



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Dicembre 2021

Studio di una metodologia per la valutazione del rischio aereo per Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto

Relatori:

Prof. Giorgio GUGLIERI
Dott. Stefano PRIMATESTA

Candidato:

Matteo MILANO

Abstract

Al giorno d'oggi, l'elevato sviluppo ed impiego dei Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, anche detti *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), è un dato di fatto che ha portato gli Enti Regolatori nazionali e sovranazionali, preposti alla gestione dell'aviazione, ad attuare misure normative rivolte alla corretta e sicura integrazione di droni e aviazione convenzionale, promuovendo anche iniziative, come il progetto U-Space, volte alla creazione di spazi aerei riservati al traffico senza pilota.

Il crescente numero di operazioni effettuate tramite UAS, se non correttamente gestito, rappresenta un rischio non solo per le persone a terra, ma anche e soprattutto per gli aeromobili che si trovano a volare all'interno dello stesso spazio aereo. Infatti, l'assenza di sistemi Detect and Avoid a bordo dei velivoli a pilotaggio remoto, unita all'assenza di controllo del traffico aereo alle quote tipiche di volo, favoriscono la probabilità che si verifichino Mid-Air Collisions, ovvero collisioni in aria tra velivoli pilotati e non, dovute al non corretto mantenimento delle distanze minime di separazione.

I metodi per la valutazione del rischio aereo esistenti allo stato dell'arte, spesso si rivelano insufficientemente accurati per via dell'approccio largamente quantitativo che adottano e per il fatto che non considerano la presenza di altri UAS nello spazio aereo; inoltre, nella maggioranza dei casi si tratta di procedure già esistenti ed utilizzate per i velivoli convenzionali, adattate al caso di velivoli a pilotaggio remoto, ma che mal si adattano a velivoli di dimensioni così ridotte, inficiando l'accuratezza dei risultati prodotti.

Lo scopo del lavoro svolto è quindi quello di sviluppare una procedura qualitativa, basata su una rigorosa e solida base matematica, per valutare in maniera efficace il rischio di Mid-Air Collision correlato ad una operazione svolta tramite l'ausilio di un drone.

A partire dai dati di traffico disponibili e riferiti allo spazio aereo italiano è stato possibile definire le condizioni al contorno del modello, ovvero la composizione del traffico aereo, in termini di categorie di velivoli considerate, il tempo medio di occupazione dello spazio aereo ed il numero di velivoli registrati in Italia, per ogni categoria.

Sono poi stati presi in esame 5 differenti modelli di UAS (DJI Mavic Mini 2, Hubsan Zino, Yuneec Typhoon H+, Parrot Disco Pro e DJI Matrice 600 Pro), rappresentativi delle principali categorie individuate dalla normativa vigente, scelti sulla base della loro diffusione commerciale e delle diverse caratteristiche costruttive, che li rendono adatti a missioni differenti, con differenti profili di quota.

Le analisi, effettuate variando diversi parametri del modello, hanno evidenziato il legame tra la probabilità di una collisione in aria ed una serie di fattori, quali ad esempio: velocità, quota di volo e dimensioni del drone. Il risultato più significativo però, sia in termini numerici che per lo sviluppo futuro delle operazioni UAS, è l'elevata incidenza che la presenza di altri velivoli a pilotaggio remoto ha sul valore finale di probabilità. Considerando una continua crescita nell'utilizzo di questo tipo di velivoli appare chiaro quanto fondamentale sia sviluppare metodi adeguati di gestione e mitigazione del rischio, così da garantire un sicuro svolgimento delle operazioni a tutti gli utilizzatori dello spazio aereo ed alle persone sottostanti.

Ringraziamenti

Prima di proseguire con l'esposizione del lavoro, vorrei dedicare alcune parole alle persone che mi hanno permesso di raggiungere questo importantissimo traguardo della mia vita, accademica e non solo.

Il primo doveroso ringraziamento va al mio relatore, prof. Giorgio Guglieri, e al mio co-relatore, dr. Stefano Primatesta, i quali mi hanno permesso di lavorare a questo progetto, seguendomi passo dopo passo nella sua realizzazione e stesura, fornendomi preziosi consigli per migliorare ogni aspetto di questo documento. Il loro aiuto e la loro esperienza mi hanno permesso di coronare nel migliore dei modi questo percorso lungo cinque anni. Un ringraziamento altrettanto speciale va ai miei genitori, che mi hanno sempre supportato, specialmente in questi ultimi due anni, resi ancora più duri per via delle condizioni imposte dalla pandemia di coronavirus. È grazie a loro se ho potuto iniziare questo percorso, e per questo gliene sarò sempre grato.

Infine, un grande grazie alla mia fidanzata, Roberta, e a tutti i miei amici, da quelli di una vita a quelli conosciuti nelle aule universitarie, i quali mi sono stati sempre vicini, sostenendomi e rincuorandomi nei momenti difficili ma gioendo assieme a me in quelli felici.

Indice

Acronimi.....	IX
Elenco delle figure	XI
Elenco delle tabelle	XIII
1 Introduzione.....	1
1.1 Obbiettivo della Tesi	2
1.2 Struttura della Tesi	2
2 Quadro normativo per velivoli a pilotaggio remoto.....	5
2.1 La Normativa Europea	5
2.1.1 Operazioni nella categoria ‘Specific’.....	6
2.1.2 Regole per una corretta valutazione del rischio.....	8
2.2 La normativa italiana.....	9
2.2.1 Generalità	9
2.2.2 D-Flight.....	9
2.2.3 Operazioni cat. ‘Specific’ SAIL maggiore o uguale a V.....	11
2.2.4 Scenari Standard e PDRA	11
2.3 Differenze normative nel mondo	13
3 Gestione del rischio aereo: stato dell’arte.....	17
3.1 Metodi Probabilistici.....	18
3.2 Metodi bayesiani	20
3.3 Specific Operations Risk Assessment SORA	23
3.4 Difetti della procedura SORA.....	26
4 Gestione del rischio aereo:.....	29
approccio matematico-probabilistico	29
4.1 Struttura del modello.....	29
4.2 Aspetti critici.....	34
4.3 Definizione parametri fondamentali	36
4.4 Definizione MAC rate di riferimento.....	42

5	Analisi dei risultati	45
5.1	Test Puntuali	45
5.1.1	Condizioni Nominali	45
5.1.2	Effetto della quota massima di volo	50
5.1.3	Effetto del traffico di aviazione generale	51
5.1.4	Effetto del traffico UAS	53
5.2	Mappe di rischio	59
5.2.1	Condizione 1	64
5.2.2	Condizione 2	66
5.2.3	Condizione 3	68
6	Conclusioni	70
	Bibliografia	73
	Sitografia	76
	Appendice A	78
	Appendice B	87

Acronimi

ARC

Air Risk Class

BVLOS

Beyond Visual Line of Sight

CAAC

Civili Aviation Administration of China

CE

Comunità Europea

EASA

European Aviation Safety Agency

ELOS

Equivalent Level of Safety

ENAC

Ente Nazionale Aviazione Civile

FAA

Federal Aviation Administration

GA

General Aviation

GRC

Ground Risk Class

ICAO

International Civil Aviation Organization

JARUS

Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems

LOS

Loss Of Separation

MAC

Mid-Air Collision

MTOM

Maximum Take-Off Mass

NMAC

Near Mid-Air Collision

OSO

Operational Safety Objectives

PDRA

Pre-Defined Risk Assessment

SAIL

Specific Assurance and Integrity Level

SORA

Specific Operation Risk Assessment

STS

Standard Scenarios

TCAS

Traffic Collision Avoidance System

UA

Unmanned Aircraft

UAS

Unmanned Aircraft System

VLOS

Visual Line Of Sight

Elenco delle figure

Figura 2.1: Categorie di classificazione per operazioni con UAS.....	5
Figura 2.2: Altezze operative massime. Fonte: [1].....	7
Figura 2.3: Procedura per l'ottenimento dell'autorizzazione operativa. Fonte: ENAC	8
Figura 2.4: Visualizzazione mappe di volo. Fonte: [53]	10
Figura 2.5: Equivalenza Scenari Standard. Fonte [2]	12
Figura 3.1: Effetto della collisione di un UAS sull'ala di un velivolo. Fonte: [60]	17
Figura 3.2: Effetto della collisione di un volatile sull'ala di un velivolo. Fonte: [60]	18
Figura 3.3: Bayesian Network per spazio aereo non controllato. Fonte: [24]	22
Figura 3.4: Modello semantico SORA. Fonte: [1]	23
Figura 3.5: Tabella per la scelta del GRC. Fonte: [1]	24
Figura 3.6: Schema per la definizione del ARC. Fonte: [1].....	25
Figura 3.7: Tabella determinazione SAIL. Fonte: [1]	26
Figura 4.1: Schema di intersezione tra velivoli all'interno del modello. Fonte: [20]	31
Figura 5.2: Probabilità di collisione orizzontale per droni di classe C0 e C1 in funzione della categoria di velivolo GA.....	46
Figura 5.3: Probabilità di collisione orizzontale per droni di classe C2 e C3 in funzione della categoria di velivolo GA.....	47
Figura 5.4: Probabilità di collisione orizzontale per drone ad ala fissa in funzione della categoria di velivolo GA.....	47
Figura 5.5: Probabilità di collisione aerea per droni di classe C0 e C1 in funzione della categoria di velivolo GA.....	48
Figura 5.6: Probabilità di collisione aerea per droni di classe C2 e C3 in funzione della categoria di velivolo GA.....	48
Figura 5.7: Probabilità di collisione aerea per droni ad ala fissa in funzione della categoria di velivolo GA.....	49
Figura 5.8: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone	49
Figura 5.9: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone, al variare della quota massima.....	51
Figura 5.10: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone, al variare del volume di traffico aereo	52
Figura 5.11: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C0, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS	55
Figura 5.12: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C1, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS	55
Figura 5.13: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C2, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS	56

Figura 5.14: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C3, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS	56
Figura 5.15: Probabilità di collisione aerea per il drone ad ala fissa, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS	57
Figura 5.16: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone considerato, in funzione del volume di traffico UAS	57
Figura 5.17: Schema descrittivo della griglia di riferimento per la costruzione della mappa di rischio. Fonte: [52]	59
Figura 5.18: Area considerata per la creazione delle mappe di rischio	61
Figura 5.19: Distribuzione di densità di popolazione nell'area considerata	62
Figura 5.20: Sheltering factor nell'area considerata	62
Figura 5.21: Mappa di rischio a terra - Condizione 1	64
Figura 5.22: Mappa di rischio in aria - Condizione 1	64
Figura 5.23: Mappa di rischio totale - Condizione 1	65
Figura 5.24: Mappa di rischio a terra - Condizione 2	66
Figura 5.25: Mappa di rischio in aria - Condizione 2	66
Figura 5.26: Mappa di rischio totale - Condizione 2	67
Figura 5.27: Mappa di rischio a terra - Condizione 3	68
Figura 5.28: Mappa di rischio in aria - Condizione 3	68
Figura 5.29: Mappa di rischio totale - Condizione 3	69

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Area di sicurezza in funzione della quota massima. Fonte: [12].....	12
Tabella 2: Area di sicurezza in funzione di quota massima e MTOM. Fonte: [13]	13
Tabella 3: Parametri fondamentali per velivoli GA	39
Tabella 4: Parametri fondamentali velivoli UA.....	41
Tabella 5: Riepilogo dati per il calcolo del MAC rate europeo.....	43
Tabella 6: Fattori di incremento per i termini n e T relativi al traffico d'aviazione generale.....	52
Tabella 7: Definizione dei parametri fondamentali per il traffico di UAS.....	53
Tabella 8: Fattori di incremento per i termini n e T relativi al traffico di UAS	54

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso dell'ultimo decennio la tecnologia dei sistemi aeromobili a pilotaggio remoto ha subito un repentino sviluppo, divenendo un elemento chiave nel settore dell'aviazione ed espandendo le proprie possibilità di utilizzo ad un crescente numero di attività sia professionali che amatoriali, tanto che, secondo i dati riportati nel *Global Drone Market Report 2021-2026* [53], entro il 2026 il mercato globale dei droni raggiungerà la cifra record di 41,3 miliardi di dollari, con un tasso di crescita annuo pari al 9,4%.

La recente pandemia di COVID-19, seppur abbia fatto riscontrare una frenata nella crescita economica di questo settore, provocando, in base alle ricerche condotte dall'*Osservatorio Droni* del Politecnico di Milano [57], un calo del 38% nel valore del mercato professionale in Italia, passato da 117 a 73 milioni di euro, ha anche messo in luce una serie di attività adatte all'utilizzo di velivoli a pilotaggio remoto quali: la sorveglianza dei centri abitati, la sanificazione di aree di difficile accesso per i mezzi convenzionali e la consegna di materiale sanitario oltre che di beni di consumo; sottolineando ancora una volta la grande flessibilità operativa che questa tecnologia offre.

Questo ampio sviluppo determina una continua crescita nel numero di aeromobili a pilotaggio remoto all'interno dello spazio aereo, ponendo un serio pericolo sia per gli altri velivoli presenti sia per le persone a terra; infatti, l'assenza di controllo del traffico aereo alle basse quote e di ausili alla navigazione sviluppati per questo tipo di aeromobili, spesso unita alla mancanza di esperienza da parte del pilota del drone, favorisce la possibilità di collisioni aeree tra velivoli con e senza pilota, basti pensare che, secondo i dati riportati nel *Safety Report 2020* [37], redatto da ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile), nel 2019 le segnalazioni di interferenza di droni durante le fasi di decollo e atterraggio di velivoli commerciali sono state 103.

Gli Enti Regolatori aeronautici di tutto il mondo stanno agendo per garantire una corretta integrazione dei velivoli a pilotaggio remoto all'interno dello spazio aereo comune, promuovendo provvedimenti normativi volti alla definizione di chiari e precisi limiti operativi, basati sulla valutazione dei rischi connessi al volo, così da poter permettere a tutti gli attori coinvolti di eseguire in maniera sicura le operazioni.

A livello europeo, l'EASA (European Aviation Safety Agency) ha sviluppato una procedura denominata Specific Operation Risk Assessment, il cui scopo è quello di fornire all'operatore dell'UAS una serie di punti chiari e facili da seguire per eseguire una corretta valutazione del rischio, necessaria per ottenere l'approvazione all'esecuzione dell'operazione in questione.

Nella maggior parte dei casi però queste procedure, SORA compresa, sfruttano un approccio estremamente quantitativo per la valutazione del rischio, in modo da renderne più semplice l'applicazione, ma determinando risultati meno accurati ed una maggior facilità nell'uscire, in caso di particolari operazioni, dalle linee guida tracciate dalla procedura stessa.

La scelta di questa tipologia di approccio è determinata oltre che dalla relativa semplicità, anche dall'assenza di adeguati metodi qualitativi di valutazione del rischio, specie quello aereo.

Allo stato dell'arte, infatti, la maggioranza dei modelli utilizzati deriva da quelli sviluppati per l'aviazione convenzionale, che mal si adattano alle piccole dimensioni caratteristiche dei velivoli a pilotaggio remoto e soprattutto non tengono in considerazione la presenza di altri UAS all'interno dello spazio aereo, caratteristica imprescindibile nell'ottica di un largo uso di questi mezzi e quindi di un elevatissimo loro numero.

Risulta quindi fondamentale, specialmente in chiave futura, sviluppare un approccio qualitativo di semplice applicazione, in grado di fornire risultati attendibili a prescindere dal tipo di operazione e che permetta l'inclusione di tutte le tipologie di velivoli presenti nello spazio aereo.

1.1 Obiettivo della Tesi

Alla luce di quanto discusso precedentemente, appare chiara l'importanza di garantire una precisa ed efficace procedura di valutazione del rischio, sia esso aereo o a terra.

L'esiguo numero di modelli di calcolo specificatamente sviluppati per i velivoli a pilotaggio remoto, in grado di fornire risultati attendibili a prescindere dalle diverse condizioni operative, rende la valutazione del rischio aereo un terreno di studio florido e ricco di possibilità.

Il lavoro qui presentato si colloca proprio all'interno di questo contesto, con l'obiettivo primario di sviluppare ed implementare un metodo di calcolo fondato su una solida base analitica, che permetta di ottenere valutazioni consistenti e che sia in grado di adattarsi a qualsiasi tipologia di UAS considerata.

Sviluppata in linguaggio C++, questa procedura di valutazione permette di sopperire ad una serie di elementi di debolezza presente nei metodi allo stato dell'arte, adattandosi bene alle dimensioni caratteristiche dei velivoli a pilotaggio remoto e permettendo, tramite la conoscenza di un esiguo numero di parametri, di considerare diverse tipologie di velivoli esterni, compresi altri droni, andando quindi anche a rispondere alla necessità futura dettata dal crescente impiego di questa classe di aeromobili.

Si è quindi cercato di valutare l'effetto dei diversi parametri fondamentali del modello sul valore di probabilità totale, confrontando poi i risultati ottenuti con i dati disponibili, andando anche a realizzare delle mappe di rischio, a terra e in volo, così da fornire una visualizzazione concreta del rischio legato ad una operazione con UAS e poter sottolineare come lo sviluppo di tale tecnologia, con conseguente aumento del numero di mezzi coinvolti, renda la probabilità di collisione aerea non più trascurabile.

1.2 Struttura della Tesi

Di seguito si definisce l'organizzazione dei contenuti all'interno del documento.

Il Capitolo 2 descrive l'attuale quadro normativo relativo alle operazioni con velivoli a pilotaggio remoto. L'attenzione è concentrata sulla regolamentazione europea ed italiana, essendo quest'ultima direttamente legata alla prima, ma vi sono anche cenni relativi alle norme vigenti in altri paesi del mondo, così da sottolineare la volontà comune a molti Stati di integrare efficacemente gli UAS nello spazio aereo convenzionale.

Nel Capitolo 3 sono descritti ed analizzati gli aspetti fondamentali dei principali metodi di valutazione del rischio aereo esistenti allo stato dell'arte e da cui partire nella definizione di una valida metodologia di calcolo. Inoltre, è presente una descrizione step

per step della procedura SORA, attualmente utilizzata nella valutazione del rischio aereo in ottemperanza alle direttive EASA, e un'analisi critica delle limitazioni che questa metodologia contiene.

Successivamente, nel Capitolo 4 è presentato il modello di calcolo centro del lavoro esposto nel presente documento. Sono descritte e sviluppate le formule necessarie per la valutazione dei singoli termini e la definizione dei parametri fondamentali per l'implementazione del modello stesso e per l'esecuzione dei test.

Le prove svolte sono presentate e discusse nel Capitolo 5, all'interno del quale si va ad indagare l'effetto che i vari parametri fondamentali hanno nella valutazione numerica della probabilità di collisione aerea. Inoltre, sono presentate e discusse le mappe di rischio, ottenute dall'integrazione del modello di rischio aereo con quello di rischio a terra, in maniera tale da avere una più chiara visione dell'influenza del rischio aereo su quello totale in un ambiente urbano.

Infine, all'interno del Capitolo 6 sono riportate le conclusioni finali relative al lavoro svolto e una discussione sullo sviluppo futuro.

Capitolo 2

Quadro normativo per velivoli a pilotaggio remoto

2.1 La Normativa Europea

L'attuale legislazione europea si propone di fornire indicazioni e regole che permettano di raggiungere il maggior tasso di integrazione possibile tra velivoli a pilotaggio remoto ed aviazione civile, con lo scopo di costituire il cosiddetto Single European Sky, uno spazio aereo comunitario all'interno del quale operatori e piloti possano operare in condizioni di massima sicurezza ed efficienza, seguendo una regolamentazione univoca negli aspetti essenziali e che permetta di appianare le differenze tra i vari paesi europei, agevolando il lavoro degli Enti Regolatori nazionali.

I più recenti aggiornamenti normativi emanati dall'EASA presenti nel *Rules for Unmanned Aircraft Systems Regulation 2019/947* Regulation 2019/947 [1] pubblicato in data 24 Maggio 2019 e aggiornato al Gennaio 2021 hanno proprio questo scopo, proponendo una procedura di classificazione delle operazioni UAS basata sulla valutazione del rischio ad esse associato, legato alle caratteristiche tecniche del drone e a quelle geografiche dell'area operativa

Secondo questa classificazione le operazioni condotte con velivoli a pilotaggio remoto possono essere suddivise in tre differenti categorie, di cui si riportano di seguito i requisiti principali.



Figura 2.1: Categorie di classificazione per operazioni con UAS.

Fonte: unive.it

Categoria ‘Open’

In questa categoria rientrano le operazioni che rispettano i seguenti requisiti:

- La MTOM (Maximum Take-Off Mass) del velivolo deve essere inferiore a 25 Kg se privatamente costruito oppure l’UAS deve appartenere ad una delle categorie stabilite dalla normativa CE (Comunità Europea)
- Il pilota deve mantenere il velivolo ad una distanza di sicurezza dalle persone e non sorvolare mai assembramenti
- Il pilota deve condurre le operazioni sempre in VLOS (Visual Line of Sight), a meno che non si trovi in follow-me mode o non si stia avvalendo di un osservatore
- Durante l’operazione il velivolo non deve superare i 120 metri di altezza dal punto di superficie terrestre più vicino. Nel caso di ostacoli di altezza superiore a 105 metri è consentito un margine di 15 metri sull’ostacolo.
- Il velivolo non deve trasportare materiali pericolosi né effettuare lo sgancio di oggetti.

All’interno di questa classe le operazioni non sono soggette né al rilascio di autorizzazioni da parte dell’ente regolatore né all’invio di dichiarazioni da parte dell’operatore.

Categoria ‘Specific’

Data l’affinità con la maggior parte delle attività professionali (svolte da aziende o liberi professionisti), questa tipologia di operazione con velivoli a pilotaggio remoto risulta la più frequente. Pertanto, data la sua importanza nello sviluppo del presente elaborato, verrà dettagliatamente analizzata al paragrafo 2.1.1.

Categoria ‘Certified’

All’interno di questa classe rientrano solamente quelle operazioni che prevedono:

- Il sorvolo prolungato di assembramenti di persone
- Il trasporto di persone
- Il trasporto di materiali pericolosi, che in caso di incidente possono portare al danneggiamento diretto o indiretto delle persone a terra (nel caso in cui non si utilizzino contenitori appositi e resistenti alle collisioni)
- Un livello di rischio troppo elevato e non mitigabile attraverso l’attuazione di misure pratiche ma solo tramite la certificazione, in accordo con le regole previste nella normativa, del velivolo, dell’operatore e del pilota, il quale deve possedere la licenza di volo adatta a svolgere la missione in questione

Per poter effettuare questo tipo di operazioni è necessario ricevere una specifica autorizzazione da parte dell’Ente Regolatore nazionale.

2.1.1 Operazioni nella categoria ‘Specific’

Il confine tra la categoria ‘Open’ e quella ‘Specific’ giuridicamente parlando è molto labile, infatti, è sufficiente che non sia rispettato uno dei requisiti elencati nel paragrafo precedente per far sì che la missione considerata non possa essere classificata come ‘Open’.

Vi sono però anche delle caratteristiche particolari che determinano l’appartenenza alla seconda classe, nello specifico:

- Operazione VLOS sopra area controllata con velivolo di dimensione massima caratteristica inferiore a 3 metri;
- Operazione VLOS sopra area scarsamente popolata con velivolo di dimensione massima caratteristica inferiore a 1 metro;
- Operazione BVLOS sopra area scarsamente popolata con velivolo di dimensione massima caratteristica inferiore a 1 metro;
- Operazione BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) sopra area controllata con velivolo di dimensione massima caratteristica inferiore a 3 metri.

In oltre il volo deve avvenire entro i 120 metri di altezza rispetto al punto più vicino della superficie terrestre all'interno di:

- Spazio aereo non controllato, a meno che l'Ente nazionale non predisponga ulteriori restrizioni sull'altezza massima se la probabilità di interferire con un velivolo pilotato non è trascurabile
- Spazio aereo controllato, in accordo con le normali procedure previste per la specifica area

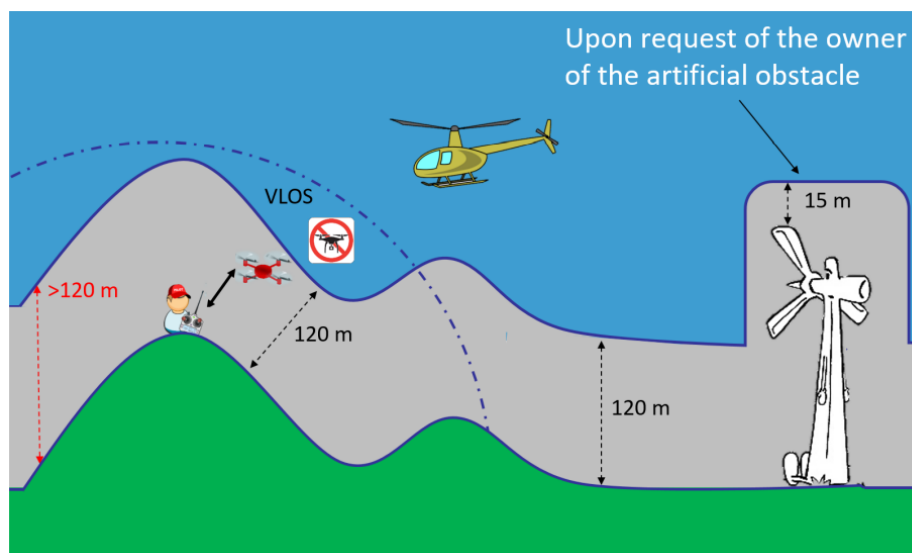


Figura 2.2: Altezze operative massime. Fonte: [1]

Per poter svolgere le operazioni classificate come 'Specific' è necessario ottenere dall'autorità nazionale competente un documento di approvazione, il cui rilascio è subordinato all'invio da parte dell'operatore di una dichiarazione contenente principalmente:

- Le informazioni amministrative relative all'operatore stesso.
- Le caratteristiche principali dell'operazione ed un'attestazione del fatto che questa possa essere svolta in sicurezza, sia per il personale a terra che per il pilota del drone, in accordo alle misure di mitigazione indicate nei risultati dalla procedura di analisi del rischio effettuata.

2.1.2 Regole per una corretta valutazione del rischio

Come evidenziato nel sottoparagrafo precedente, per ricevere l'autorizzazione al volo in determinate circostanze è necessario effettuare una procedura per la valutazione del rischio denominata Specific Operation Risk Assessment i cui principali obiettivi sono: quantificare la probabilità che l'operazione considerata possa recare danni agli oggetti e/o alle persone presenti nell'area, determinare un livello adeguato di sicurezza ed identificare le misure adatte a raggiungerlo.

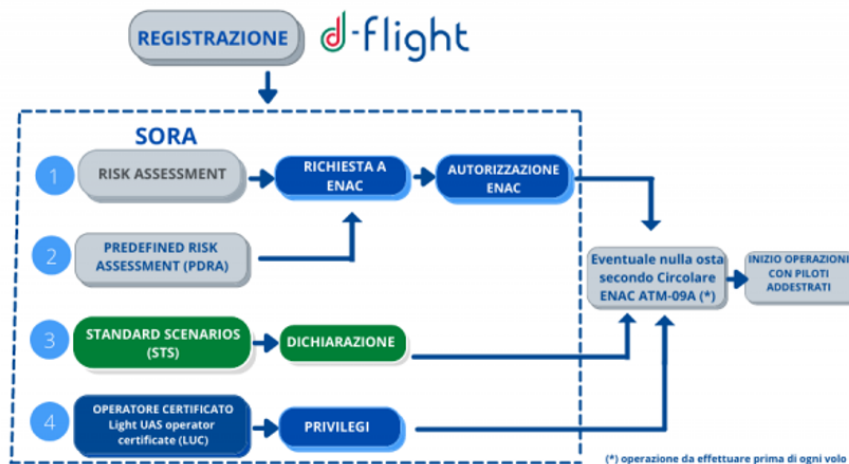


Figura 2.3: Procedura per l'ottenimento dell'autorizzazione operativa.
Fonte: ENAC

Al termine del SORA l'operatore UAS ha l'obbligo di redigere un documento, che andrà presentato all' Ente Regolatore nazionale, all'interno del quale devono essere contenute delle informazioni imprescindibili, in particolare:

- Descrizione delle caratteristiche dell'operazione, in termini di tipologia e complessità di attività da effettuare, ambiente operativo dal punto di vista geografico e legislativo, caratteristiche tecniche del velivolo e competenze dei piloti
- Definizione di un livello (non mitigato) di rischio a terra a seconda delle condizioni in cui avviene la missione, in particolare:
 - VLOS o BVLOS
 - Densità di popolazione nell'area operativa
 - Presenza di assembramenti da sorvolare
 - Dimensioni caratteristiche del drone
- Definizione di un livello (non mitigato) di rischio in aria a seconda delle condizioni in cui avviene la missione, in particolare:
 - Volume di spazio aereo occupato dalle operazioni
 - Classe di spazio aereo
 - Impatto delle operazioni sul resto dell'aviazione presente nell'area
- Identificazione di possibili misure volte a mitigare il rischio associato all'operazione, come ad esempio:

- Contenimento delle persone a terra
 - Limitazioni in termini di volume e tempo per le operazioni
 - Adozione di UAS con design volto a mitigare gli effetti di possibili impatti
 - Possibilità di far affidamento su procedure e strutture dell'aviazione civile
- Determinazione della robustezza delle misure volte alla mitigazione del rischio

2.2 La normativa italiana

Secondo quanto riportato nella timeline prevista dall'EASA entro il 1° Gennaio 2022 i paesi membri dell'Unione devono allinearsi ai dettami riportati nel *Regolamento 2019/947* per quanto riguarda operazioni di volo, autorizzazioni, certificazioni e dichiarazioni degli operatori. In quest'ottica la recente normativa emanata dall'ENAC, in vigore dal 31 Dicembre 2020, prevede l'applicabilità sul territorio italiano del regolamento sopra citato, andando anche a disciplinare gli ultimi aspetti di competenza dello Stato Membro ed abrogando il precedente *Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto, Edizione 3, Emendamento 1* del 14 Luglio 2020.

