLOS/BVLOS over a controlled ground area ³	1	2	3	4
VLOS over a sparsely populated area	2	3	4	5
BVLOS over a sparsely populated area	3	A-B 4	D-E 5	6
VLOS over a populated area	4	5	6	8
BVLOS over a populated area	5	C 6	F 8	10
VLOS over an assembly of people	7			
BVLOS over an assembly of people	8			

3. GRC finale - mitigazioni						
Caso	Mitigazione	Criterio	Integrity	Assurance	Robustezza	Coeff.
A	M1	1	-	-	-	0
		2	Media/alta	Media	Media	
	M2	1	Alta	Media (conservativo)	Media	-1
		2	Conforme	Alta	Media	
		3	Conforme	Media	Media	
	M3	1	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	0
		2	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	
	Riduzione totale: 0-1+0 = -1, conseguentemente GRC finale: 4-1 = 3					
B	M1	1	-	-	-	0
		2	Media/alta	Media	Media	
	M2	1	Alta	Media (conservativo)	Media	-1
		2	Conforme	Alta	Media	
		3	Conforme	Media	Media	
	M3	1	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	0
		2	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	
	Riduzione totale: 0-1+0 = -1, conseguentemente GRC finale: 4-1 = 3					
C	M1	1	-	-	-	0
		2	- (conservativo)	-	-	
	M2	1	Alta	Media (conservativo)	Media	-1
		2	Conforme	Alta	Media	
		3	Conforme	Media	Media	
	M3	1	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	0
		2	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	
	Riduzione totale: 0-1+0 = -1, conseguentemente GRC finale: 6-1 = 5					

D	M1	1	-	-	-	0
		2	Media/alta	Media	Media	
	M2	1	Media	Media (conservativo)	Media	-1
		2	Conforme	Alta	Media	
		3	Conforme	Media	Media	
	M3	1	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	0
2		Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media		
Riduzione totale: 0-1+0 = -1, conseguentemente GRC finale: 5-1 = 4						
E	M1	1	-	-	-	0
		2	Bassa (conservativo)	Media	Bassa	
	M2	1	Media	Media (conservativo)	Media	-1
		2	Conforme	Alta	Media	
		3	Conforme	Media	Media	
	M3	1	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	0
2		Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media		
Riduzione totale: 0-1+0 = -1, conseguentemente GRC finale: 5-1 = 4						
F	M1	1	-	-	-	0
		2	- (conservativo)	-	-	
	M2	1	Media	Media (conservativo)	Media	-1
		2	Conforme	Alta	Media	
		3	Conforme	Media	Media	
	M3	1	Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media	0
2		Media (conservativo)	Media (conservativo)	Media		
Riduzione totale: 0-1+0 = -1, conseguentemente GRC finale: 8-1 = 7						

Si può notare come si abbiano numerose similitudini tra i diversi casi, evidenziati dalle associazioni cromatiche. In particolare, il primo criterio della mitigazione M1 viene sempre considerato non presente per essere conservativi (assenza di una buffer zone a terra) nella valutazione di scenari il più generali possibile; i criteri M2 e M3 invece riguardano procedure e training degli operatori: vengono valutate in maniera conservativa applicando solo una generale robustezza media ai diversi casi.

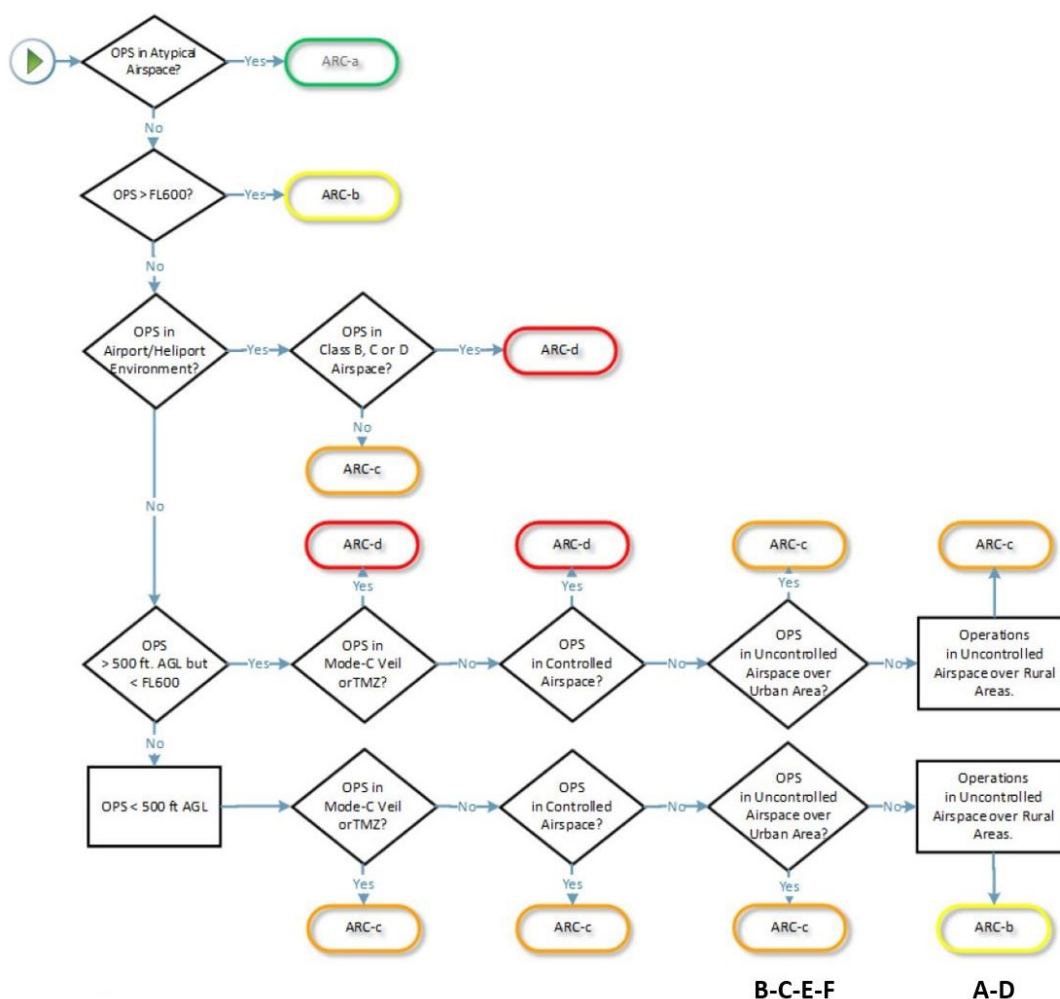
Le maggiori differenze si hanno per il secondo criterio della mitigazione M1 e per il primo della M2, che valutano rispettivamente le persone effettivamente a rischio nella missione e le feature del drone.

Nei vari criteri non sono riportati ulteriori i commenti e riferimenti all'annex che descrive tali mitigazioni. In generale, in caso di incertezza, si è fatta l'assunzione di adottare sempre la soluzione più conservativa; tale scelta è conseguenza della genericità di tali simulazioni di processi SORA, effettuate non avendo tutti i dati necessari né per il drone né per l'operatore.

4. ARC iniziale

Tutte le missioni sono supposte svolgersi in uno spazio aereo non atipico, ad una quota inferiore ai 500 feet e non in prossimità di un aeroporto. Le differenziazioni tra i diversi test riguardano solamente l'area terrestre interessata dalle operazioni nello spazio aereo soprastante.

A	B	C	D	E	F
ARC-b	ARC-c	ARC-c	ARC-b	ARC-c	ARC-c



Nota: nel processo SORA non si ha distinzione, a livello di valutazioni riguardanti lo spazio aereo, se l'area sottostante sia molto o poco popolata. Entrambe le densità abitative ricadono nella definizione di area urbana

5. ARC residuo - mitigazioni

Essendo opzionali, per mettersi nella condizione il più conservativa possibile, si ipotizza che non sia eseguita nessuna riduzione dell'ARC iniziale e non venga applicata nessuna mitigazione. Per tale motivo, per tutti i casi in esame, l'ARC residuo coincide con quello iniziale definito al punto precedente.

6. TMPR e robustezza			
Caso	ARC	TMPR	Robustezza
A	ARC-b	Basso	Bassa
B	ARC-c	Medio	Media
C	ARC-c	Medio	Media
D	ARC-b	Basso	Bassa
E	ARC-c	Medio	Media
F	ARC-c	Medio	Media

7. SAIL			
Caso	GRC	ARC	SAIL
A	3	ARC-b	II
B	3	ARC-c	IV
C	5	ARC-c	IV
D	4	ARC-b	III
E	4	ARC-c	IV
F	7	ARC-c	VI

SAIL determination				
Final GRC	Residual ARC			
	a	b	c	d
≤2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
>7	Category C operation			

8. OSO					
Caso	SAIL	Livello di robustezza necessaria per gli OSO			
		Alta	Media	Bassa	Opzionale
A	II	0/24	4/24	14/24	6/24
B	IV	7/24	16/24	1/24	0/24
C	IV	7/24	16/24	1/24	0/24
D	III	4/24	13/24	7/24	0/24
E	IV	7/24	16/24	1/24	0/24
F	VI	24/24	0/24	0/24	0/24

Si può notare come al crescere del SAIL cresce anche il numero di obiettivi di sicurezza che necessitano di una robustezza più alta. In particolare, per SAIL II si hanno ancora 6/24 di OSO opzionali, mentre per il caso SAIL VI la totalità degli OSO deve essere raggiunta con alta robustezza.

9. Considerazioni su aree e spazi aerei adiacenti	
<i>Nota: tale sezione presenta solo considerazioni generali. Essendo un SORA puramente ipotetico, non si hanno informazioni sulle zone adiacenti ai volumi operativi.</i>	
A-D	Su zone rurali normalmente non si hanno problemi con aree adiacenti, a meno di vicinanza con aeroporti o particolari installazioni.
B-C-E-F	Su zone urbane, che siano poco o molto densamente popolate, il rischio di avere aree adiacenti con un elevato numero di persone potenzialmente a rischio è da tenere in considerazione. Si possono avere anche potenziali possibili assembramenti di persone. Inoltre, si possono avere spazi aerei più critici, nonché potenzialmente prossimità con aeroporti o particolari installazioni di elevato interesse.

10. Portfolio completo sulla sicurezza
Per le finalità di questi test e la loro generalità, non è possibile e/o di particolare interesse eseguire un portfolio finale sulle caratteristiche di sicurezza della missione nel suo complesso.

Come si può notare dai test eseguiti, il processo SORA è molto flessibile e adattabile a diversi velivoli e scenari, e permette di eseguire analisi complete sui diversi ambiti della missione. Le prove effettuate hanno evidenziato una varietà di casistiche diverse, con il rischio complessivo espresso dal SAIL variabile tra 2 e 6, quindi quasi sull'intera scala disponibile. La mancanza di informazioni dettagliate sui droni, sullo scenario operativo, sull'operatore e il suo team purtroppo hanno limitato l'efficacia dei test per quanto riguarda le simulazioni delle mitigazioni GRC: i pochi dati hanno costretto ad effettuare assunzioni generali e a privilegiare sempre l'aspetto della sicurezza, con scelte conservative e quindi con una mitigazione complessiva probabilmente inferiore a quanto avverrebbe in caso di missioni reali. Di contro, il fatto che potenzialmente le operazioni potessero comunque essere autorizzate giustifica la conclusione che, per un processo SORA con dati reali, siano possibili ampi margini di abbassamento GRC e del rischio in generale.

Per completezza di analisi e curiosità intellettuale, si è provato ad applicare la metodologia SORA anche ad un aerotaxi nei tre diversi ambienti operativi. Essendo il trasporto umano riservato alla categoria Certified, e il processo SORA proprio della Specific, è stata una consapevole forzatura della procedura eseguita anche per testarne i limiti. Le simulazioni hanno confermato che il metodo non permette di eseguire analisi per aerotaxi, in quanto non è presente alcuna considerazione sulle persone a bordo e sul rischio a loro correlato. I risultati mostrano di essere dipendenti solo dal peso e dalle dimensioni del drone e sovrapponibili a quelli ottenuti per il drone pesante. Per tale ragione, e per il fatto che non sono simulazioni proprie del metodo, non vengono riportate.

Analisi del rischio a terra

Già introdotta per la mitigazione M1 del GRC durante il processo SORA, la valutazione accurata del numero di persone coinvolte è un punto chiave per effettuare analisi di rischio specifiche per ogni tipo di operazione, ambiente, orario, drone, in maniera puntuale e dettagliata, permettendo quindi di ridurre l'incertezza dovuta a valutazioni di carattere troppo generale.

I metodi proposti per valutare l'esposizione della popolazione ad una eventuale caduta di un drone sono numerosi e fortemente influenzati sia dal livello di precisione ottenibile che dall'insieme di dati utilizzati per lo sviluppo del procedimento, che può essere più o meno ottimizzato per differenti categorie di droni.

I parametri basilari su cui si articolano le analisi di rischio a terra, a prescindere da quale si consideri, sono la densità di popolazione propria dell'area interessata dalle operazioni, le peculiarità dell'ambiente locale in termini di presenza di edifici ed alberi, nonché ovviamente il drone in analisi e le sue caratteristiche di sicurezza a livello progettuale e di risposta alle emergenze.

La tipologia del drone influisce anche sul tipo di impatto ipotizzato, che varia da quello balistico in caso di droni multicotteri a una planata incontrollata più o meno ripida in caso di ala fissa. Nel prosieguo di tale trattazione si valuterà sempre una traiettoria di tipo balistico.

La conformazione dello scenario terrestre su cui si svolge l'operazione ha invece elevata importanza nella valutazione della protezione delle persone definita dallo sheltering factor, ovvero di quale sia la probabilità che il drone in caduta non impatti direttamente con la popolazione, ma che subisca dei rallentamenti o addirittura un arresto dovuto a collisione con strutture o piante. È importante anche considerare come la presenza di edifici faccia sì che una buona percentuale della popolazione possa non essere esposta a pericoli eccessivi, in quanto difficilmente raggiungibile dal mezzo in avaria o da suoi frammenti.

In alcuni metodi sarà inoltre valutata la fatalità del drone, ovvero la probabilità che un impatto tra il mezzo e una persona porti a ferite gravi o alla morte: la possibilità che avvenga dipende dalla probabilità che il drone fisicamente colpisca la persona, ovvero che vi sia una interferenza tra il volume occupato dal drone lungo la sua traiettoria e quello del corpo umano.

Metodologia suggerita da ENAC

La metodologia sviluppata da ENAC serve a fornire un metodo di calcolo del rischio per le terze parti a terra, e si applica a scenari operativi generali, non necessariamente legati ad uno specifico velivolo o ambiente operativo. Questa metodologia può essere utilizzata come una strategia accettabile di mitigazione del rischio a terra (M1) per determinare la classe GRC finale nell'ambito dell'analisi SORA.

Il riferimento per la trattazione è la guida applicativa alle linee guida (LG) ENAC numero 2017/001-NAV intitolata "Metodologia di valutazione del rischio in operazioni RPAS per autorizzazioni e permessi di volo non geografici – Ground risk analysis for RPAS operations", edizione del 9 gennaio 2020.

In queste linee guida il rischio a terra è espresso in termini di perdite medie attese per missione, da relazionare agli obiettivi di sicurezza stabiliti a livello di normativa. I principali parametri utilizzati per il calcolo del rischio al suolo sono la densità abitativa delle aree dell'operazione, la dimensione caratteristica del drone, il tempo di volo e la probabilità di un evento fuori controllo o di un'avaria che può portare ad una traiettoria incontrollata dell'UA (o di sue parti) verso il terreno.

L'obiettivo di safety da raggiungere e verificare con il processo descritto è espresso dal parametro E_c , che rappresenta il numero medio di casualties per missione accettabili, o, espresso in altri termini, il massimo rischio tollerabile per la missione. In questa trattazione, per casualties si intendono sia morti che feriti gravi.

Il rischio della missione viene rappresentato dal termine R_c , e dipende da numerosi parametri operativi legati sia all'ambiente che al drone; relativamente al velivolo, il più importante risulta essere la probabilità di caduta P_c , compresa tra 0 (nessun incidente possibile) e 1 (in ogni missione si ha una failure). Per assicurare che la missione sia eseguibile deve essere verificata la disuguaglianza $R_c \leq E_c$, ovvero si deve sempre accertare che il rischio complessivo dell'operazione sia al di sotto o pari al limite massimo previsto da normativa.

Nel procedimento suggerito da ENAC si calcola quindi il rischio, si impone la disuguaglianza, e si ricavano le condizioni e i livelli di protezione necessari per le terze parti a rischio. In particolare, esistono due tipologie di protezioni, derivanti dai due possibili limiti di rischio imponibili: E_{c1} e E_{c2} .

- $E_{c1} = 3 \cdot 10^{-5}$ casualties/mission: rappresenta il valore per minimizzare il rischio per le terze parti a terra; è la condizione maggiormente cautelativa, e viene utilizzata nelle analisi di rischio insieme ad un set di mitigazioni standard.
- $E_{c2} = 2 \cdot 10^{-4}$ casualties/mission: rappresenta un limite massimo di rischio al di sopra del quale non si dovrebbe arrivare in alcun caso, e viene utilizzato insieme a un set di mitigazioni specifiche, addizionali a quelle standard, per compensare il fatto che è un limite meno conservativo.

I valori numerici dei due limiti possono subire variazioni, in base a considerazioni locali o specifiche per l'operazione, da parte dell'Autorità competente. L'operatore, insieme all'Autorità, deve concordare i set di mitigazioni, standard e specifiche, da applicare nel caso in cui la missione sia autorizzata. Tali mitigazioni interessano la progettazione, la costruzione, la manutenzione del velivolo e le organizzazioni che se ne occupano, oltre che ovviamente la fase operativa vera e propria della missione.

Il livello risultante di protezione a terra delle terze parti può quindi conseguentemente essere:

- Buono: $R_c \leq E_{c1}$, set di mitigazioni standard, missione autorizzabile
- Adeguato: $E_{c1} < R_c \leq E_{c2}$, set di mitigazioni standard e specifiche, missione autorizzabile
- Inadeguato: $R_c > E_{c2} > E_{c1}$, missione non autorizzabile; è necessario abbassare R_c

A livello schematico i passaggi appena descritti possono essere riassunti col seguente schema fornito da ENAC:

Step 1	Definisci le mitigazioni standard a livello di progettazione, produzione, operazioni, piloti, e organizzazioni (ad es. di progettazione, di produzione, di manutenzione, di addestramento)
Step 2	Assumi un obiettivo di sicurezza $E_c = E_{c1}$
Step 3	Applica la Metodologia (con $P_c = 1$ oppure con $P_c < 1$) per calcolare il rischio R_c
Step 4	Confronta in rischio calcolato con l'obiettivo selezionato: $R_c \leq E_c$?
Step 5	Valuta: se $R_c \leq E_c$ allora OK FINE, altrimenti
Step 6	Valuta: se $E_{c2} > R_c > E_c$ allora:
Step 6.1	Modifica il progetto, le operazioni e le mitigazioni standard (ad esempio in maniera tale da ottenere una probabilità di caduta $P_c < 1$ più piccola della precedente), oppure in alternativa
Step 6.2	Prevedi ulteriori misure di mitigazione specifiche applicabili all'area delle operazioni e scegli un obiettivo E_c tale che: $E_{c1} < E_c \leq E_{c2}$
Step 6.3	Torna allo Step 3
Step 7	Valuta: se $R_c > E_{c2}$ allora non è raccomandata l'emissione di una autorizzazioni o PTF non geografici.

Figura 60 - Passaggi analisi rischio consigliata da ENAC

Si passa ora a definire in modo più approfondito il modello di rischio per calcolare R_c , i parametri che lo determinano, e le assunzioni presenti nella metodologia proposta.

Si definiscono i seguenti parametri:

- A : area sorvolata durante la missione, considerata avente densità abitativa uniforme. Si suppone inoltre che l'area di buffer abbia la stessa densità della relativa area operativa. Per una missione si possono considerare diverse aree successive di sorvolo, ognuna avente una propria densità uniforme e definita in accordo con l'Autorità competente.
Per considerare la densità come uniforme, si consiglia uno scarto quadratico medio inferiore a 1 *abitante/Km²*.
- D : densità abitativa, espressa in *abitanti/Km²*.
- N : numero di fasi in cui è suddivisa la missione.

- A_c : area letale, all'interno della quale ogni persona perisce oppure subisce un danno grave a causa dell'impatto diretto con il drone o con detriti.
È considerabile come l'area efficace a terra del drone in caso di crash.

La successiva formula è ottenuta ipotizzando una traiettoria di impatto inclinata di 45° e definendo:

- L : dimensione massima del drone (in ft)
 - V : volume del serbatoio di carburante (in l)
 - f : probabilità stimata che si abbia esplosione del serbatoio all'impatto
- $$A_c = 84 \cdot (1 + 0,5 \cdot L) + 22 \cdot (1 + 0,5 \cdot L)^2 + 5,12 \cdot f \cdot V^{3/2} \quad (ft^2)$$

Nei casi di seguito considerati, essendo relativi a droni elettrici, l'ultimo termine sarà sempre nullo.

- N_c : numero medio di persone all'interno dell'area letale del drone; $N_c = A_c \cdot D$
- P_c : come già accennato, è la probabilità di caduta, ovvero che si verifichi un evento che porti ad una caduta incontrollata del drone.

Esistono tre metodologie per la scelta di tale probabilità:

1. Stima basata sull'affidabilità di progetto, a cui si aggiungono considerazioni di tipo operativo, produttivo e manutentivo.

Definendo:

- N_{ops} : numero di occorrenze registrate di perdita di controllo dovute a cause operative
- $N_{failure}$: numero di occorrenze registrate di perdita di controllo dovute a cause tecniche
- $N_{tot} = N_{ops} + N_{failure}$: numero totale di occorrenze registrate di perdita di controllo
- $k = N_{failure} / N_{tot}$
- $P_{failure}$: probabilità di failure del sistema; è il parametro critico di tale metodologia; quindi, i dati utilizzati devono essere affidabili e la stima eseguita correttamente

si può esprimere la probabilità come: $P_c = P_{failure} / k$

2. Stima basata su dati storici del drone in scenari operativi paragonabili a quelli della missione.

Definendo:

- n : numero di cadute incontrollate registrate
- N_{miss} : numero di missioni simili precedentemente effettuate

si può esprimere la probabilità come: $P_c = (n + 1) / (N_{miss} + 2)$

3. In mancanza di informazioni si utilizza un dato conservativo: $P_c = 1$

Vista l'impostazione del modello e relative assunzioni, si può dunque passare ad una fase maggiormente operativa e di calcolo, per concludere con una serie di simulazioni su ipotetiche missioni in differenti ambienti.

Il primo step prevede il calcolo del rischio e il suo confronto con il limite normativo:

$$R_c = P_c \cdot N_c = P_c \cdot A_c \cdot D \leq E_c \quad (\text{si eseguono i calcoli sia con } E_{c1} \text{ che con } E_{c2})$$

Nel caso in cui la missione sorvoli più aree, ognuna con una propria densità costante ed una propria probabilità di caduta, il rischio totale è la somma dei rischi relativi:

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} + \dots + R_{cm} = P_{c1} \cdot A_{c1} \cdot D_1 + P_{c2} \cdot A_{c2} \cdot D_2 + \dots + P_{cm} \cdot A_{cm} \cdot D_m \leq E_c$$

In tal caso, se non fosse possibile reperire dati affidabili della probabilità di caduta, si può procedere assumendo una divisione della probabilità proporzionale ai tempi di sorvolo di ciascuna area.

Definendo:

- T_i : tempo di sorvolo dell'area i-esima ($T_i \geq 0$)
- T : tempo totale missione ($\sum T_i = T$)

si ottiene:

$$P_c = P_c \cdot \frac{T_i}{T}$$

$$D_1 \cdot T_1 + D_2 \cdot T_2 + \dots + D_m \cdot T_m \leq \frac{E_c \cdot T}{P_c \cdot A_c}$$

che può essere riscritta mettendo in evidenza le frazioni temporali:

$$D_1 \cdot \frac{T_1}{T} + D_2 \cdot \frac{T_2}{T} + \dots + D_m \cdot \frac{T_m}{T} \leq \frac{E_c}{P_c \cdot A_c}$$

Tale procedimento, tuttavia, porterebbe ad una sottostima della fase di atterraggio e decollo, caratterizzate da una maggiore probabilità di caduta ma da tempi ridotti; per poter proseguire con tale metodo è necessario supporre che atterraggio e decollo avvengano in aree segregate, e quindi con rischio nullo per terze parti a terra. È possibile, inoltre, osservare come le assunzioni del modello presentino alcune caratteristiche di imprecisione o impossibilità di eseguire calcoli dettagliati, cosa che compromette l'effettiva fruibilità della metodologia:

- Data la difficoltà di reperire dati storici sufficienti, o sufficientemente accurati, sull'affidabilità, in diversi casi è necessario utilizzare la terza metodologia di calcolo della probabilità di caduta: $P_c = 1$. Pur in un contesto correttamente conservativo per l'incertezza, tale metodologia risulta poco realistica, in quanto normalmente non si effettuano missioni con certezza di perdita del drone. Conseguentemente, tale sovrastima porta a un'impossibilità di utilizzare l'intero modello di rischio in maniera pratica, in quanto talmente conservativo da non avere riscontri pratici.

- La stima dell'area letale del drone non è precisa, e in generale il calcolo della sua fatalità in caso di impatto con persone a terra non è sufficientemente accurato. L'area è stimata in maniera conservativa; inoltre, eccezion fatta per la pericolosità relativa all'esplosione del serbatoio, l'unico parametro del drone che viene considerato è la dimensione massima. Tale scelta non solo è conservativa rispetto a tale grandezza, definendo il parametro dimensionale nel modo più ampio possibile, ovvero scegliendo la caratteristica massima, ma esclude anche ogni eventuale valutazione su geometria, peso, quota operativa e design (esempio: protezione eliche). Ne consegue una stima della pericolosità che può non risultare sufficientemente accurata per molte applicazioni e che non valuta l'energia di impatto del drone.
- L'ipotesi che decollo e atterraggio avvengano sempre con assenza di persone nell'area è un'assunzione valida in molti casi, ma che può essere inapplicabile in ambienti a densità abitativa molto alta.
- L'ipotesi di poter scomporre l'area interessata dalle operazioni in sezioni a densità costante, nella realtà sovente conduce o a superare il limite di scarto quadratico medio suggerito, oppure ad avere aree di dimensioni eccessivamente ridotte. Inoltre, l'ipotetica necessità di avere dati su P_c in ogni area risulta complessa da valutare in modo preciso, sia che si cerchi di ottenere il valore direttamente da considerazioni ambientali e dati storici, sia che lo si relazioni al tempo di sorvolo, parametro comunque non sufficientemente accurato.