2.2.1 Generalità

Il *Regolamento UAS-IT* [2] aggiornato al 4 Gennaio 2021 contiene le disposizioni relative alle operazioni che ricadono all'interno del *Regolamento EASA 2019/947*, in particolare prevede per l'operatore dell'UAS l'obbligo di registrarsi al portale D-Flight e di apporre l'identificativo QR sul velivolo e sulla stazione di comando a terra, così da facilitarne il riconoscimento e permettere l'eventuale imputazione di responsabilità civili e/o penali. Inoltre, è previsto l'utilizzo del portale D-Flight anche per l'invio di tutta la documentazione necessaria alla certificazione dell'operazione nei casi dove è prevista, secondo la procedura riportata sul regolamento EASA ed analizzata nel capitolo precedente.

A livello organizzativo il documento si divide in due categorie:

- Operazioni in categoria aperta o specifica con SAIL (Specific Assurance and Integrity Level) inferiore a V: per le quali non è prevista alcuna norma aggiuntiva se non l'adeguamento ai dettami europei
- Operazioni in categoria specifica con SAIL maggiore o uguale a V: queste verranno approfondite nel paragrafo 2.2.3

2.2.2 D-Flight

Sviluppato da ENAC, in collaborazione con Leonardo S.p.A e Telespazio S.p.A, D-Flight è il portale online italiano [55] per la gestione dei droni e del loro impiego.

Il portale nasce all'interno del progetto europeo U-Space, per la regolamentazione e gestione dello spazio aereo al di sotto dei 150 metri, elemento fondamentale per poter

garantire un corretto e sicuro svolgimento delle operazioni degli UAS in ogni tipo di contesto ambientale.

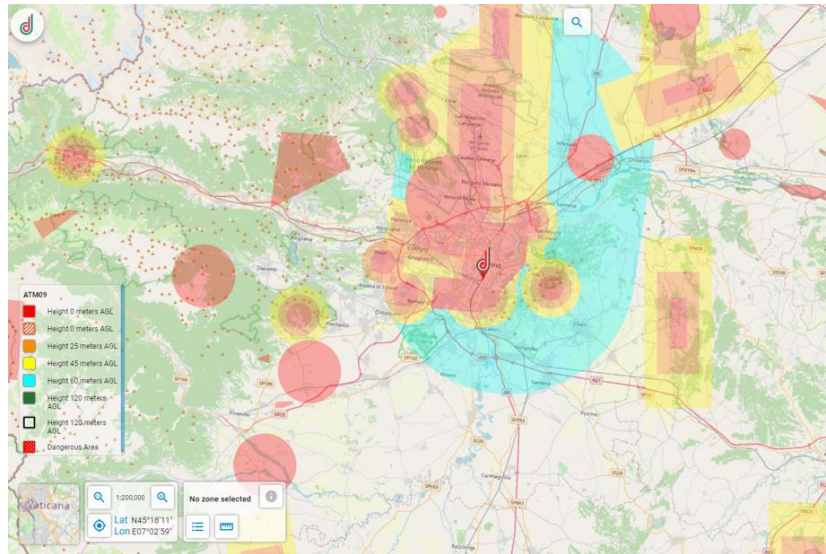


Figura 2.4: Visualizzazione mappe di volo. *Fonte:* [53]

Lo scopo principale di questo programma è quello di fornire un punto di partenza concreto per la rimozione dei vincoli che riducono la possibilità di effettuare operazioni BVLOS, di fatto limitando fortemente le potenzialità di sviluppo del mercato legato ai droni. D-Flight offre una serie di servizi, pensati sia per utenti privati che per operatori commerciali, tra cui principalmente:

- **Registrazione e identificazione:** possibilità di registrare il drone in una banca dati nazionale e di ottenere un codice identificativo univoco
- **Pianificazione:** l'utente può disporre di una serie di dati geo-referenziati (condizioni meteo, occupazione dello spazio aereo, divieti temporanei e permanenti, eccetera) per programmare correttamente e nel rispetto della normativa la missione
- **Monitoraggio e auto-separazione:** l'utente può avere costante controllo dei droni in volo nello spazio aereo limitrofo e ricevere avvisi per il mantenimento delle corrette distanze tra i droni stessi, gli ostacoli fissi e mobili ed eventuali aree sottoposte a restrizione
- **Recording and Playback:** è possibile salvare all'interno del portale ogni missione di volo, potendovi successivamente accedere

Inoltre, è previsto l'utilizzo di D-Flight anche per l'invio di tutta la documentazione necessaria alla certificazione dell'operazione nei casi dove è prevista, secondo la procedura riportata sul regolamento EASA.

2.2.3 Operazioni cat. ‘Specific’ SAIL maggiore o uguale a V

Lo svolgimento di queste operazioni richiede l’utilizzo di velivoli iscritti al *Registro degli UAS* di ENAC e sui quali devono essere esposte le marche di registrazione dedicate. L’iscrizione al registro avviene tramite domanda dell’operatore ad ENAC direttamente. Il drone (o i droni, a seconda dell’operazione) deve inoltre possedere un Permesso di Volo rilasciato dall’autorità, il quale identifica le condizioni e/o limitazioni applicabili all’operazione. Tale permesso viene rilasciato solo dopo che l’ENAC, sulla base del SORA inviato dall’operatore, ha verificato che l’operazione possa essere svolta con un adeguato livello di sicurezza.

Infine, è necessaria un’ulteriore autorizzazione da parte dell’ENAC la quale attesta che l’operatore dell’UAS possenga una serie di requisiti, quali:

- Disporre di una organizzazione tecnica e operativa adeguata
- Aver un Responsabile Tecnico per la gestione delle operazioni
- Disporre di UAS in possesso di Permesso di Volo per la specifica operazione
- Disporre di piloti adeguatamente qualificati
- Possedere un Manuale Operativo contenente le istruzioni e procedure per il corretto svolgimento dell’operazione
- Essere in grado di svolgere l’operazione in accordo alle limitazioni redatte dall’autorità, ove previste

2.2.4 Scenari Standard e PDRA

La procedura SORA prevista per richiedere l’autorizzazione allo svolgimento di una missione che ricade all’interno della categoria ‘Specific’ richiede molti passaggi e questo si traduce in tempi di attesa estremamente lunghi, non sempre sostenibili da chi deve svolgere l’operazione. Per ovviare a questo problema l’ENAC, sulla base delle direttive riportate nel documento EASA, ha pubblicato una serie di documenti che hanno proprio lo scopo di ridurre questi tempi tecnici per tutta una serie di operazioni che presentano alcune caratteristiche peculiari. Questi documenti prendono il nome di:

- *Standard Scenarios (STS)*: contengono tutte le condizioni e limitazioni operative da rispettare per particolari tipi di operazioni VLOS
- *Pre-Defined Risk Assessment (PDRA)*: contengono condizioni e limitazioni operative da rispettare per particolari tipi di operazioni BVLOS

Gli Scenari Standard emanati dall’ENAC con l’ultimo aggiornamento sono 2 [12,13], in tutto e per tutto simili a quelli pubblicati sul documento EASA, e vanno a sostituire ed accorpare i precedenti 7 esistenti, secondo la seguente conversione (Figura 2.5).

S01	IT-STS-01
S02	
S03	
S04	IT-STS-02
S05	
S06	
S07	

Figura 2.5: Equivalenza Scenari Standard. *Fonte* [2]

Di seguito si analizzano più da vicino le indicazioni presenti all'interno di questi documenti:

1. STS-01-VLOS over a controlled ground area in urban populated environment

Il presente scenario si applica nel caso di velivoli con:

- Dimensione massima inferiore a 3 metri
- MTOM inferiore o uguale a 10KG (compreso di payload)

Prevede il mantenimento di una quota massima non superiore a 120 metri rispetto al punto di superficie terrestre più vicino, salvo nel caso in cui si debba superare un ostacolo di altezza superiore a 105 metri, rispettando comunque una variazione massima inferiore ai 30 metri rispetto al limite di 120 metri.

L'operazione dev'essere condotta sempre in VLOS all'interno di un'area controllata comprendente il volume operativo, lo spazio per eventuali manovre di emergenza ed un'area di sicurezza aggiuntiva le cui dimensioni sono riportate in Tabella 1, utilizzando un solo drone alla volta, il quale non deve trasportare oggetti pericolosi.

Altezza massima dal suolo	Risk Buffer area minima
30 m	10 m
60 m	15 m
90 m	20 m
120 m	25 m

Tabella 1: Area di sicurezza in funzione della quota massima. *Fonte:* [12]

2. STS-02-VLOS over a controlled ground area in non-urban populated environment

A differenza del STS-01, il presente scenario si riferisce ad operazioni condotte all'interno di un ambiente non urbano ma comunque con una rilevante densità di popolazione, e si applica a velivoli con:

- Dimensione massima inferiore a 3 metri

- MTOM inferiore o uguale a 25KG (compreso di payload)

Analogamente al precedente, si applicano le stesse restrizioni in termini di quota massima operativa, area delle operazioni e limitazioni operative. La principale differenza, oltre che sul tipo di ambiente operativo, si ritrova nella determinazione della dimensione dell'area di sicurezza aggiuntiva (Tabella 2)

Altezza massima dal suolo	Risk Buffer area minima	
	MTOW ≤ 10 KG	MTOW > 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

Tabella 2: Area di sicurezza in funzione di quota massima e MTOM. Fonte: [13]

Per quanto riguarda i PDRA invece, come intuibile dalla dicitura, sono dei SORA precompilati che permettono all'operatore, nel caso in cui l'operazione rientri all'interno delle condizioni riportate nei documenti, di non dover effettuare l'intera procedura di valutazione del rischio, potendo così ottenere più velocemente l'autorizzazione.

I PDRA attualmente emanati dall' ENAC sono 9 [3-11], tutti relativi a missioni BVLOS, e si differenziano a seconda del rischio aereo correlato e del tipo di area operativa. All'interno dei PDRA sono descritte le condizioni operative per la specifica missione, i risultati della procedura SORA ed anche tutti gli accorgimenti e le misure volte alla riduzione del rischio a terra e aereo, secondo la seguente struttura:

- Dimensioni caratteristiche e MTOM massime dell'UAS
- Densità di popolazione dell'area operativa
- Informazioni sulla tipologia di operazione
- Distanza orizzontale massima
- Classificazione SORA

2.3 Differenze normative nel mondo

Secondo quanto visto nei paragrafi precedenti, la normativa redatta dall'EASA risulta una tra le più innovative in campo globale, collocando l'Europa, e quindi l'Italia, tra le poche nazioni che hanno effettivamente colto le possibilità di sviluppo del mercato dei droni, sia in termini economici che tecnologici, e lavorato per favorirne "l'integrazione". Come ampiamente descritto, lo scopo del regolamento europeo è creare uno spazio aereo condiviso per l'utilizzo sicuro degli UAS, anche per quanto riguarda le operazioni BVLOS, vero ostacolo legislativo da superare per dare il via ad un ampio sviluppo del mercato dei sistemi a pilotaggio remoto.

Per comprendere ancor di più l'avanguardia della strategia europea è utile analizzare come sia articolata la regolamentazione degli UAS nei principali attori mondiali, in particolare USA e Cina [59,60]. Quest'ultimo paese è noto per essere base di numerosi test-case commerciali sull'utilizzo di droni in BVLOS in particolare per quanto riguarda la consegna di merci a privati cittadini. Si potrebbe quindi pensare che la regolamentazione in merito sia meno restrittiva di quanto non sia in Europa ma all'atto pratico non è così.

La CAAC (Civil Aviation Administration of China) ha emanato nel 2019 la *Advisory Circular 92*, volta proprio a regolamentare l'utilizzo dei velivoli a pilotaggio remoto, in particolare:

- UAS con peso a vuoto non superiore a 116 Kg, MTOM compreso di payload inferiore a 150 Kg e velocità massima non maggiore di 100 Km/h
- UAS Agricoli con MTOM (payload compreso) inferiore a 5700Kg

All'interno del documento sono stabiliti una serie di limiti per le operazioni con gli UAS, in particolare per quanto riguarda le operazioni commerciali:

- È necessario che il pilota posseda un'adeguata licenza e che il velivolo, se di peso superiore ai 250 g sia registrato al portale del CAAC
- Il volo dev'essere effettuato in VLOS
- Non è possibile volare al di sopra dei 120 metri
- Non è possibile volare al di sopra di aree densamente popolate, in prossimità di aeroporti, installazioni militari o altri punti sensibili ed infine non è possibile volare nelle No-Fly-Zone istituite dal governo in specifiche zone del territorio

Nel caso l'operazione richieda di non rispettare uno dei precedenti punti è necessario ottenere dall'Ente Nazionale un'autorizzazione al volo; quindi, anche per effettuare operazioni BVLOS sul territorio cinese è necessario ricevere il via libera dal CAAC. Questo tipo di operazioni però è relegato ad un'ambiente rurale o comunque con una densità di popolazione ridotta, in quanto il governo cinese ha esplicitamente vietato il volo oltre la linea di vista nello spazio aereo al di sopra delle grandi città, fintanto che gli operatori non siano in grado di sviluppare un'efficace metodo che eviti le collisioni in volo.

Dall'altra parte del mondo, negli Stati Uniti d'America in particolare, la situazione non è tanto diversa. Con la *Part 107* la FAA (Federal Aviation Administration) ha cercato di regolamentare in maniera consona le operazioni degli UAS, così da poter sfruttare il repentino sviluppo di questa tecnologia e poterlo indirizzare nella maniera giusta.

Anche in questo caso ci si concentra sull'analisi delle misure relative alle operazioni professionali, in quanto le più interessanti da un punto di vista del mercato connesso.

All'interno della *Part 107* è specificato che per poter svolgere un'operazione commerciale:

- Il pilota deve possedere un certificato di volo commerciale rilasciata dalla FAA
- Il drone dev'essere registrato sul sito FAADroneZone
- L'UAS deve avere MTOM (compreso di payload) inferiore a 25Kg

- Non è possibile volare oltre i 400ft di altezza e con velocità superiore a 100 mph
- L'operazione dev'essere interamente effettuata in VLOS
- Si può volare solamente in spazio aereo di classe G

Ad esclusione delle limitazioni su peso e spazio aereo, che richiedono un permesso speciale denominato Special Airspace Authorization, se non è possibile rispettare le indicazioni sopra riportate è necessario ottenere un'autorizzazione da parte della FAA, denominata *Part 107 waiver*.

Anche negli USA quindi il volo BVLOS è legato all'approvazione della missione specifica da parte dell'Autorità Nazionale, non vi sono però precise limitazioni sulla possibilità di autorizzare una certa operazione, permettendo di fatto la possibilità di effettuarla, se sufficientemente sicura, anche in aree popolate, eventualmente con l'obbligo di predisporre determinate misure di sicurezza aggiuntive.

In definitiva emerge come a livello generale la regolamentazione dei velivoli a pilotaggio remoto non includa ancora "liberamente" il volo BVLOS ma che questo sia sottoposto all'approvazione specifica dell'Ente di riferimento, esclusi alcuni paesi dove si sta cercando di integrare questo tipo di operazioni in una procedura "automatizzata" di approvazione. Quest'obbiettivo è di fondamentale importanza per conseguire una certa maturità dal punto di vista normativo e di conseguenza permettere uno sviluppo ancor più rapido ed efficace del mercato legato agli UAS, potendo arrivare a fornire anche una serie di servizi estremamente efficienti che al momento risultano principalmente ostacolati dalle limitazioni normative (consegne di beni, sorveglianza, eccetera).

Capitolo 3

Gestione del rischio aereo: stato dell'arte

Come evidenziato nel Capitolo 1, l'obiettivo primario dell'EASA è quello di creare uno spazio aereo unico all'interno del quale possano coesistere ed operare velivoli pilotati e a pilotaggio remoto, assicurando un adeguato livello di sicurezza, denominato Equivalent Level of Safety (ELOS).

Uno dei principali fattori di rischio legati alla presenza simultanea di velivoli pilotati e a pilotaggio remoto è l'interferenza reciproca, che può portare al verificarsi di collisioni aeree, con conseguente danneggiamento, anche critico, del velivolo pilotato e caduta del drone, con annesso pericolo per la popolazione che si trova all'interno dell'area delle operazioni.

Secondo quanto riportato in un articolo pubblicato sul sito del *University of Dayton Research Institute* [62] gli effetti dell'impatto di un UAS con l'ala di un velivolo sono catastrofici. Nel documento sopracitato vengono confrontati i danni provocati dall'impatto di un drone del peso di 1,3 Kg, nello specifico un DJI Phantom 2, con quelli provocati dall'impatto di un volatile (simulato attraverso un blocco di gel) dello stesso peso e dimensioni analoghe all'UAS.



Figura 3.1: Effetto della collisione di un UAS sull'ala di un velivolo.
Fonte: [60]



Figura 3.2: Effetto della collisione di un volatile sull'ala di un velivolo.

Fonte: [60]

Nel primo caso, infatti, il drone dopo l'impatto rimane pressoché intatto, penetrando all'interno del cassone alare andando a danneggiare gravemente il longherone dell'ala e quindi compromettendo la resistenza strutturale della stessa. Nel caso del volatile, quest'ultimo dopo l'impatto va in pezzi, provocando il danneggiamento del solo bordo d'attacco dell'ala, non compromettendo quindi l'integrità strutturale dell'aeromobile e rendendo l'entità del danno limitata rispetto al caso precedente.

Emerge quindi come sia necessario fornire ad operatori e piloti di UAS uno strumento affidabile per la valutazione del rischio, in particolare quello aereo, legato ad una specifica missione operativa.

Allo stato dell'arte attuale è possibile identificare due principali categorie di metodi per la determinazione del rischio aereo: metodi probabilistici e metodi bayesiani, di cui nei paragrafi successivi verranno analizzate struttura, elementi fondamentali e differenze.

3.1 Metodi Probabilistici

Questa tipologia di valutazione del rischio si basa sulla determinazione della probabilità che durante lo svolgimento delle rispettive operazioni i due velivoli considerati, quello pilotato e l'UAS, si trovino su traiettorie conflittuali (CT), cioè traiettorie intersecantesi sul piano orizzontale e ad una quota reciproca tale da permettere la collisione.

Per analizzare questa classe di metodi di valutazione del rischio si farà riferimento al documento [18] all'interno del quale viene proposto un metodo di calcolo che permette di valutare:

- la frequenza di accadimento di una fatalità a seguito di una collisione aerea, noto il rateo di collisioni in un certo lasso di tempo
- il rateo di collisioni in volo, noto il valore accettabile di fatalità per rispettare il valore equivalente di sicurezza ELOS

Prima di discutere della struttura del modello è necessario soffermarsi sulle ipotesi che ne stanno alla base, in particolare nella determinazione della frequenza di accadimento di una fatalità bisogna considerare due distinte tipologie di collisione aerea, quella tra UAS e

velivolo pilotato e quella tra UAS e oggetti quali alberi, volatili, cavi elettrici ed altri ostacoli. La differenza risiede nel fatto che nel primo caso la probabilità che si verifichi una fatalità aumenta, essendo coinvolto anche l'equipaggio del velivolo pilotato e non solo le persone a terra, come invece avviene nel secondo caso.

Inoltre, data la grande variabilità in termini di dimensioni e caratteristiche sia degli UAS che dei velivoli convenzionali è difficile dire con certezza quali tipologie di collisioni causino effettivamente la perdita di entrambi i mezzi coinvolti e quali no; dunque, per semplicità di trattazione, si considera ogni collisione come catastrofica per entrambi i velivoli, andando a fornire quindi un valore di rischio sicuramente più conservativo.

A partire da queste ipotesi, è possibile valutare la frequenza di accadimento di una fatalità, espressa come morti per ora di volo, a seguito di una collisione aerea secondo la seguente formula:

$$f_F = E(\text{fatalità}|\text{Collisione})f_{MAC} \quad (3.1)$$

Dove:

- $E(\text{fatalità}|\text{Collisione})$ è il numero di fatalità, per ora di volo, a seguito di una collisione e può essere espresso come:

$$E(\text{fatalità}|\text{Collisione}) = N_{EXP}P(\text{fatalità}|\text{Collisione}) \quad (3.2)$$

Essendo:

- N_{EXP} è il numero di persone a terra esposte alla caduta dei velivoli
- $P(\text{fatalità}|\text{Collisione})$ è la probabilità che una persona esposta subisca gravi lesioni o muoia a seguito dell'impatto

Entrambi questi termini sono difficili da valutare con precisioni essendo molto influenzati sia dalla tipologia di area delle operazioni, in termini di densità di popolazione, sia dalle dimensioni e dal numero di passeggeri a bordo dei velivoli coinvolti nella collisione, richiedendo una precisa conoscenza del traffico aereo circostante; dunque, spesso è più semplice stimare un valore numerico per il termine $E(\text{fatalità}|\text{Collisione})$ sulla base dei dati disponibili e forniti dall'Ente Regolatore nazionale.

- f_{MAC} è il rateo di accadimento di una collisione, per ora di volo, e viene calcolato attraverso la seguente formula:

$$f_{MAC} = E(CT)P(\text{collisione}|CT) = \frac{A_{EXP}d}{vt}P(\text{collisione}|CT) \quad (3.3)$$

Essendo:

- $E(CT)$ è il numero di traiettorie conflittuali possibili
- $P(\text{collisione}|CT)$ è la probabilità che l'esistenza di una traiettoria di conflitto porti ad una collisione
- A_{EXP} la superficie esposta del velivolo in m^2
- d è la distanza percorsa in m
- V è il volume di spazio aereo considerato in m^3
- t il tempo per percorrere la distanza d , espresso in ore

Così poste, le equazioni precedenti prevedono la conoscenza esatta della traiettoria nello spazio e nel tempo dei velivoli considerati e ciò non è sempre possibile. Infatti, il traffico aereo non è sempre costante, sia in termini di intensità che di rotte. In particolare, nello studio del rischio aereo associato alla missione di un UAS, i velivoli pilotati tipicamente

considerati sono mezzi di aviazione generale e pertanto volando all'interno di spazio aereo non controllato, nel quale non è previsto di redigere un piano di volo, non è possibile conoscerne a priori la traiettoria. Risulta quindi più efficace considerato un valore conservativo per $E(CT)$, sulla base dei dati disponibili relativi al traffico aereo nella zona dell'operazione analizzata.

Per quanto riguarda il termine $P(\text{collisione}|CT)$, il quale sostanzialmente rappresenta la possibilità che, pur trovandosi su traiettorie conflittuali, i due velivoli non collidano, esso è dipendente dalla presenza e dall'affidabilità di sistemi anticollisione a bordo dei velivoli considerati. Per i velivoli a pilotaggio remoto ancora non esiste un sistema certificato che fornisca avvisi di collisione ed istruzioni su come evitarle, cosa che invece avviene nei velivoli pilotati tramite il sistema TCAS¹ (Traffic Collision Avoidance System); quindi, considerando anche l'ipotesi iniziale si assume il valore *conservativo* di 1, ovvero che se i velivoli in esame si trovano su traiettorie conflittuali certamente collideranno.

In presenza di informazioni più precise sulle capacità del sistema anticollisione a bordo del velivolo pilotato è possibile stimare con maggior precisione questo termine.

Nonostante una solida base matematica, l'utilizzo di metodi probabilistici, come quello sopra esposto, può comportare alcuni aspetti critici, in particolare per quanto riguarda la reperibilità delle informazioni relative al traffico aereo, che spesso sono difficili da trovare oppure non sempre sono liberamente accessibili, costringendo all'utilizzo di stime sulla base dei dati posseduti, che potrebbero alterare in maniera significativa il risultato fornito dal modello.

3.2 Metodi bayesiani

Questa classe di modelli si basa sullo studio dei precursori dell'incidente, cioè quegli eventi il cui verificarsi non comporta conseguenze catastrofiche ma può far scaturire una collisione se ulteriori misure di sicurezza vengono infrante.

Sviluppati a partire dal teorema di Bayes², questi metodi sono facilmente rappresentabili tramite i cosiddetti Bayesian Networks, grafici funzionali all'interno dei quali ogni nodo corrisponde ad una variabile unica ed ogni collegamento corrisponde ad una dipendenza condizionale.

Lo scopo ultimo di questa metodologia è valutare la probabilità di accadimento di un certo evento a partire dal verificarsi di uno o più dei suoi precursori, essendo noti i rapporti causa-effetto tra questi ultimi.

Per quanto riguarda la valutazione del rischio aereo, l'evento principe che porta al verificarsi di una collisione aerea è la perdita di separazione (Loss of Separation - LOS). Un evento LOS, secondo la definizione fornita dall'ICAO (International Civil Aviation Organization), si verifica quando due o più velivoli si trovano ad una distanza reciproca inferiore a quella minima di sicurezza stabilita dalle regole della navigazione e/o comunicata dai controllori del traffico aereo.

Dunque, nell'applicare un metodo bayesiano alla valutazione del rischio aereo legato ad una operazione UAS è necessario identificare tutti i fattori ed eventi che possono

¹ **Sistema TCAS:** Il Traffic Collision Avoidance System è un dispositivo di sicurezza presente a bordo dei velivoli di aviazione commerciale, il cui compito è quello di avvisare i piloti della presenza di altri velivoli, dotati di trasponder, all'interno di un certo volume operativo, fornendo dove necessario, istruzioni di evitamento.

² **Teorema di Bayes:** dimostrato dal presbiteriano Thomas Bayes in uno scritto postumo del 1763, questo teorema è un importante risultato nel calcolo probabilistico. Viene impiegato per calcolare la probabilità di accadimento di una causa che ha scatenato un certo evento già verificato.

contribuire al verificarsi di una perdita di separazione in volo e di conseguenza, nei casi più gravi, ad una collisione aerea tra velivoli.

Si riporta in Figura 3.3 un esempio di Bayesian Network per operazioni in spazio aereo non controllato, estratto dal documento [24].

Lo schema ci mostra i principali precursori (nodi in giallo) che possono portare al verificarsi di una collisione aerea, rappresentata dal nodo “MAC” (Mid-Air Collision) a cui è associata una certa probabilità P_{impatto} . Si vede come i diversi nodi siano collegati da delle frecce, la cui direzione rappresenta il rapporto di causalità tra i vari eventi. Vi sono poi dei nodi di colore arancione che non rappresentano dei precursori ma bensì delle variabili del modello, il cui valore influenza direttamente la probabilità di accadimento dell’evento a cui sono collegati ed è quindi necessario conoscerne l’entità.

Trattandosi di spazio aereo privo di controllori, la separazione tra i velivoli può essere assicurata solamente tramite preventiva e specifica definizione dei confini operativi e attraverso l’utilizzo di sistemi di geofencing³. Nonostante queste misure è possibile che si verifichi un evento di “boundary violation” in cui il velivolo si trova ad oltrepassare i limiti operativi previsti, ciò può essere dovuto ad un “navigation error” ovvero una discrepanza tra la posizione reale e quella ideale del velivolo, oppure può dipendere da una “inappropriate guidance” cioè una manovra inappropriata da parte del pilota dell’UAS.

Il superamento dei limiti operativi può portare ad una perdita di separazione tra i velivoli, ossia ad un “separation error” e la probabilità che ciò accada cresce all’aumentare della densità di traffico aereo in quella zona.

L’evento di “separation error” potrebbe verificarsi anche in assenza di “boundary violation” da parte dell’UAS, poiché potrebbero essere i velivoli pilotati a ritrovarsi nell’area delle operazioni, non essendovi controllori ad impedirlo; dunque, il pilota deve essere sempre consapevole del traffico aereo che lo circonda. Ciò potrebbe non essere vero, poiché l’UAS, per effetto di una manovra inappropriata, potrebbe trovarsi in un’area diversa da quella prevista, oppure perché l’elevata densità di traffico aereo potrebbe rendere complicato per il pilota tener traccia di tutti i velivoli circostanti.

Al verificarsi del “separation error” ci si trova nella condizione di Near Mid-Air Collision, o NMAC, cioè l’evento che precede direttamente la collisione. Nel caso di spazio aereo non controllato, non essendovi l’obbligo per i velivoli di equipaggiare un trasponder e dunque rendendo il sistema TCAS inefficace, l’unica possibilità per scongiurare la collisione è la presenza di sistemi e procedure See And Avoid (SAA) o Detect And Avoid (DAA), rendendo intrinsecamente più alta la probabilità di un evento MAC, rispetto ad un caso in spazio aereo controllato.

In sintesi, nota la struttura, i precursori principali e la probabilità condizionale che un evento si verifichi a seguito dell’instaurarsi di una condizione precedente è possibile giungere alla valutazione della probabilità di Mid-Air Collision tra UAS e velivolo pilotato.

³ **Sistemi di geofencing:** sistemi basati sulla tecnologia GPS, che permettono di creare un perimetro virtuale di qualsiasi dimensione (geofence) attraverso il quale è possibile monitorare l’entrata e l’uscita dei dispositivi dotati di servizi di localizzazione.