Simulazioni numeriche sulla metodologia ENAC

Per poter effettuare delle valutazioni numeriche sul metodo appena descritto, i seguenti calcoli verranno effettuati riferendosi al drone Matternet M2, ai suoi dati geometrici e al suo storico, almeno per quanto pubblicamente noto, di missioni e di failure nelle applicazioni ospedaliere in Svizzera. Come già avvenuto nel capitolo precedente, tali valutazioni non vogliono essere né un test per il drone in particolare né un'analisi dettagliata delle sue potenzialità, ma solo per avere un set di valori di riferimento reali.

Per il calcolo di R_c i parametri presenti nella formula dipendono dal drone (P_c, A_c), dalla missione (T_i, T), dallo scenario operativo (D_i) e dai limiti posti dall'Autorità (E_c).

- Parametri relativi al drone
La dimensione massima di riferimento, nel caso del drone in esame, è la diagonale della pianta quadrata di lato 80 cm.

$$L = 80 \cdot \sqrt{2} \text{ cm} \approx 113,14 \text{ cm} \approx 3,71 \text{ ft}$$

$$V = 0 \text{ l}$$

$$\Rightarrow A_c \approx 419,34 \text{ ft}^2 \approx 3,89 \cdot 10^{-5} \text{ Km}^2$$

Per il calcolo della probabilità di caduta nei diversi casi si sono utilizzati due metodi: quello conservativo da usare in assenza di dati ($P_c = 1$) e quello basato su dati storici. Nel secondo metodo si è fatto riferimento alle missioni del drone effettuate in Svizzera e si è ottenuto un valore esatto; tuttavia, ipotizzando che i dati reperibili online su tutte le problematiche avute in missione si riferiscano solo a casi gravi, si è applicato un fattore conservativo e si è introdotto anche un valore stimato pari al due volte il dato calcolato.

- Dati esatti
 $n = 2$; $N_{miss} = 3000$; $P_c = (n + 1)/(N_{miss} + 2) \approx 10^{-3} \text{ fail/miss}$
- Dati stimati
 $n = 2 + 3 = 5$; $N_{miss} = 3000$; $P_c = (n + 1)/(N_{miss} + 2) \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ fail/miss}$

Per completezza, si riportano anche i risultati espressi in failure per ora di volo; per effettuare tale calcolo si è stimata la durata totale della missione in 30 minuti (appropriato per le effettive missioni in Svizzera).

<i>failure/mission</i>	1	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$
<i>failure/FH</i>	2	$2 / 1500 = 1 / 750$	$5 / 1500 = 1 / 300$

Tabella 5 - Conversione unità di misura della probabilità di caduta

- Parametri relativi alla missione e allo scenario operativo
Saranno valutati e analizzati caso per caso; tuttavia, in generale:
 - I tempi saranno espressi come frazioni del tempo di missione totale, senza valutare numericamente il minutaggio effettivo della missione.
 - Nei casi in cui si considereranno due diverse aree di sorvolo (non sono trattati casi più complessi), verrà ipotizzato che l'area di decollo e atterraggio sia segregata e abbia densità abitativa nulla ($D_0 = 0$).
In missioni con aree multiple e rischio di caduta proporzionale al tempo si assume inoltre che anche una porzione del volo prossimo a tali fasi avverrà su aree con densità nulla.

In questi casi si rielabora la formula come segue:

$$D_0 \cdot \frac{T_0}{T} + D_1 \cdot \frac{T_1}{T} \leq \frac{E_c}{P_c \cdot A_c} \quad \Rightarrow \quad D_1 \cdot \frac{T_1}{T} \leq \frac{E_c}{P_c \cdot A_c}$$

- Nei casi in cui si vincolerà la densità abitativa, si cercherà di massimizzare il tempo di sorvolo; viceversa, quando sarà vincolato il tempo di sorvolo, si cercherà di ottenere il massimo valore possibile di densità. Se si vincolano entrambi i parametri, si ricerca il massimo P_c ammissibile. In tutti i casi, ricercando il valore limite, si sostituirà il segno di minore o uguale con un'uguaglianza.

$$\frac{T_{1max}}{T} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot D_1} \quad ; \quad D_{1max} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot \frac{T_1}{T}} \quad ; \quad P_{cmax} = \frac{E_c}{A_c \cdot D_1 \cdot \frac{T_1}{T}}$$

- Calcolo del termine E_c / A_c per i due valori di E_c standard

Valore di E_c	$E_{c1} = 3 \cdot 10^{-5}$	$E_{c2} = 2 \cdot 10^{-4}$
Valore del termine E_c / A_c	$E_{c1}/A_c = 0,77$	$E_{c2}/A_c = 5,13$

Tabella 6 - Calcolo parametri per la metodologia ENAC

Si procede ora a determinare T_{1max}/T , D_{1max} , oppure P_{cmax} , al variare degli altri parametri.

Casi analizzati:

1.

Parametri	Valore scelto	
P_c	1 <i>failure/miss</i>	
T_1/T	1 (100%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$D_{max} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot \frac{T_1}{T}}$	0,77 <i>ab/Km²</i>	5,13 <i>ab/Km²</i>

2.

Parametri	Valore scelto	
P_c	1 <i>failure/miss</i>	
T_1/T	0,1 (10%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$D_{1max} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot \frac{T_1}{T}}$	7,70 <i>ab/Km²</i>	51,34 <i>ab/Km²</i>

3.

Parametri	Valore scelto	
P_c	1 <i>failure/miss</i>	
D_1	5 <i>ab/Km²</i>	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$\frac{T_{1max}}{T} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot D_1}$	0,154 (15,4%)	1 (100%)

I primi tre casi hanno in comune l'assunzione conservativa $P_c = 1$, consigliata da ENAC nell'eventualità di dati insufficienti a valutare accuratamente tale parametro.

Nell'ipotesi di svolgere l'intera missione sull'area di interesse (caso 1), si può notare come ci si debba limitare a densità abitative minime; anche riducendo, in modo volutamente non realistico, il tempo al 10% della missione - e dunque il 90% su aree segregate - si ottengono comunque dati fortemente limitanti (caso 2).

Ipotizzando invece di vincolare la densità abitativa con un valore tipico di zone rurali o pressoché disabitate (caso 3), nel caso E_{c1} si ottiene un valore della frazione temporale spendibile sull'area molto limitante per la missione, mentre nel caso E_{c2} , quindi con un set aggiuntivo di misure di precauzione, si può raggiungere l'intera durata.

4.

Parametri	Valore scelto	
P_c	$2 \cdot 10^{-3} \text{ failure/miss}$	
T_1/T	1 (100%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$D_{max} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot \frac{T_1}{T}}$	385,03 ab/Km ²	2566,89 ab/Km ²

5.

Parametri	Valore scelto	
P_c	$2 \cdot 10^{-3} \text{ failure/miss}$	
D_1	5000 ab/Km ²	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$\frac{T_{1max}}{T} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot D_1}$	0,077 (7,7%)	0,513 (51,3%)

6.

Parametri	Valore scelto	
P_c	$10^{-3} \text{ failure/miss}$	
T_1/T	1 (100%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$D_{max} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot \frac{T_1}{T}}$	770,07 ab/Km ²	5133,79 ab/Km ²

7.

Parametri	Valore scelto	
P_c	$10^{-3} \text{ failure/miss}$	
D_1	5000 ab/Km ²	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$\frac{T_{1max}}{T} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot D_1}$	0,154 (15,4%)	1 (100%)

8.

Parametri	Valore scelto	
P_c	$10^{-3} \text{ failure/miss}$	
T_1/T	0,8 (80%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$D_{1max} = \frac{E_c}{P_c \cdot A_c \cdot \frac{T_1}{T}}$	962,58 ab/Km ²	6417,24 ab/Km ²

Nei casi da 4 a 8 si è abbandonata l'assunzione eccessivamente conservativa del rischio di caduta unitario consigliata da ENAC, andando prima ad utilizzare il P_c modificato (due volte quello esatto), e successivamente quello basato esattamente sui dati reali. Si può notare che i valori sono di ordini di grandezza superiori rispetto al caso con $P_c = 1$, eccessivamente conservativo, rendendo possibili applicazioni interesse pratico, per quanto ancora poco applicabili a scenari urbani, soprattutto con limite E_{c1} . I risultati migliori sono ovviamente legati ai test con P_c calcolato sui dati reali, essendo la probabilità di caduta il 50% inferiore.

Particolarmente interessante è il caso 8, applicabile ad uno scenario con densità abitativa di circa 6500 abitanti a chilometro quadrato, quindi paragonabile a Torino, per l'80% della missione, e il caso 7, che prende in considerazione la totalità di una missione su un ambiente con una densità abitativa già di elevato interesse pratico. È fondamentale notare tuttavia che questi commenti positivi sono entrambi in relazione al caso E_{c2} , che porta con sé limitazioni superiori al caso E_{c1} .

Dal confronto tra i diversi casi, appare evidente come il parametro P_c abbia un ruolo fondamentale nell'analisi del rischio, e di conseguenza vada valutato con molta precisione e attenzione; nel caso in cui sia impossibile calcolarlo ma lo si debba assumere unitario, la linea guida ENAC risulta talmente conservativa da rendere pressoché impossibile realizzare una missione di interesse pratico.

Come ultima serie di test, si è provato a ragionare in maniera opposta, dunque ricavando il P_c necessario a svolgere missioni in ambienti fissati e per periodi temporali noti:

1.

Parametri	Valore scelto	
D_1	5000 <i>ab/Km²</i>	
T_1/T	0,8 (80%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$P_{cmax} = \frac{E_c}{A_c \cdot D_1 \cdot \frac{T_1}{T}}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$ <i>failure/miss</i>	$1,28 \cdot 10^{-3}$ <i>failure/miss</i>

2.

Parametri	Valore scelto	
D_1	10000 <i>ab/Km²</i>	
T_1/T	0,8 (80%)	
	Calcolo con E_{c1}	Calcolo con E_{c2}
$P_{cmax} = \frac{E_c}{A_c \cdot D_1 \cdot \frac{T_1}{T}}$	$9,63 \cdot 10^{-5}$ <i>failure/miss</i>	$6,42 \cdot 10^{-4}$ <i>failure/miss</i>

Concludendo, le precedenti simulazioni che hanno prodotto risultati di possibile interesse pratico.

Nel caso E_{c1} , per avere porzioni di missione significative su aree con densità elevata, serve una probabilità di caduta estremamente ridotta. Per la densità di 5000 *ab/Km²*, tale probabilità risulta essere di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quanto valutato per reali scenari operativi, mentre per la seconda densità esaminata tale fattore è ulteriormente dimezzato.

Nel caso E_{c2} , per la prima densità abitativa simulata, il risultato numerico è perfettamente confrontabile con quanto ottenuto dall'analisi del drone reale usato come esempio, e anche nel secondo caso, di densità doppia, il valore è relativamente prossimo a quanto già ottenuto, benché rimanga più limitante. Bisogna tuttavia considerare che tali valori sono stati ottenuti in ambito E_{c2} , e quindi con mitigazioni superiori, e nell'ipotesi che il resto della missione si svolga su di un'area a densità abitativa nulla, assunzione molto forte quando interessa il 20% dello spazio temporale complessivo.

I test hanno evidenziato come la metodologia conduca a risultati di scarsa utilità pratica, in quanto affetti da valutazioni e assunzioni molto conservative, che ne limitano ampiamente sia gli scenari operativi che gli spazi temporali, a meno di non riuscire ad avere dati sulla sicurezza in volo di livello decisamente elevato, ad oggi non ancora disponibili.

Per poter valutare scenari con densità abitative superiori, tipiche delle metropoli, servono metodi di analisi più raffinati e meno conservativi, oltre che, ovviamente, droni con caratteristiche di sicurezza estremamente elevate.

Metodologia di Valavanis et al.

È una metodologia di analisi rischio di derivazione aeronautica convenzionale, adattata e modificata per le operazioni unmanned e per le caratteristiche tipiche di tali velivoli e tipologie di missioni.

È stato inoltre fondamentale intervenire sul concetto stesso di ambiente operativo che fa da cornice alle operazioni, tipicamente caratterizzato da densità abitative elevate per missioni in scenari urbani, le più interessanti per l'emergente mercato dei droni. Il rischio, in tale tipo di analisi, è inteso come pericolosità per la popolazione a terra, vista come una terza parte esposta ad impatti con UAV in caso di avarie ed emergenze.

La probabilità che una persona venga colpita dal velivolo in avaria è alla base di tale metodo, ed è fortemente dipendente dallo scenario operativo locale in analisi. Il procedimento, inoltre, valuta quale sia la probabilità che una persona colpita subisca ferite così severe da provocare un infortunio grave o il decesso; in tale contesto assume un'importanza fondamentale sia l'analisi delle caratteristiche di pericolosità del drone che quelle dell'ambiente: uno scenario denso di edifici e/o alberi infatti assicura una certa protezione da impatti diretti col drone, cosa che invece non avviene in uno spazio aperto.

Inizialmente, nella metodologia di Valavanis lo sheltering presenta una scala che va da 0 a infinito, con livello di protezione garantito crescente. In ogni caso, come puntualizzato da Guglieri et al., con droni leggeri e piccole dimensioni non ha senso valutare un valore di sheltering superiore a 10, dato che l'energia cinetica richiesta per fare una vittima risulterebbe impossibile da ottenere con questi velivoli. Di seguito, alcuni valori puntuali predefiniti:

- 0: no ostacoli
- 2.5: alberi sparsi
- 5: veicoli e edifici bassi
- 7.5: edifici alti
- 10: edifici industriali

L'effettivo valore di sheltering proprio di una specifica zona non è di facile determinazione, soprattutto a livello di dettaglio locale, ma sfruttando la scala proposta si può comunque efficacemente stimare.

Infine, la probabilità di avere incidenti che coinvolgano terze parti dipende indubbiamente dall'eventualità che si verifichi una situazione anomala o un'avaria che portino alla caduta del drone; tali circostanze vengono valutate in base alle caratteristiche del velivolo e, se possibile, si fa riferimento a dati storici e statistici di missioni precedenti.

Per questa trattazione si è assunto di semplificare la simulazione ipotizzando che sia la densità abitativa che lo sheltering siano costanti in qualunque area possa essere interessata dalle operazioni e da un eventuale impatto: tale ipotesi permette di isolare e meglio valutare il peso dei singoli parametri e la loro influenza sul rischio, senza dipendere da caratteristiche locali dell'ambiente, dal percorso di discesa e dal punto in cui cade il velivolo. La traiettoria viene inoltre supposta di tipo balistico: per tale motivo l'angolo di impatto, se non assunto diversamente in test specifici, è fissato pari a 60 gradi, valore compatibile con tale tipo di traiettoria ipotizzando una velocità orizzontale non nulla nel momento dell'avaria.

Dopo aver introdotto il metodo e alcune sue assunzioni, si può passare ad analizzare il processo operativo del calcolo della probabilità che si abbia una vittima nel caso di impatto tra drone e terze parti, e i parametri che la influenzano.

La probabilità che si verifichi una casualty, punto chiave dell'intero processo e delle conseguenti valutazioni su sicurezza e fattibilità di una missione, è la combinazione della probabilità che il drone abbia un'avaria che lo porti a una discesa incontrollata, che la sua traiettoria di impatto coinvolga una o più persone, e che l'eventuale collisione sia fatale per le terze parti coinvolte:

$$P_{casualty} = P_{event} \cdot P_{impact} \cdot P_{fatality}$$

- P_{event} : probabilità che si abbia un evento imprevisto e critico tale da causare l'impatto al suolo del velivolo. Si ricava da dati storici sul drone oppure da accurate simulazioni e considerazioni sulle sue caratteristiche progettuali e di sicurezza, e sulla sua affidabilità in generale.
- P_{impact} : probabilità che il volume occupato dal drone durante la sua caduta collida con il volume tipico occupato da un corpo umano, tenendo conto del numero di persone che possono intersecare la traiettoria del velivolo, in funzione della densità abitativa dell'area.

I parametri che determinano tale probabilità sono quindi la densità abitativa (ρ) e un parametro dimensionale sull'area di possibile collisione drone-uomo, denominata area di esposizione (o area letale), che dipende dalle caratteristiche geometriche dei due corpi coinvolti nell'impatto e dalla traiettoria del drone.

$$P_{impact} = \rho \cdot A_{exp}$$

$$A_{exp} = 2 \cdot (r_p + r_{UAV}) \cdot \frac{h_p}{tg(\theta)} + \pi \cdot (r_p + r_{UAV})^2$$

- r_{UAV} è il raggio del drone, pari alla metà della dimensione caratteristica massima
- r_p e h_p sono, rispettivamente, il raggio all'altezza delle spalle e l'altezza di una persona media. Permettono quindi di calcolare il volume di spazio occupato dal corpo umano. I dati presenti in letteratura e consigliati per tali due parametri sono rispettivamente 1 ft e 6 ft, che corrispondono approssimativamente a 30 e 180 cm. Si può notare come siano valutazioni conservative rispetto alla media italiana, determinando un possibile volume di collisione superiore a quello di un corpo medio locale.
- θ : angolo di impatto al suolo del drone, definito come angolo tra livello del terreno e traiettoria. È un parametro fortemente dipendente dalle caratteristiche del drone e della sua traiettoria di discesa, che può variare da un glide più o meno ripido in caso fixed wing a una traiettoria balistica. Ovviamente l'angolo di impatto riveste notevole importanza nella valutazione del numero di persone intersecate dalla traiettoria: più il drone si muove parallelo al terreno, più possibilità ci sono che collida con molti "volumi umani" presenti nell'area. Tale valutazione è effettuata ipotizzando solamente un tipo di contatto geometrico, ovvero senza considerare che, in funzione del tipo e del peso, la corsa si potrebbe arrestare prima di aver impattato contro tutte le persone potenzialmente presenti.

Confronto con formula ENAC: la formula presentata è la stessa utilizzata nella metodologia ENAC, ad eccezione delle valutazioni sulle possibili esplosioni del serbatoio; tuttavia, in quel caso, le dimensioni standardizzate del corpo umano erano già inserite, e l'angolo di impatto era fissato a 45°. Nelle linee guida ENAC è inoltre presente un fattore correttivo 7 per tenere conto dei possibili effetti di skidding e rebound, cioè del fatto che, dopo l'impatto, il drone possa scivolare e/o rimbalzare sul terreno ancora per qualche metro. Tale modello, per quanto migliori di attendibilità all'aumentare della dimensione del drone, risulta comunque notevolmente conservativa, inficiando ulteriormente la fruibilità del metodo ENAC.

Come verifica, è possibile osservare che per il valore di 45° la formulazione ENAC e quella di Valavanis moltiplicata per un fattore 7 coincidono anche graficamente:

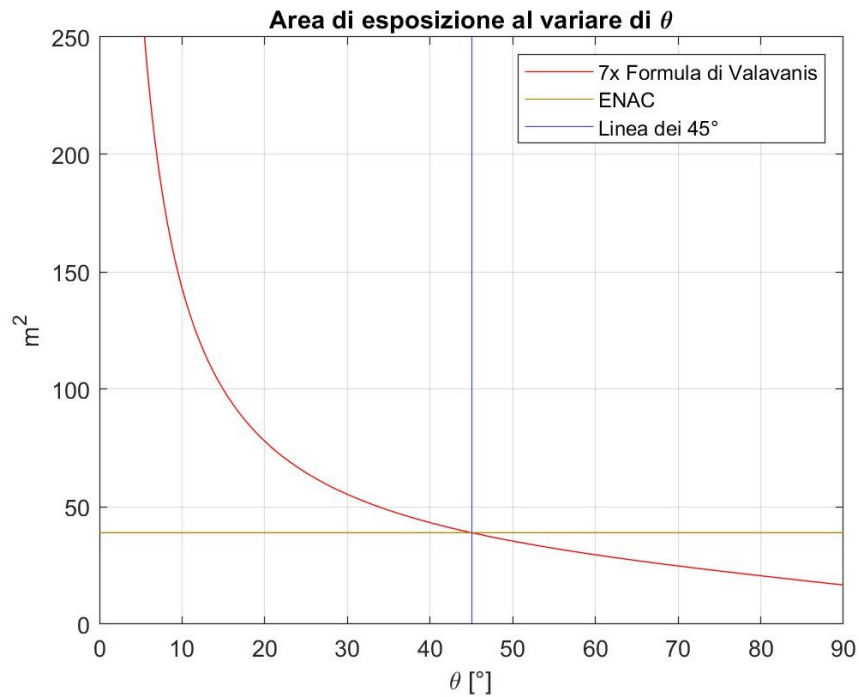


Figura 61

Nota: il grafico è stato ottenuto scegliendo come riferimento il drone Matternet M2, con dimensione massima corrispondente alla diagonale di $80 \cdot \sqrt{2}$ cm.

- $P_{fatality}$: è la probabilità che, nell'eventualità di un impatto, le persone coinvolte periscano per la collisione con il drone in caduta. È un parametro particolarmente complesso da calcolare e da valutare, anche a causa dell'impossibilità di effettuare test fisici; si ricava tramite considerazioni che combinano dati storici delle missioni unmanned con nozioni di biomeccanica del corpo umano, ed è quindi fortemente influenzato dalla base dati a cui si fa riferimento. Il metodo Valavanis è tarato su droni di dimensioni e masse importanti.

$$P_{fatality} = \frac{1 - k}{1 - 2 \cdot k + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \left[\frac{\beta}{E_{imp}} \right]^{\frac{3}{P_s}}}$$

- E_{imp} : è l'energia cinetica di impatto del drone al momento della collisione. Diversamente dal processo SORA, in questo caso verrà effettuato un calcolo più preciso, non assumendo in modo conservativo la velocità terminale come velocità di collisione, ma ricavando la reale velocità di impatto in base alle caratteristiche del drone e alla quota operativa. Tuttavia, considerando per semplicità solo impatti balistici, e nel complesso delle imprecisioni relative allo studio approssimato del moto di caduta del drone, non sarà eseguita l'analisi delle componenti di velocità. Il coefficiente di attrito sarà posto a 0.7 come suggerito dal calcolatore NASA proposto in SORA, e come area si utilizzerà quella in pianta della struttura principale del drone; tali approssimazioni sono accettabili in fase di studio di massima sulla metodologia in analisi.

Il calcolo viene eseguito ipotizzando che il drone inizi la traiettoria di discesa dalla quota operativa con una velocità nulla, andando a ricavare il valore di velocità finale considerando la forza gravitazionale e quella dovuta all'attrito. Essendo le quote operative dei droni limitate, si è inoltre assunto che la densità dell'aria sia costante e pari a quella a sea level.

$$F = ma = mg - \frac{1}{2}\rho C_D A u^2 \quad \rightarrow \quad m u \frac{du}{dx} = mg - \frac{1}{2}\rho C_D A u^2$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{g}{u} - \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2}\rho C_D A u \quad \rightarrow \quad \frac{\frac{g}{u} - \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2}\rho C_D A u}{du} = dx$$

A questo punto è possibile integrare a variabili separate tra le condizioni iniziali e quelle finali, e, tralasciando i passaggi di calcolo intermedi, si ottiene la seguente formulazione della velocità di impatto effettiva:

$$u_f = \sqrt{\frac{g - \left(g - \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2}\rho C_D A u_0^2\right) \cdot e^{-\frac{1}{m}\rho C_D A \cdot (x_f - x_0)}}{\frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2}\rho C_D A}}$$

Calcolata la velocità finale, l'energia cinetica di impatto risulta essere:

$$E_{imp} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_f^2$$

Nota: tale metodologia di calcolo della velocità e dell'energia di impatto verrà utilizzata per tutti i metodi valutati nella trattazione, tranne quello ENAC per il quale si seguono le linee guida relative alla velocità terminale.

Confronto tra Velocità ed Energia cinetica vera all'impatto e terminale

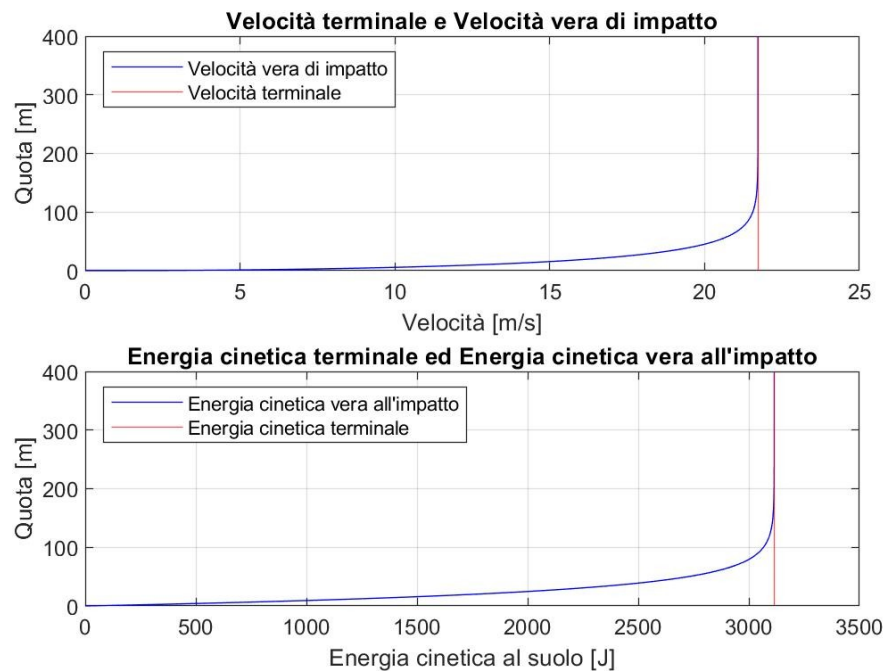


Figura 62

Nota: il grafico è stato ottenuto scegliendo come riferimento il drone Matternet M2, con dimensione massima corrispondente alla diagonale di $80 \cdot \sqrt{2}$ cm, massa di 13.2 kg, quota operativa di 120 m.

Si può notare come, per le quote operative di interesse, ci sia una differenza notevole tra la velocità effettiva di impatto al suolo e quella terminale, consigliata da EASA per l'analisi SORA, la quale risulta conservativa dato che determina la massima energia di impatto possibile. Si può notare come nel caso terminale l'energia coincida esattamente con quella calcolata tramite programma NASA nella sezione SORA della tesi.

- P_s : è il livello di sheltering, variabile tra 0 e 10
- $\beta = 34 \text{ J}$ è l'energia sotto la quale è stato valutato non si abbia fatalità nel caso di impatto
- $k = \min \left[1, \left(\frac{\beta}{E_{imp}} \right)^{\frac{3}{P_s}} \right]$, è un fattore correttivo legato alle energie di impatto e allo sheltering, avente valore massimo possibile 1, in cui la fatalità va a zero annullandosi il numeratore della frazione. Esprime la casistica, dipendente anche dallo sheltering, di droni aventi una così bassa energia di impatto da essere inoffensivi: $\left(\frac{\beta}{E_{imp}} \right)^{\frac{3}{P_s}}$ diventa superiore a 1 avendo un denominatore piccolo, e di conseguenza si ottiene $k = 1$

- α : parametro matematico con le dimensioni di un'energia, che viene definito come quel valore che, fissato lo sheltering a un fattore 6, produce una probabilità complessiva di fatalità del 50%. In altre parole, se nella formula complessiva di $P_{fatality}$ si forza tale valore a 0.5 e si sostituisce a P_s il valore 6, si può calcolare il parametro richiesto. Nell'eseguire i calcoli necessari, sarà valutata una k valida solo per questo passaggio, differente, a causa dello shelter, da quella del calcolo vero e proprio della probabilità.

Una volta calcolata l'energia d'impatto, noti il mezzo e la quota operativa, ricavati α e k , sostituito β , scelto il valore di P_s , si può infine ottenere la probabilità che l'impatto del drone con un essere umano sia fatale, ovvero la $P_{fatality}$.

Definite e calcolate quindi le probabilità dell'evento, dell'impatto e della fatalità dell'impatto, è possibile moltiplicarle tra loro e ottenere la probabilità di avere una vittima in caso di impatto al suolo di un determinato drone, operante ad una quota nota, in un determinato scenario con le proprie caratteristiche di schermatura.

Rispetto all'analisi SORA o alle linee guida ENAC, tale valore numerico permette di esprimere in maniera molto più precisa il reale rischio a terra delle terze parti presenti nel volume operativo di una missione UAV.

Metodologia di Valavanis modificata Primatesta et al.

Uno step migliorativo della metodologia proposta da Valavanis è stato introdotto da Primatesta et al., che riformulando la definizione dell'area letale ne ha esteso l'applicabilità anche a droni di masse inferiori rispetto a quelli usati come riferimento nel metodo originale.

La modifica della formula ha influenza soprattutto sulla valutazione di traiettorie aventi angoli di impatto ridotti: nella metodologia di Valavanis si ha un incremento esponenziale dell'area e conseguentemente della fatalità della collisione, mentre nel metodo modificato da Primatesta si ipotizza che il velivolo venga arrestato dall'impatto con gli esseri umani, coinvolgendo quindi un numero minore di persone. La modifica è figlia di un concetto differente di drone per quel che riguarda la massa di riferimento: un mezzo molto pesante con traiettoria poco inclinata potrebbe effettivamente impattare un elevato numero successivo di persone; invece, si può ipotizzare che un velivolo leggero non abbia la medesima capacità di penetrare attraverso molte persone consecutivamente.

La modifica della formula riguarda infatti la relazione con la variazione dell'angolo di impatto:

- Originale: $A_{exp} = 2 \cdot (r_p + r_{UAV}) \cdot \frac{h_p}{tg(\theta)} + \pi \cdot (r_p + r_{UAV})^2$
- Modificata: $A_{exp} = 2 \cdot (r_p + r_{UAV}) \cdot (h_p + r_{UAV}) \cdot \cos(\theta) + \pi \cdot (r_p + r_{UAV})^2 \cdot \sin(\theta)$

Lo studio della nuova formulazione è stato effettuato proprio con il fine di aggiornare e perfezionare la nota metodologia Valavanis, rendendola applicabile a casi differenti da quelli per cui è stata ideata.

La variazione dell'area letale al variare dell'angolo di impatto è rappresentata dal seguente grafico:

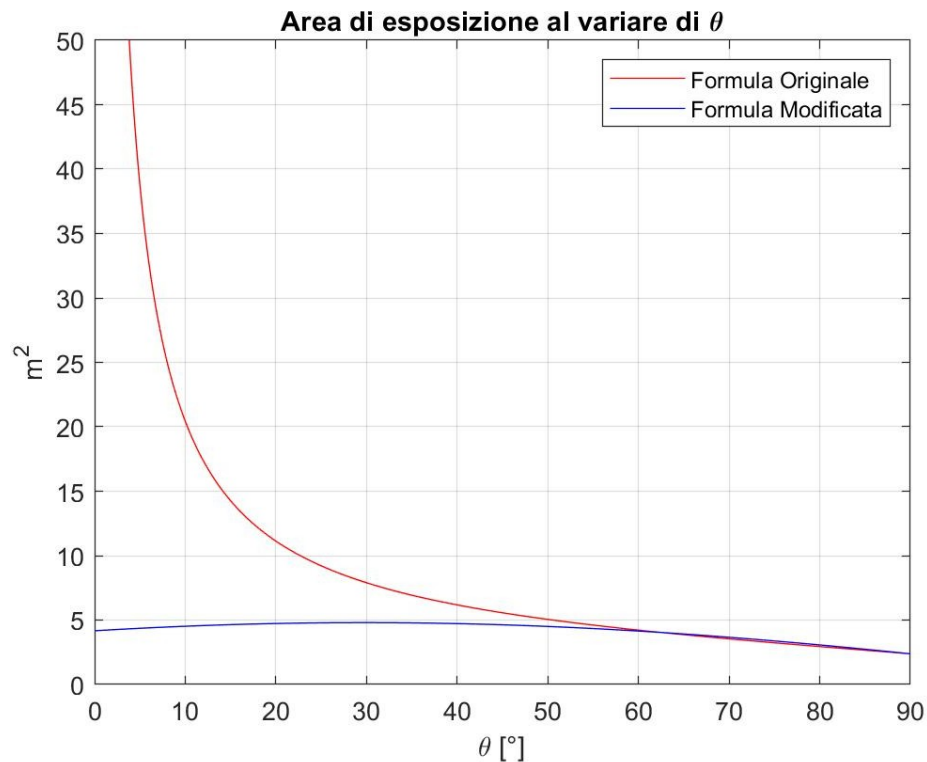


Figura 63

Nota: il grafico è stato ottenuto scegliendo come riferimento il drone Matternet M2, con dimensione massima corrispondente alla diagonale di $80 \cdot \sqrt{2}$ cm.

Come si può notare, la metodologia di Valavanis presenta una crescita esponenziale per θ bassi, mentre quella riformulata tende a un valore finito per angoli prossimi a zero. La formula di Primatesta presenta un massimo assoluto nell'intorno dei 30 gradi, angolo che quindi esprime la massima area di esposizione possibile per il caso in esame. Da un'osservazione attenta si nota come per valori superiori a circa 65 gradi le due curve siano praticamente sovrapposte, con quella di Valavanis che risulta leggermente più conservativa. La nuova curva permette di valutare in modo molto più accurato la casistica di droni aventi masse contenute, potendo spingersi anche ad analizzare casi di glide angle bassi, e quindi espandendo le potenzialità del metodo di Valavanis.

Simulazioni

Passando ad analizzare l'influenza dei diversi parametri che compongono la probabilità complessiva di casualty della missione, a prescindere dal metodo considerato, si può notare come alcuni di essi abbiano un legame lineare, e quindi siano di immediata e facile comprensione: la loro variazione viene espressa graficamente da una retta crescente con il parametro.

In particolare, si analizzano due parametri di notevole importanza, sia in termini di sicurezza del drone che di ambiente operativo:

- P_{event} : una delle tre probabilità che contribuiscono alla $P_{casualty}$, ha un ruolo fondamentale nella determinazione del rischio complessivo ed è a sua volta figlia di numerose valutazioni sulle caratteristiche progettuali e sui dati storici del drone.
- ρ : facente parte della formulazione per il calcolo della probabilità di impatto ($P_{impact} = \rho \cdot A_{exp}$), è linearmente proporzionale con la probabilità di casualty, ed esprime, insieme allo sheltering, una delle due caratteristiche principali dell'ambiente operativo a terra interessato dalla missione.

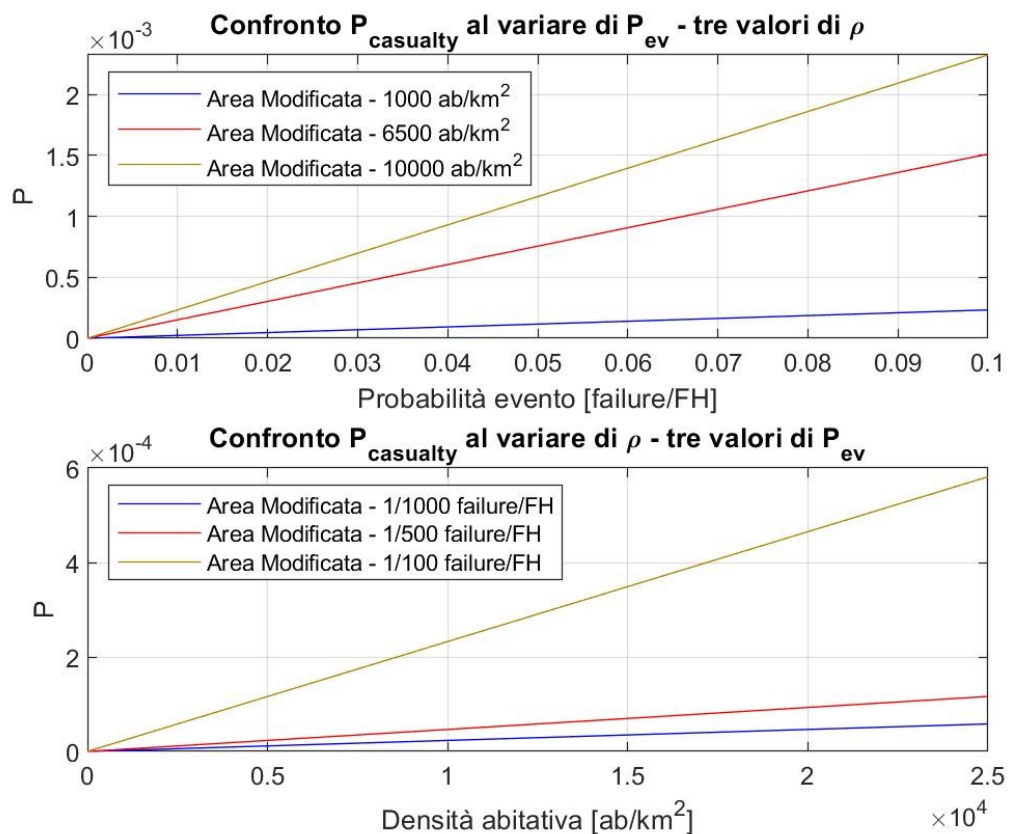


Figura 64

Si può notare come la caratteristica lineare della relazione si mantenga anche al variare dell'altro parametro, per ampliare il numero di casi analizzati. Tra i due termini, quello su cui si può intervenire più facilmente per abbassare il livello di rischio della missione è la probabilità di failure, tramite miglioramenti delle caratteristiche progettuali e di affidabilità del drone utilizzato; la densità abitativa, per quanto controllabile tramite una opportuna scelta della rotta o dell'area su cui svolgere la missione, normalmente risulta più vincolata e difficilmente modificabile, essendo parte dell'ambiente operativo.

Altri parametri, compresi nella valutazione dell'area di esposizione e della probabilità di fatalità, hanno una relazione più complessa con la probabilità di casualty finale, e necessitano quindi di analisi più dettagliate.

Per quanto riguarda l'area di esposizione, ipotizzando di mantenere costanti i parametri relativi alla dimensione del corpo umano considerato, si può notare come i possibili termini suscettibili di variazioni siano la dimensione del UAV e l'angolo di impatto. Tali considerazioni sono valide per entrambe le formulazioni proposte per l'area letale, anche se la variazione dell'angolo, in particolare per valori contenuti, ha un'influenza molto diversa tra la formula di Valavanis originale e quella modificata.

Valutazioni sull'area di esposizione al variare dell'angolo di impatto e della dimensione massima del drone

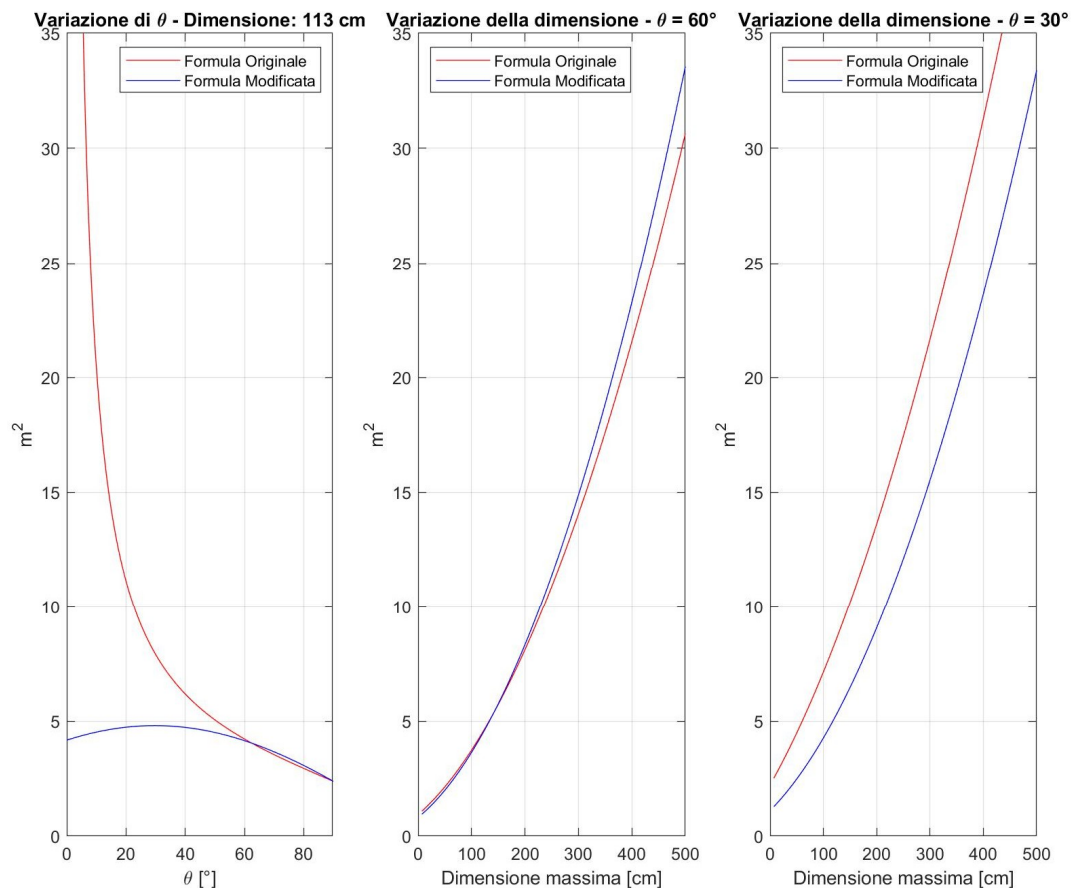


Figura 65

Si può notare come il primo grafico sia il medesimo già riportato nella trattazione del confronto tra il metodo di Primatesta e quello originale di Valavanis. Gli altri due grafici presentano, per due valori distinti dell'angolo di impatto, l'influenza che la dimensione massima del drone ha sull'area di esposizione: come è intuibile, ad un aumento delle dimensioni del drone ne consegue un aumento dell'area letale. Si può notare come la differenza tra le due formule in base all'angolo di impatto (primo grafico) si ritrovi anche nei due grafici al variare della dimensione: per il caso di $\theta = 60^\circ$ le curve sono molto ravvicinate, nonostante si possa osservare un interessante incrocio intorno ai 150 cm di dimensione caratteristica del drone; per il caso con un angolo di impatto basso, invece, le due curve sono più distanziate, soprattutto per dimensioni crescenti.

Per quanto riguarda invece il calcolo di $P_{fatality}$, i parametri presenti nella formula presentano relazioni fortemente non lineari, con i due aspetti chiave rappresentati dalla valutazione dell'energia di impatto e del fattore di sheltering. La prima è legata indubbiamente alla dimensione del drone e alla quota operativa della missione; la seconda è più propria dell'ambiente operativo.

Le curve sotto riportate evidenziano come la differente formulazione dell'area, rispettivamente di Valavanis originale e modificata, non influenzino in alcun modo il legame tra energia di impatto e/o fattore di sheltering con la probabilità di fatality.

I grafici relativi alla variazione dell'energia di impatto, in particolare quello con uno zoom sui valori molto bassi di tale parametro, permettono di osservare chiaramente come la formulazione di Valavanis presenti una forte discontinuità: tale andamento è dovuto al parametro k presente nella formula di $P_{fatality}$, che permette di distinguere tra droni inoffensivi o meno. I droni con un'energia di impatto inferiore al valore di discontinuità presentano una probabilità di fatalità pari a 0, da cui consegue che la probabilità composta per l'analisi del rischio della missione si annulli: $P_{casualty} = P_{event} \cdot P_{impact} \cdot P_{fatality}$.

In questo caso, la curva è tracciata con un fattore di sheltering di 5.5, e quindi per un ambiente operativo con tali caratteristiche si può constatare che la soglia di inoffensività è nell'intorno di 35 J. Osservando invece il grafico a scala completa, si può notare che l'influenza dell'energia di impatto è più evidente nel caso in cui tale parametro presenti valori contenuti, ai quali corrispondono evidenti variazioni di probabilità; per energie di impatto elevate invece la variazione è molto minore, con un andamento comunque crescente, ma contenuto.

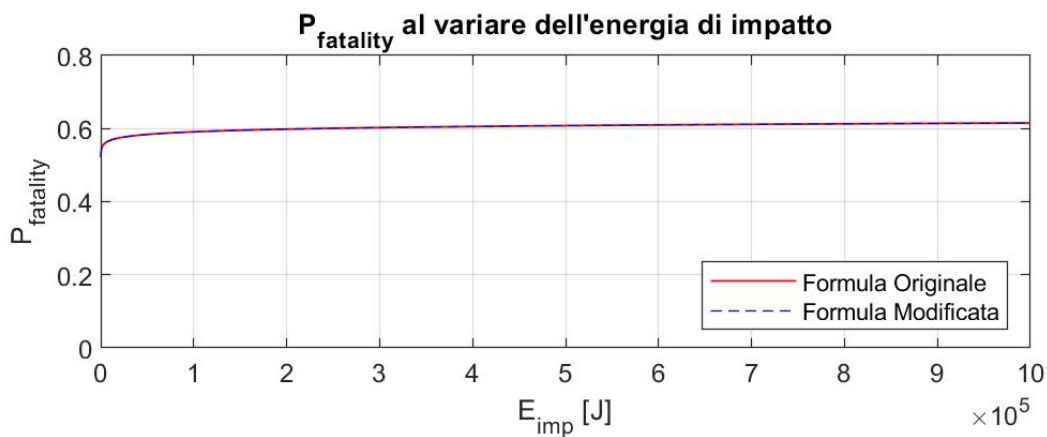


Figura 66

Nella pagina seguente sarà riportato un dettaglio del grafico completo, incentrato sui valori di energia di impatto molto contenuti.

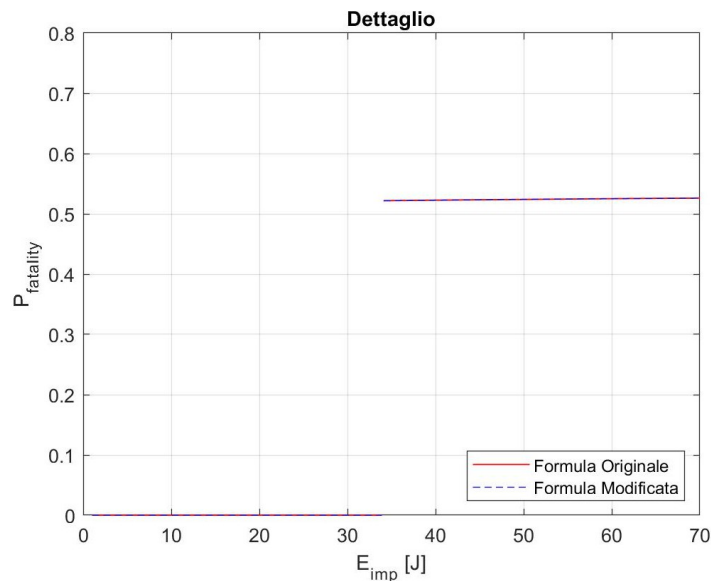


Figura 67

Per quel che riguarda il fattore di sheltering, nel prossimo grafico si può apprezzare la curva di relazione tra tale parametro e la probabilità di fatality. Per valori prossimi a zero, ovvero per schermatura tra popolazione e drone in caduta pressoché assente, si può notare come la probabilità tenda a 1, ovvero a certezza di fatality nel caso di impatto. Al crescere del fattore di sheltering, per quanto in modo palesemente non lineare, si ha una netta diminuzione monotona di $P_{fatality}$, che raggiunge valori contenuti per sheltering superiore a 8.

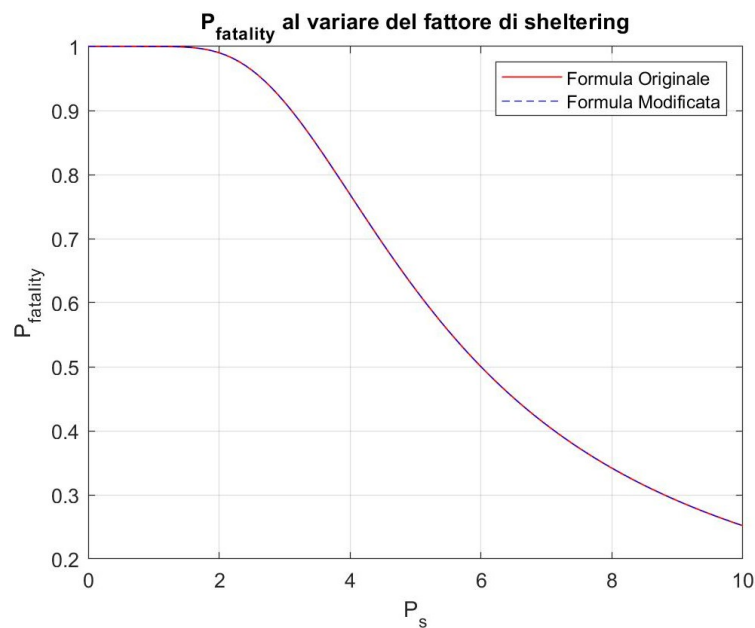


Figura 68

La scelta dell'ambiente operativo, e quindi la valutazione dello sheltering per la popolazione presente, per quanto a volte difficilmente modificabile, ha un impatto fondamentale sul rischio correlato alla missione, ed è quindi un parametro da valutare con attenzione e da massimizzare il più possibile. Il peso delle variazioni di fattore di sheltering è superiore all'influenza dell'energia di impatto, quindi conviene privilegiare l'analisi dello scenario operativo e la valutazione di tale coefficiente per calcolare in maniera corretta il rischio complessivo della missione.

ELOS e confronto tra ENAC e Valavanis, originale e modificato

Viene ora introdotto il concetto di ELOS, fondamentale per una valutazione della fattibilità di una missione, in fase di definizione e analisi di ConOps.

L'acronimo ELOS sta per Equivalent Level Of Safety, e rappresenta il livello di sicurezza che vuole essere garantito durante l'operazione nel suo complesso. È possibile considerarlo come il livello di probabilità di casualty, ovvero il massimo rischio tollerabile per l'intera missione, a prescindere da ogni altra valutazione.

Il livello di ELOS permette di procedere inversamente a quanto fatto precedentemente, ovvero non ricercando la $P_{casualty}$, ma forzandola, e ricavando di conseguenza i limiti di variazione dei parametri ambientali e del velivolo che permettano complessivamente di mantenere il rischio al di sotto del limite desiderato. Tali considerazioni possono essere fatte sia procedendo con variazioni singole di un parametro, fissati gli altri, sia in maniera più complessa con variazioni combinate di diversi fattori, in modo da poter esplorare ogni possibilità di personalizzazione della missione, pur mantenendo il rischio entro limiti di sicurezza.

Il livello equivalente di sicurezza permette inoltre di facilitare significativamente il confronto tra diverse possibilità di missione, nonché il rapporto tra l'analisi tecnica di rischio e i limiti normativi e di sicurezza presenti. Dal punto di vista normativo, ma anche più semplicemente organizzativo, è possibile quindi fissare il limite di rischio tollerabile per la missione, e attraverso l'analisi di rischio scelta, che sia quella di Valavanis o altro, risalire alle possibilità concrete di variazione dei vari parametri per effettuare l'operazione. È possibile quindi non solo indagare più a fondo come l'ambiente operativo, espresso attraverso la densità abitativa, il fattore di sheltering, e la quota delle operazioni influenzino la fattibilità della missione proposta, ma anche come essa dipenda e si rapporti alle specifiche caratteristiche del drone scelto per effettuarla, siano esse dimensionali o di affidabilità.

Esprimendo ELOS in casualty per abitante per flight hour, normalmente si valutano tre ordini di grandezza possibili per tale parametro: 10^{-5} , 10^{-6} oppure $10^{-7} \text{ cas.} \cdot \text{ab./FH}$. Per rimanere conservativi, il primo valore spesso non viene valutato, mentre il terzo risulta molto stringente, per quanto si lavori sulla sicurezza e sulla riduzione dei diversi parametri che influiscono negativamente sul rischio.

L'introduzione del concetto di ELOS permette inoltre di effettuare un confronto tra la metodologia suggerita da ENAC e quella di Valavanis, sia nella forma originale che in quella modificata da Primatesta. È possibile paragonare il limite ELOS alla $P_{casualty}$ nella formulazione di Valavanis, e con il rischio massimo accettabile da normativa previsto nel metodo ENAC, identificato con E_{C1} oppure E_{C2} , come già introdotto e spiegato precedentemente. Per quanto siano presenti assunzioni differenti e una tipologia di trattazione e analisi del rischio diversa (basti pensare ad esempio al concetto di tempo della metodologia ENAC o di probabilità di fatalità di quella Valavanis, non presenti a parti invertite), tramite tale paragone è possibile effettuare un confronto tra i diversi metodi, e dimostrare ulteriormente come le linee guida ENAC siano estremamente conservative ed eccessivamente limitanti.

Sezione dei grafici singoli di variazione dei parametri

In questa sezione sono riportati alcuni grafici per illustrare non solo le dipendenze tra le diverse variabili e il livello di rischio tollerabile, ma anche per mostrare le potenzialità dell'utilizzo di ELOS per determinare la fattibilità e i limiti di una missione, le scelte effettuabili e i vincoli che devono essere rispettati. Le possibilità sono molteplici, quindi si è scelto di riportare solo i grafici di maggior interesse, sia legati alla metodologia ENAC che a quella di Valavanis, grafici che permettono di illustrare come l'utilizzo di un rischio predefinito determinato attraverso il valore ELOS influenzi la relazione tra i diversi parametri operativi.