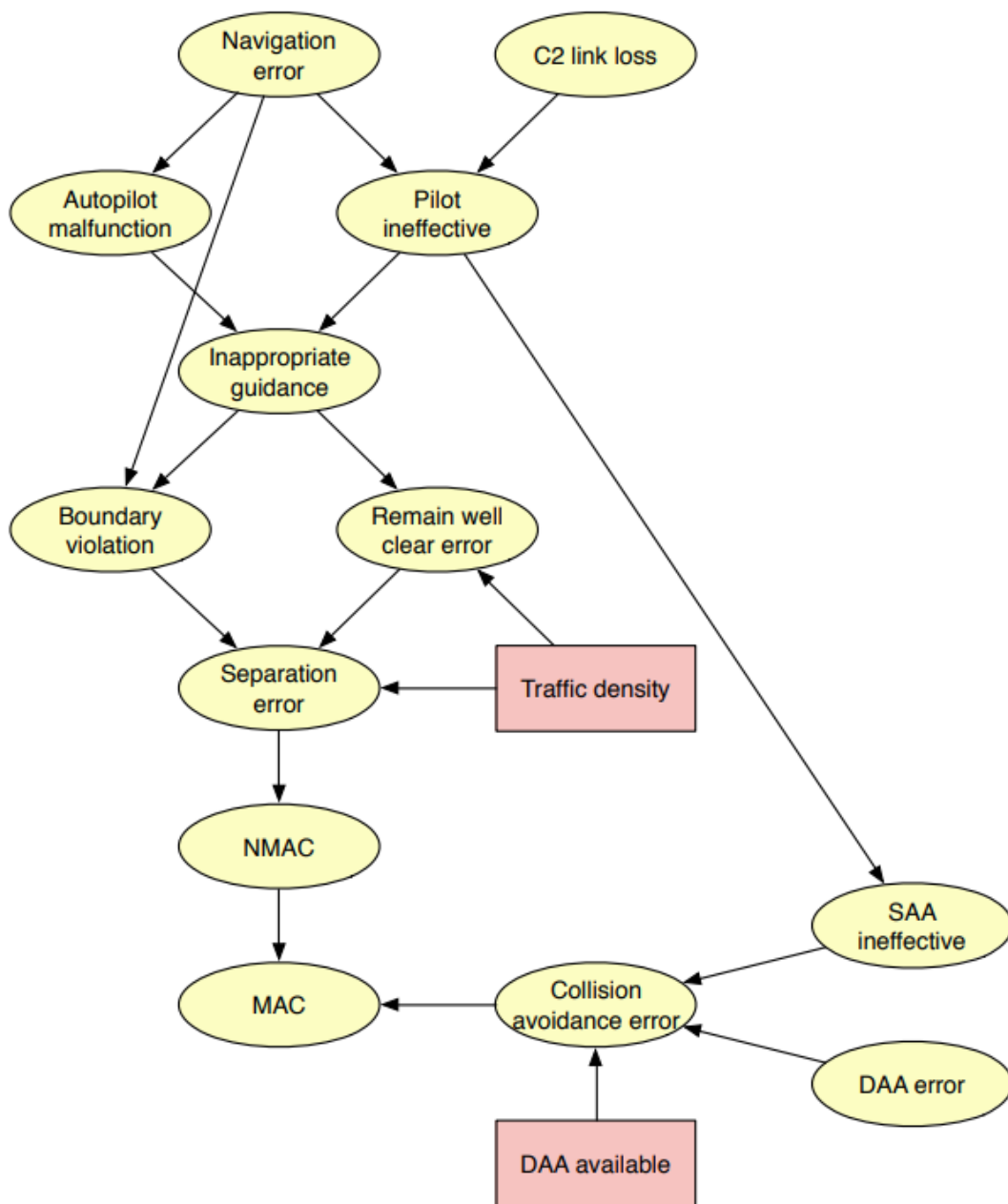


Figura 3.3: Bayesian Network per spazio aereo non controllato. *Fonte:* [24]

3.3 Specific Operations Risk Assessment SORA

Si è visto come i metodi esistenti allo stato dell'arte attuale permettano di effettuare un'analisi qualitativa del rischio aereo connesso ad una operazione con velivoli a pilotaggio remoto, richiedendo però, in entrambi i casi, la conoscenza di particolari dati riguardanti il traffico aereo.

Tali informazioni, oltre che essere in alcuni casi molto difficili da reperire liberamente, sono anche variabili nel tempo, rendendo l'operazione di valutazione del rischio difficile da effettuare per il pilota, specialmente se con poca esperienza.

Con lo scopo di rendere più accessibile la richiesta di autorizzazione ad operare, la normativa EASA propone, per la valutazione del rischio, una procedura qualitativa semplificata denominata Specific Operations Risk Assessment (SORA), sviluppata dal JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems), gruppo composto dalle autorità nazionali il cui compito è armonizzare le regole sui mezzi aerei a pilotaggio

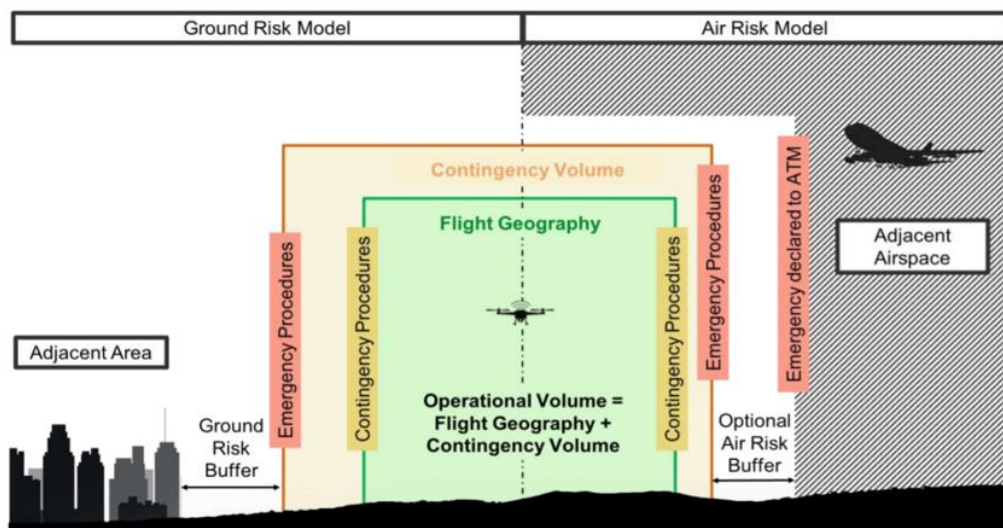


Figura 3.4: Modello semantico SORA. Fonte: [1]

remoto.

Lo scopo di questa procedura è quello di guidare l'operatore dell'UAS, coadiuvato dove necessario dall'autorità nazionale, a redigere una corretta valutazione del rischio, sia a terra che in aria, per la missione in esame, seguendo una serie di passaggi chiave che verranno analizzati di seguito:

1) Determinazione della Ground Risk Class (GRC) iniziale:

Per stabilire tale valore, legato essenzialmente alla probabilità che una persona venga colpita dall'UAS in caso di avaria, l'operatore deve fornire la dimensione caratteristica massima del drone (apertura alare o diametro dei rotori), il volume operativo totale, somma di area di volo effettiva e spazio dedicato alle manovre e procedure di contingenza. Tale volume deve essere valutato in un riferimento 4D (latitudine, longitudine, altitudine e tempo)

tenendo in considerazione *flight technical error*⁴, *path definition error*⁵ e tempi caratteristici dei comandi del drone. Infine, è necessario fornire il cosiddetto Ground Risk Buffer, ovvero una zona di sicurezza ulteriore adiacente al volume operativo (in rapporto 1:1).

Il valore iniziale di GRC è ottenuto seguendo la tabella in Figura 3.5, dove in caso non ci sia corrispondenza tra l'energia cinetica all'impatto per la missione considerata e la dimensione caratteristica dell'UAS, l'operatore deve specificare adeguatamente la scelta di una colonna piuttosto che l'altra.

Intrinsic UAS Ground Risk Class				
Max UAS characteristics dimension	1 m / approx. 3ft	3 m / approx. 10ft	8 m / approx. 25ft	>8 m / approx. 25ft
Typical kinetic energy expected	< 700 J (approx. 529 Ft Lb)	< 34 KJ (approx. 25000 Ft Lb)	< 1084 KJ (approx. 800000 Ft Lb)	> 1084 KJ (approx. 800000 Ft Lb)
Operational scenarios				
VLOS/BVLOS over controlled ground area	1	2	3	4
VLOS in sparsely populated environment	2	3	4	5
BVLOS in sparsely populated environment	3	4	5	6
VLOS in populated environment	4	5	6	8
BVLOS in populated environment	5	6	8	10
VLOS over gathering of people	7			
BVLOS over gathering of people	8			

Figura 3.5: Tabella per la scelta del GRC. Fonte: [1]

2) Definizione del GRC finale:

Partendo dal valore ricavato allo step precedente è possibile, applicando alcune misure specifiche, ottenere una mitigazione del rischio di impatto con una persona all'interno dell'area delle operazioni. La determinazione di questo fattore di rischio finale è legata alla disponibilità che l'operatore ha di applicare tali misure, le quali devono garantire una certa 'robustezza'⁶. È inoltre importante applicare queste misure nell'ordine prescritto per ottenere l'effetto desiderato.

3) Definizione della Air Risk Class (ARC) iniziale:

L'Air Risk è correlato alla probabilità di collisione con altri velivoli di aviazione civile (non si tiene conto della presenza di altri UAS nell'area operativa o nelle vicinanze) e dunque dipende fortemente dalla tipologia di spazio aereo in cui avviene l'operazione (quota, spazio aereo controllato/non controllato, zona aeroportuale/non aeroportuale, sorvolo di ambiente urbano/rurale, ecc.).

La determinazione dell'ARC nella metodologia SORA avviene seguendo lo schema in Figura 3.6. Vi sono una serie di quesiti, riguardanti sia le caratteristiche tecniche dell'operazione da effettuare sia quelle dello spazio

⁴ **Flight technical error:** rappresenta la differenza tra la rotta di volo desiderata e quella effettiva. In aviazione commerciale è legato all'abilità dell'autopilota di seguire la rotta impostata.

⁵ **Path definition error:** rappresenta la differenza tra il percorso definito nel sistema di navigazione e quello desiderato.

⁶ **Robustezza:** rappresenta il livello di integrità con il quale è definita una certa mitigazione ed il livello di affidabilità con il quale l'operatore dell'UAS tiene traccia di tale mitigazione. La robustezza è classificata in base a tre livelli: bassa, media o alta.

aereo in cui deve essere eseguita, a cui il pilota deve rispondere in maniera affermativa o negativa così da stabilire il valore di ARC adeguato. In alternativa, se rese disponibili dall'autorità nazionale o dal provider U-Space, è possibile utilizzare delle mappe di rischio, in cui ogni spazio aereo possiede una propria caratterizzazione in termini di ARC.

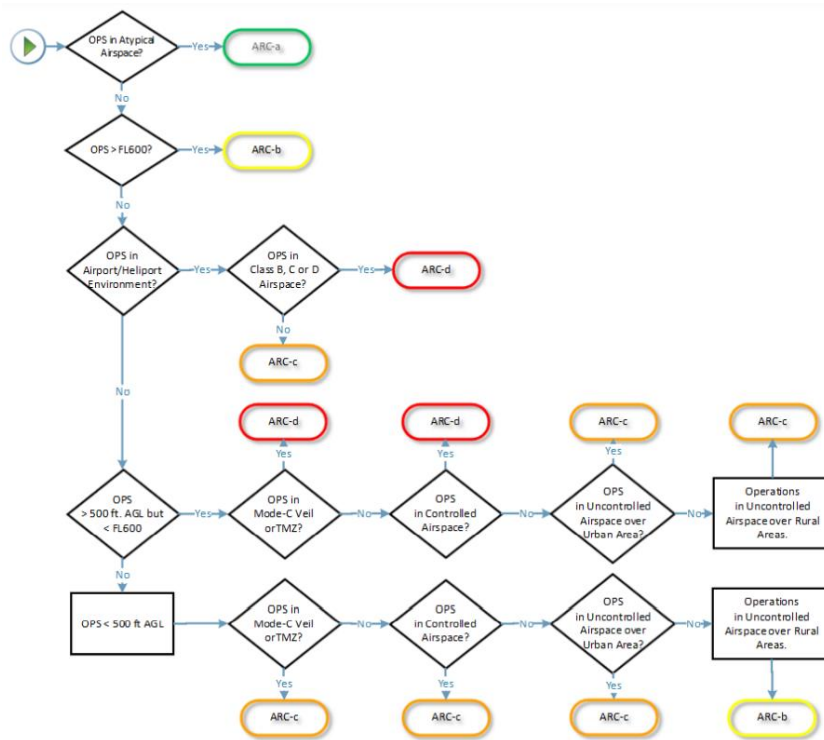


Figura 3.6: Schema per la definizione del ARC. Fonte: [1]

4) Definizione del Residual ARC:

Anche per l'Air Risk è possibile adottare delle misure mitigative volte a ridurre il livello di rischio, che prendono il nome di Strategic Mitigations e Tactical Mitigations. Le prime prevedono la riduzione della probabilità di collisione in volo tramite modifiche, dove possibile, allo spazio delle operazioni ed alle caratteristiche stesse dell'operazione (tempo di volo e/o quota). Le Tactical Mitigations si riferiscono invece all'adozione di sistemi di 'See and Avoid' o di Trasponder per la comunicazione tra velivoli.

5) Final Specific Assurance and Integrity Levels (SAIL):

Il SAIL rappresenta il livello di fiducia con il quale si determina il mantenimento di sicurezza dell'operazione esaminata. Tale valore discende direttamente dalla combinazione di Final GRC e Residual ARC, secondo quanto riportato nella tabella di Figura 3.7.

6) Identificazione degli Operational Safety Objectives (OSO):

Lo step finale del procedimento SORA consiste nell'identificazione di procedure e accorgimenti necessari a raggiungere il livello di sicurezza previsto negli step precedenti. Tali OSOs vengono prescritti in funzione del

SAIL precedentemente calcolato, il quale permette anche di determinare il livello di robustezza necessario per queste procedure (O: Optional, L: Low robustness, M: Medium robustness). All'interno della normativa sono riportati una serie di OSOs storicamente utilizzati in aviazione da cui partire per l'adozione delle corrette misure.

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 3.7: Tabella determinazione SAIL. Fonte: [1]

3.4 Difetti della procedura SORA

L'obiettivo con cui nasce la metodologia SORA è quello di fornire uno strumento di facile applicazione per gli operatori degli UAS, rispetto alle convenzionali pratiche di analisi del rischio utilizzate nell'aviazione convenzionale. Seppur sulla carta quest'approccio qualitativo sembri essere efficace, fornendo un'analisi di "alto livello", esaminandolo più attentamente, come fatto in [61] emergono una serie di punti critici all'interno della procedura che potrebbero portare ad un'errata valutazione del rischio connesso ad una determinata operazione.

Il primo aspetto da analizzare riguarda le competenze nel campo nella definizione del rischio. Infatti, in alcuni scenari particolari, è possibile uscire dalle "linee di demarcazione" tracciate idealmente dalla procedura, ed in queste situazioni è necessario che sia l'Ente di riferimento che l'operatore abbiano un'adeguata esperienza, competenza e conoscenza dello spazio aereo all'interno del quale si dovrà operare, per poter decidere con "maggiore autonomia" come valutare l'operazione in questione. Molto spesso questo passaggio non è completamente soddisfatto, principalmente dal lato dell'operatore, in quanto non tutti coloro che si ritrovano a dover svolgere una determinata procedura hanno una sufficiente esperienza e competenza in ambito aeronautico e dunque il pericolo, se non ben coadiuvati dall'Ente, è quello di finire a sottostimare il rischio annesso, ledendo la sicurezza delle operazioni.

Esiste anche un limite più intrinseco nella procedura, dato dall'approccio largamente qualitativo che il SORA adotta, basato su un calcolo probabilistico generale piuttosto che sull'analisi dei dettagli che caratterizzano la missione, finendo per determinare un livello di rischio troppo generico che va a "penalizzare" in particolar modo le operazioni BVLOS

(le quali possiedono un rischio intrinseco maggiore) che quindi risultano effettuabili solamente in scenari ben precisi e limitati.

Le limitazioni di quest'approccio si riflettono anche nella determinazione del livello di robustezza misure di mitigazione attuabili per un certo scenario. Secondo la procedura SORA la robustezza è classificata in tre livelli: *Basso*, *Medio* o *Alto* ma questa classificazione non è redatta in base all'applicazione di precise leggi matematiche bensì attraverso la possibilità dell'operatore e dell'Ente Nazionale di dichiarare l'applicabilità di quella specifica mitigazione e la capacità di fornire "prove" che sia sicura.

Questo tipo di classificazione porta al verificarsi di situazioni in cui, l'applicazione di comuni misure di mitigazione su scenari diversi fornisce uno stesso valore di Final GRC ma dal punto di vista numerico la reale mitigazione della probabilità di avere una fatalità è differente per i diversi scenari.

Si evince quindi una certa mancanza di univocità nella determinazione di alcuni parametri che influiscono particolarmente nella determinazione del livello di rischio, tra i quali anche ad esempio la densità di popolazione nell'area coinvolta dalle operazioni. All'interno della normativa non è mai esplicitato chiaramente quale sia il limite numerico che determina il passaggio da una zona all'altra (non popolata, scarsamente popolata, popolata e densamente popolata) e dunque l'operatore si trova a dare una propria interpretazione dei dati, che non solo determina una certa incertezza nel risultato ottenuto, ma anche un sovraccarico di lavoro per l'Ente Nazionale, il quale di volta in volta si trova a dover verificare ogni singola missione, cercando di interpretare anche la lettura che l'operatore ha effettuato per verificare se il risultato a cui è pervenuto è corretto o meno. Infine, vi è anche un altro rilevante aspetto che penalizza la metodologia SORA ed è legato alla determinazione della classe di rischio aereo ARC. La valutazione di questo parametro si basa principalmente sulla tipologia di spazio aereo all'interno del quale deve avvenire l'operazione e la classificazione dello spazio aereo è effettuata in ragione della probabilità di incontrare aerei di aviazione convenzionale (con pilota). Non vi è dunque riferimento alla possibilità di incontrare altri velivoli senza pilota, e soprattutto non si tiene in conto il rischio di collisioni aeree tra UAS.

Oltre che trascurare una fonte di rischio rilevante, questa "semplificazione" nel modello non si adegua a quella visione a lungo termine auspicata dall'EASA con la nuova normativa; infatti, se l'intento è quello di arrivare a creare uno spazio aereo adatto all'utilizzo sicuro degli UAS sia per operazioni commerciali che non, è imprescindibile tenere conto della presenza di questi velivoli nel calcolo del livello di rischio correlato ad una missione.

Capitolo 4

Gestione del rischio aereo: approccio matematico-probabilistico

Come discusso nel Paragrafo 3.4, l'esistenza di una serie di limitazioni sia dal punto di vista pratico che concettuale si ripercuote sull'accuratezza del risultato finale fornito dall'applicazione della procedura SORA. È quindi necessario un approccio più rigoroso, basato su solide considerazioni e relazioni matematiche, che permetta di ridurre o evitare tutte quelle situazioni di incertezza legate alle differenti caratteristiche dell'operazione considerata.

Si è quindi cercato di sviluppare un modello, sulla base del lavoro svolto dal Dottor La Cour-Harbo e discusso in [20], in grado di calcolare in maniera predittiva la probabilità di collisione tra un velivolo a pilotaggio remoto (UA) ed uno o più velivoli convenzionali con pilota (GA) all'interno di spazio aereo di classe G⁷, nella condizione in cui il drone non stia seguendo una rotta predefinita o che questa sia sconosciuta inizialmente.

La scelta di considerare questa specifica classe di spazio aereo è dettata dal fatto che all'interno di essa i velivoli non sono soggetti a controllo del traffico e non sono tenuti a fornire un piano di volo, potendo quindi modificare liberamente la loro rotta. Inoltre, all'interno di spazio aereo non controllato vigono le regole della navigazione a vista (VFR) per il mantenimento della corretta separazione tra velivoli, dunque in caso di operazione UAS in BVLOS, per la quale il modello si adatta molto bene, risulta pressoché impossibile per il pilota del drone adottare manovre SAA.

Questi fattori, uniti alla mancanza di efficaci sistemi di DAA a bordo dei velivoli a pilotaggio remoto, contribuiscono ad un intrinseco aumento del rischio di collisione aerea all'interno di spazio aereo non controllato, rendendo quindi di grande interesse la determinazione qualitativa di tale valore.

Si ritiene necessario specificare come i risultati forniti dal modello implementato non tengano conto dei danni provocati dalla caduta di detriti successivi alla collisione, ma si riferiscano solamente alla probabilità, per ora di volo, che si verifichi una collisione in aria tra UA e GA.

Ciò che succede in seguito alla collisione verrà approfondito all'interno del Capitolo 5.

Nei paragrafi successivi si andranno ad analizzare la struttura del modello e la determinazione dei dati necessari alla sua implementazione.

4.1 Struttura del modello

Prima di analizzare l'ossatura vera e propria del metodo di calcolo è doveroso soffermarsi sulle ipotesi iniziali, necessarie per una più semplice, ma comunque valida, applicazione del modello.

⁷ **Spazio aereo di classe G:** è la classificazione tipica degli spazi aerei poco trafficati, nel quale non vi è controllo del traffico ma è solo fornito il Servizio Informazioni di Volo e il Servizio di Allarme. Secondo quanto previsto dall'ENAC, tale classificazione si applica allo spazio aereo così detto INFERIORE, dalla superficie sino a FL195 incluso.

Le principali assunzioni sono di seguito riportate e spiegate:

- UA e GA sono raffigurati tramite dei cilindri il cui diametro rappresenta la larghezza e l'altezza del cilindro è equivalente a quella del velivolo considerato
- UA e GA volano indipendentemente
- L'UA vola al di sotto di una quota limite stabilita (in genere si considera l'altezza massima prevista dalla normativa)
- La probabilità che il GA si trovi sotto la quota limite è conosciuta o stimata
- Le direzioni di volo sono uniformemente distribuite tra 0° e 360° per entrambi i velivoli
- La posizione geografica dei velivoli è uniformemente distribuita all'interno di un'area predefinita
- Quando in prossimità l'uno dell'altro i due velivoli non compiono spostamenti verticali
- L'altitudine di volo di entrambi i velivoli viene valutata in maniera probabilistica tramite funzioni di distribuzione note
- Il GA è prevalentemente al di sopra dell'altitudine limite nelle aree in cui l'UA è autorizzato a volare

L'utilizzo di queste assunzioni permette l'applicabilità del modello esclusivamente a spazi aerei non soggetti a controllo del traffico, ed inoltre non vengono considerate le collisioni dovute a variazioni di quota durante il volo, questo perché tipicamente la distanza percorsa orizzontalmente è molto maggiore di quella percorsa in verticale, dunque l'errore commesso è poco rilevante, a fronte di una notevole semplificazione nel modellizzare le cause di una possibile collisione.

Sulla base di quanto appena descritto la probabilità di Mid-Air Collision (MAC) è calcolabile tramite la seguente formula:

$$p_{MAC} = p_{HC} p_{VC} p_{below} \lambda_{STM} \quad (4.1)$$

Il significato dei quattro termini, indipendenti tra di loro, è di seguito analizzato:

- 1) p_{HC} rappresenta il rateo di collisione sul piano orizzontale, espresso in Hertz. È inteso come probabilità che i due velivoli si trovino sullo stesso punto della rotta nel piano North-East, all'interno di un sistema di riferimento NED, ed è calcolabile tramite la relazione **4.2**:

$$p_{HC} = \frac{1}{t_i + t_o} = \frac{p_i}{t_i} \quad (4.2)$$

Dove:

- t_i è il tempo medio in cui i due velivoli si intersecano orizzontalmente
- t_o è il tempo medio in cui i due velivoli non si intersecano orizzontalmente

- p_i è la probabilità di intersezione dei due cilindri rappresentativi dei velivoli

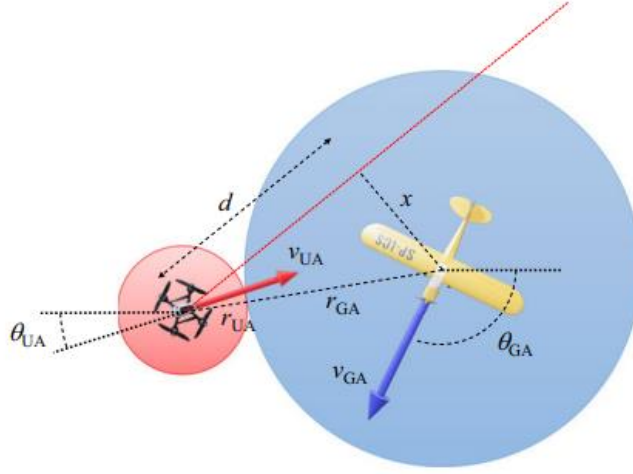


Figura 4.1: Schema di intersezione tra velivoli all'interno del modello. *Fonte:* [20]

Il termine t_i è definito come il rapporto tra i valori medi della distanza d percorsa dal GA durante l'intersezione sicura dei due cilindri e della velocità relativa v dei velivoli:

$$t_i = \frac{2\langle d \rangle}{\langle v \rangle} \quad (4.3)$$

Essendo:

$$d = \sqrt{(r_{GA} + r_{UA})^2 - x^2} \quad (4.4)$$

con r_{GA} ed r_{UA} rispettivamente i raggi dei cilindri rappresentativi di velivoli pilotato e drone ed x la distanza dei centri dei due velivoli, misurata rispetto alla direzione relativa di volo. Assumendo x uniformemente distribuito tra $[0, r]$ è possibile scrivere:

$$\begin{aligned} \langle d \rangle &= \frac{1}{r} \int_0^r d(x) dx = \\ &= \frac{1}{r} \left[\frac{1}{2} x \sqrt{(r_{GA} + r_{UA})^2 - x^2} + \frac{1}{2} (r_{GA} + r_{UA})^2 \arcsin \left(\frac{x}{(r_{GA} + r_{UA})} \right) \right]_0^r = \\ &= \frac{(r_{GA} + r_{UA}) \pi}{4} \quad (4.5) \end{aligned}$$

Il termine v è definito come la norma della differenza tra il vettore velocità dell'UAS \mathbf{v}_{UA} e quello del velivolo convenzionale \mathbf{v}_{GA} :

$$v = \|\mathbf{v}_{UA} - \mathbf{v}_{GA}\| = \sqrt{v_{GA}^2 + v_{UA}^2 - 2v_{GA}v_{UA}\cos(\theta_{UA} - \theta_{GA})} \quad (4.6)$$

dove v_{GA} e v_{UA} sono i moduli dei vettori velocità sopracitati, mentre θ_{GA} e θ_{UA} rappresentano gli angoli formati dal vettore velocità rispetto al riferimento globale, rispettivamente per velivolo pilotato e drone. Assumendo per entrambi questi angoli una distribuzione uniforme tra $[0, 2\pi]$ è possibile scrivere la funzione di distribuzione probabilistica per $\theta = \theta_{UA} - \theta_{GA}$:

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{2\pi - \theta}{4\pi^2} & \text{se } |\theta| < 2\pi \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Tenendo presente che, per quanto appena discusso:

$$\langle \cos\theta \rangle = \int_{-2\pi}^{2\pi} \cos(\theta) f(\theta) d\theta = 0$$

è possibile scrivere:

$$\langle v \rangle = \sqrt{v_{GA}^2 + v_{UA}^2} \quad (4.7)$$

Andando ora a sostituire la (4.5) e la (4.7) nella relazione (4.3) è possibile ottenere:

$$t_i = \frac{(r_{GA} + r_{UA})\pi}{2\sqrt{v_{GA}^2 + v_{UA}^2}} \quad (4.8)$$

Per quanto riguarda la probabilità di intersezione tra due cilindri, definita come:

$$p_i = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (4.9)$$

può anche essere espressa come la frazione di area G'/G coperta dagli stessi. Il termine G' rappresenta l'area coperta dai cerchi, proiezione del cilindro su un piano 2D, appartenenti al GA e all'UA in un dato istante temporale, ed è calcolata secondo la seguente formula:

$$G' = \pi(r_{GA} + r_{UA})T \quad (4.10)$$

dove T rappresenta il tempo medio di occupazione dello spazio aereo, espresso come ore anno, riferito al velivolo, o alla categoria di velivoli, considerato.

Riprendendo l'equazione (4.2) e sostituendovi quanto ricavate nelle relazioni (4.10) e (4.8) è possibile pervenire alla formulazione finale per il calcolo del rateo di collisione sul piano orizzontale:

$$\begin{aligned} p_{HC}(r_{GA}, r_{UA}, v_{GA}, v_{UA}, T) &= \frac{p_i}{t_i} = \frac{G'}{G t_i} = \frac{\pi(r_{GA}^2 + r_{UA}^2)T}{\frac{(r_{GA} + r_{UA})\pi}{2\sqrt{v_{GA}^2 + v_{UA}^2}} G} \\ &= \frac{2(r_{GA}^2 + r_{UA}^2)T \sqrt{v_{GA}^2 + v_{UA}^2}}{(r_{GA} + r_{UA})G} \quad (4.11) \end{aligned}$$

Tale formulazione può essere semplificata sotto l'ipotesi di considerare $r_{GA} \gg r_{UA}$ e $v_{GA} \gg v_{UA}$, ma all'interno di questo modello l'assunzione in questione non viene effettuata.

2) p_{VC} è la probabilità condizionale che i due velivoli si trovino alla stessa altitudine e con velocità verticale nulla, ed è quindi dipendente dalla distribuzione di quota associata al velivolo considerato, sia UA che GA.

La quota di volo si considera riferita al punto medio del cilindro in direzione verticale; dunque, la collisione può avvenire solo se la differenza di altitudine tra i due velivoli è minore della somma delle altezze dei cilindri, quindi:

$$p_{VC} = \iint_{\substack{|\alpha-\beta| < (h_{GA}+h_{UA}) \\ \beta < z_{MAX}}} f_{GA}(\alpha) f_{UA}(\beta) d\alpha d\beta =$$

$$= \int_0^{z_{MAX}} f_{UA}(\beta) (F_{GA}(\beta + \frac{h_{GA}+h_{UA}}{2}) - F_{GA}(\beta - \frac{h_{GA}+h_{UA}}{2})) d\beta \quad (4.12)$$

Essendo:

- β la quota del GA
- α la quota del UA
- h_{GA} e h_{UA} le altezze dei cilindri dei due velivoli
- z_{MAX} la quota massima di riferimento per il drone
- f_{GA} ed f_{UA} le densità di probabilità che descrivono la quota dei velivoli
- F_{GA} la distribuzione cumulativa legata a f_{GA}

3) p_{below} rappresenta la probabilità che il velivolo si trovi al di sotto della quota di riferimento z_{MAX} . All'interno del modello si fa una importante considerazione, ovvero che se il GA si trova ad una quota inferiore a quella di riferimento tipicamente significa che, escluse alcune fasi del volo, non è in una condizione operativa standard; quindi, se si fosse in grado di conoscere il tasso di occorrenza di queste situazioni si potrebbe fare una determinazione migliore del valore di p_{below} . Questo termine inoltre è legato alla densità di probabilità f_{GA} del punto precedente, dipendente dal tipo di operazione che il mezzo pilotato è solito effettuare e quindi varia anche a seconda della classe di velivolo considerata.