In generale, in relazione all'analisi delle potenzialità ELOS con il metodo di Valavanis, si è scelto ancora un drone simile al Matternet M2, e si variano la quota operativa, il fattore di sheltering, l'angolo di impatto al suolo, e le caratteristiche di sicurezza del velivolo espresse attraverso la probabilità di avere una failure.

Nei successivi grafici la legenda riporta, per ogni curva, la formulazione dell'area utilizzata e il fattore di sheltering oppure il valore di probabilità di una failure.

Fissato il limite ELOS, si può osservare la dipendenza tra l'angolo di impatto e la densità abitativa accettabile per svolgere la missione in sicurezza, al variare del fattore di shelter, della probabilità di una failure, e della formulazione del calcolo dell'area di esposizione scelta. In questa tipologia di analisi, infatti, tale parametro assume una notevole importanza, in quanto direttamente e fortemente influenzato dalla variazione di θ .

Influenza di vari parametri e legame con la formulazione dell'area - ELOS: 10^{-6}

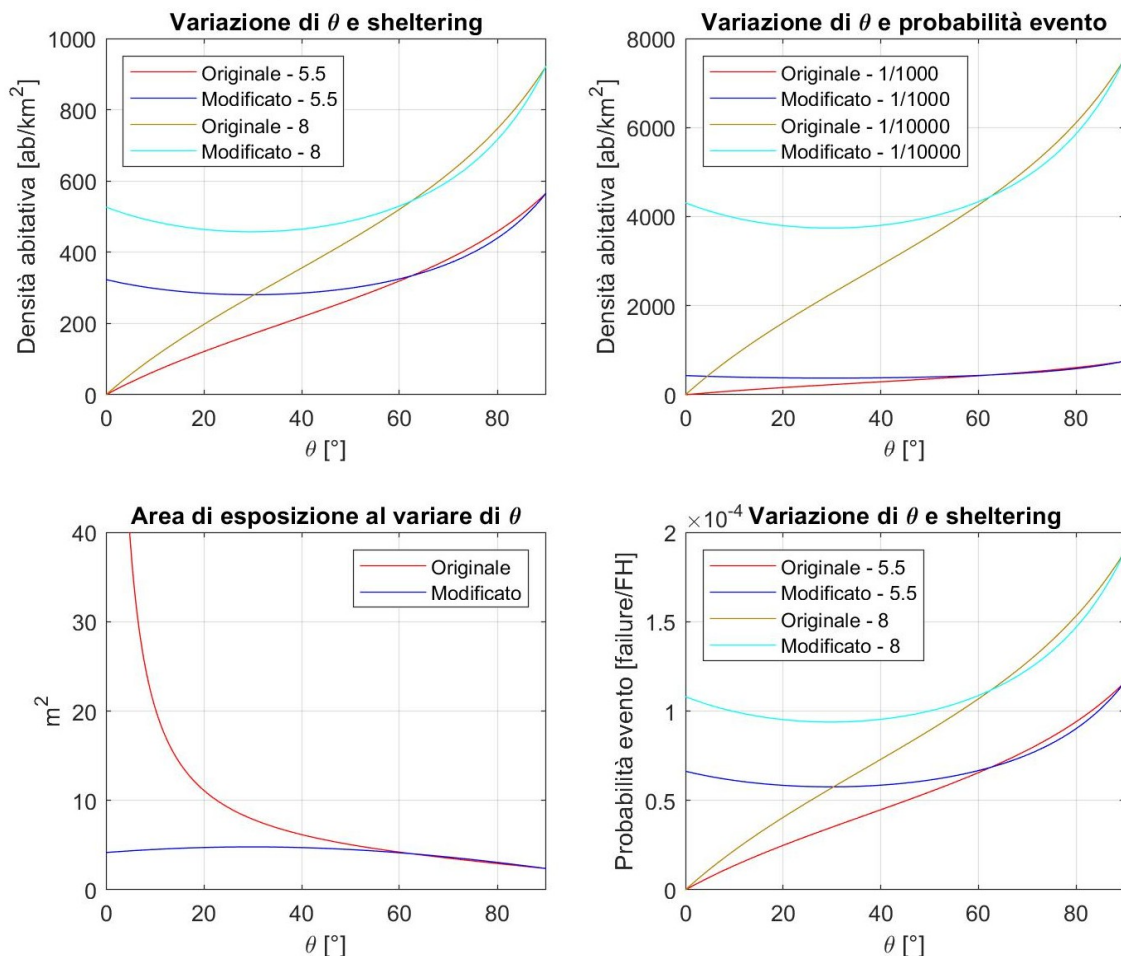


Figura 69

È evidente la correlazione tra le curve dell'area, originale e modificata, al variare dell'angolo di impatto, e le curve degli altri tre grafici: l'area di esposizione risulta infatti essere un fattore moltiplicativo, paragonabile a un coefficiente, degli altri parametri compresi nel calcolo del rischio, e per questo motivo la sua influenza è graficamente intuibile. Si può osservare come per angoli di impatto tendenti a zero la formula originale di Valavanis porti ad una crescita tendente a infinito dell'area, e quindi del rischio correlato all'operazione: per tale motivo, a prescindere da ogni ulteriore valutazione sullo sheltering o su altri fattori, la missione risulta effettuabile solo in caso di assenza di popolazione coinvolta (subplot 1 e 2) oppure con affidabilità totale del drone (subplot 4). Dal confronto tra i subplot 1 e 2 è inoltre possibile notare come, in termini di possibile densità abitativa dell'area delle operazioni, abbia un effetto maggiore un aumento dell'affidabilità del drone, piuttosto che uno scenario delle operazioni caratterizzato da un fattore di sheltering superiore.

Da un'osservazione dei valori numerici relativi alle curve espresse dai grafici soprastanti, è inoltre possibile osservare come un livello di rischio fissato a 10^{-6} risulti comunque restrittivo: per angoli di circa 70° , con una probabilità di failure di 1 evento ogni 750 FH e uno sheltering pari a 8, già superiore a quello tipico di numerosi ambienti urbani, si arriva infatti ad accettare missioni su aree con una densità abitativa di poco superiore ai 600 abitanti a chilometro quadrato, valore molto limitante (subplot 1). Dal secondo grafico si può notare come tale limite possa essere superato intervenendo sull'affidabilità del drone.

I successivi grafici mostrano la stessa casistica del subplot 1 precedente, però al variare del livello di ELOS imposto: si può notare come l'effetto sia lineare, con un fattore 10 del rischio che si riflette, tramite lo stesso coefficiente moltiplicativo, sulla densità abitativa accettabile, a parità degli altri parametri. Da tale osservazione si può ulteriormente percepire l'importanza di selezionare un livello di ELOS che possa coniugare le esigenze di sicurezza e la fattibilità della missione, senza ricadere in vincoli eccessivamente conservativi. Dai successivi grafici, ipotizzando di utilizzare il drone Matternet M2 con la propria probabilità di un evento di avaria pari a $1/750 \text{ failure/FH}$, risulta evidente come il livello di ELOS meno conservativo consenta una vasta gamma di missioni possibili, con quello intermedio queste siano più limitate, e con il valore più stringente risultino fattibili solo su zone disabitate o quasi.

Rapporto densità abitativa possibile in funzione di θ e sheltering al variare di ELOS

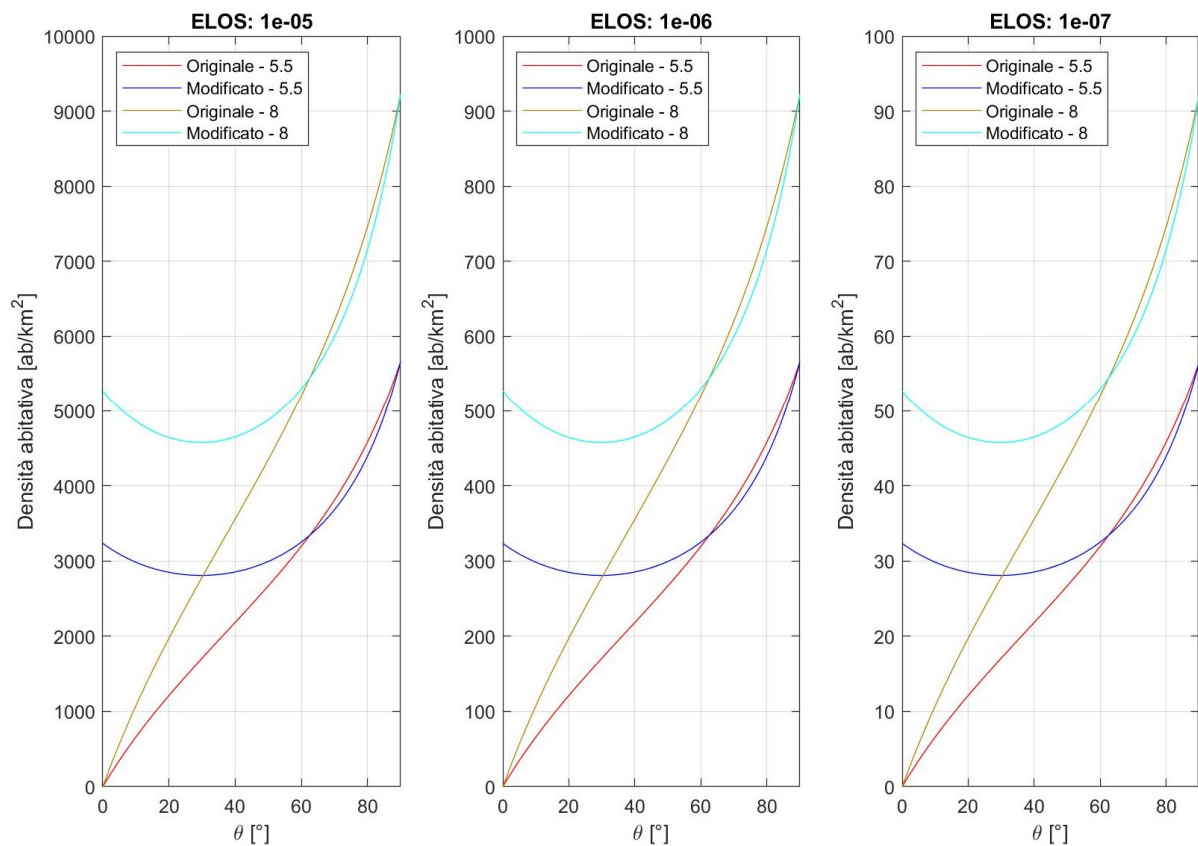


Figura 70

Sempre mantenendo i tre valori imposti di ELOS, è possibile analizzare il rapporto tra la densità abitativa dell'area operativa e la probabilità di un evento di failure accettabile, al variare degli altri parametri. Si è scelto di mantenere il drone già utilizzato in precedenza, e di lavorare sullo scenario e sulle operazioni: si è dunque supposta una variazione sia del fattore di shelter che della quota operativa. Si è inoltre valutato sia il metodo originale di Valavanis che quello proposto da Primatesta.

Nei grafici successivi si può notare come l'andamento delle curve rimanga pressoché invariato al variare di ELOS, ma cambiano completamente i valori sull'asse delle ascisse e su quello delle ordinate. Nel primo caso si può valutare un range di scenari anche con densità abitative molto elevate prima di arrivare a casistiche che necessitano di affidabilità quasi totale, e poco realistica, del drone. Al decrescere del livello di ELOS aumenta molto la limitazione alle operazioni possibili, e confrontando valori simili di probabilità di evento sui differenti grafici risulta evidente come le densità abitative possibili si riducano molto da un caso all'altro. Invertendo il ragionamento, si può osservare che al decrescere del livello di ELOS scelto, ovvero al crescere della sicurezza prevista, a parità di densità abitativa dello scenario operativo, l'affidabilità deve salire notevolmente da un caso all'altro.

La legenda dei grafici illustra le diverse casistiche con, in ordine da sinistra, il metodo utilizzato per il calcolo dell'area di esposizione, il fattore di sheltering, la quota operativa; il livello ELOS è invece indicato come titolo del subplot.

Rapporto densità abitativa possibile in funzione della probabilità evento al variare di ELOS

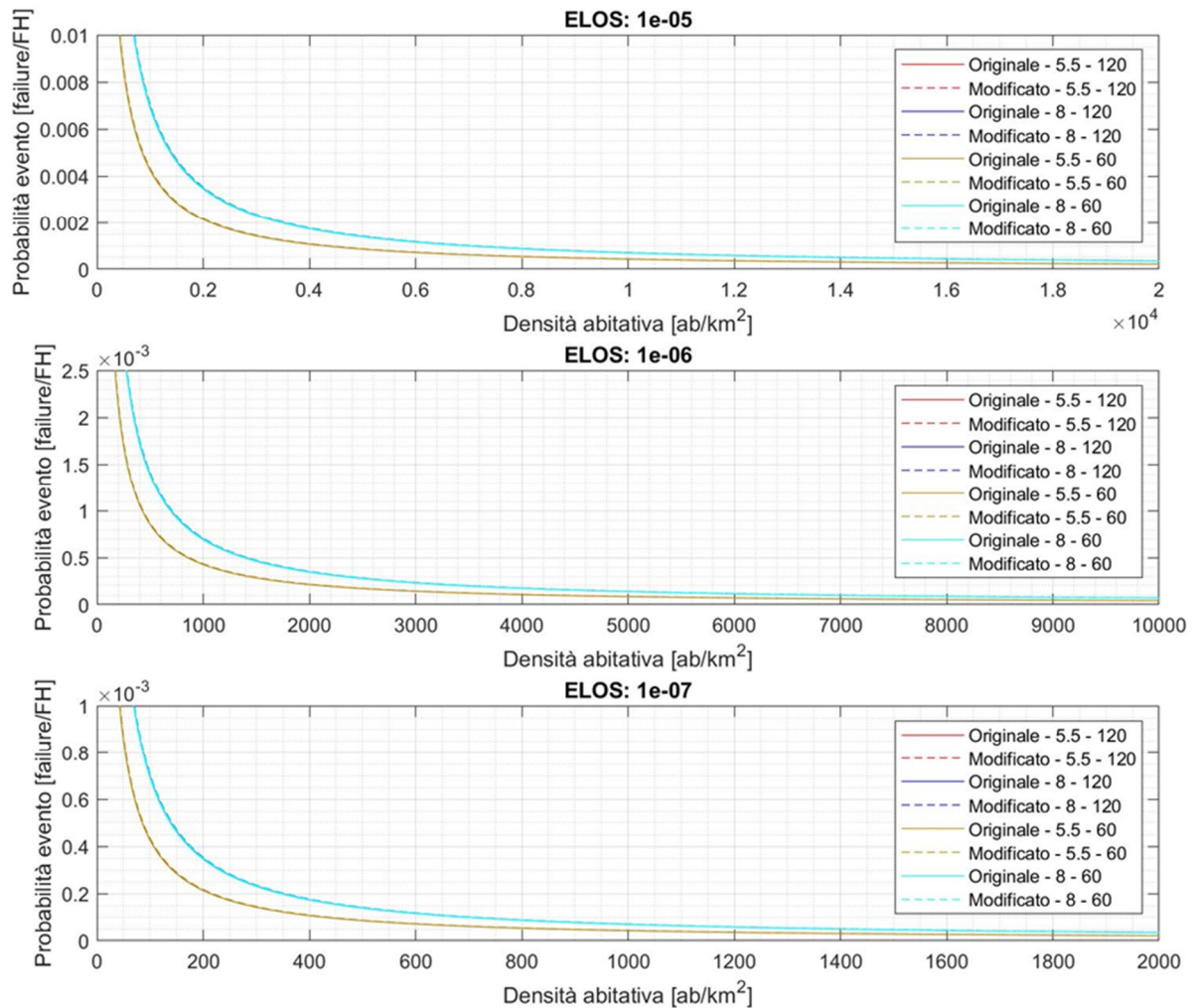


Figura 71

Osservando i grafici, appare evidente come le curve siano pressoché sovrapposte in due gruppi, che dipendono quasi esclusivamente dal fattore di sheltering, fissato l'angolo di impatto a 65° . Un dettaglio della lieve differenziazione in base ai diversi parametri viene comunque riportato nel grafico sottostante, in cui si può osservare come, fissato ELOS e il drone, in generale:

- La metodologia per il calcolo dell'area modificata, per l'angolo di impatto scelto per questi test, risulta più permissiva rispetto a quella originale di Valavanis, in quanto a parità di densità abitativa consente missioni anche con una affidabilità del drone inferiore, ovvero con una probabilità di failure oraria superiore.
- A parità di area e shelter, una quota minore comporta un rischio minore in quanto diminuisce l'energia d'impatto del drone, e quindi è accettabile un failure rate superiore.
- Come già evidenziato, il fattore di sheltering ha il peso maggiore, determinando una netta separazione in gruppi di curve aventi valore comune di tale parametro.

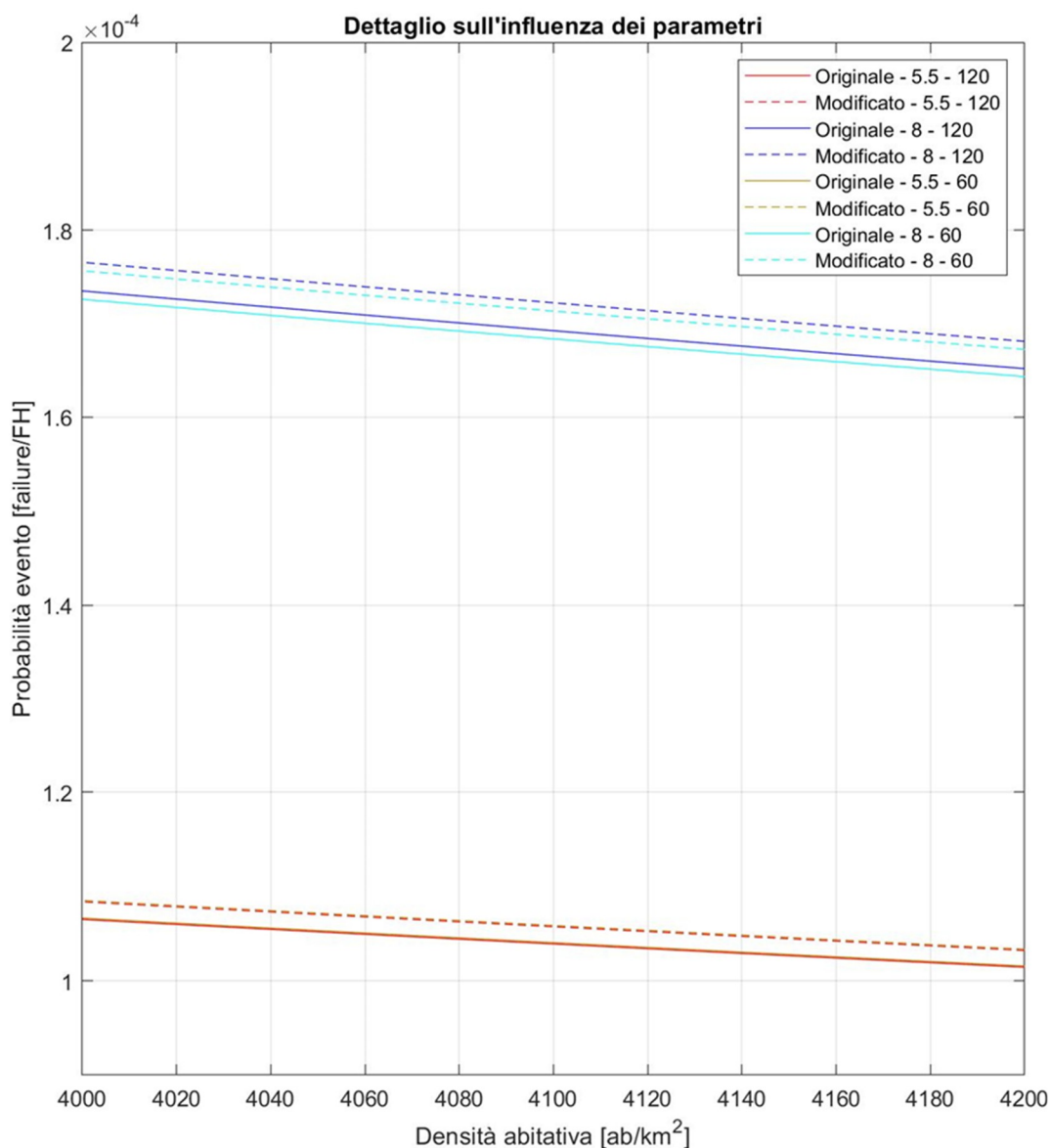


Figura 72

Osservando ora più in dettaglio una delle curve proposte in precedenza, si possono analizzare altre caratteristiche di interesse. In particolare, si è scelto come esempio il grafico tracciato per ELOS pari a $10^{-6} \text{ cas.} \cdot \text{ab./FH}$, valore che coniuga un elevato livello di sicurezza e un approccio conservativo con una relativamente ampia gamma di possibili missioni.

Il grafico proposto presenta uno zoom incentrato su valori della densità abitativa tipici di missioni in scenario urbano, con migliaia di persone per chilometro quadro. Le curve tracciate sono relative a fattori di sheltering propri di un ambiente urbano e per quote realisticamente sfruttabili in uno scenario di tale tipo. Si può osservare come, nel range 1000-5000 in ascissa, le curve presentino ancora una pendenza elevata, con sensibili variazioni della probabilità di una failure tollerabile a fronte di relativamente modeste variazioni della densità abitativa, e come tale pendenza diminuisca progressivamente per ascisse superiori.

Per gli estremi inferiori di densità abitativa la probabilità di failure accettabile è relativamente elevata, mentre per casistiche più tipiche di città densamente abitate la curva presenta valori nell'intorno di 10^{-4} *failure/FH*: tale livello al momento non è raggiunto da nessun drone presente sul mercato; tuttavia, si suppone sia conseguibile in un futuro prossimo, grazie allo sviluppo tecnologico del settore e al miglioramento dell'affidabilità dei mezzi.

Nel grafico è stato inoltre tracciato un esempio pratico di una missione ipoteticamente realizzabile: per uno scenario come Torino, avente una densità abitativa media di circa 6500 abitanti al chilometro quadrato e un fattore di shelter valutabile pari a 5.5, per missioni con un drone equiparabile al Matternet M2 ad una quota operativa di 120 metri, servirebbe garantire una probabilità inferiore a circa $0.67 \cdot 10^{-4}$ *failure/FH* (1/15000), valore, come già detto, molto difficoltoso da raggiungere, ma non proibitivo in assoluto.

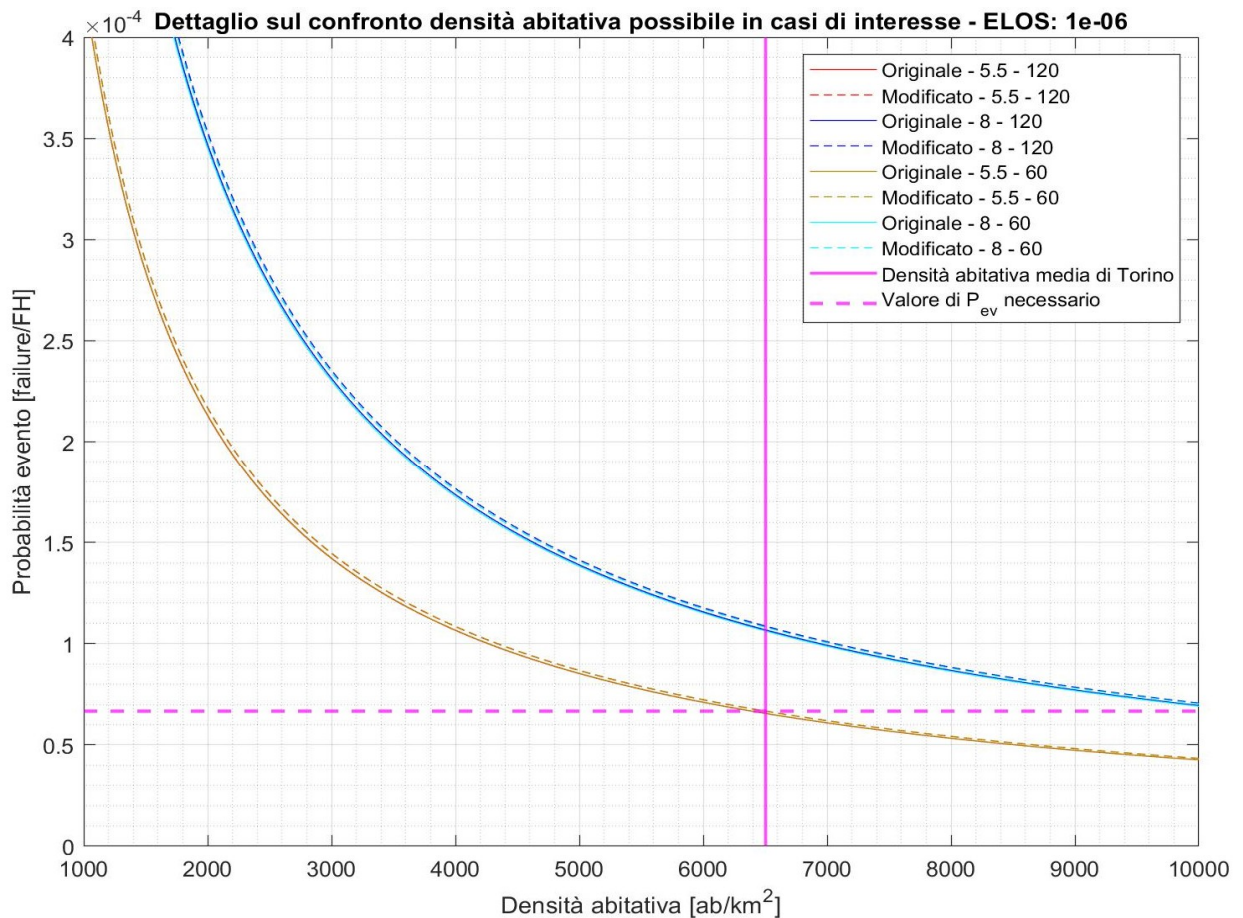


Figura 73

Per la casistica ENAC, invece, il parametro sfruttato è il tempo di sorvolo dell'area di interesse e si sono utilizzati come ipotetici livelli ELOS i valori E_{C1} ed E_{C2} .

Come si può notare dal grafico, vi è similitudine tra le tre curve relative al limite E_{C1} e le tre relative a E_{C2} , con queste ultime che risultano maggiormente distanziate tra di loro. Le tre curve di ogni gruppo si differenziano per il tempo di sorvolo previsto della zona operativa avente la densità espressa in ascissa. Si può notare come l'affidabilità del drone necessaria a compiere la missione cresca al crescere del tempo di sorvolo, in quanto con esso aumenta il rischio correlato all'operazione; è inoltre necessaria una affidabilità superiore nel caso del limite maggiormente stringente, in questo caso E_{C1} .

Come risulta evidente dal grafico, a conferma ulteriore di quanto già espresso sulla metodologia ENAC, per una densità abitativa urbana di interesse pratico si hanno requisiti sull'affidabilità del drone molto stringenti in caso E_{C1} , e comunque limitanti anche nel caso E_{C2} . È inoltre importante sottolineare come le curve di riferimento siano quelle con il 100% della missione svolta nell'ambiente operativo scelto, in quanto le più prossime ad un'ipotetica missione reale in area urbana.

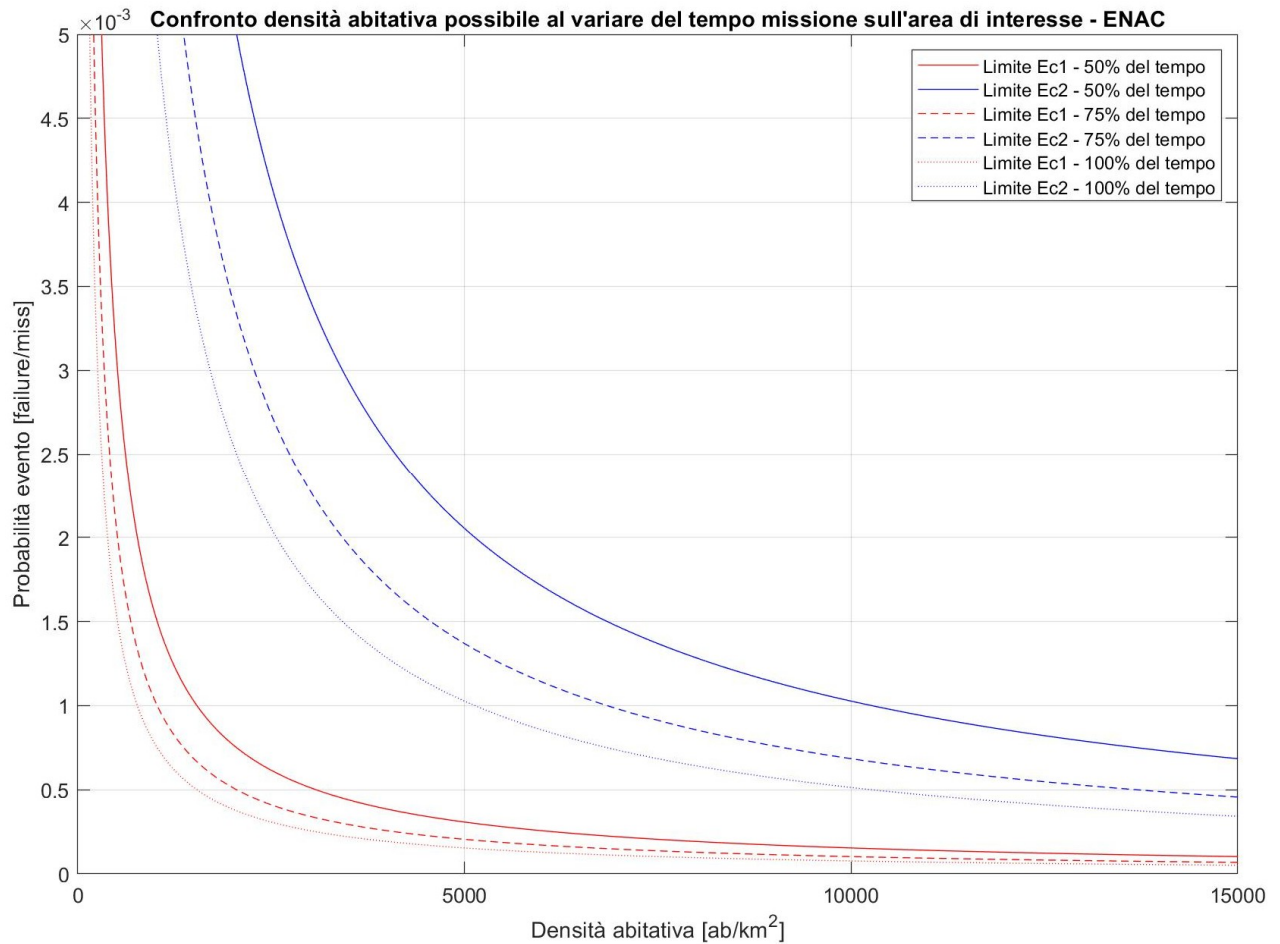


Figura 74

Confronto ENAC – Valavanis con ELOS

Confronto tra metodologia ENAC e valutazioni ELOS

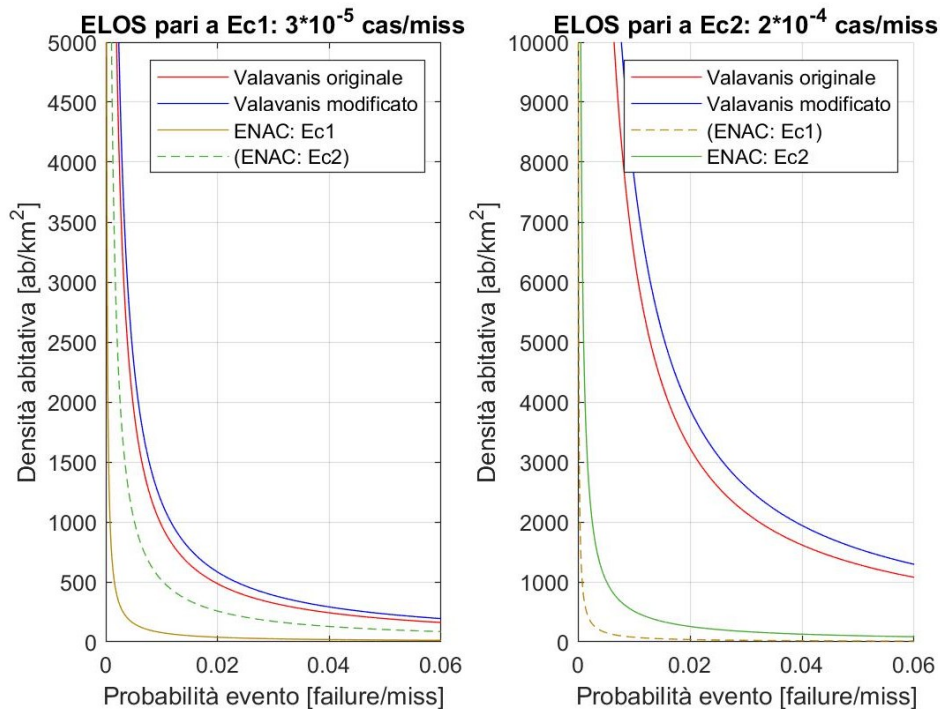


Figura 75

Per quanto tale confronto sia solo in termini di massima e non possa avere pretese di scendere in dettaglio a causa delle differenti assunzioni e ipotesi dei due diversi tipi di analisi di rischio, la rappresentazione grafica permette di evidenziare l'importante differenza tra le curve relative al metodo ENAC e a quello Valavanis, originale o modificato che sia, fissata una eguale soglia di rischio accettabile. Tale limite è valutato imponendo il livello di ELOS, utilizzabile nella formulazione di Valavanis, pari ai valori di rischio nominali e normativi suggeriti da ENAC, nel grafico di sinistra uguale al valore E_{C1} , in quello di destra a E_{C2} . Per completezza e per aiuto visivo, in ciascun grafico è riportata anche la curva ENAC propria dell'altro, ovvero quella del secondo limite di rischio nel grafico relativo al primo, e viceversa. Per poter tracciare le curve e poter effettuare il confronto nella maniera comunque più accurata possibile, è stato necessario operare sulle ipotesi delle due metodologie e sulla scelta dei parametri in modo da uniformare al meglio le ipotesi e le caratteristiche proprie di ogni metodo.

In particolare, si è assunto:

- Stesso drone: Matternet M2
- Stesse condizioni operative, in particolare relativamente a quota e sheltering, rispettivamente 120 metri e fattore pari a 5.5
- Stesso angolo di impatto al suolo: 45°, valore proprio della metodologia ENAC
- Totalità della missione svolta sull'area con densità abitativa di interesse, caratteristica da imporre nelle procedure ENAC per poterle equiparare al meglio all'analisi di rischio di Valavanis
- La metodologia ENAC si basa su probabilità espresse relativamente al numero di failure per missione invece che al numero di failure per flight hour usata da Valavanis: per poter effettuare il confronto si sono ipotizzate missioni da 30 minuti (0.5 h) e si è espresso ogni valore convertito sugli eventi di failure per missione

Come si può notare dai grafici, le curve ENAC, a prescindere da quale valore di ELOS si decida di utilizzare, risultano notevolmente più limitanti rispetto alle equivalenti di Valavanis. Tale comportamento conferma quanto già osservato in precedenza sull'eccessiva tendenza conservativa della metodologia suggerita dalle linee guida ENAC, che rendono tale metodo di difficile applicabilità pratica, in quanto eccessivamente limitante. Si può infatti vedere che a parità di probabilità di avere una failure, e quindi a parità di drone e di caratteristiche operative fissate dagli altri parametri imposti uniformi per i due metodi, la densità di popolazione accettabile nell'area operativa interessata dalla missione presenta valori sostanzialmente differenti. Come esempio basti osservare, nel grafico di sinistra, la soglia di 1000 abitanti a chilometro quadrato, che per il caso ENAC risulta tollerabile solo con elevatissimi valori di sicurezza del drone, mentre per il caso Valavanis è sufficiente una percentuale di failure a missione nell'ordine del 1%.

Si può infine osservare come nel caso di destra sia più marcata la differenza tra la curva di Valavanis originale e quella modificata secondo Primatesta: tale maggior divario è dovuto alla superiore influenza che hanno i diversi parametri correlati al calcolo del rischio, in questo particolare caso l'area, in presenza di un livello di ELOS maggiore.

Metodologia AIS (Abbreviated Injury Scale)

L'ambito dell'analisi di rischio quantitativa di una missione unmanned è tuttora in piena fase di sviluppo ed evoluzione; pertanto, viene ora introdotto e trattato un metodo innovativo e molto promettente, anche se meno affermato rispetto a quello canonico di Valavanis, o alla sua modifica relativa all'area di esposizione.

Questa nuova metodologia si basa sul lavoro svolto da Anders la Cour-Harbo, che prende ispirazione dal metodo di Valavanis e ne ricalca molti aspetti, introducendo tuttavia il legame con la scala AIS e il suo utilizzo per valutare il rischio correlato a un'operazione.

La metodologia è ottimizzata per operazioni con droni leggeri e in ambiente urbano: per tale motivo si è deciso di non basarsi sul metodo tradizionale di Valavanis, ma sulla modifica proposta da Primatesta relativamente all'area di esposizione, maggiormente adatta per velivoli di massa e dimensioni contenute.

La scala AIS, sviluppata a partire dagli anni '70 inizialmente in ambito di collisioni stradali, e da allora in continua espansione ed evoluzione, è stata pensata come una metodologia comune per determinare la gravità degli infortuni che il corpo umano può subire. La scala è in continuo sviluppo e affinamento: in questa trattazione si farà riferimento alla versione del 2005, che nonostante non sia la più aggiornata, è ancora considerata da molte fonti come quella di riferimento, e quindi è quella maggiormente utilizzata. La scala è stata sviluppata analizzando numerosissimi dati storici relativi a infortuni dovuti a diversi tipi di incidenti, e alla loro relazione con la probabilità di sopravvivenza della vittima. La metodologia AIS introduce una scala di pericolosità degli infortuni derivanti da collisioni con veicoli o sue parti, innovativa per il mondo aeronautico ma da tempo ampiamente utilizzata in ambito medico. Tale categorizzazione dell'entità delle ferite permette valutazioni e confronti uniformati tra differenti ambiti, ed ha come fine quello di ottenere un'analisi di pericolosità della missione il più possibile accurata sulla persona.

Nella metodologia di calcolo del livello AIS si utilizza il Blunt Criteria (BC), ovvero una stima della capacità di penetrazione di un oggetto nel corpo umano, valutata in base all'energia cinetica assorbita dalla persona nell'impatto, alle caratteristiche geometriche del mezzo, e alle proprietà medie del corpo umano. Tale parametro BC consente di calcolare il livello AIS tramite una semplice formula, e noto tale livello si può quindi risalire alla pericolosità complessiva dell'impatto tra il drone in analisi e una persona. Tramite la scala AIS si ricava la probabilità di sopravvivenza della persona, ma eseguendo un complemento a uno si ottiene la valutazione della fatalità.

In particolare, la relazione tra probabilità di sopravvivenza e livello AIS è stata ricavata tramite un fitting dei dati sperimentali derivanti dalla curva media del seguente grafico:

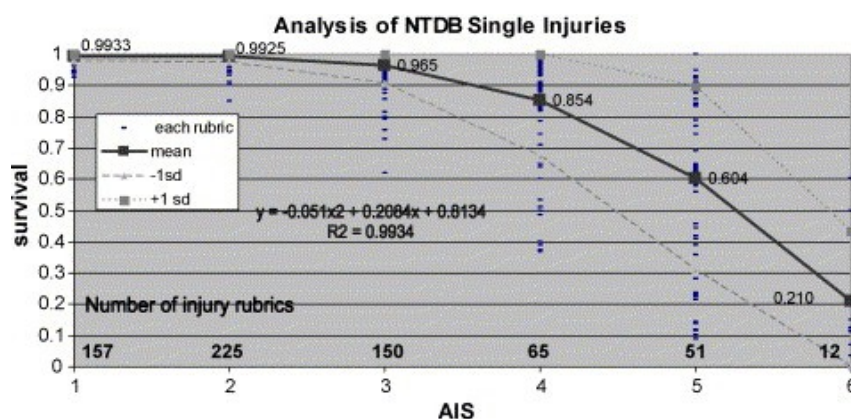


Figura 76 - Relazione livello AIS e probabilità di sopravvivenza

La curva, rielaborata per esprimere la relazione tra livello AIS e probabilità di fatalità, punto di vista più affine allo scopo di questo lavoro, si presenta nel seguente modo:

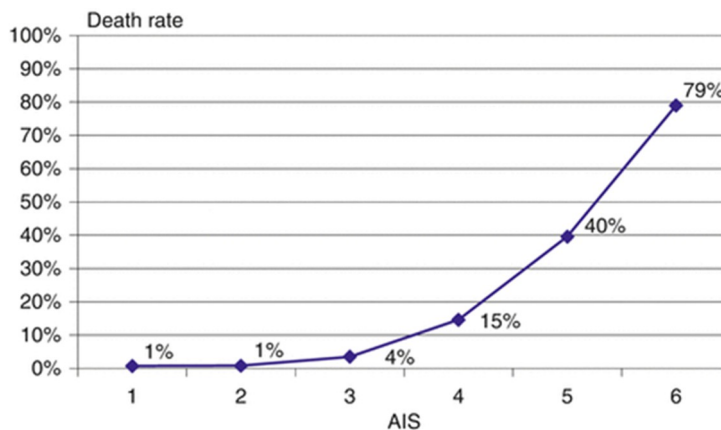


Figura 77 - Relazione livello AIS e fatalità

Come si può osservare la scala AIS presenta valori compresi tra 1 e 6, con un livello di pericolosità dell'infortunio crescente al crescere del numero: la mortalità risulta quasi nulla per valori molto bassi sull'asse delle ascisse, mentre sfiora l'80% in corrispondenza di AIS pari a 6. È importante sottolineare come il limite massimo di livello AIS non corrisponda a morte certa, ma indichi la massima gravità di infortunio possibile.

Anche la valutazione dello sheltering è diversa, con una scala modificata rispetto alla metodologia Valavanis, e con l'utilizzo del parametro non nel calcolo della probabilità di fatality dell'incidente, ma nell'analisi della probabilità di impatto tra velivolo ed essere umano. Il fattore di sheltering, invece che caratteristica operativa la quale può proteggere la persona abbassando il rischio di fatalità della collisione, diventa un parametro ambientale che influenza il fatto che il drone impatti o meno la popolazione presente nell'area delle operazioni, venendo considerato più come un ostacolo "geometrico" che come una protezione vera e propria.

In questa metodologia, lo sheltering non viene più simboleggiato con P_s ma con S ; la scala non si estende più da 0 a 10 ma varia ora tra 0 e 1, e la valutazione degli estremi viene invertita: se prima a numero elevato corrispondeva sheltering massimo (10), nella scala AIS 0 rappresenta un fattore di sheltering totale, con protezione completa della popolazione, mentre 1 indica l'assenza di ogni protezione che possa interporre tra il drone e una persona nella traiettoria di collisione.

Per poter eseguire un confronto efficace tra i diversi metodi è stato necessario introdurre una formulazione che consentisse di uniformare la valutazione del fattore di sheltering: si è deciso di mantenere la scala di Valavanis, invertirne gli estremi, e applicare un fattore di scala pari a 0.1, in modo da ottenere una corrispondenza corretta.

$$\text{Formula di conversione: } S = 1 - (P_s/10)$$

Dopo aver illustrato i dettagli del metodo AIS e le sue caratteristiche in confronto alla metodologia Valavanis, viene presentata schematicamente la procedura operativa per il calcolo del rischio a terra relativo a una determinata operazione, fissati i vari parametri di input.

La probabilità di avere una vittima viene espressa come la combinazione della probabilità che si abbia una caduta del drone, che avvenga un impatto con una persona e che tale impatto sia o meno fatale:

$$P_{fatality} = P_{event} \cdot P_{impact\ person} \cdot P_{fatal\ impact}$$

La probabilità dell'evento è espressa, come per il metodo di Valavanis, in failure per flight hour.

La probabilità di impattare una persona risulta formalmente molto simile a quella del metodo di Valavanis con, tuttavia, la sostanziale differenza dell'introduzione del coefficiente di sheltering valutato tramite il parametro S . In questa trattazione si è scelto di applicare alla metodologia AIS la formulazione dell'area di esposizione nella forma proposta da Primatesta. Essendo già stati in precedenza introdotti tutti i parametri e le assunzioni, la formula non verrà ulteriormente commentata.

$$P_{impact\ person} = S \cdot \rho \cdot A_{exp}$$

$$A_{exp} = 2 \cdot (r_p + r_{UAV}) \cdot (h_p + r_{UAV}) \cdot \cos(\theta) + \pi \cdot (r_p + r_{UAV})^2 \cdot \sin(\theta)$$

La probabilità di mortalità dell'impatto si basa sul calcolo di BC e all'utilizzo della scala AIS per correlare le caratteristiche della collisione alla sua pericolosità. La procedura è la seguente:

- Calcolo dell'energia cinetica di impatto del drone, in base alle caratteristiche del mezzo e operative
- Calcolo di BC:

$$BC = \ln \frac{E}{W^{1/3} \cdot T \cdot D}$$

dove:

- E: è l'energia cinetica di impatto
- W: è la massa del corpo impattato, ovvero della persona; in questa trattazione si assumerà come massa media di un essere umano 70 kg
- T: è lo spessore del corpo impattato. Si valuta tramite la formula: $T = k \cdot W^{1/3}$, con k che è un parametro pari a 0.6 per le donne e 0.7 per gli uomini; in questa trattazione sarà fissato pari a 0.65
- D: è il diametro del corpo impattante, ovvero del drone
- Calcolo del livello AIS: $AIS = 1.33 \cdot BC + 0.6$
- Calcolo della probabilità di avere un impatto fatale, ricavata tramite la curva, già introdotta in precedenza, che esprime la mortalità in funzione del livello AIS.

Nella nuova formulazione, con lo sheltering che viene espresso, da un punto di vista matematico, come coefficiente moltiplicativo nel calcolo della probabilità di impattare una persona, il legame tra tale parametro e il rischio complessivo è sensibilmente più diretto e intuitivo che nella formulazione di Valavanis: se il valore è 0, ovvero la protezione è totale, la probabilità di colpire una persona va anch'essa a zero, e di conseguenza anche la probabilità complessiva di fatality si annulla a prescindere da qualsiasi altro parametro e possibile considerazione.

Nel prosieguo della sezione saranno presentati dei grafici per facilitare la comprensione della dipendenza tra il rischio della missione e alcuni parametri di particolare interesse, in particolare il fattore di sheltering. Tali grafici sono stati tracciati utilizzando come riferimento il drone Matternet M2, come già avvenuto nelle precedenti simulazioni.

Relazione tra P_{fatality} e vari parametri, per diversi valori di shelter

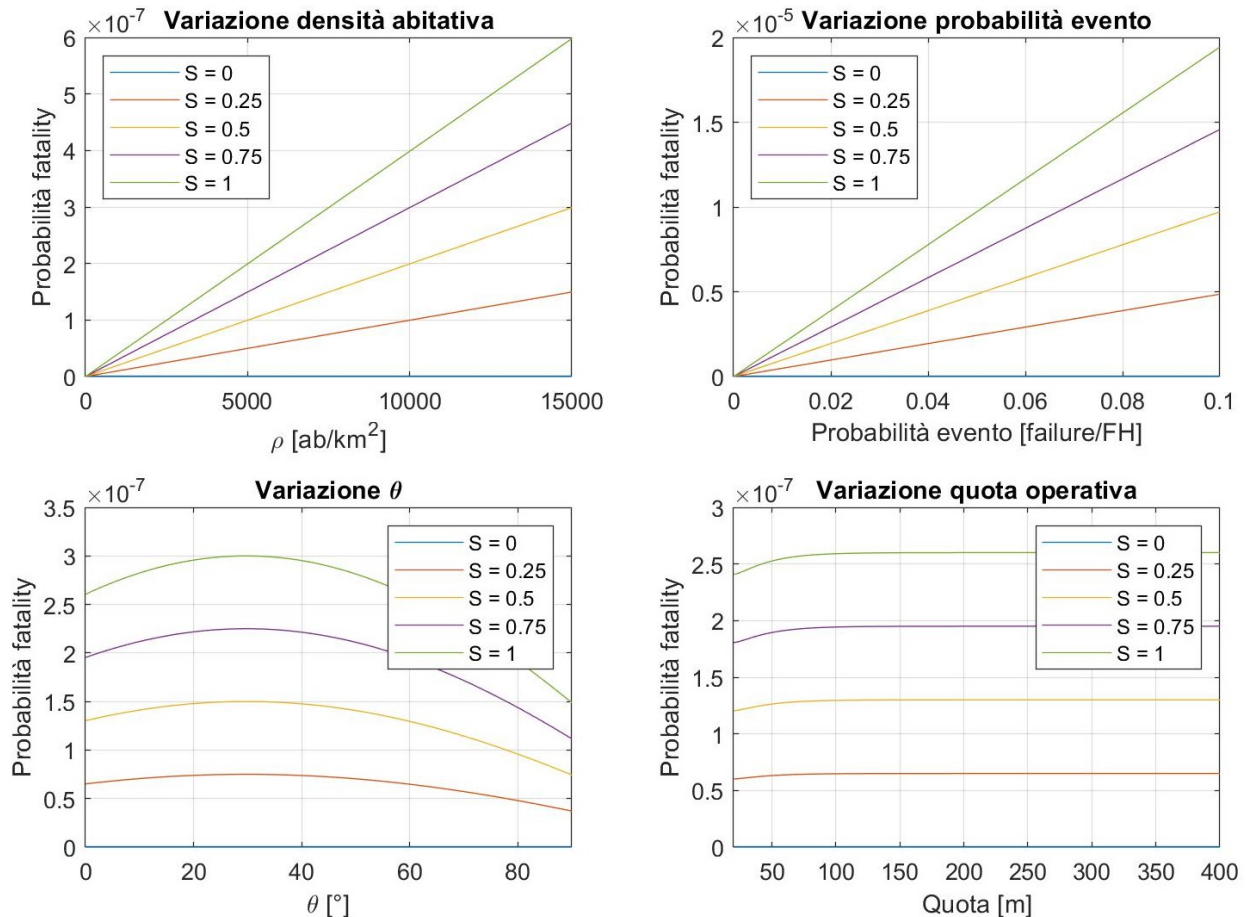


Figura 78

I grafici permettono di osservare la relazione tra diversi parametri e la probabilità di fatality complessiva, ovvero il valore di rischio a terra della missione, espresso in termini di *cas.* ab./FH*.

Escludendo momentaneamente dall'analisi il fattore di sheltering, si può notare come sia la densità abitativa che la probabilità dell'evento di failure abbiano una relazione lineare con il rischio complessivo della missione. La variazione dell'angolo di impatto influisce invece sull'area di esposizione, e le curve ricalcano infatti il grafico della relazione tra tale parametro e θ . Il grafico di riferimento, già presentato in precedenza e quindi non riportato in questa sezione, è quello relativo alla metodologia Valavanis con la formula dell'area modificata da Primates.

La curva che esprime la dipendenza dalla quota è invece influenzata dalla velocità di impatto, calcolata in modo esatto e non approssimata a quella terminale: tale variazione quindi si riflette sull'energia di impatto e di conseguenza sul rischio. Si può osservare come, per quote superiori a circa 100 m, si raggiunga una velocità prossima a quella terminale, con le curve che quindi tendono ad un asintoto orizzontale, ovvero ad un valore costante.

I grafici mostrano chiaramente come il fattore di sheltering sia effettivamente un coefficiente moltiplicativo della probabilità di fatality, in quanto al suo crescere viene accentuata la caratteristica della curva, e quindi i valori di rischio coinvolti.

Si noti che per sheltering totale ($S = 0$) tutte le curve sono corrispondenti a rischio nullo, a prescindere da ogni altro parametro.