- 4) λ_{STM} è un fattore riduttivo, il cui scopo è tenere in considerazione l'effetto di sistemi di mitigazione del rischio, ad esempio, tramite limitazioni in termini di spazio e tempo delle operazioni, oppure per via della presenza di sistemi di Detect and Avoid a bordo dei velivoli. All'interno del modello qui presentato è imposto il *valore unitario* per tale parametro, così da poter analizzare il caso più *conservativo*, non disponendo di informazioni sufficientemente accurate per poter stimare il valore del fattore mitigativo a seconda della tipologia utilizzata.

Quanto discusso sinora è valido per il calcolo della probabilità di collisione tra un sistema a pilotaggio remoto ed un solo velivolo convenzionale, ma è possibile estendere la formulazione in modo da considerare tutti i velivoli presenti all'interno dello spazio aereo di riferimento. Ciò è possibile calcolando il termine p_{MAC} per ogni GA, sfruttando la seguente relazione:

$$p_{MAC,TOT} = \sum_{i=0}^{\# di GA} p_{MAC,i} = \sum_{i=0}^{\# di GA} (p_{Hci} p_{Vci}) n_i p_{belowi} \lambda_{STMi} \quad (4.13)$$

Il termine n_i rappresenta il numero di velivoli appartenenti alla categoria considerata (ala fissa, elicotteri, ecc.) ed ogni fattore della moltiplicazione deve essere valutato per il singolo GA, sulla base delle proprie caratteristiche. Infatti, i termini v_{GA} , r_{GA} , h_{GA} ed f_{GA} variano a seconda del modello di velivolo preso in esame.

Alla base di questa formulazione vi sono due importanti assunzioni, in primis il fatto che non vi siano sovrapposizioni tra i cilindri rappresentativi dei diversi GA, cosa ragionevole date le dimensioni dello spazio aereo considerato.

In secondo luogo, non viene considerato il fatto che nel caso in cui il drone abbia una collisione con un velivolo, la probabilità di collidere con un altro diventi zero, ciò comunque risulta accettabile dato il basso valore dei singoli $p_{MAC,i}$.

4.2 Aspetti critici

Nonostante la rigorosa base matematica che sta dietro lo sviluppo di questo modello di calcolo, come analizzato all'inizio del paragrafo precedente, vi sono una serie di ipotesi semplificative ed assunzioni all'interno del modello, necessarie a permettere una più semplice gestione dal punto di vista matematico dei fenomeni considerati, ma che si traducono in un errore numerico nella valutazione di p_{MAC} . Di seguito sono riportati i principali elementi critici nel modello:

- *Mancata considerazione della velocità verticale nel calcolo del tempo di intersezione t_i*

Tale semplificazione risulta accettabile, in quanto anche considerando l'approssimazione 3D del volume del velivolo, tramite la definizione di un ellissoide di equazione:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

il tempo di fuga dal centro del velivolo, che si muove con velocità vettoriale (V_x, V_y, V_z) è dato dalla seguente espressione:

$$T_i = \frac{r}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + (4V_z)^2}} \quad (4.14)$$

che confrontata con il caso $V_z = 0$, assumendo una velocità verticale cento volte più piccola di quella orizzontale e non trascurabile per il 10% del volo, porta ad una variazione del 1.6% sul risultato finale, dunque trascurabile.

- *Approssimazione cilindrica dei due velivoli*

L'intersezione dei cilindri relativi ai velivoli potrebbe non necessariamente significare una collisione, anche considerando le dimensioni del cilindro minime per contenere il velivolo in questione. Infatti, vi sono delle porzioni di cilindro non occupate dal velivolo, dunque il valore ottenuto risulta sovrastimato. Questo da un lato potrebbe risultare negativo se si volesse un calcolo estremamente accurato, dall'altro potrebbe essere un vantaggio in quanto permette di tenere in considerazione anche i casi di passaggi estremamente ravvicinati.

In generale l'errore che si commette è molto piccolo, inoltre in prima approssimazione la proiezione della sezione del velivolo nella direzione di volo è molto simile ad un rettangolo; dunque, quest'approssimazione è accettabile.

- *Area di riferimento del modello (G)*

All'interno del modello l'area considerata è tipicamente una nazione intera, in quanto è più facile reperire dati sulla presenza di velivoli nello spazio aereo nel corso di un determinato lasso temporale. Ciò determina la presenza di zone nelle quali in realtà ai droni non è permesso volare e questo contribuisce ad una leggera sovrastima del valore di p_{MAC} . Si potrebbe considerare un'area di riferimento G^* minore, escludendo le zone interdette al volo dei sistemi UAS, ma così facendo bisognerebbe anche modificare il termine T , cioè il tempo di occupazione dello spazio aereo da parte del velivolo GA, in quanto anch'esso è riferito all'intera superficie G , comportando una complicazione nella determinazione del parametro stesso che non sarebbe comunque giustificata essendo il rapporto G^*/G molto prossimo ad uno e di conseguenza il risultato non viene particolarmente influenzato.

- *Sensibilità negli estremi del dominio nel calcolo del termine di probabilità verticale*

Il calcolo di p_{VC} parte dall'assunzione di considerare la quota riferita al punto medio del cilindro. Questa ipotesi fa sì che per quote di volo prossime a z_{MAX} parte dei cilindri che rappresentano i velivoli potrebbe risultare fuori dal dominio considerato, andando ad alterare il valore di probabilità. Tale alterazione risulta rilevante nel caso particolare in cui l'altezza del velivolo sia relativamente elevata rispetto al valore di z_{MAX} , mentre in casi normali tale errore è trascurabile.

4.3 Definizione parametri fondamentali

Per poter implementare e testare efficacemente ed accuratamente la procedura di calcolo analizzata è necessario definire e conoscere una serie di parametri fondamentali, riferiti sia a velivoli UA che GA, che stanno alla base delle formule discusse al paragrafo 4.1 e di seguito elencati:

- G : area di applicazione del modello. Tipicamente si considera una nazione intera in quanto è più semplice reperire dati relativi al traffico aereo nell'area analizzata. Nel documento si considera l'estensione territoriale italiana, di conseguenza $G = 302073 \text{ Km}^2$
- h, r : dimensioni caratteristiche dei cilindri rappresentativi di GA ed UA. h rappresenta l'altezza del velivolo, mentre r può essere definito come metà dell'apertura alare se si tratta di velivolo ad ala fissa, oppure come metà della lunghezza del velivolo, rotor compresi
- v : velocità di volo caratteristica del velivolo considerato, sia esso UA o GA. Non si considera la velocità massima raggiungibile né in volo normale né eventualmente in 'modalità sport' in quanto utilizzate di rado nell'ambito professionale
- n : numero di velivoli GA presenti nell'area considerata. Se ci si riferisce ad una nazione, tale valore rappresenta il numero di velivoli operativi registrati presso l'organo di gestione dell'aviazione dello Stato in questione
- T : tempo di occupazione dello spazio aereo, espresso in ore di volo per anno, riferito ad ogni singola categoria di velivoli GA considerata
- p_{below} : probabilità che il velivolo GA si trovi a volare al di sotto della quota massima di riferimento per i velivoli UA. Tale valore dipende dal tipo di

velivolo considerato e tipicamente rappresenta una condizione di funzionamento non-nominale

- f : funzione distribuzione di quota tra 0 e z_{MAX} per UA e GA. Questa funzione dipende dal tipo di operazione che sta compiendo, o che è solito compiere, il velivolo considerato. Nel documento, specialmente per quanto riguarda i velivoli UA, si è assegnata una distribuzione più generica, che fosse rappresentativa delle operazioni tipicamente condotte dallo specifico UAS, ma nel caso in cui si fosse a conoscenza delle caratteristiche specifiche dell'operazione è possibile assegnare una funzione di quota più precisa ed accurata.

All'interno del modello sono utilizzate due distribuzioni di quota differenti:

- Normale (o Gaussiana⁸) 'N': caratterizzata dal valore nominale μ e dalla deviazione standard σ .
È doveroso precisare che nel caso di tale distribuzione i valori sono scalati in maniera tale che sull'intervallo $[0, z_{MAX}]$ considerato, l'integrale della funzione sia pari ad uno.
- Uniforme (o a gradino) 'U': il valore di probabilità è nullo al di fuori dell'intervallo $[0, z_{MAX}]$ considerato. In questo caso il parametro μ assume il significato di estremo di sinistra dell'intervallo considerato, mentre σ quello di estremo di destra.

Prima di procedere occorre fare una importante precisazione riguardo la definizione numerica dei parametri sopra analizzati. I dati relativi al traffico aereo, utilizzati per stimare i valori dei diversi termini, si riferiscono tutti all'anno 2019 in quanto non alterati dagli effetti dei blocchi imposti per via della pandemia di COVID-19 e quindi rappresentativi del reale volume di movimenti all'interno dello spazio aereo considerato.

Definizione parametri GA

Nel caso in esame si è scelto di considerare cinque differenti categorie di velivoli pilotati, in modo tale da rappresentare nella maniera più conforme possibile la composizione degli utilizzatori dello spazio aereo italiano. In accordo con quanto definito nel *EASA Safety Report 2020* [33], si riportano di seguito le denominazioni utilizzate all'interno del modello:

- **Velivoli ad ala fissa (Fixed Wing)**: tale classe comprende i velivoli ad ala fissa con dotati di sistema propulsivo, adibiti ad operazioni di Air-Taxi quelli con MTOM inferiore a 5700 Kg utilizzati per operazioni non-commerciali.
- **Velivoli ad ala rotante (Rotorcraft)**: questa categoria comprende gli elicotteri, senza particolari limitazioni sul MTOM, utilizzati per operazioni commerciali e non, nonché per operazioni specializzate. Non sono considerati

⁸ **Distribuzione Gaussiana**: è una distribuzione di probabilità continua utilizzata per descrivere il comportamento variabili casuali che tendono a concentrarsi attorno ad un valore medio. Prende il nome dal matematico tedesco Carl Friedrich Gauss.

i mezzi adibiti al soccorso aereo (HEMS), in quanto appartenente ad una categoria a parte, che sarà definita successivamente

- **Aerostati (Ballons):** comprende quei velivoli cosiddetti ‘più leggeri dell’aria’ che sfruttano aria calda o altri gas più leggeri dell’aria per il sostentamento
- **Alianti (Gliders):** insieme dei velivoli ad ala fissa sprovvisti di sistema propulsivo, che sfruttano le correnti ascensionali per rimanere in volo
- **HEMS (Helicopter Emergency Medical Service):** all’interno di questa ultima categoria sono considerati i velivoli ad ala rotante adibiti al soccorso aereo

Note le tipologie di aeromobili considerate, si riportano, in Tabella 3, i valori dei parametri principali prima discussi.

Attraverso i dati riportati nel documento [28] è stato possibile valutare il numero di velivoli di ogni categoria registrati in Italia. Mentre per la definizione del parametro T si è fatto riferimento a quanto riportato in [29] e [65]. Seppur i dati presenti in questo ultimo documento si riferissero allo spazio aereo USA, diverso da quello italiano considerato nel modello sia per conformazione che per volume di traffico, si sono rivelati molto utili come base di partenza, opportunamente scalati, per la valutazione del tempo di occupazione, in riferimento anche ai valori riportati in [20].

Per quanto riguarda dimensioni e velocità caratteristiche si è anche in questo caso fatto riferimento a quanto riportato in [20], essendo le categorie considerate sostanzialmente le stesse. I valori utilizzati sono stati scelti in maniera tale da essere il più rappresentativi possibile della categoria di riferimento.

Lo stesso vale per il termine p_{below} , in quanto non disponendo di dati sufficienti a poterlo stimare si è scelto di utilizzare i valori presenti nel documento sopra citato, poiché prodotti da esperti del settore.

Infine, a proposito della distribuzione di quota, questa è stata assegnata in modo tale da fornire una rappresentazione veritiera del comportamento della specifica classe di velivoli al di sotto della quota di riferimento, tenendo conto delle tipiche condizioni operative che portano a trovarsi a basse altitudini, come ad esempio: voli a bassa quota, atterraggi di emergenza o stazionamenti in prossimità del terreno per operazioni di soccorso.

	Ala fissa	Ala rotante	Aerostati	Alianti	HEMS
p_{below}	0,1%	5%	1%	10%	5%
h [m]	2	3	25	1,2	3,9
r [m]	6	5	9,5	10	7,2
v [m/s]	75	56	10	50	75,4
n	13314	504	87	144	48
T [ore/anno]	100	147	17	32	200
f	U	N	N	U	N
μ [m]	0	80	100	0	80
σ [m]	z_{MAX}	50	60	z_{MAX}	50

Tabella 3: Parametri fondamentali per velivoli GA

Definizione parametri UA

Per effettuare i test necessari alla validazione del modello e alla determinazione dell'influenza dei diversi parametri fondamentali sul valore di p_{MAC} si è scelto di considerare cinque differenti tipologie di UAS, una per ogni categoria identificata dalla normativa europea.

I modelli sono stati scelti anche in base alla loro diffusione commerciale, così da poter ottenere risultati quanto più possibile veritieri e rappresentativi dei velivoli senza pilota realmente operanti nello spazio aereo.

In accordo con quanto presente nel documento [1] sono di seguito riportate le categorie considerate, con le rispettive limitazioni ed il modello di drone scelto:

- **Categoria C0:**

Requisiti:

- MTOM inferiore a 250 g, payload incluso
- Velocità orizzontale massima di 19 m/s

Modello: DJI Mavic Mini 2

- **Categoria C1:**

Requisiti:

- MTOM inferiore a 900 g, payload incluso
- Velocità orizzontale massima di 19 m/s

Modello: Hubsan Zino

- **Categoria C2:**

Requisiti:

- MTOM inferiore a 4 Kg, payload incluso

Modello: Yuneec Typhoon H+ e Parrot Disco Pro

- **Categoria C3:**

Requisiti:

- MTOM inferiore a 25 Kg, payload incluso
- Dimensione massima caratteristica inferiore a 3 m

Modello: DJI Matrice 600 Pro

In Tabella 4 sono riportati i valori numerici dei principali parametri, riferiti ai velivoli UA, per ogni modello considerato.

Si è scelto di analizzare anche un modello di UAS ad ala fissa, il Parrot Disco Pro, appartenente alla categoria C3, così da poter studiare la variazione della probabilità di collisione in funzione delle caratteristiche peculiari di questa tipologia di aeromobile, nello specifico: dimensioni contenute e velocità più elevata a parità di MTOM ed in particolare una differente funzione di distribuzione di quota.

Vi è una ulteriore categoria prevista dalla normativa, la C4, la quale possiede le stesse limitazioni sul MTOM della categoria C3 ma non prevede restrizioni sulle dimensioni caratteristiche. Nel caso in esame non è stato preso nessun UAS appartenente a questa categoria in quanto i principali modelli, utilizzati in ambito professionale e disponibili sul

mercato, il cui peso al decollo risulti tale da rientrare nella classe C3 posseggono dimensioni caratteristiche inferiori rispetto al limite imposto per questa categoria.

	Mavic Mini2	Hubsan Zino	Yuneec Typhoon HL	Parrot Disco Pro	Matrice 600 Pro
h [m]	0,055	0,1	0,31	0,12	0,73
r [m]	0,1	0,16	0,26	0,575	0,84
v [m/s]	10	11,5	13,5	15	18,1
MTOM [Kg]	0,25	0,7	1,99	0,94	15,5
f	N	N	N	U	N
μ [m]	25	30	40	0	60
σ [m]	20	25	25	Z_{MAX}	40

Tabella 4: Parametri fondamentali velivoli UA

4.4 Definizione MAC rate di riferimento

Per poter valutare l'affidabilità e la veridicità dei risultati prodotti, nonché avere la possibilità di apprezzare concretamente gli effetti prodotti dalla variazione dei parametri fondamentali, si è resa necessaria la definizione di un valore di p_{MAC} da utilizzare come riferimento.

Partendo dai dati contenuti in [33] è stato possibile calcolare il numero complessivo di incidenti aerei⁹ in cui sono stati coinvolti i velivoli appartenenti alle categorie definite nel paragrafo precedente e avvenuti nel corso del 2019 all'interno dello spazio aereo europeo.

Avvalendosi poi dell'utilizzo di una serie di Safety Report, liberamente accessibili e riferiti al periodo 2015-2019, appartenenti a diversi paesi membri dell'Unione Europea, in particolare: Francia [38-41], Italia [36], Irlanda [42-46], Slovacchia [47-50] e Romania [51]; si è potuta valutare, per ognuno di questi Stati, l'incidenza degli eventi di collisione aerea rispetto al totale, andando poi a definire un valore percentuale medio europeo da utilizzare come indice generale. Applicando tale valore percentuale al numero totale di incidenti precedentemente definito si è potuto ricavare un numero indicativo di eventi MAC all'interno dello spazio aereo europeo nel corso del 2019.

Infine, rapportando il valore sopra indicato al numero totale di voli effettuati all'interno dello spazio aereo europeo nel corso del medesimo anno, estratto dal *Network Operations Report 2019* redatto da EUROCONTROL [32], si è ricavato il rateo di accadimento di collisioni aeree utilizzato come riferimento, espresso come evento per ora di volo.

Nonostante tale dato sia molto utile per confrontare i risultati ottenuti, il valore calcolato risulta sicuramente sovrastimato, in quanto a differenza di ciò che si intende all'interno dell'elaborato per evento MAC, discusso al paragrafo 4.1, gli organi di sicurezza nazionali e sovranazionali classificano come evento MAC o NMAC anche situazioni in cui si verifica una perdita di separazione tra due velivoli che però non risulta in un vero e proprio passaggio ravvicinato rischioso, di conseguenza il numero di eventi considerato nella definizione del rateo di riferimento è maggiore di quanto non sarebbe applicando il significato di evento MAC utilizzato in questo documento. Inoltre, tale valore rappresenta uno stato dell'arte, non un obiettivo da raggiungere, ed è stimato sulla base di dati relativamente scarsi, in quanto non riferiti a tutti gli stati membri dell'Unione poiché spesso non reperibili. Si è quindi scelto, nella valutazione dei risultati prodotti, di utilizzare come riferimento anche il rateo pari ad $1 \cdot 10^{-6}$ eventi per ora di volo, in

⁹ **Incidenti aerei:** secondo quanto riportato nell'Annesso 13 dell'ICAO [31], esistono tre differenti tipologie di incidente aereo, cioè dove viene coinvolto un aeromobile, di cui si riportano le definizioni:

- Incidente (Accident): evento connesso all'esercizio di un aeromobile con equipaggio, che avviene tra il momento in cui qualsiasi persona sale a bordo con l'intento di volare ed il momento in cui tutte le persone sono state sbarcate. L'evento può comportare gravi danni alle persone e/o all'aeromobile
- Inconveniente grave (Serious Incident): inconveniente associato all'impiego di un aeromobile nelle circostanze in cui vi era un'alta probabilità che tale evento potesse verificarsi, tra il momento in cui tutte le persone fossero state imbarcate ed il momento in cui tutte fossero state sbarcate.
- Inconveniente (Incident): evento, connesso alle operazioni dell'aeromobile, il cui accadimento può inficiare la sicurezza delle operazioni stesse.

Nel calcolo del numero totale di incidenti vengono considerate tutte e tre queste categorie

maniera tale da tenere conto della sovrastima discussa precedentemente e poter paragonare i risultati prodotti con un valore che possa rappresentare un target di sicurezza per il settore dell'aviazione.

Totale incidenti (2019)	941
% MAC Italia (15-19)	6,45%
% MAC Francia (15-19)	1%
% MAC Irlanda (15-19)	6,25%
% MAC Romania (12-19)	4,4%
% MAC Slovacchia (16-19)	2,9%
%MAC medio europeo	4,2%
Totale collisioni aeree (2019)	40
Totale voli (2019)	11105855
MAC rate medio europeo (2019)	$3.55866 \cdot 10^{-6}$

Tabella 5: Riepilogo dati per il calcolo del MAC rate europeo

Capitolo 5

Analisi dei risultati

5.1 Test Puntuali

Per poter valutare la corretta implementazione del metodo di calcolo precedentemente descritto ed evidenziare l'influenza dei diversi parametri fondamentali all'interno del modello, sono stati effettuati una serie di test, i cui risultati sono qui riportati in forma grafica ed analizzati.

I valori numerici, utili per una più precisa quantificazione dei risultati ottenuti, sono invece consultabili in Appendice A.

5.1.1 Condizioni Nominali

Per condizioni nominali si intendono i test effettuati considerando una quota di volo massima del drone z_{MAX} pari a 120 m e con i valori di traffico pari a quelli riportati in Tabella 3.

In queste condizioni si sono analizzati i singoli termini che compongono la probabilità di collisione p_{MAC} , in particolare: la probabilità di collisione orizzontale p_{HC} in Figura [5.1-5.4] e la probabilità di collisione verticale p_{VC} in Figura 5.1.

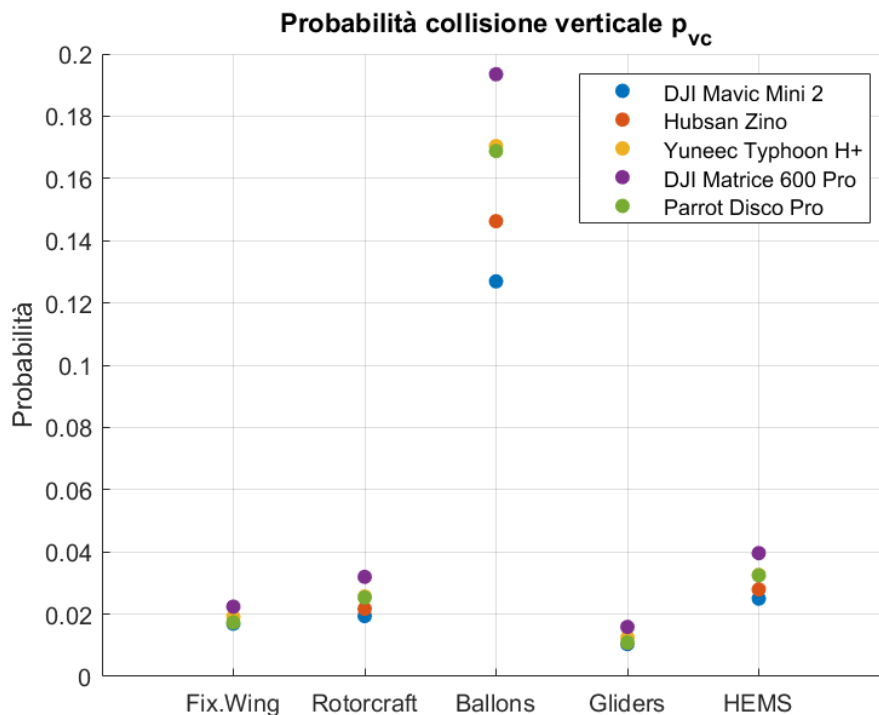


Figura 5.1: Probabilità di collisione verticale in funzione della classe di velivoli GA

Per quanto riguarda il termine p_{VC} , è possibile vedere come i valori riportati si attestino tutti sullo stesso ordine di grandezza, tranne che nel caso dei ‘Balloons’, per i quali i risultati ottenuti sono numericamente più grandi rispetto alle altre categorie di velivoli GA considerate. Questo è giustificabile in quanto la probabilità di collisione verticale dipende principalmente dalla distribuzione di quota assegnata al velivolo GA ed UA considerato, ed in minor parte dall’altezza dei cilindri rappresentativi dei velivoli. Nel caso dei ‘Balloons’, la distribuzione di quota assegnata risulta molto ampia, andando ad aumentare la probabilità che UA e GA si trovino alla stessa quota, cosa che non succede per le altre categorie, essendo le distribuzioni assegnate maggiormente concentrate attorno a quote specifiche, anche in virtù delle tipiche operazioni considerate. L’aumento del valore del termine p_{VC} è anche dovuto alla maggiore altezza caratteristica di questi particolari velivoli rispetto alle altre categorie considerate.

Inoltre, osservando la Figura 5.1 si può vedere come salendo di categoria di drone, aumentando quindi le dimensioni caratteristiche, in particolare il termine h_{UA} , e il valore nominale di distribuzione di quota, la probabilità di collisione cresce, a parità di categoria di velivolo GA considerata.

Nelle Figure 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 è invece possibile osservare il comportamento del termine p_{HC} ; il suo valore cresce per ogni tipologia di GA, seppur in maniera poco marcata, salendo di categoria di UA considerata. Tale aumento è dovuto al fatto che, per come sono stati scelti i modelli di UAS, aumentando la categoria crescono sia le dimensioni che la velocità caratteristica del velivolo non pilotato, ed entrambi questi parametri hanno un’importante influenza sulla probabilità di collisione orizzontale, così come si può vedere dalla Equazione 4.11. Nonostante ciò, l’aumento del valore risulta attenuato in quanto a dominare sono le dimensioni caratteristiche dei velivoli GA, nettamente maggiori rispetto a quelle dei droni presi in considerazione.

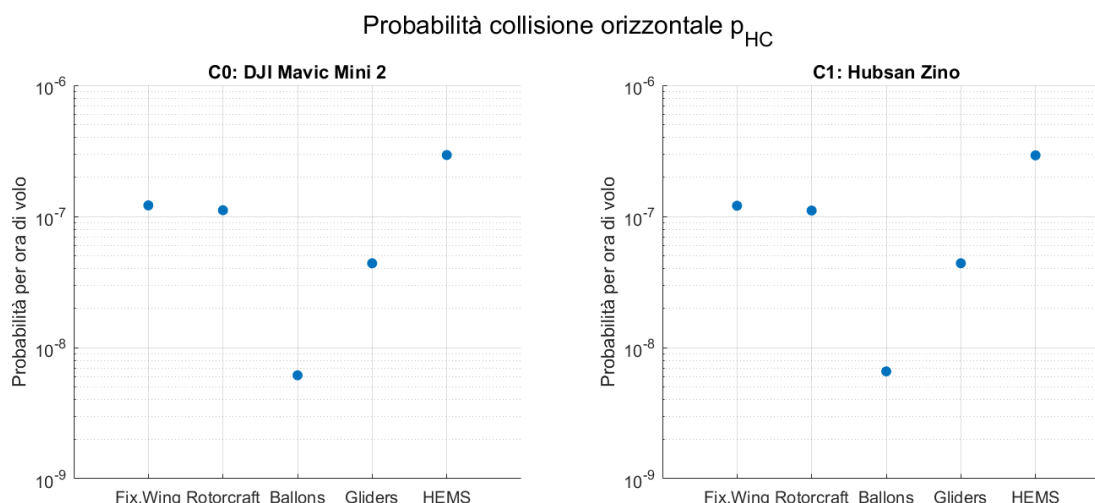


Figura 5.1: Probabilità di collisione orizzontale per droni di classe C0 e C1 in funzione della categoria di velivolo GA

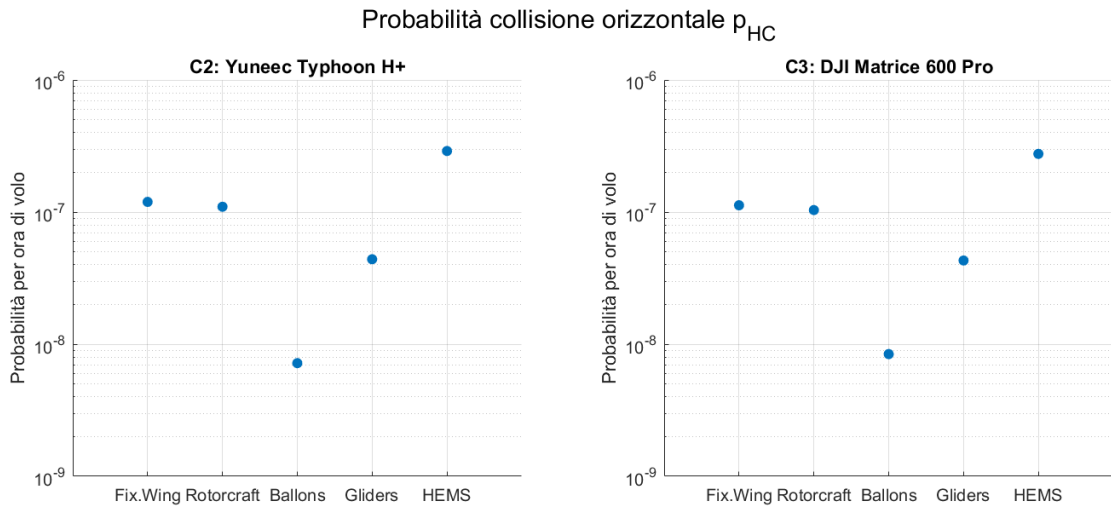


Figura 5.2: Probabilità di collisione orizzontale per droni di classe C2 e C3 in funzione della categoria di velivolo GA

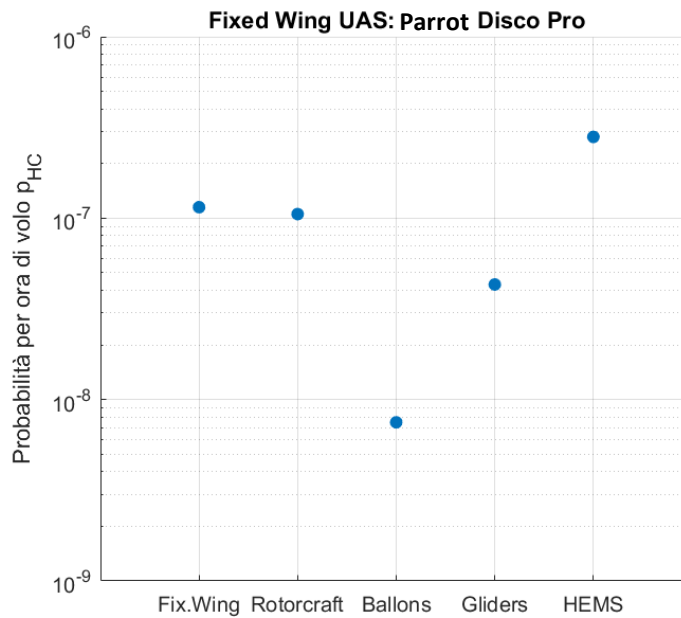


Figura 5.3: Probabilità di collisione orizzontale per drone ad ala fissa in funzione della categoria di velivolo GA

L'effetto combinato dell'aumento di p_{HC} e p_{VC} al variare del modello di UA considerato è visibile in Figura 5.5, 5.6 e 5.7, nelle quali sono riportate le probabilità di collisione per le diverse categorie di GA presenti nel modello. Si deve precisare che i valori fino ad ora riportati si riferiscono alla probabilità di collisione tra un solo drone ed un solo velivolo pilotato.