Relazione tra $P_{fatality}$ e shelter, in funzione di vari parametri

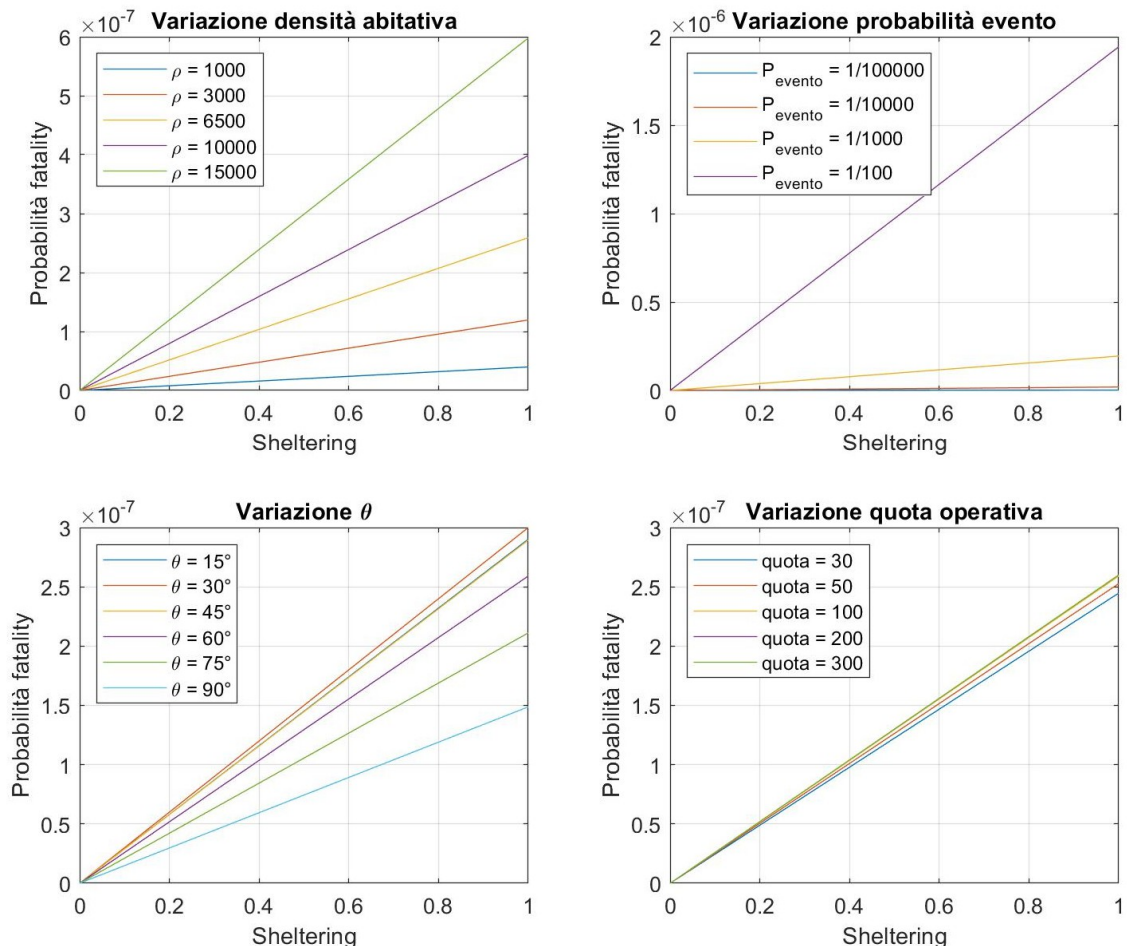


Figura 79

In questo gruppo di grafici la probabilità di fatality è espressa in funzione del fattore di sheltering, in modo da permettere di osservare meglio l'influenza di tale parametro.

Si può notare come in generale il rischio cresca linearmente con il crescere del fattore di sheltering, il che comporta una diminuzione della protezione offerta dall'ambiente operativo, e quindi una maggiore probabilità di fatality.

Per quel che riguarda invece la variazione degli altri parametri, si può osservare come ad un aumento della densità abitativa, della probabilità di evento, e della quota operativa, corrisponda un aumento del rischio complessivo della missione. I primi due parametri risultano essere paragonabili a coefficienti moltiplicativi del resto della formula per il calcolo del rischio, quindi con una dipendenza diretta tra la loro variazione e quella dell'output. La quota ha invece un'influenza più complessa, determinando la velocità e quindi l'energia cinetica dell'impatto, che viene utilizzata nella sequenza di calcolo di BC, AIS e $P_{fatal impact}$.

La dipendenza dall'angolo di impatto segue la relazione tra area di esposizione e θ della formulazione di Primatesta, con un rischio minore per valori vicini a 0° e a 90° , e via via crescenti verso il massimo presente nell'intorno dei 30° . La variazione dell'area influenza il rischio complessivo: ad area maggiore, dipendente dal parametro di input θ , corrisponde un rischio maggiore, e quindi una retta con pendenza maggiore nel grafico in esame.

Da tutti i grafici precedenti si vede che, a prescindere dalla variazione degli altri parametri, se il fattore di sheltering è zero, ovvero se la protezione ambientale è totale, il metodo propone di valutare il rischio come nullo, in quanto si presuppone che non si abbia possibilità di collisione tra il drone e la persona. Tale assunzione risulta eccessivamente conservativa in quanto indipendente da ogni altra considerazione: basti pensare, come esempio limite, che si potrebbe avere un drone di massa estremamente elevata e comunque rischio nullo se lo sheltering è completo. Per cercare di far sì che il metodo sia in grado di valutare anche casi limite dal punto di vista del fattore di sheltering, e quindi più adeguato a coprire una vasta gamma di missioni, in questo lavoro viene proposta una modifica del metodo AIS con l'introduzione di un asintoto in corrispondenza di $S = 0$, che porti il rischio ad un valore, per quanto molto contenuto, non nullo.

Introduzione dell'asintoto

Rispetto alla formulazione originale proposta dalla metodologia AIS, la curva asintotica che si desidera introdurre deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Asintoto definito in modo tale da evitare il valore di rischio nullo per fattore di sheltering completo ($S = 0$)
- Andamento della curva il più possibile simile alla retta originale nel tratto restante
- Valore puntuale del rischio identico per curva asintotica e originale per shelter nullo ($S = 1$)

La curva in grado di soddisfare le caratteristiche ricercate è stata individuata tramite numerose iterazioni e test successivi. Nel grafico sono riportati alcuni di questi passaggi e tentativi, nonché la curva considerata come punto di arrivo della ricerca.

Test e risultato: individuazione della funzione asintotica AIS migliore

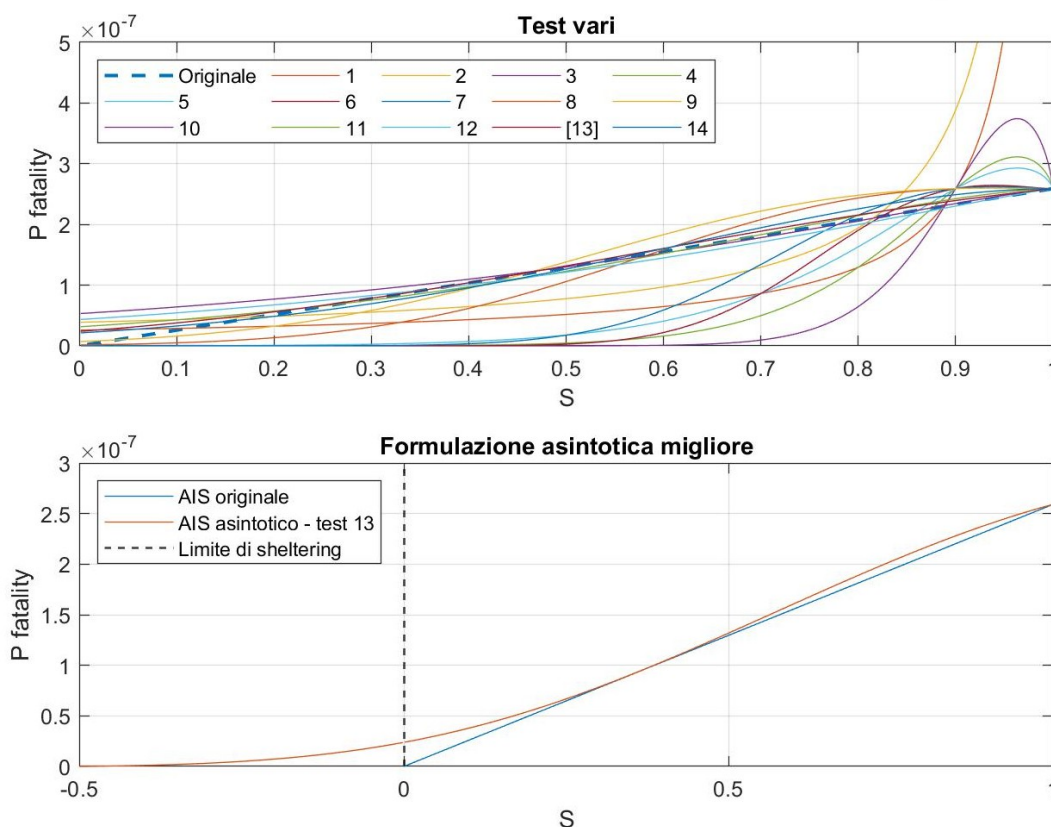


Figura 80

Il risultato proposto è quello di una curva che ricalca in modo sufficientemente preciso il tratto originale, con l'introduzione dell'asintoto in corrispondenza di $S = 0$. Il grafico è stato esteso fino a valori di sheltering negativi, che non hanno alcun significato fisico o pratico, ma che permettono di osservare in maniera maggiormente dettagliata l'andamento asintotico della curva.

Si è inoltre scelto di introdurre una curva che avesse valore di rischio, a parità di ascissa, sempre pari o superiore a quella originale, in modo da avere un approccio conservativo alla modifica del metodo AIS.

La metodologia seguita per introdurre tale metodo consiste nel sostituire il termine S , presente nei vari termini moltiplicativi che compongono la formula di $P_{fatality}$, con una nuova relazione propria dell'introduzione dell'asintoto, senza variare alcun altro parametro.

$$\begin{aligned}
 P_{fatality\ originale} &= P_{impact\ person} \cdot P_{event} \cdot P_{fatal\ impact} = \\
 &= (S \cdot \rho \cdot A_{exp}) \cdot P_{event} \cdot P_{fatal\ impact} = \\
 &= S \cdot (\rho \cdot A_{exp} \cdot P_{event} \cdot P_{fatal\ impact}) = \\
 &= S \cdot (Parte\ Nota)
 \end{aligned}$$

Una volta calcolata la "parte nota" è sufficiente, invece che per il fattore di sheltering, moltiplicarla per un coefficiente, dipendente dal fattore di sheltering, che modifichi l'influenza di tale parametro nell'espressione del rischio complessivo, senza alterare il resto della relazione.

La formulazione diventa quindi:

$$P_{impact\ person\ modif.} = coeff. \cdot \rho \cdot A_{exp} \Rightarrow P_{fatality\ modif.} = coeff. \cdot (Parte\ Nota)$$

L'espressione del coefficiente introdotto è la seguente:

$$coefficiente = \frac{1 - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{x}{10}\right)}{\left[1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{x}{10}\right)^4\right] \cdot e^{\left(\frac{x}{10}\right)^2}}$$

in cui x è definito come P_s , ovvero in un range di variazione da 0 a 10.

Tale scelta è stata effettuata per facilitare il confronto con la metodologia di Valavanis, che modella in tal modo lo sheltering ambientale.

Per esprimere il coefficiente in funzione del fattore di sheltering AIS, ovvero S , basta sfruttare la relazione che correla le due scale:

$$S = 1 - (P_s/10) \Rightarrow P_s = 10 \cdot (1 - S) \Rightarrow x = 10 \cdot (1 - S)$$

e quindi il termine $\left(\frac{x}{10}\right)$ presente nella formula può essere sostituito con $(1 - S)$.

È importante sottolineare come tale variazione della valutazione dello sheltering rimanga propria della metodologia AIS, che lo considera come parametro della probabilità di collisione tra drone e persona, a differenza di quanto proposto nella metodologia di Valavanis che lo utilizza nell'analisi di fatalità dell'impatto. Si è scelto di lavorare avendo come riferimento P_s in quanto in letteratura è presente una definizione più dettagliata del rapporto tra il valore numerico del parametro e l'effettiva caratteristica dell'ambiente operativo.

Per visualizzare come l'introduzione della curva asintotica modifichi la valutazione dello shelter, vengono riportati due dei grafici già proposti in precedenza, ricalcolati in tal senso. Non vengono riportati tutti i grafici già presentati per non appesantire la trattazione, ma il tipo di variazione che subiscono le curve è del tutto confrontabile ed estrapolabile dai due esempi proposti.

Confronto tra AIS originale e asintotico: relazioni tra P_{fatality} , ρ e shelter

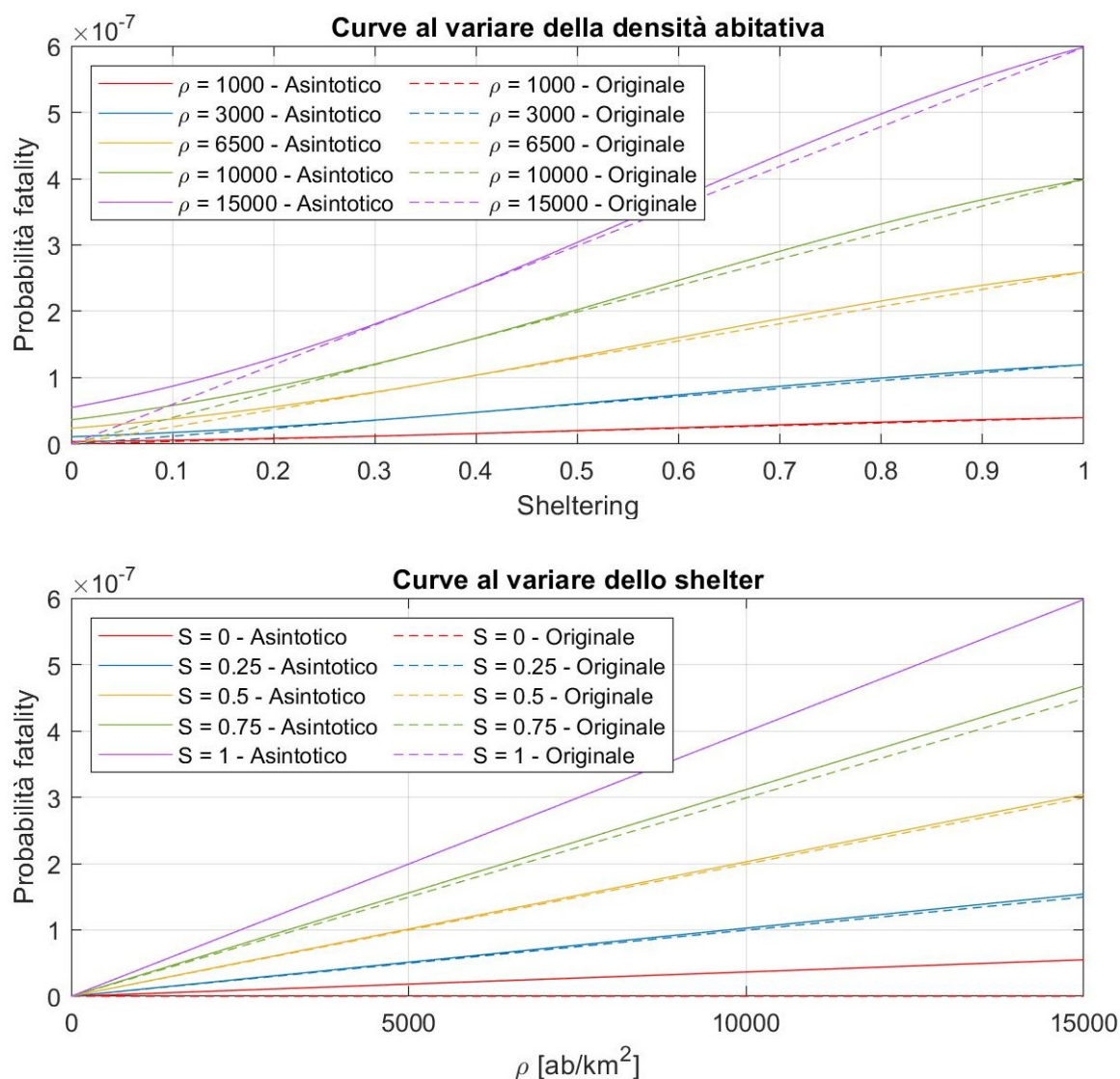


Figura 81

La differenza sostanziale, che si può notare principalmente nella sezione inferiore a sinistra del primo grafico e nelle curve in rosso del secondo, è che con la nuova metodologia asintotica non si ha valore di rischio nullo quando lo sheltering ambientale è completo, a prescindere dalla densità abitativa (nell'esempio), o da qualunque altro parametro.

Si può apprezzare come per altri valori di shelter le curve siano molto simili, e coincidano esattamente nel caso $S = 1$. Questa condizione è stata imposta già a partire dalla scelta delle caratteristiche del nuovo coefficiente, e risulta particolarmente evidente nel secondo grafico in cui le due curve viola sono perfettamente coincidenti. Tale peculiarità è anche osservabile nel primo grafico dove, a prescindere dalla densità abitativa, ogni coppia di curve di confronto tra i due metodi AIS coincide puntualmente per sheltering ambientale nullo, casistica con rischio massimo.

Confronto tra il metodo di Valavanis, di Primatesta e AIS asintotico

In questa sezione verranno effettuati confronti tra le potenzialità dei diversi metodi, le loro caratteristiche e il loro impatto sul calcolo del rischio a terra di una missione in un determinato scenario operativo. In particolare, l'analisi comparativa riguarderà la metodologia di Valavanis, la sua modifica in termini del parametro dell'area di esposizione realizzata da Primatesta, e il processo AIS modificato secondo la definizione del parametro di sheltering asintotico introdotta in questo lavoro.

Per eseguire un confronto che evidenzi in modo esaustivo le differenze tra i diversi metodi, le analisi non verranno eseguite solamente su un drone di riferimento come nelle sezioni precedenti, ma su sei modelli diversi. Per rendere realistica l'indagine, i droni usati come campione sono tutti effettivamente esistenti, e si sono utilizzati i dati più precisi disponibili al pubblico; nel caso alcuni valori non fossero reperibili, sono stati stimati.

Le analisi verranno effettuate specificatamente per valutare le caratteristiche di affidabilità, determinate dai vari metodi, richieste al drone per operare nell'ambiente prescelto, una volta fissato il valore di rischio accettabile. Il processo utilizzato è quello ricavare la P_{ev} dopo aver definito il livello di ELOS desiderato e aver fissato tutti gli altri parametri operativi. In particolare, sarà effettuata un'analisi improntata a esaminare, fissato il rischio, la variazione della probabilità di failure accettabile in funzione della densità abitativa dell'ambiente interessato dalle operazioni.

Si terranno in considerazione densità tra 0 e 10000 $ab./km^2$, evidenziando nei grafici due valori di particolare interesse: 250 e 6500 abitanti al chilometro quadrato. Il primo valore viene preso come riferimento sia per aree scarsamente abitate o rurali che per una "controlled ground area" tipica del processo SORA: si è infatti stimato che in un'area circoscritta e riservata alle operazioni si abbiano comunque numerosi membri dello staff e addetti alle operazioni, e che questo valore locale, esteso a una superficie di 1 km^2 , porti ad una densità di 250 $ab./km^2$. Il secondo valore è la densità media di Torino, usata come riferimento per le missioni in scenari urbani e con un elevato numero di persone interessate. Per quanto riguarda il valore di ELOS si è deciso di utilizzare $10^{-6} cas.*ab./FH$, soglia di rischio intermedia e attendibile compromesso tra l'essere troppo conservativi e l'esposizione eccessiva della popolazione al pericolo.

Oltre al livello di rischio accettabile, gli altri parametri operativi fissati, e comuni per tutti i metodi e i droni in esame, sono i seguenti:

- Quota operativa: 100 m
- Angolo di impatto: 60°
- Fattore di sheltering: 5.5, considerando la scala del metodo di Valavanis. Nella metodologia AIS si userà il coefficiente asintotico, definito in precedenza partendo proprio da P_s per facilitare il confronto tra i diversi metodi. Il valore 5.5 è tipico della città di Torino, in cui sono presenti molti alberi e edifici con un'altezza comunque contenuta; tale valore, oltre che ottimizzare la precisione di calcolo nel caso di $\rho = 6500 ab./km^2$, densità abitativa propria di tale città, è considerata anche un buon livello medio per permettere di valutare in un solo grafico scenari da rurali a urbani.
- Caratteristiche del corpo umano standard (modellato come cilindro):
 - Altezza = 6 feet
 - Raggio = 1 feet
 - Peso = 70 kg

Nella seguente tabella sono elencati i droni usati come campione, di cui vengono riportate solo le caratteristiche necessarie ai fini delle analisi di rischio in esame:

#	Modello	Massa [kg]	Dimensione massima [m]	Area [m ²]
1	DJI Mavic Pro	0.734	0.2147	0.0164
2	DJI Inspire 2	3.44	0.6050	0.1830
3	Matternet M2	13.2	1.1314	0.6400
4	Italdron BIGONE 8HSE	23	1.8102	1.6384
5	Flyingbasket FB3	160	2.8284	4.0000
6	Volocopter Volodrone	800	8.0000	50.2655

Tabella 7 - Caratteristiche massiche e geometriche dei droni in esame

Noti tali parametri, è possibile calcolare l'energia di impatto e l'area di esposizione per ogni caso, ed essendo fissato il valore di ELOS è possibile ricavare le curve che relazionano densità abitativa e probabilità di failure accettabile. Le curve sono tracciate per ogni drone con tutti e tre i metodi; per semplicità di lettura, in legenda è riportata per ogni linea solo una denominazione composta da una lettera e da un numero:

- V: metodologia di Valavanis
- P: metodologia di Primatesta
- A: metodologia AIS asintotica
- Numero: drone di riferimento, come indicato nella prima colonna della tabella precedente

Confronto tra metodi di Valavanis-Primatesta-AIS asintotico, ELOS = 10^{-6}

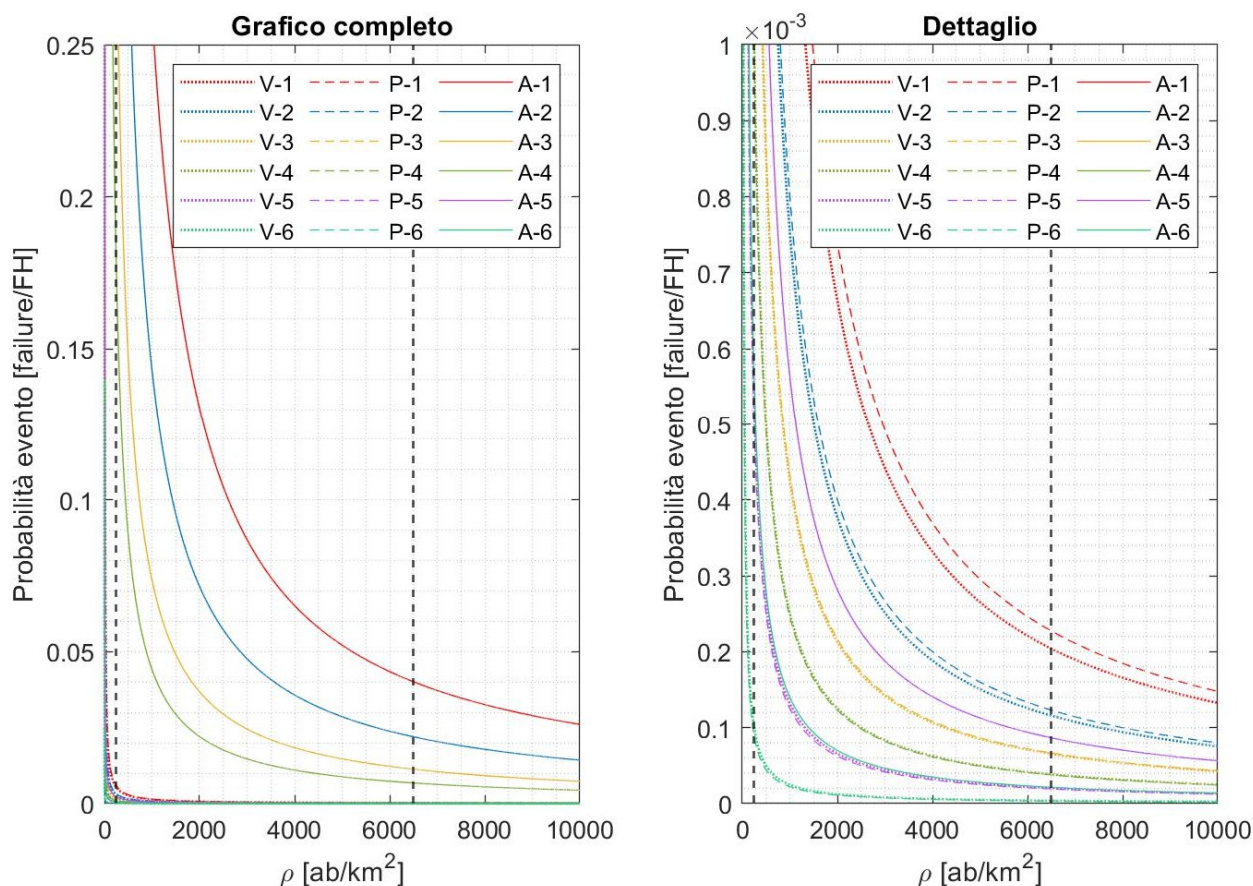


Figura 82

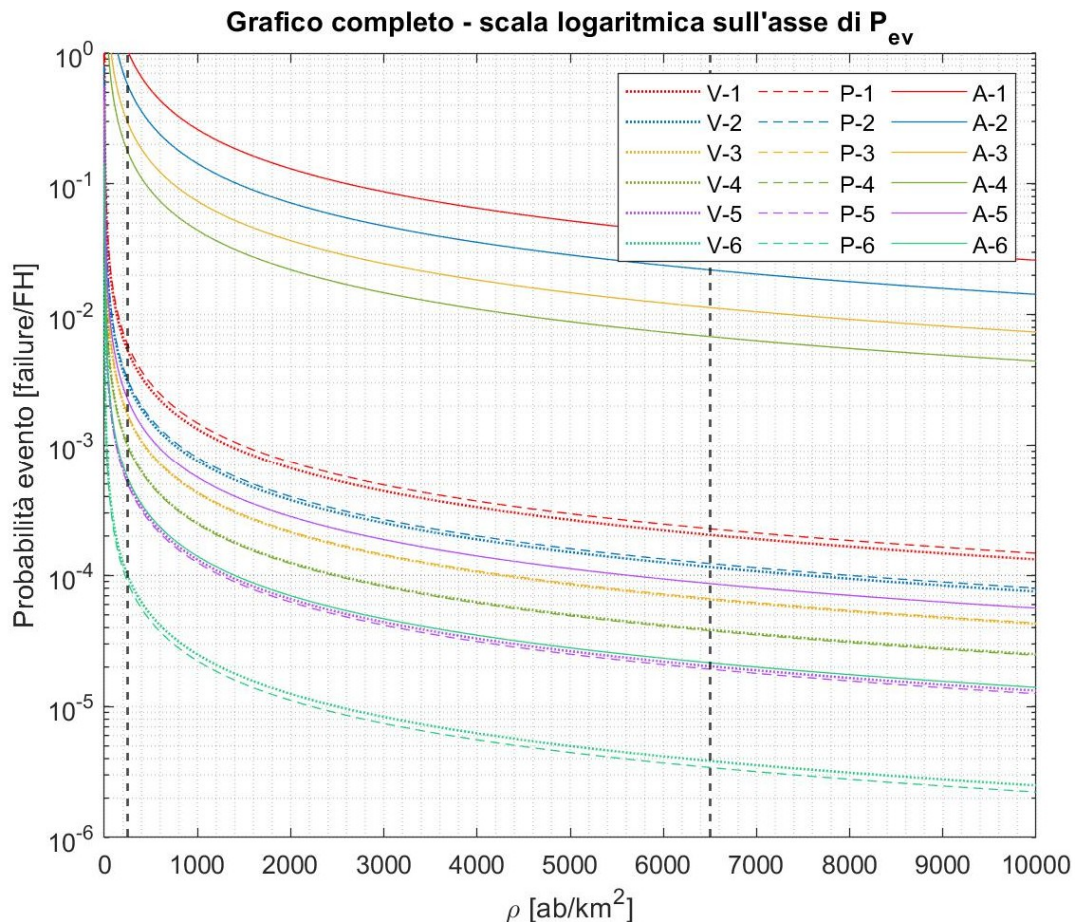


Figura 83

I tre grafici riportati permettono di apprezzare le diverse curve, il primo con una visione complessiva, il secondo con un dettaglio sulle curve caratterizzate da valori di probabilità di failure più contenuti, il terzo con una visione globale in scala logaritmica, che permette di visualizzare meglio la separazione tra le diverse linee. Nei grafici sono indicate con riga verticale tratteggiata nera le due densità abitative di particolare interesse, già citate precedentemente. In questa sezione verrà analizzato principalmente il confronto tra le diverse curve più che l'andamento generale comune tra esse, in quanto coerente a quanto già ampiamente discusso nel capitolo precedente.