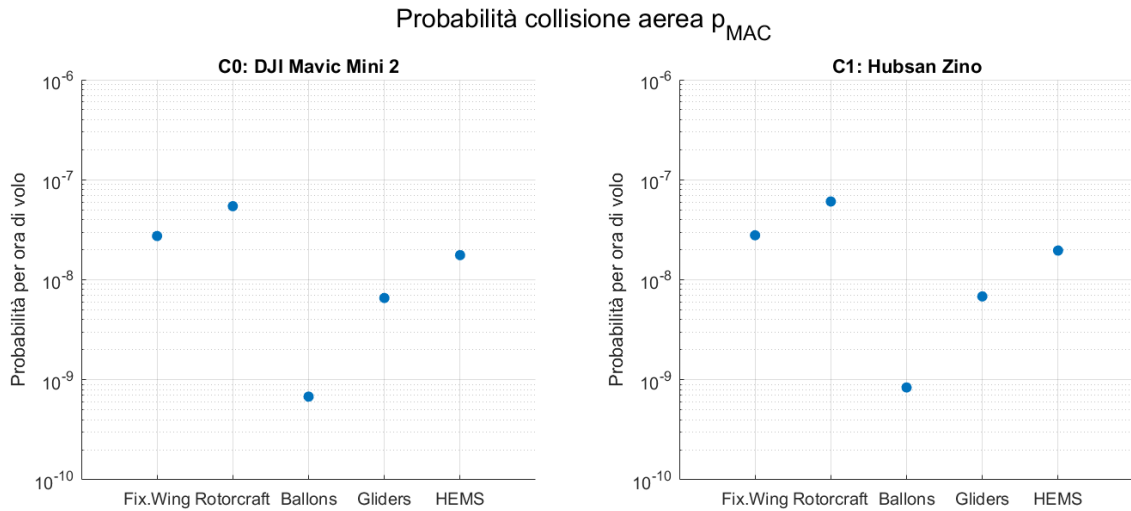


Figura 5.4: Probabilità di collisione aerea per droni di classe C0 e C1 in funzione della categoria di velivolo GA

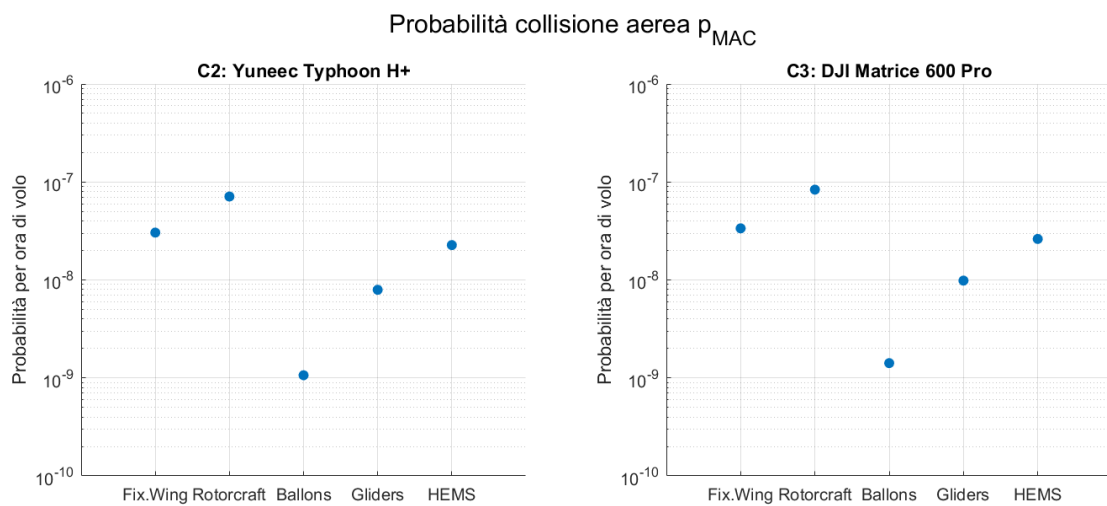


Figura 5.5: Probabilità di collisione aerea per droni di classe C2 e C3 in funzione della categoria di velivolo GA

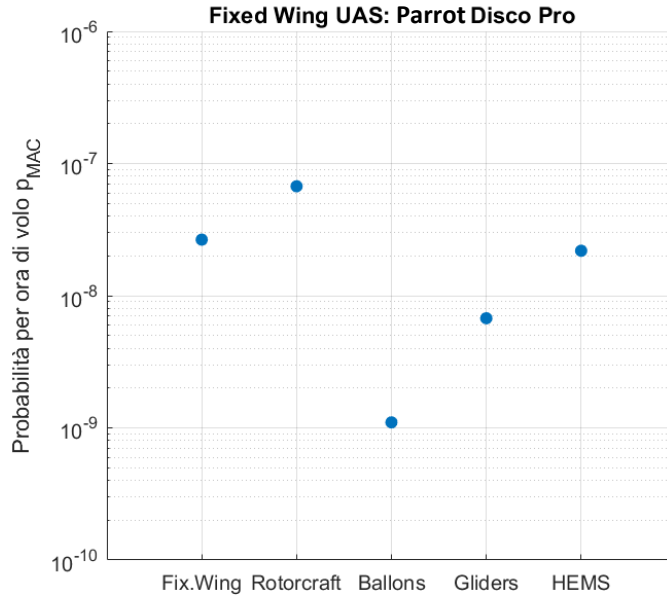


Figura 5.6: Probabilità di collisione aerea per droni ad ala fissa in funzione della categoria di velivolo GA

Confrontando i valori ottenuti con quelli riportati in [20] è possibile notare come gli ordini di grandezza risultino molto simili, andando a rafforzare la veridicità dei risultati ottenuti. In Figura 5.8 sono invece presentati i dati relativi al termine p_{MAC} totale, in funzione del modello di drone considerato. Si vede subito come i valori ottenuti risultino ampiamente inferiori rispetto ai valori di riferimento discussi nel Paragrafo 3.4, rendendo di fatto il rischio di collisione aerea tra drone e velivoli pilotati quasi trascurabile al momento.

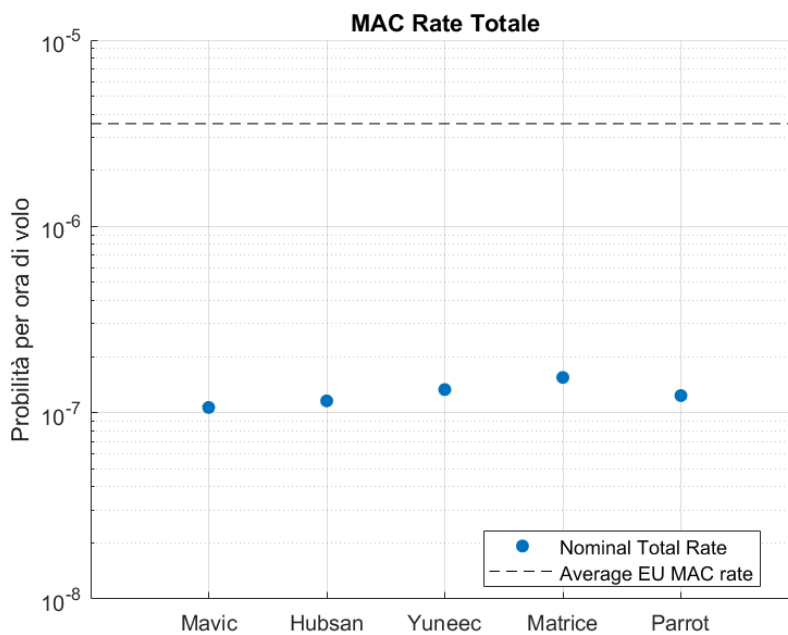


Figura 5.7: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone

Non solo, il grafico in questione permette anche di apprezzare l'influenza di dimensioni, velocità caratteristica e distribuzione di quota del velivolo UA, infatti, per come sono stati scelti i modelli, questi tre parametri fondamentali crescono al crescere della categoria di drone considerata, andando anche ad aumentare il MAC rate totale. In particolare, l'effetto della velocità è significativamente apprezzabile nel caso del Parrot Disco Pro, il quale appartiene alla categoria C3, come lo Yuneec Typhoon H+ ma con dimensioni ridotte rispetto a quest'ultimo. Nonostante questo, il valore di probabilità totale risulta molto simile per i due velivoli, questo perché il Parrot, essendo un drone ad ala fissa, possiede una velocità caratteristica maggiore rispetto al Typhoon, andando a compensare la differenza di dimensioni.

5.1.2 Effetto della quota massima di volo

Come discusso anche nel Paragrafo 3.2, non tutte le zone considerate all'interno della superficie di riferimento G permettono il libero volo degli UAS. La *Circolare ATM 09-A* emanata il 24 Marzo 2021 dall'ENAC definisce:

Zona geografica unica dell'UAS: “una porzione di spazio aereo stabilita dall'autorità competente che agevola, limita o esclude le operazioni UAS al fine di far fronte ai rischi connessi alla sicurezza, alla riservatezza, alla protezione dei dati personali, alla sicurezza o all'ambiente derivanti dalle operazioni UAS”

All'interno di tali zone, situate tipicamente nelle immediate vicinanze di aeroporti ed eliporti civili e/o militari, a seconda della distanza a cui ci si trova rispetto alla pista sono in vigore delle limitazioni sulla quota massima di volo raggiungibile dall'UAS. I principali limiti operativi sono fissati a 25, 45 e 60 m dal punto di superficie terrestre più vicino.

Si è quindi scelto di considerare le quote precedentemente elencate per valutare l'effetto del parametro z_{MAX} , nonostante queste si riferiscano a spazio aereo controllato trovandosi in vicinanza di aeroporti.

Come ci si aspettava, osservando quanto riportato in Figura 5.9 si può notare come al diminuire della quota massima di volo consentita per il drone diminuisca anche il valore di probabilità totale. Tale riduzione è più accentuata per i velivoli di categoria maggiore, possedendo quest'ultimi un valore nominale di quota più elevato.

La diminuzione di probabilità è dovuta esclusivamente alla riduzione del termine p_{VC} , che come detto nel Sottoparagrafo 5.1.1 dipende principalmente dalla distribuzione di quota assegnata a UA e GA. Abbassando la quota massima di volo si riduce la probabilità di trovarsi alla stessa altitudine del velivolo pilotato, poiché questi ultimi hanno valori nominali di distribuzione di quota più elevati, che vengono quindi tagliati fuori considerando z_{MAX} più piccole.

In Figura 5.9 è anche possibile osservare cosa succede superando il limite $z_{MAX} = 120$ m. Si è infatti scelto di analizzare anche il comportamento del MAC rate alzando la quota massima a 200 m, immaginando un possibile aumento nel limite operativo fissato dalla normativa. Così come per i valori precedenti, anche in questo caso il comportamento osservato è in linea con quanto atteso, infatti è possibile osservare come la probabilità totale cresca rispetto agli altri casi. L'aumento è apprezzabile solo per il Parrot Disco Pro, il quale possiede una distribuzione di quota uniforme tra 0 e z_{MAX} essendo un drone ad

ala fissa, e per il Matrice 600 Pro, il cui valore nominale di quota è maggiore rispetto agli altri droni considerati, aumentando il valore di probabilità per quote maggiori. Nel caso del Mavic Mini 2, dell'Hubsan Zino e dello Yuneec Typhoon H+, il valore di probabilità coincide per $z_{MAX} = 120\text{ m}$ e $z_{MAX} = 200\text{ m}$, in quanto le distribuzioni di quota assegnate a questi velivoli non coprono quote di volo così elevate, rendendo quindi ininfluenza l'aumento della soglia massima.

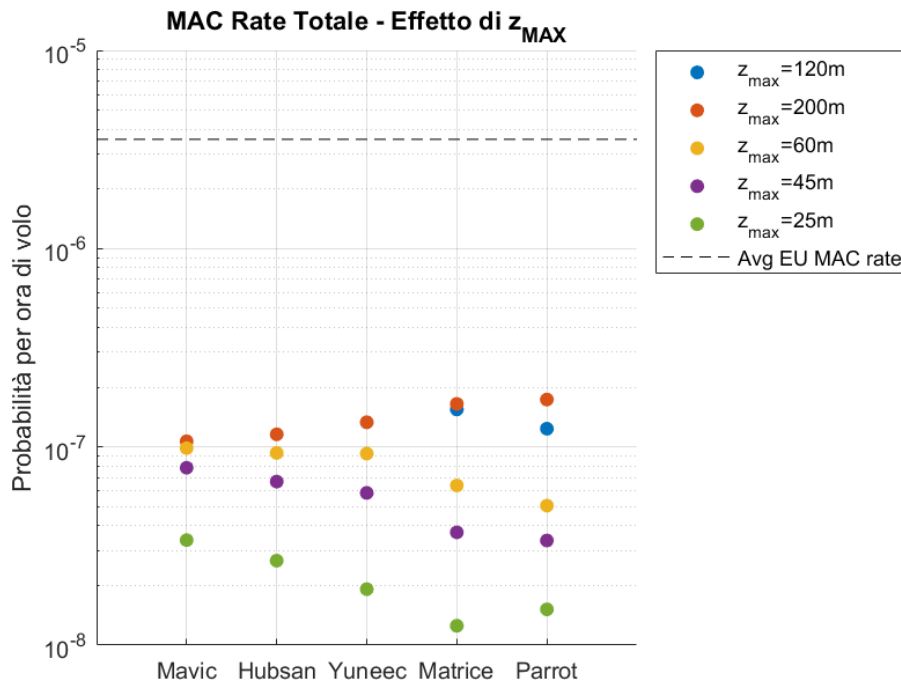


Figura 5.8: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone, al variare della quota massima

5.1.3 Effetto del traffico di aviazione generale

Per come è stato sviluppato e implementato il modello, la probabilità di collisione aerea dipende fortemente dal volume di traffico considerato, di conseguenza si è cercato di quantificare in maniera più precisa questa relazione, andando ad analizzare il comportamento dei risultati al variare l'entità del traffico di velivoli d'aviazione generale. Tale analisi è giustificata dal fatto che, nonostante gli effetti della pandemia di COVID-19, quello aeronautico è un settore in crescita ed è dunque auspicabile vedere nel corso dei prossimi anni un incremento del traffico aereo, anche per quanto riguarda l'aviazione generale, oltre che quella commerciale.

Si sono quindi considerati diversi livelli di aumento nel volume di traffico, così da poter simulare più scenari possibili. Concretamente, all'interno del modello, l'aumento del traffico è stato valutato aumentando della quantità prestabilita il numero di velivoli GA appartenenti alla categoria considerata e proporzionalmente anche il tempo di occupazione dello spazio aereo T . I valori utilizzati sono riportati in Tabella 6 di seguito:

Incremento	n	T
150%	1.5x	+15%
200%	2x	+20%
300%	3x	+30%
500%	5x	+50%

Tabella 6: Fattori di incremento per i termini n e T relativi al traffico d'aviazione generale

La scelta di non aumentare in egual misura i parametri n e T è stata dettata dalla considerazione che, pur aumentando il numero di velivoli operativi, non è detto che le abitudini di volo degli utilizzatori cambino nello stesso modo, di conseguenza è possibile che il tempo di occupazione dello spazio aereo vari meno sensibilmente. È altresì ragionevole pensare che, aumentando considerevolmente il numero dei velivoli presenti, vengano istituiti “incentivi” al volo o comunque norme che facilitino l'utilizzo, dunque, nell'eseguire i test si è cercato di tener conto di entrambi questi fattori, implementando un aumento proporzionato del parametro T , in funzione delle modifiche ad n .

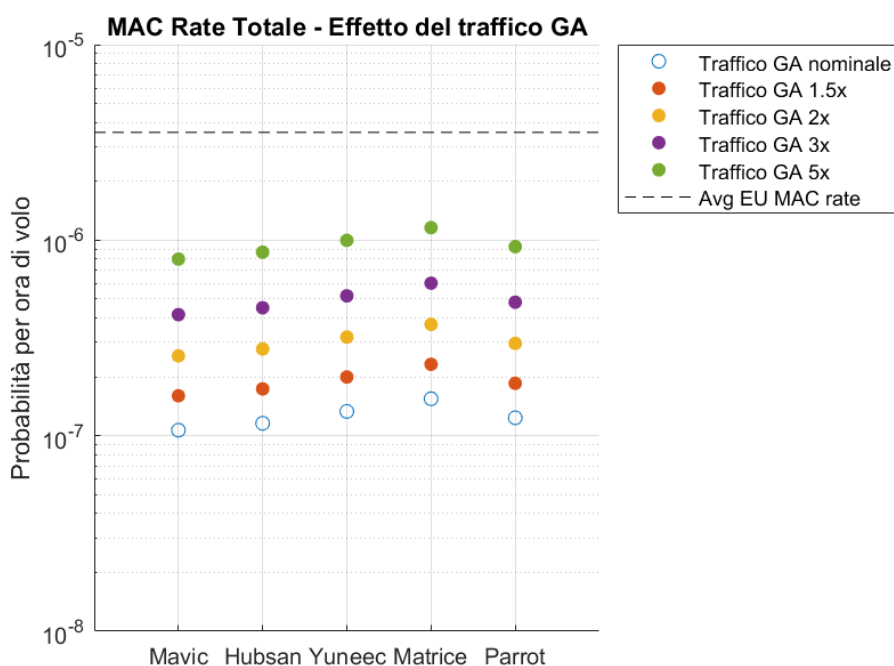


Figura 5.9: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone, al variare del volume di traffico aereo

Osservando la Figura 5.10 si può vedere come all'aumentare del volume di traffico aumenti anche la probabilità di collisione aerea e l'incremento risulta uguale per tutte le categorie di drone considerate, sottolineando come l'effetto della variazione del traffico aereo abbia un peso rilevante a prescindere dalla tipologia di UAS.

Inoltre, è possibile notare come per incrementi di cinque volte del volume di traffico aereo, la probabilità totale di collisione raggiunga pressoché lo stesso ordine di grandezza dei valori di riferimento definiti al Paragrafo 3.4, rendendo il rischio di collisione tra drone e velivoli pilotato un fattore non trascurabile, al pari di quanto avviene per collisioni in aria tra velivoli commerciali con pilota.

Si ritiene infine necessario specificare che non vengono mostrati gli andamenti dei singoli termini che compongono la probabilità p_{MAC} poiché, secondo quanto riportato nell'Equazione 4.13 il numero di velivoli operativi presenti nello spazio aereo influenza solamente il valore del termine p_{MAC} e di conseguenza la probabilità totale. In realtà il parametro T si ritrova nella formulazione di p_{HC} (Equazione 4.11), ma per quanto discusso precedentemente in riferimento all'aumento di tale parametro, non si è ritenuto necessario analizzarne l'influenza sul termine di probabilità di collisione orizzontale, essendo molto più significativa la variazione di probabilità totale ai fini del lavoro.

5.1.4 Effetto del traffico UAS

Come discusso nel Capitolo 2, una delle principali limitazioni dei metodi allo stato dell'arte è data dalla mancata considerazione della presenza di altri UAS all'interno dello spazio aereo di riferimento.

Si è quindi cercato di analizzare l'influenza che questo tipo di traffico aereo ha sulla probabilità di collisione, andando a valutare non solo la presenza di altri velivoli a pilotaggio remoto, ma anche l'aumento del volume di traffico stesso, condizione del tutto verosimile data la continua espansione nell'utilizzo di questa tecnologia.

Come fatto per le varie categorie di velivoli GA, anche in questo caso è stato necessario definire i vari parametri principali analizzati nel Paragrafo 4.3. I valori utilizzati sono riportati in Tabella 7:

p_{below}	h [m]	r [m]	v [m/s]	n	T [ore/ anno]	f	μ [m]	σ [m]
100%	0.29	0.39	13.6	13566	21	N	50	30

Tabella 7: Definizione dei parametri fondamentali per il traffico di UAS

Sulla base dei dati riportati in [28] è stato possibile stabilire il numero n di UAS registrati in Italia nel 2019. Per la definizione del tempo di occupazione dello spazio aereo invece, sono stati utilizzati i dati ottenuti da un sondaggio [30], effettuato dalla FAA sul territorio americano, riguardo le abitudini di volo dei piloti di UAS, da cui è emerso che il numero medio di voli mensili effettuati da un singolo pilota è pari a sette, con una durata media di quindici minuti. Pur riferendosi ad uno spazio aereo differente, si è reputato verosimile, essendo valori medi, utilizzare tali dati all'interno dello spazio aereo italiano, ottenendo quanto riportato in Tabella 7.

Le dimensioni e la velocità di riferimento sono state ottenute come media dei valori caratteristici dei droni utilizzati per i test, coprendo questi gran parte delle soluzioni disponibili sul mercato. Per quanto riguarda il termine p_{below} è stato fissato pari al 100% in quanto trattandosi di velivoli a pilotaggio remoto, si troveranno sicuramente al di sotto della quota massima di riferimento.

Infine, la distribuzione di quota riportata in tabella è stata assegnata tenendo conto delle altre distribuzioni assegnate ai droni scelti per i test, in maniera tale da rappresentare il maggior numero possibile di operazioni effettuabili.

È doveroso precisare, prima di analizzare i risultati ottenuti, che i test sono stati effettuati considerando un valore di z_{MAX} pari a 120 m e lasciando invariati i parametri caratteristici delle varie categorie di velivoli GA, come riportati in Tabella 3 mentre la variazione di traffico di altri UAS è stata effettuata come descritto nel Sottoparagrafo 5.1.3, andando quindi a variare della quantità stabilita il termine n e in maniera proporzionale il termine T . I valori utilizzati per i diversi test sono riportati in Tabella 8:

Incremento	n	T
200%	2x	+20%
300%	3x	+30%
500%	5x	+50%
1000%	10x	+100%
10000%	100x	+1000%

Tabella 8: Fattori di incremento per i termini n e T relativi al traffico di UAS

Nelle Figure da 5.11 a 5.15, riferite alle diverse categorie di UAS considerate, è possibile vedere come il termine p_{MAC} riferito al traffico di velivoli a pilotaggio remoto, anche in condizioni nominali, ovvero con i valori dei parametri riportati in Tabella 7, sia del tutto paragonabile agli altri termini presenti, riferiti alle altre categorie di velivoli GA. Ciò che è maggiormente interessante da osservare è che all'aumentare del volume di traffico UAS, il termine p_{MAC} ad essi riferito cresce decisamente, divenendo rapidamente il termine dominante nella determinazione dell'ordine di grandezza della probabilità totale. Tale incremento avviene per tutte le categorie di UAS utilizzate nei test ed è più rapido per droni più grandi, data l'influenza delle dimensioni nel calcolo della probabilità; inoltre, si vede come per incrementi di cento volte nel volume di traffico, il termine p_{MAC} superi ampiamente il valore di probabilità di riferimento, sottolineando come la presenza di altri droni diventi la maggior fonte di rischio, specialmente in casi di traffico elevato.

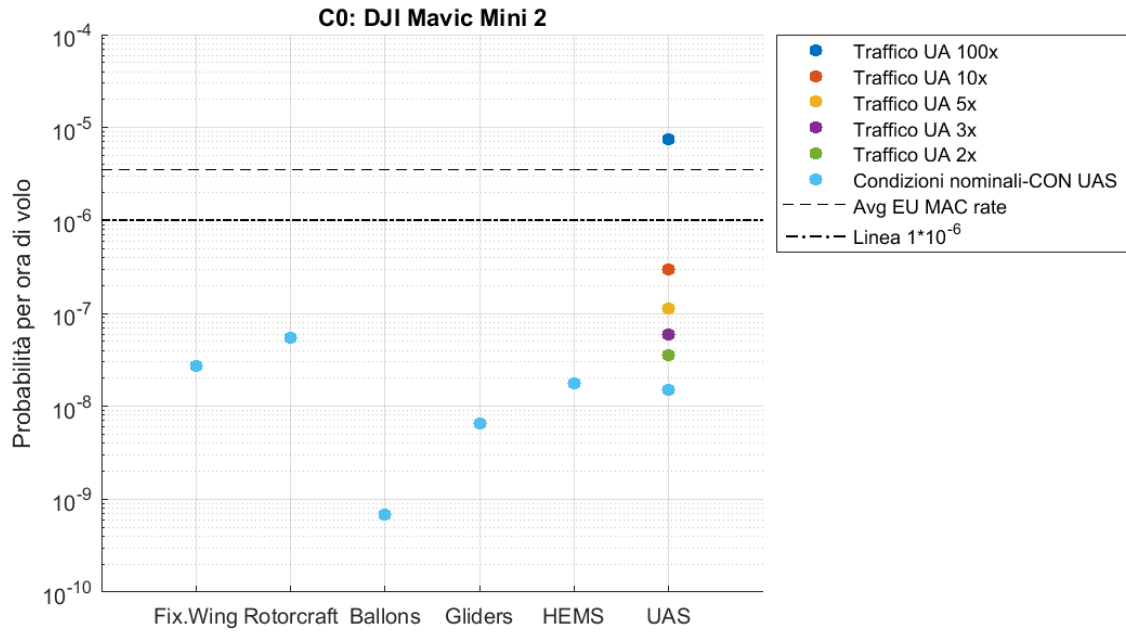


Figura 5.10: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C0, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS

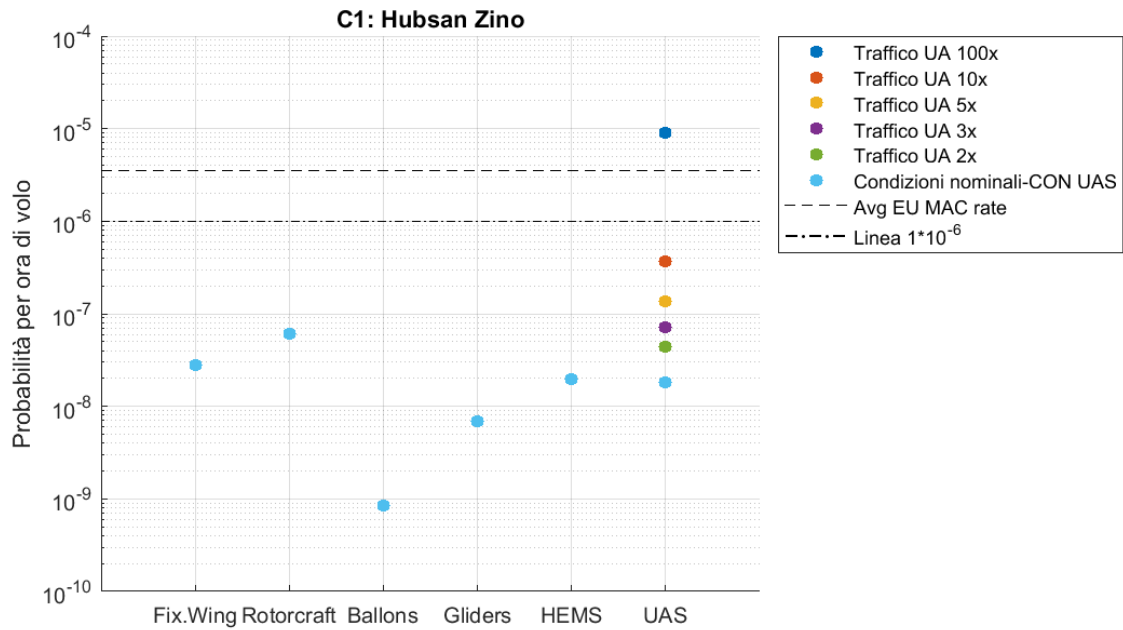


Figura 5.11: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C1, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS

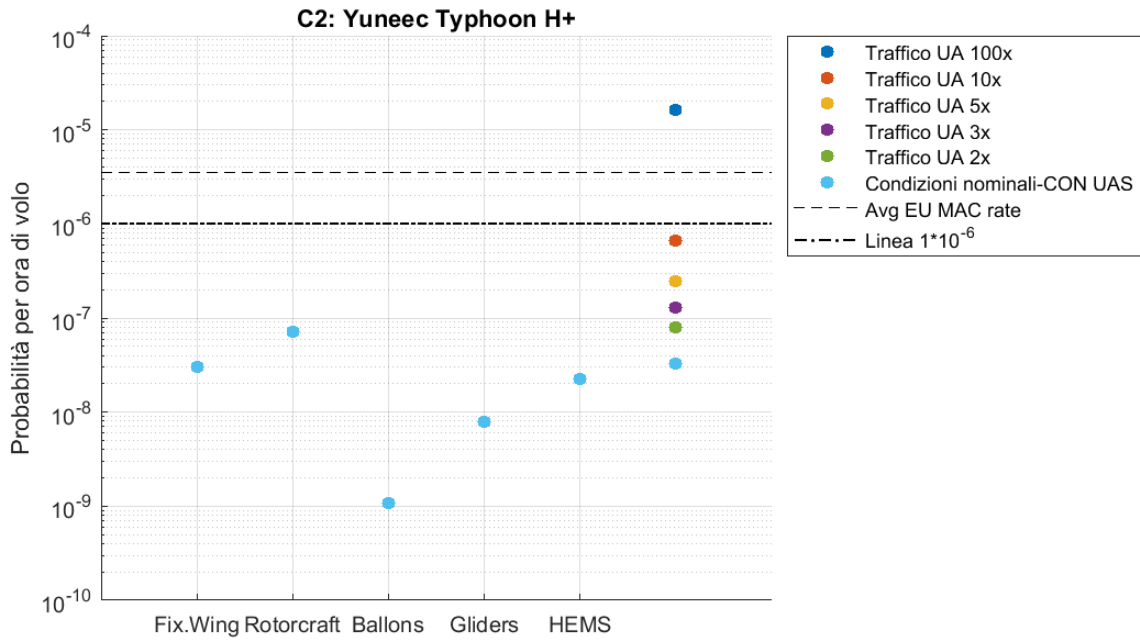


Figura 5.12: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C2, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS

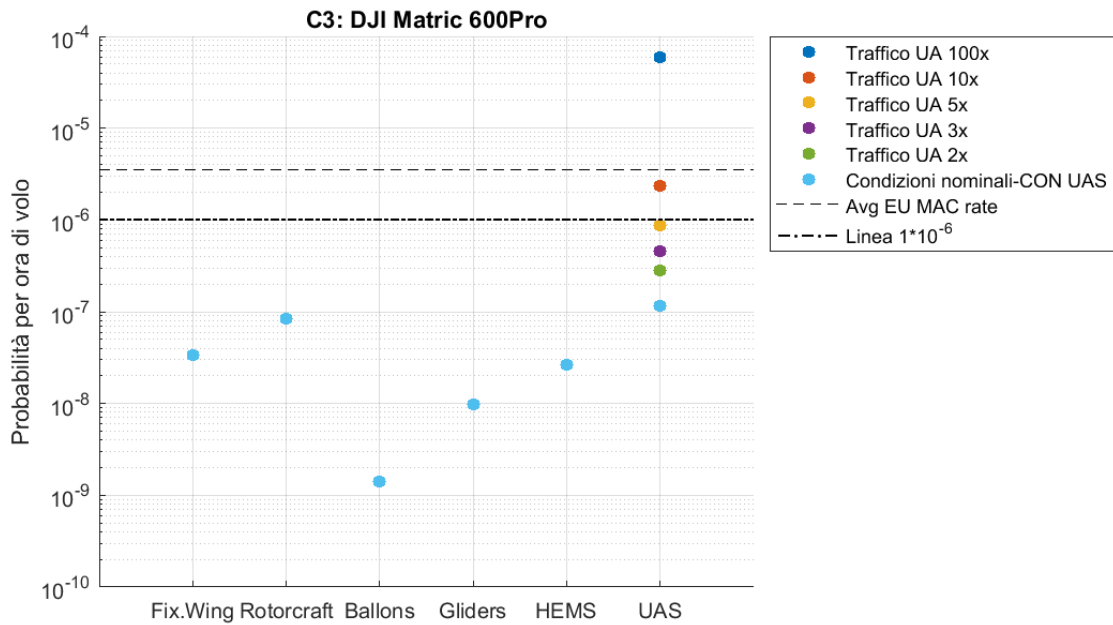


Figura 5.13: Probabilità di collisione aerea per il drone di classe C3, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS

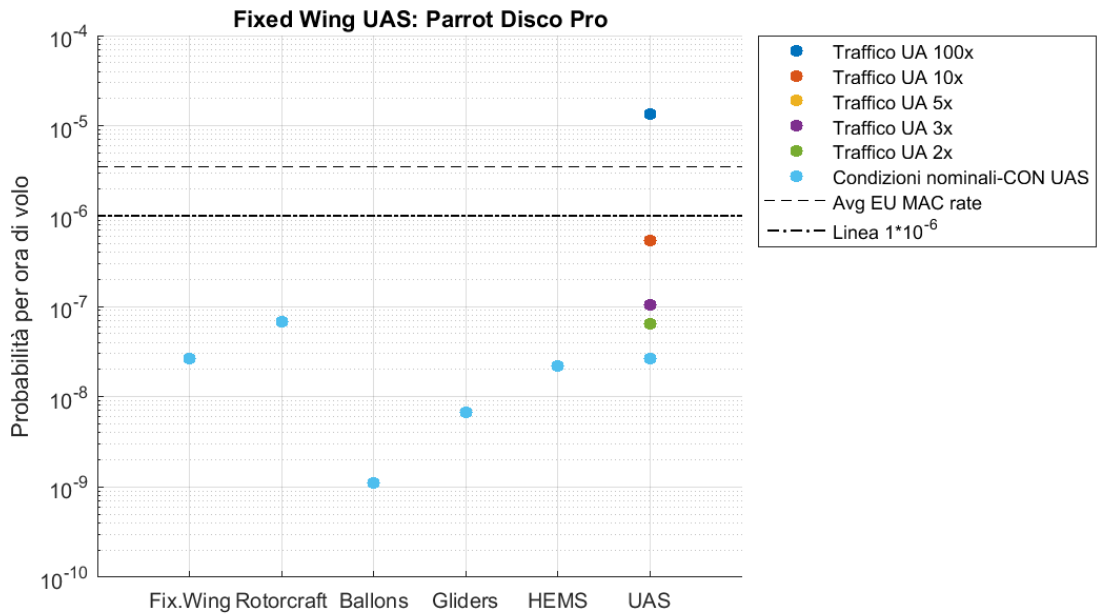


Figura 5.14: Probabilità di collisione aerea per il drone ad ala fissa, in funzione della categoria di velivolo GA, al variare del volume di traffico UAS

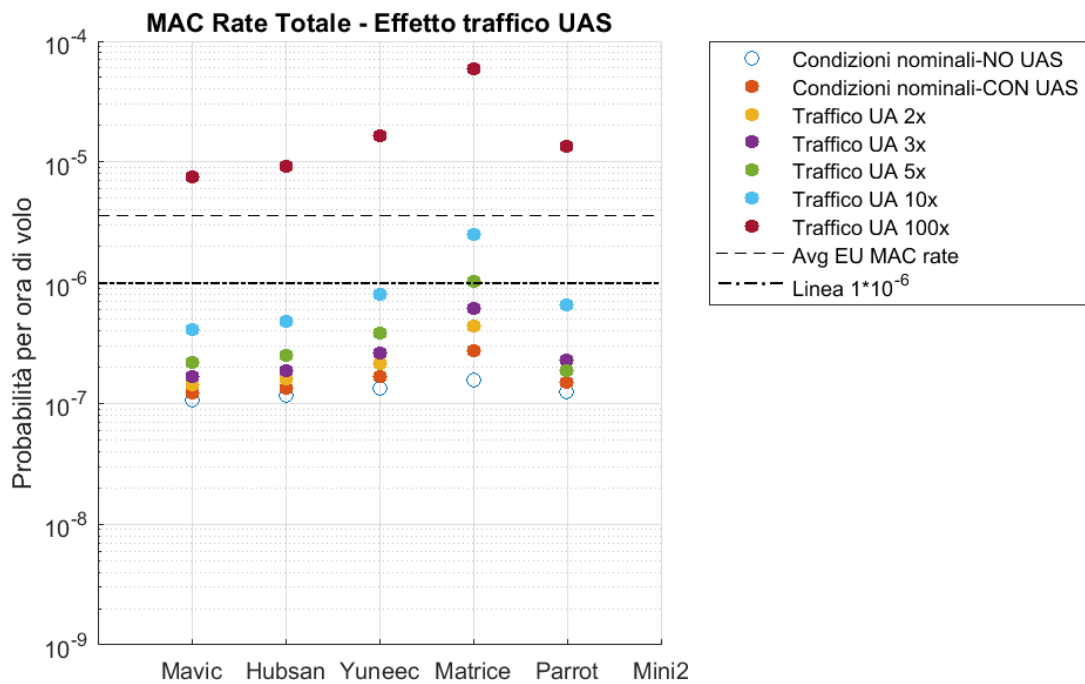


Figura 5.15: Probabilità totale di collisione aerea a seconda del modello di drone considerato, in funzione del volume di traffico UAS

In Figura 5.16 è interessante osservare l'effetto che la presenza del traffico di UAS ha sulla probabilità totale di collisione aerea. Il primo importante risultato da analizzare è che, in condizioni nominali, la sola considerazione di altri velivoli a pilotaggio remoto porta ad un sostanziale aumento di probabilità di collisione, che in alcuni casi raggiunge anche il doppio rispetto al valore senza UAS. In secondo luogo, si può nuovamente osservare come al crescere del volume di traffico, il valore di probabilità totale aumenta, e per quanto detto prima è possibile notare che l'ordine di grandezza è dettato principalmente dalla probabilità di collidere con altri droni. Anche in questo caso, per aumenti di dieci o cento volte del traffico aereo considerato, il valore di probabilità totale supera ampiamente i target di riferimento, rendendo il rischio aereo non più trascurabile.

5.2 Mappe di rischio

Analizzati i risultati ottenuti dalle diverse prove e dimostrato l'effetto dei principali parametri del modello sulla probabilità di collisione aerea, si è ritenuto utile fornire una più concreta visualizzazione del rischio correlato all'operazione di un velivolo a pilotaggio remoto all'interno di un ambiente urbano, andando a definire delle mappe di rischio, tramite le quali è anche possibile apprezzare come il rischio aereo influenzi il valore totale.

Ciò è stato possibile implementando il lavoro analizzato nel presente documento all'interno del programma di calcolo sviluppato dal Dr. Primatesta Stefano e dettagliatamente descritto in [52].

Di seguito è riportata la definizione di mappa di rischio, estratta dal documento sopra citato:

Definizione: “Una **mappa di rischio** è una mappa bidimensionale che quantifica il rischio per le persone a terra. La mappa è costituita da $N \times M$ celle, indicate con il simbolo $\mathbf{R}(i, j)$, equidistanti tra di loro e di forma quadrata, ognuna della quali rappresenta una delimitata zona geografica a cui è associato un valore di rischio. Le coordinate discrete (i, j) rappresentano una posizione georeferenziata (x, y) nel sistema di riferimento locale North-East-Down, definito rispetto alla cella centrale della mappa.”

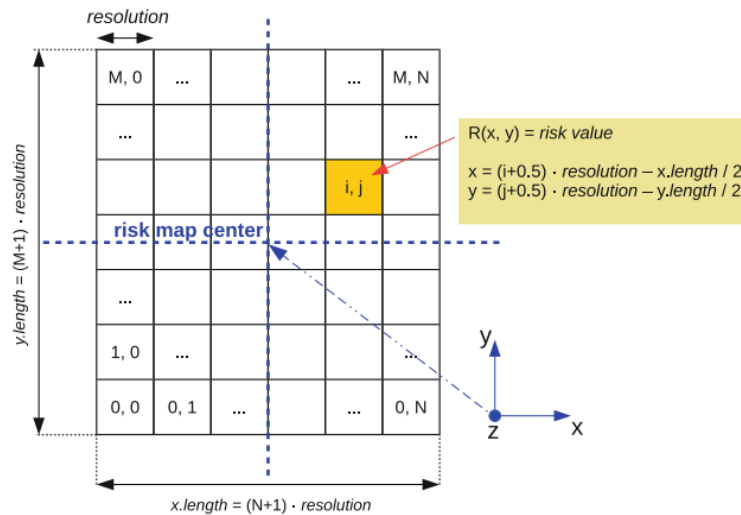


Figura 5.16: Schema descrittivo della griglia di riferimento per la costruzione della mappa di rischio. *Fonte:* [52]

Il valore di rischio associato ad ogni singola cella, indicato con $P_{casualty}$ ed espresso in h_{volo}^{-1} , rappresenta la probabilità che si verifichi una fatalità e viene calcolato tramite la seguente formula:

$$P_{casualty}(x, y) = P_{event} \cdot P_{impact}(x, y) \cdot P_{fatality}(x, y) \quad (5.1)$$

Dove:

- P_{event} rappresenta la probabilità che si verifichi una perdita di controllo del drone con conseguente caduta al suolo.

Per le mappe qui discusse, si vanno a considerare due eventi diversi:

- Uno legato ad un malfunzionamento del drone, che può essere di natura interna alla macchina o dovuto a manovre inappropriate da parte del pilota. In tal caso si utilizza $P_{event} = \frac{1}{200} h^{-1}$ che risulta essere un valore realistico per i droni considerati nel modello
 - Il secondo evento considerato è proprio la collisione in aria tra drone e velivolo pilotato, che risulta poi in uno schianto al suolo dell'UAS. In questo caso il termine P_{event} è pari proprio al valore $P_{MAC,TOT}$ discusso nel Capitolo 4
- P_{impact} rappresenta la probabilità che il drone, cadendo a seguito della perdita di controllo, colpisca una persona.
Per valutare questo termine si utilizza la seguente formula:

$$P_{impact}(x, y) = \rho(x, y) \cdot A_{exp} \quad (5.2)$$

In cui $\rho(x, y)$ è la densità di popolazione della cella considerata e A_{exp} rappresenta l'area esposta allo schianto, anche nota come *area letale*, e dipende dalle dimensioni dell'UAS (raggio r_{UAS} e altezza h_{UAS}) e della persona coinvolta (raggio r_p e altezza h_p) secondo questa relazione:

$$A_{exp}(\theta) = 2(r_p + r_{UAS}) \frac{h}{\tan(\theta)} + \pi(r_{UAS} + r_p)^2 \quad (5.3)$$

L'unico termine variabile è l'angolo di impatto θ che dipende dal tipo di discesa considerata.

Nella generazione delle mappe analizzate in questo Paragrafo si è unicamente considerata la *discesa balistica*, poiché per valutare l'effetto del rischio aereo sul valore totale, si è verosimilmente ipotizzato che a seguito di una collisione in aria il drone cada secondo una traiettoria balistica, regolata dalla sola azione della forza di gravità e di attrito dell'aria, modellata attraverso l'equazione di secondo grado:

$$m\dot{\mathbf{v}} = m\mathbf{g} - c|\mathbf{v}|\mathbf{v} \quad (5.4)$$

Dove:

- m è la massa dell'UAS
- g è l'accelerazione di gravità
- c è una costante che contiene: densità dell'aria, coefficiente di attrito e superficie esposta
- \mathbf{v} è il vettore velocità del drone

- $P_{fatality}$ è la probabilità che l’impatto del drone risulti fatale per la persona colpita.

Di seguito si riporta il metodo di calcolo utilizzato in [52], basato sull’energia cinetica al momento dell’impatto e sul cosiddetto *sheltering factor* (fattore di protezione) di cui si riporta la definizione estratta dal documento sopra citato:

Definizione: “Lo **sheltering factor** è un numero maggiore di zero che quantifica il livello di protezione offerto da oggetti come alberi o edifici alle persone presenti nell’area considerata.”

$$P_{fatality} = \frac{1-k}{1-2k + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{\beta}{E[E_{imp}]} \right]^{\frac{3}{E[S(x,y)]}}} } \quad (5.5)$$

Con $k = \min \left[1, \left[\frac{\beta}{E[E_{imp}]} \right]^{\frac{3}{E[S(x,y)]}} \right]$. Si riporta il significato dei termini presenti nell’Equazione 5.5:

- S : sheltering factor
- E_{imp} : energia cinetica all’impatto
- α : energia necessaria per ottenere una probabilità di fatalità del 50% con $S=6$
- β : energia necessaria per ottenere una fatalità con S prossimo a zero
- $E[\cdot]$: notazione che indica il valore atteso per una certa grandezza

Per la creazione delle mappe si è scelto di considerare un’area limitata della città di Torino, così da non rendere eccessivamente lunghi i tempi di generazione, ma si è comunque cercato di considerare delle zone strategiche, in modo tale da rappresentare all’interno della mappa diverse condizioni di rischio, con zone a più alto ed altre a più basso livello, permettendo di osservare come il valore vari a seconda della conformazione urbana dell’area considerata.

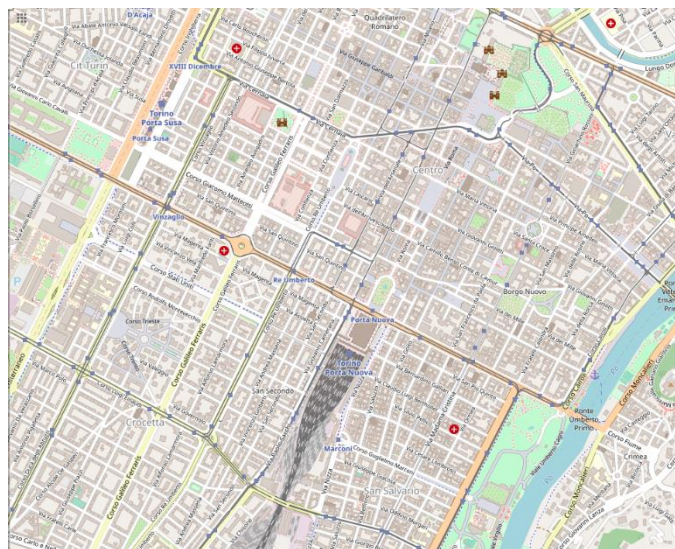


Figura 5.17: Area considerata per la creazione delle mappe di rischio

In Figura 5.18 è mostrata la mappa, estratta dal sito *Open Street Map* [68], dell'area considerata per i calcoli

Si possono riconoscere diversi luoghi d'interesse della città di Torino, in particolare nell'angolo in basso a destra vi è parte del Parco del Valentino e del fiume Po, spostandosi verso il centro della mappa è possibile riconoscere la stazione di Porta Nuova, inoltre è presente gran parte del centro cittadino, con Piazza Castello leggermente spostata verso l'angolo in alto a destra. Infine, spostandosi nella parte sinistra della mappa è possibile individuare la stazione di Porta Susa e parte di Corso Inghilterra.

In Figura 5.19 è poi riportata la distribuzione di densità di popolazione, utilizzata per i test, nell'area considerata in Figura 5.18. Come per le mappe di rischio, anche il livello di densità di popolazione è definito sulla base di una mappa bidimensionale formata da $N \times M$ celle in cui ad ogni elemento, rappresentato dal simbolo $D(x, y)$, è associato un valore di densità espresso in *abitanti/m²*; nello specifico, la distribuzione qui valutata, sulla base di quanto riportato in [52] va da un valore minimo di $1,974 \cdot 10^{-4}$ *abitanti/m²* (celle fucsia) ad un massimo di $2,355 \cdot 10^{-2}$ *abitanti/m²* (celle blu).

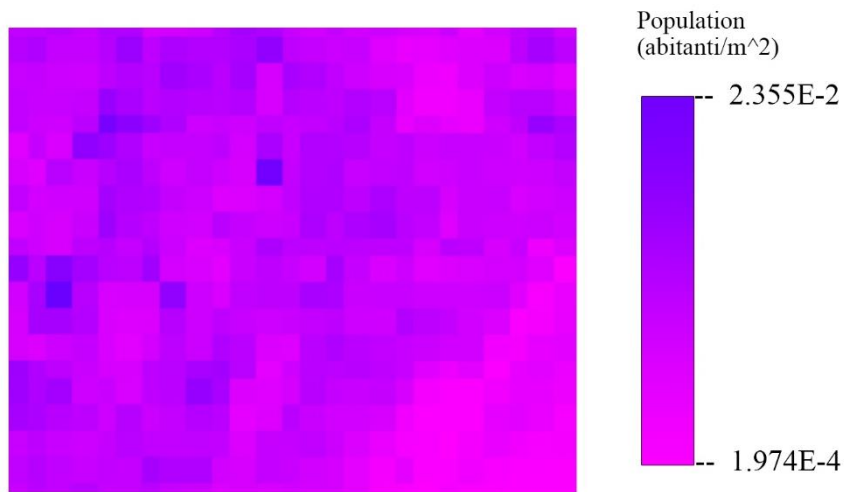


Figura 5.18: Distribuzione di densità di popolazione nell'area considerata



Figura 5.19: Sheltering factor nell'area considerata

Infine, per completare la definizione dei dati necessari alla generazione delle mappe di rischio, in Figura 5.20 viene riportata la mappa relativa ai valori del fattore di protezione all'interno dell'area considerata in Figura 5.18.

Come analizzato precedentemente, lo sheltering factor è un numero maggiore di zero e sulla base di quanto riportato in [52] si considera $S = 10$ come valore di protezione massima.

Con riferimento alla Figura 5.20 le zone in giallo rappresentano quelle aree con un livello di protezione medio-basso, caratterizzato da $S=3$, ovvero in cui sono presenti solamente oggetti come macchine o alberi in grado di offrire riparo dal drone in caduta. Le zone in rosso, invece, rappresentano le aree ad alto livello di protezione, $S=8$, in cui la presenza di edifici di dimensioni rilevanti offre un buon riparo alle persone esposte.

Per quanto riguarda i test effettuati, si è andati a valutare tre differenti condizioni:

- **Condizione 1** (nominali): presenza di traffico UAS, volume di traffico UAS nominale (come riportato in Tabella TOT) e $P_{event} = \frac{1}{200} h_{volo}^{-1}$
- **Condizione 2**: presenza di traffico UAS, volume di traffico UAS 100x (come riportato in Tabella TOT) e $P_{event} = \frac{1}{1000} h_{volo}^{-1}$
- **Condizione 3**: presenza di traffico UAS, volume di traffico UAS 100x (come riportato in Tabella TOT) e $P_{event} = \frac{1}{2000} h_{volo}^{-1}$

Si è scelto di analizzare un incremento del traffico di UAS così elevato perché lo scopo della creazione di tali mappe è quello di osservare come il rischio aereo influenzi il valore totale di rischio, di conseguenza, come anche visto nei test condotti al Paragrafo 5.1, tale valore di incremento massimizza il termine $P_{MAC,TOT}$, inoltre, come discusso sempre nello stesso Paragrafo, tale aumento non è così irrealistico, dato il sempre crescente sviluppo ed impiego dei mezzi aeromobili a pilotaggio remoto.

I test sono stati tutti effettuati ad una quota di volo $z = 60 m$, utilizzando il DJI Matrice 600 Pro, che tra i modelli considerati è il più grande in termini di dimensioni e quello con la probabilità di collisione più elevata. L'utilizzo di tale drone giustifica anche la scelta dei valori più bassi per P_{event} , poiché secondo quanto riportato in diverse fonti, tra cui [53,54], è verosimile ipotizzare che nel caso di UAS certificato ed utilizzato in ambito professionale, da piloti con una certa esperienza, il tasso di malfunzionamenti scenda sino all'ordine di grandezza di $\frac{1}{10^3}$. Inoltre, tale assunzione è avallata dalla considerazione che, nel momento in cui si raggiungano volumi di traffico come quelli considerati nei test, con aumenti di quasi cento volte rispetto al valore attuale, la tecnologia alla base subisca un miglioramento tale da garantire un livello di affidabilità maggiore rispetto allo stato attuale.

Nei Sottoparagrafi successivi verranno mostrate ed analizzate le mappe di rischio relative alle condizioni di test precedentemente esposte. Si ritiene utile precisare come le mappe siano realizzate utilizzando una scala logaritmica, essendo i valori in gioco molto minori dell'unità. Sono anche riportate, di lato alle figure, le scale di riferimento per i colori presenti nelle mappe.

5.2.1 Condizione 1

In Figura 5.21, 5.22 e 5.23 sono riportate rispettivamente le mappe di rischio a terra, aereo e totale ottenute per le condizioni nominali di test.

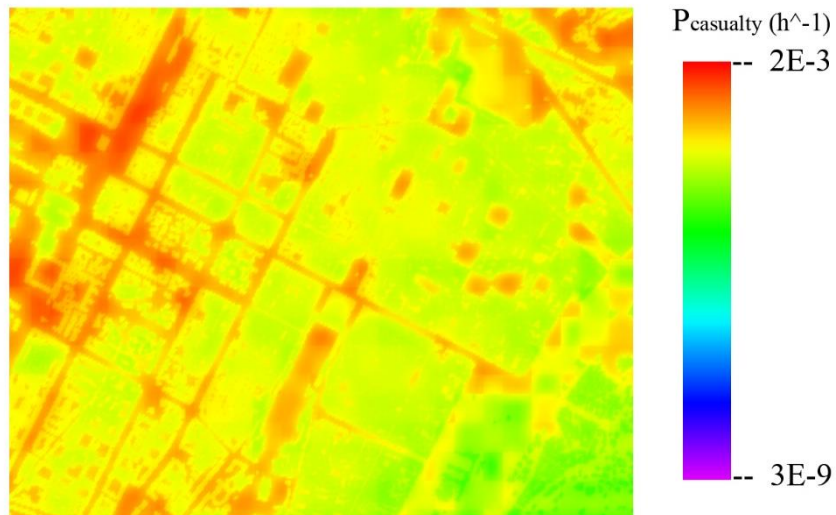


Figura 5.20: Mappa di rischio a terra - Condizione 1

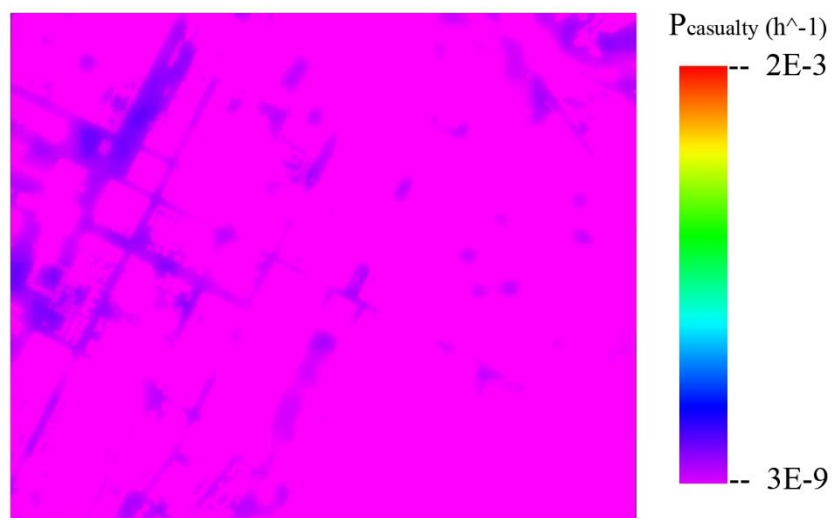


Figura 5.21: Mappa di rischio in aria - Condizione 1

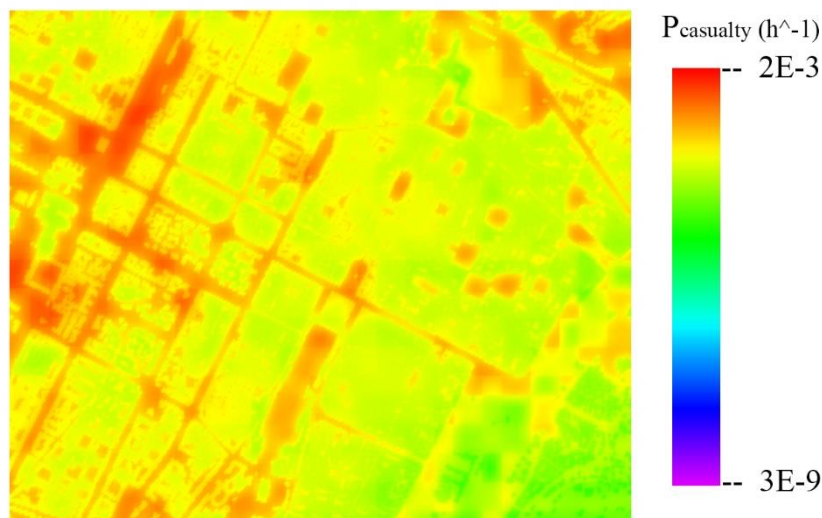


Figura 5.22: Mappa di rischio totale - Condizione 1

Come discusso anche nel Paragrafo precedente, la mappa di rischio totale è ottenuta come combinazione delle mappe di rischio a terra e in aria, permettendo di analizzare l'influenza che quest'ultimo termine ha sul rischio totale. Si può immediatamente osservare, facendo riferimento alla scala riportata a lato delle figure, come l'effetto del rischio in aria, il cui valore massimo è pari a $1,53 \cdot 10^{-9} h_{volò}^{-1}$, sia limitatissimo, essendo addirittura cinque o sei ordini di grandezza inferiore, a seconda della cella considerata, al rischio a terra, il cui valore minimo si attesta a $1,69 \cdot 10^{-4} h_{volò}^{-1}$.

Il livello di rischio totale, valore massimo pari a $1,03 \cdot 10^{-3} h_{volò}^{-1}$ e valore minimo pari a $1,16 \cdot 10^{-5} h_{volò}^{-1}$, risulta quindi pressoché uguale a quello a terra, rendendo di fatto trascurabile il termine aereo.

In riferimento alla scelta dell'area considerata per i test, inoltre, è possibile osservare come il valore di rischio, sia esso totale, a terra o in aria, cresca dall'angolo in basso a destra, cioè la zona del Parco del Valentino e del fiume Po, verso l'angolo in alto a sinistra, ovvero la zona del centro cittadino e delle due principali stazioni ferroviarie. Tale andamento era atteso, in quanto considerando zone con maggiore densità di popolazione, come quelle centrali o delle stazioni, il termine P_{impact} cresce aumentando il valore complessivo di rischio $P_{casualty}$, nonostante la maggior presenza di edifici accresca il termine di sheltering factor, di fatto riducendo la probabilità $P_{fatality}$.

5.2.2 Condizione 2

Si analizzano ora le mappe relative alla seconda condizione considerata nei test.