Come si può immediatamente notare, tra la metodologia AIS asintotica e le due versioni basate sul metodo Valavanis, c'è un notevole divario, che arriva ad essere di uno se non due ordini di grandezza di differenza per i quattro droni più leggeri, e che comunque risulta significativo anche per i due più pesanti. Tale diversità è dovuta alla gestione completamente diversa del calcolo del rischio e della valutazione della fatalità di un eventuale incidente, essendo la metodologia AIS meno conservativa per i droni di piccola taglia rispetto alle due di Valavanis. Tale diversità nell'approccio al rischio in funzione della massa e dimensione dei droni è alla base stessa dei metodi, pensati e ottimizzati per diverse categorie di velivoli.

Le metodologie di Valavanis, originale e modificata da Primatesta, risultano sostanzialmente identiche per l'angolo di impatto scelto, con tuttavia una variazione della posizione reciproca delle due curve rispetto ai valori di probabilità di failure, al variare della massa e della dimensione del drone.

Si può infatti osservare come, a parità di ρ , per i primi due droni la curva di Primatesta mostri valori di P_{ev} superiori a quelli di Valavanis, per i due droni intermedi siano quasi perfettamente sovrapposte, mentre per i due di dimensioni più importanti risulti superiore la curva tracciata con il metodo originale. Essendo l'area di esposizione l'unica differenza tra i due metodi, ed essendo tale parametro dipendente dalla dimensione del drone in esame, le caratteristiche geometriche del velivolo risultano essere la discriminante per la variazione dell'andamento reciproco tra le due curve. Al crescere della dimensione del drone, quindi, la metodologia di Primatesta passa da essere meno conservativa a più conservativa rispetto a quella di Valavanis, fissato il livello di ELOS e gli altri parametri operativi. Tale considerazione implica che per droni di piccole dimensioni sia accettabile un'affidabilità minore, ovvero una P_{ev} superiore, per la metodologia di Primatesta rispetto a quella di Valavanis, mentre al crescere dei velivoli tale considerazione si inverte. È interessante inoltre notare come tale differenza tra le due curve, a prescindere dalla posizione reciproca tra esse, sia superiore per droni di piccole dimensioni, con, ad esempio, le due curve del drone 1 molto più distanziate che le due del drone 6.

È necessario ricordare, coerentemente con quanto discusso nella sezione apposita, che tali considerazioni sono effettuate a parità sia di ELOS che di altri parametri operativi, e in particolare dell'angolo di impatto, che influenza in modo predominante la variazione dell'area di esposizione e quindi il confronto tra i due metodi.

La metodologia AIS asintotica risulta essere decisamente meno conservativa sia di quella di Valavanis che di quella di Primatesta, in particolare per i droni di dimensione e massa inferiore: si può osservare come, per droni leggeri, l'approccio AIS permetta di ipotizzare missioni in ambiente urbano con un livello di sicurezza già elevato ($ELOS = 10^{-6} \text{ cas.* ab./FH}$) anche con livelli di affidabilità notevolmente inferiori a quelli di altri metodi. La variazione delle curve tra i diversi droni rimane coerente con quanto è facilmente intuibile e già analizzato negli altri metodi: al crescere della taglia cresce il pericolo relativo, e quindi a parità di densità abitativa è necessario avere un'affidabilità maggiore.

La metodologia AIS è stata sviluppata per droni di piccole dimensioni e per tale motivo interpreta la fatalità come la probabilità che il drone penetri il corpo umano: tale concezione perde di significato nel caso di droni di dimensioni e masse importanti, per i quali l'impatto provocherebbe non una penetrazione del velivolo nei tessuti corporei, ma più propriamente una collisione completa tra oggetto impattante e impattato. A causa di tale approccio, per droni pesanti la metodologia risulta non sufficientemente adatta, in quanto mezzi aventi dimensioni di diversi metri non possono correttamente rientrare nell'ipotesi di calcolo di un parametro di penetrazione. È poi importante notare come le dimensioni del drone influiscano sul parametro BC più che l'energia cinetica all'impatto: tale effetto porta ad una situazione controintuitiva per cui, in certi casi, un drone di categoria superiore risulta meno lesivo che uno di categoria inferiore. Infatti, al crescere delle dimensioni il parametro BC diminuisce, quindi sarà inferiore anche il livello AIS calcolato, e di conseguenza l'intera valutazione della pericolosità del drone nel caso di impatto con una persona.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva di tale processo, con i dati, per ogni drone, di dimensione, massa, Blunt Criteria, livello AIS e conseguente probabilità che l'impatto sia fatale:

Grandezza di riferimento	Drone					
	1	2	3	4	5	6
Massa [kg]	0.734	3.44	13.2	23	160	800
Dimensione massima [m]	0.2147	0.6050	1.1314	1.8102	2.8284	8.0000
Energia all'impatto [kJ]	0.3201	0.7320	3.0659	3.6856	64.6353	144.9956
Blunt Criteria	0.3003	0.0916	0.8979	0.6120	3.0301	2.7983
Livello AIS	0.9994	0.7218	1.7943	1.4140	4.6300	4.3217
Probabilità fatal impact	0	0	0.0072	0.0068	0.2869	0.2082

Tabella 8 - Parametri dei droni in esame necessari per il metodo AIS

Osservando la tabella, è possibile notare che mentre ad un aumento di massa e dimensione corrisponde sempre un aumento di energia di impatto, non sia presente la stessa relazione rispetto a BC. La crescita maggiore della dimensione caratteristica del drone rispetto alla sua energia porta a conseguenze particolari su BC, per cui talvolta droni di dimensioni maggiori presentano una capacità di penetrazione inferiore rispetto a quelli più piccoli, come si può osservare nei seguenti confronti: 2 su 1, 4 su 3, 6 su 5. Il livello AIS, avendo una dipendenza lineare con BC, presenta la medesima caratteristica, e di conseguenza anche la probabilità che l'impatto sia fatale: un drone da 23 kg risulta meno lesivo di uno da 13.2 kg, e soprattutto un drone da 160 kg risulta di quasi il 40% più pericoloso di uno da 800 kg in caso di impatto.

È inoltre necessario specificare come nel calcolo di BC si consideri la dimensione massima del drone, e quindi nell'impatto si valuti la collisione tra la persona e la sfera di massimo ingombro possibile del velivolo: tale assunzione è poco conservativa, in quanto il livello di penetrazione decresce velocemente con il crescere la dimensione. Infatti, un drone, anche con un'area in pianta notevole, potrebbe presentare una superficie laterale ridotta, e quindi un coefficiente di penetrazione molto variabile in base all'assetto nel momento dell'impatto. Un livello di BC ridotto porta ad un AIS ridotto, e quindi ad una sottostima del livello di fatalità nel caso di collisione. Questo errore di valutazione è tanto più importante quanto più il drone ha dimensioni elevate: tale considerazione giustifica il perché la metodologia AIS sia maggiormente indicata per droni di piccola taglia, per i quali, coerentemente con le proprie assunzioni, può essere usata per valutare accuratamente il rischio a terra di una missione.

Un'ulteriore miglioria al metodo riguarda i droni molto piccoli, o relativamente leggeri ma sufficientemente ampi da avere un parametro BC abbastanza alto da comportare un livello AIS minore di 1. La scala AIS contempla solo livelli nel range 1-6, dove i valori inferiori sono considerati propri di uno scenario completamente inoffensivo; il metodo è stato appunto usato a livello normativo per definire una soglia conservativa di inoffensività per la metodologia SORA, pari a 250 gr, in categoria Open. Nell'ottica di questo lavoro si è valutato che il drone 1 e il drone 2, per quanto numericamente aventi pericolosità nulla, fossero da considerare non inoffensivi poiché superano la soglia dei 250 gr: per tale motivo è stata introdotta una modifica in chiave conservativa nel calcolo di AIS. Si è infatti deciso di intervenire su quei droni che presentassero un livello AIS compreso tra 0.7 e 1, forzandone il valore a 1: tale modifica permette di introdurre una certa pericolosità anche in droni che tecnicamente risulterebbero inoffensivi, ma comunque prossimi al limite.

Tale decisione è stata maturata dopo aver osservato gli esempi proposti in questa sezione, in particolare in relazione al drone 2, valutato numericamente come inoffensivo nonostante il peso di quasi 3.5 kg.

La forzatura introdotta modifica la tabella precedentemente proposta, relativamente ai dati di livello AIS e probabilità di fatal impact, nel seguente modo:

Grandezza di riferimento		Drone					
		1	2	3	4	5	6
Calcolo esatto	Livello AIS	0.9994	0.7218	1.7943	1.4140	4.6300	4.3217
	Probabilità fatal impact	0	0	0.0072	0.0068	0.2869	0.2082
Post correzione	Livello AIS	1	1	1.7943	1.4140	4.6300	4.3217
	Probabilità fatal impact	0.0067	0.0067	0.0072	0.0068	0.2869	0.2082

Tabella 9 - Correzione livello AIS e ricalcolo della probabilità di fatal impact

Come si può notare, tale correzione in chiave conservativa, volta anche a minimizzare l'effetto dell'eccessiva influenza dell'aumento di dimensione nel calcolo di BC, riguarda i droni 1 e 2: forzando il livello AIS a 1, di conseguenza la probabilità di un impatto fatale assume un valore che, per quanto contenuto, risulta maggiore di zero. Tale correzione viene giustificata anche da ragionamenti di carattere pratico: risulta infatti sensato supporre che un drone da alcuni kg, per quanto non presenti valori elevati di pericolosità, non venga però considerato completamente inoffensivo.

Dai grafici precedenti, e dalle considerazioni che li hanno prodotti, si è dunque ottenuto il dato numerico di P_{ev} per i diversi droni nei due casi di densità abitativa di interesse. Tali valori sono stati ricavati dopo aver fissato sia il livello di ELOS che gli altri parametri operativi; tuttavia, questa procedura può essere facilmente adattata e modificata per soddisfare ogni esigenza di analisi di rischio, sia in base al velivolo utilizzato che allo scenario operativo.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori numerici ottenuti; per facilità di lettura la probabilità di failure viene espressa con il proprio reciproco, ovvero come numero di ore che intercorrono tra due avarie consecutive:

Ore che intercorrono tra due eventi [$FH/failure$]							
ρ [$ab./km^2$]	Metodo	Drone					
		1	2	3	4	5	6
250	Valavanis	188.4	331.7	586.7	998.0	1893.8	10012.7
	Primatesta	169.1	312.2	576.6	1017.1	1996.6	11232.7
	AIS asintotico	0.96	1.75	3.39	5.66	443.6	1785.5
6500	Valavanis	4899.3	8624.7	15254.8	25948.1	49239.0	260329.9
	Primatesta	4397.3	8118.3	14991.7	26443.8	51911.8	292051.4
	AIS asintotico	24.9	45.4	88.3	147.2	11534.3	46423.4

Tabella 10 - Risultati del confronto tra i diversi metodi

Come si può osservare, coerentemente a quanto visualizzato nei grafici precedenti, si ha una notevole differenza tra il valore ottenuto con la metodologia AIS asintotica e i due ottenuti con i metodi di Valavanis e Primatesta, tra loro relativamente simili. La differenza è marcata nel caso dei quattro droni più leggeri, in cui la metodologia AIS si trova ad operare in condizioni più coerenti con le proprie ipotesi, e per i quali si ottengono risultati di elevatissimo interesse pratico, soprattutto considerando che sono stati ottenuti con un ELOS già utilizzabile per la definizione di missioni reali.

A livello numerico, considerando la totalità dei metodi, è evidente come le missioni in scenario urbano presentino limitazioni molto superiori, e sensibilmente crescenti all'aumentare di massa e dimensione del drone. Tali limitazioni sono evidentemente superiori nelle metodologie di Valavanis, originale e modificata, in cui si richiedono valori di affidabilità molto superiori a quanto consentito dalle tecnologie ad oggi disponibili. Solamente per i droni leggeri usati nell'esempio si può ipotizzare che nel giro di alcuni anni di sviluppo si possa arrivare a garantire l'affidabilità necessaria: per il drone 3, ovvero per il Matternet M2, il dato attuale riporta una failure ogni 3000 ore, circa un quinto del livello necessario a rendere possibile la missione ipotizzata su Torino.

A livello di missioni su area rurale o controllata, ovvero nel caso di $\rho = 250 \text{ ab./km}^2$, si può invece osservare come l'affidabilità richiesta per i metodi di Valavanis e Primatesta sia già acquisita, o comunque prossima a valori effettivamente disponibili sul mercato. Tale netto abbassamento del livello di affidabilità richiesta rispetto allo scenario urbano è dovuto al minor numero di persone potenzialmente in pericolo, e quindi in generale ad una riduzione del rischio di avere un impatto drone-uomo: essendo il livello di rischio complessivo della missione fissato, questo si traduce nella possibilità di utilizzare droni aventi affidabilità minore.

È interessante notare come per tale valore di densità abitativa il drone più leggero, valutato con la metodologia AIS asintotica, necessiti di bassissimi livelli di affidabilità per eseguire la missione, nell'intorno di una failure per ogni ora operativa. Tale valore è stato ottenuto solo a valle della correzione introdotta per portare a 1 i droni nel range 0.7-1: se si fosse mantenuto il valore originale il drone sarebbe stato considerato inoffensivo e si sarebbe potuto quindi eseguire operazioni anche con il 100% di probabilità di caduta del drone durante la missione, cosa ovviamente non realistica. Una valutazione analoga vale per il drone 2, che senza correzione AIS sarebbe risultato anch'esso inoffensivo: in questo caso è ancora più evidente come tale modifica sia stata necessaria, così da vincolare un drone di circa 3.5 kg ad avere un'affidabilità tale per cui non sia accettabile che il velivolo abbia failure ogni ora di missione.

I valori numerici presentati nella tabella precedente evidenziano in maniera chiara come la metodologia AIS permetta di ipotizzare missioni molto meno limitate rispetto agli altri metodi proposti, e come questo possa portare ad utilizzare tale processo di calcolo del rischio per la definizione di missioni in scenari urbani, e quindi di maggior interesse pratico.

Tali risultati sono conseguenza di un calcolo del rischio più accurato e realistico rispetto ad altre metodologie, dato che la fatalità è definita relativamente alla scala AIS, a sua volta basata su dati reali raccolti analizzando incidenti di varia natura, non esclusivamente propri del mondo aeronautico.

È tuttavia evidente come i valori della metodologia AIS per i due droni di taglia superiore siano fuori scala rispetto a quelli degli altri quattro, ad ulteriore conferma di quanto già espresso in precedenza sulla difficoltà e imprecisione di tale metodo nel valutare velivoli di categorie superiori. Dai test quindi si evince che la metodologia AIS può essere propriamente applicata e dare risultati affidabili solo nel range dei droni con dimensioni contenute e massa inferiore a qualche decina di kg. La metodologia potrà forse essere estesa in futuro a droni con dimensioni via via maggiori, ma solo dopo accurati e approfonditi studi sulla relazione tra BC, dimensione del mezzo e tipologia di impatto tra velivolo e persona.

Per droni di dimensioni superiori è necessario fare affidamento sulla metodologia di Valavanis in una delle sue declinazioni, con quella di Primatesta più adatta a valutare mezzi di dimensione e massa intermedie, e quella originale più adatta alle categorie superiori. Tale distinzione è conseguenza della diversa concezione dell'area di esposizione, che nel caso originale considera una caratteristica di impatto del drone più propria di velivoli di grandi dimensioni, quindi in grado di travolgere numerose persone.

Le valutazioni sulla scelta tra le due metodologie, nel caso di uno studio molto più realistico e volto a simulare una missione effettiva, non possono inoltre prescindere da attente considerazioni sull'angolo di impatto al suolo, forte discriminante tra i due metodi, soprattutto in caso di valori contenuti tipici di traiettorie non balistiche.

Metodo AIS asintotico: variazione ELOS

Per i quattro droni più leggeri la metodologia AIS presenta valori di elevato interesse, in quanto rientrano più propriamente nelle assunzioni del metodo e nel range più corretto per il suo utilizzo. Poiché l'affidabilità minima richiesta per le missioni usate come esempio è già ampiamente disponibile sul mercato, sia per il caso a densità abitativa minore che per quello a densità maggiore, si è deciso di esplorare le potenzialità del metodo imponendo restrizioni più forti sul rischio accettabile, e quindi andando ad intervenire sul livello ELOS. L'obiettivo di queste ulteriori analisi è quello di valutare se si riescano a simulare correttamente missioni condotte in sicurezza con livelli di rischio valutati in modo sempre più conservativo.

Le simulazioni eseguite, riportate graficamente e numericamente nei due casi di densità abitativa di maggior interesse, sono state realizzate ipotizzando i seguenti valori di ELOS: 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} cas.* ab./FH. La legenda del grafico indica il livello ELOS e il numero di riferimento del drone per ogni curva tracciata.

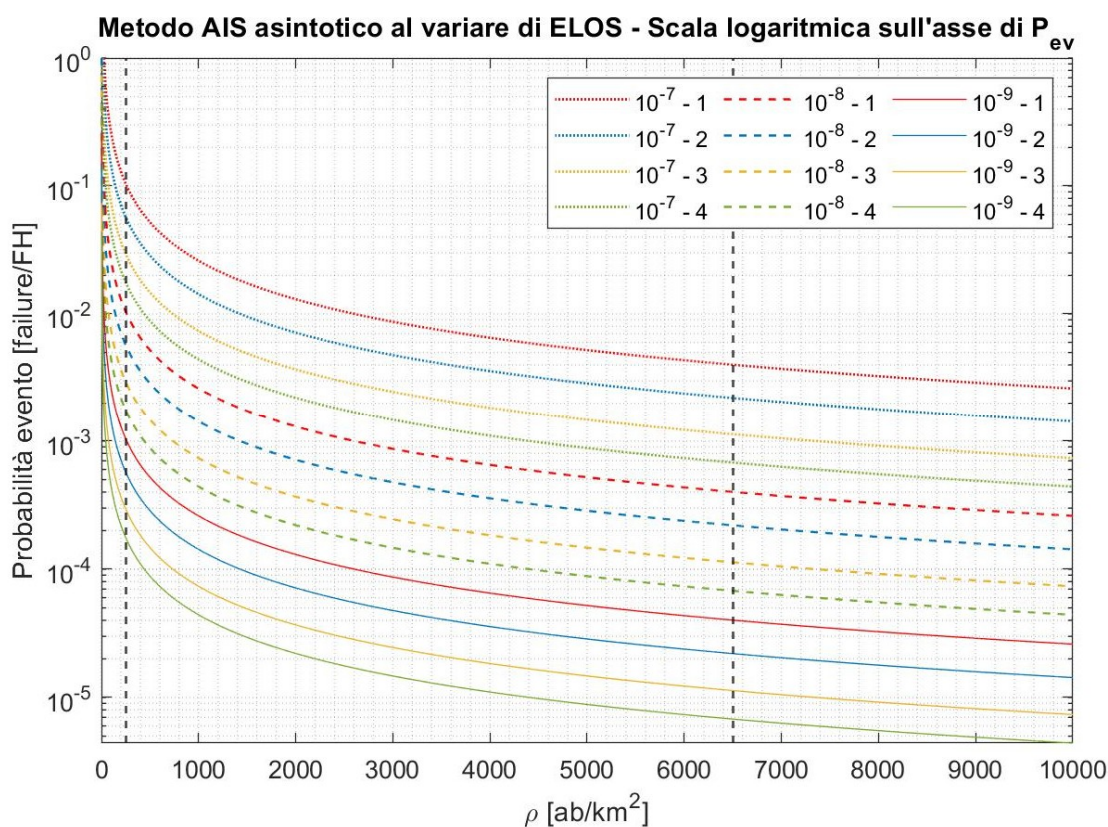


Figura 84

Come si può notare dal grafico in scala logaritmica, vi è una diretta corrispondenza tra il fattore 10 che differenzia i diversi gruppi di curve aventi il medesimo ELOS e il valore di P_{ev} calcolato, a parità di densità abitativa. Le diverse curve dimostrano come la metodologia AIS asintotica applicata a droni di piccola taglia permetta di ipotizzare missioni anche in ambito urbano e con sicurezza molto elevata, pur mantenendo un livello di affidabilità comparabile con le tecnologie attuali.

Tale valutazione può essere eseguita più facilmente osservando la tabella sottostante, che riporta i valori di affidabilità necessari, in funzione del livello ELOS, per i diversi droni nelle due condizioni di densità abitativa considerati come esempio (250, 6500 *ab./km²*).

Ore che intercorrono tra due eventi [<i>FH/failure</i>]					
ELOS [<i>cas.* ab./FH</i>]	ρ [<i>ab./km²</i>]	Drone			
		1	2	3	4
10^{-7}	250	9.586	17.48	33.942	56.632
	6500	249.24	454.47	882.5	1472.4
10^{-8}	250	95.86	174.8	339.42	566.32
	6500	2492.4	4544.7	8825	14724
10^{-9}	250	958.6	1748	3394.2	5663.2
	6500	24924	45447	88250	147240

Tabella 11 - Affidabilità necessaria al variare di ELOS, densità abitativa e drone

Si osservi come è evidente il fattore 10 tra le diverse analisi presenti nella tabella, e come solamente il caso con $ELOS = 10^{-9}$ *cas.* ab./FH*, livello di rischio analogo a quello tipicamente richiesto in aviazione generale, presenti valori di affidabilità notevolmente superiori a quelli commerciali, mentre per tutti gli altri esempi si può notare come si sia in un range pienamente compatibile con lo stato dell'arte dei droni attuali.

La metodologia AIS si dimostra in grado di simulare al meglio le operazioni per droni leggeri anche in scenari cittadini e con parametri di sicurezza più elevati rispetto ad altri metodi: può essere la metodologia più promettente per futuri sviluppi e affinamenti tali da permettere avanzati studi di fattibilità di missioni in scenari densamente abitati.

Conclusioni

Come argomentato nel corso della trattazione, le metodologie per la valutazione del rischio a terra sono ancora in fase di sperimentazione, sviluppo e affinamento, per poter passare da processi di derivazione aeronautica a specifici metodi sviluppati propriamente per il mondo unmanned.

Tale analisi di rischio a terra si inserisce come elemento chiave e di maggior criticità nel contesto di uno sforzo normativo e organizzativo in corso d'opera, al fine di introdurre la mobilità per mezzo di droni nel contesto urbano e non solo, pur mantenendo elevati standard di sicurezza.

Si è visto come gli enti normatori stiano proponendo, modificando e implementando nuove regolamentazioni e specifiche procedure per poter autorizzare missioni sempre più complesse e diversificate, mantenendo comunque la sicurezza delle persone come priorità assoluta. La missione viene quindi analizzata sotto numerosi punti di vista, per riuscire a trovare il giusto compromesso tra le possibilità realizzative e i vincoli da rispettare, sia in fase di sua progettazione, che di mitigazione durante la sua esecuzione, per poter assicurare che il rischio sia minimizzato.

In parallelo all'evoluzione normativa, è in corso anche lo sviluppo e l'implementazione di numerose metodologie di analisi del rischio complessivo proprio della missione, in relazione con tutti i possibili parametri che possono influenzarlo. Sono da considerare tutti gli aspetti che riguardano non solo il drone stesso, ma anche l'ambiente operativo, che, come scenario della missione, risulta essere un fattore chiave nello stabilire la pericolosità di quest'ultima. In particolare, sono da considerare sia le caratteristiche dell'aerea interessata dalle operazioni a terra, quali densità abitativa media e fattore di sheltering ambientale per la popolazione, che quelle del volume aereo in cui si svolge la missione, le sue caratteristiche e il rischio di possibili incontri con altri velivoli, manned e unmanned.

Si sono analizzati numerosi processi disponibili per il calcolo del rischio, che vanno da metodologie semplificate e/o standardizzate a vere e proprie analisi specifiche da effettuare per ogni missione, considerando in ogni caso un vasto spettro di parametri tecnici e di valutazioni operative, nonché le possibili mitigazioni del pericolo da applicare nei diversi casi. È poi apparso evidente, vista la complessità del processo SORA, come sia necessario sviluppare un sempre crescente ventaglio di procedure di analisi del rischio standardizzate; al momento le analisi STS e PDRA sono poche, non molto flessibili e difficilmente applicabili a molti tipi di missione che avrebbero interesse pratico. In una sezione apposita della tesi si è inoltre evidenziato come sia in corso un processo di omogeneizzazione di tali procedure a livello europeo, che sta spingendo gli enti normatori italiani a rivedere le proprie analisi di rischio standardizzate per allinearsi sempre di più ai canoni europei unificati.

Molti di questi processi strutturati di analisi del rischio complessivo della missione risultano tuttavia eccessivamente vincolanti; per questo motivo, e per definire in maniera più efficace le mitigazioni necessarie, è indispensabile l'introduzione di analisi più sofisticate e dettagliate per la valutazione della pericolosità di un eventuale impatto del drone al suolo. Tale analisi risulta tanto più importante quanto più è elevata la taglia del drone e la densità abitativa propria dell'area delle operazioni.

La possibilità di calcolare accuratamente il rischio per le persone presenti nell'area coinvolta dalla missione risulta essere un punto chiave nella definizione di un'operazione eseguibile in sicurezza: per questo motivo nel corso della tesi si è insistito con particolare enfasi sull'analisi di tale fattore e sul confronto tra i diversi metodi presenti in letteratura, o sperimentali, che possono essere sfruttati per tale valutazione.

La metodologia suggerita dalle linee guida ENAC si è dimostrata eccessivamente conservativa a causa della prescritta valutazione della probabilità che il drone abbia una failure: infatti, in assenza di dati storici e affidabili, viene indicato di considerare che il drone presenti il 100% di probabilità di failure ogni missione. Tale assunzione risulta estremamente limitante e corrisponde a una impossibilità pressoché totale di definire una missione, anche su aree con densità abitative bassissime. Anche considerando una probabilità di failure reale, basata su dati storici di droni esistenti, il metodo risulta comunque tendenzialmente conservativo e vincolante, permettendo missioni di possibile interesse pratico solo considerando la soglia di rischio maggiore suggerita dalle linee guida, la quale richiede l'applicazione di una serie di mitigazioni. Concludendo, in generale il metodo si è rivelato poco adatto a tenere in considerazione i diversi parametri ambientali, soprattutto per il fatto che esclude ogni considerazione sulle caratteristiche di sheltering dell'area di interesse.

Il metodo di Valavanis et al. al momento è il più diffuso ed utilizzato, e presenta caratteristiche ottimizzate per il calcolo di droni di dimensione e massa elevate, con alcuni limiti dovuti principalmente alla valutazione eccessivamente conservativa dell'area di esposizione nel caso di collisioni drone-uomo con ridotti angoli di impatto. Tali limitazioni sono dovute al fatto che tale metodo si basa su considerazioni e dati tipici dell'aviazione generale, che enfatizzano la caratteristica conservativa del metodo, con conseguenti vincoli alle possibilità operative della missione, relativi principalmente alla densità abitativa dell'area sorvolabile e al fattore di affidabilità minimo richiesto dal drone.

La metodologia sviluppata da Primatesta et al. parte dal procedimento di Valavanis e lo modifica al fine di mitigarne le limitazioni: viene infatti ridefinita la formula per la valutazione dell'area di esposizione in modo che ad angoli di impatto ridotti corrisponda un rischio valutato in modo più corretto. Tale miglioria permette di adattare maggiormente il metodo di Valavanis, attualmente il più utilizzato, ad una tipologia di drone più piccola, riducendone inoltre la caratteristica eccessivamente conservativa in caso di impatti caratterizzati da glide. Tale riformulazione tiene conto di come una o più persone impattate dal drone ne arrestino la marcia lungo la traiettoria a terra, riducendo effettivamente l'area di collisione con ulteriori corpi; tale valutazione è tanto più vera quanto più il drone ha dimensione e massa ridotte.

La metodologia legata alla Abbreviated Injury Scale (AIS) mostra invece un approccio innovativo al calcolo del rischio a terra, in quanto parte dall'analisi delle lesioni e della mortalità che l'impatto di un oggetto ha su una persona. Considera inoltre il fattore di sheltering in modo differente dalla metodologia di Valavanis, passando da fattore che riduce la possibile fatalità dell'impatto a parametro che riduce la probabilità che il drone colpisca la persona lungo la sua traiettoria di caduta. Tale valutazione porta tuttavia ad un risultato eccessivamente conservativo in caso di schermatura completa: il rischio scende a valore zero, a prescindere dalla taglia del drone. Per superare tale limite, proprio di questo metodo, in questa tesi viene proposto un nuovo coefficiente che sia espressione del fattore di sheltering, e che introduca un asintoto tendente a zero nella regione in cui altrimenti si avrebbe valore nullo del rischio, pur ricalcando in maniera precisa l'andamento della curva originale per un ampio range di variazione di tale parametro.

Tale miglioria consente di evitare situazioni non realistiche o non sufficientemente conservative, permettendo una valutazione più accurata del rischio in tutta la gamma di scenari possibili.

Dal confronto effettuato tra i metodi ENAC, Valavanis originale, Valavanis modificato Primatesta e AIS, si può concludere che il primo è eccessivamente conservativo e quindi rende difficoltosa una vera e propria analisi comparativa con gli altri, che il secondo e il terzo sono sostanzialmente sovrapponibili ad esclusione della regione con angoli di impatto contenuti, coerentemente alla riformulazione proposta da Primatesta, e che il quarto è molto promettente, in particolare nella versione asintotica presentata in questa tesi, che conduce ad una valutazione del rischio inferiore alle altre procedure, con una accuratezza maggiore ed evitando assunzioni eccessivamente conservative. Da tale analisi si ricava come, fissato il livello di rischio massimo accettabile (ELOS), si possa riuscire a definire missioni in scenari ad alta densità abitativa con droni dotati di un'affidabilità prossima allo stato dell'arte attuale, se non addirittura già disponibile sul mercato.

In assoluto la metodologia AIS si è dimostrata come la più promettente per simulare e analizzare missioni in ambito urbano e con droni di piccola taglia: tale qualità deriva dalla definizione stessa del metodo e al momento ne rappresenta forse anche il limite. Essendo l'impatto valutato come una penetrazione tra il drone in caduta e il corpo umano, e il drone stesso modellato per semplicità come una sfera di diametro pari alla sua dimensione massima, in caso di velivoli di grandi dimensioni il modello risulta non accurato in quanto la capacità di penetrazione diminuisce eccessivamente. Tale diminuzione non è sufficientemente bilanciata dall'aumento della pericolosità del mezzo al crescere della massa, e quindi si verificano situazioni illogiche, in cui droni di taglia superiore risultano meno lesivi di mezzi più piccoli e leggeri. Per tale motivo, al momento il metodo risulta estremamente promettente per droni di piccola taglia, mentre per l'applicabilità a mezzi di maggiori dimensioni sono da compiere ulteriori studi e valutazioni sulle collisioni che interessano l'intero corpo umano.

Concludendo, l'analisi svolta in questa tesi permette di affermare che per droni di dimensioni importanti il metodo più accurato per la valutazione del rischio a terra risulta essere la metodologia di Valavanis riformulata da Primatesta, che ne espande il range applicativo ad una più vasta gamma di mezzi e di possibili traiettorie di impatto, mentre per droni più leggeri è preferibile utilizzare il metodo AIS, che rende possibili missioni complesse anche in presenza di scenari con forti densità abitative.

Come possibile futuro sviluppo degli studi svolti in questa tesi, si può ipotizzare di espandere il campo di applicabilità del metodo AIS, considerando non solo la modifica della relazione con il fattore di sheltering ambientale proposta in questo lavoro, ma anche una ridefinizione delle formule che analizzano le caratteristiche dell'impatto drone-uomo in funzione dei parametri tipici del velivolo.

Glossario

AEC	airspace encounter category
AI	artificial intelligence
AIS	abbreviated injury scale
AMC	acceptable means of compliance
AO	airspace observer
AOC	air operator certificate
APR	aeromobile a pilotaggio remoto
ARC	air risk class
ATCO	air traffic control officers
ATM	air traffic management
BC	blunt criteria
BVLOS	beyond visual line of sight
CAAC	civil aviation administration of China
CAAS	civil aviation authority of Singapore
CASA	civil aviation safety authority
CE	comunità europea
CNS	communications, navigation, surveillance systems
ConOps	concept of operations
DAA	detect and avoid
DEVT	ducted electric vector thrust
DOA	design organisational approval
DR	delegated rules
EASA	European Union aviation safety agency
ED	executive director
ELOS	equivalent level of safety
ENAC	ente nazionale per l'aviazione civile
ENAV	ente nazionale per l'assistenza al volo
ERP	emergency response plan
FAA	federal aviation administration
FOCA	federal office of civil aviation
GM	guidance material

GPS	global positioning system
GRC	ground risk class
ICAO	international civil aviation organization
IFR	instrument flight rules
IR	implementing rules
JARUS	joint authorities for rulemaking on unmanned systems
LG	linee guida
LUC	light UAS operator certificate
MTOM	maximum take-off mass
NASA	national aeronautics and space administration
NOTAM	notice to airmen
OSO	operational safety objective
PAV	passenger air vehicle
PDRA	predefined risk assessment
Q&A	question and answer
RPAS	remotely piloted aircraft system
SAIL	specific assurance and integrity level
SORA	specific operations risk assessment
STS	standard scenario
TMPR	tactical mitigation performance requirement
UA	unmanned aircraft
UAM	urban air mobility
UAS	unmanned aircraft system
UAV	unmanned aerial vehicle
UTM	unmanned aircraft system traffic management
VLL	very low level
VLOS	visual line of sight

Lista delle figure

Figura 1 - Aurora	4
Figura 2 - Lillium Air Mobility	4
Figura 3 - Joby aviation: S4	5
Figura 4 - Volocopter: Volocity	6
Figura 5 - Volocopter: Voloport	8
Figura 6 - Airbus: City Airbus	9
Figura 7 - Airbus: Vahana	10
Figura 8 - XTI aircraft: Trifan600	10
Figura 9 - Ehang: EH216	11
Figura 10 - Lift Aircraft: Hexa	13
Figura 11 - Opener Blackfly	13
Figura 12 - Bell: Nexus 4EX (sinistra) e 6HX (destra)	14
Figura 13 - Wisk: Cora	14
Figura 14 - Kitty Hawk: Heaviside	15
Figura 15 - Volocopter: Volodrone	15
Figura 16 - Boeing: CAV	16
Figura 17 - Flying Basket: FB3	16
Figura 18 - Ehang: Falcon B (sinistra) e GD2.OX (destra)	17
Figura 19 - Partnership tra Ehang e DHL-Sinotrans	17
Figura 20 - Pipistel: Nuuva V300	18
Figura 21 - Amazon Prime Air: MK27	18
Figura 22 - Flytrex	19
Figura 23 - Zipline	20
Figura 24 - Zipline: decollo e atterraggio	21
Figura 25 - Airbus: Skyways	21
Figura 26 - F-drones	22
Figura 27 - Flirtey: Eagle	22
Figura 28 - Wingcopter: Wingcopter 178	23
Figura 29 - Wingcopter: Wingcopter 198	25
Figura 30 - DHL: Parcelcopter 4	25
Figura 31 - Wing	25
Figura 32 - Matternet: M2V9	26

Figura 33 - Categoria Open	30
Figura 34 - Distinzione tra Categoria Open A1, A2 e A3	32
Figura 35 - Categoria Specific	33
Figura 36 - Caratteristiche STS-01 e STS-02	35
Figura 37 - Caratteristiche area di buffer	35
Figura 38 - Caratteristiche PDRA-S01, PDRA-S02, PDRA-G01 e PDRA-G02	37
Figura 39 - Q&A: Sorvolo assembramenti di persone	41
Figura 40 - Confronto tra le categorie Open, Specific e Certified	42
Figura 41 - Roadmap di sviluppo di U-space	43
Figura 42 - Q&A: operazioni autonome	44
Figura 43 - SORA: classificazione UAS e scenario operativo	47
Figura 44 - SORA: legame tra integrity, assurance e robustness	48
Figura 45 - SORA: legame mitigazioni per ground risk e robustness	49
Figura 46 - SORA: mitigazione M1, integrity	50
Figura 47 - SORA: mitigazione M1, assurance	51
Figura 48 - SORA: mitigazione M2, integrity	52
Figura 49 - SORA: mitigazione M2, assurance	53
Figura 50 - SORA: mitigazione M3, integrity	54
Figura 51 - SORA: mitigazione M3, assurance	55
Figura 52 - SORA: determinazione ARC iniziale	57
Figura 53 - SORA: mitigazione ARC	59
Figura 54 - SORA: legame ARC, TMPR e robustezza	61
Figura 55 - SORA: legame ARC, TMPR e system risk ratio	62
Figura 56 - SORA: legame TMPR, integrity e assurance	63
Figura 57 - SORA: determinazione SAIL	64
Figura 58 - SORA: elenco OSO e relazione con SAIL	65
Figura 59 - SORA: aree adiacenti	66
Figura 60 - Passaggi analisi rischio consigliata da ENAC	78
Figura 61 - Area di esposizione al variare di θ	89
Figura 62 - Confronto tra velocità ed energia cinetica vera all'impatto e terminale	91
Figura 63 - Area di esposizione al variare di θ	93
Figura 64 - Confronto $P_{casualty}$ al variare di P_{ev} e p	94
Figura 65 - Valutazioni sull'area di esposizione al variare dell'angolo di impatto e della dimensione massima del drone	95

Figura 66 - $P_{fatality}$ al variare dell'energia di impatto	96
Figura 67 - Dettaglio (della figura 66)	97
Figura 68 - $P_{fatality}$ al variare del fattore di sheltering	97
Figura 69 - Influenza di vari parametri e legame con la formulazione dell'area ELOS: 10^{-6}	99
Figura 70 - Rapporto densità abitativa possibile in funzione di θ e sheltering al variare di ELOS	101
Figura 71 - Rapporto densità abitativa possibile in funzione della probabilità evento al variare di ELOS	102
Figura 72 - Dettaglio sull'influenza dei parametri (della figura 71)	103
Figura 73 - Dettaglio sul confronto densità abitativa possibile in casi di interesse ELOS: 10^{-6}	104
Figura 74 - Confronto densità abitativa possibile al variare del tempo missione sull'area di interesse	105
Figura 75 - Confronto tra metodologia ENAC e valutazioni ELOS	106
Figura 76 - Relazione livello AIS e probabilità di sopravvivenza	108
Figura 77 - Relazione livello AIS e fatalità	109
Figura 78 - Relazione tra $P_{fatality}$ e vari parametri, per diversi valori di shelter	111
Figura 79 - Relazione tra $P_{fatality}$ e shelter, in funzione di vari parametri	112
Figura 80 - Test e risultato: individuazione della funzione asintotica AIS migliore	114
Figura 81 - Confronto tra AIS originale e asintotico: relazioni tra $P_{fatality}$, p e shelter	116
Figura 82 - Confronto tra metodi di Valavanis-Primatesta-AIS asintotico, ELOS: 10^{-6}	118
Figura 83 - Grafico completo - scala logaritmica sull'asse di P_{ev}	119
Figura 84 - Metodo AIS asintotico al variare di ELOS - scala logaritmica sull'asse di P_{ev}	125

Lista delle tabelle

Tabella 1 - Quadro normativo di riferimento	28
Tabella 2 - Classificazione IT-PDRA	38
Tabella 3 - Simulazioni analisi SORA: casi analizzati	68
Tabella 4 - Simulazione analisi SORA: caratteristiche dei droni	68
Tabella 5 - Conversione unità di misura della probabilità di caduta	82
Tabella 6 - Calcolo parametri per la metodologia ENAC	82
Tabella 7 - Caratteristiche massiche e geometriche dei droni in esame	118
Tabella 8 - Parametri dei droni in esame necessari per il metodo AIS	121
Tabella 9 - Correzione livello AIS e ricalcolo della probabilità di fatal impact	122
Tabella 10 - Risultati del confronto tra i diversi metodi	122
Tabella 11 - Affidabilità necessaria al variare di ELOS, densità abitativa e drone	126

Bibliografia

La bibliografia risulta suddivisa per capitolo di riferimento.

Primo capitolo

ⁱ «Urban Air Mobility – Aurora Flight Sciences», <https://www.aurora.aero/urban-air-mobility/>.

ⁱⁱ «Aurora Flight Sciences Pegasus PAV», <https://evtol.news/aurora>.

ⁱⁱⁱ «Lilium Air Mobility - Lilium», <https://lilium.com/>.

^{iv} «Why We're Focusing on Regional Air Mobility - Lilium», <https://lilium.com/newsroom-detail/why-regional-air-mobility>.

^v «Joby Aviation | Joby», <https://www.jobyaviation.com/>.

^{vi} «Uber Air | Uber Elevate», Uber, <https://www.uber.com/it/it/elevate/>.

^{vii} «Homepage», Volocopter, <https://www.volocopter.com/>.

^{viii} «Volocopter-WhitePaper-1-01.pdf»,
<https://www.volocopter.com/content/uploads/Volocopter-WhitePaper-1-01.pdf>.

^{ix} «Volocopter-WhitePaper-2-0.pdf»,
<https://www.volocopter.com/content/uploads/Volocopter-WhitePaper-2-0.pdf>.

^x «CityAirbus», Airbus, <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html>.

^{xi} «Vahana», Airbus, <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/vahana.html>.

^{xii} «XTI aircraft - Air mobility revolutionized», <https://www.xtiaircraft.com/>.

^{xiii} «EHang | Autonomous Aerial Vehicle (AAV) Innovator for Urban Air Mobility (UAM)»,
<https://www.ehang.com/index.html>.

^{xiv} «EHang White Paper on Urban Air Mobility Systems.pdf»,
<https://www.ehang.com/app/en/EHang%20White%20Paper%20on%20Urban%20Air%20Mobility%20Systems.pdf>.

^{xv} «Multirotor Drone Flying Experience», LIFT Aircraft, <https://www.liftaircraft.com>.

^{xvi} «Opener», <https://www.opener.aero>.

^{xvii} «Bell Nexus», Bell Flight, <https://www.bellflight.com/products/bell-nexus>.

^{xviii} «Wisk | We've Arrived.», Wisk, <https://wisk.aero/>.

^{xix} «Heaviside», <https://kittyhawk.aero/heaviside/>.

Secondo capitolo

^{xx} «Boeing: Cargo Air Vehicle: Boeing tests the advanced technology behind its Cargo Air Vehicle.», <https://www.boeing.com/features/highlights/2020/cargo-air-vehicle>.

^{xxi} «FlyingBasket | Droni per trasportare carichi pesanti in aree remote», FlyingBasket, <https://flyingbasket.com/it/flying-basket-droni-per-trasporto-carichi-pesanti/>.

^{xxii} «EHang | DHL-Sinotrans and EHang jointly launch first fully-automated and intelligent urban drone delivery solution in China», <https://www.ehang.com/news/497.html>.

^{xxiii} «Nuuva V300 – Pipistrel Aircraft», <https://www.pipistrel-aircraft.com/aircraft/nuuva-v300/>.

^{xxiv} «Amazon.com: Prime Air», <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>.

^{xxv} Name, *Amazon Delivery Drone: Five Key Things We Know So Far*, 2019, <https://techmonitor.ai/technology/data/amazon-delivery-drone>.

^{xxvi} «Flytrex Drone Service Tees off at U.S. Golf Course [VIDEO] | Air Cargo World», 5 settembre 2018, <https://aircargoworld.com/news/flytrex-drone-service-tees-off-at-u-s-golf-course-video/>, <https://aircargoworld.com/news/flytrex-drone-service-tees-off-at-u-s-golf-course-video/>.

^{xxvii} «Zipline - Vital, On-Demand Delivery for the World», <https://flyzipline.com/>.

^{xxviii} Real Engineering, *How Rwanda Built A Drone Delivery Service*, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=jEbRVNxL44c>.

^{xxix} James Vincent, «Self-Flying Drones Are Helping Speed Deliveries of COVID-19 Vaccines in Ghana», *The Verge*, 9 marzo 2021, <https://www.theverge.com/2021/3/9/22320965/drone-delivery-vaccine-ghana-zipline-cold-chain-storage>.

^{xxx} «Airbus' Skyways Drone Trials World's First Shore-to-Ship Deliveries», Airbus, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/03/airbus-skyways-drone-trials-worlds-first-shoretoship-deliveries.html>.

^{xxxi} Redazione di Aviation Report News Civili 3 min read, «Il drone Airbus Skyways collauda le prime consegne terra-nave al mondo», *Aviation Report* (blog), 22 marzo 2019, <https://www.aviation-report.com/il-drone-airbus-skyways-collauda-le-prime-consegne-terra-nave-al-mondo/>.

^{xxxii} «F-Drones | Marine Delivery | Singapore», F-drones, <https://www.f-drones.com>.

^{xxxiii} Flirtey, «Flirtey | Real-Time Delivery by Flying Robots», Flirtey, <https://www.flirtey.com/>.

^{xxxiv} «Wingcopter GmbH – Technology with a Purpose», <https://wingcopter.com/>.

^{xxxv} «Rapid Response from the Air: Medicines Successfully Delivered Using a Parcel Drone in East Africa», DHL, <https://www.dhl.com/global-en/home/press/press-archive/2018/rapid-response-from-the-air-medicines-successfully-delivered-using-a-parcel-drone-in-east-africa.html>.

^{xxxvi} REDAZIONE, «DHL abbandona il progetto Parcelcopter», *Drone Blog News* (blog), 10 agosto 2021, <https://www.droneblog.news/dhl-abbandona-il-progetto-parcelcopter-per-la-consegna-di-pacchi-con-droni/>.

^{xxxvii} «Wing», X, the moonshot factory, <https://x.company/projects/wing/>.

^{xxxviii} «Wing (Company)», in *Wikipedia*, 6 maggio 2021, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wing_\(company\)&oldid=1021675901](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wing_(company)&oldid=1021675901).

^{xxxix} «Matternet», Matternet, <https://mttr.net>.

^{xl} Die Schweizerische Post, «Drones for Transport Operations», Swiss Post, <https://www.post.ch/en/about-us/innovation/innovations-in-development/drones?shortcut=opp-en-about-us-company-innovation-swiss-post-s-innovations-for-you-drones>.

Terzo capitolo

^{xli} «EU Drone Regulation», Droneinfo, <https://www.droneinfo.fi/en/eu-drone-regulation>.

^{xlii} Danilo Scarato, «Droni 2021, ENAC pubblica il regolamento aggiuntivo UAS-IT», *Quadricottero News* (blog), <https://www.quadricottero.com/2021/01/droni-2021-enac-pubblica-il-regolamento.html>.

^{xliii} «Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and Regulation (EU) 2019/945)», EASA, <https://www.easa.europa.eu/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulation-eu>.

^{xliv} «Civil Drones (Unmanned Aircraft)», EASA, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas>.

^{xliv} «Open Category - Civil Drones», EASA, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/open-category-civil-drones>.

^{xlvi} «Specific Category - Civil Drones», EASA, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/specific-category-civil-drones>.

^{xlvi} «Certified Category - Civil Drones», EASA, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones>.

^{xlvi} «PDF.pdf», <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0639&from=EN>.

^{xlvi} PwC, «Drones Law: EASA Published Opinion on Standard Scenarios», *PwC* (blog), <https://blog.pwclegal.at/en/easa-published-opinion-on-standard-scenarios/>.

^l Fabio Affortunato, «ENAC - Scenari standard IT-STS-01 e IT-STS-02 - 4mydrone», <https://4mydrone.com/it/>, <https://4mydrone.com/it/normativa-uas/normativa-uas-droni-easa/scenari-enac-it-sts-01-it-sts-02/>.

^{li} «JAR doc 06 SORA (package) | JARUS», <http://jarus-rpas.org/content/jar-doc-06-sora-package>.

^{lii} «I Fall under the ‘Specific’ Category, so How Do I Obtain an Authorisation?», EASA, <https://www.easa.europa.eu/faq/116462>.

^{liii} Danilo Scarato, «EASA risolve il problema dei DRONI senza marcatura di classe negli Scenari Standard», *Quadricottero News* (blog), <https://www.quadricottero.com/2021/01/easa-risolve-il-problema-dei-droni.html>.

^{liv} «SESAR Joint Undertaking | U-space», <https://www.sesarju.eu/U-space>.

^{lv} «U-space Drone Operations Europe.pdf», consultato 25 settembre 2021, <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/U-space%20Drone%20Operations%20Europe.pdf>.

^{lvi} «CORUS ConOps vol1.pdf», consultato 25 settembre 2021, <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol1.pdf>.

^{lvii} «CORUS ConOps vol2.pdf», consultato 25 settembre 2021, <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf>.

^{lviii} «Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Revision from September 2021).pdf», consultato 25 settembre 2021, <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy%20Access%20Rules%20for%20Unmanned%20Aircraft%20Systems%20%28Revision%20from%20September%202021%29.pdf>.

^{lix} «LG 2020/001-NAV», ENAC, <http://www.enac.gov.it/la-normativa/normativa-enac/linee-guida/lg-2020001-nav>.

^{lx} «operating_a_drone_commercially_-_webinar_q_and_a.pdf», https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/operating_a_drone_commercially_-_webinar_q_and_a.pdf.

Quarto e quinto capitolo

^{lxi} «LG-2017_001-NAV Ed. 2 Jan 2020_con Appendice (9 gennaio 2020)_0.pdf», https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2020-Gen/LG-2017_001-NAV%20Ed.%202%20Jan%202020_con%20Appendice%20%289%20gennaio%202020%29_0.pdf.

^{lxii} Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P. Valavanis, e Les A. Piegł, *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System: Issues, Challenges, Operational Restrictions, Certification, and Recommendations* (Springer Science & Business Media, 2011).

^{lxiii} K. Dalamagkidis, K. P. Valavanis, e L. A. Piegł, «On Unmanned Aircraft Systems Issues, Challenges and Operational Restrictions Preventing Integration into the National Airspace System», *Progress in Aerospace Sciences* 44, n. 7 (1 ottobre 2008): 503–19, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.08.001>.

^{lxiv} Konstantinos Dalamagkidis, a c. di Kimon P. Valavanis e George J. Vachtsevanos, «Handbook of Unmanned Aerial Vehicles», (Dordrecht: Springer Netherlands, 2015), 57–81, https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_93.

^{lxv} Stefano Primatesta, Alessandro Rizzo, e Anders la Cour-Harbo, «Ground Risk Map for Unmanned Aircraft in Urban Environments», *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 97, n. 3 (1 marzo 2020): 489–509, <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01015-z>.

-
- ^{lxvi} Stefano Primatesta et al., «An Innovative Algorithm to Estimate Risk Optimum Path for Unmanned Aerial Vehicles in Urban Environments», *Transportation Research Procedia*, INAIR 2018 AVIATION ON THE GROWTH PATH, 35 (1 gennaio 2018): 44–53, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.006>.
- ^{lxvii} Anders la Cour-Harbo, «Quantifying Risk of Ground Impact Fatalities for Small Unmanned Aircraft», *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 93, n. 1 (1 febbraio 2019): 367–84, <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0853-1>.
- ^{lxviii} Anders la Cour-Harbo, «Mass Threshold for ‘Harmless’ Drones», *International Journal of Micro Air Vehicles* 9, n. 2 (1 giugno 2017): 77–92, <https://doi.org/10.1177/1756829317691991>.
- ^{lxix} Thomas A. Gennarelli e Elaine Wodzin, «AIS 2005: A Contemporary Injury Scale», *Injury*, Special Issue: Trauma Outcomes, 37, n. 12 (1 dicembre 2006): 1083–91, <https://doi.org/10.1016/j.injury.2006.07.009>.
- ^{lxx} G. Guglieri, F. Quagliotti, e G. Ristorto, «Operational issues and assessment of risk for light UAVs», *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 2, n. 4 (1 dicembre 2014): 119–29, <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0015>.