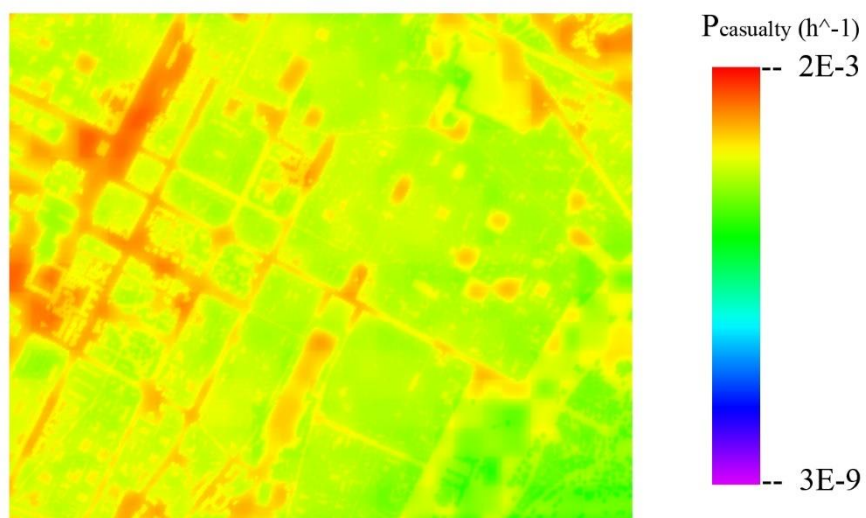


Figura 5.23: Mappa di rischio a terra - Condizione 2

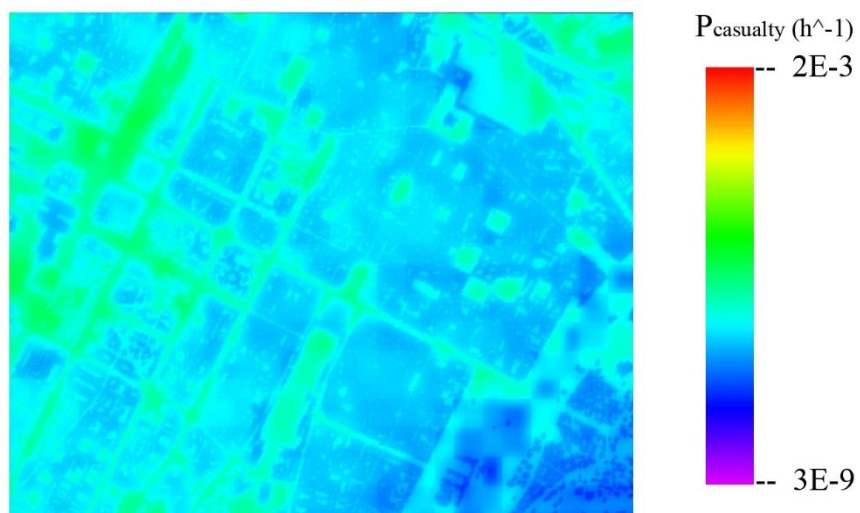


Figura 5.24: Mappa di rischio in aria - Condizione 2

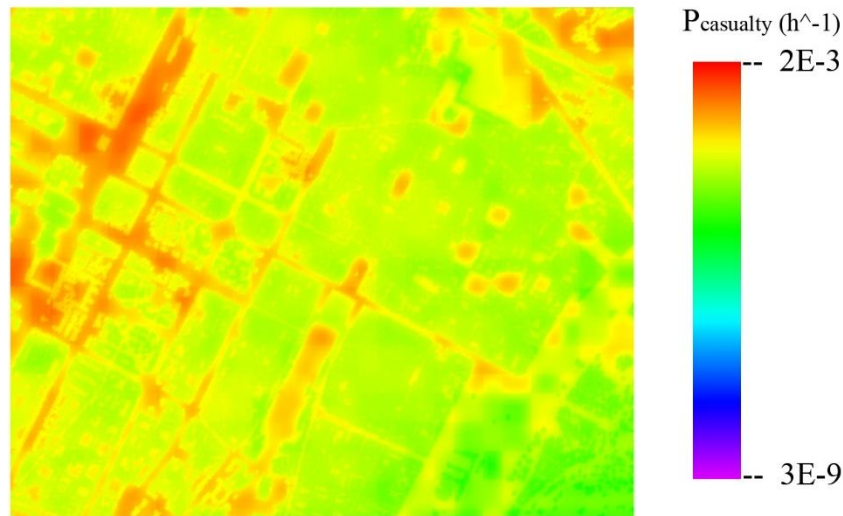


Figura 5.25: Mappa di rischio totale - Condizione 2

Confrontando le figure qui riportate con quelle del Sottoparagrafo 5.2.1 è possibile osservare l'effetto della modifica nei parametri di test. Il primo e più vistoso cambiamento si ha nella mappa del rischio aereo, nella quale è osservabile un cospicuo aumento del valore di rischio, il cui massimo arriva a $4,33 \cdot 10^{-6} h_{vol}^{-1}$, dato dall'incremento del traffico di UAS il quale comporta una crescita del termine P_{event} (che ricordiamo corrispondere al termine $P_{MAC,TOT}$ in questo caso), così come evidenziato nei test al Paragrafo 5.1.4.

I colori della mappa sono passati dal fucsia/viola della Figura 5.22 al blu/azzurro, addirittura verde nelle zone centrali più popolate, della Figura 5.25, segnando un aumento di circa tre ordini di grandezza.

Osservando attentamente la Figura 5.24 è anche possibile valutare l'effetto della riduzione del failure-rate sul rischio a terra. L'utilizzo del termine P_{event} pari a $\frac{1}{1000} h_{vol}^{-1}$ ha comportato la riduzione di circa un ordine di grandezza nel valore di rischio a terra (massimo valore pari a $7,55 \cdot 10^{-3} h_{vol}^{-1}$) determinando quindi un'attenuazione nell'intensità dei colori della mappa, che sono passati da una prevalenza di rosso, arancione e giallo (Figura 5.21) ad una di giallo e verde, con alcune zone più scure nel centro cittadino.

Per quanto riguarda la mappa di rischio totale (Figura 5.26), questa non ha subito rilevanti modifiche, ($max = 7,59 \cdot 10^{-4} h_{vol}^{-1}; min = 8,55 \cdot 10^{-6} h_{vol}^{-1}$) ma ciò che è interessante osservare è come in queste condizioni, l'effetto del rischio aereo non sia più trascurabile, al contrario, in alcune zone diventa quasi comparabile con il rischio a terra, andando quindi ad influenzare attivamente il valore finale.

Come già precedentemente discusso i valori di traffico utilizzati per i test sono ritenuti verosimili e ciò comporta la necessità di adottare efficaci misure di mitigazione e prevenzione dei rischi, non solo per garantire un corretto e sicuro svolgimento delle operazioni agli utilizzatori dello spazio aereo, ma anche per garantire l'incolumità delle

persone a terra, che risultano direttamente esposte alle conseguenze di una collisione aerea.

5.2.3 Condizione 3

Di seguito si riportano le mappe relative alla terza ed ultima condizione considerata per i test.

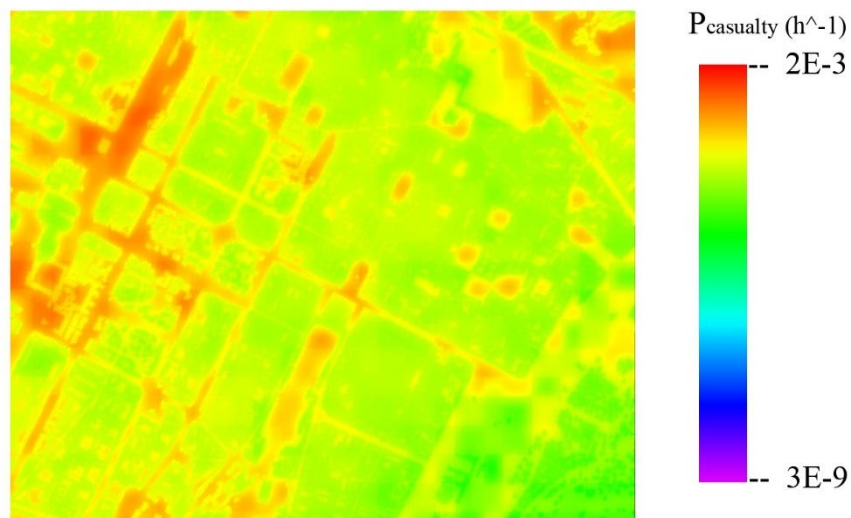


Figura 5.26: Mappa di rischio a terra - Condizione 3

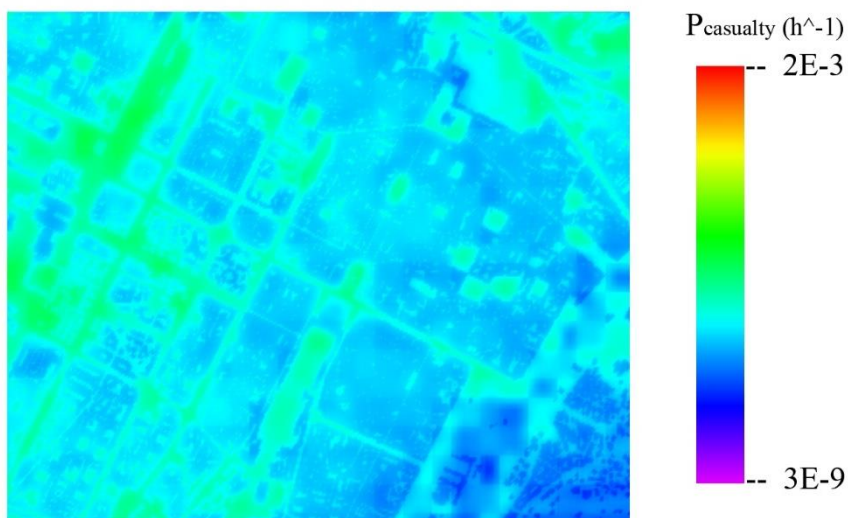


Figura 5.27: Mappa di rischio in aria - Condizione 3

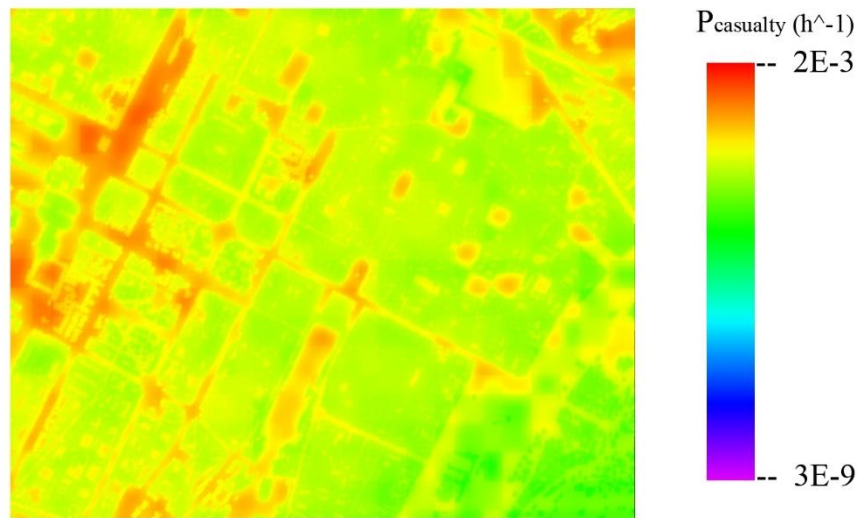


Figura 5.28: Mappa di rischio totale - Condizione 3

Analogamente alle precedenti, possiamo vedere come il valore di rischio cresca dall'angolo in basso a destra verso quello in alto a sinistra, per le motivazioni viste in 5.2.1.

Anche in questo caso, (Figura 5.28), si può osservare l'effetto dato dall'aumento del traffico di velivoli a pilotaggio remoto, cioè l'aumento nel valore di rischio aereo ($max = 4,33 \cdot 10^{-6} h_{volo}^{-1}$; $min = 9,52 \cdot 10^{-7} h_{volo}^{-1}$).

Rispetto a quanto analizzato in 5.2.2, in questo caso, pur riducendo ulteriormente il valore di P_{event} a $\frac{1}{2000} h_{volo}^{-1}$ non si riscontrano cambiamenti significativi per il rischio a terra rispetto alla mappa in Figura 5.24, poiché l'ordine di grandezza considerato (*valore massimo*: $7,21 \cdot 10^{-4} h_{volo}^{-1}$; *valore minimo*: $1,19 \cdot 10^{-4} h_{volo}^{-1}$) continua ad essere lo stesso. Continua comunque a valere quanto discusso in 5.2.2 rispetto alla mappa di rischio a terra presentata in condizioni nominali (Figura 5.21).

Anche per questa terza condizione l'effetto del rischio aereo sul valore complessivo risulta non trascurabile, avendo nuovamente considerato un traffico di droni aumentato.

Capitolo 6

Conclusioni

Lo scopo di questo elaborato era quello di presentare un rigoroso modello di valutazione del rischio, nello specifico quello aereo, in grado di sopperire, almeno in parte, a quelle mancanze delineate nel Paragrafo 3.4. Ciò che è emerso è che, tramite l'applicazione di una ben definita e dimostrata procedura di calcolo, è possibile ottenere dei risultati precisi anche da un punto di vista qualitativo oltre che quantitativo.

L'analisi dei test effettuati ha permesso, inoltre, di delineare l'effetto sul valore di rischio aereo di diverse variabili presenti all'interno del modello. È chiaramente apparso come la principale fonte di rischio sia data dal traffico di velivoli a pilotaggio remoto, attualmente non considerati nei modelli di valutazione allo stato dell'arte.

Seppur la valutazione dell'aumento di traffico d'aviazione generale abbia permesso di osservare, anche in quel caso, un aumento nella probabilità di collisione in aria, l'incremento registrato a seguito della variazione di traffico UAS è stato di gran lunga superiore. Questo risultato si può spiegare considerando il grande numero di mezzi a pilotaggio remoto attualmente registrati in Italia, numero che si presume continuerà a crescere nei prossimi anni; inoltre, seppur le dimensioni caratteristiche di questo tipo di velivoli siano nettamente inferiori a quelle tipiche dei velivoli convenzionali, il fatto di avere quote operative sicuramente al di sotto della quota di riferimento del modello aumenta notevolmente la probabilità di collisione aerea.

Quanto appena discusso acquisisce ulteriore importanza se si considera il prossimo futuro. La grande flessibilità di utilizzo, propria dei velivoli a pilotaggio remoto, ha permesso il rapido sviluppo di questa tecnologia, favorendone, insieme alla progressiva riduzione dei costi, un'ampia diffusione sia a livello amatoriale che professionale. Questa tendenza, secondo le statistiche, è destinata a mantenersi e addirittura ad aumentare, nonostante la lieve frenata provocata dalla pandemia, rendendo di fatto più che verosimili le previsioni di traffico UAS utilizzate nell'esecuzione dei test presentati all'interno dell'elaborato.

Vi è quindi la necessità, da parte della autorità competenti, di prevedere e sviluppare delle precise procedure volte alla corretta integrazione dei velivoli a pilotaggio remoto nello spazio aereo, in modo da permettere un sicuro svolgimento delle operazioni a tutti gli utilizzatori dello spazio aereo stesso, ma anche garantire l'incolumità delle persone a terra.

Quest'ultimo aspetto emerge chiaramente dall'osservazione delle mappe di rischio presentate al termine del Capitolo 5. Allo stato attuale delle cose, infatti, il rischio derivante dalla caduta di un drone a seguito di una collisione aerea è nettamente trascurabile rispetto al rischio derivante dalla caduta del drone a seguito di un malfunzionamento interno della macchina, ma considerando un volume di traffico più elevato ed una maggior affidabilità della macchina (considerazione verosimile se ad una richiesta maggiore di un certo prodotto si associa uno sviluppo tecnologico dello stesso) si vede come le due probabilità sopra menzionate raggiungano livelli del tutto paragonabili e confrontabili, rendendo, quindi, il rischio di collisioni aeree un problema serio sia per le persone direttamente coinvolte sia per quelle che non lo sono.

In conclusione, si può dire che la strada intrapresa da numerosi Enti Regolatori, ad esempio l'EASA, è quella corretta. Come anticipato precedentemente, è necessario redigere precise normative che garantiscano l'efficace integrazione dei velivoli a pilotaggio remoto nello spazio aereo esistente, anche attraverso la creazione di zone di volo apposite, come sta avvenendo all'interno del progetto U-Space, inoltre è doveroso fornire ad operatori e piloti di UAS accurati strumenti per una corretta ed affidabile valutazione del rischio, così da facilitare la definizione di una missione sicura.

Le normative però da sole potrebbero non essere sufficienti, in virtù di un elevato aumento di velivoli coinvolti, dunque, è anche necessario progettare e realizzare tecnologie DAA adatte a questa tipologia di aeromobili e ai suoi differenti impieghi, in modo tale da assicurare una certa autonomia e raggiungere l'obiettivo di uno spazio aereo condiviso.

Bibliografia

- [1] EASA, “*Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945)*”, Ed. 2021
- [2] ENAC, “*Regolamento UAS-IT*”, Ed.1, 2021
- [3] ENAC, “*IT-PDRA-01 BVLOS flight close to obstacles over non-populated area*”, 2020
- [4] ENAC, “*IT-PDRA-02 BVLOS flight with NOTAM over non-populated area*”, 2020
- [5] ENAC, “*IT-PDRA-03 BVLOS flight with Visual Observers (VO) over non-populated area*”, 2020
- [6] ENAC, “*IT-PDRA-04 BVLOS flight close to obstacles over controlled ground area in Urban environment*”, 2020
- [7] ENAC, “*IT-PDRA-05 BVLOS flight with NOTAM over controlled ground area in Urban environment*”, 2020
- [8] ENAC, “*IT-PDRA-06 BVLOS flight with Visual Observers over controlled ground area in Urban environment*”, 2020
- [9] ENAC, “*IT-PDRA-07 BVLOS flight close to obstacles over Urban area*”, 2020
- [10] ENAC, “*IT-PDRA-08 BVLOS flight with NOTAM over Urban area*”, 2020
- [11] ENAC, “*IT-PDRA-09 BVLOS flight with Visual Observers over Urban area*”, 2020
- [12] ENAC, “*IT-STS-01 VLOS over a controlled ground area in an urban populated environment*”, 2020
- [13] ENAC, “*IT-STS-02 VLOS over a controlled ground area in a non-urban populated environment*”, 2020
- [14] JARUS, “*JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)*”, Ed.2, 2019
- [15] Terhese Jones, “*International Commercial Drone Regulation and Drone Delivery Service*”, RAND Corporation, 2018, Capitolo 2
- [16] Anders la Cour-Harbo, “*The Value of Step-by-Step Risk Assessment for Unmanned Aircraft*”, 2018
- [17] Mikko Huttunen, “*Drone Operations in the Specific Category: A Unique Approach to Aviation Safety*”, in: “*The Aviation and Space Journal*”, Numero 2, 2019, pp. 20-21
- [18] Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P. Valavanis, Les A. Piegl, “*On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*”, Springer, Ed.2, 2010, pp. 108-115
- [19] Kimon P. Valavanis, George J. Vachtsevanos, “*Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*”, Springer, 2015, Sezione XVI, pp. 2216-2227

- [20] Anders la Cour-Harbo, Henrik Schiøler, “*Probability of Low-Altitude Mid-air Collision Between General Aviation and Unmanned Aircraft*”, Aalborg University, 2019
- [21] Rosa María Arnaldo Valdés, Schon Z.Y. Liang Cheng, Victor Fernando Gómez Comendador, Francisco Javier Sáez Nieto, “*Application of Bayesian Networks and Information Theory to Estimate the Occurrence of Mid-Air Collisions Based on Accident Precursors*”, Entropy Journal, MDPI, 2018
- [22] Hector Usach, Juan A. Vila, Áurea Gallego, “*Trajectory-Based, Probabilistic Risk Model for UAS Operations*” in: “*Risk Assessment in Air Traffic Management*”, IntechOpen, Londra, 2020, Capitolo 7, pp. 125-127, 129-139
- [23] Markus Ortlieb, Jannis Konopka, Florian-Michael Adolf, “*Modular Modelling of Ground and Air Risks for Unmanned Aircraft Operations Over Congested Areas*”, 2020
- [24] Hèctor Usach Molina, Dr. Juan Antonio Vila Carbó, “*Automated Contingency Management in Unmanned Aircraft Systems*”, Master Thesis, 2019, Capitolo 6, pp. 109-131
- [25] Airbus, Boeing, “*A New Digital Era of Aviation: The Path Forward for Airspace and Traffic Management*”, 2019
- [26] Associazione Nazionale Imprese Assicuratrici, “*Droni: il mercato prende quota*”, 2020
- [27] Marco Donzelli, Vladi Finotto, Michele Tamma, “*L’avioturismo*”, Tesi Magistrale, Venezia, 2020, Capitolo 2, pp. 27-32
- [28] General Aviation Manufacturers Association, “*2019 Databook*”, 2020, Capitolo 3, pp. 28-32
- [29] ENAC, “*Dati Traffico 2019*”, 2020, pp. 25,26
- [30] FAA, “*Aerospace Forecast Fiscal Years 2021-2041*”, 2021
- [31] ICAO, “*Annex 13: Aircraft Accident and Incident Investigation*”, Capitolo 1, pp. 10-12
- [32] EUROCONTROL, “*Network Operations Report 2019*”, Ed.1 2020, Capitolo 3, p. 10
- [33] EASA, “*Annual Safety Review 2020*”, 2021, pp. 48, 58, 68, 82, 90, 96, 105, 115
- [34] ANSV, “*Rapporto informativo sull’attività svolta dall’ANSV e sulla sicurezza dell’aviazione civile in Italia: Anno 2019*”, 2020
- [35] ENAC, “*Safety Performance Indicators*”, Tabella 1 p. 8, Tabella 2 p.10
- [36] ENAC, “*Safety Report: Safety Data 2015-2019*”, 2020
- [37] ENAC, “*Safety Report 2020*”, 2021
- [38] Ministère de l’Environnement, de l’Energie et de la Mer, “*Rapport sur la securite aerienne 2015*”, 2016

- [39] Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, "Rapport sur la securite aerienne 2016", 2017
- [40] Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, "*Rapport sur la securite aerienne 2018*", 2019
- [41] Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, "*Rapport sur la securite aerienne 2019*", 2020
- [42] Irish Aviation Authority, "*Review of Aviation Safety Performance in Ireland: during 2015*", 2016
- [43] Irish Aviation Authority, "*Review of Aviation Safety Performance in Ireland: during 2016*", 2017
- [44] Irish Aviation Authority, "*Review of Aviation Safety Performance in Ireland: during 2017*", 2018
- [45] Irish Aviation Authority, "*Review of Aviation Safety Performance in Ireland: during 2018*", 2019
- [46] Irish Aviation Authority, "*Review of Aviation Safety Performance in Ireland: during 2019*", 2020
- [47] Slovak Civil Aviation Agency, "*Povzetek letnega poročila o letalski varnosti 2016*" – "*Relazione annuale sulla sicurezza aerea 2016*", 2017
- [48] Slovak Civil Aviation Agency, "*Povzetek letnega poročila o letalski varnosti 2017*" – "*Relazione annuale sulla sicurezza aerea 2017*", 2018
- [49] Slovak Civil Aviation Agency, "*Povzetek letnega poročila o letalski varnosti 2018*" – "*Relazione annuale sulla sicurezza aerea 2018*", 2019
- [50] Slovak Civil Aviation Agency, "*Povzetek letnega poročila o letalski varnosti 2019*" – "*Relazione annuale sulla sicurezza aerea 2019*", 2020
- [51] Autorità Aeronautica Civile Romena, "*Informare Anuală de Siguranță 2012-2019*" – "*Analisi di sicurezza 2012-2019*", 2020
- [52] Stefano Primatesta, Alessandro Rizzo, Anders la Cour-Harbo, "*Ground Risk Map for Unmanned Aircraft in Urban Environments*", Springer, 2019
- [53] Enrico Petritoli, Fabio Leccese, Lorenzo Ciani, "*Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles*", Sensors Journal, MDPI, 2018, p. 1
- [54] Anthony P. Tvaryanas, William T. Thompson, Stefan H. Constable, "*The U.S. Military Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Experience: Evidence-Based Human Systems Integration Lessons Learned*", NATO Research and Technology Organisation, 2005

Sitografia

- [54] D-Flight
https://www.d-flight.it/new_portal/
- [55] Global Drone Market Report 2021-2026, 2021
<https://droneii.com/product/drone-market-report>
- [56] I droni nella pandemia da coronavirus, tra opportunità e controversie, 2020
<https://www.assorpas.it/i-droni-nella-pandemia-da-coronavirus-tra-opportunita-e-controversie/>
- [57] Droni: il mercato perde quota, 2021
<https://www.osservatori.net/it/ricerche/comunicati-stampa/droni-mercato-italia>
- [58] Master List of Drone Laws (Organized by State and Country)
<https://uavcoach.com/drone-laws/>
- [59] Global Drone Regulations Database
<https://www.droneregulations.info/>
- [60] Specific Operation Risk Assessment (SORA), 2019
<https://www.eurocockpit.be/positions-publications/specific-operations-risk-assessment-sora>
- [61] Impact tests prove large aircraft won't always win in collision with small drones, 2018
<https://udayton.edu/udri/news/18-09-13-risk-in-the-sky.php>
- [62] I dati “record” 2019: più di 10mila missioni di soccorso in montagna, 2020
<https://www.cnsas.it/2020/04/06/i-dati-record-2019-piu-di-10mila-missioni-di-soccorso-in-montagna/>
- [63] HEMS Association - Helicopter Emergency Medical Service
<https://www.hems-association.com/>
- [64] FAA: General Aviation and Part 135 Activity Survey, Chapter I, Chapter II
https://www.faa.gov/data_research/aviation_data_statistics/general_aviation/CY2019/
- [65] Ministero della Salute: I mezzi di soccorso
https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?id=1100&area=118%20Pronto%20Soccorso&menu=vuoto
- [66] Ministero della Salute: Emergenza sanitaria Territoriale
<https://www.salute.gov.it/portale/lea/dettaglioContenutiLea.jsp?lingua=italiano&id=4698&area=Lea&menu=distrettuale>

[68] Open Street Map
<https://www.openstreetmap.org/>

Appendice A

Sono di seguito riportati i risultati numerici ottenuti nel corso dei test descritti al Capitolo 5, divisi in base alla variabile modificata.

Effetto della quota di volo

DJI MAVIC MINI 2 - 120m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	p_VC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	p_HC
120	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - 120m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	p_VC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	p_HC
120	1	2.78E-08	6.06E-08	8.38E-10	6.82E-09	1.96E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - 120m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	p_VC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	p_HC
120	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.93E-09	2.27E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO - 120m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	/	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	p_VC
120	/	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	p_HC
120	/	2.66E-08	6.73E-08	1.10E-09	6.75E-09	2.19E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - 120m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	p_VC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	p_HC
120	3	3.36E-08	8.35E-08	1.42E-09	9.85E-09	2.62E-08	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2 - 200m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
200	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	p_VC
200	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	p_HC
200	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - 200m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
200	1	1.73E-02	2.17E-02	1.47E-01	1.08E-02	2.80E-02	p_VC
200	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	p_HC
200	1	2.79E-08	6.06E-08	8.39E-10	6.82E-09	1.96E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - 200m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
200	2	1.92E-02	2.57E-02	1.71E-01	1.25E-02	3.26E-02	p_VC
200	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	p_HC
200	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.94E-09	2.27E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO - 200m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
200	/	2.91E-02	3.28E-02	3.03E-01	1.82E-02	4.22E-02	p_VC
200	/	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	p_HC
200	/	4.46E-08	8.71E-08	1.97E-09	1.13E-08	2.84E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - 200m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
200	3	2.43E-02	3.38E-02	2.28E-01	1.72E-02	4.20E-02	p_VC
200	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	p_HC
200	3	3.64E-08	8.83E-08	1.67E-09	1.06E-08	2.78E-08	p_MAC
DJI MAVIC MINI 2 - 60m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
60	0	1.61E-02	1.77E-02	9.51E-02	9.89E-03	2.28E-02	p_VC
60	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	p_HC
60	0	2.60E-08	4.98E-08	5.09E-10	6.26E-09	1.60E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - 60m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
60	1	1.49E-02	1.71E-02	8.40E-02	9.30E-03	2.18E-02	p_VC
60	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	p_HC
60	1	2.39E-08	4.77E-08	4.81E-10	5.89E-09	1.53E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - 60m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
60	2	1.46E-02	1.73E-02	7.59E-02	9.61E-03	2.17E-02	p_VC
60	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	p_HC
60	2	2.31E-08	4.77E-08	4.74E-10	6.08E-09	1.51E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO - 60m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
60	/	8.52E-03	9.67E-03	4.20E-02	5.38E-03	1.23E-02	p_VC
60	/	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	p_HC
60	/	1.30E-08	2.57E-08	2.74E-10	3.34E-09	8.25E-09	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - 60m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
60	3	1.09E-02	1.24E-02	4.48E-02	7.78E-03	1.52E-02	p_VC
60	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	p_HC
60	3	1.63E-08	3.24E-08	3.28E-10	4.81E-09	1.00E-08	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2 - 45m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
45	0	1.37E-02	1.37E-02	5.27E-02	8.44E-03	1.75E-02	p_VC
45	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	p_HC
45	0	2.21E-08	3.85E-08	2.82E-10	5.34E-09	1.23E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - 45m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
45	1	1.16E-02	1.18E-02	4.19E-02	7.31E-03	1.49E-02	p_VC
45	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	p_HC
45	1	1.87E-08	3.28E-08	2.40E-10	4.62E-09	1.04E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - 45m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
45	2	1.02E-02	1.04E-02	3.27E-02	6.78E-03	1.30E-02	p_VC
45	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	p_HC
45	2	1.62E-08	2.89E-08	2.05E-10	4.29E-09	9.03E-09	p_MAC
PARROT DISCO PRO - 45m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
45	/	6.31E-03	6.12E-03	2.06E-02	4.00E-03	7.71E-03	p_VC
45	/	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	p_HC
45	/	9.66E-09	1.62E-08	1.34E-10	2.48E-09	5.19E-09	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - 45m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
45	3	7.06E-03	6.80E-03	1.84E-02	5.08E-03	8.23E-03	p_VC
45	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	p_HC
45	3	1.06E-08	1.77E-08	1.34E-10	3.15E-09	5.45E-09	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2 - 25m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
25	0	6.97E-03	5.38E-03	0.00E+00	4.40E-03	6.67E-03	p_VC
25	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	p_HC
25	0	1.13E-08	1.51E-08	0.00E+00	2.78E-09	4.71E-09	p_MAC
HUBSAN ZINO - 45m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
25	1	5.56E-03	4.24E-03	0.00E+00	3.56E-03	5.24E-03	p_VC
25	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	p_HC
25	1	8.93E-09	1.18E-08	0.00E+00	2.25E-09	3.67E-09	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - 35m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
25	2	4.05E-03	3.04E-03	0.00E+00	2.74E-03	3.69E-03	p_VC
25	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	p_HC
25	2	6.44E-09	8.40E-09	0.00E+00	1.74E-09	2.57E-09	p_MAC
PARROT DISCO PRO - 25m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
25	/	3.37E-03	2.49E-03	0.00E+00	2.17E-03	3.07E-03	p_VC
25	/	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	p_HC
25	/	5.15E-09	6.59E-09	0.00E+00	1.35E-09	2.07E-09	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - 25m							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
25	3	2.89E-03	2.03E-03	0.00E+00	2.11E-03	2.41E-03	p_VC
25	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	p_HC
25	3	4.33E-09	5.30E-09	0.00E+00	1.31E-09	1.59E-09	p_MAC

Effetto del traffico GA

DJI MAVIC MINI 2- GA Traffic 1.5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	p_VC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	p_HC
120	0	4.11E-08	8.16E-08	1.02E-09	9.86E-09	2.64E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO- GA Traffic 1.5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	p_VC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	p_HC
120	1	4.18E-08	9.09E-08	1.26E-09	1.02E-08	2.94E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+- GA Traffic 1.5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	p_VC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	p_HC
120	2	4.56E-08	1.06E-07	1.60E-09	1.19E-08	3.40E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO- GA Traffic 1.5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	/	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	p_VC
120	/	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	p_HC
120	/	3.98E-08	1.01E-07	1.65E-09	1.01E-08	3.28E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO- GA Traffic 1.5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	p_VC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	p_HC
120	3	5.04E-08	1.25E-07	2.12E-09	1.48E-08	3.93E-08	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2- GA Traffic 2x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	p_VC
120	0	1.46E-07	1.34E-07	7.38E-09	5.27E-08	3.53E-07	p_HC
120	0	6.57E-08	1.31E-07	1.63E-09	1.58E-08	4.23E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO- GA Traffic 2x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	p_VC
120	1	1.45E-07	1.33E-07	7.90E-09	5.27E-08	3.51E-07	p_HC
120	1	6.68E-08	1.45E-07	2.01E-09	1.64E-08	4.71E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+- GA Traffic 2x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	p_VC
120	2	1.43E-07	1.32E-07	8.62E-09	5.27E-08	3.48E-07	p_HC
120	2	7.30E-08	1.70E-07	2.56E-09	1.90E-08	5.45E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO- GA Traffic 2x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	/	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	p_VC
120	/	1.38E-07	1.26E-07	8.99E-09	5.17E-08	3.37E-07	p_HC
120	/	6.37E-08	1.61E-07	2.64E-09	1.62E-08	5.25E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO- GA Traffic 2x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	p_VC
120	3	1.35E-07	1.24E-07	1.01E-08	5.16E-08	3.31E-07	p_HC
120	3	8.07E-08	2.00E-07	3.40E-09	2.36E-08	6.29E-08	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2- GA Traffic 3x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	p_VC
120	0	1.58E-07	1.45E-07	7.99E-09	5.71E-08	3.82E-07	p_HC
120	0	1.07E-07	2.12E-07	2.65E-09	2.56E-08	6.88E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO- GA Traffic 3x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	p_VC
120	1	1.57E-07	1.44E-07	8.56E-09	5.71E-08	3.80E-07	p_HC
120	1	1.09E-07	2.36E-07	3.27E-09	2.66E-08	7.65E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+- GA Traffic 3x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	p_VC
120	2	1.55E-07	1.43E-07	9.34E-09	5.71E-08	3.77E-07	p_HC
120	2	1.19E-07	2.77E-07	4.15E-09	3.09E-08	8.85E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO- GA Traffic 3x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	/	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	p_VC
120	/	1.49E-07	1.37E-07	9.74E-09	5.60E-08	3.65E-07	p_HC
120	/	1.04E-07	2.62E-07	4.29E-09	2.63E-08	8.53E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO- GA Traffic 3x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	p_VC
120	3	1.46E-07	1.35E-07	1.09E-08	5.59E-08	3.58E-07	p_HC
120	3	1.31E-07	3.26E-07	5.52E-09	3.84E-08	1.02E-07	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2- GA Traffic 5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	p_VC
120	0	1.82E-07	1.67E-07	9.22E-09	6.59E-08	4.41E-07	p_HC
120	0	2.05E-07	4.08E-07	5.09E-09	4.93E-08	1.32E-07	p_MAC
HUBSAN ZINO- GA Traffic 5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	p_VC
120	1	1.81E-07	1.66E-07	9.87E-09	6.59E-08	4.38E-07	p_HC
120	1	2.09E-07	4.55E-07	6.28E-09	5.11E-08	1.47E-07	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+- GA Traffic 5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	p_VC
120	2	1.79E-07	1.65E-07	1.08E-08	6.59E-08	4.35E-07	p_HC
120	2	2.28E-07	5.32E-07	7.99E-09	5.95E-08	1.70E-07	p_MAC
PARROT DISCO PRO- GA Traffic 5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	/	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	p_VC
120	/	1.72E-07	1.58E-07	1.12E-08	6.46E-08	4.21E-07	p_HC
120	/	1.99E-07	5.04E-07	8.25E-09	5.06E-08	1.64E-07	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO- GA Traffic 5x							
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	p_VC
120	3	1.69E-07	1.55E-07	1.26E-08	6.45E-08	4.13E-07	p_HC
120	3	2.52E-07	6.26E-07	1.06E-08	7.38E-08	1.97E-07	p_MAC

Effetto del traffico UAS

DJI MAVIC MINI 2 - TRAFFICO UAS								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	3.47E-03	p_HC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	3.19E-10	p_VC
120	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	1.50E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - TRAFFICO UAS								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	4.09E-03	p_HC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	3.29E-10	p_VC
120	1	2.78E-08	6.06E-08	8.38E-10	6.82E-09	1.96E-08	1.82E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - TRAFFICO UAS								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	6.58E-03	p_HC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	3.70E-10	p_VC
120	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.93E-09	2.27E-08	3.30E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO - TRAFFICO UAS								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	4	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	3.41E-03	p_HC
120	4	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	5.78E-10	p_VC
120	4	2.66E-08	6.73E-08	1.10E-09	6.75E-09	2.19E-08	2.68E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - TRAFFICO UAS								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	9.57E-03	p_HC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	9.01E-10	p_VC
120	3	3.36E-08	8.35E-08	1.42E-09	9.85E-09	2.62E-08	1.17E-07	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2 - TRAFFICO UAS 2x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	3.47E-03	p_HC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	3.83E-10	p_VC
120	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	3.60E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - TRAFFICO UAS 2x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	4.09E-03	p_HC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	3.94E-10	p_VC
120	1	2.78E-08	6.06E-08	8.38E-10	6.82E-09	1.96E-08	4.37E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - TRAFFICO UAS 2x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	6.58E-03	p_HC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	4.44E-10	p_VC
120	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.93E-09	2.27E-08	7.93E-08	p_MAC
PARROT DISCO PRO - TRAFFICO UAS 2x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	4	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	3.41E-03	p_HC
120	4	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	6.94E-10	p_VC
120	4	2.66E-08	6.73E-08	1.10E-09	6.75E-09	2.19E-08	6.42E-08	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - TRAFFICO UAS 2x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	9.57E-03	p_HC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	1.08E-09	p_VC
120	3	3.36E-08	8.35E-08	1.42E-09	9.85E-09	2.62E-08	2.81E-07	p_MAC
DJI MAVIC MINI 2 - TRAFFICO UAS 3x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	3.47E-03	p_HC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	4.15E-10	p_VC
120	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	5.85E-08	p_MAC
HUBSAN ZINO - TRAFFICO UAS 3x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	4.09E-03	p_HC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	4.27E-10	p_VC
120	1	2.78E-08	6.06E-08	8.38E-10	6.82E-09	1.96E-08	7.11E-08	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - TRAFFICO UAS 3x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	6.58E-03	p_HC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	4.81E-10	p_VC
120	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.93E-09	2.27E-08	1.29E-07	p_MAC
PARROT DISCO PRO - TRAFFICO UAS 3x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	4	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	3.41E-03	p_HC
120	4	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	7.52E-10	p_VC
120	4	2.66E-08	6.73E-08	1.10E-09	6.75E-09	2.19E-08	1.04E-07	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - TRAFFICO UAS 3x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	9.57E-03	p_HC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	1.17E-09	p_VC
120	3	3.36E-08	8.35E-08	1.42E-09	9.85E-09	2.62E-08	4.56E-07	p_MAC

DJI MAVIC MINI 2 - TRAFFICO UAS 5x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	3.47E-03	p_HC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	4.78E-10	p_VC
120	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	1.13E-07	p_MAC
HUBSAN ZINO - TRAFFICO UAS 5x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	4.09E-03	p_HC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	4.93E-10	p_VC
120	1	2.78E-08	6.06E-08	8.38E-10	6.82E-09	1.96E-08	1.37E-07	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - TRAFFICO UAS 5x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	6.58E-03	p_HC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	5.55E-10	p_VC
120	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.93E-09	2.27E-08	2.48E-07	p_MAC
PARROT DISCO PRO - TRAFFICO UAS 5x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	4	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	3.41E-03	p_HC
120	4	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	8.68E-10	p_VC
120	4	2.66E-08	6.73E-08	1.10E-09	6.75E-09	2.19E-08	2.01E-07	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - TRAFFICO UAS 5x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	9.57E-03	p_HC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	1.35E-09	p_VC
120	3	3.36E-08	8.35E-08	1.42E-09	9.85E-09	2.62E-08	8.77E-07	p_MAC
DJI MAVIC MINI 2 - TRAFFICO UAS 10x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	0	1.69E-02	1.94E-02	1.27E-01	1.04E-02	2.50E-02	3.47E-03	p_HC
120	0	1.21E-07	1.12E-07	6.15E-09	4.39E-08	2.94E-07	6.38E-10	p_VC
120	0	2.74E-08	5.44E-08	6.79E-10	6.57E-09	1.76E-08	3.00E-07	p_MAC
HUBSAN ZINO - TRAFFICO UAS 10x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	1	1.73E-02	2.17E-02	1.46E-01	1.08E-02	2.79E-02	4.09E-03	p_HC
120	1	1.21E-07	1.11E-07	6.58E-09	4.39E-08	2.92E-07	6.57E-10	p_VC
120	1	2.78E-08	6.06E-08	8.38E-10	6.82E-09	1.96E-08	3.64E-07	p_MAC
YUNEEC TYPHOON H+ - TRAFFICO UAS 10x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	2	1.91E-02	2.57E-02	1.70E-01	1.25E-02	3.26E-02	6.58E-03	p_HC
120	2	1.19E-07	1.10E-07	7.19E-09	4.40E-08	2.90E-07	7.40E-10	p_VC
120	2	3.04E-08	7.10E-08	1.07E-09	7.93E-09	2.27E-08	6.61E-07	p_MAC
PARROT DISCO PRO - TRAFFICO UAS 10x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	4	1.74E-02	2.53E-02	1.69E-01	1.09E-02	3.25E-02	3.41E-03	p_HC
120	4	1.15E-07	1.05E-07	7.49E-09	4.31E-08	2.81E-07	1.16E-09	p_VC
120	4	2.66E-08	6.73E-08	1.10E-09	6.75E-09	2.19E-08	5.35E-07	p_MAC
DJI MATRICE 600 PRO - TRAFFICO UAS 10x								
z_max	UAV	Fix.Wing	Rotorcraft	Baloon	Glider	HEMS	UAS	
120	3	2.24E-02	3.20E-02	1.93E-01	1.59E-02	3.96E-02	9.57E-03	p_HC
120	3	1.13E-07	1.04E-07	8.41E-09	4.30E-08	2.76E-07	1.80E-09	p_VC
120	3	3.36E-08	8.35E-08	1.42E-09	9.85E-09	2.62E-08	2.34E-06	p_MAC

Appendice B

Di seguito viene mostrato il codice, in linguaggio C++, utilizzato per l'implementazione del modello di calcolo descritto nel Capitolo 4. È inizialmente mostrato il file *main* e successivamente tutte le funzioni che vi sono richiamate all'interno.

```
1 #include <iostream>
2 #include <cmath>
3 #include <cstring>
4 #include <fstream>
5
6 #include "mainLib.h"
7
8 using namespace std;
9 GAdata GA;
10 UAdata UA;
11
12 int main()
13 {
14     //-----
15     // AIR RISK MODEL La Cour-Harbo
16     //-----
17     // Definizione di una frequenza di collisione come prodotto da termini
18     // p_MAC=p_HC p_VC lambda STM=
19     //-----
20
21     // Struttura del codice a livelli:
22     // ogni funzione calcola un termine, i risultati vengono poi combinati
23
24     FILE *fp;
25
26     double p_MAC[6];
27     double p_HC[6];
28     double p_VC[6];
29     double TOT_RATE=0;
30     double type_number=6; // numero di velivoli GA considerati
31
32     double z_max=120; // [m]
33     double G=302073000000; // [m^2] Superficie di riferimento (Italia) (Danimarca):43100000000;
34     //double time_conv=3600.00/8766; // fattore di conversione da [ore/anno] a [sec/ore]
35
36
37     //Caratteristiche UA
38     int UA_category=4; //identifica la categoria C di drone (e di conseguenza il modello)
39     double sum_UA=0;
40     double scale_UA=1;
41
42     if(UA_Definition(UA_category) != 0){ //Inizializzazione parametri UA
43         cout<<"ERRORE nella definizione dei parametri del drone "<<endl;
44         return DEFINITION_ERROR;
45     };
46
47     if(UA.distrib_type=='n'){
48         for(int j=0;j<120+1;j++){
49             sum_UA+=DistribFunction(j,UA.sigma,UA.nom,scale_UA,UA.distrib_type)+DistribFunction(j+1,UA.sigma,UA.nom,scale_UA,UA.distrib_type)*0.5;
50         }
51         scale_UA=1/sum_UA;
52     }
53
54     fp=fopen("OutputData\\Risultati.txt", "w");
55     fprintf(fp,"%s_max UAV Fix.Wing Rotorscraft Baloon Glider HEMS UAS \n");
56
57     for(int i=0;i<type_number;i++){
58
59         double sum_GA=0;
60         double scale_GA=1;
61
62         if(GA_Definition(i,120) != 0){ //Inizializzazione parametri GA
63             cout<<"ERRORE nella definizione dei parametri del velivolo pilotato "<<endl;
64             return DEFINITION_ERROR;
65         };
66
67         if(GA.distrib_type=='n'){
68             for(int j=0;j<120+1;j++){
69                 sum_GA+=DistribFunction(j,GA.sigma,GA.nom,scale_GA,GA.distrib_type)+DistribFunction(j+1,GA.sigma,GA.nom,scale_GA,GA.distrib_type)*0.5;
70             }
71             scale_GA=1/sum_GA;
72         }
73
74         //Probabilità orizzontale
75         p_HC[i]=HorizontalProb(GA.r, UA.r, GA.I, UA.v, GA.v, G);
76
77         //Probabilità Verticale
78         p_VC[i]=VerticalProb(z_max, GA.h, UA.h,
79             UA.sigma, UA.nom, scale_UA, UA.distrib_type,
80             GA.sigma, GA.nom, scale_GA, GA.distrib_type);
81
82         /**Probabilità del GA di essere sotto la quota di riferimento
83         pbelow=0.01;*/
84
85         /**Fallito alligatore
86         lambdaSTM=0.2;*/
87
88         p_MAC[i]=GA.n*p_HC[i]*p_VC[i]*GA.pbelow*GA.lambdaSTM[0];
89
90         TOT_RATE=TOT_RATE + p_MAC[i];
91
92     }
93
94     fprintf(fp,"% .2lf %i % .4e % .4e % .4e % .4e % .4e % .4e \n",z_max,UA_category,p_VC[0],p_VC[1],p_VC[2],p_VC[3], p_VC[4],p_VC[5]);
95     fprintf(fp,"% .2lf %i % .4e % .4e % .4e % .4e % .4e % .4e \n",z_max,UA_category,p_HC[0],p_HC[1],p_HC[2],p_HC[3], p_HC[4],p_HC[5]);
96     fprintf(fp,"% .2lf %i % .4e % .4e % .4e % .4e % .4e % .4e \n",z_max,UA_category,p_MAC[0],p_MAC[1],p_MAC[2],p_MAC[3], p_MAC[4],p_MAC[5]);
97     fclose(fp);
98     return 0;
99 }
```

```

1  #ifndef MAINLIB_H_INCLUDED
2  #define MAINLIB_H_INCLUDED
3
4
5  //-----
6  // Constanti Utili
7  //-----
8
9  #define pi 3.14159265
10 #define DEFINITION_ERROR 1
11 #define READ_ERROR 2
12 |
13 //-----
14 // Gas Parameters
15 //-----
16
17 typedef struct{
18     double h;           //[m]
19     double r;           //[m]
20     double v;           //[m/s]
21     double T;           //[ore/anno]
22     double n;           //[Numero di velivoli nell'area considerata]
23     double sigma;       //[Deviazioni standard distribuzione normale]
24     double nom;         //[Valore nominale distrib normale]
25     double pbelow;     //[Probabilità di trovarsi sotto la z_max]
26     double lambdaSTM[1]; //Fattore mitigativo
27     char distrib_type;  //[Determina il tipo di distribuzione sotto la quota z_max]
28 }GAdata;
29
30
31
32 typedef struct{
33     double h;           //[m]
34     double r;           //[m]
35     double v;           //[m/s]
36     double MTOW;        //[Kg]
37     double sigma;       //[Deviazioni standard distribuzione normale]
38     double nom;         //[Valore nominale distrib normale]
39     char distrib_type;  //[Determina il tipo di distribuzione sotto la quota z_max]
40 }UAdata;
41
42
43
44 extern GAdata GA;
45 extern UAdata UA;
46
47 //-----
48 // Funzioni Matematiche
49 //-----
50
51 double DistribFunction(double x, double sigma, double nom, double scale, char type);
52 double Cumulative(double x, double sigma, double nom, double scale, char type);
53
54 //-----
55 // Funzioni per il calcolo dei termini di probabilità
56 //-----
57
58 double HorizontalProb(double r_GA, double r_UA, double T, double v_UA,
59                     double v_GA, double G);
60 // quantifica la probabilità che i due velivoli abbiano traiettorie
61 // che si intersecano orizzontalmente
62
63 double VerticalProb(double z_max, double h_GA, double h_UA,
64                   double sigma_UA, double nom_UA, double scale_UA, char type_UA,
65                   double sigma_GA, double nom_GA, double scale_GA, char type_GA);
66 // quantifica la probabilità che i due velivoli abbiano traiettorie
67 // che si intersecano verticalmente
68
69 int GA_Definition(int model, double z_max); // Funzione per la definizione dei parametri
70 // relativi ai diversi velivoli con pilota (GA)
71
72 int UA_Definition(int model); // Funzione per la definizione dei parametri
73 // relativi ai diversi droni (UA)
74
75
76 #endif // MAINLIB_H_INCLUDED

```

```

1 | #include <iostream>
2 | #include <cmath>
3 | #include <cstring>
4 | #include "../mainLib.h"
5 |
6 | using namespace std;
7 |
8 |
9 | int GA_Definition( int model, double z_max)
10 | {
11 |
12 | //IMPORTANTE!!
13 | //Nel caso di distribuzione uniforme le variabili SIGMA e NOM
14 | //ASSUMONO il seguente significato:
15 | // SIGMA ----> estremo di destra dell'intervallo considerato
16 | // NOM ----> estremo di sinistra
17 |
18 | switch(model)
19 | {
20 |
21 | //-----
22 | case 0: // Fixed wings
23 | GA.h=2;
24 | GA.r=6;
25 | GA.v=75;
26 | GA.T=100;
27 | GA.n=13314;
28 | GA.sigma=z_max;
29 | GA.nom=0;
30 | GA.pbelow=0.001;
31 | GA.lambdaSTM[0]=1;
32 | GA.distrib_type='u';
33 | break;
34 | //-----
35 | case 1: // Rotocraft (HEMS helicopters not included)
36 | GA.h=3;
37 | GA.r=5;
38 | GA.v=56;
39 | GA.T=147;
40 | GA.n=504;
41 | GA.sigma=50; //50
42 | GA.nom=80; // 80
43 | GA.pbelow=0.05;
44 | GA.lambdaSTM[0]=1;
45 | GA.distrib_type='n';
46 | break;
47 | //-----

```

```

48 | case 2: // Ballons
49 | GA.h=25;
50 | GA.r=9.5;
51 | GA.v=10;
52 | GA.T=17;
53 | GA.n=87;
54 | GA.sigma=60; //60
55 | GA.nom=100; //100
56 | GA.pbelow=0.01;
57 | GA.lambdaSTM[0]=1;
58 | GA.distrib_type='n';
59 | break;
60 | //-----
61 | case 3: //Gliders
62 | GA.h=1.2;
63 | GA.r=10;
64 | GA.v=50;
65 | GA.T=32;
66 | GA.n=144;
67 | GA.sigma=z_max;
68 | GA.nom=0;
69 | GA.pbelow=0.1;
70 | GA.lambdaSTM[0]=1;
71 | GA.distrib_type='u';
72 | break;
73 | //-----
74 | case 4: //HEMS helicopters
75 | GA.h=3.9;
76 | GA.r=7.2;
77 | GA.v=75.4;
78 | GA.T=200;
79 | GA.n=48;
80 | GA.sigma=50; //50
81 | GA.nom=80; //80
82 | GA.pbelow=0.05;
83 | GA.lambdaSTM[0]=1;
84 | GA.distrib_type='n';
85 | break;
86 | //-----
87 | case 5: //UAS
88 | GA.h=0.29;
89 | GA.r=0.39;
90 | GA.v=13.6;
91 | GA.T=21;
92 | GA.n=13566;
93 | GA.sigma=30;
94 | GA.nom=50;
95 | GA.pbelow=1;
96 | GA.lambdaSTM[0]=1;
97 | GA.distrib_type='n';
98 | break;

```

```

1 | #include <iostream>
2 | #include <cmath>
3 | #include <cstring>
4 |
5 | #include "../mainLib.h"
6 |
7 | using namespace std;
8 |
9 |
10 | int UA_Definition( int model)
11 | {
12 |
13 | //IMPORTANTE!!
14 | //Nel caso di distribuzione uniforme le variabili SIGMA e NOM
15 | //ASSUMONO il seguente significato:
16 | // SIGMA ----> estremo di destra dell'intervallo considerato
17 | // NOM ----> estremo di sinistra
18 |
19 | FILE *fp;
20 |
21 | switch(model)
22 | {
23 |
24 | //-----
25 | case 0: //CATEGORIA C1 -- DJI_NAVIC_MINI_2
26 | fp = fopen("UA_Data\\DJI_Navic_Mini_2.txt", "r");
27 |
28 | if(fp == NULL)
29 | { cout<<"Errore nell'apertura del file.txt"<<endl;
30 | return(READ_ERROR);
31 | }
32 |
33 | break;
34 |
35 | case 1: //CATEGORIA C1 -- HUBSAN_ZINO
36 | fp = fopen("UA_Data\\Hubsan_Zino.txt", "r");
37 |
38 | if(fp == NULL)
39 | { cout<<"Errore nell'apertura del file.txt"<<endl;
40 | return(READ_ERROR);
41 | }
42 |
43 | break;
44 |
45 | case 2: //CATEGORIA C2 -- YUNEEC_TYPHON_H+
46 | fp = fopen("UA_Data\\YuneeC_Typhoon_H+.txt", "r");
47 |
48 | if(fp == NULL)
49 | { cout<<"Errore nell'apertura del file.txt"<<endl;
50 | return(READ_ERROR);
51 | }
52 |
53 |

```

```

54 | }
55 |
56 | break;
57 |
58 | case 3: //CATEGORIA C3 -- DJI_MATRICE_600Pro
59 | fp = fopen("UA_Data\\DJI_Matrice_600Pro.txt", "r");
60 |
61 | if(fp == NULL)
62 | { cout<<"Errore nell'apertura del file.txt"<<endl;
63 | return(READ_ERROR);
64 | }
65 |
66 |
67 | break;
68 |
69 | case 4: //ALA FISSA -- FARROT DISCO PRO
70 | fp = fopen("UA_Data\\Parrot_Disco_Pro.txt", "r");
71 |
72 | if(fp == NULL)
73 | { cout<<"Errore nell'apertura del file.txt"<<endl;
74 | return(READ_ERROR);
75 | }
76 |
77 |
78 | break;
79 | } //CHIUSURA SWITCH
80 |
81 | fscanf(fp, "%lf %*[\n]\n", &UA.h);
82 | fscanf(fp, "%lf %*[\n]\n", &UA.r);
83 | fscanf(fp, "%lf %*[\n]\n", &UA.v);
84 | fscanf(fp, "%lf %*[\n]\n", &UA.MIOW);
85 | fscanf(fp, "%c %*[\n]\n", &UA.distrib_type);
86 | fscanf(fp, "%lf %*[\n]\n", &UA.nom);
87 | fscanf(fp, "%lf %*[\n]\n", &UA.sigma);
88 |
89 | fclose(fp);
90 | return 0;
91 | }

```



```

1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <cstring>
4
5  #include "../mainLib.h"
6
7  using namespace std;
8
9
10 double VerticalProb(double z_max, double h_GA, double h_UA,
11                   double sigma_UA, double nom_UA, double scale_UA, char type_UA,
12                   double sigma_GA, double nom_GA, double scale_GA, char type_GA)
13 {
14     //implementazione metodo dei tentativi per risoluzione iterativa
15
16     double step; //quota minima, massima e step
17     double beta;
18     double pVC=0;
19
20     step=0.001;
21     beta=0;
22
23     while(beta < z_max+1){
24
25         if (((beta+step)-((h_GA+h_UA)/2)) > 0 && (beta -((h_GA+h_UA)/2)) > 0 && (beta+((h_GA+h_UA)/2)) < z_max && ((beta+step)+((h_GA+h_UA)/2)) < z_max){
26
27
28             pVC = pVC + ((DistribFunction(beta,sigma_UA,nom_UA,scale_UA,type_UA)*(Cumulative(beta+((h_GA+h_UA)/2),sigma_GA, nom_GA,scale_GA, type_GA)-
29                               Cumulative(beta-((h_GA+h_UA)/2), sigma_GA, nom_GA,scale_GA, type_GA))+
30                               DistribFunction(beta+step,sigma_UA,nom_UA,scale_UA,type_UA)*(Cumulative((beta+step)+((h_GA+h_UA)/2), sigma_GA, nom_GA,scale_GA, type_GA)-
31                               [Cumulative((beta+step)-((h_GA+h_UA)/2),sigma_GA,nom_GA,scale_GA, type_GA)]*step/2));
32
33             // f_UA ed f_GA sono rispettivamente la densità di probabilità lanciata alla quota dal drone
34             // e la cumulata della densità di probabilità lanciata al velivolo
35
36             beta = beta + step;
37
38
39         }
40
41     }
42
43     return pVC;
44 }

```

```

1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <cstring>
4
5  #include "../mainLib.h"
6
7  using namespace std;
8
9
10 double HorizontalProb(double r_GA, double r_UA, double T,
11                    double v_UA, double v_GA, double G)
12 {
13     double pHC;
14
15     pHC=(2*(r_GA*r_GA+r_UA*r_UA)*(T*3600.00/8766.00)*sqrt(v_GA*v_GA+v_UA*v_UA))/((r_GA+r_UA)*G);
16
17     return pHC;
18
19 }

```

```

1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <cstring>
4
5  #include "../mainLib.h"
6
7  using namespace std;
8
9
10 double Cumulative(double x, double sigma, double nom, double scale, char type)
11 {
12     double z=0; // argomento cumulata
13     double res=0; // (risultato) valore di distribuzione
14
15     switch(type){
16
17     case('n'):
18         z=(x-nom)/(sigma*sqrt(2));
19         res=0.5*(1+erf(z));
20         break;
21
22     case('u'):
23         if(x <= (sigma)){ //In questo modo calcolo la probabilità solo tra 0 e la quota di volo dichiarata
24             res=(x-nom)/(sigma-nom); //nom=estremo di destra intervallo //sigma=estremo di sinistra intervallo
25         }else{
26             res=0;
27         };
28         break;
29
30     }; // CHIUSURA SWITCH
31     return res*scale;
32 }

```

```

1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <cstring>
4
5  #include "../mainLib.h"
6
7  using namespace std;
8
9  double DistribFunction(double x, double sigma, double nom, double scale, char type)
10 {
11
12     double res =0;           // (risultato) valore di distribuzione
13     double z=0;             // Argomento della distribuzione
14
15     switch (type)
16     {
17
18     case ('n'):              //Distribuzione normale sull'intervallo
19
20         z=(x-nom)/sigma;
21         res=1/(sigma*sqrt(2*pi))*exp(-0.5*z*z);
22
23     break;
24
25     case ('u'):
26
27     if(x <= (sigma)){
28         res=1/(sigma-nom);    //nom=estremo di destra intervallo //sigma=estremo di sinistra intervallo
29     }else{
30         res=0;
31     };
32
33     break;
34
35     };
36     return res*scale;
37 }

```